

**Storregional grundvattenmodellering –
fördjupad analys av flödesförhållanden
i östra Småland**

Jämförelse av olika konceptuella beskrivningar

Lars O Ericsson, Lars O Ericsson Consulting AB

Johan Holmén, Golder Associates

Ingvar Rhén, Niklas Blomquist, SWECO VIAK

Maj 2006

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-06-64

Storregional grundvattenmodellering – fördjupad analys av flödesförhållanden i östra Småland

Jämförelse av olika konceptuella beskrivningar

Lars O Ericsson, Lars O Ericsson Consulting AB

Johan Holmén, Golder Associates

Ingvar Rhén, Niklas Blomquist, SWECO VIAK

Maj 2006

Förord

Vissa frågeställningar som kopplas till grundvattnets flödesstorlek och flödesmönster har bäring på hur man skall bedöma ett områdes lämplighet för slutförvaring av använt kärnbränsle. Kärnavfallsorganisationer liksom myndigheter i olika länder har under de senaste decennierna genomfört olika utredningar och modelleringar med det övergripande syftet att belysa grundvattnets omsättning inklusive in- och utströmningsförhållanden. En central referens i ämnet publicerades för tio år sedan av /Toth och Sheng 1996/: "Enhancing safety of nuclear waste disposal by exploiting regional groundwater flow: The recharge area concept. Hydrogeology Journal Vol. 4, No 4". Betydelsen av in-utströmningsförhållanden bör dock ställas i relation till, och komplettera, andra geovetenskapliga faktorer/processer som är väsentliga för den långsiktiga säkerheten av slutförvaret. I Sverige har framförallt diskuterats avfallslagrets lokaliseringaspekter när det gäller ett kustnära eller ett inlandsförlagt förvar. Ett exemplifierande urval av relativt nyligen genomförda utredningsinsatser som berör frågeställningarna är:

Voss C I, Provost A M, 2001. Recharge-area nuclear waste repository in Southeastern Sweden, Demonstration of hydrogeologic siting concepts and techniques, SKI rapport 01:44, Stockholm.

SKB, 2003. Grundvattnets regionala flödesmönster och sammansättning – betydelse för lokalisering av slutförvaret. SKB R-03-01.

Follin S, Svensson U, 2003. On the role of mesh discretisation and salinity for the occurrence of local flow cells. SKB R-03-23.

Holmén et al. 2003. Modelling of groundwater flow and flow paths for large scale regional domain in northeast Uppland. SKB R-03-24.

Mot bakgrund av regeringsbeslut kopplat till SKB:s Fud-program /SKB 2004c/ samt myndigheternas kompletterande synpunkter /SSI 2004, KASAM 2005/ har SKB föreslagits överväga /SKI 2004/ att vidare:

- ”utvärdera konceptuella förenklingar och antaganden som utnyttjas för modellering av storskaliga flödesmönster, samt utvärdera osäkerheter hos hittills erhållna modelleringsresultat”,
- ”mera förutsättningslöst och utförligt analysera de regionala flödesförhållandena i östra Småland,”.

Utöver ovanstående rapporter och referenser finns ytterligare myndighetsgranskande och kommenterande underlag som berör frågeställningen om in- och utströmning.

Denna rapport redovisar modelleringsresultat för olika konceptuella förutsättningar exemplifierade över östra Småland. Projektet har enbart syftat till ett fördjupat vetenskapligt underlag i en lokaliseringdiskussion med hänsyn till grundvattnets in- och utströmning. Eventuell lokalisering av ett förvar i någon speciell region måste bedömas av SKB med hänsyn till betydligt fler faktorer och den övergripande säkerhetsfilosofi som tillämpas.

Myndigheterna har i sin granskning av SKB:s arbeten om in- och utströmning även betonat vikten av att SKB bör:

- ”göra en systematisk genomgång av hur salta respektive söta grundvatten (med olika TDS-halter) kan påverka de tekniska barriärerna, både i perspektivet långsiktig säkerhet och för driften av slutförvaret,”
- ”redovisa de metoder som kan användas för att utvärdera hur en långsiktig utveckling av grundvattencirkulationen kan påverka salthalt på förvarsdjup i förhållande till uppmätta salthalter, samt bedöma förutsättningarna för att kunna säkerställa att salthalter håller sig inom intervall som är lämpliga för de tekniska barriärernas funktion.”

Dessa aspekter utreds i separata projekt inom ramen för säkerhetsanalysen SR-Can och har ej berörts i föreliggande projekt om storregional modellering.

Projektet har genomförts av en projektgrupp bestående av: Lars O Ericsson, Lars O Ericsson Consulting AB, Johan Holmén, Golder Associates, Ingvar Rhén, Sweco, Niklas Blomquist, Sweco och Jan-Olof Selroos, SKB. Arbetet har fortlöpande granskats av en referensgrupp: Gerhard Barmen, Lunds tekniska högskola, Johan Andersson, J A Streamflow AB och Per-Olof Johanson, Artesia Grundvattenkonsult AB. Beställarens ombud har varit Anders Ström, SKB. Projektets metodik och resultat har även diskuterats vid SKB:s arbetsgrupp för platsspecifik hydrogeologisk modellering, den s k HydroNet-gruppen.

Stockholm i maj, 2006

Lars O Ericsson

Sammanfattning

Bakgrund och syfte

En av många geovetenskapliga frågeställningar vid lokalisering av ett slutförvar för använt kärnbränsle i Sverige handlar om förståelsen för de storskaliga flödesmönstren för det grundvatten som naturligt omsätts. Grundvattnets in- och utströmning är därför föremål för såväl SKB:s utredningsverksamhet som de granskande myndigheternas intresse.

Denna rapport avser att ge ett fördjupat vetenskapligt underlag beträffande grundvattnets flödesmönster mot bakgrund av de kriterier och lämplighetsindikatorer som SKB tidigare redovisat /Andersson et al. 2000/ med hänsyn till in- och utströmningsaspekter i ett storregionalt perspektiv.

Underlaget har tagits fram inom ramen för ett projekt vars mål har varit att:

- utvärdera konceptuella förenklingar och modellosäkerheter vid storregional grundvattenmodellering,
- genomföra en fördjupad och förutsättningslös analys av regionala flödesförhållanden i östra Småland.

Denna målformulering har inneburit ett genomförande som baseras på geovetenskapligt tillgängliga datasammanställningar från Smålandsregionen men där olika konceptuella antaganden och systembeskrivningar analyserats.

Området

Det studerade området utgörs av fem regionala avrinningsområden i östra Småland (Emån, Virån, Marströmmen samt kustområdena omkring Oskarhamn och Simpevarpshalvön). Grundvattenmodellen representerar ett mycket stort område, ca 80×130 km².

Modellområdets topografiska relief tillhör huvudsakligen delar av det sönderbrutna, delvis nederoderade subkambriska peneplanet. De västligaste delarna av modellområdet tillhör den sydsmländska urbergsslätten. Områdets högsta nivåer ligger där ca 360 m över havet. och peneplanet sluttar mot Östersjön där kambriskt täckberg uppträder vid Kalmarsund. Utmed sprickzoner i den sönderbrutna terrängen har de dominerande vattendragens dalgångar utbildats. Modellområdet ligger till stora delar över högsta kustlinjen (HK), 100 m över havet. Den helt dominerande jordarten är morän. Stråk med isälvssediment, dvs åsar, kames och deltan, löper i huvudsakligen NV/SO-lig riktning.

Berggrunden inom modellområdet domineras av bergarter som hör till det ”Transskandinaviska magmatiska bältet”. I modellområdet består bergarterna huvudsakligen av olika typer av djupbergarter, där s k Småland-Värmlandsgraniter är vanligast. Även sura ytbergarter av vulkaniskt ursprung förekommer liksom yngre djupbergarter som tillhör den s k Götemarksviten. I den västra delen av modellregionen uppträder Almesåkragruppens sedimentära bergarter och med dem associerade horisontella diabaser. Vertikala långsträckta breda (50–100 m) diabasgångar som hör till de s k Blekinge-Dalarna diabaserna uppträder med ungefärligen nord-sydlig riktning i modellområdet.

Metodik

Med hjälp av modelleringen har analyser gjorts av flödesvägar från 500 m djup, vilket motsvarar nivån för ett tänkt slutförvar för kärnavfall (använt kärnbränsle). Flödesvägarna från teoretiska förvarsområden har utretts med avseende på:

- Flödesmönster för grundvattnet som passerar förvarsdjup.
- Utflödestid (genombrottsid) från förvaret (tid för advektivt flöde från förvaret på 500 m djup till utströmningsområde).
- Flödeslängder från förvarsdjup.
- Specifika flöden vid förvarsdjup
- Salinitetsutveckling vid densitetsdrivet flöde under landhöjningsskede (för vissa konceptuella modeller).

Följande systemegenskaper som är av betydelse för grundvattenflödet har studerats:

- Lokal topografisk undulation.
- Kvantära avlagringar.
- Anisotropi i konduktivitetfältet.
- Djupavtagande konduktivitet.
- Varierande konduktivitet i olika delar av modellen beroende på olika litologiska enheter.
- Regionala vertikala deformationszoner.
- Regionala horisontella deformationszoner.
- Diabasgångar.
- Lokal heterogenitet.
- Densitetsberoende flöde och tidsberoende aspekter av det studerade systemet.

Integrerade analyser har genomförts med avseende på:

- Inströmning-utströmningssituation för respektive förvarsläge.
- Kartläggning av förvarsområden med såväl långa utflödestider som små specifika grundvattenflöden.
- Kartägning där områden med långa utflödestider och små specifika flöden kombinerats med kompletterande information om långa flödesvägar.

Utifrån olika beräkningsfall (med topografistyrda topprandvillkor) belyses i rapporten viktiga aspekter av hur olika konceptualiseringar och systemegenskaper påverkar flödesvägarna. Den systematik som har använts för att tilldela de olika beräkningsfallen olika egenskaper bygger på ett stegvis ökande av det studerade systemets komplexitet. De enklaste fallen har t ex homogena egenskaper och ingen lokal topografisk undulation (ett sluttande plan mot Östersjön), medan de mest komplexa fallen innehåller så mycket som möjligt av systemets egenskaper, t ex olika kombinationer av litologiska enheter, deformationszoner, diabasgångar, djupberoende K-värden, lokal heterogenitet, kvartära avlagringar och densitetsberoende flöde etc. Ett referensfall, Fall 5, baseras på tillgängliga, officiella databaser och utgör utgångspunkt för de gjorda jämförelserna.

Genom att jämföra hur flödesvägarna förändras för olika beräkningsfall, som representerar olika aspekter på systemegenskaperna, kan betydelsen av olika systemegenskaper, och därmed även osäkerheterna i dessa egenskaper, belysas.

För varje beräkningsfall har analyserats ett stort antal jämnt fördelade teoretiska flödesvägar (220 000 stycken) från förvarsdjup. Flödesvägarna beräknas genom simulering av virtuella

partiklar som följer grundvattenflödet. De virtuella partiklarna startas och rör sig i en flödessituation som representerar dagens flödessituation. Partiklarna rör sig i ett flödesfält som ej förändras med tiden.

Det studerade modellområdet ovanför strandlinjen har indelats i teoretiska försvarsområden (6 000 stycken) som är av storleken 1 km². Varje försvarsområde representeras av 36 stycken flödesvägar, och för varje försvarsområde har följande storheter beräknats: medianen av flödesvägarnas längder, minimivärdet av flödesvägarnas längder, medianen av genombrotts-tid och medianen av det specifika flödet vid startpunkterna.

Modeller med olika djup till modellens botten har upprättats och flödesvägar i dessa modeller har analyserats. Simuleringarna visar att de allmänna slutsatser som presenteras i denna studie inte påverkas av modelldjup, under förutsättning att detta definieras på rimliga nivåer dvs djupare än ca 2 000 m. Med hänsyn till den genomförda känslighetsanalysen valdes ett modelldjup av 2 500 m. Modellens diskretisering är vald med hänsyn till erfarenheter från tidigare modellstudier över nordöstra Uppland /Holmén et al. 2003/.

Resultat, betydelsen av olika systemegenskaper

Det stora antal simuleringar som genomförts visar att grundvattnets regionala flödesmönster från försvarsdjup kan beskrivas med flödesceller av olika storlekar. Storleken på dessa celler beror av det studerade systemets egenskaper. Inströmningsområden och utströmningsområden finns över hela det studerade modellområdet. Utströmningsområden förekommer främst i topografins lägre delar, längs med dalgångar, medan inströmningsområden förekommer på höjderna.

Det är viktigt att betona att resultaten enbart skall ses som relativa och ej som kvantifierande. En eventuell lokalisering av ett slutförvar i någon speciell region måste bedömas med hänsyn till betydligt fler faktorer och lämpligheten av en specifik plats bedömas inom ramen för en säkerhetsanalys baserad på platsspecifika data.

Topografins betydelse

Störst betydelse för det regionala flödesmönstret (från försvarsdjup) har den topografiska undulationen, dvs landskapets typiska variation med höjdområden och dalgångar. Den topografiska undulationen är av större betydelse än konduktivitetens egenskaper. Olika litologiska enheter, regionala deformationszoner, lokal heterogenitet, kvartära avlagringar etc är av mindre betydelse än topografins undulation. Detta beror på att grundvattenytan tenderar att följa topografien. Det ringa djupet till grundvattenytan i den studerade regionen orsakas av den stora potentiella grundvattenbildningen i relation till det sprickiga bergets begränsade genomsläpplighet. Detta är för övrigt typiskt för svenska förhållanden.

Konduktivitetens djupavtagande och anisotropi

De systemegenskaper som efter topografins undulation är av störst betydelse för det regionala flödesmönstret är konduktivitetens djupavtagande och anisotropi. I jämförelse med det flödesmönster som erhålls med ett homogent konduktivitetensfält fås följande förändringar i flödesmönstret då djupavtagande och anisotropi inkluderas som egenskaper i konduktivitetensfältet:

- (a) Grundvattnets flödesceller blir mindre och mer lokala då konduktivitetensfältet definieras med djupavtagande genomsläpplighet; det är främst de långa flödesvägarna som blir kortare då ett djupavtagande inkluderas.

- (b) Grundvattnets flödesceller blir större då konduktivitetssfältet definieras med en ökad genomsläpplighet i horisontalplanet (horisontal anisotropi). Det är främst de långa flödesvägarna som blir ännu längre då genomsläppligheten ökas i horisontalplanet.
- (c) Grundvattnets flödesceller blir mindre då konduktivitetssfältet definieras med en ökad genomsläpplighet i vertikalplanet (vertikal anisotropi). Flödesmönstret blir mycket lokalt om genomsläppligheten är stor i vertikalplanet.

Införandet av en generell anisotropi, definierad som en ökad horisontal genomsläpplighet, får dock inte lika stor betydelse i en modell med djupavtagande genomsläpplighet, som i en modell där genomsläppligheten är konstant med djupet. Ännu mindre betydelsefull är generell horisontal anisotropi i en komplex modell med djupavtagande genomsläpplighet och lokal heterogenitet. Om en generell horisontal anisotropi slutligen definieras som tydligt avtagande med djupet (på djup över förvarsdjup) i en modell med djupavtagande genomsläpplighet och lokal heterogenitet, så blir betydelsen av horisontal anisotropi relativt ringa för flödesvägar från förvarsdjup (ringa betydelse i jämförelse med t ex topografins betydelse).

Deformationszoner och diabasgångar

Förekomst av deformationszoner och diabasgångar kan vara av stor betydelse för det lokala flödesmönstret, men dessa strukturer är av begränsad betydelse för det storregionala flödesmönstret.

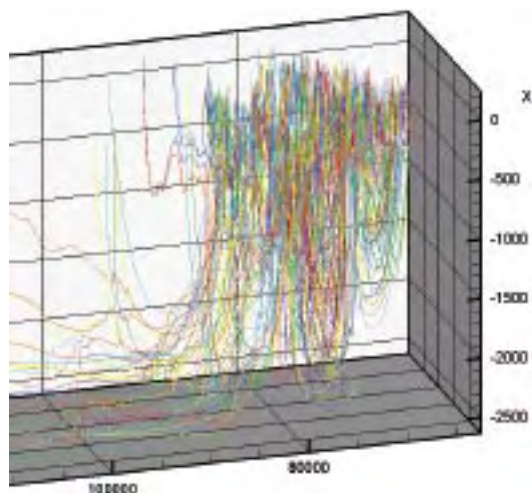
Stokastiskt genererade horisontala deformationszoner har inkluderats i ett antal fall. Dessa fall uppvisar samma allmänna flödesmönster som för referensfallet, Fall 5. Grundvattnets flödesceller är i huvudsak lokala. De inkluderade horisontala zonerna är inte tillräckligt hydrauliskt betydelsefulla för att förändra flödesmönstret i en storregional skala men kan ha stor betydelse lokalt.

Flödesmönstrets beroende av avstånd till kustlinjen

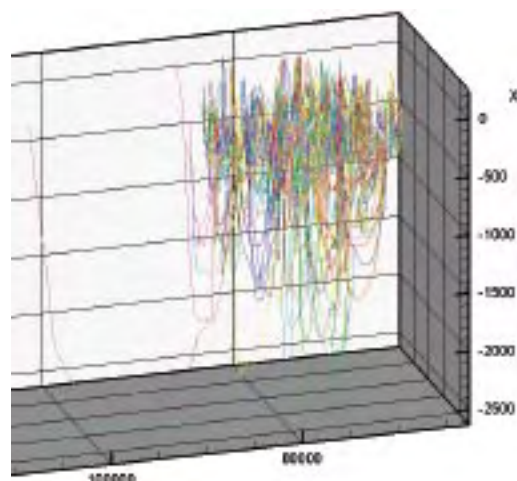
Ett beräkningsfall, Fall 5, har valts som referensfall. Detta fall inkluderar en stor grad av komplexitet och är en riklig representation av det studerade systemet. Fallet bygger på en sammanställning av tillgängliga undersökningsdata. Resultaten från denna beräkning innebär att flödesmönstren kan beskrivas som i huvudsak lokala celler. Medianlängden på flödesvägarna är 1 500 m och andelen storregionala flödesvägar är mycket liten (se nedan, figur A-1). Flödesvägarnas längder från tänkta förvar ökar inte med avståndet från strandlinjen, snarare tenderar längderna att minska med avståndet från havet. Detta beror på den mer accentuerade topografiska undulationen i modellområdets inre delar. De längsta flödesvägarna förekommer på ett avstånd av ca 20 km från strandlinjen. Korta flödesvägar förekommer på alla avstånd från strandlinjen.

Om lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde läggs till utöver referensfallets förutsättningar erhålls ett likartat flödesmönster, dvs att flödesvägarnas längder inte ökar med avståndet från strandlinjen. Andelen riktigt långa flödesvägar tenderar snarare att minska med avståndet från havet. Vidare gäller att flödesvägarnas genombrotstider inte ökar med avståndet från strandlinjen. Korta och långa genombrotstider förekommer på alla avstånd från strandlinjen.

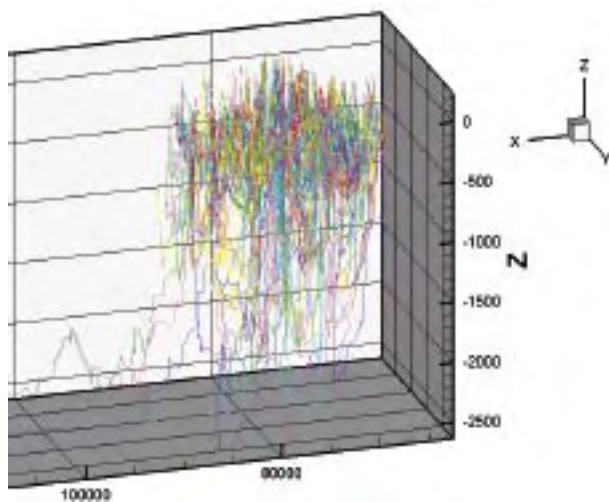
Utströmningsområden för flödesvägarna från 500 m djup förekommer mer eller mindre i hela modellområdet. Ovanför strandlinjen förekommer sådana områden främst längs med betydande topografiska lågpunkter, dalgångar, sänkor, vattendrag och sjöar. Utströmningsområden förekommer inte på lokala topografiska maxima, utan i dalgångar och sänkor runtom sådana höjder.



Konstant genomsläpplighet.



Djupavtagande genomsläpplighet
Litologiskaenheter, Deformationszoner,
Diabasgångar. (Fall 5).



Djupavtagande genomsläpplighet.
Litologiskaenheter, Deformationszoner,
Diabasgångar. Lokalheterogenitet.
Djupavtagandehorisontalanisotropi.

Figur A-1. Illustrationer av grundvattnets simulerade flödesmönster vid olika systembeskrivningar. Figurerna visar 1 000 flödesvägar initierade på 500 m djup inom ett cirkulärt område med radien 10 km (området överlappar alltså ca 300 teoretiska förvarsområden med area 1 km²). De presenterade flödesmönstren är representativa för hela det studerade modellområdet. Andelen långa flödesvägar i figurerna stämmer nära med andelen långa flödesvägar i hela modellområdet. Notera att den vertikala skalan är 12 gånger större än den horisontala skalan. Vyn ses i SV-lig riktning, dvs kustlinjen är i vänster figurkant. Notera de olika konceptualiseringarnas skilda flödesmönster.

Flödesmönster och djupet under markytan

Det beräknade grundvattenflödet avtar med djupet. För referensfallet blir medianvärdet av flödet vid ett djup av 100 m 10 Liter/(m²,år), vid förvarsdjup (500 m) är medianvärdet 0,3 Liter/(m²,år) och vid djupet 1 000 m är medianvärdet 0,06 Liter/(m²,år). Som jämförelse kan nämnas att enligt SMHI är nettonederbörden vid kusten ca 170 mm/år och vid den västra modellranden ca 310 mm/år (1 Liter/(m²,år) motsvarar 1 mm/år). Medianvärdet för det specifika flödet på förvarsdjup är alltså endast cirka en tusendel av specifika avrinningen.

Betydelse av densitetsberoende flöde

Det mesta av modellområdet (cirka två tredjedelar) är beläget ovanför tidigare högsta kustlinje (HK = 100 m över havet). På förvarsdjup är salthalterna därför ofta låga, och densitetseffekter får ringa betydelse för flödesvägar från förvarsdjup i den storregionala modellen förutom vid kusten.

Lokal heterogenitet

Lokal heterogenitet i genomsläpplighet har också inkluderats i ett antal fall. Dessa fall uppvisar samma allmänna flödesmönster som Fall 5, även om flödesvägarna (och genombrotts-tiderna) är något längre (ca 30 %), delvis beroende på att flödesvägarna blir mer "slingriga" då lokal heterogenitet inkluderas. Grundvattnets flödesceller är i huvudsak lokala eftersom den lokala heterogeniteten inte är tillräckligt betydelsefull för att förändra flödesmönstret i en storregional skala.

Andel långa flödesvägar

Andelen mycket långa flödesvägar är av intresse för frågeställningen om in- och utströmning. Flödesvägar med längder längre än 10 km har definierats som storregionala flödesvägar. Andelen sådana flödesvägar presenteras nedan. För alla de fall som presenteras nedan är topografin definierad som undulerande.

Andel storregionala flödesvägar (flödesvägar som är längre än 10 km):

- Fall 1: Homogen modell: 5,3 %
- Fall 2: Homogen modell med ökad horisontal genomsläpplighet (10 gånger): 25 %
- Fall 3: Homogen modell med ökad vertikal genomsläpplighet (10 gånger): 0,5 %
- Fall 5: **Referensfallet:** 0,6 %
- Fall 7A: Som Fall 5, men med horisontella deformationszoner: 0,8 %
- Fall 8A: Som Fall 5, men med lokal heterogenitet: 2,3 %
- Fall 8As2: Som Fall 5, men med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde: 1,7 %
- Fall 8D: Som Fall 5, men med lokal heterogenitet, densitetsberoende flöde och djupavtagande horisontal anisotropi: 3,4 %

Eftersom varje flödesväg representerar en viss area av det studerade modellområdet representerar procentsatserna ovan också andelar av modellområdets area. Därigenom erhåller vi följande slutsats: För Fall 5 (referensfallet) förekommer storregionala flödesvägar från 0,6 % av arean ovanför strandlinjen och för Fall 8As2 (referensfallet med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde) förekommer storregionala flödesvägar från 1,7 % av arean ovanför strandlinjen. Förvarsområden med mycket långa genombrotts-tider och mycket långa flödesvägar, samt små specifika flöden förekommer bara från ett fåtal förvarsområden inom modellområdet.

Resultat, integrerade analyser

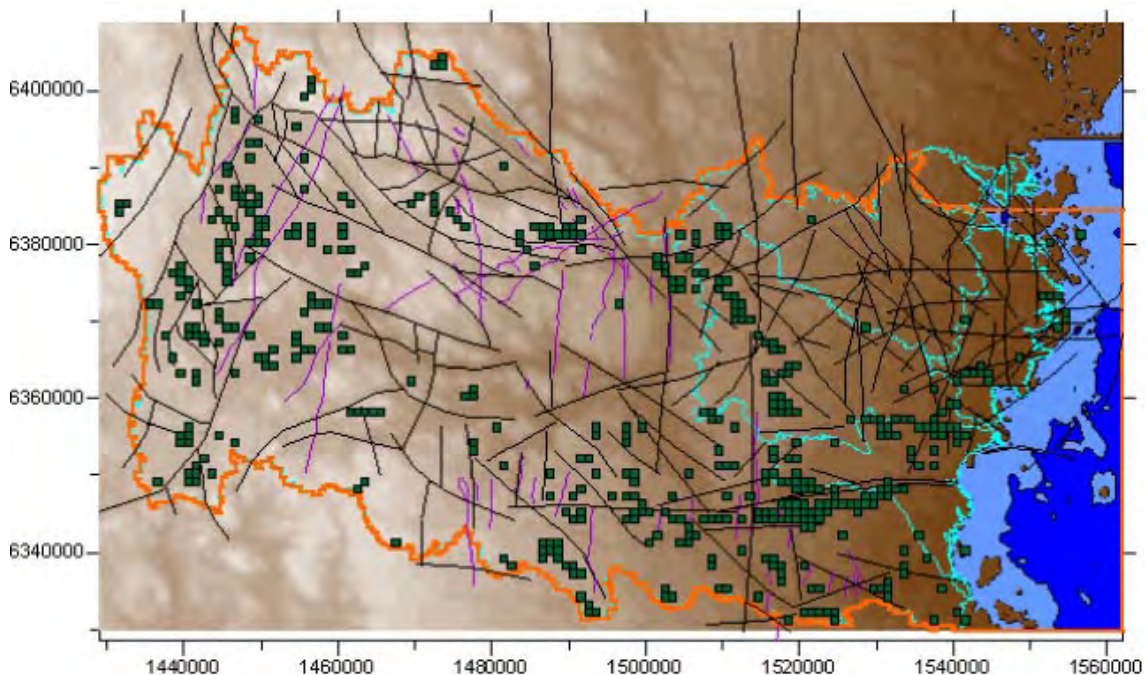
Förvarsområden med låga flöden, långa genombrotts-tider och långa flödesvägar

Genombrotts-tiderna i de upprättade modellerna representerar också transportmotståndet (även om de absoluta värdena inte är desamma). Att genombrotts-tiderna kan representera transportmotståndet beror på att porositeten förutsatts vara konstant i modellerna. Alltså är en jämförelse av förvarsområden baserad på specifika flöden och genombrotts-tider också en

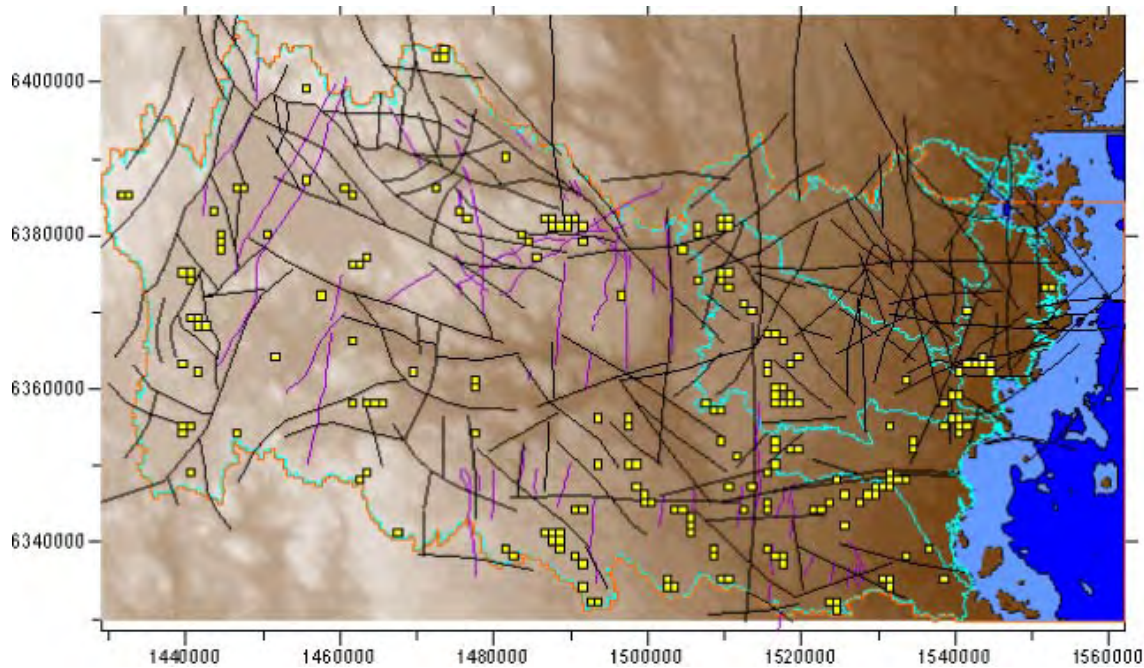
jämförelse av specifika flödet och transportmotståndet. En jämförelse av transportmotstånd är intressant eftersom transportmotståndet bestämmer hur olika nuklider fördröjs på grund av matrisdiffusion och sorption. Transportmotstånd och specifika flöden bestäms dock i hög grad av den lokala genomsläppligheten. Den kan variera avsevärt mellan olika platser. Detta har inte kunnat analyseras i denna studie eftersom detta skulle kräva platsspecifika borrhålsdata.

En sortering av alla förvarsområden med hänsyn till genombrottsid och specifikt flöde har utförts. Sorteringen baseras på snittet av de två delmängderna: (i) 1 000 områden med de längsta genombrottsiderna och (ii) 1 000 områden med de minsta specifika flödena. För t ex Fall 8As2 (referensfallet med densitetsberoende flöde och lokal heterogenitet) resulterar sorteringen i 457 förvarsområden (vilket motsvarar 8 % av alla förvarsområden), som representerar områden med relativt sett långa genombrottsider och små specifika flöden. Resultatet visas i figur A-2. Förvarsområden som har passerat denna test förekommer över hela det studerade modellområdet, förutom i områdets centrala delar där den topografiska gradienten är stor. (Stora topografiska gradienter leder ofta till flödesvägar med korta genombrottsider.)

Testen som diskuteras ovan kan utökas till att också inkludera flödesvägarnas längd. Sorteringen baseras då på snittet av de tre delmängderna: (i) 1 000 områden med de längsta genombrottsiderna, (ii) 1 000 områden med de minsta specifika flödena och (iii) 1 000 områden med de längsta flödesvägarna. För t ex Fall 8As2 (återigen referensfallet med densitetsberoende flöde och lokal heterogenitet) resulterar sorteringen i 198 förvarsområden (vilket motsvarar 3 % av alla förvarsområden). Dessa områden representerar alltså i ett relativt perspektiv områden med långa genombrottsider, små specifika flöden och långa längder. Resultatet visas i nedan i figur A-3. Förvarsområden som har passerat denna test förekommer över hela det studerade modellområdet, förutom i områdets centrala delar, och ej heller under stora sjöar eftersom flödesvägarna under sjöar ofta är korta (och uppåtriktade).



Figur A-2. Exempel på analys av förvarsområden (markerade med gröna rutor) med långa genombrottsider i kombination med små specifika flöden. Fall 8As2 (lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde).



Figur A-3. Exempel på analys av försvarsområden (markerade med gula rutor) med långa genombrottstider i kombination med små specifika flöden och långa flödesvägar. Fall 8As2 (lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde).

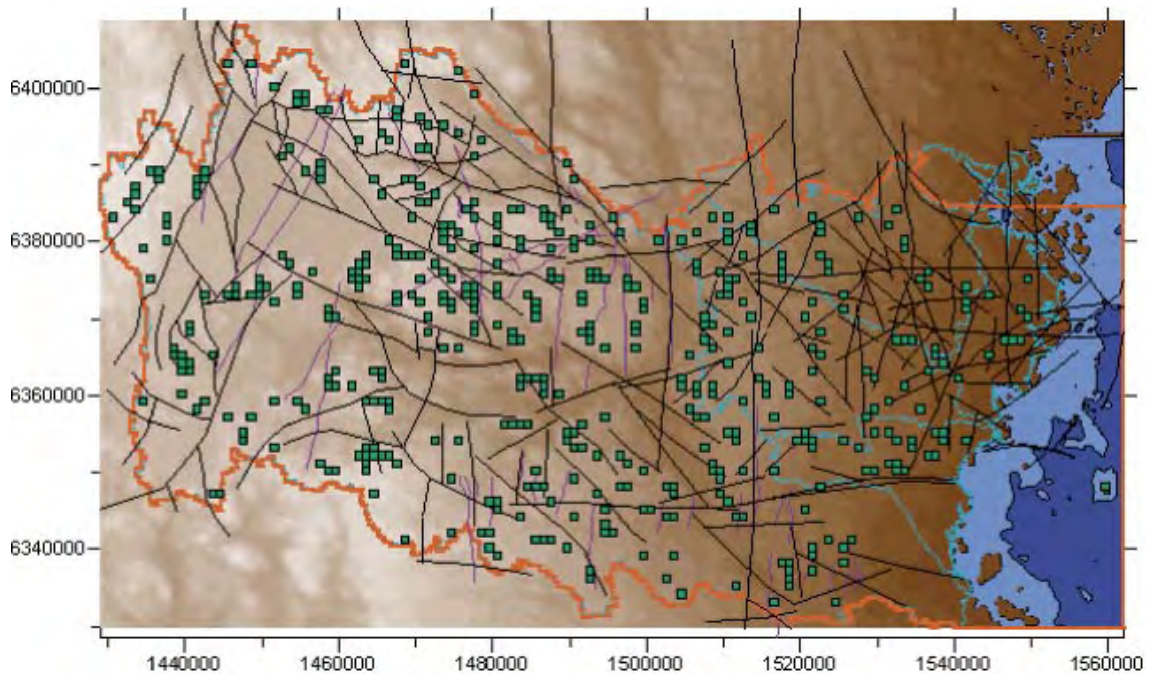
Försvarsområden med nedåtriktat grundvattenflöde

Det kan vara av intresse att särskilt analysera försvarsområden med nedåtriktade grundvattenflöden för att belysa förekomsten av inströmningsområden på försvarsdjup. Från nedåtriktade flöden förväntas nämligen följa långa flödesvägar och ofta även långa genombrottstider, även om båda dessa egenskaper också kan förekomma i områden som inte domineras av nedåtriktade flöden.

För att på ett effektivt sätt kunna analysera om ett studerat försvarsområde (dvs på försvarsdjup) är beläget i ett nedåtriktat eller uppåtriktat grundvattenflöde har införts en parameter kallad R_p . R_p kan beskrivas som mängden nedåtriktade flödesvägar i procent inom ett visst område. Höga värden på R_p representerar alltså nedåtriktade flöden. Med hjälp av R_p kan figurer tas fram som visar på förekomst av områden med nedåtriktade grundvattenflöden på försvarsdjup.

I den upprättade modellen kan förekomsten av försvarsområden med tydligt nedåtriktat grundvattenflöde variera beroende på vilka systemegenskaper som har tilldelats modellen. För att erhålla en robust bestämning av områden med nedåtriktade flöden valdes att jämföra och kombinera R_p -värden från ett stort antal olika fall. Områden med $R_p > 90\%$ för ett antal fall med mycket olika systemegenskaper jämfördes. Försvarsområden med $R_p > 90\%$ som förekommer gemensamt i alla de studerade fallen har alltså valts ut och redovisas nedan.

Ovanstående analys genomfördes för flera olika serier av beräkningsfall. Serie 2 inkluderar t ex 8 stycken olika fall med mycket olika systemegenskaper, med och utan densitetsberoende flöde, men utan realisationsberoende lokal heterogenitet (Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2). Resultatet av denna analys som alltså tar fram de områden som har nedåtriktat flöde för flera olika realiseringar presenteras i figur A-4. Totalt passerade 454 försvarsområden denna kombinerade test, vilket motsvarar nära 8 % av alla försvarsområden.



Figur A-4. Exempel på test för R_p -värden med olika systembeskrivningar – Serie 2. Studerade fall: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2. Förvarsområden markerade med gröna rutor är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$) i alla beräkningsfallen som ingår i den valda serien av fall.

Det relativt stora antal förvarsområden som passerar denna test visar att områden med tydligt nedåtriktat grundvattenflöde är ganska okänsliga för olika beskrivningar av bergets genomsläpplighet. Detta följer av den tidigare presenterade slutsatsen att den mest betydelsefulla systemegenskapen är topografins undulation. Förvarsområden som har passerat testen förekommer över hela det studerade modellområdet förutom under större sjöar.

Den test för olika systembeskrivningar som presenterades i föregående stycke testar bara för R_p -värden och resultatet är inte kopplat till ett visst fall eller en viss systembeskrivning. Ytterligare ett steg har därför varit att koppla de förvarsområden som passerar denna kombinerade test med ett utvalt fall som kan anses vara en god beskrivning av det studerade systemet, t ex referensfallet Fall 5. Därigenom erhålles statistiska egenskaper för de förvarsområden som passerat den ovan diskuterade kombinerade testen.

En sådan analys visar att bland de förvarsområden som passerar den ovan diskuterade kombinerade testen för nedåtriktat flöde, förekommer det områden med korta genombrotts-tider, korta flödeslängder (särskilt minimilängder) och specifika flöden som är relativt stora i jämförelse med variationen av flöden inom modellområdet. Detta indikerar att ett förvarsområde med nedåtriktat grundvattenflöde (inströmningssituation) inte nödvändigtvis är ett område med långa tider, långa flödesvägar och små flöden.

Förvarsområden som uppfyller samtliga testkriterier, sammanvägning av olika konceptualiseringar

Olika systembeskrivningar representeras i denna studie av olika beräkningsfall. Ett fall som kallas referensfallet (Fall 5), och varianter på referensfallet med densitetsberoende flöde och/eller lokal heterogenitet, är de fall som är närmast förankrade i den sammanställning av

tillgängliga undersökningsdata som gjorts i projektet. Därför kan dessa fall betraktas som de mest rimliga och sannolika systembeskrivningarna. Ett stort antal andra fall har även studerats. Dessa fall är mindre sannolika i jämförelse med sammanställda data, men de är ändå av visst intresse eftersom de representerar olika (mer eller mindre extrema) varianter på systemegenskaperna. Som en avslutande jämförelse har därför de olika systembeskrivningarna sammanvägts i en och samma test. Systembeskrivningar som är sannolika och rimliga har ställts mot beskrivningar som är mindre rimliga och kanske till och med extrema.

En sådan sammanvägning har varit ett försök att belysa betydelsen av en variation (osäkerhet) i systemegenskaperna när olika förvarsområden skall jämföras med varandra. Den studerade (inkluderade) variationen i systemegenskaper är den variation som beskrivs av skillnaderna mellan de olika studerade fallens systemegenskaper. Testerna har baserats på en jämförelse av förvarsområden och flödesvägar som de förekommer i en serie av utvalda fall. Testerna avser följande resulterande egenskaper (medianvärden för förvarsområden): (i) Längsta genombrottstiderna. (ii) Längsta flödesvägarna. (iii) Minsta specifika flödena.

Testerna (sorteringen) har avsett antingen:

- Snittet av de två delmängderna: (i) 1 000 områden med de längsta genombrottstiderna och (ii) 1 000 områden med de längsta flödesvägarna.

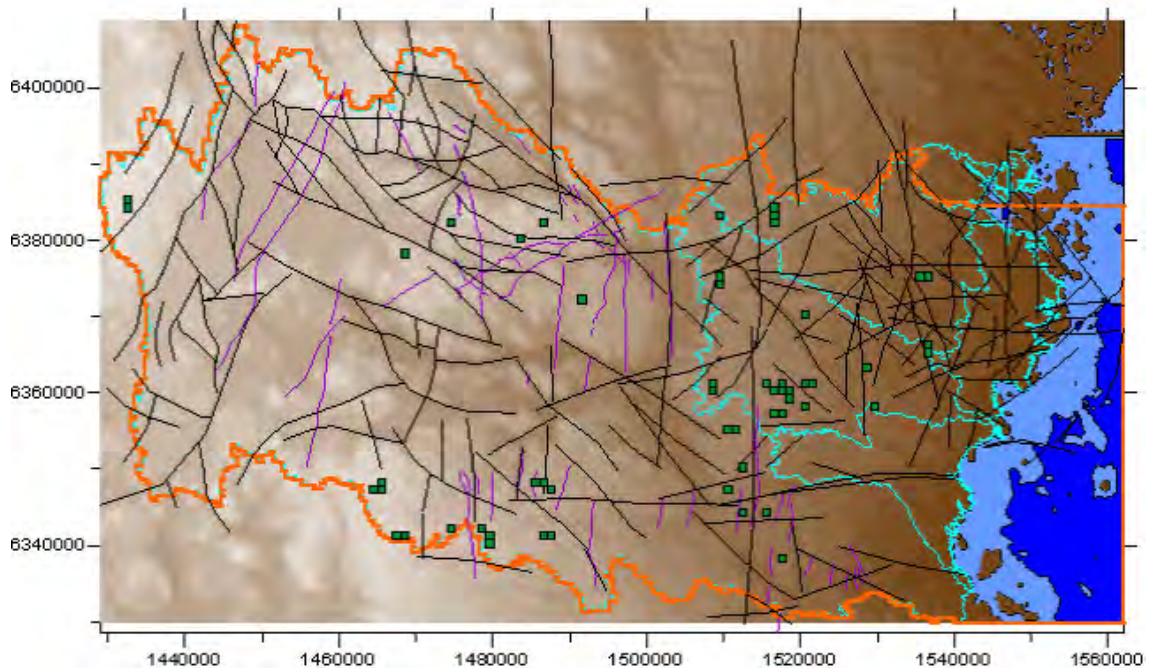
eller:

- Snittet av de två delmängderna: (i) 1 000 områden med de längsta genombrottstiderna och (ii) 1 000 områden med de minsta specifika flödena.

För att erhålla en robust bestämning av områden med de ovan nämnda resulterande egenskaperna valdes att jämföra och kombinera områden med dessa egenskaper från ett antal olika fall med delvis mycket olika systemegenskaper. För varje studerat fall identifierades de förvarsområden som uppfyllde de ovan nämnda kriterierna. Därefter jämfördes de identifierade förvarsområdena för de olika fallen. När identifierade förvarsområden från olika fall jämfördes i en sådan test så beaktas alltså inte de absoluta värdena på flödesvägarnas resulterande egenskaper, utan bara rumslig förekomst av gemensamma områden.

Den första typen av test har alltså avsett snittet av de två delmängderna: (i) 1 000 områden med de längsta genombrottstiderna och (ii) 1 000 områden med de längsta flödesvägarna, för olika systembeskrivningar. Testet har exempelvis utförts för en serie av beräkningsfall (systembeskrivningar), med och utan densitetsberoende flöde, och utan realisationsberoende lokal heterogenitet (Serie 2: Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2). Resultatet av den kombinerade testen, dvs snittet av de områden som uppfyller villkoren för beräkningsfall som ingår i Serie 2, presenteras i figur A-5. Totalt passerar 53 förvarsområden den applicerade testet (0,9 % av alla områden). Områden som passerar denna test är alltså områden som demonstrerar långa flödesvägar och långa genombrottstider för samtliga beräkningsfall (systembeskrivningar) som ingår i den valda serien.

Orsaken till att ett inte obetydligt antal förvarsområden passerar testet, är att det endast avser flödesvägarnas längd och genombrottstid. Eftersom topografin i denna serie är densamma i alla beräkningsfallen blir flödesmönstren i de olika beräkningsfallen inte helt olika varandra. Även här drar vi slutsatsen att den topografiska undulationen är den mest betydelsefulla systemegenskapen för grundvattnets flödesmönster i det studerade modellområdet.



Figur A-5. Exempel på test av försvarsområden vid olika systembeskrivningar: flödesvägars längd och genombrotts tid. Studerade fall: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2. 53 försvarsområden passerade testet. Försvarsområdena är markerade med gröna rutor. Dessa områden är områden med långa flödesvägar i kombination med långa genombrotts tider för samtliga fall som ingår i den valda serien.

Allmänna slutsatser

Från den genomförda studien och med den metodik som tillämpats kan man dra följande generella slutsatser:

- Störst betydelse för det regionala flödesmönstret från försvarsdjup har topografien. Utströmningsområdena förekommer främst i topografins lägre delar, längs med dalgångar och inströmningsområdena förekommer på höjderna. Den topografiska undulationen är av större betydelse än konduktivitetens egenskaper. Olika litologiska enheter, regionala deformationszoner, lokal heterogenitet, kvartära avlagringar etc är av mindre betydelse än topografins undulation.
- Grundvattnets flödesmönster, för områden som beskrivs och analyseras med mest realistiska förutsättningar, kan beskrivas som en huvudsakligen lokal flödesprocess. Medianlängden på flödesvägarna är i studien av storleksordningen 2 km och andelen storregionala flödesvägar (längre än 10 km) är mycket liten.
- Om den hydrauliska konduktiviteten avtar mot djupet erhålls flödesceller med mer begränsad utsträckning än om så inte vore fallet.
- Anisotropi i konduktivitetens fält med större horisontell hydraulisk konduktivitet än vertikal ger relativt sett större flödesceller och långa flödesvägar förlängs.
- Anisotropi i konduktivitetens fält med större vertikal hydraulisk konduktivitet än horisontell ger relativt sett mer mindre flödesceller och flödesmönstret blir mer lokalt.
- Djupavtagande och horisontell anisotropi dominerar över litologiska enheters, deformationszoners, diabasgångars och kvartära avlagringarnas påverkan på flödesmönstret.

- Deformationszoner och diabasgångar har betydelse för det lokala flödesmönstret men liten betydelse för det regionala.
- Storregionala horisontella deformationszoner är ej tillräckligt hydrauliskt betydelsefulla för att påverka det storskaliga flödesmönstret.
- Lokal heterogenitet uppvisar samma allmänna flödesmönster som referensfallet (utan naturlig spridning i det hydrauliska konduktivitetssfältet). Dock är flödesvägarna och genombrottsiderna ca 30 % längre.
- Densitetseffekter får ringa betydelse i valda modellregionen. Enbart kustnära påverkan noteras.
- Förvarsområden i inlandet har generellt sett inte längre genombrottsider, längre flödeslängder eller mindre specifika flöden än förvarsområden närmare kustlinjen.

Studien visar sammanfattningsvis att ökad konceptuell komplexitet ger ökad tendens till att mer lokala flödesceller utvecklas. De genomförda modelleringarna visar inte att ett inlandsförvar skulle vara lämpligare än ett kustnära när verklighetens geohydrologiska förutsättningar vägs in i beräkningarna. Grundvattenflödets storlek beror t ex i hög utsträckning på den lokala vattengenomsläppligheten. Vattengenomsläppligheten varierar inom vida gränser och ger sannolikt, lokalt sett, mycket större flödesvariationer än vad de olika systemegenenskaperna givit i denna studie.

Summary

Background and purpose

One of many geoscientific questions in connection with the siting of a final repository for spent nuclear fuel in Sweden has to do with understanding the large-scale flow patterns of the naturally circulating groundwater. The recharge and discharge of the groundwater is therefore a subject for both SKB's research activities and the interest of the regulatory authorities.

This report aims at providing an in-depth scientific analysis of the groundwater flow pattern based on the criteria and suitability indicators which SKB has previously presented /Andersson et al. 2000/ with respect to recharge and discharge aspects in a supraregional perspective.

The analysis was conducted within the framework of a project whose goals were to:

- evaluate conceptual simplifications and model uncertainties in supraregional groundwater modelling,
- carry out an in-depth and comprehensive analysis of regional flow conditions in eastern Småland.

Achieving these goals has required an approach based on the use of available geoscientific data on the Småland region combined with an analysis of different conceptual assumptions and system descriptions.

Area

The area studied consists of five regional catchment areas in eastern Småland (the rivers Emån, Virån and Marströmmen and the coastal areas around Oskarshamn and the Simpevarp Peninsula). The groundwater model represents a very large area, about 80×130 km².

The model area's topographic relief mainly belongs to parts of the broken, partially eroded sub-Cambrian peneplain. The westernmost parts of the model area belong to the south Småland Precambrian bedrock plain. The highest levels in the area are about 360 m above sea level, and the peneplain slopes towards the Baltic Sea where Cambrian cover rock appears at Kalmarsund. The valleys of the dominant watercourses have been formed along fracture zones in the broken terrain. The model area is largely located above the previous highest shoreline (HS), 100 m above sea level. The dominant Quaternary deposit is glacial till. Agglomerations of glaciofluvial sediments – i.e. eskers, kames and deltas – run mainly in the NW/SE direction.

The bedrock in the model area is dominated by rock types belonging to the “Trans-scandinavian igneous belt”. The rocks in the model area consist primarily of different types of plutonic rocks, where Småland-Värmland granites are most common. Felsic supracrustal rocks of volcanic origin also occur, as do younger plutonic rocks belonging to the Götömar massif. The sedimentary rocks of the Almesåkra group and horizontal dolerites associated with them appear in the western part of the model region. Vertical elongated wide (50–100 m) dolerite dykes belonging to the Blekinge-Dalarna dolerites appear with a roughly north-south direction in the model area.

Methodology

By means of modelling, analyses were made of flow paths from a depth of 500 m, which is the level of a planned final repository for nuclear waste (spent nuclear fuel). The flow paths from theoretical repository areas were studied with respect to:

- Flow pattern for groundwater passing repository depth.
- Outflow time (breakthrough time or return-flow time) from the repository (time for advective flow from the repository at a depth of 500 m to the discharge area).
- Flow lengths from repository depth.
- Specific flows at repository depth.
- Evolution of salinity in connection with density-driven flow during the land uplift phase (for certain conceptual models).

The following system properties that are of importance for the groundwater flow were studied:

- Local topographic undulation.
- Quaternary deposits.
- Anisotropy in the conductivity field.
- Depth-decreasing conductivity.
- Varying conductivity in different parts of the model depending on different lithological units.
- Regional vertical deformation zones.
- Regional horizontal deformation zones.
- Dolerite dykes.
- Local heterogeneity.
- Density-dependent flow and time-dependent aspects of the studied system.

Integrated analyses were carried out with respect to:

- Inflow-outflow situation for different repository locations.
- Survey of repository areas with both long outflow times and small specific groundwater flows.
- Survey where areas with long outflow times and small specific flows were combined with supplementary information on long flow paths.

Based on different calculation cases (with topography-determined top boundary conditions) the report sheds light on important aspects of how different conceptualizations and system properties affect the flow paths. The systematics that was used to assign different properties to the different calculation cases is based on a stepwise increase in the complexity of the studied system. The simplest cases have homogeneous properties and no local topographic undulation (an inclined plane towards the Baltic Sea), while the most complex cases contain as much as possible of the system's properties, for example different combinations of lithological units, deformation zones, dolerite dykes, depth-dependent K values, heterogeneity, Quaternary deposits and density-dependent flow. One reference case, Case 5, is based on available official databases and serves as a point of departure for the comparisons made.

By comparing how the flow paths change for different calculation cases representing different aspects of the system properties, it is possible to shed light on the importance of different system properties, and thereby the uncertainties in these properties.

For each calculation case a large number of evenly distributed theoretical flow paths (220,000) from repository depth were analyzed. The flow paths are calculated by simulation of virtual particles that follow the groundwater flow. The virtual particles are started and move in a flow situation that represents today's flow situation. The particles move in a flow field that does not change with time.

The studied model area above the shoreline was divided into 6,000 theoretical repository areas 1 km² in size. Each repository area is represented by 36 flow paths, and for each repository area the median flow path length, the minimum flow path length, the median breakthrough time and the median specific flow at the starting points were calculated.

Models with different depths to the bottom of the model were set up and flow paths in these models were analyzed. The simulations show that the general conclusions presented in this study are not affected by model depth, provided that this is defined at reasonable levels, i.e. deeper than approximately 2,000 m. Based on the sensitivity analysis performed, a model depth of 2,500 m was chosen. The discretization of the model is based on experience from previous model studies of northeastern Uppland /Holmén et al. 2003/.

Results, importance of different system properties

The large number of simulations that were carried out show that the groundwater's regional flow pattern from repository depth can be described with flow cells of various sizes. The size of these cells depends on the properties of the studied system. Recharge and discharge areas are located all over the studied model area. Discharge areas are mainly found in the low-lying parts of the topography, along valleys, while recharge areas occur on the heights.

It is important to stress that the results are only to be regarded as relative and not as quantifying. A possible siting of a final repository in a particular region must be considered in reference to considerably more factors, and the suitability of a specific site is assessed within the framework of a safety assessment based on site-specific data.

Importance of topography

The factor of greatest importance for the regional flow pattern (from repository depth) is the topographic undulation, i.e. the typical variation of the landscape with upland areas and valleys. The topographic undulation is of greater importance than the properties of the conductivity field. Different lithological units, regional deformation zones, local heterogeneity, Quaternary deposits etc are of less importance than the undulation of the topography. This is because the groundwater table tends to follow the topography. The shallow depth of the groundwater table in the studied region is caused by the large potential groundwater recharge in relation to the limited permeability of the fractured rock. This is typical of Swedish conditions.

Decrease with depth and anisotropy of the conductivity field

The system properties that are of greatest importance for the regional flow pattern after topographic undulation are the decrease of the conductivity field with depth and its anisotropy. In comparison with the flow pattern that is obtained with a homogeneous conductivity field, the following changes in the flow pattern are obtained when decrease with depth and anisotropy are included as properties in the conductivity field:

- (a) The groundwater's flow cells become smaller and more local when the conductivity field is defined with depth-decreasing permeability; it is above all the long flow paths that become shorter when a decrease with depth is included.

- (b) The groundwater's flow cells become bigger when the conductivity field is defined with an increased permeability in the horizontal plane (horizontal anisotropy). It is above all the long flow paths than become even longer when the permeability is increased in the horizontal plane.
- (c) The groundwater's flow cells become smaller when the conductivity field is defined with an increased permeability in the vertical plane (vertical anisotropy); The flow pattern becomes very local if permeability is great in the vertical plane.

The inclusion of a general anisotropy, defined as an increased horizontal permeability, does not, however, have as much importance in a model with depth-decreasing permeability as in a model where permeability is constant with depth. Even less important is general horizontal anisotropy in a complex model with depth-decreasing permeability and local heterogeneity. If a general horizontal anisotropy is finally defined as clearly decreasing with depth (at depths above repository depth) in a model with depth-decreasing permeability and local heterogeneity, the importance of horizontal anisotropy is relatively small for flow paths from repository depth (small importance compared with the importance of e.g. the topography).

Deformation zones and dolerite dykes

The occurrence of deformation zones and dolerite dykes can be of great importance for the local flow pattern, but these structures are of limited importance for the supraregional flow pattern.

Stochastically generated horizontal deformation zones were included in a number of cases. These cases exhibit the same general flow pattern as for the reference case, Case 5. The groundwater flow cells are primarily local. The included horizontal zones are not sufficiently hydraulically important to change the flow pattern on a supraregional scale, but may be important in the local perspective.

Dependence of flow pattern on distance to coast

One calculation case, Case 5, was chosen as the reference case. This case includes great complexity and is a reasonable representation of the studied system. The case is based on the compilation of available investigation data. The results of this calculation show that the flow patterns can be described as mainly local cells. The median flow path length is 1,500 m and the fraction of supraregional flow paths is very small (see below, Figure A-1). The lengths of the flow paths from hypothetical repositories do not increase with the distance from the shoreline. Rather, the lengths tend to decrease with the distance from the sea. This is due to the more accentuated topographic undulation in the inner parts of the model area. The longest flow paths occur at a distance of about 20 km from the shoreline. Short flow paths occur at all distances from the shoreline.

If local heterogeneity and density-dependent flow are added to the features of the reference case, a similar flow pattern is obtained, i.e. the lengths of the flow paths do not increase with the distance from the shoreline. The fraction of very long flow paths rather tends to decrease with distance from the sea. Furthermore, the breakthrough times of the flow paths do not increase with distance from the shoreline. Short and long breakthrough times occur at all distances from the shoreline.

Discharge areas for the flow paths from a depth of 500 m occur more or less throughout the whole model area. Above the shoreline, such areas occur mainly along important topographic valleys, depressions, watercourses and lakes. Discharge areas do not occur on local topographic maxima, but in valleys and depressions around such heights.

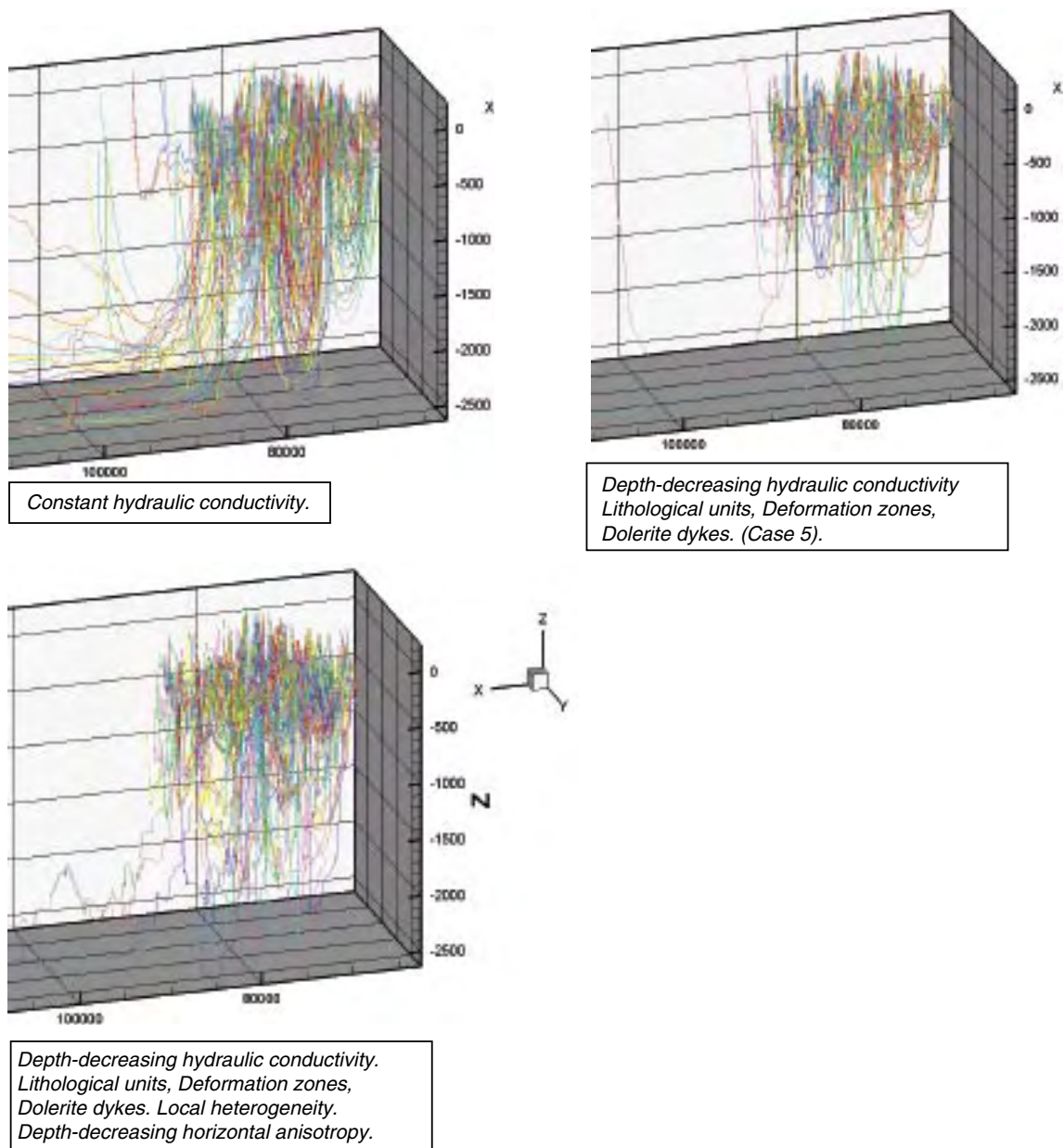


Figure A-1. Illustrations of simulated groundwater flow pattern for different system descriptions. The figures show 1,000 flow paths initiated at a depth of 500 m within a circular area with a radius of 10 km (the area thus overlaps about 300 theoretical repository areas with a surface area of about 1 km²). The flow patterns shown are representative of the entire studied model area. The fraction of long flow paths in the figures corresponds closely to the fraction of long flow paths in the entire model area. Note that the vertical scale is 12 times greater than the horizontal scale. The view is in the SW direction, i.e. the coastline is on the left-hand edge of the figure. Note the different flow patterns for the different conceptualizations.

Flow pattern and depth below ground surface

The calculated groundwater flow decreases with depth. For the reference case, the median flow at a depth of 100 m is 10 Litre/(m²,year), at repository depth (500 m) the median flow is 0.3 Litre/(m²,year), and at a depth of 1,000 m the median flow is 0.06 Litre/(m²,year). As a comparison it can be mentioned that according to SMHI, net precipitation at the coast is about 170 mm/year, and at the western model boundary about 310 mm/year (1 Litre/(m²,year) is equivalent to 1 mm/year). The median specific flow at repository depth is thus only about one-thousandth of the specific runoff.

Importance of density-dependent flow

Most of the model area (about two-thirds) is situated above the previous highest shoreline (HS = 100 m above sea level). At repository depth the salinities are therefore often low, and density effects are of little importance for flow paths from repository depth in the supraregional model, except at the coast.

Local heterogeneity

Local heterogeneity in permeability has also been included in a number of cases. These cases exhibit the same general flow pattern as Case 5, although the flow paths (and breakthrough times) are slightly longer (about 30%), partly because the flow paths get more tortuous when local heterogeneity is included. The groundwater flow cells are primarily local, since the local heterogeneity is not important enough to change the flow pattern on a supraregional scale.

Fraction of long flow paths

The fraction of very long flow paths is of interest for the question of recharge and discharge. Flow paths with lengths greater than 10 km have been defined as supraregional flow paths. The fraction of such flow paths is presented below. For all the cases presented below, the topography is defined as undulating.

Fraction of supraregional flow paths (flow paths longer than 10 km):

- Case 1: Homogeneous model: 5.3%
- Case 2: Homogeneous model with increased horizontal permeability (10 times): 25%
- Case 3: Homogeneous model with increased horizontal permeability (10 times): 0.5%
- Case 5: **Reference case:** 0.6%
- Case 7A: Like Case 5, but with horizontal deformation zones: 0.8%
- Case 8A: Like Case 5, but with local heterogeneity: 2.3%
- Case 8As2: Like Case 5, but with local heterogeneity and density-dependent flow: 1.7%
- Case 8D: Like Case 5, but with local heterogeneity, density-dependent flow and horizontal anisotropy decreasing with depth: 3.4%

Since each flow path represents a certain surface area of the studied model area, the above percentages also represent fractions of the surface area of the model area. This leads to the following conclusion: For Case 5 (reference case), supraregional flow paths occur from 0.6% of the surface area above the shoreline, and for Case 8As2 (reference case with local heterogeneity and density-dependent flow), supraregional flow paths occur from 1.7% of the surface area above the shoreline. Very long breakthrough times and very long flow paths, as well as small specific flows, occur from only a few repository areas within the model area.

Results, integrated analyses

Repository areas with low flows, long breakthrough times and long flow paths

The breakthrough times in the constructed models also represent the transport resistance (even though the absolute values are not the same). The reason the breakthrough times can represent the transport resistance is because porosity is assumed to be constant in the models. In other words, a comparison of repository areas based on specific flows and

breakthrough times is also a comparison of the specific flow and the transport resistance. A comparison of the transport resistance is interesting, since the transport resistance determines how much different nuclides are retarded due to matrix diffusion and sorption. Transport resistance and specific flows are, however, determined to a high degree by the local hydraulic conductivity, which can vary considerably between different sites. It was not possible to analyze this in this study since it would require site-specific borehole data.

A sorting of all repository areas was done according to breakthrough time and specific flow. The sorting is based on the average of the two subsets: (i) the 1,000 areas with the longest breakthrough times and (ii) the 1,000 areas with the smallest specific flows. For e.g. Case 8As2 (reference case with density-dependent flow and local heterogeneity), the sorting results in 457 repository areas (which is equivalent to 8% of all repository areas) that represent areas with relatively long breakthrough times and small specific flows. The results are shown in Figure A-2. Repository areas that passed this test occur all over the studied model area, except in the central parts of the area where the topographic gradient is great. (Large topographic gradients often lead to flow paths with short breakthrough times.)

The test discussed above can be extended to include flow path length as well. The sorting is then based on the average of the three subsets: (i) the 1,000 areas with the longest breakthrough times, (ii) the 1,000 areas with the smallest specific flows and (iii) the 1,000 areas with the longest flow paths. For e.g. Case 8As2 (reference case with density-dependent flow and local heterogeneity), the sorting results in 198 repository areas (which is equivalent to 3% of all repository areas). These areas thus represent in a relative perspective areas with long breakthrough times, small specific flows and long lengths. The results are shown below in Figure A-3. Repository areas that passed this test occur all over the studied model area, except in the central parts of the area and beneath large lakes, since flow paths beneath lakes are often short (and upward).

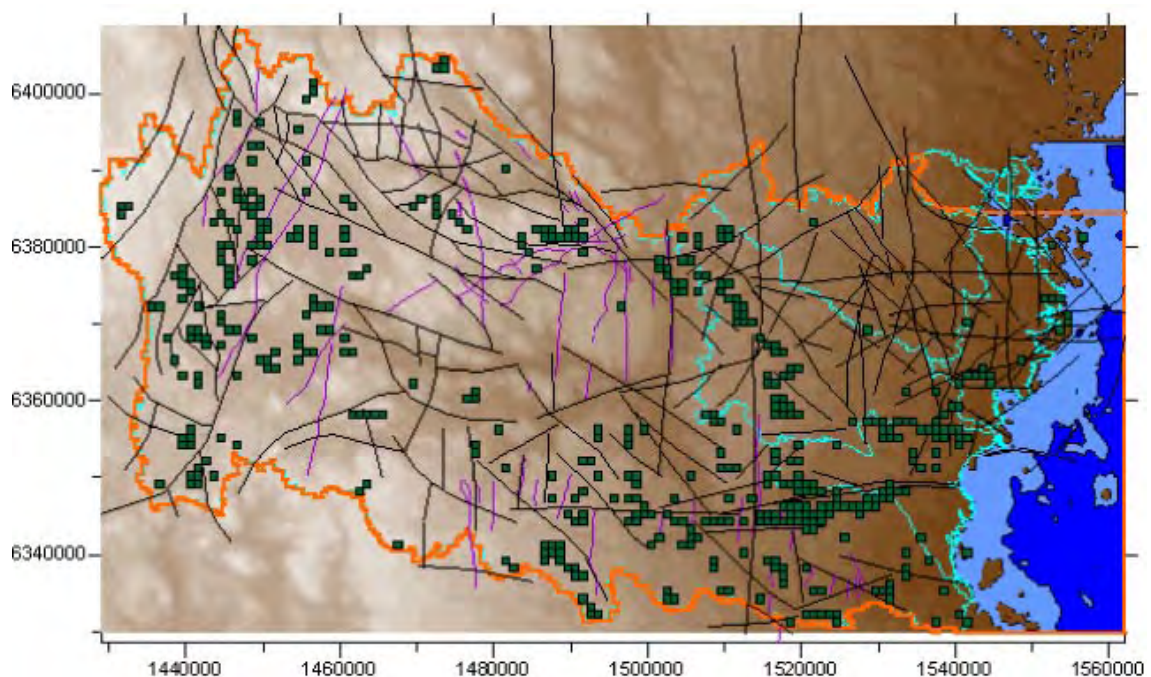


Figure A-2. Example of analysis of repository areas (marked with green squares) with long breakthrough times in combination with small specific flows. Case 8As2 (local heterogeneity and density-dependent flow).

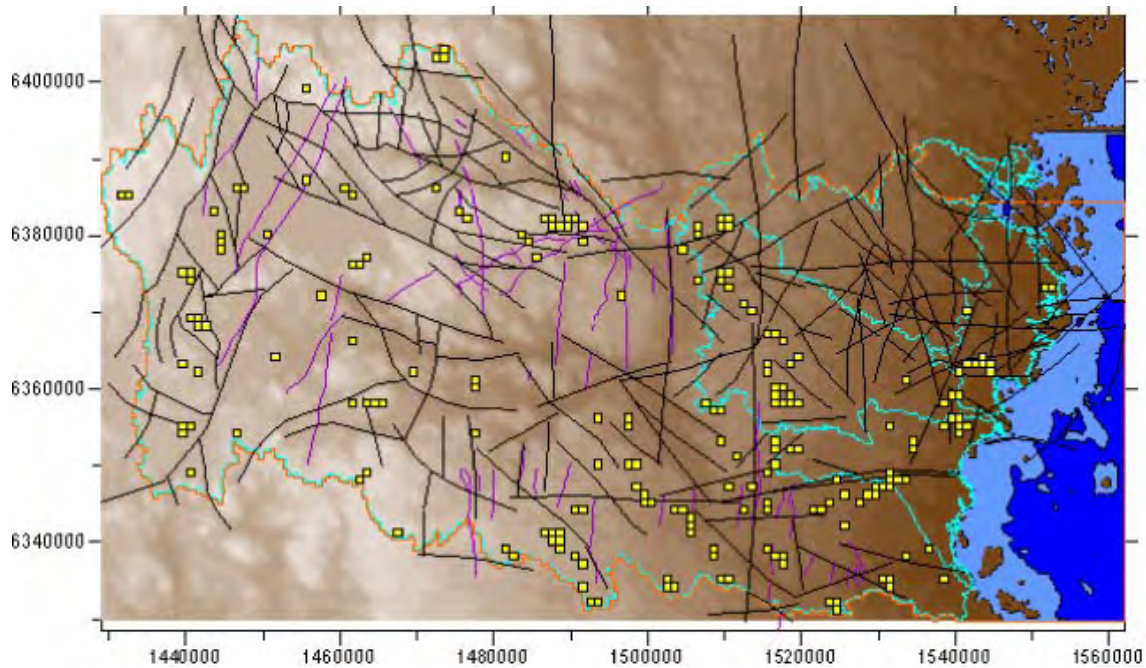


Figure A-3. Example of analysis of repository areas (marked with yellow squares) with long breakthrough times in combination with small specific flows and long flow paths. Case 8As2 (local heterogeneity and density-dependent flow).

Repository areas with downward groundwater flow

It may be of particular interest to analyze repository areas with downward groundwater flows in order to shed light on the occurrence of recharge areas at repository depth. This is because downward flows are expected to be associated with long flow paths and often also long breakthrough times, even though both of these properties can also occur in areas that are not dominated by downward flows.

In order to be able to analyze in an efficient manner whether a studied repository area (i.e. at repository depth) is situated in a downward or upward groundwater flow, a parameter called R_p has been introduced. R_p can be described as the percentage of downward flow paths within a given area. High R_p values thus represent downward flows. Using R_p , figures can be obtained showing the occurrence of areas with downward groundwater flows at repository depth.

In the constructed model, the occurrence of repository areas with clearly downward groundwater flows can vary depending on which system properties were assigned to the model. In order to obtain a robust determination of areas with downward flows, R_p values from a large number of different cases were compared and combined. Areas with $R_p > 90\%$ were compared for a number of cases with very different system properties. Repository areas with $R_p > 90\%$ that occur in all the studied cases were thus selected and are described below.

The above analysis was carried out for several different series of calculation cases. Series 2 includes, for example, 8 different cases with very different system properties, with and without density-dependent flow, but without realization-dependent local heterogeneity (Cases 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 and 5s2). The results of this analysis, which thus selects the areas with downward flow for several different realizations, are presented in Figure A-4.

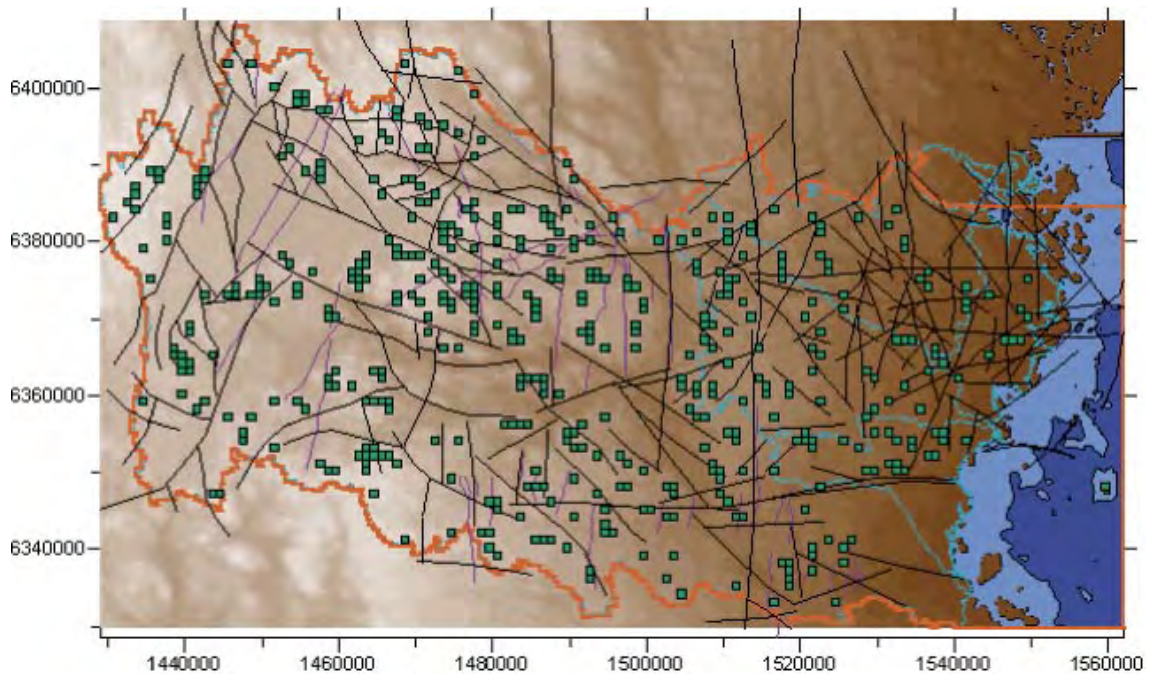


Figure A-4. Example of test for R_p values with different system descriptions – Series 2. Studied cases: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 and 5s2. Repository areas marked with green squares are areas with downward groundwater flow ($R_p > 90\%$) in all the calculation cases included in the chosen series of cases.

Altogether, 454 repository areas passed this combined test, which is equivalent to nearly 8% of all repository areas. The relatively large number of repository areas that pass this test shows that areas with clearly downward groundwater flows are fairly insensitive to different descriptions of the permeability of the rock. This follows from the previously presented conclusion that the most important system property is topographic undulation. Repository areas that passed the test occur all over the studied model area, except beneath large lakes.

The test for different system descriptions that was presented in the preceding paragraph only tests for R_p values, and the results are not linked to a given case or a given system description. A further step was therefore to link the repository areas that pass this combined test to a selected case that can be considered to be a good description of the studied system, for example the reference case, Case 5. In this way statistical properties are obtained for the repository areas that have passed the combined test discussed above.

Such an analysis shows that among the repository areas that pass the combined test for downward flow discussed above, there are areas with short breakthrough times, short flow lengths (particularly minimum lengths) and specific flows that are relatively great in comparison with the variation of flows within the model area. This indicates that a repository area with downward groundwater flow (recharge situation) is not necessarily an area with long times, long flow paths and small flows.

Repository areas that satisfy all test criteria, weighing-together of different conceptualizations

Different system descriptions are represented in this study by different calculation cases. The case called the reference case (Case 5), and variants on the reference case with density-dependent flow and/or local heterogeneity, are the cases that have most in common with the

available investigation data that were compiled in the project. These cases can therefore be regarded as the most reasonable and probable system descriptions. However, a large number of other cases have been studied that are less probable in comparison with the cases based on compiled data, but are nevertheless of some interest since they represent different (more or less extreme) variants of the system properties. As a concluding comparison, the different system descriptions were therefore weighed together in one and the same test. System descriptions that are probable and reasonable were weighed together with descriptions that are less reasonable and perhaps even extreme.

This was done in an attempt to shed light on the importance of a variation (uncertainty) in the system properties when different repository areas are to be compared with each other. The studied (included) variation in system properties is the variation that is described by the differences between the system properties of the different studied cases. The tests were based on a comparison of repository areas and flow paths as they occur in a series of selected cases. The tests concern the following resulting properties (median values for repository areas): (i) The longest breakthrough times. (ii) The longest flow paths. (ii) The smallest specific flows.

The tests (the sorting) pertained to either:

- The average of the two subsets: (i) the 1,000 areas with the longest breakthrough times and (ii) the 1,000 areas with the longest flow paths.

or:

- The average of the two subsets: (i) the 1,000 areas with the longest breakthrough times and (ii) the 1,000 areas with the smallest specific flows.

In order to obtain a robust determination of areas with the above resulting properties, areas with these properties from a number of different cases, sometimes with very different system properties, were compared and combined. For each studied case, the repository areas that satisfied the above criteria were identified. Then the repository areas were compared for the different cases. Thus, when identified repository areas from different cases are compared in such a test, the absolute values of the resulting properties of the flow paths are not taken into account, only the spatial occurrence of common areas.

The first type of test thus pertained to the average of the two subsets: (i) the 1,000 areas with the longest breakthrough times and (ii) the 1,000 areas with the longest flow paths, for different system descriptions. The test was, for example, carried out for a series of calculation cases (system descriptions) with and without density-dependent flow and without realization-dependent local heterogeneity (Series 2: Cases 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 and 5s2). The results of the combined test, i.e. the average of the areas that satisfy the conditions for calculation cases included in Series 2, are presented in Figure A-5. Altogether, 53 repository areas pass the applied test (0.9% of all areas). Areas that pass this test are thus areas that exhibit long flow paths and long breakthrough times for all calculation cases (system descriptions) included in Series.

The reason why a not insignificant number of repository areas pass the test is that it only pertains to the length and breakthrough time of the flow paths. Since the topography in this series is the same in all the calculation cases, the flow patterns in the different calculation cases are not entirely unlike each other. Here as well we draw the conclusion that the topographic undulation is the most important system property for the groundwater flow pattern in the studied model area.

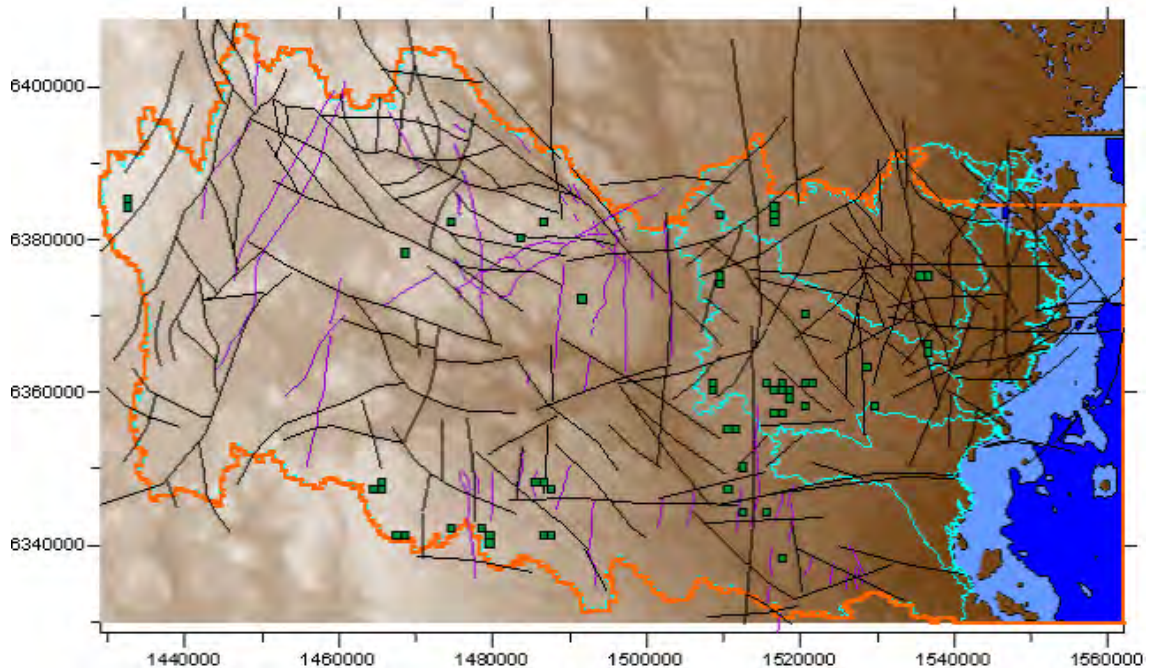


Figure A-5. Example of test of repository areas for different system descriptions: flow path length and breakthrough time. Studied cases: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 and 5s2. 53 repository areas passed the test. The repository areas are marked with green squares. These areas are areas with long flow paths in combination with long breakthrough times for all cases included in the chosen series.

General conclusions

The following general conclusions can be drawn from the study and the applied methodology:

- The factor of greatest importance for the regional flow pattern (from repository depth) is the topography. The discharge areas are mainly found in the low-lying parts of the topography, along valleys, and the recharge areas occur on the heights. The topographic undulation is of greater importance than the properties of the conductivity field. Different lithological units, regional deformation zones, local heterogeneity, Quaternary deposits etc are of less importance than the undulation of the topography.
- For areas described and analyzed with the most realistic assumptions, the groundwater flow pattern can be described as a primarily local flow process. The median flow path length in the study is on the order of 2 km, and the fraction of supraregional flow paths (longer than 10 km) is very small.
- If hydraulic conductivity decreases with depth, flow cells of a smaller size are obtained than if this were not the case.
- Anisotropy in the conductivity field with greater horizontal than vertical hydraulic conductivity results in relatively larger flow cells and long flow paths are extended.
- Anisotropy in the conductivity field with greater vertical than horizontal hydraulic conductivity results in relatively smaller flow cells and the flow pattern is more local.
- Hydraulic conductivity that decreases with depth and horizontal anisotropy have a greater influence on the flow pattern than lithological units, deformation zones, dolerite dykes and Quaternary deposits.

- Deformation zones and dolerite dykes are of importance for the local flow pattern, but of little importance for the regional one.
- Supraregional horizontal deformation zones are not of sufficient hydraulic importance to influence the large-scale flow pattern.
- Local heterogeneity exhibits the same general flow pattern as the reference case (without natural variation in the hydraulic conductivity field). However, the flow paths and the breakthrough times are about 30% longer.
- Density effects have little importance in the selected model region. Only near-coastal impact is noted.
- Inland repository areas do not generally have longer breakthrough times, longer flow lengths or smaller specific flows than repository areas closer to the coast.

In summary, the study shows that increased conceptual complexity results in an increased tendency towards the development of more local flow cells. The modellings done do not show that an inland repository would have any advantages over a near-coastal one when real geohydrological conditions are included in the calculations. The size of the groundwater flow is, for example, dependent to a great extent on the local hydraulic conductivity. Hydraulic conductivity varies within wide limits and probably leads to much greater flow variations on a local scale than those resulting from the different system properties in this study.

Innehåll

1	Introduktion	33
1.1	Bakgrund	33
1.2	Syfte	34
1.3	Omfattning	34
1.4	Metodik	35
1.5	Rapportens disposition	36
2	Det storregionala området med tillgängliga undersökningar och övriga modellförutsättningar	37
2.1	Topografisk relief	38
2.1.1	Höjddata	38
2.1.2	Batymetri	39
2.1.3	Topografisk modell	39
2.2	Hydrologi	40
2.3	Geologi	41
2.3.1	Kvartära avlagringar	41
2.3.2	Jordmäktighet	43
2.3.3	Glacifluviala sediment	43
2.3.4	Jordlagrens konceptualisering	44
2.3.5	Berggrunden	46
2.3.6	Berggrundens konceptualisering i litologiska enheter	48
2.3.7	Konceptualisering av deformationszoner och gångbergarter	48
2.4	Hydrogeologisk domänindelning	50
2.4.1	Kvartära avlagringar – hydrogeologi	50
2.4.2	Berggrund – hydrogeologi	52
2.4.3	Diabasgångars genomsläpplighet	56
2.4.4	Transmissivitet i deformationszoner	56
2.5	Djupberoende av hydraulisk konduktivitet	58
2.5.1	Djupberoende av hydraulisk konduktivitet – SKB:s platsundersökningar i Oskarshamn	58
2.5.2	Djupberoende av hydraulisk konduktivitet – andra data än från SKB:s platsundersökningar	61
2.5.3	Modeller för djupberoende av hydrauliska egenskaper	63
2.6	Porositet	64
2.7	Strandlinjeförskjutning, landhöjning	64
2.8	Grundvattnets salinitet och dess rumsliga fördelning	66
3	Beräkningsmetodik och teoretiska förutsättningar för modellen	69
3.1	Den systemanalytiska metoden	69
3.2	Teoretisk representation av flödesmedia	69
3.3	Formell matematisk modell	71
3.4	Salt grundvatten och betydelsen av densitetsberoende grundvattenflöde	72
3.5	Landhöjning	73
3.6	Metod för att generera en lokal heterogenitet	73
3.7	Metod för beräkning av flödesvägar	75
3.8	Metod för analys av förvarsområden	76
3.9	In- och utströmningsområden och Rp-parametern	78
3.10	Kalibrering	80
3.11	Transportmotstånd, genombrottsid och porositet	80

4	Modelldomän, diskretisering, randvillkor och egenskaper	83
4.1	Topografiska vattendelare och modellområdets avgränsning, samt modellområdets topografi	83
4.2	Beräkningsnät	86
4.3	Randvillkor	88
4.3.1	Inledning	88
4.3.2	Randvillkor vid modellens sidor	89
4.3.3	Randvillkor vid modellens botten	89
4.3.4	Randvillkor vid modellens övre yta	89
4.3.5	Randvillkor vid simuleringar av densitetsberoende flöde	91
4.4	Kvartära avlagringar	95
4.5	Litologiska enheter	95
4.6	Vertikala deformationszoner	99
4.7	Diabasgångar	101
4.8	Horisontala deformationszoner	102
4.9	Porositet	106
4.10	Lokal heterogenitet	106
5	Modelleringens omfattning och de olika studerade fallen	107
5.1	Metodik för val av beräkningsfall	107
5.2	De olika studerade fallen	108
6	Resultat och diskussion	111
6.1	Inledning	111
6.2	Fall 5 – Referensfallet	111
6.3	Visualisering av flödesvägar: Fall 5, Referensfallet.	118
6.4	Fall 0A och 0B – Beräkningsfall med topografin definierad av ett lutande plan	122
6.5	Fall 1, 2, 3 – Beräkningsfall med homogent K-värde men med olika anisotropi	126
6.6	Fall 4 och 5 och tillhörande sensitivitetsfall – Beräkningsfall med djupavtagande K-värden och komplexa egenskaper	141
6.6.1	Inledning – Djupavtagande genomsläpplighet	141
6.6.2	Fall 4	141
6.6.3	Fall 5	143
6.6.4	Fall 5s1 och Fall 5s2 – Densitetsberoende flöde	145
6.6.5	Fall 5D – Sensitivitetsfall med generell anisotropi	158
6.6.6	Fall 5B och 5C – Sensitivitetsfall med olika värden på diabasgångarnas lågpermeabla kärna	160
6.6.7	Fall 5F, 5G och 5H – Sensitivitetsfall med och utan deformationszoner och diabasdiabasgångar, eller med ökade K-värden i zonerna	160
6.6.8	Fall 5J – Sensitivitetsfall där grundvattenytan är utjämnad i förhållande till topografin	161
6.7	Fall 6A, 6B och 6C – Modeller med olika basnivåer	165
6.8	Fall 7A, 7B och 7Bs2 – Horisontala deformationszoner	171
6.9	Fall 8A, 8B, 8As2 och 8As3 – Lokal heterogenitet och isotropi	178
6.10	Fall 8C och 8D – Lokal heterogenitet och anisotropi	191
6.11	Betydelse av anisotropi – en jämförelse av resultat från olika beräkningsfall	198
7	Jämförelse av förvarsområden	201
7.1	Inledning och metodik	201
7.2	Test avseende långa genombrotstider och små flöden – Test 1B och Test 1C	204

7.2.1	Test 1B för Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde)	205
7.2.2	Test 1C för Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde)	206
7.2.3	Test 1B för Fall 8As2 (som referensfallet men med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde)	208
7.2.4	Test 1C för Fall 8As2 (som referensfallet men med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde)	209
7.2.5	Test 1B och Test 1C för Fall 8D (som referensfallet men med lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi)	211
7.3	Test avseende långa flödeslängder, långa genombrottstider och små flöden – Test 1A	212
7.3.1	Metodik	212
7.3.2	Test 1A för Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde)	213
7.3.3	Test 1A för Fall 8As2 (som referensfallet men med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde)	213
7.3.4	Test 1A för Fall 8D (som referensfallet men med lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi)	214
7.4	Tester av olika systembeskrivningar baserad på ett villkor om nedåtriktat grundvattenflöde: Test RA	217
7.4.1	Metodik	217
7.4.2	Resultat för Serie 1 – Fall 1, 2, 3, 4 och 5	218
7.4.3	Resultat för Serie 2 – Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2	218
7.4.4	Resultat för Serie 3 – Fall 1, 2, 3, 4, 5 och 8A	218
7.4.5	Resultat för Serie 4 – Fall 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2 och 8As2	219
7.4.6	Resultat för Serie 5 – Fall 1, 2, 3, 4, 5 och 8B	219
7.5	Kombinerad test av olika systembeskrivningar baserad på områden med nedåtriktade grundvattenflöden –Test RB	222
7.5.1	Metodik	222
7.5.2	Test RB1 för Fall 5s2	223
7.5.3	Test RB2 för Fall 5s2	225
7.6	Korrelation mellan Rp-värden och flödesvägarnas egenskaper	226
7.6.1	Inledning och metodik	226
7.6.2	Resultat för Fall 8As2	227
7.7	Kombinerade tester av olika systembeskrivningar baserad på flödesvägarnas egenskaper: Test P1, P2 och P3	232
7.7.1	Metodik	232
7.7.2	Test P1 – Långa tider och långa vägar	233
7.7.3	Test P2 – Långa tider och små flöden	237
7.7.4	Test P3 – Långa tider, långa vägar och små flöden	239
8	Slutsatser	241
9	Referenser	243
Bilaga 1	Översikt av tillgängliga data	249
Bilaga 2	Djupavtagande konduktivitet för litologiska enheter i modell	253
Bilaga 3	Ekvationer för stokastisk generering av lokal heterogenitet. Exempel på genererade K-värden	259
Bilaga 4	Diabasgångars hydrauliska konduktivitet (engelsk version)	265
Bilaga 5	Generellt djupavtagande för hydraulisk konduktivitet, klassning 100 m och 200 m	279

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

/SKB 2003/ har tidigare uttryckt det som ett önskemål och en generell fördel om ett slutförvar placeras i ett inströmningsområde för grundvatten, men att det ej är uppenbart att inlandsplatser är att föredra och att dessa platser skulle vara kopplade till stora fördelaktiga cirkulationsceller för grundvattnets omsättning i kristallin berggrund. Jämfört med de regionala förhållandena skall snarare de lokala, avgöra platsens lämplighet /se även Andersson et al. 2000/. /SKI 2004/ har formulerat sig på följande vis om frågeställningen in- och utströmning: "Lokalisering av ett slutförvar inom ett inströmningsområde kan under vissa förutsättningar vara en fördel. Lämpligheten hos ett kandidat område beror dock inte på en enstaka egenskap. För att en plats skall kunna bedömas som acceptabel måste det finnas kombinationer av goda egenskaper och avsaknad av betydande nackdelar. Frågan om in- och utströmning är en faktor bland många andra som måste vägas samman inför ett kommande platsval."

En av många geovetenskapliga frågeställningar vid lokalisering av ett slutförvar för använt kärnbränsle i Sverige handlar alltså om förståelsen för de storskaliga flödesmönstren för det grundvatten som naturligt omsätts. Grundvattnets in- och utströmning är därför föremål för såväl SKB:s utredningsverksamhet som de granskande myndigheternas intresse /se t ex Voss och Provost 2001, SKB 2003, Follin och Svensson 2003, Holmén et al. 2003/.

Grundvattnets flödesmönster i geologiska flerlagerföljder har sedan 1960-talet analyserats teoretiskt då de första numeriska simuleringarna introducerades inom hydrogeologin. Under senare hälften av 1900-talet utvecklades även spårämnestekniken och isotopkemin som gjorde det möjligt att med större noggrannhet kartlägga grundvattnets omsättning i djupled, med utvecklad förståelse för in- och utströmning. I den Baltiska sköldens naturgivna geologiska förutsättningar spelar emellertid heterogeniteten och anisotropin en väsentlig roll för att med god noggrannhet förutsäga flödesmönstrens utseende och utsträckning.

I den internationella litteraturen förekommer många generella och principiella beskrivningar över grundvattnets flödesmönster med hänsyn till topografiska och geologiska förutsättningar. Vanligen är dessa principiella skildringar analyserade och utvärderade utifrån ett perspektiv av tvådimensionella tvärsnitt över topografi och geologiska lagerföljder. Få studier i regional skala bygger på verklighetsbaserade data och är inriktade på att beskriva tredimensionella flödesmönster. En översiktlig litteratursammanfattning framgår av t ex /SKB 2003/.

Avsikten är att placera det svenska kärnavfalls lagret i en geologisk miljö som består av mycket gamla kristallina bergarter. Genom påverkan av olika tektoniska skeden under hundratals miljoner år har dessa bergarter blivit deformerade och genomslagna av sprickzoner och gångbergarter. Detta i sin tur innebär att berggrunden kan uppvisa en såväl utpräglad anisotropi som en påtaglig heterogenitet, vilket innebär att geovetenskapliga parametrar inom en och samma bergart uppvisar en stor variationsbredd. I hög grad gäller detta de hydrauliska egenskaperna.

SKB har låtit utföra denna studie med det övergripande syftet att komplettera tidigare arbeten om storregional grundvattenströmning och att på ett mer ingående sätt kunna diskutera konceptuella osäkerheter om storskaliga grundvattenflöden i kristallin urbergsmiljö. Det genomförda modelleringsarbetet har, så långt som det varit möjligt, baserats på tillgängliga storregionala data och exemplifieras med östra Småland.

1.2 Syfte

Denna projektrapport avser att ge ett fördjupat vetenskapligt underlag mot bakgrund av förekommande lämplighetsindikatorer samt motsvarande kriterier /Andersson et al. 2000/ och enbart med hänsyn till in- och utströmningsaspekter i ett storregionalt perspektiv.

Projektets mål har varit att:

- utvärdera konceptuella förenklingar och modellosäkerheter vid storregional grundvattenmodellering,
- genomföra en fördjupad och förutsättningslös analys av regionala flödesförhållanden i östra Småland.

Denna målformulering har inneburit ett genomförande som baseras på geovetenskapligt tillgängliga datasammanställningar från Smålandsregionen men där olika konceptuella antaganden analyserats.

1.3 Omfattning

Det storregionala modelleringsprojektet har genomförts med tonvikt på fyra huvudaktiviteter för att underbygga en god resultatdiskussion och kunna bedöma konceptuella osäkerheter när det gäller grundvattnets flödesregimer i mycket översiktliga skalor. Arbetet har omfattat följande aktiviteter:

- Genomgång av relevans och användbarhet av olika mätningar och fältundersökningar för kalibrering och verifikation av modellresultat.
- Hydrogeologiska konceptualiseringar och databaser för en tidigare nedisad urbergs-terräng, östra Småland, vid storregional modellering.
- Numerisk modellering av östra Småland med programkoden DarcyTools version 3.0.
- Analys och rapportering av modelleringsresultat samt bedömning av osäkerheter.

Inledningsvis identifierades lämpliga och tillgängliga data som underlag för storregional modellering. Likaså bedömdes eventuella data som kan verifiera eller kontrollera sådana modelleringsresultat. I de fall där det varit möjligt har underlagsmaterialets regionala medelvärden och variabilitet uppskattats. Exempel på parametrar och fältiakttagelser är: specifik avrinning, grundvattentryck, konduktivitets- och/eller transmissivitetsvärden, hydrauliska gradienter, hydrogeokemiska signaturer (paleohydrogeokemi, grundvattenkemi). Som ett komplement till denna utredningsfas genomfördes separata studier och sammanställningar av diabasgångars och plastiska zoners genomsläpplighet.

I nästa projektsteg utarbetades relevanta konceptuella alternativ med tillhörande databaser. Modelleringsförutsättningarna sammanställdes i ett separat arbetsmaterial (en Technical Note) och i ett separat indataprotokoll, en s k Task Description (TD), exemplifierat för östra Småland som bl a behandlar:

- Topprandvillkor (specificerat tryck) inklusive glaciala, glacifluviala och postglaciala avlagringar.
- Ytvattenförekomster (sjöar och vattendrag).
- Landhöjningsdata inklusive kustlinje.
- Initialvillkor inklusive salinitetsvillkor.

- Konduktivitetsfördelningar mot djup.
- Bergrundsdomäner i storregionalt perspektiv.
- Väsentliga strukturelement.
- Anisotropi och heterogenitetsaspekter för ingående parametrar.

Med utgångspunkt i de konceptuella alternativen genomfördes därefter den numeriska modelleringen i tre dimensioner med programkoden DarcyTools version 3.0 (DT30). De olika konceptuella förutsättningarna har betraktats att utgöra alternativ för osäkerhetsbedömningar. Utifrån modelleringarna analyserades resultat och sammanställdes i föreliggande rapport.

1.4 Metodik

Arbetet skall ses som ett huvudsakligen generiskt modelleringsprojekt vilket förankrats i tillgängliga geologiska och hydrogeologiska databaser. Tonvikt har legat på analys av involverade osäkerheter vid utvärdering av grundvattnets in- och utströmningsmönster samt flödesvägars utseende i anslutning till ett tänkt slutförvarsområde av 1 km². Förvarsområdet har tillåtits vara placerat var som helst inom beräkningsdomänen östra Småland på 500 m djup. Detta har i sin tur inneburit möjligheter till statistiska analyser med avseende på varierade tentativa förvarslägen.

Det bör tilläggas att studien ej ingående behandlar lokala variationer och trender av berggrundens genomsläpplighet inom respektive beräkningsdomän. I studien förutsätts att bergartsdomäner, deformationszoner har samma statistiska konduktivitetsfördelning inom hela östra Småland. (I studien ingår dock ett antal fall där berget har definierats med en lokal stokastisk heterogenitet.)

Erfarenheter från t ex pågående platsundersökningar visar emellertid att skillnader mellan olika platser kan vara stora. Detta innebär i sin tur att resultaten enbart skall ses som relativa och ej som kvantifierande.

Baserat på olika typer av konceptuella antaganden och generaliseringar (basfall) genomfördes ett antal (24 stycken) stationära grundvattenmodelleringar över östra Småland. Enbart trycksatt topprandvillkor tillämpades vid de stationära fallen. Därutöver genomfördes några (6 stycken) transienta modelleringar med densitetsberoende flöden under en landhöjningssekvens, också med trycksatt topprandvillkor. Som initialvillkor valdes en situation då området blivit isfritt i samband med den senaste landisens (Weichsel) recession.

För varje studerat förvarsläge och konceptuell förutsättning har modelleringsresultaten analyserats med avseende på:

- Flödesmönster för grundvattnet som passerar förvarsdjup.
- Utflödestid (genombrottsid) från förvaret (tid för advektivt flöde från förvaret på 500 m djup till utströmningsområde).
- Flödeslängder från förvarsdjup.
- Specifikt flöde vid förvarsdjup.
- Salinitetsutveckling vid densitetsdrivet flöde under landhöjningsskede (för vissa konceptuella modeller).

Integrerade analyser har genomförts med avseende på:

- Inströmning-utströmningssituation för respektive förvarsläge.
- Kartläggning av förvarsområden med såväl långa utflödestider som låga specifika grundvattenflöden.
- Kartläggning där områden med långa utflödestider, låga specifika flöden kombinerats med kompletterande information om långa flödesvägar.

Skälet till analysen med sammanvägda utflödestider och specifika flöden motiveras av "transportmotståndets" eller "F-parameterns" definition /se t ex EU RETROCK 2005/: $F = a_r L / q = a_w t_w$, där a_r är den flödesvåta ytan per volym berg och a_w är den flödesvåta ytan per volym strömmande vatten. L och q uttrycker transportvägens längd och darcy-hastigheten eller specifika flödet. I publikationen /Andersson et al. 2000/, den sk "Krav och kriterierapporten", presenteras hantering av hydrogeologiska samt transportrelaterade lämplighetsindikatorer och parametrar med avseende på krav och önskemål. Ett kvantitativt önskemål är enligt publikationen att $F > 10^{-4}$ år/m. För rimliga värden på a_r ($1,0 \text{ m}^2/\text{m}^3$) och L innebär detta ett önskemål på $q < 0,01 \text{ m/år}$ ($10 \text{ Liter}/(\text{m}^2, \text{år}) = 10 \text{ mm/år}$).

Utifrån de flödesberäkningar som utförts för olika djup under markytan för ett referensfall har jämförelser utförts mellan grundvattenflöden och den specifika ytavrinningen.

1.5 Rapportens disposition

Rapportens fokus är riktat mot det konceptuella underlaget för östra Småland i modellberäkningarnas resultat med relevanta slutsatser. Generella och grundläggande frågeställningar om in- och utströmning behandlas ej i denna rapport. För sådan belysning hänvisas till internationella textböcker.

- I kapitel 2 presenteras regionen östra Småland med tillgängliga undersökningar och övriga modellförutsättningar. Här redovisas i sammanfattande form topografi, geologi, hydrogeologiska förutsättningar etc.
- I kapitel 3 introduceras den numeriska beräkningsmetoden och den använda programkoden DarcyTools version 3.0. Vidare presenteras det matematiska angreppssättet för flödesberäkningarna osv.
- I kapitel 4 behandlas modelldomänens diskretisering, randvillkor och egenskaper i sammanfattning.
- I kapitel 5 redovisas modelleringens omfattning och strukturen för de konceptuellt olika modellerade fallen.
- I kapitel 6 redovisas resultaten för respektive beräkningsfall.
- I kapitel 7 analyseras och jämförs resultaten för de olika beräkningsfallen.
- I kapitel 8 ges en sammanvägd bedömning

2 Det storregionala området med tillgängliga undersökningar och övriga modellförutsättningar

I detta kapitel redovisas den underlagsinformation, i form av topografiska, hydrologiska, geologiska, hydrogeologiska och hydrogeokemiska data, som har använts för att beskriva modellområdets egenskaper på vilka de upprättade modellerna baseras.

I nedanstående text lämnas endast övergripande information för respektive dataset. För mer detaljerade beskrivningar hänvisas till angivna referenser i bilaga 1, vilket redovisar allt underlagsmaterial som sammanställts och beaktats inför arbetet med den konceptuella modelleringen. Materialet redovisas uppdelat i olika ämneskategorier. I bilagan menas med ett kryss i kolumnen, "använt", att materialet direkt använts, ett kryss inom parentes betyder att underlagsmaterialet ger en allmän bild som kan användas för konceptualisering och/eller tilldelning av egenskaper.

Modellområdet (figur 2-1) har definierats utifrån de dominerande avrinningsområdena för östra Småland och att, under antagande i ett storskaligt perspektiv, ytvattendelare sammanfaller med grundvattendelare. Dessa avrinningsområden tillhör Emån, Virån, Marströmmen samt utgörs av kustområdena omkring Oskarshamn och Simpevarpshalvön.



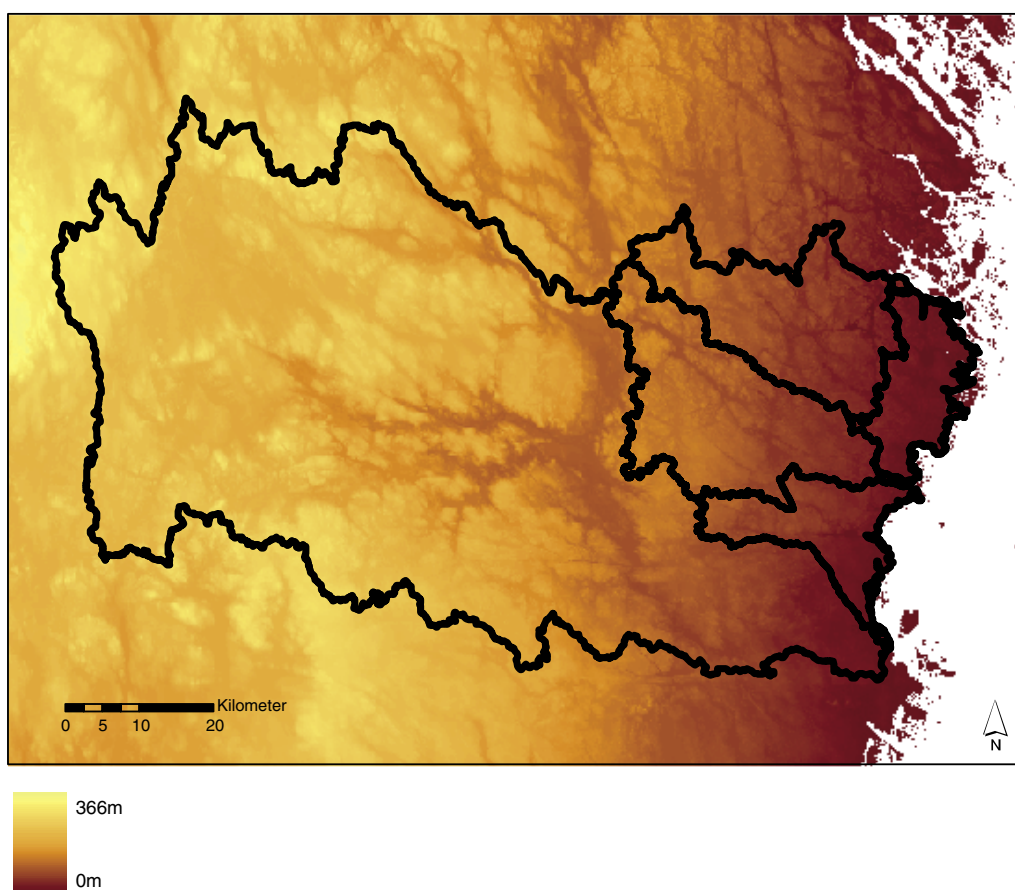
Figur 2-1. Modellområdet har definierats utifrån de dominerande avrinningsområdena i regionen. Den rödmarkerade avgränsningen redovisar det regionala modellområdet för platsbeskrivningar, Oskarshamns kommun.

De ämnesvisa konceptuella beskrivningarna ligger till grund för det referensfall som modellerats. Utifrån referensfallets parameteruppsättning har olika kompletterande variationsfall studerats och jämförts. Detta för att, i enlighet med projektets mål, kunna presentera såväl ett så verklighetsanknutet fall som möjligt över östra Småland som möjliggöra känslighetsstudier och osäkerhetsbedömningar.

2.1 Topografisk relief

2.1.1 Höjddata

Modellområdets topografiska relief tillhör huvudsakligen delar av det sönderbrutna, delvis nederoderade subkambriska peneplanet. De västligaste delarna i modellområdet tillhör den sydsmåländska urbergsslätten. Områdets högsta nivåer ligger där ca 360 m över havet och peneplanet sluttar mot Östersjön där kambriskt täckberg uppträder vid Kalmarsund. Utmed sprickzoner i den sönderbrutna terrängen har de dominerande vattendragens dalgångar utbildats /SNA 1994/. Topografiska data är hämtade från Lantmäteriets höjddatabas med 50 m upplösning /Lantmäteriverket 2000/, figur 2-2.



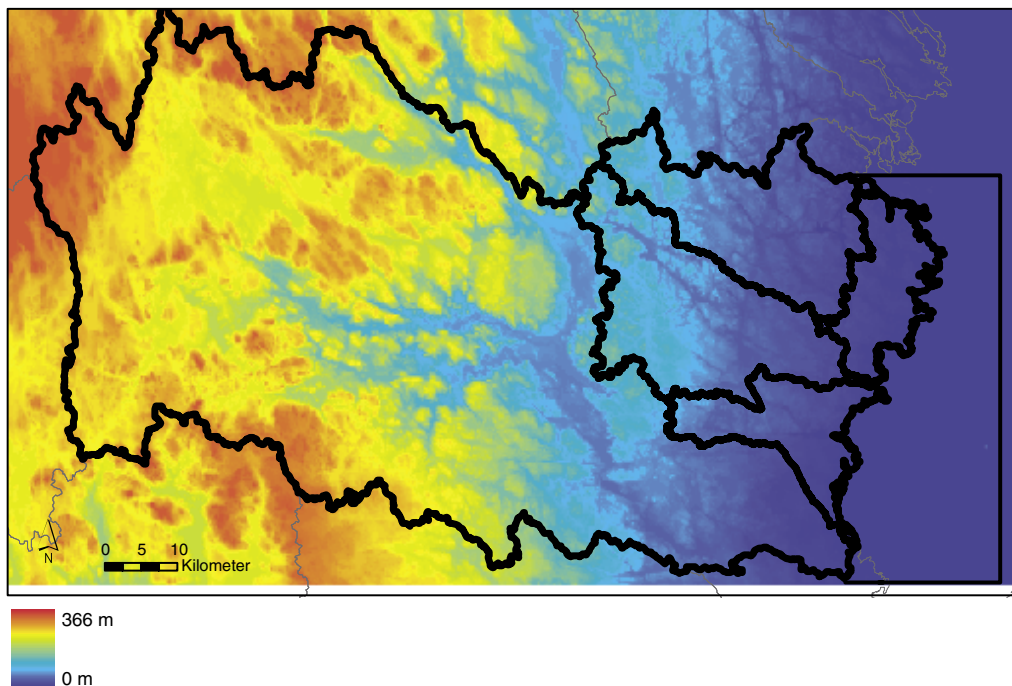
Figur 2-2. Lantmäteriverkets höjddata för modellregionen (50 m upplösning).
Ur GSD-Höjddatabasen ©Lantmäteriverket Gävle 2001, Medgivande M2001/5268.

2.1.2 Batymetri

Detaljerad djupinformation finns tillgänglig för området som omfattas av SKB:s platsundersökningar i Oskarshamn /SKB/Sjöfartsverket 2005/. För övriga delar av modellområdet saknas detaljerad djupdata. För modellen utnyttjades därför en kombination av detaljerad djupinformation med djupdata hämtad ifrån sjökort genom digitalisering av djupkurvor /Sjöfartsverket-Svenska Kryssarklubben 2003/. Slutprodukten utgörs av en batymetrisk modell med 50 m upplösning som framställts genom kriging. Den batymetriska modellen baseras på en kustlinje hämtad ifrån Lantmäteriverkets översiktskarta.

2.1.3 Topografisk modell

Utifrån den batymetriska modellen och höjddatabasen skapades en sammanhängande modell för topografisk och batymetrisk data för hela modellområdet. Modellens upplösning är 50 m, se figur 2-3. Eftersom simuleringarna genomförts med trycksatt topprandvillkor har höjddata varit styrande för de gradienter som tillämpats i modelleringarna. Denna approximation är möjlig om de hydrauliska konduktiviteterna för den ytliga berggrunden är påtagligt lägre än nettonederbördens storlek.



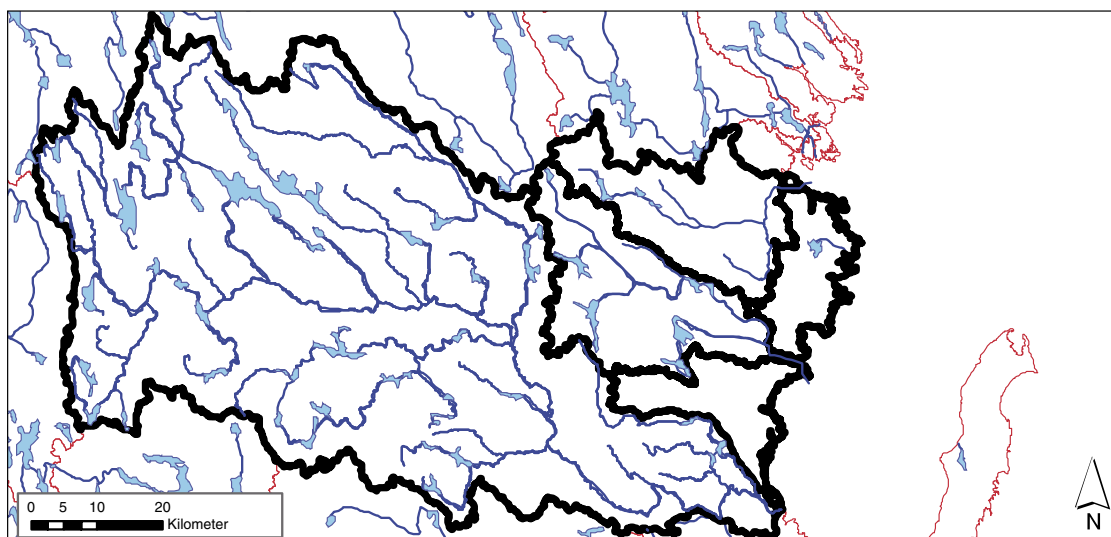
Figur 2-3. Kombinerad höjd- och batymetrisk modell. Linjen i öster markerar modellområdets utbredning i havet. Av sekretesskäl redovisas inte batymetrien. Ur GSD-Höjddatabasen ©Lantmäteriverket Gävle 2001, Medgivande M2001/5268.

2.2 Hydrologi

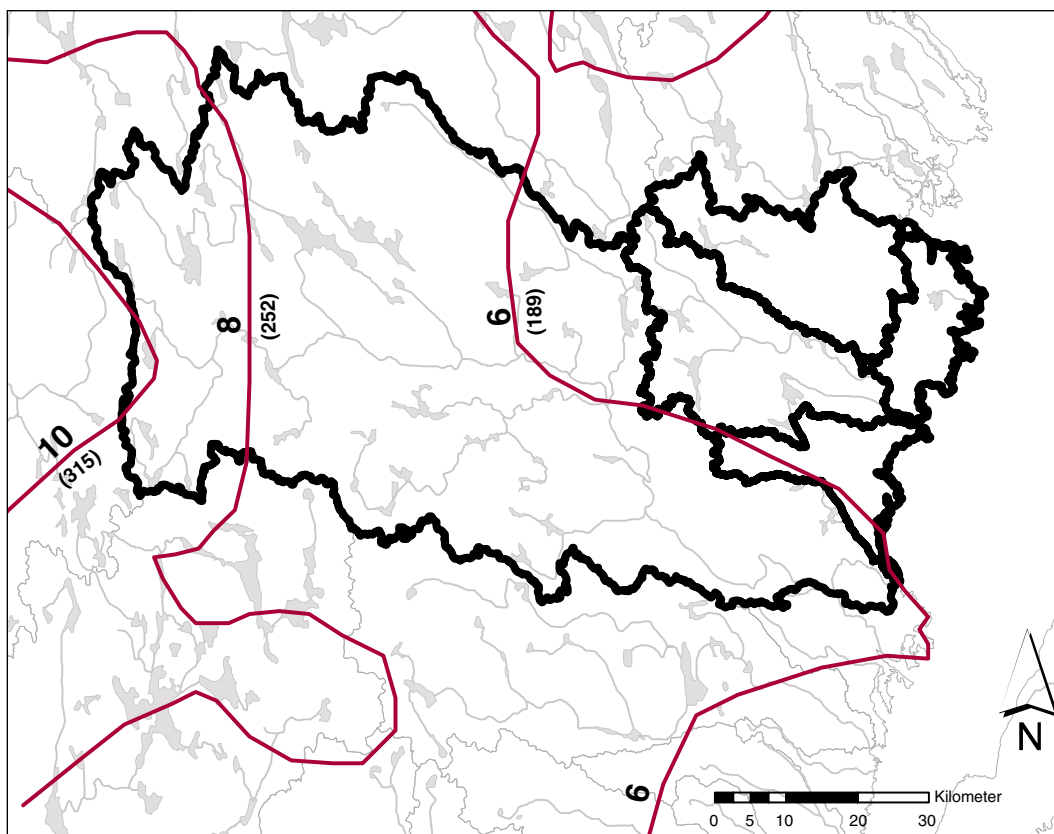
Generellt sett så uppvisar de sydöstra delarna av Sverige landets lägsta värden för den specifika avrinningen, som i sin tur avspeglar den regionala nettonederbörden. Detta beror på en relativt sett låg årsmedelnederbörd i kombination med måttlig till hög evapotranspiration. Eftersom modellregionen är vidsträckt från Östersjön till småländska höglandet innebär det emellertid att nederbörden skiljer sig stort med varierande nettonederbörd till följd. Vid kusten är nettonederbörden ca 170 mm/år och vid den västra modellranden ca 310 mm/år.

I den svenska berg/moränterrängen överstiger ytlagens infiltrationskapacitet i de flesta fall nederbördsintensiteterna. Detta innebär i sin tur att merparten av nettonederbörden omsätts som grundvatten och att de värden som framgår av specifik avrinning kan betraktas som översiktlig grundvattenomsättning för ett område.

Hydrologisk information (avrinningsområden, vattendrag och sjöar) inhämtades ifrån SMHI:s databaser /SMHI 2002ab/. I vissa fall saknas vattendrag i SMHI:s material och därför utfördes kompletterande digitalisering från översiktskartor eller motsvarande. Hydrologisk data som använts för modellen redovisas i figur 2-4. Avrinningsdata hämtades ifrån /SMHI 1996/ i form av medelvärden för perioden 1961–1990 angivet i l/(s, km²) samt inom parentes angivet i mm/år (l/(år, m²)), se figur 2-5.



Figur 2-4. Hydrologisk data (avrinningsområden, vattendrag och sjöar) erhållna från /SMHI 2002ab/. Kompletterande digitalisering har skett i de fall SMHI:s data var ofullständiga.



Figur 2-5. Avrinning 1961–1990, $l/(s, km^2)$, värden i parentes anger avrinning i $mm/år$ ($l/(år, m^2)$) /SMHI 1996/.

2.3 Geologi

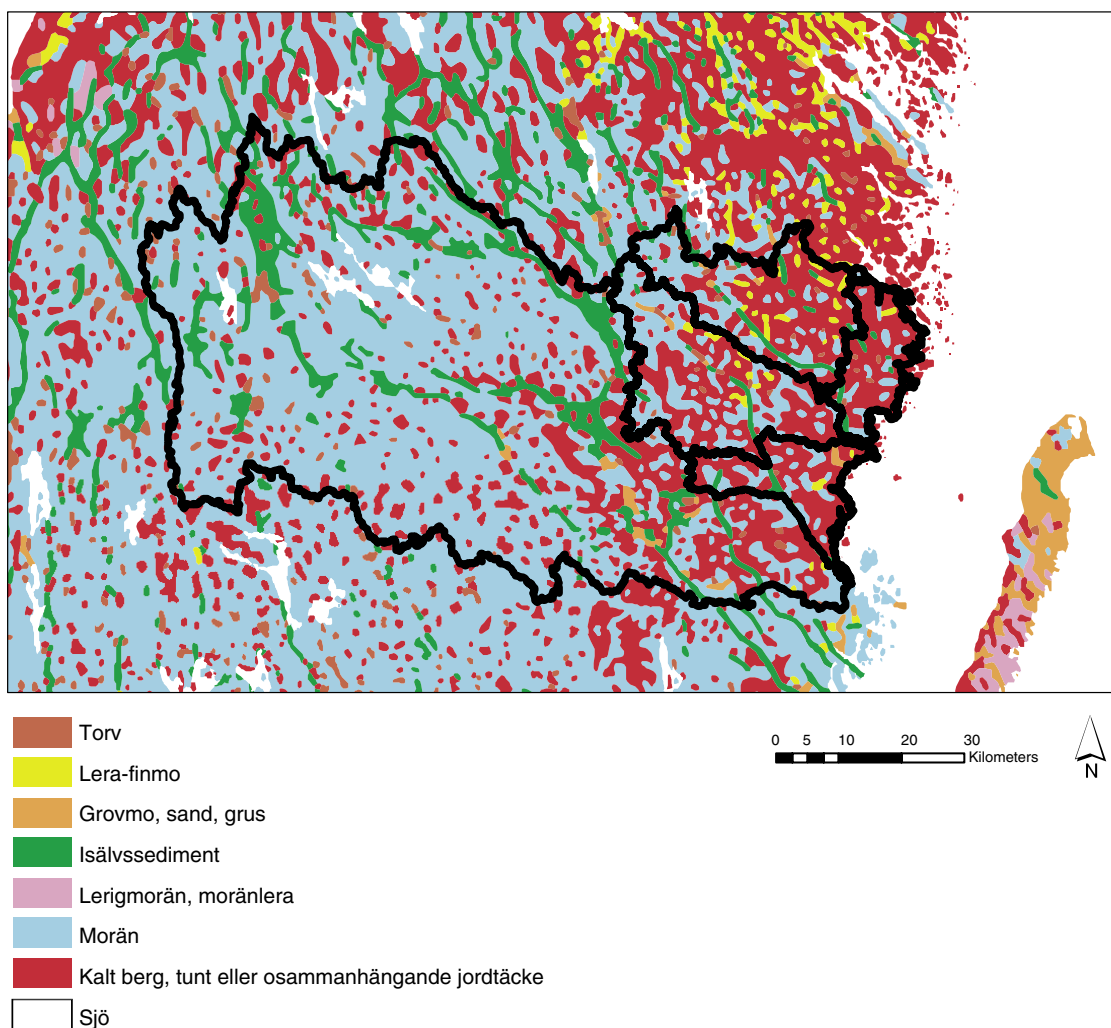
Nedanstående geologiska översikt syftar enbart till att ge underlag för den hydrogeologiska konceptualiseringen. Enhetligt modernt kartunderlag för såväl kvartärgeologi som bergsgeologi saknas för modellregionen. En omfattande regional revidering och sammanställning pågår dock inom ramen för SGU:s verksamhet, ”Projekt Småland regionalt berg”, men informationen har enbart delvis kunnat nyttjas /SGU 2003/.

2.3.1 Kvartära avlagringar

Geologiskt sett domineras det svenska landskapet av mycket gamla kristallina bergarter med överlagrande jordarter som är ett resultat av de senaste nedisningarna. Inlandsisens nedmalande effekt på underlaget har gett upphov till en vidsträckt moräntäckning, ca 70 %, av landets yta. Ur isälvar 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 vanligtvis bildade efter inlandsisens avsmältning, dvs under de senaste 14 000 åren /från SKB 2003/. Modellområdet ligger till stora delar över högsta kustlinjen (HK), 100 m över havet. Den helt dominerande jordarten är morän. Stråk med isälvsediment, dvs åsar, kames och deltan, löper i huvudsakligen NV/SO-lig riktning och

de är vanligen lokaliserade till större dalgångar. Förekommande deltan ligger i anslutning till HK. Den största utbredningen av isälvsediment förekommer i trakterna runt Hultsfred och Nässjö. Issjöar har haft viss utbredning och därav resulterande finsediment påträffas i vissa dalgångar. Förekomst av finsediment under HK är mycket begränsad. Isavsmältningen i modellregionen skedde från sydost mot nordväst och området blev isfritt under en period av 400–500 år (från ca 13 900 till 13 400 år sedan) /SNA 1994/.

Detaljerade kvartärgeologiska kartor (skala 1:50 000, 1:250 000) finns inte tillgängliga för hela modellområdet. Den enda datakällan med full täckning utgörs av SGU:s nationella jordartsdatabas i skala 1: 1 000 000 /SGU 2005d/, figur 2-6. Jordartskartan grundar sig på SGU:s kartläggningar och visar huvuddragen av områdets jordartsgeologi. Jordartsindelningen är förenklad och kartans skala har medfört kraftig generalisering, t ex är isälvsedimenten i åsarna överdrivna för att de ska framträda tydligt.



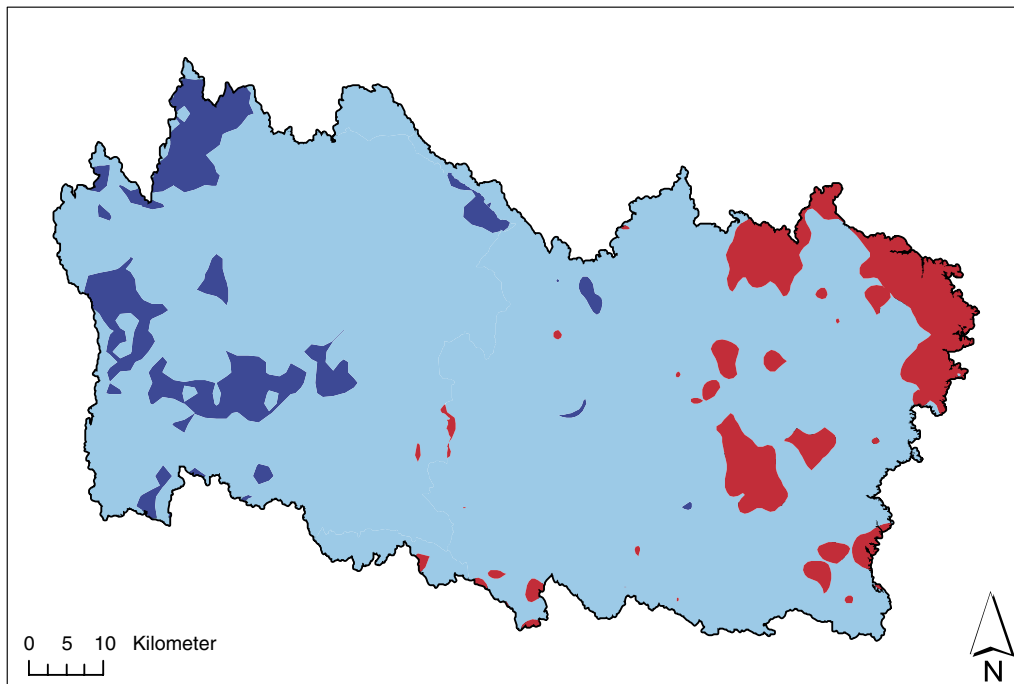
Figur 2-6. Kvartära avlagringar från SGU:s nationella databas. Ur SGU:s databaser © Sveriges geologiska undersökning Dnr: 30-414/2005 /SGU 2005/.

2.3.2 Jordmäktighet

Jordmäktigheten inom modellområdet finns beskriven i de regionala översiktstudierna utförda av SGU på uppdrag av /SKB 1998ab, 1999ab/. Jordmäktigheter i översiktstudierna baseras på uppgifter i SGU:s brunnarkiv, figur 2-7.




2.3.3 Glacifluviala sediment

De glacifluviala sedimenten i regionen är väsentliga akviferer. En beskrivning av grundvattentillgångar inom modellområdet återfinns i de regionala översiktstudierna /SKB 1998ab, 1999ab/. Informationen baseras på SGU:s hydrogeologiska kartor /SGU 1981, 1987, 1989/. Utbredningen av de glacifluviala avlagringarna är överdriven för att passa aktuell kartskala och detta innebär att åsar i kartan återges med ca 600–1 000 m bredd, figur 2-8. I verkligheten uppskattas åsarnas bredd ligga inom intervallet 100–300 m. Den kraftigt överdrivna utbredningen av åsar med permeabelt isälvsmaterial bör beaktas vid modellkonceptualiseringen då detta annars medför att åsarnas betydelse för vattenflödet i modellen överdrivs.

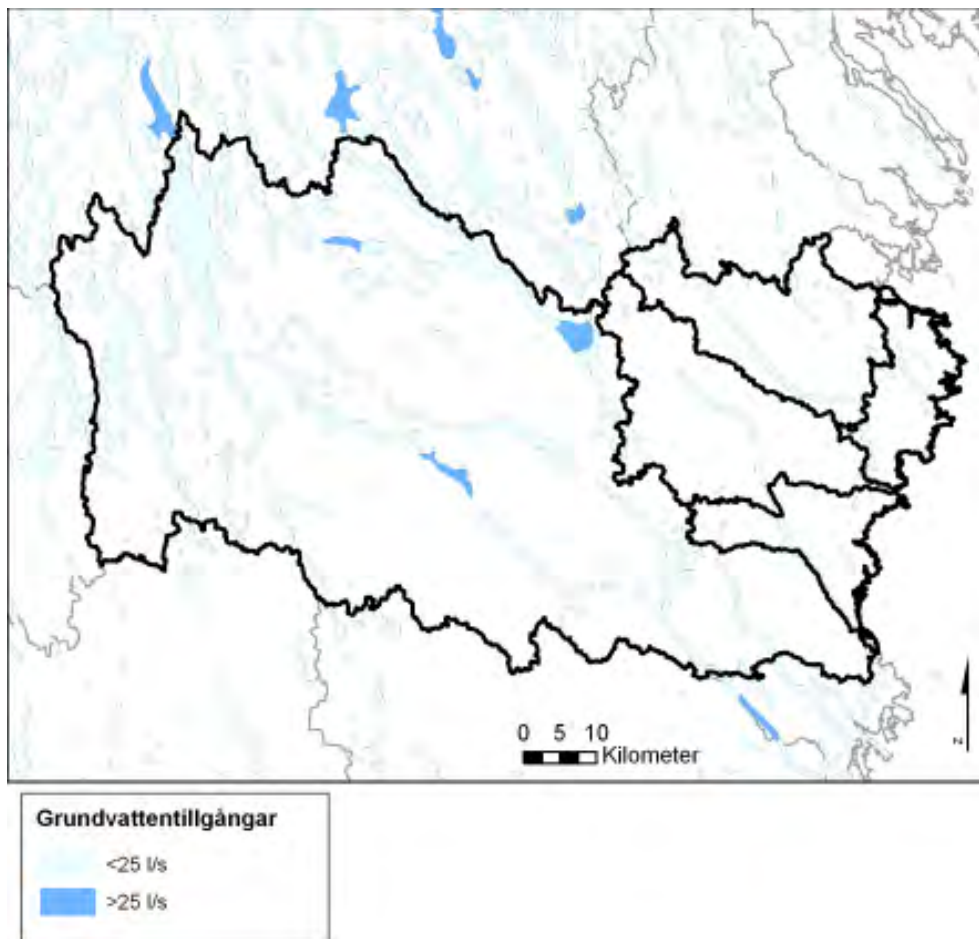


Jordmäktighet-regional

Djup

	0–1 m
	1–5 m
	5–10 m

Figur 2-7. Regional jordmäktighet från SGU, Ur SGU:s databaser © Sveriges geologiska undersökning, Dnr: 30-414/2005 /SGU 2005/.

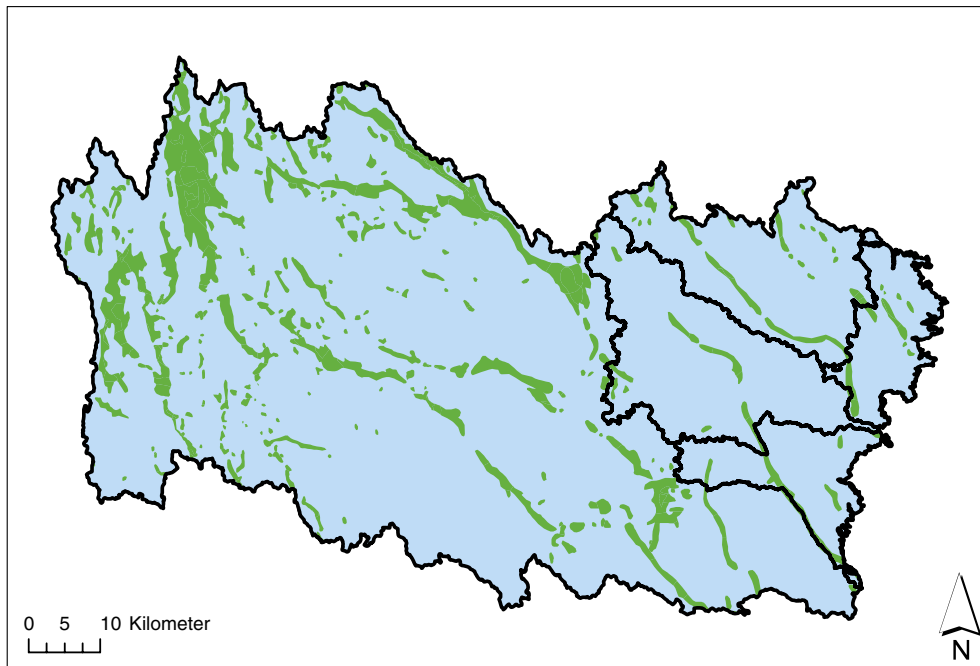


Figur 2-8. De glacifluviala sedimenten framgår indirekt av kartmaterial över de väsentligaste grundvattentillgångarna inom modellregionen. Ur SGU:s databaser © Sveriges geologiska undersökning, Dnr:30-414/2005 /SGU 2005/.

2.3.4 Jordlagrens konceptualisering

Kartan över de mest väsentliga regionala grundvattentillgångarnas geologiska formationer (figur 2-8) har valts som det primära underlaget för den storregionala modellrepresentationen av de kvartära avlagringarna även om den nationella jordartsdatabasen är mer detaljerad. Den ökade detaljrikedomen i den nationella jordartsdatabasen bedöms ej tillföra den storregionala hydrogeologiska modelleringen större tillförlitlighet i den skala som frågeställningarna analyseras. Konceptualiseringen av jordlagren utgår alltså från de glacifluviala stråken kompletterade med resterande områden som domineras av morän med varierande mäktighet, (se figur 2-9).

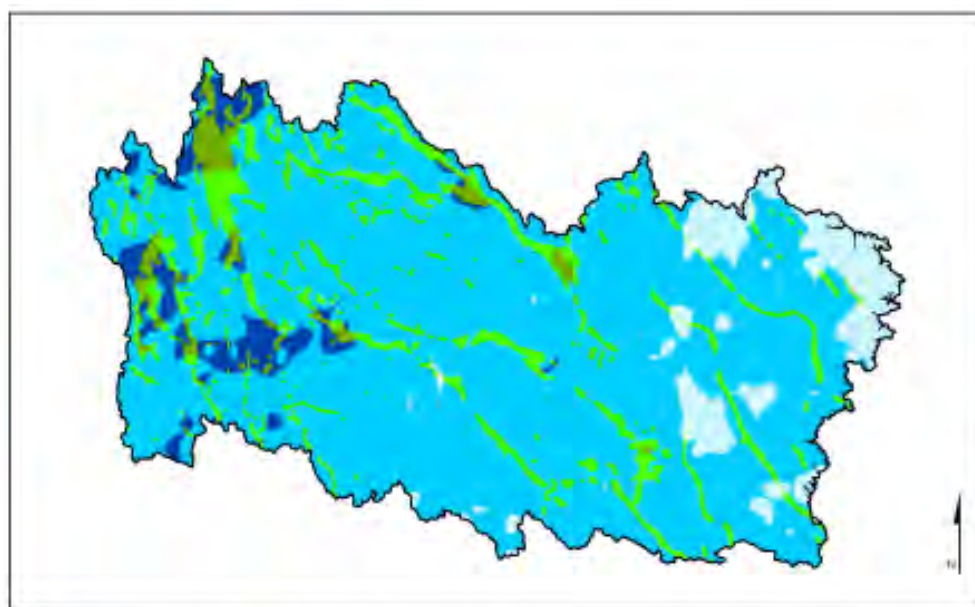
Mäktigheten av de kvartära avlagringarna anges i den karta över regional jordmäktighet som framtagits av SGU (figur 2-7). Eftersom jordmäktigheten i grundvattenmodellen måste definieras av ett specifikt värde utfördes en omklassificering av jordmäktighetskartan där mäktigheter anges i intervall. I figur 2-10 anges mäktighetsintervallen för den regionala jordmäktighetskartan samt den specifika mäktighet som ansatts för den konceptuella modellen.



Konceptuell modell - Kvartära avlagringar

- Isälvsmaterial
- Morän

Figur 2-9. Konceptuell modell över utbredning av kvartära avlagringar i modellområdet. Modellen baseras på material från SGU:s databaser © Sveriges geologiska undersökning, Dnr: 30-414/2005 /SGU 2005/.



Jordmaktighet - Morän/Isälvsmaterial

- | | |
|--|---|
| Morän-8m | Isälvsmaterial-8m |
| Morän-3m | Isälvsmaterial-3m |
| Morän-1m | Isälvsmaterial-1m |

0 5 10 20 Kilometer

Figur 2-10. Den konceptuella jordlagermodellen med klassning av jordmaktigheter.

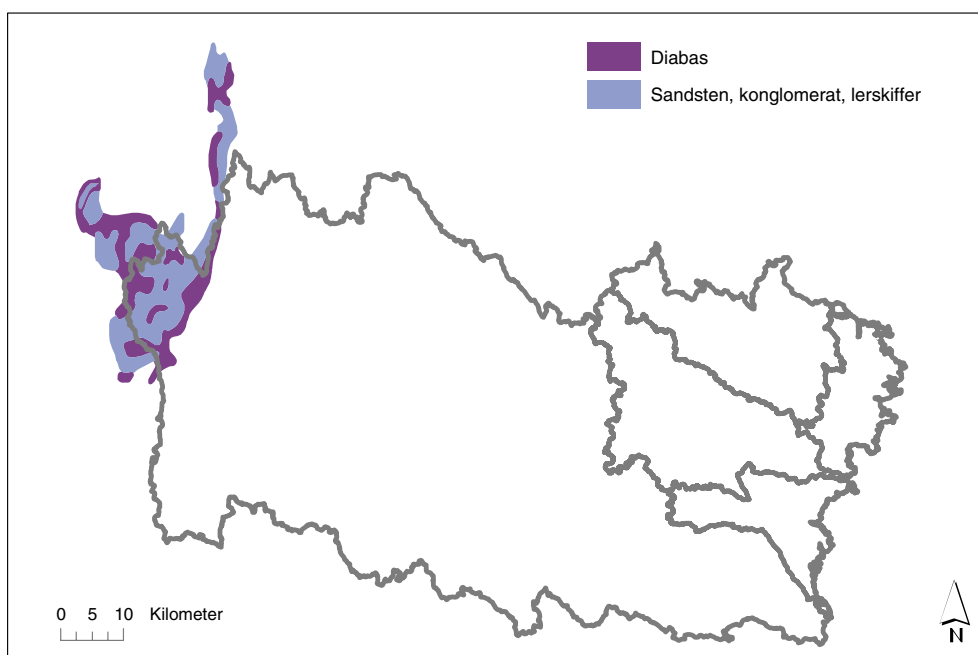
2.3.5 Berggrunden

Berggrunden inom modellområdet domineras av bergarter som hör till det ”Transskandinaviska magmatiska bältet (TMB)”. Detta bälte sträcker sig från Blekinge i södra Sverige till Lofotenområdet i Norge. Bergarternas ålder skiftar mellan 1 850 och 1 650 miljoner år. I modellområdets del av TMB är bergarternas ålder ca 1 800 miljoner år och de består huvudsakligen av olika typer av djupbergarter med varierande sammansättning från gabbro, diorit och monzodiorit till granit-alkaligranit, monzogranit och monzonit. Även sura ytbergarter av vulkaniskt ursprung förekommer i vida stråk med huvudsakligen ONO-lig riktning. Yngre djupbergarter med en ålder av ca 1 450 miljoner år förekommer kustnära och tillhör den s k Götemarksviten /SGU 2003/.

I den västra delen av modellregionen uppträder Almesåkragruppens sedimentära bergarter och med dem associerade horisontella diabaser som sannolikt hör till de s k Blekinge-Dalarnadiabaserna, (se figur 2-11). Almesåkrgruppen består av sandsten, skiffer och konglomerat med nämnda skivformiga diabasintrusioner. Mäktigheten uppskattas till ca 1 200 m. En detaljerad stratigrafi är svår att fastställa på grund av den stora mängden diabasintrusioner och senare tektoniska händelser. Diabasintrusionerna uppskattas ha en mäktighet överstigande 70 m och täcker en yta större än 100 km² vilket utgör cirka en tredjedel av Almesåkrgruppens yta. Åldern på Almesåkrgruppen uppskattas till ca 1 000 miljoner BP /Rodhe 1986/.

Vertikala långsträckta breda (50–100 m) diabasgångar, som också hör till de s k Blekinge-Dalarnadiabaserna med en ålder av ca 930 miljoner år, uppträder med ungefärligen nord-sydlig riktning. Förekomsten av dessa nord-sydliga diabasgångar är mer frekvent i den nytolkade berggrundskarteringen (Lundqvist L, 2006, pers. kom.) än i tidigare beskrivningar över regionen (se vidare avsnitt 2.3.7).

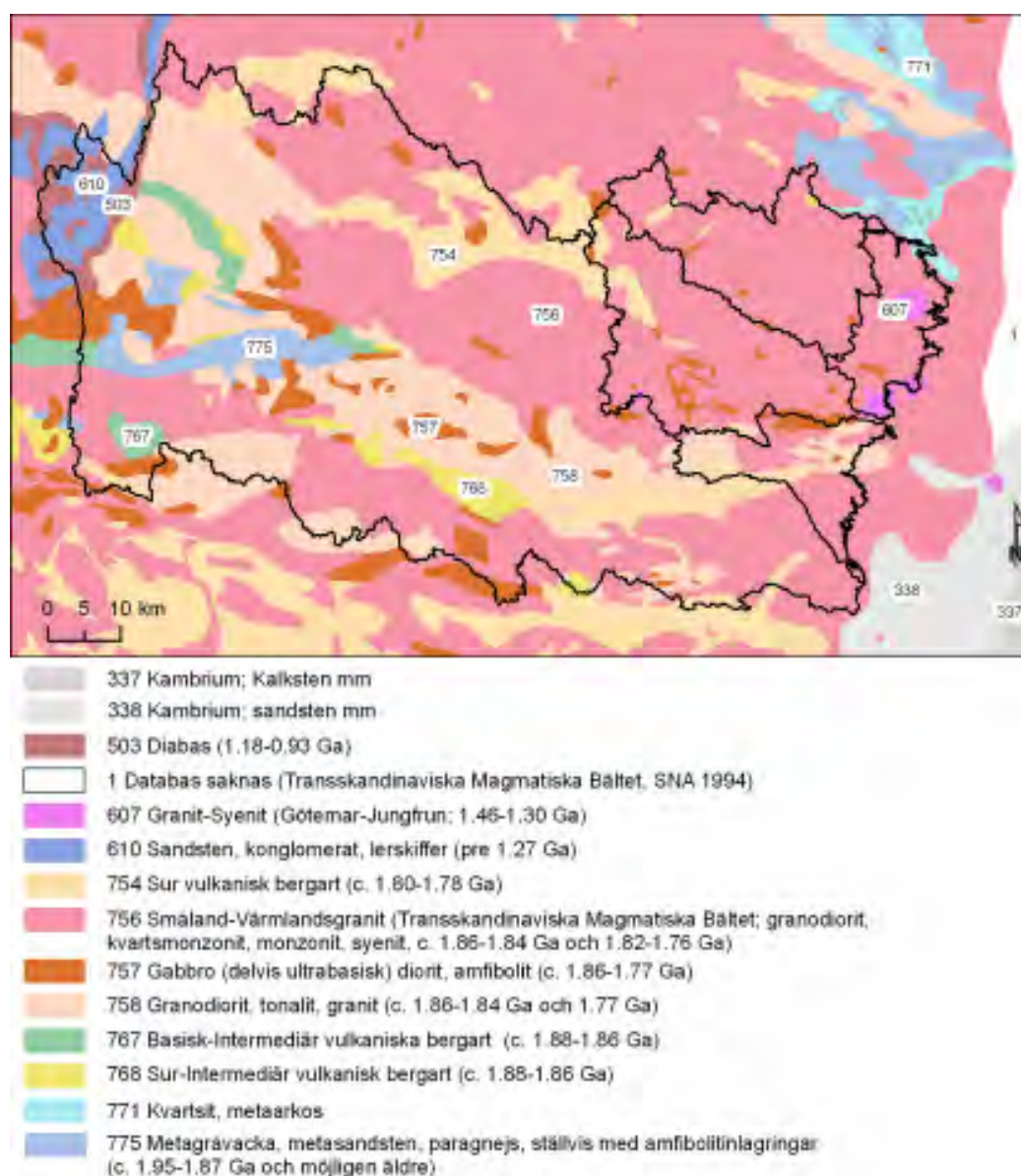
Paleozoiska bergarter förekommer i modellområdets östligaste under Östersjöns nivå. Den sedimentära berggrunden utgörs av underkambriska sandstenar vilka överlagras av kambriska och ordoviciska kalkstenar samt skiffrar.



Figur 2-11. Överikt av Almesåkrgruppens geologi samt läge inom modellområdet, från SGU:s nationella berggrundsdatabas. Ur SGU:s databaser © Sveriges geologiska undersökning Dnr: 30-414/2005 /SGU 2005/.

Inom TMB-regionen uppträder ett område, det s k Oskarshamn-Jönköpingsbältet (OJB), med bergarter som uppvisar mer kalkalkalin geokemisk sammansättning. Huvudsakligen granitoida bergarter med granodioritisk till tonalitisk sammansättning dominerar inom OJB-bältet. Bergarterna i denna delregion uppvisar en förhöjd grad av deformation jämfört med omgivande TMB-bergarter. Såväl plastisk som spröd deformation förekommer /SGU 2003/.

Detaljerade berggrundskartor (skala 1:50 000, 1:250 000) finns inte tillgängligt för hela modellområdet. En regional kartering av Kalmar- och Jönköpings län (skala 1:250 000) är under utförande av SGU, men endast kartan för Kalmar län fanns tillgänglig vid tidpunkten för denna studie (hösten 2005). Den senaste litologiska tolkningen med full täckning över modellområdet utgörs av en karta (databas) över Fennoskandiska skölden i skala 1: 2 000 000 /SGU 2005c/, figur 2-12. Eftersom svensk översättning av litologier för denna karta saknas baseras de svenska översättningarna i denna rapport på motsvarande litologier i Sveriges nationalatlas – Berg och jord /SNA 1994/ med kompletterande uppgifter från SGU (Lundqvist L, 2006, pers. kom.).



Figur 2-12. Utdrag ur bergartskartan den Svenska delen av den Fennoskandiska skölden /SGU 2005c/. Ur SGU:s databaser © Sveriges geologiska undersökning, Dnr: 30-414/2005 /SGU 2005/.

2.3.6 Berggrundens konceptualisering i litologiska enheter

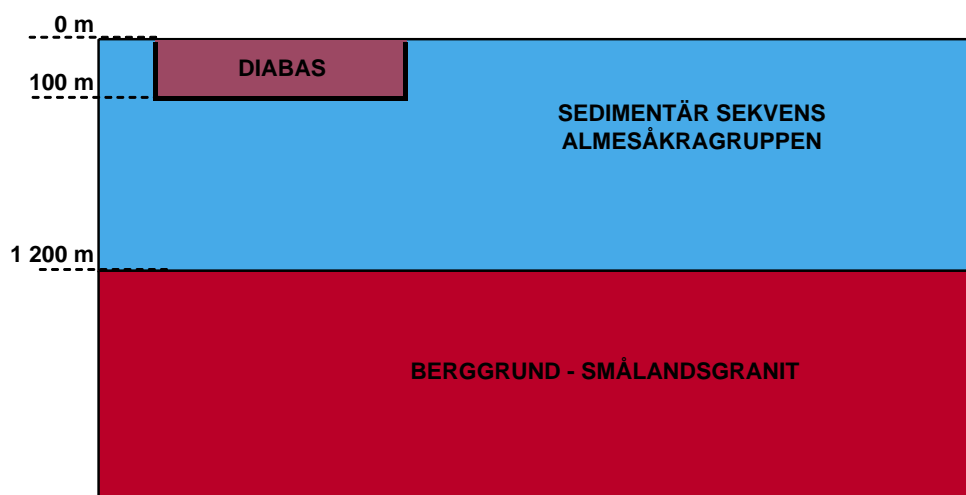
Utbredningen av de litologiska enheterna för modellen har hämtats från SGU:s nationella berggrundsdatabas, se avsnitt 2.3.5. I brist på data angående de litologiska enheternas utbredning mot djupet antas bergartskropparna ha samma utsträckning mot djupet som på ytan. Detta innebär att bergartskartan i figur 2-12 har samma utseende ned till modellens botten.

Almesåkragruppens mäktighet ansätts i modellen till 1 200 m och områden som är diabastäckta har ansatts en mäktighet på 100 m i enlighet med Rodhe, 1986, figur 2-13.

2.3.7 Konceptualisering av deformationszoner och gångbergarter

Den enda datamängd med information om strukturer i form av deformationszoner och diabasgångar som har full täckning över modellområdet utgörs av de regionala översiktarna, framtagna av /SKB 1998a,1999a/. Information om deformationszoner och diabasgångar inom Kalmar län finns även redovisat i den regionala berggrundskartan för Kalmar län /SGU 2005ab/.

Beträffande deformationszoner bedömdes de regionala översiktarna /SKB 1998a,1999a/ innehålla fler spröda strukturer (skjuvzoner) än vad som redovisas i den regionala berggrundskartan för Kalmar län /SGU 2005ab/. Detta kan vara en "generaliseringseffekt" eftersom översiktsstudierna fokuserar på SKB:s intresseområden där undersökningsunderlaget beträffande strukturer är omfattande. I SGU:s karta för Kalmar /SGU 2005ab/ är målsättningen att redovisa strukturer med samma detaljeringsgrad för hela området utan fokus på SKB:s verksamhet. För aktuell studie bedömdes SKB:s regionala översiktsstudier vara bäst lämpade som underlag för spröda deformationszoner vilket innebär att utgångsmodellen innehåller fler strukturer med ökad permeabilitet vilket i sin tur innebär ökad konservatism med avseende på flödesaspekter för ett slutförvar.

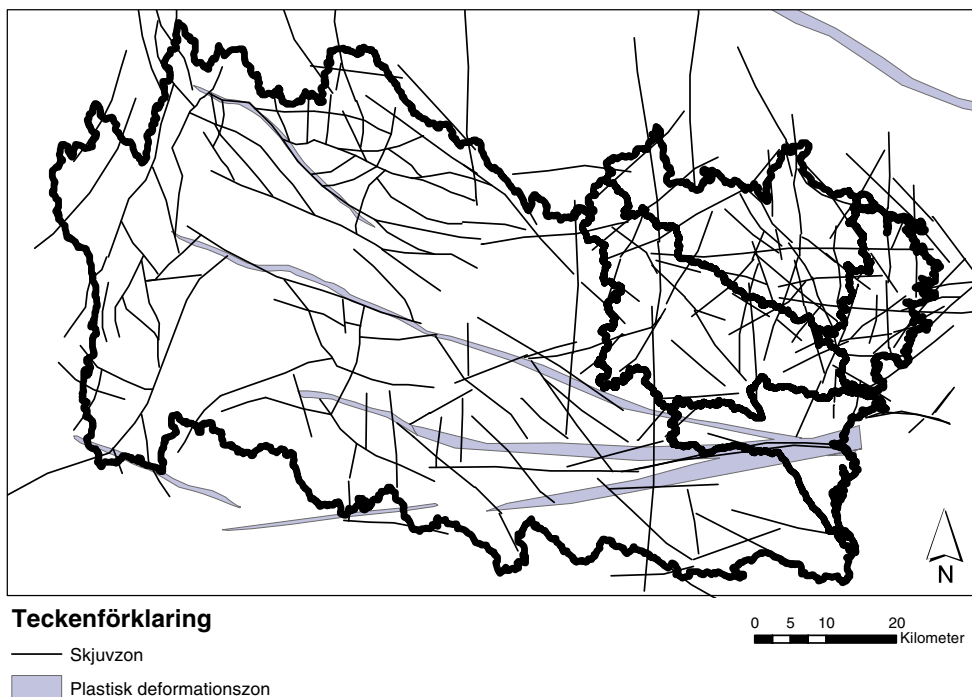


Figur 2-13. Konceptuell modell över Almesåkragruppens uppbyggnad.

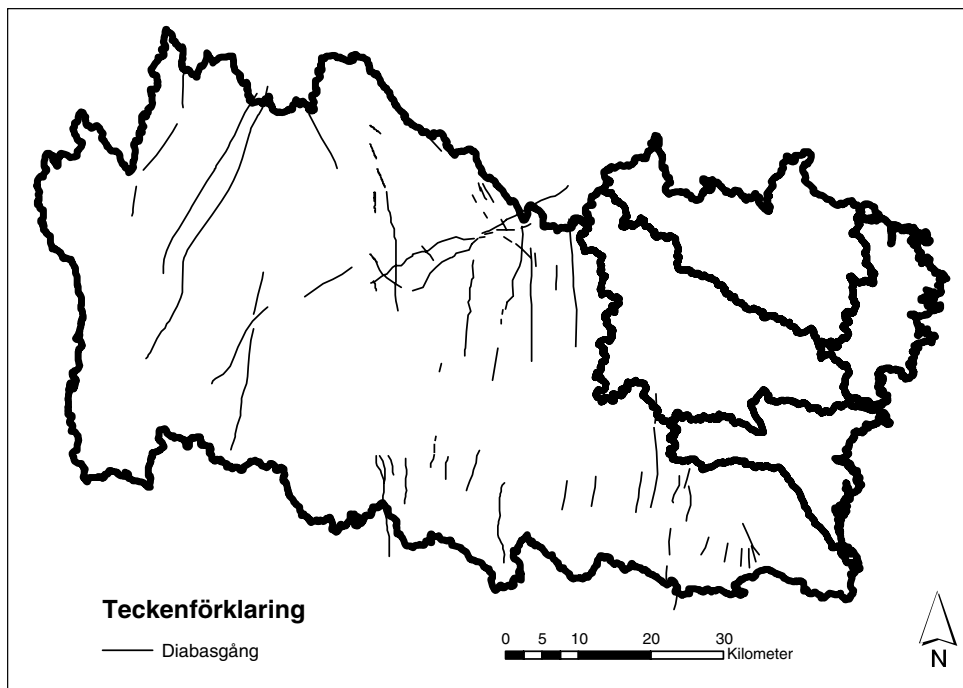
Enligt ovan förekommer en betydande plastisk deformationszon i modellområdet i form av det s k Oskarshamn-Jönköpingsbältet (OJB). Detta karakteriseras av både plastiska och spröda strukturer /SGU 2005ab/, (se figur 2-14). Utmärkande för OJB är en påtaglig foliation vars riktning varierar mellan ost-västlig till VNV-lig.

SGU:s undersökningar i samband med den regionala berggrundskartan för Kalmar län /SGU 2005ab/ innebar att ny geofysisk data tolkades samt att omtolkning av äldre data genomfördes. Omtolkningen har resulterat i en kartbild med ökad frekvens av nord-sydliga diabasgångar vilka legat till grund för den geologiska konceptualiseringen. Eftersom kartan över Kalmar län endast täcker en del av modellregionen kompletterades bilden över diabasgångars förekomst med data från den regionala översikten för Jönköpings län /SKB 1999a/ för övriga delar, (se figur 2-15). En genomsnittligt värde för diabasgångarnas bredd i regionen är ca 100 m, (Lundqvist L, 2006, pers. kom.).

I äldre strukturgeologisk litteratur från regionen påtalas förekomst av subhorisontella deformationszoner /Nordenskjöld 1944/. Endast ett litet antal mindre subhorisontella deformationszoner påträffades vid anläggningen av Äspölaboratoriet i Oskarshamn. Än så länge har inga storregionala subhorisontella deformationszoner rapporterats (våren 2006) från SKB:s pågående platsundersökningar för slutförvar av använt kärnbränsle i Oskarshamns kommun. SKB-undersökningarna i den östra delen av modellområdet indikerar än så länge endast subvertikala deformationszoner (vertikala till ca 45 graders stupning). Förekomst av subhorisontella överskjuvningar rapporteras dock i anslutning till Almesåkrgruppen /Rodhe 1987/.



Figur 2-14. *Strukturer inom modellområdet hämtade ifrån de regionala studierna av /SKB 1998a, 1999a/. Ur SGU:s databaser © Sveriges geologiska undersökning /SGU 2005/. Dnr: 30-414/2005.*



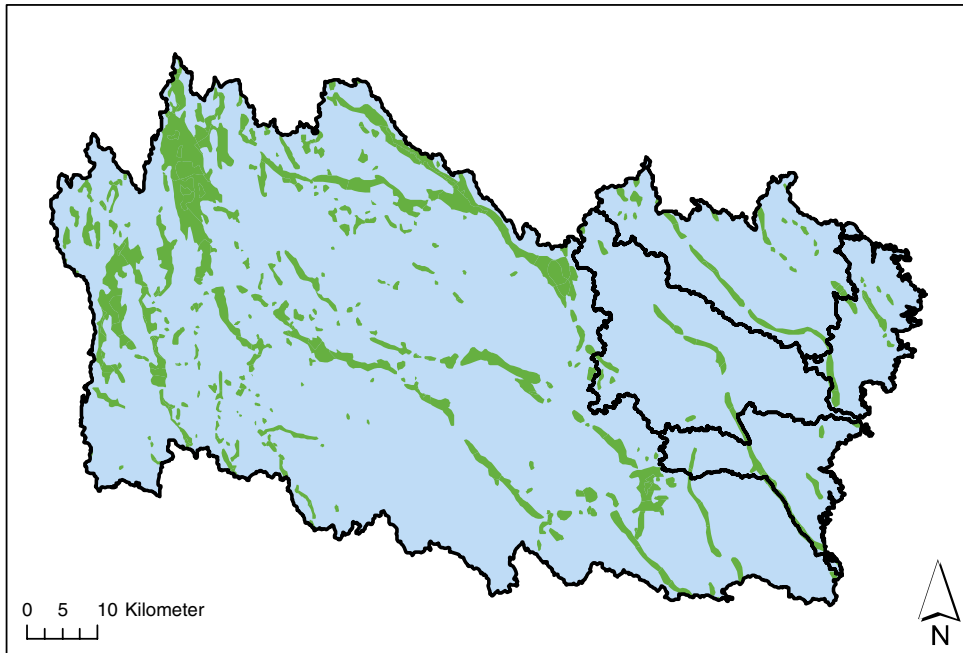
Figur 2-15. Dioritgångar i modellområdet. I Jönköpings län hämtade ifrån de regionala studierna av SKB 1999. I Kalmar län hämtade ifrån berggrundskartan för Kalmar län, SGU ser Ba66 /SGU 2005/. Ur SGU:s databaser Sveriges geologiska undersökning, Dnr: 30-414/2005 /SGU 2005/.

2.4 Hydrogeologisk domänindelning

2.4.1 Kvartära avlagringar – hydrogeologi

Hydrogeologiska enheter för de kvartära avlagringarna redovisas i figur 2-16. Medelärden på hydraulisk konduktivitet är erfarenhetsmässigt valda /se exempelvis Knutsson och Morfeldt 2002/. I figur 2-17 visas en sektion av den konceptuella modellen för de kvartära avlagringarna samt tilldelade konduktivitetsvärden. På grund av begränsningar i modellverktyget måste det översta lagret som återger de kvartära avlagringarna representeras av 10 m konstant cell tjocklek i numeriska grundvattenmodellen. Egenskaperna i figur 2-17 skalades därför till en modell med 10 cellmäktighet. Detta betyder att K-värdena skalas så att samma flöde erhålls i horisontal- och vertikalled som i den konceptuella modellen, se figur 2-18. Skalningen är således endast en anpassning till modellverktyget och medför inga förändringar i vattenförande egenskaper.

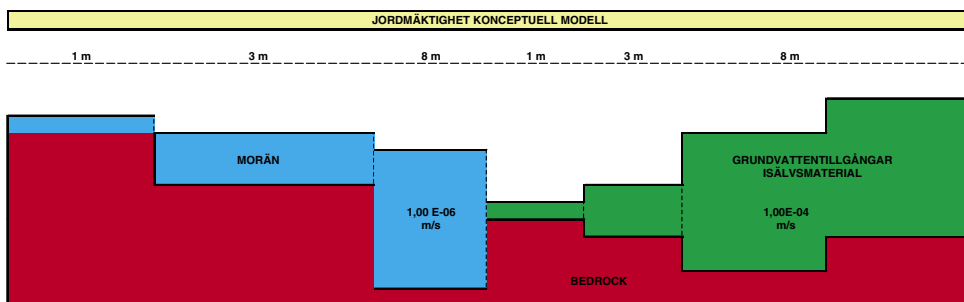
När det gäller grundvattennivåer i isälvsediment så antas dessa, på grund av de höga transmissiviteterna, kunna approximeras med topografiska ytnivåerna för omgivande jordarter.



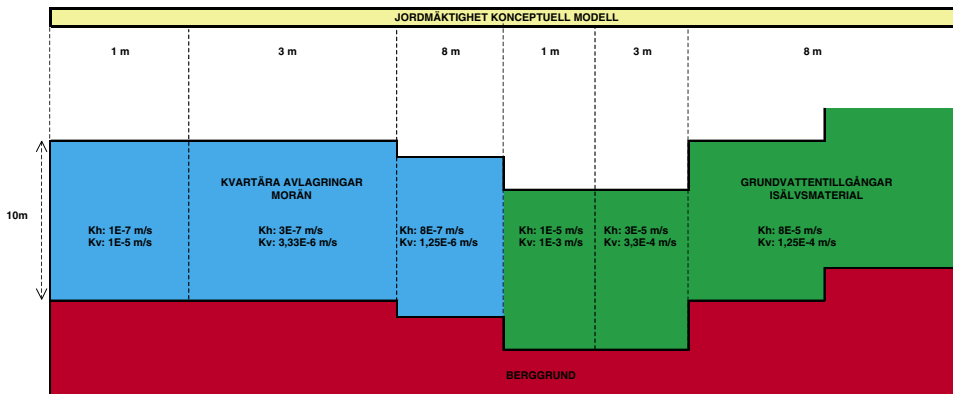
Hydrogeologiska egenskaper - Kvartära avlagringar

- Isälvsmaterial ($K=1E-4$ m/s)
- Morän ($K=1E-6$ m/s)

Figur 2-16. Konceptuell modell över kvartära avlagringarnas hydrogeologiska enheter.



Figur 2-17. Konceptuell sektion över mäktighet och hydrogeologiska egenskaper för kvartära avlagringar.



Figur 2-18. Numeriska modellens representation av den konceptuella modellen för kvartära avlagringar. Hydrauliska konduktivitetsvärden har skalats (K_h , K_v) för att representeras av en modell med konstant cellstorlek motsvarande en jordmäktighet på 10 m.

2.4.2 Berggrund – hydrogeologi

Denna studie bygger till övervägande del på hypotesen att det finns en relation mellan hydraulisk konduktivitet och respektive bergart inom modellregionen.

Information om berggrundens genomsläpplighet uttryckt i hydraulisk konduktivitet (K-värden m/s) har hämtats från de hydrogeologiska kartorna för Jönköpings- /SGU 1989/ respektive Kalmar län /SGU 1981/. Dessa genomsläpplighetsvärden representerar K-värden för bergarternas yttligare nivåer. Värdena i de hydrogeologiska kartbladen har därefter kopplats till bergarterna i den nationella bergartsdatabasen. I tabell 2-1 redovisas kopplingen mellan litologiska enheter och K-värden från de hydrogeologiska kartbladen.

Hydrauliska konduktiviteter för Almesåkrgruppen har tilldelats de respektive litologierna, diabas och sandsten, efter SGU:s hydrogeologiska karta för Jönköpings län /SGU 1989/. Med benämningen ”Almesåkrgruppen” avser den hydrogeologiska kartan brunnsdata från sandstenar. Hydraulisk konduktivitet för Almesåkrgruppens diabaser har hämtats från gruppen ”diabaser” i den hydrogeologiska kartan.

På grund av skillnader i benämningar överensstämmer inte alla bergartsbenämningar i de hydrogeologiska kartbladen med tillgänglig berggrundsdata. Skillnader i kartskala medför att flera litologiska enheter i det hydrogeologiska kartbladet (skala 1: 250 000) representeras av en mer generaliserad enhet i berggrundsdata (skala 1:2 000 000). I de fall en litologisk enhet i berggrundsdata representeras av flera enheter i de hydrogeologiska kartbladen med olika K-värden tilldelas modellen K-värden utifrån den enhet som har störst utbredning inom modellområdet. I tabell 2-1 markeras litologiska enheter med grå markering i de fall där areell utbredning varit avgörande vid tilldelning av K-värden i modellområdet.

För att möjliggöra stokastiska modelleringar har en statistisk utvärdering utförts av K-värden för litologiska enheter baserat på brunnsuppgifter gällande uttagskapacitet och mediandjup i de hydrogeologiska kartbladen. Syftet var att beräkna standardavvikelsen på K-värden för varje litologisk enhet eftersom detta inte framgår i SGU:s kartbladsbeskrivningar. K-värdet för en litologisk enhet beräknades utifrån brunnskapaciteten (Q), mediandjup (d) på brunnar samt antal brunnar i respektive kapacitetsintervall. K-värdet för respektive brunnskapacitet uppskattades genom sambandet: $K=1,2 \cdot Q \cdot d^2$. Därefter uppskattades medelvärden och standardavvikelsen av $^{10}\text{Log}(K)$ vilka presenteras i tabell 2-1 (K-beräkn, Std avv (=std($^{10}\text{log}(K)$))) samt i figur 2-19 och figur 2-20. Ett exempel på resultatet av den statistiska beräkningen presenteras i figur 2-21. Eftersom de beräknade K-värdenas medelvärden baseras på intervallvärden skiljer sig dessa något från SGU:s värden.

Den statistiska utvärderingen indikerade ett sannolikt fel i SGU:s data. Den hydrogeologiska kartan /SGU 1981/ anger ett K-värde för sandsten på $9E-6$ m/s (tabell 2-1) men den statistiska utvärderingen ger ett betydligt lägre värde på $9,5E-7$ m/s. Det beräknade lägre värdet används som ingångsdata för modellen, i övrigt används de värden som rapporteras av SGU enligt tabell 2-1 (SGU K-värde). I tabell 2-2 redovisas en sammanställning över de ingångsdata som använts för grundvattenmodellen för respektive litologisk enhet. Standardavvikelsen som beräknats utifrån SGU:s data innebär sannolikt en undervärdering på grund av de förenklade mätningar som utförs vid brunnsborring och som ligger till grund för SGU:s underlagsdata. En bättre uppskattning av standardavvikelsen kan göras utifrån data från SKB:s platsundersökningar, se avsnitt nedan.

Ovanstående data baseras på enkla kapacitetstester som genomförs av brunnsbore. Kontrollerade pumpningar är sällsynta när brunnskapaciter skall bedömas efter genomförd borring. Det är troligt att låga värden överskattas och att höga genomsläpplighetsvärden underskattas vid de förenklade testförfaranden som används. För att öka tilliten i de

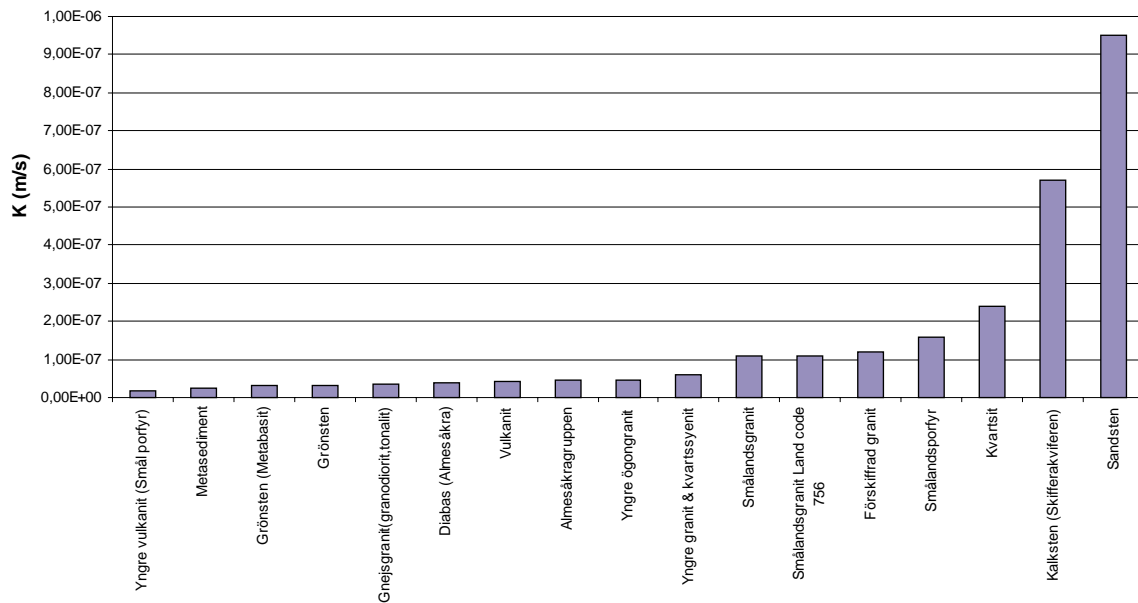
Tabell 2-1. Koppling mellan K-värden av litologiska enheter från de hydrogeologiska kartbladen för Jönköping- och Kalmar län och litologiska enheter från SGU:s nationella berggrundsdatabas.

Referens	Bergart (hydrogeologiska kartor)	SGU K-värde (m/s)	Median djup (m)	K-beräkn (m/s)	Std avv (m/s)	Land Code (databas)	Bergart*
SGU Serie Ah nr 11, 1989	Diabas (Almesåkra)	6,38E-08	55	3,80E-08	0,874	503	Yngsta diabas
SGU Serie Ah nr 1, 1981	Smålandsgranit	1,60E-07	55	1,10E-07	0,588	1	Transskandinaviska granit-porfyrbältet**
SGU Serie Ah nr 1, 1981	Smålandsgranit	1,60E-07	55	1,10E-07	0,588	607	Götemar- Jungfrungranit m fl.
SGU Serie Ah nr 1, 1981	Smålandsgranit	1,60E-07	55	1,10E-07	0,588	756	Smålands-Värmlandsgranit, Rätan- och Sorselegranit
SGU Serie Ah nr 11, 1989	Yngre granit & kvartssyenit	8,22E-08	71	5,90E-08	0,616		
SGU Serie Ah nr 11, 1989	Yngre ögongranit	6,01E-08	76	4,70E-08	0,577		
SGU Serie Ah nr 11, 1989	Gnejsgranit (granodiorit,tonalitet)	4,83E-08	77	3,60E-08	0,618	758	Äldsta graniter (urgraniter): tonalitet, granodiorit, granit
SGU Serie Ah nr 1, 1981	Förskiffrad granit	1,80E-07	47	1,20E-07	0,636		
SGU Serie Ah nr 1, 1981	Sandsten	9,00E-06	43	9,50E-07	0,557	338	Sandsten, kambrium
SGU Serie Ah nr 11, 1989	Almesåkrargruppen	6,59E-08	80	4,60E-08	0,665	610	Jotnisk sandsten, konglomerat, lerskiffer
SGU Serie Ah nr 1, 1981	Grönsten	2,60E-08	77	3,10E-08	0,425	757	Gabbro, delvis ultrabasisk, diorit, amfibolit
SGU Serie Ah nr 11, 1989	Grönsten (metabasit)	4,00E-08	85	3,00E-08	0,508	767	Basiska vulkaniska bergarter
SGU Serie Ah nr 11, 1989	Metasediment	2,84E-08	110	2,50E-08	0,544	775	Gråvacka, skiffer, kvartsit
SGU Serie Ah nr 1, 1981	Kvartsit	3,80E-07	41	2,40E-07	0,57	771	Gråvacka, skiffer, kvartsit och arkos, delvis omvandlade till gnejs och migmatit
SGU Serie Ah nr 11, 1989	Yngre vulkanit (Smål porfyr)	2,36E-08	100	1,60E-08	0,65	754	Sura vulkaniska bergarter
SGU Serie Ah nr 1, 1981	Smålandsprfyr	2,40E-07	45	1,60E-07	0,619		
SGU Serie Ah nr 11, 1989	Vulkanit	5,09E-08	70	4,40E-08	0,529	768	Sura vulkaniska bergarter

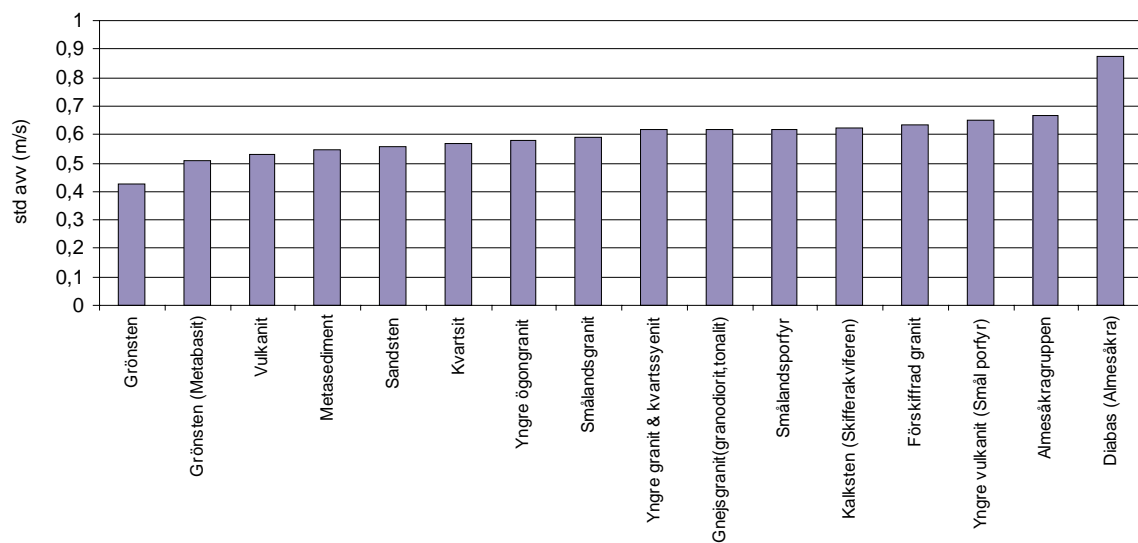
* Svensk översättning hämtad ifrån SNA 1994 för litologier ur den Svenska delen av den Fennoskandiska skölden /SGU 2005c/
 ** Information om bergart saknas i litologisk databas /SGU 2005c/, information hämtad ifrån maringeologisk karta i SNA,1994.

utvärderade standardavvikelse jämfördes bearbetad SGU-data för Smålandsgranit med den mer tillförlitliga databasen för samma bergart från platsundersökningarna vid Simpevarpsområdet. Den huvudsakliga bergarten inom regionalmodellen för SKB:s platsundersökningar i Oskarshamn är Ävrögranit som motsvaras av Smålandsgranit i de hydrogeologiska kartorna och ”granit” (land code 756) i figur 2-12. Omfattande hydrauliska tester med god kvalitet har utförts inom platsundersökningarna. Dessa tester är användbara vid tilldelning av egenskaper för aktuellt modellområde.

Den hydrauliska konduktiviteten (K) inom Ävrögraniten, med testskalan 100 m, är enligt modellering över Laxemarregionen (version L1.2) för ¹⁰Log K: Medelvärde: -7,3, Standardavvikelse: 1,35, /Rhén et al. 2006/. De flesta observationerna inom platsundersökningarna är utförda inom Ävrögraniten, så även om hela den insamlade datamängden skulle användas så avspeglar statistiken i huvudsak egenskaper hos Ävrögraniten. Om hela datamängden studeras inom intervallet 0–100 m är: Medelvärde -7,2, Std avv: 1,29.

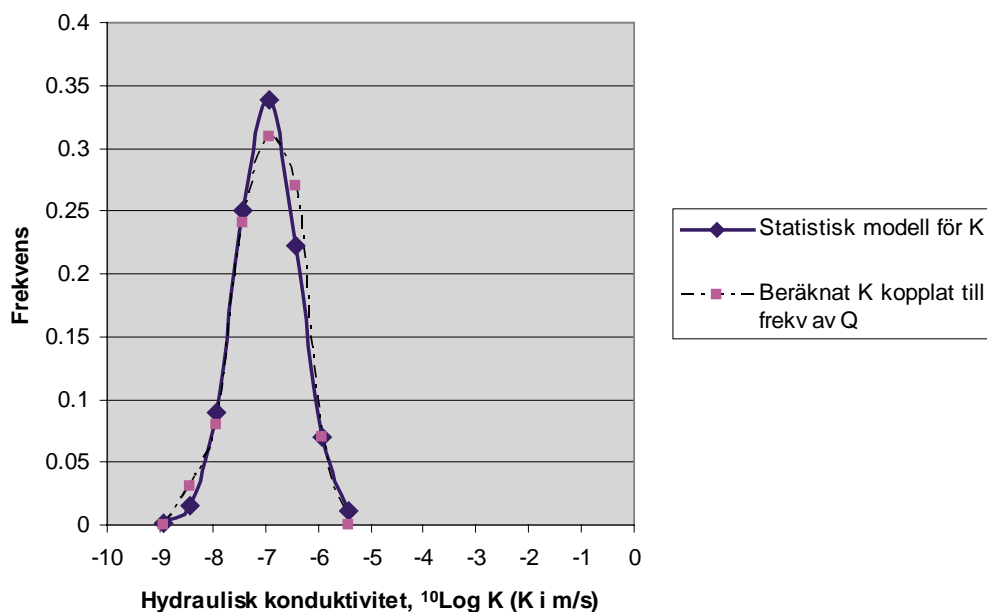


Figur 2-19. Hydraulisk konduktivitet för litologiska enheter beräknad utifrån data uppgifter i /SGU 1981/ och /SGU 1989/.



Figur 2-20. Standardavvikelse av hydraulisk konduktivitet av litologiska enheter, beräknad ifrån data hämtad från /SGU 1981/ och /SGU 1989/.

Utifrån de erfarenheter från platsundersökningarna som redovisats bör standardavvikelseerna för de olika litologierna i tabell 2-1 justeras för att utgöra mer realistiska ingångsvärden för grundvattenmodellen. En rimlig ansats bör vara att för $^{10}\text{Log K}$ tillämpa en standardavvikelse på 1,3 för Smålandsgranit som normalisering för standardavvikelsen för samtliga litologier. Standardavvikelseerna från brunnsarkivets data har således normaliserats mot Smålandsgranitens värde av Std avv ($^{10}\text{Log K}$) = 1,3. I tabell 2-2 redovisas de justerade standardavvikelseerna inklusive geometriska medelvärden av K (medelvärde för $^{10}\text{Log K}$). Hydrauliska egenskaper för diabasgångar diskuteras i avsnitt 2.4.3.



Figur 2-21. Fördelning av hydraulisk konduktivitet ($^{10}\text{Log K}$) för Smålandsgranit baserad på specifik kapacitet och antal brunnar hämtad ur /SGU 1981/.

Tabell 2-2. Hydraulisk konduktivitet och standardavvikelse för olika litologier som används som ingångsdata för grundvattenmodellen.

Bergart*	Land code databas	Modell K-geom. med (m/s)	Skalad std avv ($^{10}\text{Log K}$) (m/s)
Yngsta diabas	503	6,38E-08	1,932
Transskandinaviska granit-porfyrbältet**	1	1,60E-07	1,300
Götemar-Jungfrungranit m fl	607	1,60E-07	1,300
Smålands-Värmlandsgranit, Rätan- och Sorselegranit	756	1,60E-07	1,300
Äldsta graniter (urgraniter): tonalit, granodiorit, granit	758	4,83E-08	1,366
Sandsten, kambrium	338	9,50E-07	1,231
Jotnisk sandsten, konglomerat, lerskiffer	610	6,59E-08	1,470
Gabbro, delvis ultrabasisk, diorit, amfibolit	757	2,60E-08	0,940
Basiska vulkaniska bergarter	767	4,00E-08	1,123
Gråvacka, skiffer, kvartsit	775	2,84E-08	1,203
Gråvacka, skiffer, kvartsit och arkos, delvis omvandlade till gnejs och migmatit	771	3,80E-07	1,260
Sura vulkaniska bergarter	754	2,36E-08	1,437
Sura vulkaniska bergarter	768	5,09E-08	1,170

* Svensk översättning hämtad ifrån /SNA 1994/ för litologier ur den Svenska delen av den Fennoskandiska skölden /SGU 2005c/.

** Information om bergart saknas i litologisk databas /SGU 2005c/, information hämtad ifrån maringeologisk karta i /SNA1994/.

2.4.3 Diabasgångars genomsläpplighet

En begränsad litteraturstudie (se bilaga 4) med analys av hydrogeologiska egenskaper för diabasgångar och basiska bergarter har genomförts /se t ex Ericsson och Ronge 1986, Albom et al. 1991, Hermansson et al. 1997, Botha och Viviers 1999, KASAM 2001, Woodford och Chevallier 2002, Rhén et al. 2006/. Eftersom tydliga testlängder inom diabasgångar sällan har varit fallet i de refererade studierna föreligger en viss konceptuell osäkerhet i föreslagna genomsläpplighetsvärden. Erfarenheterna från SKB:s platsundersökningar visar dock påtagligt att de lägsta medelvärdena för de hydrauliska konduktiviteterna finner man bland de basiska bergartstyperna ($5,0 \cdot 10^{-12}$ m/s för 5 m testskala) till vilka diabasen hör.

Enligt SGU (Lundqvist L, 2006, pers. kom.) förekommer ibland spröda strukturer i kontaktzoner mellan diabasgångar och omgivande bergmassa. I de fall sprickzoners och diabasgångars utsträckning sammanfaller i strukturgeologiskt hänseende har dessa strukturer representerats med en central lågkonduktiv del som omges av mer högkonduktiva delar. De högkonduktiva delarna representerar de mer uppspruckna kontaktzonerna för diabasgångarna mot moderbergarten.

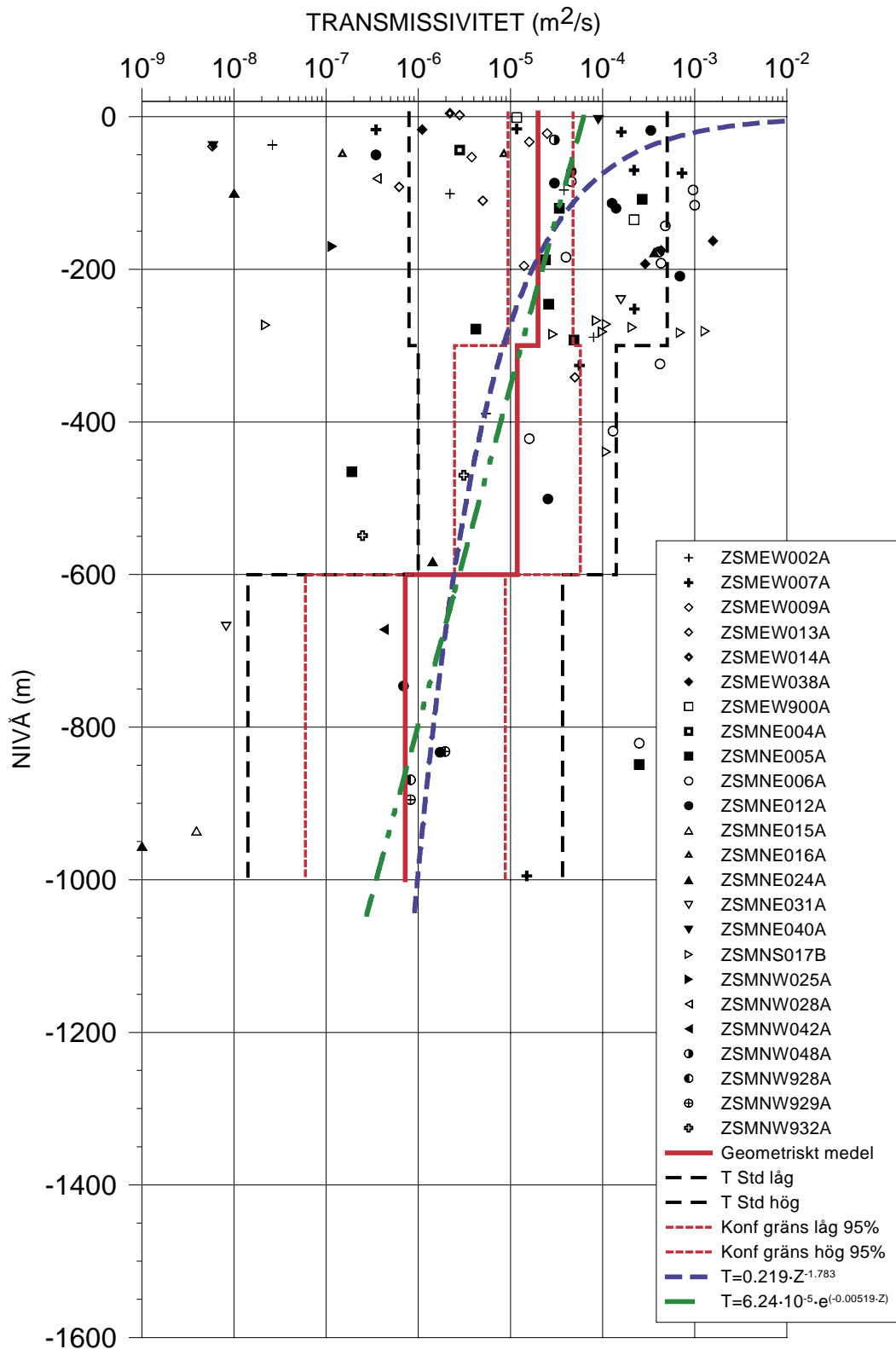
Tillgängliga data indikerar tänkbara värdeintervall för diabasgångars och närliggande kontaktzoners egenskaper. De föreslagna värdena måste dock betraktas som osäkra. Diabasgångarnas genomsläpplighet förutsätts ha värden från 0,05 till 0,5 gånger omgivande bergmassas hydrauliska konduktivitet (K). Kontaktzoner som ansluter till diabasgångar antas ha en bredd inom intervallet 3–30 m (med tyngdpunkt åt lägre värden) och 1–20 gånger K-värdet för omgivande bergmassa. Vidare förutsätts att ett djupberoende kan vara likartat som det för vertikala deformationszonerna (se nedan).

2.4.4 Transmissivitet i deformationszoner

Transmissivitet (T) i deformationszoner har studerats inom SKB:s pågående platsundersökningar för slutförvaret i Oskarhamns kommun. Figur 2-22 visar transmissivitetsvärden för spröda deformationszoner med avseende på djup för olika anpassade interpolations samband. (Data baseras på plushöjd, men eftersom topografin är ganska flack är djup \approx – plushöjd). I figuren visas två funktioner som anpassats efter medelvärden för LogT för de tre ca 300 m långa djupintervallen samt stegvisa förändringar i djupled. Observationerna är sannolikt påverkade av att ett flertal borrhål har borrats med syfte att träffa deformationszoner på 100–500 m djup, och att fler transmissiva zoner därför återstår att finna och undersöka. Möjligen kan högre transmissiviteter än vad som framgår av tillgängliga data förväntas i de ytliga lagren, dvs inom ett intervall från markytan och till ca 200 m djup. De i figur 2-22 representerade deformationszonerna har varierande bredd inom intervallet 5–250 m med ett aritmetiskt medelvärde av 53 m.

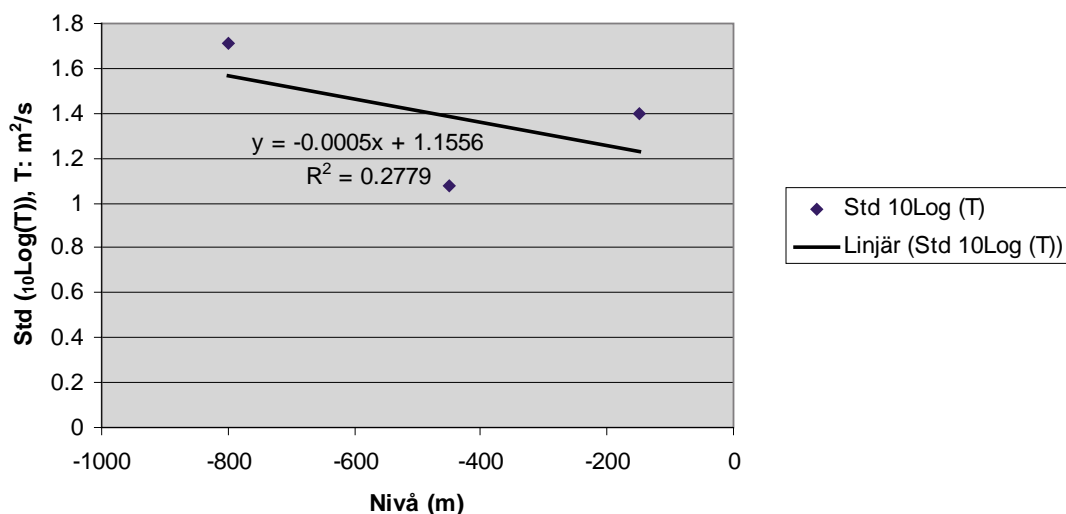
Av figur 2-22 framgår det att deformationszonernas genomsläpplighet varierar starkt men att en viss djupavtagande trend finns. Figur 2-23 visar standardavvikelsen för de representerade djupintervallen enligt ovan. Djupavtagande trender diskuteras vidare i nästa avsnitt 2.5.

I de fall subhorisontella deformationszoner inkluderas i den storregionala modelleringen antas att egenskaperna definieras i enlighet med hur data uppträder i figur 2-22, figur 2-23 och där transmissiviteten baseras enligt en modell för djupavtagande.



Figur 2-22. Transmissivitetens (T) fördelning i (huvudsakligen) regionala och lokala större deformations zoner (deterministiskt modellerade deformationszoner) inom det regionala modellområdet för SKB:s platsundersökningar i Oskarshamn. Medelvärde T uttryckt som en funktion för stegvis djupberoende och som en kontinuerlig funktion. Preliminära resultat från modellering i Laxemar, modellversion 1.2 /Rhén et al. 2006/.

Standardavvikelse för HCD



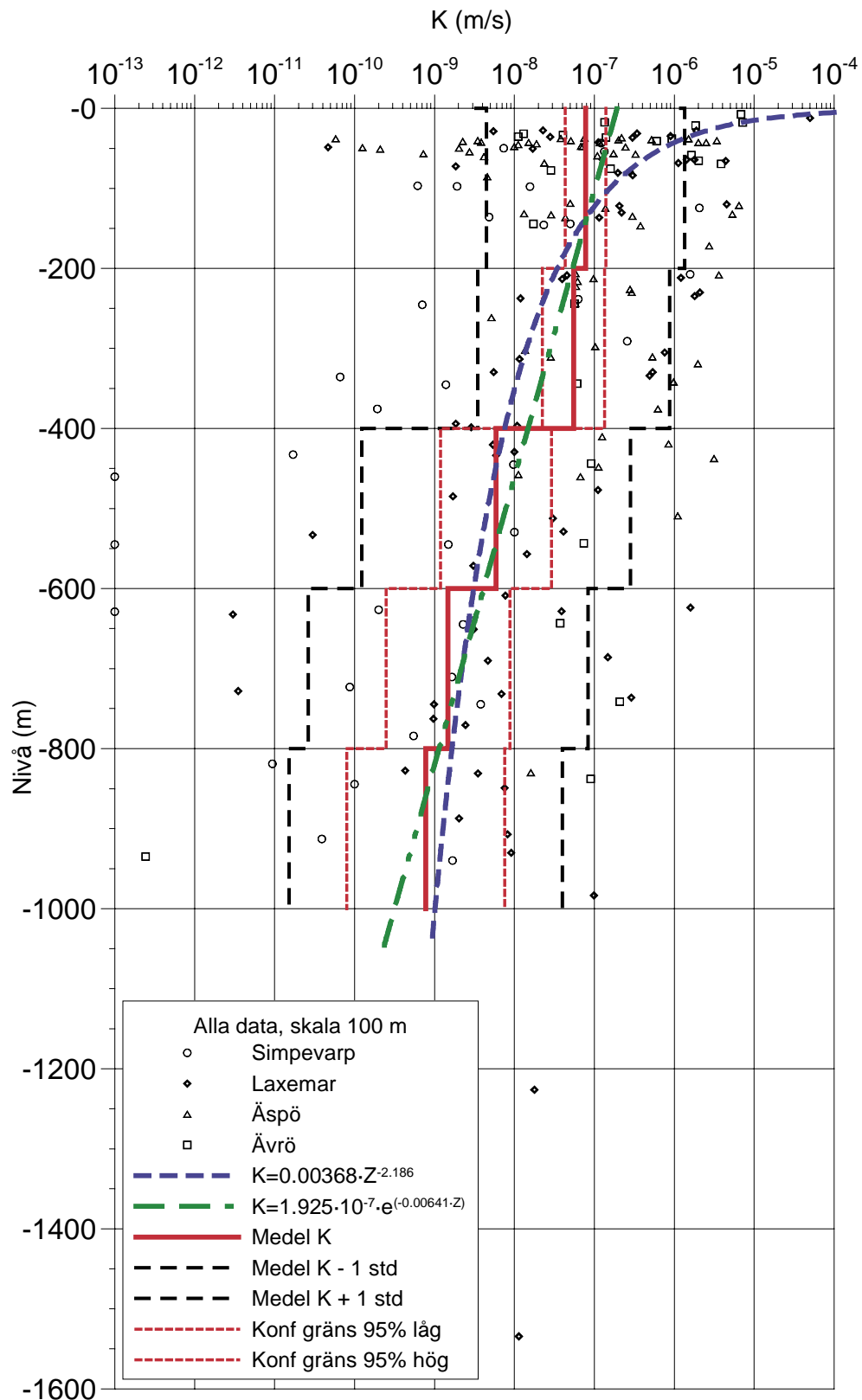
Figur 2-23. Standardavvikelse för transmissiviteten (T) i (huvudsakligen) regionala och lokala betydande deformation zoner (deterministiskt modellerade deformationszoner, HCD = Hydraulic Conductive Domain) inom det regionala modellområdet för SKB:s platsundersökningar i Oskarshamn. Preliminära resultat från regional modellering i Laxemar, modellversion 1.2 /Rhen et al. 2006/.

När det gäller plastiska strukturers hydrogeologiska konceptualisering har en kompletterande fördjupning skett för att utröna om dessa strukturer med statistisk signifikans uppvisar högre genomsläpplighet än tektoniskt opåverkade områden med samma berggrund /Follin 2006/. Studien bygger på SGU:s brunnsarkivs databas. Den genomförda analysen har dock inte kunnat påvisa något samband mellan brunnskapaciteter och förekomst av plastiska strukturer. Av detta skäl har ingen särbehandling gjorts för genomsläpplighetsegenskaper inom det s k Oskarshamn-Jönköpingsbältet (OJB) utan konceptualiseringen följer bergartsdomänerna.

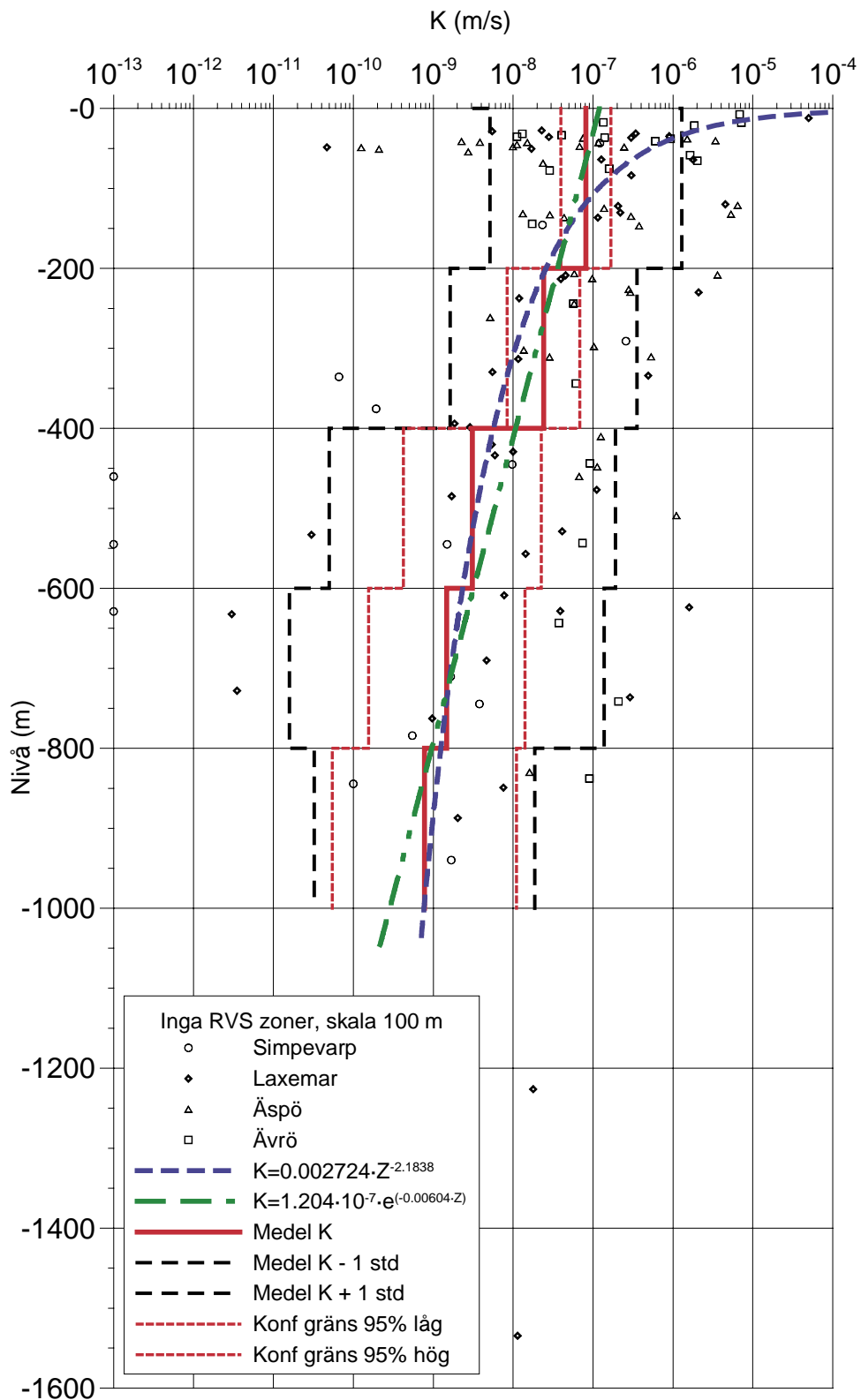
2.5 Djupberoende av hydraulisk konduktivitet

2.5.1 Djupberoende av hydraulisk konduktivitet – SKB:s platsundersökningar i Oskarshamn

Den hydrauliska konduktivitetens (K) djupberoende, för testskalan 100 m, har studerats inom SKB:s pågående platsundersökningar för slutförvaret. Figur 2-24 och figur 2-25 visar förändring av K med djup och statistik för aktuellt djupintervall samt två funktioner anpassade efter medelvärdet av $^{10}\text{Log } K$ i 200 m djupintervall. (Data baseras på plushöjd, men eftersom topografin är ganska flack är djup \approx - plushöjd). Figur 2-24 visar all data och i figur 2-25 är de deterministiskt modellerade deformationszonerna (de som visas i figur 2-24) exkluderade. Funktionerna kan betraktas som alternativ beskrivning till den stegvisa djuptrend som visas i figurerna. Figur 2-26 visar standardavvikelsen för $^{10}\text{Log } K$ och för de representerade djupintervallen enligt figur 2-25 om deterministiska deformationszoner är exkluderade. För det storregionala projektet gjordes en analys av djupavtagande trend med dataklasser i såväl 100 m som 200 m djupintervall, (se bilaga 5).

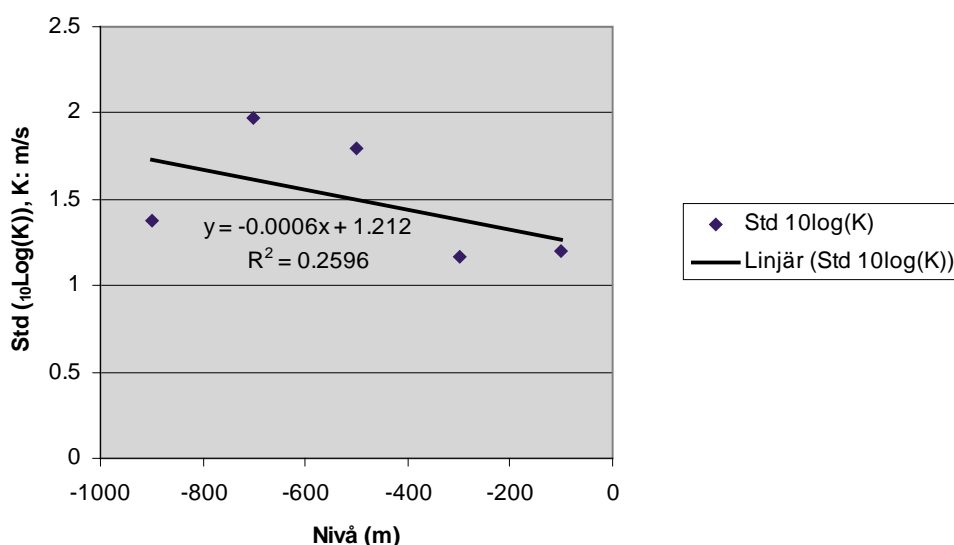


Figur 2-24. Hydraulisk konduktivitet (K) fördelning i 200 m intervall inom det regionala modellområdet för SKB:s platsundersökningar i Oskarshamn. Test skalan är 100 m och inbegriper deterministiskt modellerade deformationszoner. Medel K beskrivs som ett stegvis djupavtagande med en standardavvikelse samt två kontinuerliga funktioner. Preliminära resultat för regional modellering i Laxemar, modellversion 1.2 /Rhén et al. 2006/.



Figur 2-25. Hydraulisk konduktivitet (K) fördelning i 200 m intervall inom det regionala modellområdet för SKB:s platsundersökningar i Oskarshamn. Test skalan är 100 m och deterministiskt modellerade deformationszoner exkluderas. Medel K beskrivs som ett stegvis djupavtagande med en standardavvikelse samt två kontinuerliga funktioner. Preliminära resultat från regional modellering i Laxemar, modellversion 1.2 /Rhén et al. 2006/.

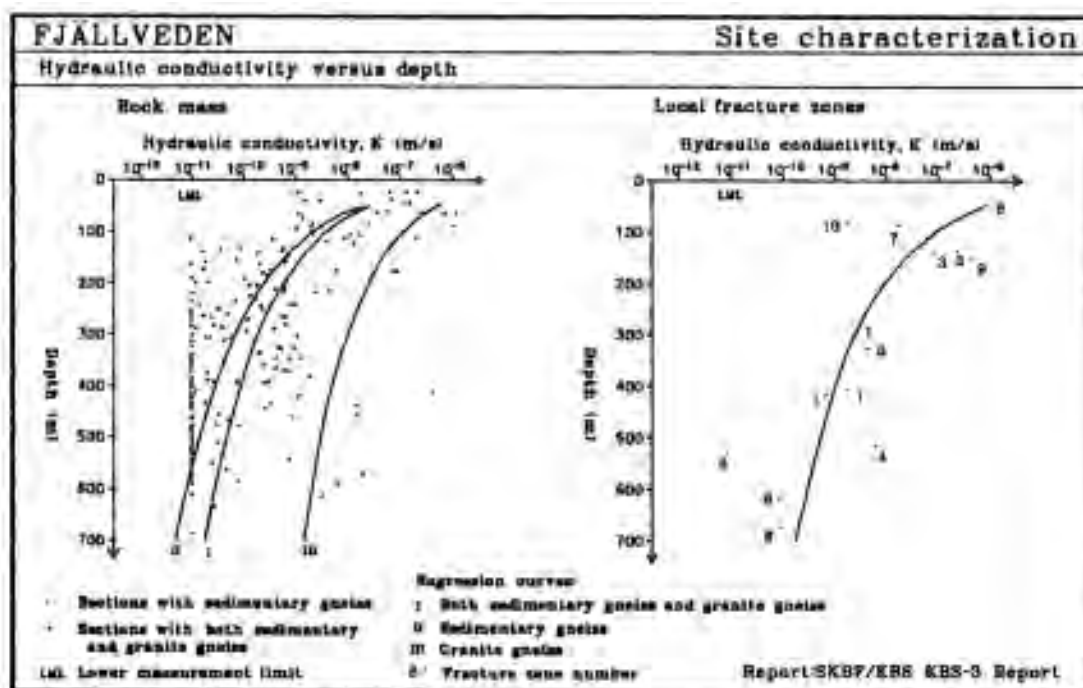
Standardavvikelse för HRD utan DZ-RVS, testskala 100m



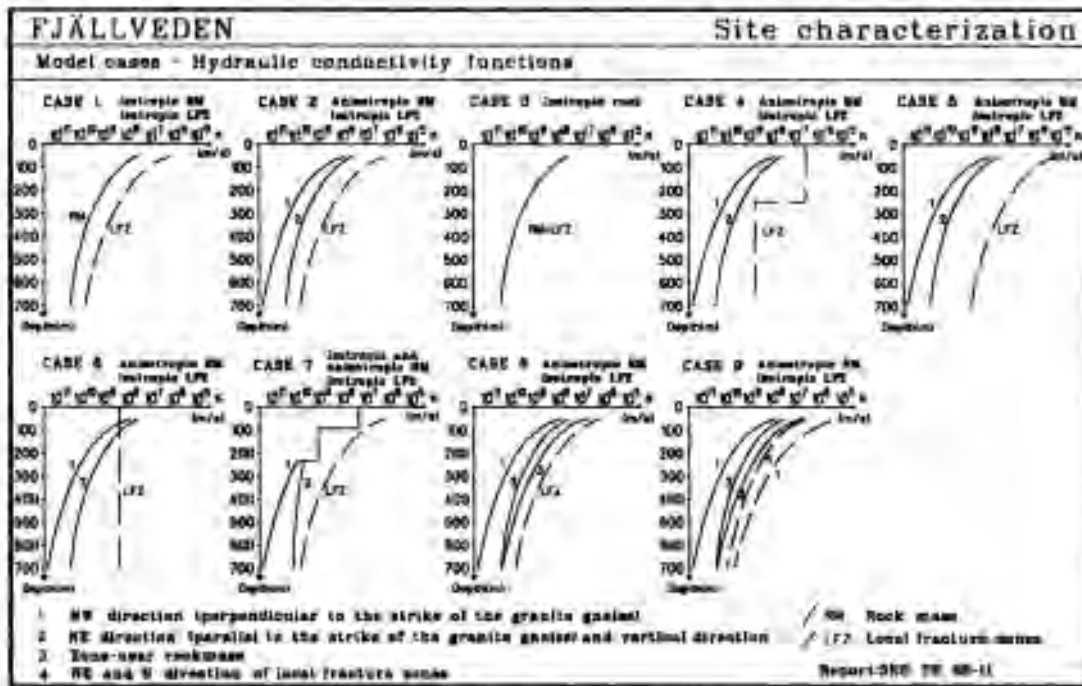
Figur 2-26. Standardavvikelse av hydraulisk konduktivitet (K) för 200 m djupintervall inom det regionala modellområdet för SKB:s platsundersökningar i Oskarshamn. (HRD = Hydraulic Rock Domain, DZ – RVS = Deformation Zones according to Rock Visualisation System). Testskalan är 100 m och deterministiskt modellerade deformationszoner är exkluderade. Preliminära resultat från regional modellering i Laxemar, modellversion 1.2 /Rhén et al. 2006/.

2.5.2 Djupberoende av hydraulisk konduktivitet – andra data än från SKB:s platsundersökningar

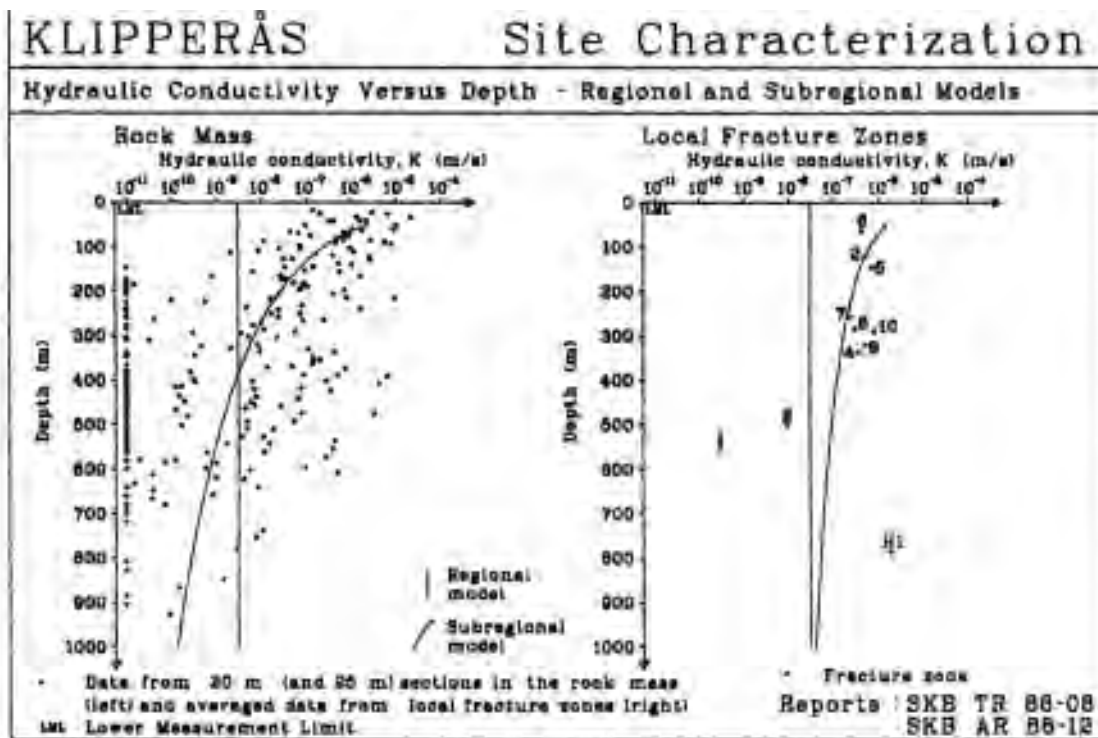
Ett liknande djupberoende av den hydrauliska konduktiviteten som registrerats i Oskarshamn återfinns i andra områden (se figur 2-27 till figur 2-30).



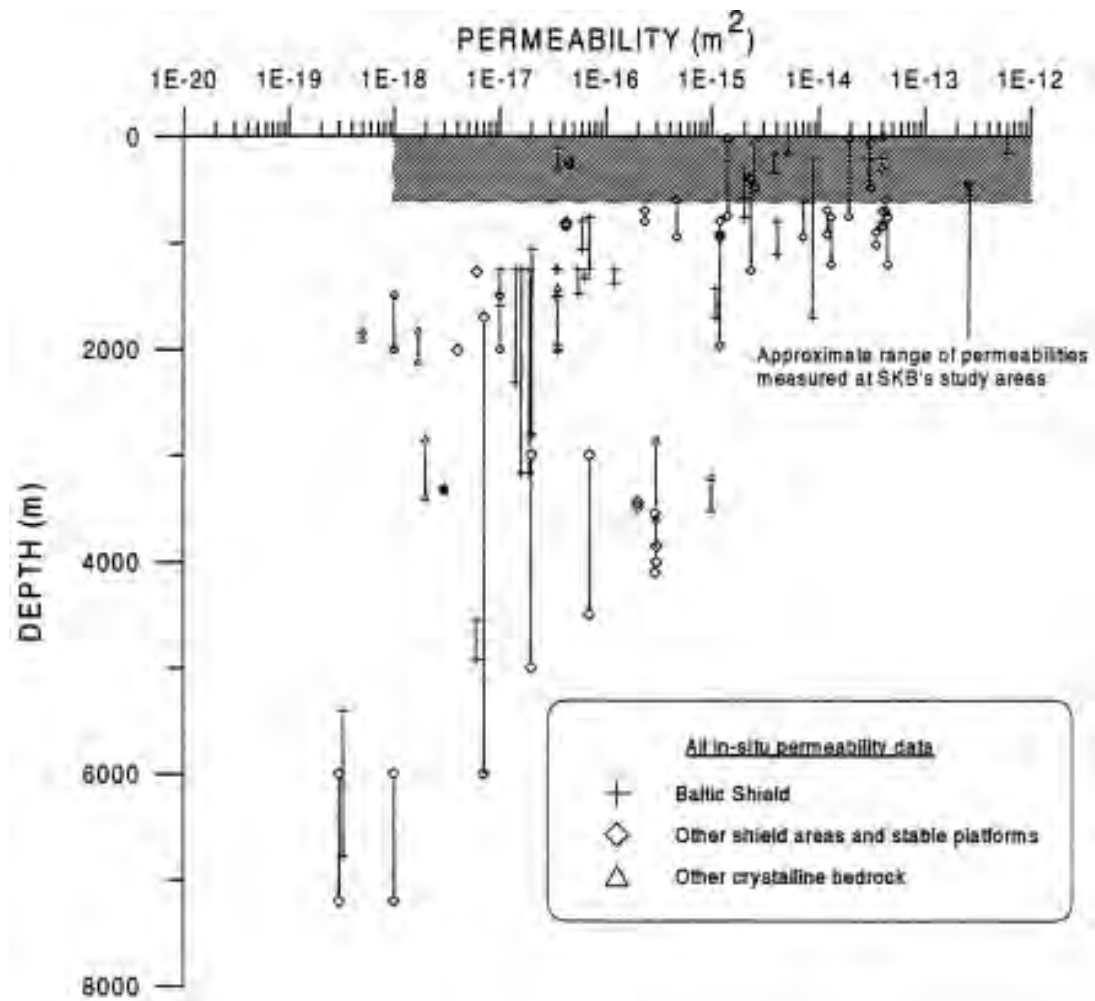
Figur 2-27. Hydraulisk konduktivitet (m/s) plottad mot djup för bergmassa (vänster) och för sprickzoner (höger). Från /SKB 1992/.



Figur 2-28. Hydrauliska konduktivitetsfunktioner för olika hydrauliska enheter och för olika modellfall. Från /SKB 1991/.



Figur 2-29. Uppmätt hydraulisk konduktivitet inom Klipperåsområdet tillsammans med tillämpade funktioner för konduktivitet mot djup för bergmassa (vänster) och sprickzoner (höger) inom den regionala och subregionala modellen. Från /SKB 1992/.



Figur 2-30. Data som sammanställts i figuren representerar i de flesta fall transmissivitetsvärden dividerade med testsektionens längd, vilken varierar mellan 1 m och ca 4 km. Omvandling från permeabilitet $k(m^2)$ till hydraulisk konduktivitet (m/s): $1 \text{ m/s} \approx k(m^2) \cdot 10^7$. Från /SKB 1998e/.

2.5.3 Modeller för djupberoende av hydrauliska egenskaper

Den hydrauliska konduktiviteten mellan större deformationszoner förutsätts i referensfallet bli modellerad i enlighet med bilaga 5 och den där redovisade interpolationen med klassning i 100 m djupintervall. Den minimala hydrauliska konduktiviteten (K) som tilldelas de hydrauliska bergdomänerna bör ej underskrida $1E-12 \text{ m/s}$. Medelvärde av brunnarnas mediandjup i tabell 2-1 är 67 m. Ned till detta djup ansätts brunnarsarkivets K-värden. Djupare än denna nivå ansätts ett djupavtagande som kan normaliseras mot platsundersökningarnas i Laxemar-Simpevarp djupavtagande.

De regionalt beskrivna deformationszonernas genomsläpplighet antas följa det beteende som uppmäts vid SKB:s platsundersökningar. I enlighet med bergartsdomänernas konceptualisering kan antas ett konstant K-värde (omräknat från transmissivitet) ovanför djupet 67 m även i deformationszoner. Under djupet 67 m förutsätts i referensfallet att K-värdena avtar i enlighet med en trend som framgår i figur 2-22 och figur 2-23.

2.6 Porositet

Den effektiva porositeten, också kallad den kinematiska porositeten, varierar inom ett flödesmedium och mellan olika typer av media, en uppskattning av denna variation presenteras nedan i tabell 2-3.

Tabell 2-3. Effektiv porositet för olika flödesmedia /efter Carlson och Gustafsson 1984/.

Flödesmedia	Effektiv porositet
Grus-sand	0,05 – 0,2
Morän	0,01 – 0,1
Homogent urberg	0,0001 – 0,001
Sprickzon i urberg	0,001 – 0,01
Sedimentär berggrund	0,005 – 0,05

I denna studie har alla olika geologiska enheter samma effektiva porositet, detta värde är lika med 0,001.

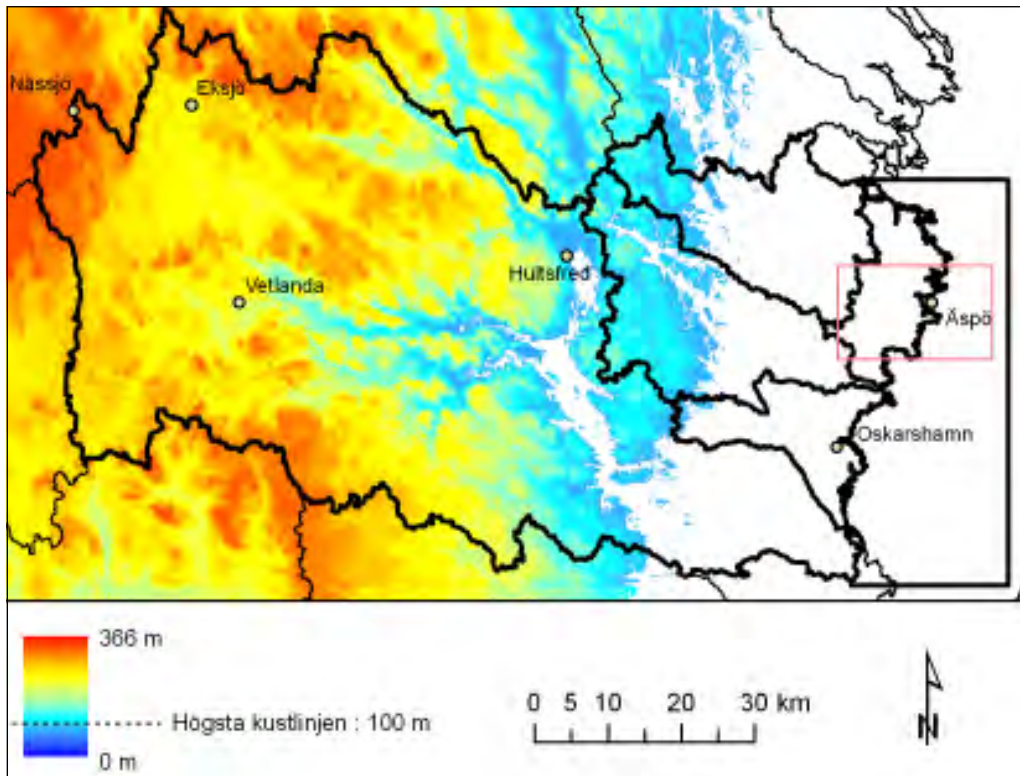
Detta värde på effektiv porositet har använts delvis för att det är ett värde som har använts i tidigare studier /t ex Voss och Provost 2001, Follin och Svensson 2003, Holmén et al. 2003/, vilket möjliggör en direkt jämförelse av denna studies resultat med resultat från dessa andra studier, men också för att det är ett rimligt integrerat värde för berget.

Genom att använda konstant porositet kan dessutom de beräknade transporttiderna användas för att ge en relativ uppfattning av det s k transportmotståndet F , (se vidare avsnitt 3.11).

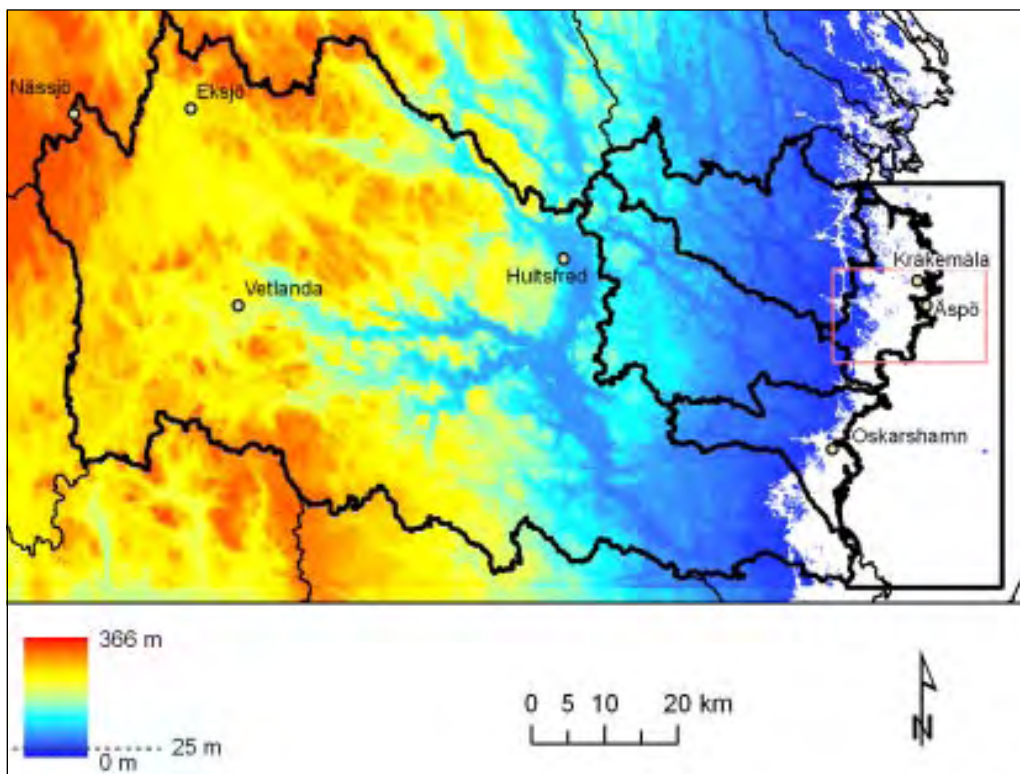
2.7 Strandlinjeförskjutning, landhöjning

Östersjöområdets utveckling från den senaste istiden har inneburit en generell landhöjning i östra Småland. Högsta tidigare kustlinjen (HK) återfinns idag på nivåer av ca 100 m över havet. Direkt efter inlandsisens avsmältning var strandlinjeförskjutningen relativt snabb (från ca 14 000 år till ca 11 500 år före nutid). Därefter har strandförskjutningen varit lugnare med en avänkning från ca 25 m till nuvarande Östersjönivå. Efter Ancylusstadiets (10 800–9 500 år före nutid) inledningsfas uppvisar området en viss transgression med en förhöjning av strandlinjen av ca 11 m.

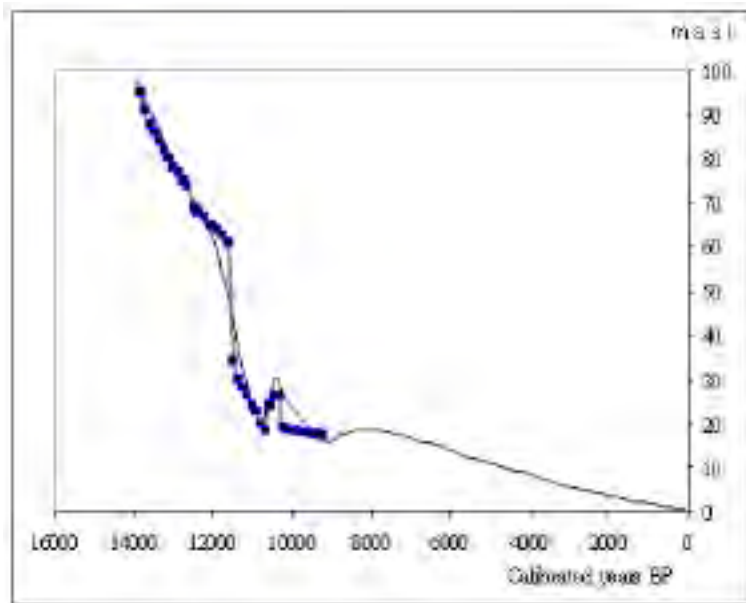
I figur 2-31 visas en översiktlig bild över vilka landområden som legat under HK. Figur 2-32 visar strandlinjens ungefärliga läge, ca 25 m högre än dagens nivå, under Ancylustid (10 000 år före nutid). I figur 2-33 visas en strandförskjutningskurva från Oskarshamn. Från figurerna är det uppenbart att mer parten av modellregionen ligger över tidigare högsta kustlinje.



Figur 2-31. Bilden visar att ca 30 % av modellregionen ligger under tidigare högsta kustlinje.



Figur 2-32. Bilden visar att för 10 000 år sedan var enbart ca 10 % av modellregionen under Östersjöns nivå.



Figur 2-33. Strandlinjeförskjutning i Oskarshamns kustområde efter den senaste nedisningen. De blå symbolerna representerar en kurva från /Svensson 1989/ som baserar sig på sjösediment i regionen. Kurvan utan symboler härör från en modellering av /Påsse 2001/.

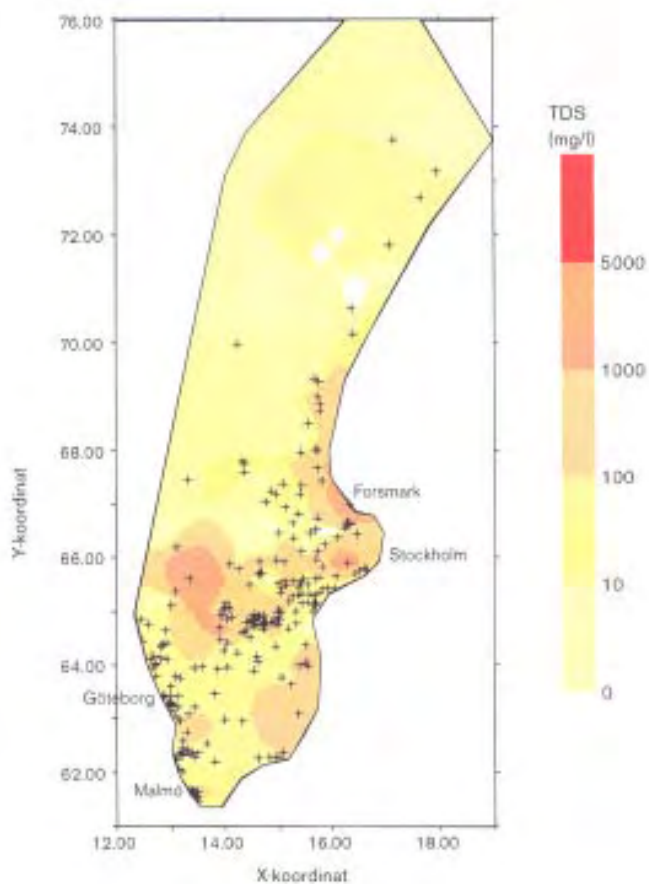
2.8 Grundvattnets salinitet och dess rumsliga fördelning

Salthalten i grundvatten varierar med djup och avstånd till kusten. För grundare brunnar i berggrunden är salthalten i form av TDS (Total Dissolved Solids) av storleksordning tiotals till hundratals mg/l. Vid överexploatering av berggrundvatten för vattenförsörjning i kustområden kan salthalterna överstiga smakgränsen (motsvarande ca 300 mg klorid per liter. Tabell 2-4 visar typiska salthalter för ytligt berggrundvatten.

Om något djupare nivåer studeras ökar salthalterna. I figur 2-34 åskådliggörs en kartbild som bygger på en interpolation mellan olika brunnar med varierande djup mellan 100 och 250 m.

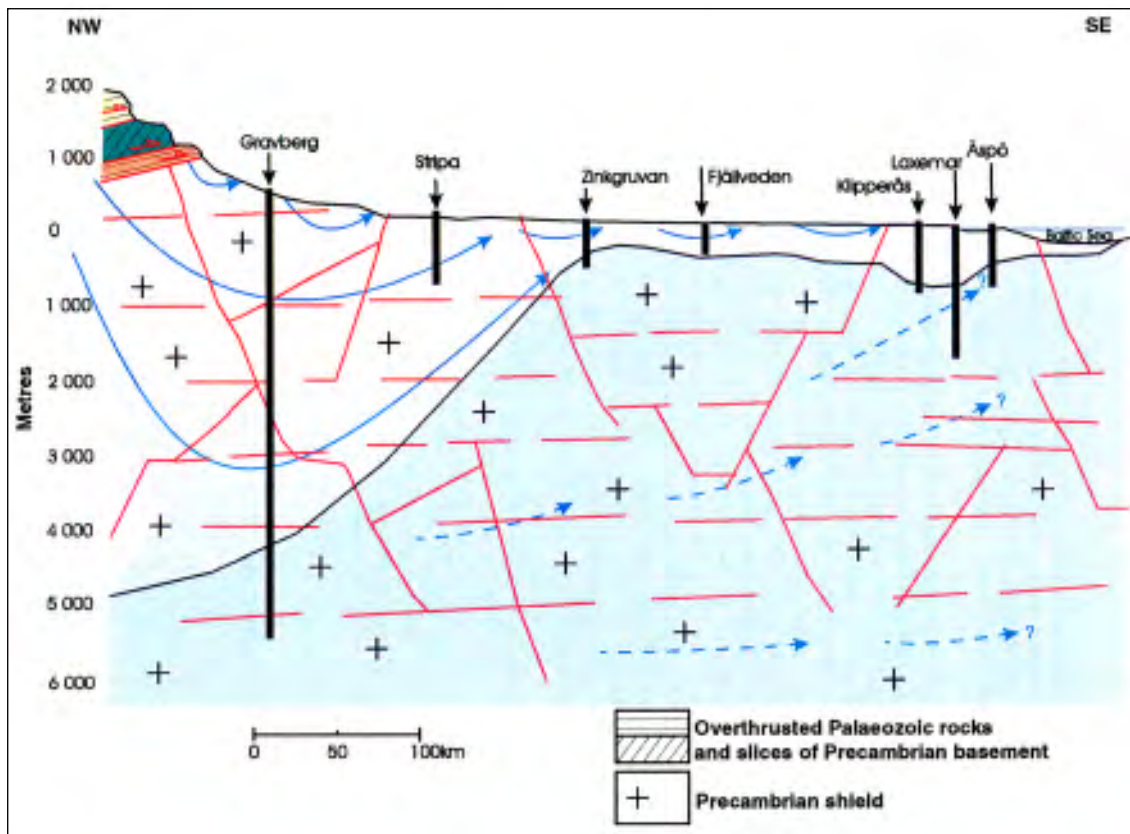
Tabell 2-4. Salthalt i ytligt grundvatten (borrade brunnar).

Referens	Län	Median salthalt – borrade brunnar (mg/L)	Intervall (mg/L)
SGU ser Ah nr 1	Kalmar	22	2–1 410
SGU ser Ah nr 10	Kronoberg	11	2–47
SKB R98-26	Östergötland	15	5–70
SGU ser Ah nr 11	Jönköping	11	3–65



Figur 2-34. Interpolerade (Kriging) salthalter (TDS mg/l) på 100–250 m djup för olika svenska områden. Från /SKB 2003/.

I den Fennoskandiska skölden finns enbart ett fåtal mätningar av salthalter i berggrunden på stora djup. De flesta mätningar är genomförda av kärnavfallsorganisationerna i Sverige och Finland, men även iakttagelser av salint grundvatten finns från vattenanalyser i djupa gruvor. En konceptuell bild av hur salthalten kan fördela sig i djupled framgår av figur 2-35. Figuren skildrar en transekt från Äspöområdet till norra Dalarna. För områden som ligger under HK förväntas saltlake (eng. "brine"), ca 10 % eller mer, på djup som överstiger flera tusen meter. I djupgashålet vid Gravberg, Dalarna, har uppmätts 15 % salthalt vid ca 6 000 m /SKB 1998e/.



Figur 2-35. Konceptuell modell för vattencirkulation längs en central/nordlig profil genom Sverige. Ökad salthalt markeras i figuren med mörkare rastrering. Från /SKB 1998e/.

3 Beräkningsmetodik och teoretiska förutsättningar för modellen

3.1 Den systemanalytiska metoden

Denna studie avser grundvattenflödena i en storregional skala. Den studerade delen av verkligheten kallar vi ett system, t ex grundvattensystemet. Den upprättade modellen är en förenklad beskrivning av det studerade systemet.

Föreliggande studie bygger på en systemanalytisk metod för att lösa komplicerade problem genom att: (i) Upprätta en modell av det studerade systemet, (ii) Använda modellen för simuleringar som imiterar det verkliga systemets beteende och (iii) Baserat på resultat som beräknats av modellen (genom de utförda simuleringarna) uppnå förståelse av det verkliga systemets beteende och tillstånd.

Baserat på studiens syfte och tillgänglig information upprättas en konceptuell modell. Den konceptuella modellen innehåller känd information om det studerade systemets egenskaper (t ex topografi, utbredning på olika jordarter, värden på konduktivitet etc) samt en beskrivning av de fysikaliska processer som styr det studerade systemet (t ex Darcys lag). Den konceptuella modellen innehåller dock endast information som är relevant med avseende på studiens syfte.

Baserat på den konceptuella modellen upprättas en formell modell. Den formella modellen är en matematisk beskrivning av den konceptuella modellen, den formella modellen upprättas med hjälp av ett datorprogram (t ex DarcyTools). Den formella modellen används för simuleringar.

3.2 Teoretisk representation av flödesmedia

De etablerade modellerna representerar huvudsakligen ett sprickigt kristallint berg, sedimentära bergarter förekommer endast ytligt i ett begränsat område i östra delen av modellområdet (Almseåkra formationen) samt under havet. Kvantära avlagringar förekommer ofta ovanpå berget, men de kvartära avlagringarna har en mycket liten mäktighet i jämförelse med underliggande berg. Förutom de sedimentära bergarterna (som endast förekommer i begränsad omfattning) och de kvartära avlagringarna (med ringa mäktighet) består alltså modellen av ett sprickigt kristallint berg.

Grundvattenflöde i ett sprickigt kristallint berg förekommer i sprickor och sprickzoner av varierande betydelse och storlek. Förekomsten av sprickor och sprickzoner bestämmer det kristallina bergets heterogena och anisotropa hydrauliska egenskaper.

I en matematisk modell av grundvattenflöde kan ett sprickigt berg representeras på olika sätt, vanligen används två olika matematiska beskrivningar: (i) en kontinuumbeskrivning eller (ii) en beskrivning baserad på ett diskret nätverk av explicit definierade sprickor. I denna studie har vi använt oss av en kontinuumbeskrivning.

I en kontinuumbeskrivning representeras det sprickiga berget av ett kontinuerligt flödesmedium inom vilket värden på bergets egenskaper (t ex genomsläpplighet) kan tilldelas volymer (bergblock) av olika storlek. Ett stort antal av bergblock (som kan ha olika

egenskaper) representerar det sprickiga berget. Vi kommer inte i denna studie att i detalj presentera eller diskutera kontinuummetoden, för en sådan diskussion hänvisar vi till /Bear och Verruit 1987/ och /Bear och Bachmat 1990/.

I en kontinuummodell kan de ovan diskuterade bergblocken tilldelas egenskaper deterministiskt eller stokastiskt. I en deterministisk beskrivning tilldelas bergblocken egenskaper som motsvarar medelvärden för det sprickiga bergets varierande egenskaper. I en stokastisk beskrivning tilldelas bergblocken egenskaper utifrån sannolikhetsfördelningar som representerar det sprickiga bergets varierande egenskaper (s k stokastisk kontinuum) /se Neuman 1987/. Med en stokastisk beskrivning kan modellen representera bergets lokala heterogenitet och anisotropi. Både deterministiska och stokastiska beskrivningar har använts i denna studie.

För det studerade grundvattensystemet i berget kan vi identifiera två olika betydelsefulla teoretiska flödesdomäner: flödet mellan större sprickzoner och flödet i större sprickzoner. Vi har använt oss av följande beskrivning av dessa domäner:

- Berget mellan större sprickzoner har definierats som ett kontinuerligt medium, vilket är representerat av ett stort antal olika bergblock. Bergblocken tilldelas olika egenskaper beroende på vilken typ av berg som blocket representerar (litologisk enhet). Både en deterministisk och stokastisk metod har använts för att tilldela berget lokala värden på genomsläpplighet.
- Större sprickzoner (och diabasgångar) har definierats som separata kontinuerliga strukturer. Zonerna (och gångarna) är explicit definierade med separata block som inte representerar omgivande berg. Både en deterministisk och stokastisk metod har använts för att tilldela zonerna (och diabasgångarna) lokala värden på genomsläpplighet.

De kvartära avlagringarna har inkluderats i modellen som separata kontinuerliga strukturer, med hjälp av ett stort antal mindre volymer (block) som vilar på det underliggande kristallina berget. Egenskaperna är deterministisk definierade.

Som ovan nämnts har bergets egenskaper i vissa av de studerade beräkningsfallen definierats med hjälp av sannolikhetsfördelningar, metoden för detta beskrivs närmare i avsnitt 3.6.

För att den etablerade modellen skall utgöra en god beskrivning av verkligheten så är det nödvändigt att modellen har en god upplösning. Med en god upplösning menas att de olika domäner (t ex litologiska enheter) som förekommer i det studerade området och som ingår i den etablerade modellen måste avbildas i modellen med en rimligt hög detaljeringsgrad.

Modellens upplösning definieras av storleken på de beräkningsceller vilka ingår i den numeriska modellens beräkningsnät. Den etablerade modellen representerar ett mycket stort område 133×79 km. Av detta följer att beräkningscellerna inte kan vara orimligt små för då blir det totala antalet celler i beräkningsnätet ohanterligt stort för den numeriska matematiska metod som används för att beräkna grundvattenflödet.

En av de mest betydelsefulla parametrarna för grundvattnets flödesmönster förväntas vara markytans topografiska undulation. Särskilt viktigt är det att den lokala topografiska undulationen kan representeras med en rimligt god upplösning och för att detta skall vara möjligt måste cellernas horisontala storlek inte vara alltför stor. I relation till storleken på det studerade området är cellstorleken i den etablerade modellen tillräckligt liten för att på ett adekvat sätt representera den lokala topografiska undulationen. Vid markytan har cellerna en horisontal storlek som är 200×200 m, förutom vid deformationszoner och diabasgångar där storleken är 100×100 m. Den vertikala cellstorleken är vid markytan 5 m.

I den storregionala studien av Uppland /Holmén et al. 2003/ analyserades olika cellstorlekar med avseende på den uppländska topografin, analysen demonstrerade att cellerna bör ha en horisontal storlek som är mindre än ca 700 m.

3.3 Formell matematisk modell

Grundvattenflöde är beräknat med den numeriska matematiska modellen DarcyTools /Svensson et al. 2004/. Den upprättade formella modellen är en matematisk beskrivning av det studerade flödessystemet. Beskrivningen bygger på en kontinuumbetraktelse (se avsnitt 3.2). Beskrivningen är tredimensionell och kan inkludera tidsberoende och densitetsberoende effekter.

DarcyTools3.0 använder finita differens metoden för att numeriskt lösa det matematiska problemet. Det studerade modellområdet indelas i beräkningsceller, som kan vara av olika storlekar. Egenskaper hos det studerade systemet som är skalärer (t ex tryck, porositet och salinitet) definieras i cellernas centrum, men riktningensberoende egenskaper (t ex hydraulisk konduktivitet och specifikt flöde) definieras eller beräknas för cellernas väggar.

I DarcyTools formuleras masskonservering med följande uttryck /Svensson et al. 2004/:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = Q \quad \text{Ekvation 3-1}$$

Där:

ρ = Vätskans densitet

ε = Flödes porositet (effektiv porositet)

u, v, w = Darcy flöden (specifika flöden)

Q = Inflöde eller utflöde

Flödesekvationerna är tryckberoende och formuleras på följande vis /Svensson et al. 2004/:

$$\begin{aligned} \rho u &= -\frac{K_x}{g} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \rho v &= -\frac{K_y}{g} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \rho w &= -\frac{K_z}{g} \frac{\partial p}{\partial z} - K_z (\rho - \rho_0) \end{aligned} \quad \text{Ekvation 3-2}$$

Där:

g = Gravitationsaccelerationen

p = Det dynamiska trycket relativt ett hydrostatiskt referenstryck

K_x, K_y, K_z = Hydraulisk konduktivitet längs med koordinat axlarna

ρ_0 = Densitet på en referensvätska (t ex sötvatten)

Transport av salt behandlas parallellt med två olika processer i DarcyTools:

- Advektion-diffusion genom det kontinuerliga flödesmedium som representeras av beräkningscellernas flödesporositet (effektiva porositet).

- Diffusivt utbyte mellan vätska i beräkningscellernas flödesporositet och vätska i en stagnant porvolym (icke flödande porositet). Detta utbyte äger rum på en skala mindre än cellernas storlek.

Ekvationen för masstransport genom advektion-dispersion formuleras på följande vis i DarcyTools /Svensson et al. 2004/

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u C - \rho \gamma D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v C - \rho \gamma D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho w C - \rho \gamma D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = Q C + Q_c \end{aligned} \quad \text{Ekvation 3-3}$$

Där:

C = Transporterad massfraktion av salt

D_x, D_y, D_z = Hydrodynamisk dispersion längs med koordinat axlarna

Q_c = Inflöde eller utflöde. Diffusivt utbyte av salt mellan vätskan i flödesporositeten och vätskan i den stagnanta porvolymen

γ = Kompaktion av flödesmedium

Det diffusiva utbytet av salt mellan vätska i beräkningscellernas flödesporositet och vätska i en stagnant porvolym (Q_c) modelleras genom en "multi-rate" diffusions modell. Denna modell baseras på den endimensionella "multi-rate" formuleringen presenterad i /Haggerty och Gorelick 1995/. För en närmare presentation hänvisar vi till /Svensson et al. 2004/ och /Follin et al. 2005/.

3.4 Salt grundvatten och betydelsen av densitetsberoende grundvattenflöde

Grundvattnet i det studerade området har olika ursprung, och delvis beroende på var det befinner sig i flödessystemet är det också av olika ålder. Det är möjligt att identifiera olika typer av grundvatten, tex: (i) relativt nybildat sötvatten, (ii) äldre sötvatten med låga salthalter, (iii) äldre vatten med salthalter nära Östersjöns nuvarande salthalt (troligtvis infiltrerat havsvatten) och (iv) salt grundvatten med höga salthalter (alltså med salthalter större än Östersjöns nuvarande salthalt); samt slutligen (v) mycket salt grundvatten sk saltlake (på engelska "brine") som förekommer på mycket stort djup i berget (mycket lite är känt om ursprung och bildningsprocess för saltlaken).

Nära kusten förekommer det söta grundvattnet ytligt och grundvatten med viss salthalt kan också påträffas på ringa djup, men på större avstånd från kusten förekommer sött grundvatten även på mycket stora djup. Landhöjningen efter den senaste istiden har medfört att strandlinjen har förflyttats och områden som numera ligger ett gott stycke från kusten (ca 30 km) låg för att antal tusen år sedan under havet. Man kan anta att i de områden som tidigare var täckta av något av Östersjöns utvecklingsstadier kan grundvatten med viss salthalt påträffas på ringa djup.

Dock är det så att ungefär två tredjedelar av den etablerade modellen representerar områden vilka efter den senaste istiden aldrig har varit belägna under havsnivån. Dessa områden är alltså belägna ovanför vad som kallas ”den högsta kustlinjen” (HK) och inom dessa områden förekommer grundvatten med höga salthalter troligen endast på stora djup t ex flera kilometers djup, och följaktligen dominerar grundvattensystemet ned till mycket stora djup av sött grundvatten.

Den applicerade konceptuella modell för det studerade systemet baseras på följande resonemang. På nivåer över de mycket stora djup där saltlake förekommer förväntas flödesmönstret för sött och salt grundvatten huvudsakligen bero av av topografins undulation. Den tunga saltlaken som förekommer på stort djup är mindre påverkad av topografien och fungerar troligen som ett golv som begränsar det vertikala flödet för sött grundvattnet och för grundvatten med mindre salthalt. Man kan troligen indela det studerade flödessystemet i två teoretiska domäner: en domän ovanför saltlaken där sött grundvatten och grundvatten med relativt låga salthalter cirkulerar, och en relativt stagnant domän på stort djup som är fylld med saltlake. På grund av den stora densitetsskillnaden mellan saltlaken och grundvattnet ovanför saltlaken kommer inte grundvattnet ovanför saltlaken att penetrera ner i saltlaken.

Av diskussionen ovan kan man sluta sig till att för den etablerade modellen, som huvudsakligen är belägen ovanför den högsta kustlinjen, kommer densitetsberoende flöde endast vara av mindre betydelse.

3.5 Landhöjning

Under den senaste glaciala perioden (istiden) ban ds stora mängder vatten i ismassorna. När ismassorna började avsmälta förändrades nivån på både landmassorna och nivån på de omgivande haven. Förändringarna i landmassornas nivå och havsnivån resulterade i att Östersjöns vattennivå och salthalt förändrades med tiden. Östersjöns olika stadier brukar indelas i (i) Baltiska issjön (ii) Yoldia havet, (iii) Ancylus sjön, (iv) Litorina havet, samt slutligen (v) Östersjön.

I de transienta simuleringarna med densitetsberoende flöde har landhöjningen inkluderats med hjälp av linjära samband representerande strandlinjens förskjutning under de senaste 10 000 åren (eller 14 000 åren).

3.6 Metod för att generera en lokal heterogenitet

För några av de studerade beräkningsfallen har en lokal heterogenitet i den hydrauliska konduktiviteten införts för berget mellan deformationszonerna, deformationszonerna och diabasgångarna. Nedan presenteras metoden som har använts för att skapa denna heterogenitet.

I avsnitt 3.2 diskuterades olika metoder för att representera de heterogena egenskaperna för det sprickiga berget. I en stokastiskt kontinuum beskrivning tilldelas olika bergblock egenskaper utifrån sannolikhets fördelningar som representerar det sprickiga bergets varierande egenskaper /se Neuman 1987/. Med en stokastisk beskrivning kan modellen representera bergets lokala heterogenitet och anisotropi.

För att kunna använda en stokastiskkontinuum beskrivning i en matematisk modell är det nödvändigt att bestämma egenskaperna för de sannolikhetsfördelningar som skall användas för att tilldela bergblocken olika egenskaper.

Uppmätta värden på genomsläpplighet (i en viss skala i ett sprickigt berg) varierar från mät punkt till mätpunkt, mätningarna visar alltså att det sprickiga bergets genomsläpplighet är heterogen storhet. De uppmätta värdena är ofta lognormalfördelade. Dessutom visar fältobservationer vid t ex Äspölaboratoriet (Äspö HRL) att heterogeniteten är skalberoende. Detta skalberoende finns dokumenterat i flera olika studier t ex /Gustafson et al. 1989/ och /Wikberg et al. 1991/. Skalberoendet i genomsläpplighet (konduktivitet) kan vara mycket komplicerat, eftersom det skapas av ett underliggande system av sprickor med mycket olika egenskaper, dessutom är sprickornas konnektivitet (hur de är sammankopplade i ett nätverk) också av stor betydelse för skalberoendet.

Den hydrauliska konduktiviteten varierar från plats till plats, men den varierar också med skalan över vilken konduktiviteten mätes. Det observerade skalberoendet i konduktivitet vid Äspölaboratoriet kan tolkas på följande vis:

- För små volymer är variansen stor och för stora volymer är variansen liten.
- För små volymer är medianvärdet litet och för stora volymer är medianvärdet stort.

Baserat på observationen ovan kan vi anta att det kan finnas ett effektivvärde för den hydrauliska konduktiviteten. *Effektivvärdet* är det värde som erhålls vid så stora skalor att variansen är så liten att den kan försummas. Vid mindre skalor erhålls ett *ekvivalent värde* för den hydrauliska konduktiviteten, det ekvivalenta värdet bör kopplas till en viss skala och till en varians.

Ett effektivvärde förutsätter en stor volym. Dessutom förutsätts det att för mindre volymer (mindre skalor) inom denna volym är variationen i konduktivitet statistisk homogen. Med statistisk homogenitet menar vi att de statistiska egenskaperna (parametrarna) som beskriver konduktivitetens variation (i en viss skala) inte förändras inom den studerade volymen – alltså att alla olika värden på konduktivitet (stickprover) beskriver ett berg med samma statistiska egenskaper (eller med andra ord: att alla stickprov kommer från samma population).

I verkligheten kan ett effektivvärde vara svårt att mäta i fält, eftersom mätskalan kan bli mycket stor och statistisk homogenitet inte nödvändigtvis förekommer. Detta är dock ett mindre bekymmer för en teoretisk modell vars syfte det är att matematiskt beskriva ett heterogent medium vid olika skalor.

Om man förutsätter en modell av ett flödesmedium definierat som ett stokastiskt kontinuum (statistiskt homogent) då består detta flödesmedium av ett stort antal mindre volymer, kallade block. Varje block kan slumpmässigt tilldelats ett värde på hydraulisk konduktivitet som härstammar från en lognormalfördelning. För ett uniformt flöde (som medelvärde) genom ett sådant medium har flera författare tagit fram analytiska matematiska lösningar för hur ett effektivvärde kan beräknas, t ex /Landau och Lifshitz 1969/ och /Matheron 1967/. De analytiska lösningarna beskriver effektivvärdet som en funktion av ett medianvärde och en standardavvikelse för den lognormalfördelning som definierar blockens konduktivitet.

För olika realiseringar av blockens konduktivitet och vid olika skalor (olika antal block) kommer systemet av block att tillsammans producera olika värden på konduktivitet med avseende på flöde genom hela modellen av block. Dessa konduktivitetsvärden är ekvivalenta värden på hydraulisk konduktivitet för den studerade modellskalan. Om antalet block i modellen ökas kommer den ekvivalenta hydrauliska konduktiviteten att asymptotiskt närma sig ett effektivvärde.

Modellskalan vid vilket ett effektivvärdet kan anses förekomma beror av variansen i den lognormalfördelning som används för att generera blockens konduktivitet, antalet block

och blockens storlek, samt dessutom av en accepterbar avvikelse mellan den observerade ekvivalenta hydrauliska konduktiviteten och det teoretiska effektivvärdet.

I denna studie är lokal heterogenitet i hydraulisk konduktivitet (K -värde) definierad som ett stokastiskt kontinuum i enlighet med en metod presenterad i /Holmén 1997/. Heterogeniteten i K -värde för olika blockstorlekar definieras av olika lognormalfördelningar. Dessa lognormalfördelningar har egenskaper som varierar med skalan – median och standardavvikelse varierar med skalan – men egenskaperna är beräknade på ett sådant sätt att för alla olika skalor så producerar lognormalfördelningarna samma teoretiska effektivvärde (beräknat med den metod som föreslås av /Matheron 1967/. Dessutom är lognormalfördelningarnas egenskaper beräknade på ett sådant sätt att de reproducerar den varians i uppmätt konduktivitet, vid skalan 100 m, som har iakttagits vid fältmätningar (hydraultester) utförda vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn.

Metoden som används för att beräkna lognormalfördelningarnas egenskaper presenteras mer i detalj i avsnitt 4.10 och i bilaga 3. Ingen rumslig korrelation är inkluderad när den lokala heterogeniteten genereras eftersom de flesta av modellens celler är stora (större än 100 m).

När en lokal heterogenitet skall genereras stokastiskt i en modell som bygger på kontinuum-betraktelsen är det viktigt att tillämpa en metod för att generera den lokala heterogeniteten som är konsistent med teoretiska aspekter för ett stokastiskt kontinuum. Effektivvärdet är ett betydelsefullt koncept när olika formuleringar av heterogenitet skall jämföras, och alldeles särskilt viktigt när en modell med homogen konduktivitet skall jämföras med en modell med heterogen konduktivitet. Effektivvärdet är nämligen bron mellan en homogen modells konduktivitet och konduktiviteten i en stokastisk kontinuummodell. Om båda modellerna skall ha jämförbara egenskaper vid stora skalor så skall effektivvärde för konduktiviteten i den heterogena modellen vara lika med den homogena modellens konduktivitet.

3.7 Metod för beräkning av flödesvägar

I denna studie analyseras flödesvägarna genom grundvattensystemet med hjälp av simulerade virtuella partiklar. Dessa partiklar följer grundvattenflödena genom modellen (s k partikelspårning eller ”particle tracking”). Ett stort antal partiklar representerar flödesvägarna i modellen. Totalt simuleras ca 220 000 flödesvägar med startpunkter i ett regelbundet mönster.

Partiklarnas startpunkter bildar ett uniformt mönster i horisontalplanet, ovanför strandlinjen. En partikel representerar en viss area på ett viss djup, t ex 167×167 m på djupet 500 m. En partikel representerar alltså inte ett visst givet grundvattenflöde, utan en partikel representerar flödesvägen från ett visst givet område i modellen (en startpunkt). Grundvattenflödets storlek varierar från startpunkt till startpunkt och därmed för de olika partiklarna. Startpunkter för partiklarna förekommer överallt i modellen (även i zoner), dock ej under havet – inga startpunkter förekommer alltså under havet. De simulerade partiklarna stoppas vid modellen övre begränsningsyta. Partiklarnas slutpunkter är alltså vid markytan, sjöbotten eller havsbotten. Ytvattenflöden är inte inkluderat i denna modellstudie.

Flödesvägarna i grundvattensystemet beräknas av datormodellen DarcyTools med hjälp av en iterativ metod. Partiklarna följer vektorn för grundvattenflödet, och eftersom vektorn varierar från punkt till punkt i modellen så uppdateras partiklarnas flödesriktning iterativt längs med flödesvägen från startpunkt till slutpunkt. Ett stort antal iterationer appliceras längs med flödesvägen – mer än 10 iterationer inom varje beräkningscell.

Flödesvägarna som skapats av de virtuella partiklarna har analyserats med avseende på längder och genombrottsstider, men även med avseende på det specifika grundvattenflödet vid startpunkterna. Med genombrottsstid menas den tid det tar för partiklen att röra sig från en viss startpunkt fram till slutpunkten vid markytan.

Flödesvägarna som skapats i flödesmodellen representerar endast advektiv transport. Dispersiv avvikelser från den advektiva flödesvägen har inte inkluderats när flödesvägarna genererades. Ej heller har några retentionsprocesser inkluderats när flödesvägarna genererades. Det tidigare diskuterade (se avsnitt 3.3) diffusiva utbytet mellan flödande vätska och stagnant vätska har inte heller simulerats när flödesvägarna beräknats.

Numerisk dispersion är inte inkluderad i de skapade flödesvägarna, eftersom flödesvägarna beräknades genom partikelspårning och inte genom att direkt lösa advektion-dispersions-ekvationen.

De virtuella partiklarna startas i en flödessituation som representerar den nuvarande flödessituationen (2000 AD). Partiklarna rör sig i ett flödesfält som ej förändras med tiden. Partiklarna får röra sig i modellen (följa det advektiva flödet) under en simulerad tidsperiod som är lika med en miljon år. Resultat för flödesvägar från partiklar som ej nått fram till markytan efter denna tidsperiod bestäms utgående från den punkt i modellen där partiklen befinner sig efter en miljon år. Endast ett fåtal partiklar har ej nått fram till markytan efter en miljon år.

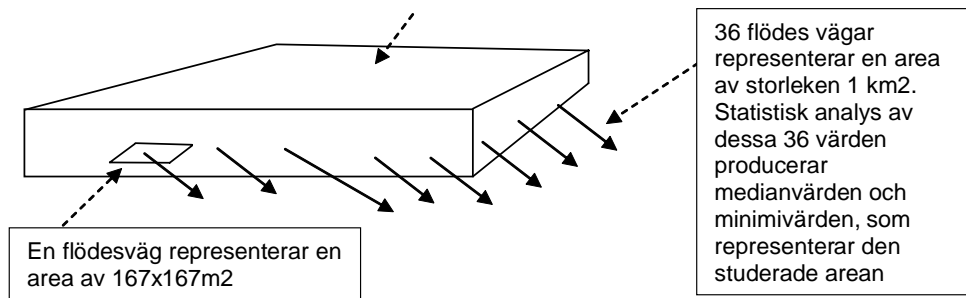
Sammanfattningsvis bildar alltså partiklarnas startpunkter ett uniformt mönster i horisontalplanet, ovanför strandlinjen. Partiklarnas startpunkter ligger på djupet 500 m, detta djup motsvarar ett tänkbart djup för ett slutförvar för kärnavfall. Varje flödesväg representerar ett område av storlek 167×167 m. Flödesvägarna startas i en flödessituation som representerar den nuvarande flödessituationen (2000 AD). Partiklarna rör sig i ett flödesfält som ej förändras med tiden. Flödesvägarna som skapats i flödesmodellen representerar endast advektiv transport.

3.8 Metod för analys av förvarsområden

Analysen av flödesvägar består både av en statistisk analys av alla flödesvägar som en population, men också av en analys av tänkta förvarsområden, där varje område representeras av ett flertal flödesvägar. Ett område lämpligt för ett slutförvar måste vara av en viss storlek. I denna studie har vi analyserat områden med storleken 1 km^2 . Flera sådana områden kan bilda ett större förvar, men analysen inriktas på enskilda områden.

Analysen av flödesvägar baseras på ett mycket stort antal vägar (ca 220 000) vilket är tillräckligt många för att erhålla en mycket god statistisk beskrivning av flödesvägar från förvarsdjup. Det skall dock påpekas att en del av analyserna inriktas på de allra längsta flödesvägarna, och i en sådan analys blir antalet studerade flödesvägar inte särskilt stort, därav följer att statistiskt sett är osäkerheten i egenskaperna för de allra längsta flödesvägars betydligt större än för t ex medianen av alla flödesvägar.

Totalt simuleras ca 220 000 flödesvägar med startpunkter i ett regelbundet mönster. Varje flödesväg representerar ett område av storlek 167×167 m. Ett område av storleken 1 km^2 representeras alltså av 36 flödesvägar. För varje förvarsområde beräknas medianvärden och minimivärden. I analysen av förvarsområden är det dessa två statistiska moment som karakteriserar ett visst förvarsområde. Principen för denna analys visas i figur 3-1.

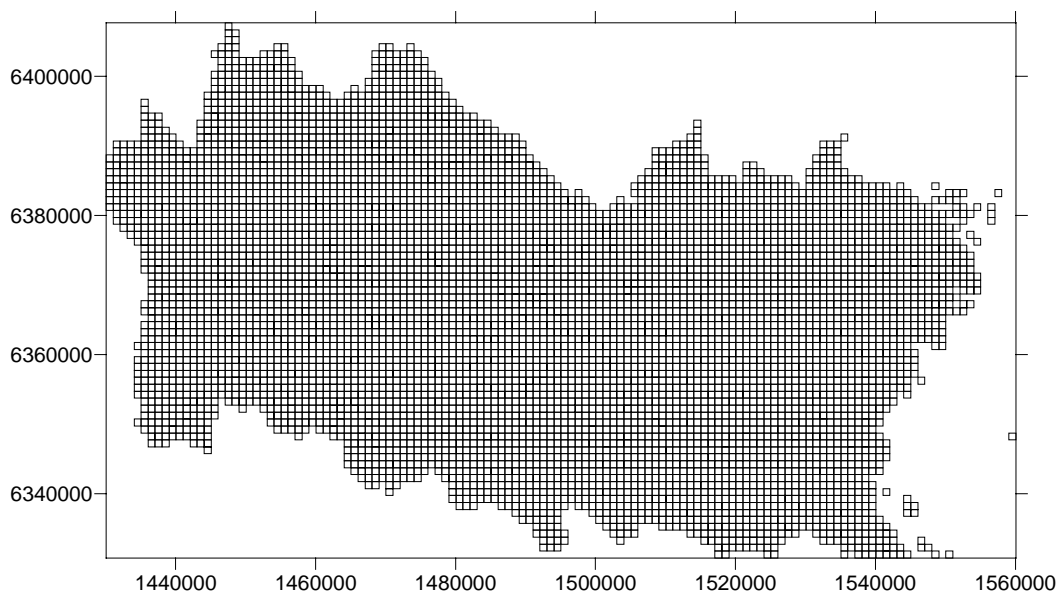


Figur 3-1. Principskiss som visar metoden för analys av försvarsområden.

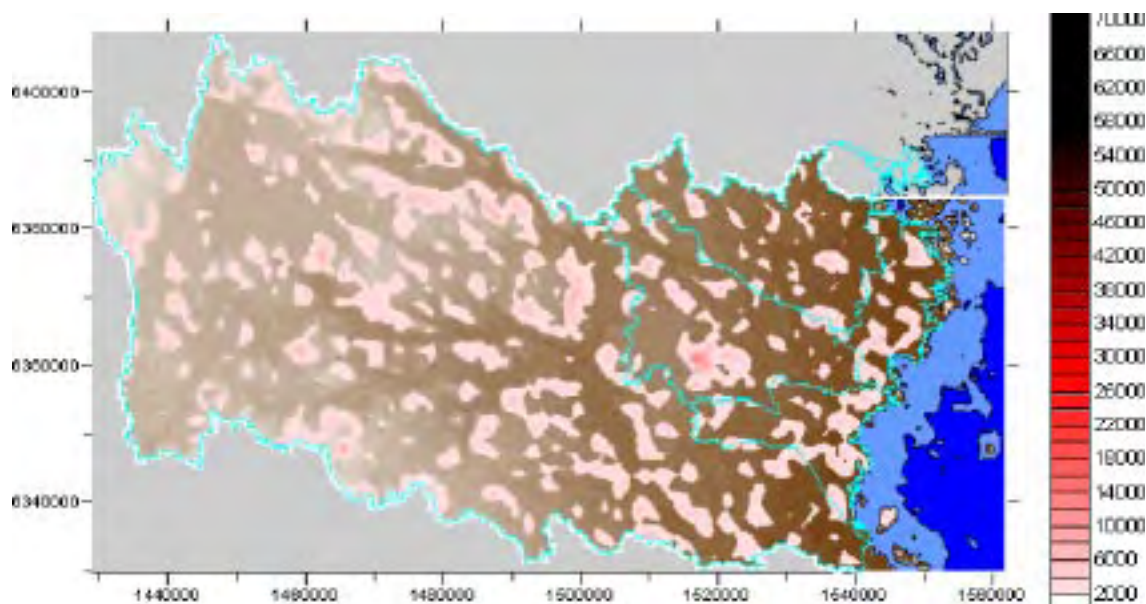
Den upprättade modellen täcker ett mycket stort område (detta diskuteras i avsnitt 4.1). För den statistiska analysen av försvarsområden indelas modellområdet ovanför strandlinjen i försvarsområden av storleken 1 km², 6 026 områden täcker hela modellområdet ovanför strandlinjen. De analyserade försvarsområdena framgår av figur 3-2. Notera att dessa områden inte är samma sak som det numeriska beräkningsnätet som används då grundvattentryck och grundvattenflöden skall beräknas.

Medianvärdena är valda som representativa värden för flödesmönstret från områden av storlek 1 km². Ett extremvärde för en viss punkt är av mindre intresse när det gäller att beskriva det allmänna flödesmönstret.

Baserat på de 6 026 studerade försvarsområdena (se figur 3-2) har en areabaserad analys av olika beräknade resultat utförts för det studerade modellområdet. Olika beräknade resultat, t ex medianlängd på flödesvägar från försvarsområden, presenteras på kartor över det studerade modellområdet (se konturplottar). Isolinjerna är beräknade med hjälp av Krigingmetoden. En sådan figur presenteras nedan (se figur 3-3). Som nämnts ovan så beräknas medianvärdena för försvarsområdena, det finns alltså flödesvägar som är betydligt längre än de värden som representerar försvarsområdena.



Figur 3-2. Studerade försvarsområden ovanför strandlinjen. Storleken på varje område är 1 km². Notera att dessa områden inte är samma sak som det numeriska beräkningsnätet som används då grundvattentryck och grundvattenflöden skall beräknas.



Figur 3-3. Exempel på resultat av areabaserad analys. Medianlängd för flödesvägar från förvarsområden. Bara längder > 2 000 m presenteras i figuren. De röda till svarta ytorna i figuren representerar områden med längder > 2 000 m.

Tabeller med statistiska fördelningar presenteras också i anslutning till figurerna som presenterar de areabaserade analyserna (se t ex figur 6-21). Det skall kanske påpekas att värdena som anges i dessa tabellers kolumner är oberoende av värdena i övriga kolumner, det är alltså inte ett och samma förvarsområde som har de längsta flödesvägarna, och de längsta genombrottsiderna etc.

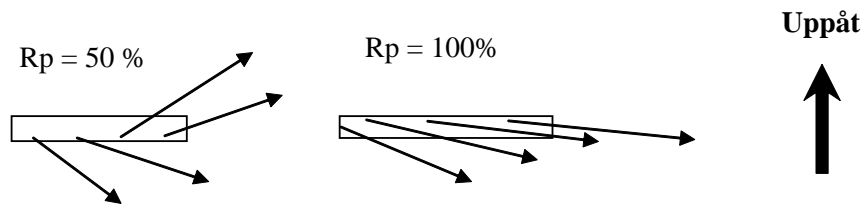
3.9 In- och utströmningsområden och Rp-parametern

Vid flödesvägarnas startpunkter beräknas det specifika flödets komponenter för de tre huvudriktningarna: X, Y och Z; flödeskomponenterna kallas q_x , q_y och q_z . Tillsammans definierar de tre komponenterna en vektor i tre dimensioner, betecknad som \mathbf{q} . Om komponenten i vertikalplanet (q_z) är riktad nedåt, då är också vektorn (\mathbf{q}) i någon mån riktad nedåt. Om komponenterna i horisontalplanet, q_x och q_y , är stora i jämförelse med komponenten i vertikalplanet, q_z , då är det specifika flödets \mathbf{q} riktning nära ett horisontalt flöde, men flödet är ändå i någon mån riktat nedåt om q_z är riktad nedåt.

I analysen av flödesvägarna har vi för varje studerat förvarsområde (se avsnitt 3.8) beräknat andelen startpositioner med nedåtriktad vertikal flödeskomponent (q_z). Andelen har uttryckts i procent av alla startpunkter inom det studerade området. Vi har kallat denna parameter för Rp-parametern och den varierar mellan 0 % och 100 %.

- Om alla startpunkter inom ett studerat området visar på nedåtriktade vertikala flödeskomponenter (q_z) då blir $R_p = 100\%$ för det studerade området.
- Om hälften av alla startpunkter inom ett studerat området visar på nedåtriktade vertikala flödeskomponenter (q_z) då blir $R_p = 50\%$ för det studerade området.
- Om inga startpunkter inom ett studerat området visar på nedåtriktade vertikala flödeskomponenter (q_z) då blir $R_p = 0\%$ för det studerade området.

Rp kan beskrivas som: *mängden nedåtriktade flödesvägar i procent inom ett visst område.* Se figur 3-4.



Figur 3-4. Inströmmande och utströmmande grundvatten – nedåtriktat och uppåtriktat grundvattenflöde. Rp-parametern. För det vänstra fallet är hälften av flödesvägarna inom det studerade området riktade nedåt, $R_p = 50\%$. För det högra fallet är alla flödesvägarna inom det studerade området riktade nedåt, $R_p = 100\%$.

Rp-parametern ger ingen detaljerad information om vinkeln på flödesvägarna bort från förvaransområdena, bara andelen nedåtriktade flödeskomponenter. Om vi studerar figuren ovan så ser man att för det högra exemplet är $R_p = 100\%$ trots att flera av flödesvägarna inte avviker så mycket från horisontalplanet.

Om vi studerar områden på 500 m djup, så kan vi notera det följande.

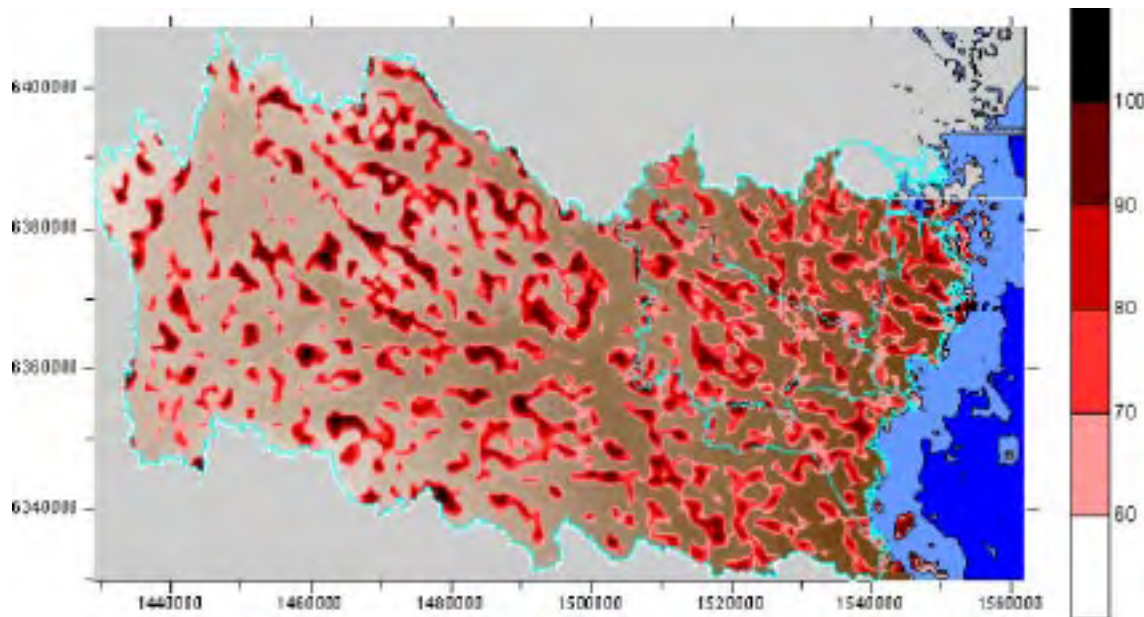
- Områden på 500 meters djup med R_p större än ca 90 % är ofta områden från vilket det djupa grundvattenflödet påfylls.
- Om $R_p > 50\%$ är det studerade området dominerat av nedåtriktade flöden, alltså är det ett område som är dominerat av inströmmande grundvatten.
- Om $R_p < 50\%$ är det studerade området dominerat av uppåtriktade flöden, alltså är det ett område som är dominerat av utströmmande grundvatten.

Rp är inte viktad mot flödets storlek, utan analysen baseras endast på areor och riktning på den vertikala flödeskomponenterna inom de studerade areorna. Det är fullt möjligt att införa en Rp-parameter som är flödesviktad, men det har inte gjorts i denna studie.

Det skall också påpekas att de studerade förvaransområdena inte har optimerats med avseende på geometrisk form, alla studerade områden är fyrkantiga i ett regelbundet mönster (se figur 3-2). Det är fullt möjligt att två områden som ligger bredvid varandra och som både har R_p nära 90 % skulle kunna optimeras till ett område med $R_p = 100\%$ och ett annat område med $R_p = 80\%$. Därför bör en analys av Rp inte fokuseras på områden med $R_p = 100\%$, eftersom områden med $R_p > 90\%$ lätt kan omformas till områden med $R_p = 100\%$. Alla områden med stora värden på Rp (t ex $R_p > 90\%$) kan betraktas som ungefärligen likvärdiga med avseende på Rp.

Baserat på de drygt 6 000 studerade förvaransområdena (se figur 3-2 ovan) har en areabaserad analys av Rp-parametern utförts för det studerade modellområdet. Rp-parametern för förvaransområdena presenteras på kartor över det studerade modellområdet (se konturplottar). Isolinjerna är beräknade med hjälp av Krigingmetoden. En sådan figur presenteras nedan (se figur 3-5).

Tabeller med statistiska fördelningar presenteras också i anslutning till figurerna som presenterar de areabaserade analyserna av Rp-värden (se t ex figur 6-25). Det skall kanske påpekas att värdena som anges i dessa tabellers kolumner är oberoende av värdena i övriga kolumner, det är alltså inte ett och samma förvarområde som har de största Rp-värdena, de längsta flödesvägarna, och de längsta genombrotstiderna etc.



Figur 3-5. Exempel på resultat av areabaserad analys. R_p -parametern för försvarsområden. Bara värden på $R_p > 60\%$ presenteras i figuren, alltså endast områden som domineras av nedåtriktade flöden. Röda-svarta ytor representerar områden med $R_p > 60\%$.

3.10 Kalibrering

Den etablerade modellen är inte kalibrerad, eftersom data lämpliga för en kalibrerings procedur inte är tillgängliga för en modell i en så stor skala som den etablerade modellens skala. Modellen har emellertid tilldelats egenskaper som är i linje med observerade och uppmätta värden.

3.11 Transportmotstånd, genombrottsid och porositet

För alla studerade geologiska enheter, och för alla olika studerade beräkningsfall har den effektiva porositeten satts till 0,001. Som tidigare presenterats i avsnitt 2.6 har modellen tilldelats detta värde på porositet delvis för att det är ett värde som har använts i tidigare studier, vilket möjliggör en direkt jämförelse av denna studies resultat med resultat från dessa andra studier, men också för att det är ett rimligt integrerat värde för berget; det finns dessutom ytterligare ett skäl som diskuteras nedan.

I jämförelse med det advektiva flödet av grundvatten så fördröjs lösta ämnen i grundvattnet genom olika retentionsprocesser, t ex fastläggning och matrisdiffusion (med matrisdiffusion menas ett löst ämnes diffusion in i det stagnanta vattnet i bergsmatrisen som omger en vattenförande spricka). Matrisdiffusion är en mycket viktig retentionsprocess och den fördröjning som erhålles genom matrisdiffusion styrs av en parameter som kallas transportmotståndet eller F .

Transportmotståndet kan förenklat beskrivas som ytan av en transportväg dividerad med grundvattenflödet längs densamma. För konstant geometri av flödesvägen kan transportmotståndet skrivas som:

$$F = a_r \frac{L}{q} \quad \text{Ekvation 3-4}$$

F = Transportmotståndet (Tid/Längd)

a_r = Flödesväta ytan per volym berg ($Längd^2/Längd^3 = 1/Längd$)

L = Transportvägens längd (Längd)

q = Specifika flödet eller darcyhastigheten (Längd/Tid)

Uttrycket för transportmotståndet blir mer komplicerat om geometrin varierar. Se vidare EU RETROCK 2005.

Kvoten L/q i ekvationen ovan kan beräknas i en grundvattenmodell. Den kan summeras över olika avsnitt längs med en flödesväg från startpunkt till slutpunkt (utströmningsområde). Dessutom om porositeten approximeras med ett konstant värde längs med flödesvägen kan kvoten (L/q) enkelt beräknas utifrån advektiva genombrotts tiden, på följande vis:

$$\sum \frac{L}{q} = \frac{1}{\eta} t_{genombrott} \quad \text{Ekvation 3-5}$$

η = Effektiv porositet (–)

$t_{genombrott}$ = Beräknad advektiv genombrotts tid (Tid)

Baserat på de två ekvationerna ovan (ekvation 3-4 och ekvation 3-5) erhålles följande ekvation.

$$F = a_r \frac{1}{\eta} t_{genombrott} \quad \text{Ekvation 3-6}$$

Av ekvationen ovan (ekvation 3-6) framgår det att transportmotståndet blir proportionellt mot genombrotts tiden om porositeten och flödesväta ytan per volym berg definieras som konstant utmed flödesvägen.

Detta är ett av skälen till varför vi har använt en konstant porositet i denna studie. I kapitel 7 jämförs olika förvarsområden, denna jämförelse baseras på specifika flöden och genombrotts tider. Som diskuterats ovan representerar genombrotts tiderna i den upprättade modellen också transportmotståndet (även om de absoluta värdena inte är desamma), alltså är en jämförelse av förvarsområden baserad på specifika flöden och genombrotts tider också en jämförelse av specifika flöden och transportmotstånd (detta gäller för den upprättade modellen eftersom porositeten är konstant).

En jämförelse av transportmotstånd är mycket intressant eftersom transportmotståndet bestämmer hur mycket olika nuklider fördröjs på grund av matrisdiffusion och sorption.

4 Modelldomän, diskretisering, randvillkor och egenskaper

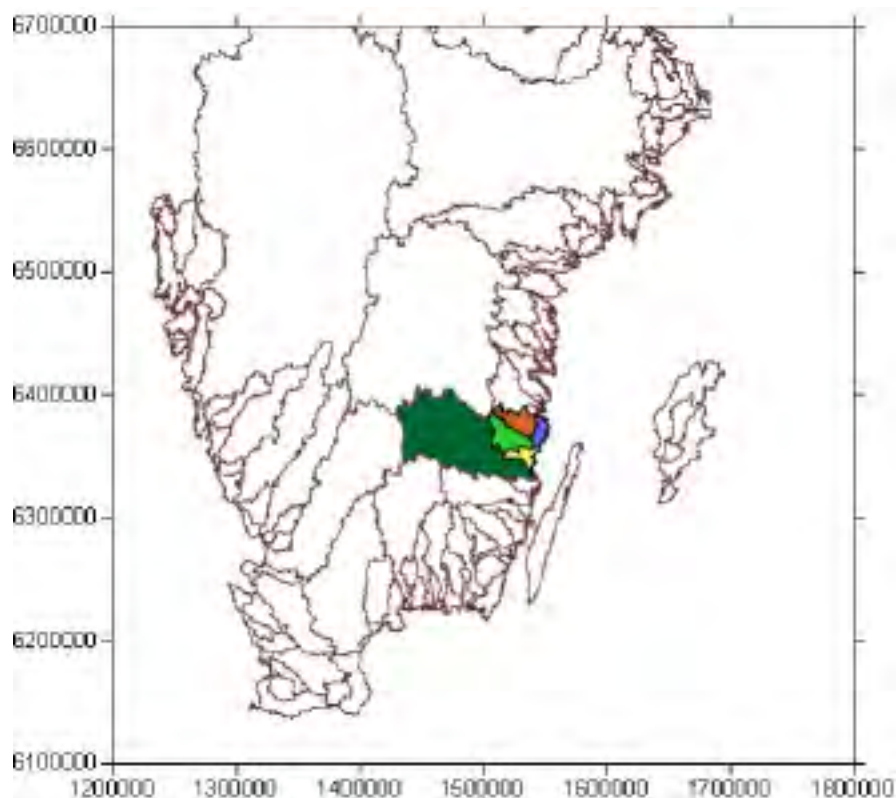
4.1 Topografiska vattendelare och modellområdets avgränsning, samt modellområdets topografi

Det studerade området avgränsas rumsligt av regionala topografiska ytvattendelare (se figur 4-1 och figur 4-2)

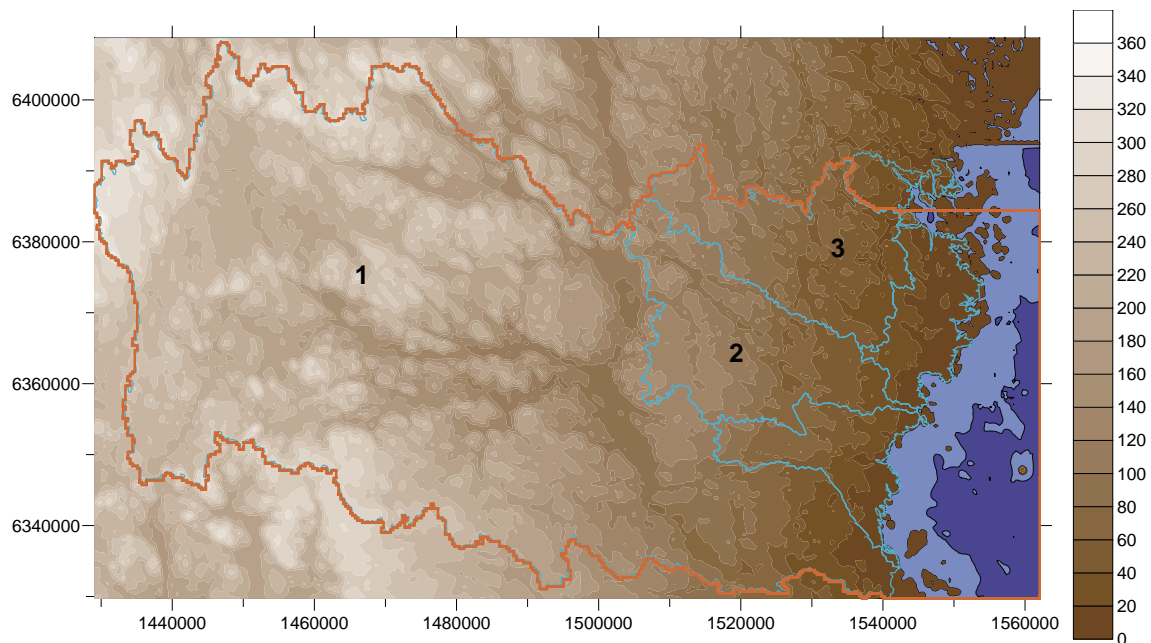
Det studerade området innehåller fem regionala avrinningsområden, varav tre områden är betydelsefulla nog för att ha namngetts av SMHI, områdena är markerade i figur 4-2 och har följande namn och storlek:

- Område 1: Emåns avrinningsområde. SMHI No.74. Area: 4 472 km²
- Område 2: Viråns avrinningsområde. SMHI No.73. Area: 588 km²
- Område 3: Marströmmens avrinningsområde. SMHI No.72. Area: 496 km²

Det aktiva området i den numeriska modellen utgörs av de fem avrinningsområdena som de är definierade i figur 4-1 och figur 4-2; dessutom inkluderar modellen ett stycke av havet (havsbottnen) utanför kustlinjen. Grundvattenmodellen representerar ett mycket stort område, utbredningen är i riktning nord-syd ca 79 km, och i riktning öst-väst ca 133 km. Modellens interna koordinatsystem har origo vid: 1429064, 6329723 (koordinatsystem RT90 2,5 gV).



Figur 4-1. Regionala topografiska ytvattendelare i södra Sverige. Det studerade modellområdet ovanför strandlinjen är markerat med färg.

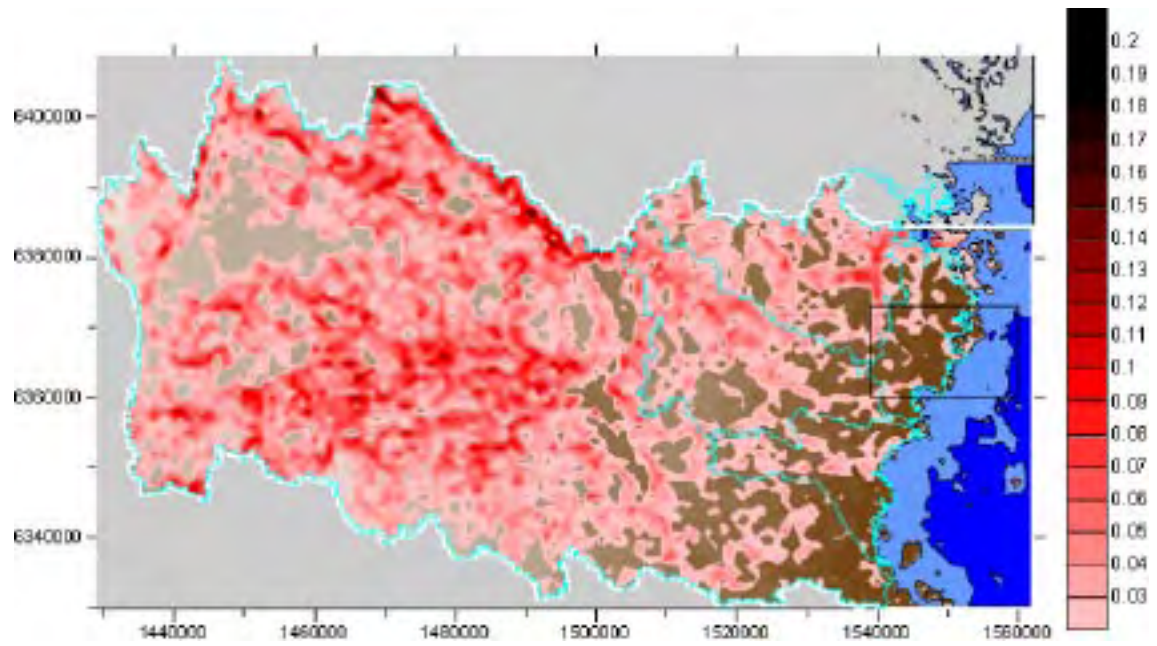


Figur 4-2. Det studerade modellområdet. Den brandgula linjen markerar modellens horisontala storlek. De ljusblå linjerna visar position för regionala topografiska ytvattendelare. Siffrorna markerar tre största regionala avrinningsområdena inom det studerade modellområdet: 1=Emån, 2=Virån, 3=Marströmmen.

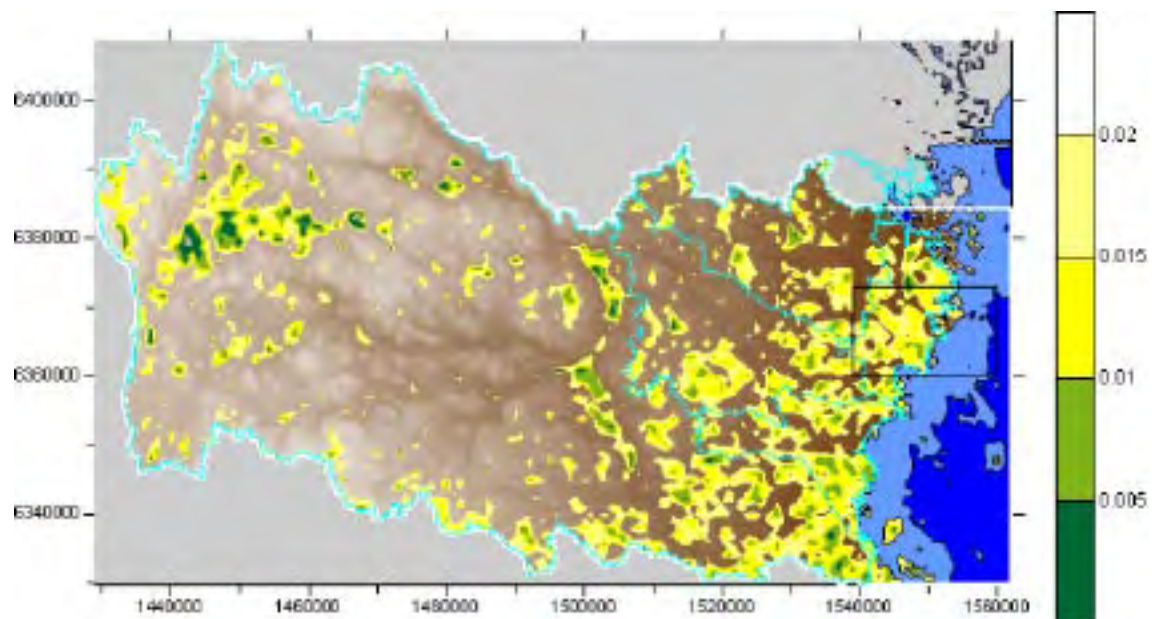
Modeller med olika djup och basnivåer har analyserats, men för den primära kedjan av studerade beräkningsfall har modellens bas ansatts till nivån $-2\ 500$ m över havet. En modell med en basnivå på ett större djup än nivån $-2\ 500$ m över havet förväntas ej vara nödvändig för denna studie, eftersom det tunga och saltrika grundvattnet (saltlake) som förekommer på stora djup förhindrar flöden till mycket stora djup av sött grundvatten och grundvatten med mindre salthalt än saltlaken. Detta diskuteras också i avsnitt 3.4 (modeller med olika basnivåer simuleras och analyseras i avsnitt 6.7).

Det kan vara av intresse att notera förhållandet mellan modellens horisontala storlek och dess tjocklek (djup). För den studerade modelldomänen är detta förhållandet jämförbart med motsvarande förhållande hos ett vanligt kreditkort. Tjockleken på ett kreditkort är ca 1 mm. Om kreditkortet har en tjocklek av 1,7 mm, stämmer förhållandet mellan längd och tjocklek ungefärligen med motsvarande förhållanden i modellen. Den studerade modelldomänen är alltså en tre dimensionell kropp som är mycket tunn i jämförelse med dess längd (och bredd).

Topografien är av mycket stor betydelse, både för yt- och grundvattenflöden. Modellens topografi baserar sig på en digital terrängmodell, diskuterad i kapitel 2. Den lokala topografiska gradienten presenteras i figur 4-3. Det framgår av figuren att de största topografiska gradienterna förekommer i inlandet, ett gott stycke från kusten. Nära kusten är de topografiska gradienterna små.



(i) Topografisk gradient. Bara värden större än 0,02 är avbildade i figuren.



(ii) Topografisk gradient. Bara värden mindre än 0,02 är avbildade i figuren.

Figur 4-3. Den topografiska gradienten i modellområdet (ovanför strandlinjen). Gradienten är beräknad för en horisontal upplösning på 333×333 m.

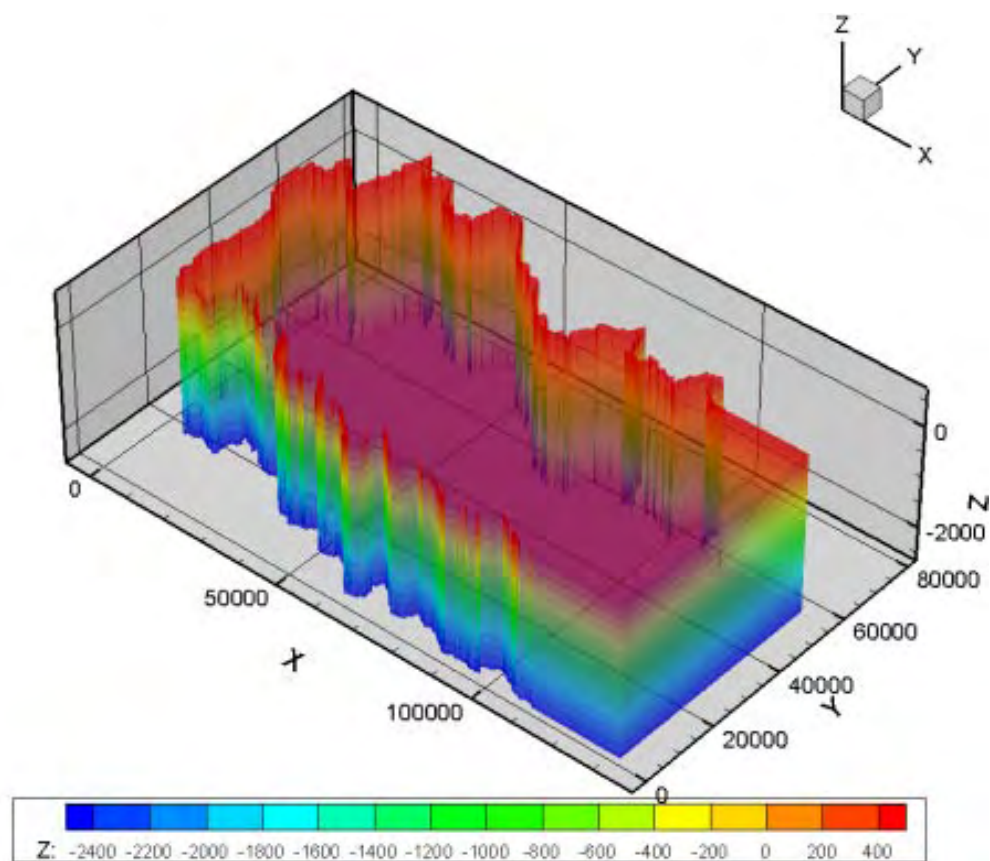
4.2 Beräkningsnät

Modellen består av ett mycket stort antal tre-dimensionella celler, ordnade i ett system av rader, kolumner och lager kallat beräkningsnätet, eller modellgriddan. Modellen har upprättats med hjälp av datorkoden DarcyTools 3.0 (DT30). Denna kod använder sig av ett ostrukturerat beräkningsnät, detta betyder att antalet rader, kolumner och lager inte är detsamma överallt i modellen, utan kan variera i olika delar av modellen.

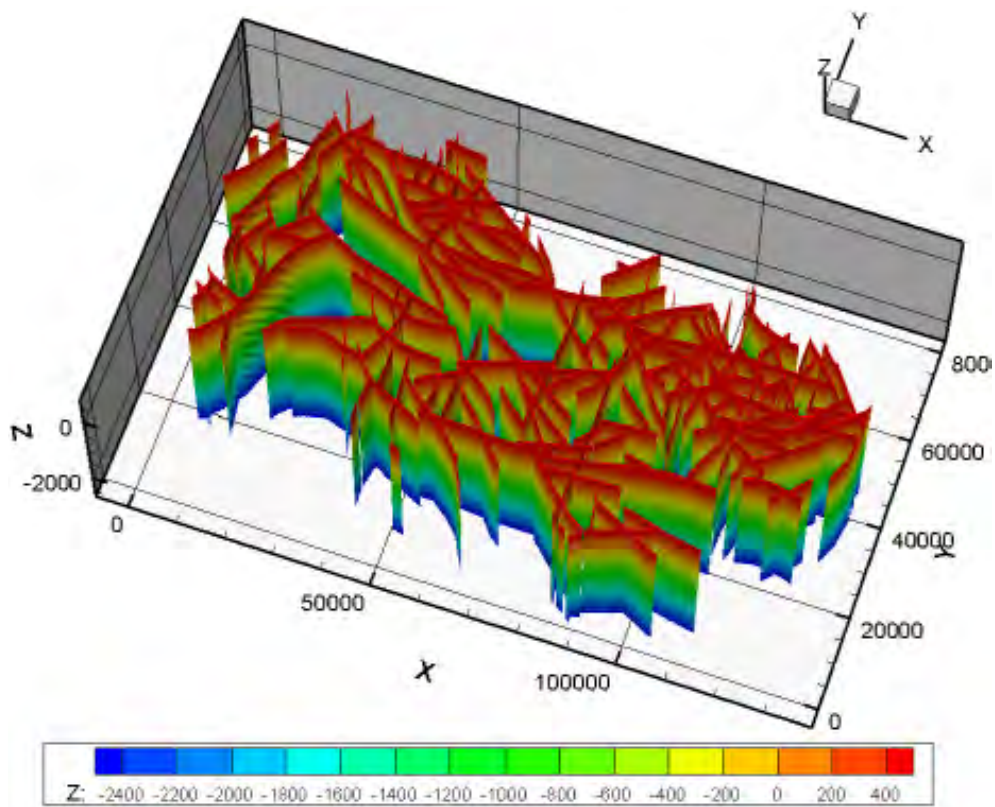
Beräkningsnätet i DT30 skapas utifrån olika tredimensionella objekt som representerar olika strukturer i modellen. Modellen yttre begränsningar definieras av en volym som presenteras i figur 4-4.

Modellens överyta är definierad av en undulerande yta med upplösningen av 200×200 m. Denna yta följer topografin och skär igenom modellvolymen som presenteras i figur 4-4. Alla strukturer som skall inkluderas i modellen definieras som tredimensionella objekt, t ex deformationszonerna vilka presenteras nedan i figur 4-5. Ett exempel på en litologisk enhet ges i figur 4-6.

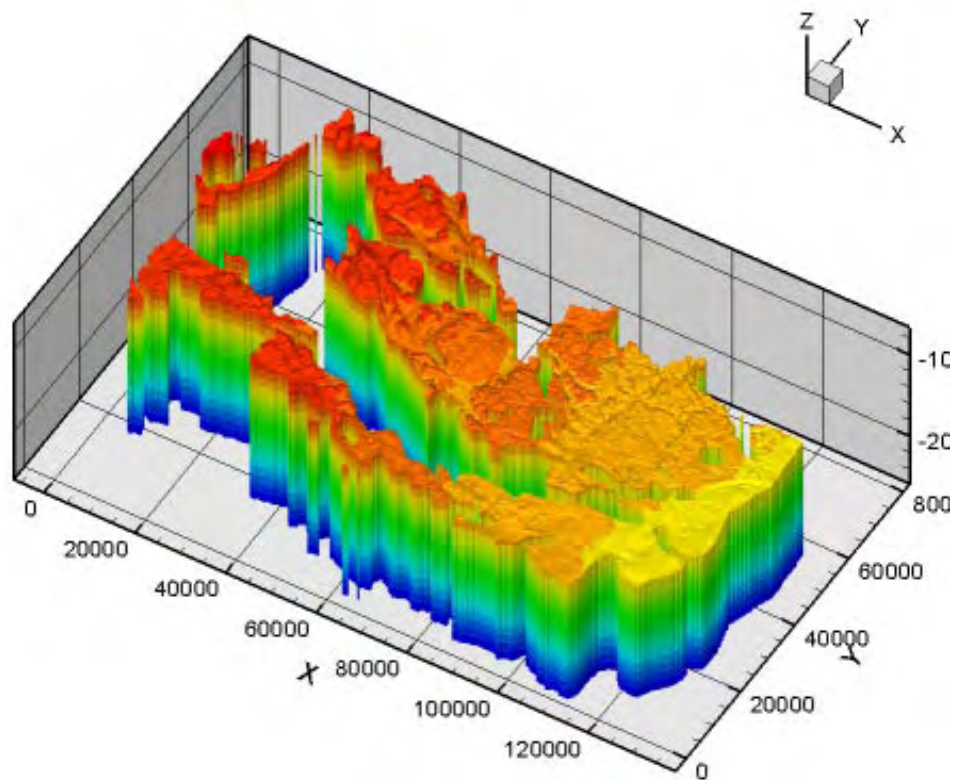
För varje tredimensionellt objekt definieras en cellstorlek. Resultatet blir ett komplext och ostrukturerat beräkningsnät. Ett exempel på ett sådant nät ges nedan i figur 4-7.



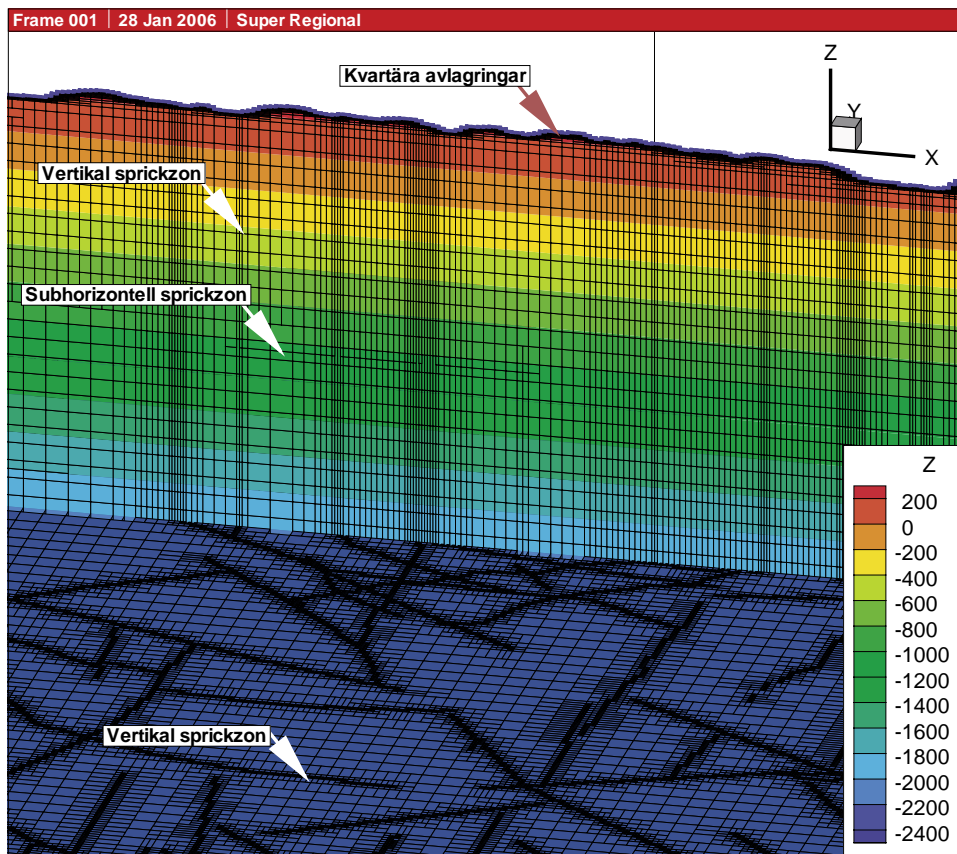
Figur 4-4. Tredimensionellt objekt som definierar modellens yttre begränsningar.



Figur 4-5. Tredimensionellt objekt som definierar deformationszonerna.



Figur 4-6. Tredimensionellt objekt som definierar en litologisk enhet.



Figur 4-7. Exempel på beräkningsnät. Olika strukturer som ingår i modellen är markerade med pilar i figuren. Varje struktur är definierat med en viss cellstorlek.

Följande cellstorlekar har definierats i modellen:

- Cellstorleken är 200×200×5 (m) i de kvartära avlagringarna och vid markytan.
- Cellstorleken är 200×200×100 (m) vid den yttre begränsningen (vattendelaren).
- Cellstorleken är 100×100×100 (m) vid deformationszoner och diabasgångar.
- Subhorizontala zoner har tjockleken 50 m.
- Cellstorleken är 400×400×100 (m) i de litologiska enheterna ned till ett djup av 1 100 m.
- Cellstorleken är 800×800×200 i de litologiska enheterna ned till nivån -2 500 m över havet.

Det totala antalet celler är ca 5 600 000.

4.3 Randvillkor

4.3.1 Inledning

Modellen är rumsligt begränsad av vertikala sidor, en horisontal botten och en övre yta som följer topografin. Modellens botten och vertikala sidor framgår av figur 4-4. Modellens topografi framgår av figur 4-2. Modellens gränser bör placeras där grundvattentrycket (grundvattenpotentialen) eller grundvattenflödet är känt, så att modellen kan tilldelas kända värden utmed modellens gränser sk randvillkor.

4.3.2 Randvillkor vid modellens sidor

Modellens vertikala sidor är placerade längs med regionala topografiska ytvattendelare (se figur 4-2), dessa strukturer utgör gränser för ytvattenflöden och det är sannolikt att de också utgör betydelsefulla barriärer för grundvattenflödet. Det är dock möjligt att det i verkligheten sker ett visst mindre grundvattenflöde också över regionala topografiska ytvattendelare, t ex där större sprickzoner skär vattendelaren, men de regionala vattendelarna är ändå de bästa gränser som kan identifieras inom det studerade området. I modellen definieras de vertikala sidorna som helt täta, inget grundvattenflöde kan alltså passera över dessa gränser i modellen ("no-flow boundary condition"). Modellens östra rand är placerad under havet, åtskilliga kilometer från kusten. Det är sannolikt att de verkliga grundvattenflödena under havet (ett gott stycke från kusten) är mycket små och huvudsakligen riktade uppåt (delvis beroende på landhöjningen). Modellens östra vertikala gräns (belägen under havet) är liksom modellens övriga vertikala sidor definierad som en tät rand. De applicerade randvillkoren presenteras schematiskt i figur 4-8.

4.3.3 Randvillkor vid modellens botten

Modellen botten ligger på ett mycket stort djup, på nivån $-2\ 500$ m över havet. Grundvattenflödena på så stora djup i berget är mycket små. Som tidigare diskuterats i avsnitt 3.4, så förekommer dessutom ett mycket tungt saltvatten (saltlake) på stora djup i berget. På nivåer över de mycket stora djup där saltlake förekommer bestäms flödesmönstret för sött och salt grundvatten huvudsakligen av topografins undulation. Den tunga saltlaken som förkommer på stort djup är mindre påverkad av topografien och fungerar troligen som ett golv som begränsar det vertikala flödet för sött grundvattnet och för grundvatten med mindre salthalt. Man kan troligen indela det studerade flödessystemet i två teoretiska domäner: en domän ovanför saltlaken där sött grundvatten och grundvatten med relativt låga salthalter cirkulerar, och en relativt stagnant domän på stort djup som är fylld med saltlake. På grund av den stora densitetsskillnaden mellan saltlaken och grundvattnet ovanför saltlaken kommer inte grundvattnet ovanför saltlaken att penetrera ner i saltlaken.

Av den ovan angivna orsaken, och därför att grundvatten flödet på stora djup är mycket litet, kan modellens botten definieras som tät. De flesta av de studerade beräkningsfallen är simulerade utan densitetsberoende flöde, och för dessa simuleringar bildar modellens bottennivå en gräns som representerar en nivå där den tunga saltlaken (och de mycket små grundvattenflödena) begränsar det vertikala djupet på de simulerade flödescellerna. Vissa beräkningsfall har simulerats med densitetsberoende flöde, i dessa simuleringar förekommer saltlaken ovanför modellens botten. De applicerade randvillkoren presenteras schematiskt i figur 4-8.

4.3.4 Randvillkor vid modellens övre yta

Det svenska klimatet med stor nederbörd, låga temperaturer (under vintertid) och relativt begränsad avdunstning, ger upphov till en stor avrinning. På grund av denna stora mängd vatten som finns tillgängligt för att bilda grundvatten så tenderar grundvattennivån i områden med begränsad genomsläpplighet (lera, moränområden och bergområden m m) att huvudsakligen ligga mycket nära markytan. Därmed kommer den lokala topografins undulation att bestämma grundvattennivåer och i väsentlig grad flödesriktningar för det lokala grundvattensystemet. Denna slutsats gäller dock inte för ett mycket genomsläppligt material såsom grova glaciofluviala sediment (åsar), men slutsatsen gäller för de områden som omger sådana material. Indirekt beror därför grundvattennivåerna i grova glaciofluviala sediment (åsar) också på topografien, eftersom den omgivande topografien ofta definierar en tröskelnivå som kontrollerar grundvattennivån i åsen.

Grundvattenflöden från stort djup i berget strömmar mot tydliga lågpunkter i topografin (utströmningsområden), såsom dalgångar. I dessa utströmningsområden ligger grundvattenytan vid markytan, eller mycket nära markytan. På de omgivande höjderna förekommer inströmningsområden och i dessa områden ligger grundvattenytan något under markytan, dock sällan mer än någon, eller några, meter under markytan.

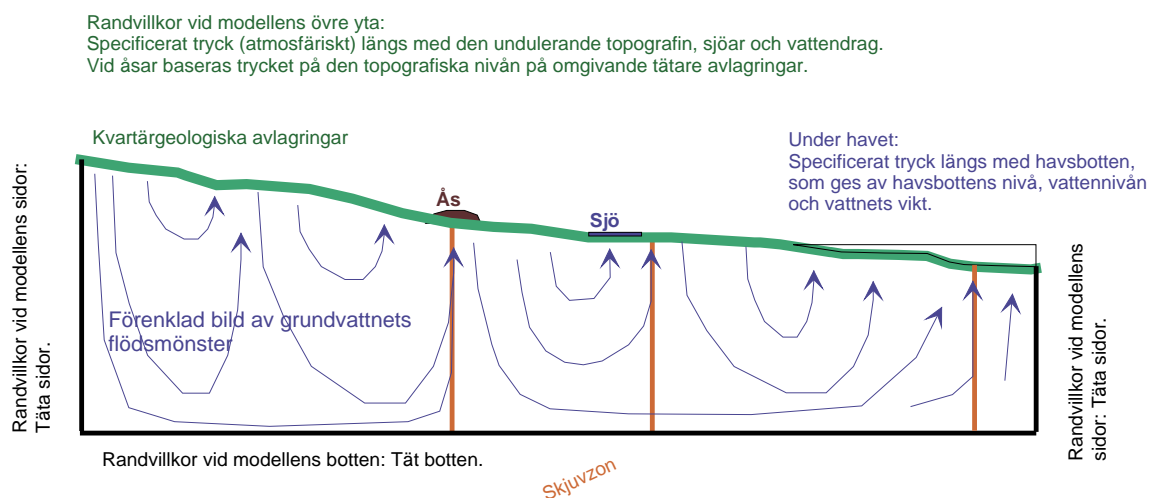
Simuleringar av /Holmén och Forsman 2005/ för ett område nära Forsmarks kärnkraftverk demonstrerade att längder och genombrotstider för flödesvägar från stort djup är tämligen okänsliga för grundvattenytans årstidsvariationer och därmed för mindre variationer i grundvattenytans nivå i inströmningsområden.

Om syftet med en grundvattenmodellering är att simulera flödesvägar från stora djup kan grundvattenytans nivå approximeras till markytans nivå, förutom i områden med mycket genomsläppliga kvartära avlagringar.

I denna studie har vi använt oss av den ovan diskuterade approximationen. I modellen antas det att grundvattenytans position kan approximeras till markytans topografi. Modellens övre yta följer topografin och längs med denna yta appliceras randvillkoret specificerat tryck. Trycket sätts lika med atmosfärstryck på de olika nivåer som ges av topografins undulation. Eftersom trycket är specificerat kommer modellen att beräkna in- och utflöde av grundvatten utmed denna yta. Vi har dock gjort tre undantag från approximationen om att grundvattenytan följer topografin.

- För områden som är definierade som glaciofluviala sediment interpoleras grundvattenytans nivå utifrån den topografiska nivån på de omgivande materialen (t ex morän); därmed kommer åsar som är lokala topografiska maxima inte att bli mättade med grundvatten, utan i modellen (liksom i verkligheten) kommer grundvattennivån i dessa strukturer att ges av den omgivande topografin.
- Under havet definieras ett specificerat tryck längs med havsbotten. Trycket ges av havsbottens nivå, vattennivån och vattnets vikt.
- Vid större sjöar och vattendrag definieras ett specificerat tryck (atmosfärstryck) längs med sjöarnas och vattendragens vattenyta, i enlighet med dessa ytors nivå i den topografiska databasen.

De applicerade randvillkoren presenteras schematiskt i figur 4-8.



Figur 4-8. Schematisk presentation av modellens randvillkor. Notera att denna figur inte är en visualisering av grundvattnets flödesmönster i den storregionala modellen.

Vi har analyserat två sensitivitetsfall (Fall 5J) i vilka grundvattennivån i inströmningsområden har sänkts med upp till 5 m från markytans topografiska nivå (och utjämnats). Resultatet av dessa fall har sedan jämförts med motsvarande fall baserade på den ovan diskuterade approximationen. Se avsnitt 6.6.8. Sensitivitetsfallen demonstrerar att den applicerade approximationen är rimlig.

4.3.5 Randvillkor vid simuleringar av densitetsberoende flöde

När densitetsberoende flöde simuleras så måste också randvillkor definieras för grundvattnets salthalt. Simuleringarna med densitetsberoende flöde är tidsberoende (transienta) och därför måste ett initialtillstånd definieras, från detta tillstånd simuleras sedan det studerade systemets utveckling fram till dagens situation (2000 AD).

Två olika initiala tidpunkter har studerats: antingen är initialtillståndet i modellen definierat till 10 000 år före nuvarande situation (alltså initialtillstånd vid 10 000 BP) denna tidpunkt används i villkor **s1** och **s2**, alternativt är initialtillståndet i modellen definierat till 14 000 år före nuvarande situation, denna tidpunkt används i villkor **s3**.

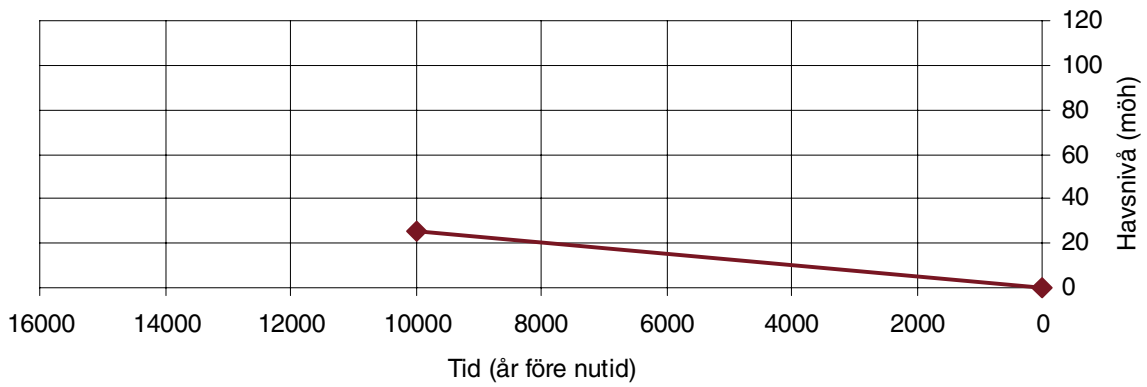
För den initiala tidpunkten definieras en viss fördelning av salthalt med djupet och isostatiska tryck beräknas för den applicerade initiala saltfördelningen. Modellens botten definieras som tät och med en specificerad salthalt motsvarande saltlake, modellens sidor definieras som täta men utan någon given specificerad salthalt. Modellen övre yta är definierad med ett specificerat tryck, vattnet som inströmmar ovanför strandlinjen definieras som sötvatten.

I den upprättade modellen används följande definition på salinitet: mängden löst salt (TDS) per volymenhet. TDS är ett engelskt uttryck ”total dissolved solids”. Salinitet lika med 10 % betyder alltså: 100 gram TDS per liter, vilket är ungefär lika med 0,1 kg TDS/kg.

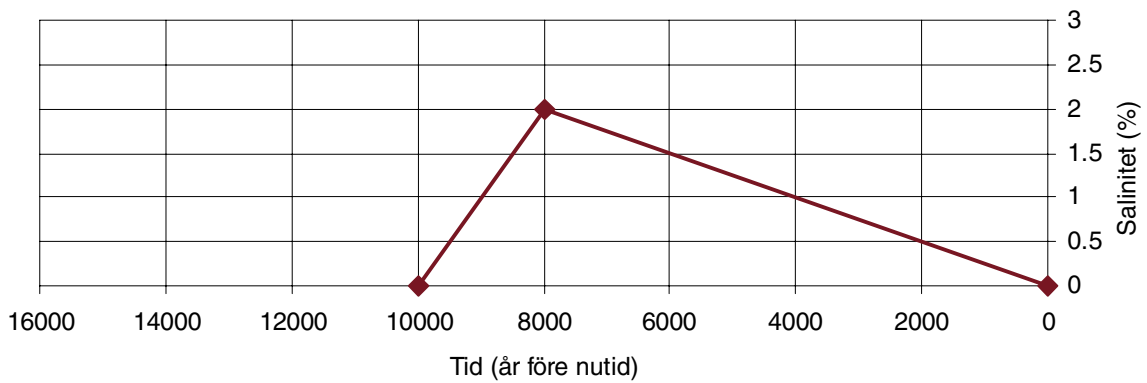
Östersjön är ett innanhav med bräckt vatten. Salthalten sjunker från ungefär 1 % söder om de danska sunden till nästan rent sötvatten i norra Bottenviken (världshaven har en salthalt på ungefär 3 %).

I modellen har salthalten i havet (Östersjön) definieras approximativt i enlighet med den gängse uppfattning om hur salthalten i havet har varierat under den simulerade tidsperioden /se text Westman et al. 1999, Gustafsson 2004/. Följande definition har använts i den upprättade modellen: Mellan 14 000 BP (före nutid) och 10 000 BP är salthalten i havet (i modellen) satt till noll. I verkligheten förekom under denna period två olika stadier i Östersjöns utveckling: Yoldia havet och Ancylus sjön. Yoldia havets lätt bräckta vatten inkluderas inte i modellstudien, istället simuleras Ancylussjöns sötvatten för hela perioden före 10 000 BP (Ancylussjön ca 10 800–9 500 BP). Efter 10 000 BP ökar salthalten i havet (i modellen) linjärt under 3 000 år upp till nivån 2 % (Litorina havet 9 500–4 000 år sedan), varefter salthalten i havet (i modellen) avtar linjärt ned till dagens nivå, som är satt till 0,5 %. Se figur 4-9.

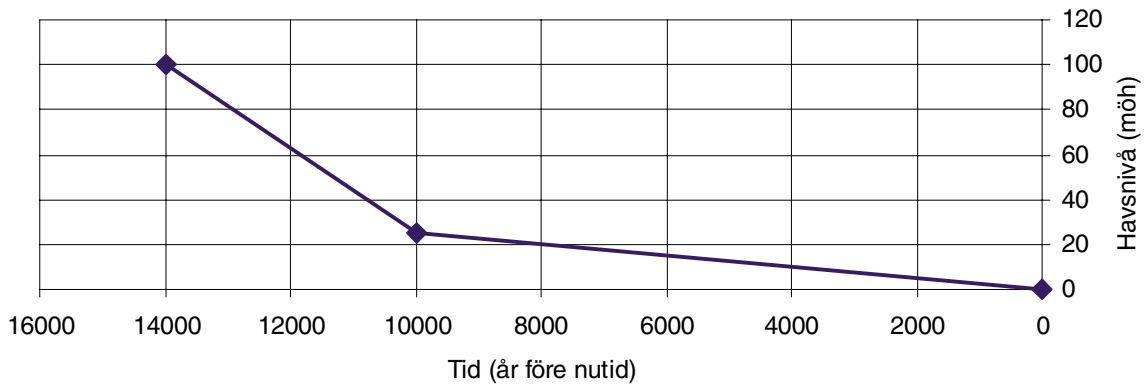
Strandlinjen och havets nivå förflyttas under den transienta simuleringen från nivån vid initialtillståndet (14 000 BC eller 10 000 BP) fram tills dagens nivå; denna procedur simulerar landhöjningen (eller strandlinjeförskjutningen), se kapitel 2. I modellen och vid tidpunkten 14 000 BP ligger strandlinjen på nivån +100 m över havet, därefter sjunker nivån i modellen linjärt med tiden fram till 10 000 BP, då nivån är +25 m över havet. Från 10 000 BP och fram till dagens situation sjunker strandlinjens nivå linjärt i modellen från +25 m över havet till +0 m över havet. Se figur 4-9.



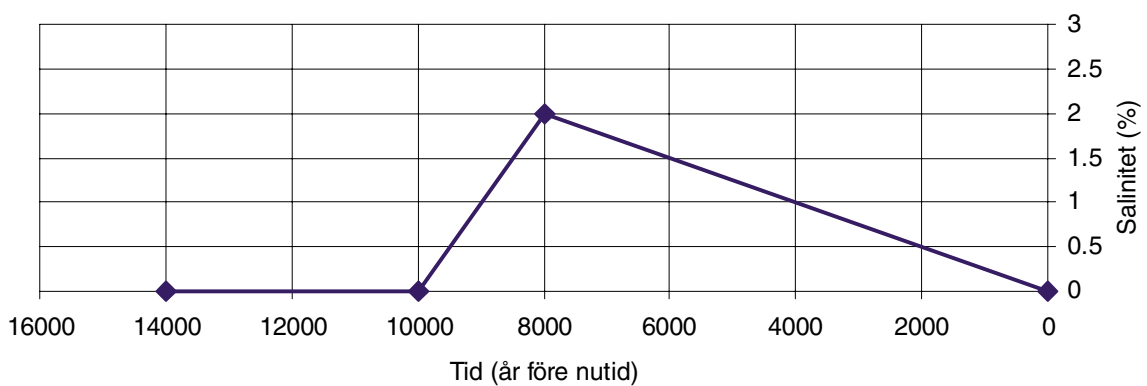
(i) Simulering s1 och s2. Strandlinjen och havets nivå som funktion av tiden.



(ii) Simulering s1 och s2. Salthalten i havet som funktion av tiden.



(iii) Simulering s3. Strandlinjen och havets nivå som funktion av tiden.



(iv) Simulering s3. Salthalten i havet som funktion av tiden.

Figur 4-9. Strandlinjen och havets nivå och salthalt, som dessa egenskaper har implementerats i de transienta och densitetsberoende simuleringarna

Två olika alternativa fördelningar av salthalten med djupet har specificerats för den initiala tidpunkten.

Det första studerade tillståndet (**s1**) liknar den initiala salthalt som har använts vid SKB:s platsmodelleringar, men den applicerade initiala saltfördelningen är inte identiskt med platsmodelleringarnas initiala salthalt. Detta beror på att den storregionala modellen huvudsakligen täcker områden ovanför den högsta kustlinjen, där djupet till det saltrika grundvattnet (saltlake) är större än i de mer kustnära platsmodellerna. Ovanför nivån -500 m över havet är salthalten satt till noll, under denna nivå och ned till nivån $-2\,500$ m över havet ökar salthalten linjärt från noll till 10 %, således är salthalten vid modellens botten lika med 10 %. Detta initalvillkor presenteras i figur 4-10.

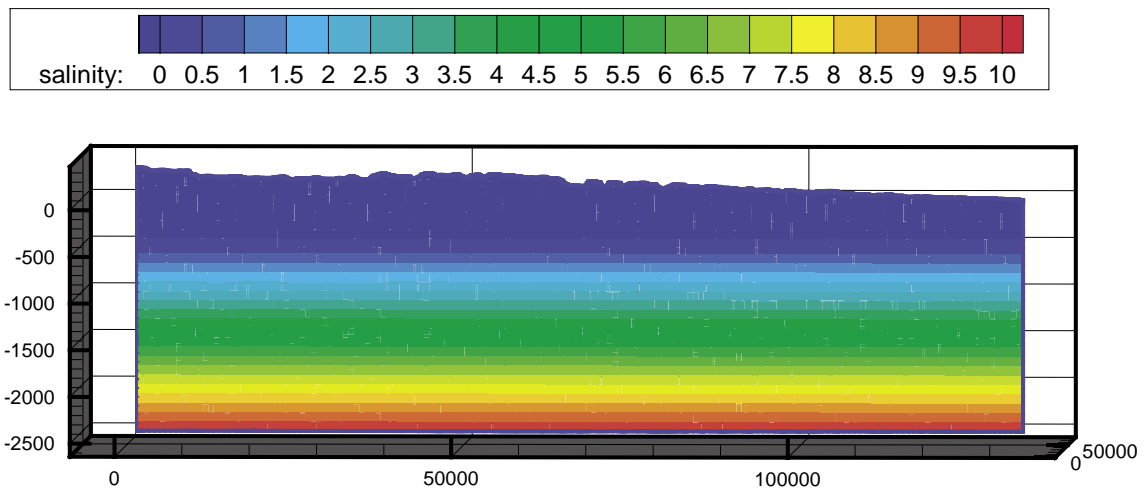
För de andra studerade initaltillstånden (**s2** och **s3**) har nivån för saltvattnet relaterats till topografins nivå, så att lägre nivåer för saltvattnet erhålls då den topografiska nivån ökar. Följande samband har använts:

- Om topografien är ≤ 100 m börjar saltvattnet vid nivån -700 m över havet.
- Om topografien är > 100 m börjar saltvattnet vid en nivå som ges av följande ekvation:
 $Z = -5,385 * \text{Topo} - 161,54$.

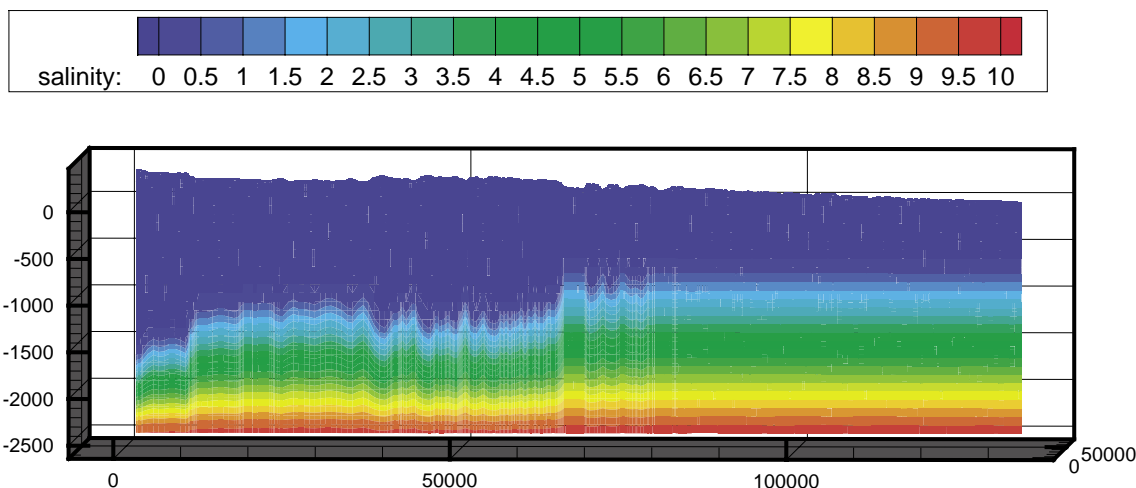
Ovanför den beräknade nivån (Z) är salthalten satt till noll, under denna nivå och ned till nivån $-2\,500$ m över havet ökar salthalten linjärt från noll till 10 %, således är salthalten vid modellens botten lika med 10 %. Detta initalvillkor presenteras i figur 4-11.

Sambandet ovan, som används i **s2** och **s3**, skall bara betraktas som approximativ metod för att generera ett initaltillstånd där salthalten varierar med den topografiska nivån.

I den upprättade modellen rör sig saltvattnet i enlighet med flödesekvationerna som presenteras i avsnitt 3.3, och baserat på en kontinuum betraktelse.



Figur 4-10. Initalvillkor **s1** för salthaltens variation med djupet. (Salinitet i procent.) En sektion genom modellen i väst-östlig riktning. Ovanför nivån -500 m över havet är salthalten satt till noll, under denna nivå och ned till nivån $-2\,500$ m över havet ökar salthalten linjärt från noll till 10 %. Profilen är placerad vid $Y = 6379700$ (rikets nät).



Figur 4-11. Initialvillkor s2 och s3 för salthaltens variation med djupet. (Salinitet i procent.) Exempel för en väst-östlig sektion. Profilen är placerad vid $Y = 6379700$ (rikets nät).

I verkligheten sker flödet i berget i sprickor. Grundvattenflödet sker dock inte i alla sprickor, många sprickor är återvändsgränder, eller delar av spricksystem som är dåligt konnekterade till de större sprickor som är effektiva ledare av grundvattnet. Ett stort antal mycket små sprickor förekommer dessutom, sprickor som har liten genomsläpplighet, men som ändå är konnekterade till de större mer genomsläppliga sprickorna. En viss andel av spricksystemet är alltså relativt passivt när det gäller att advektivt transportera grundvatten, men dessa sprickor har dock viss betydelse som buffert och reservoar för salt och föroreningar som transporteras med det flödande vattnet. Detta diskuteras i avsnitt 3.3.

Effekten av utbytet av salt mellan vätskan i de flödande sprickorna och den stagnanta vätskan i de omgivande passiva sprickorna är en fördröjning av saltets förflyttning i modellen. Detta beteende reproduceras i modellen av ”multi rate sub-grid model”, se avsnitt 3.3; processen inkluderas endast i de transienta densitetsberoende simuleringarna, och processen påverkar endast saltet som är löst i grundvattnet.

I denna studie är denna process (diffusivt utbyte mellan vätska i beräkningscellernas flödesporositet och vätska i en stagnant porvolym) inte inkluderad då flödesvägar beräknas i modellen med hjälp av virtuella partiklar. Flödesvägarna som genereras i flödesmodellen representerar endast advektiv transport.

En sammanfattning av initialvillkor och transienta randvillkor ges nedan i tabell 4-1.

Tabell 4-1. Sammanfattning av initialvillkor och transienta randvillkor.

Villkor	Initialvillkor och transienta randvillkor			
	Initial tidpunkt	Initial salinitetsfördelning	Strandlinjeförskjutning	Utveckling av salinitet i havet
s1	10 000 BP	Figur 4-10	Figur 4-9 (i)	Figur 4-9 (ii)
s2	10 000 BP	Figur 4-11	Figur 4-9 (i)	Figur 4-9 (ii)
s3	14 000 BP	Figur 4-11	Figur 4-9 (iii)	Figur 4-9 (iv)

4.4 Kwartära avlagringar

Modellen bygger på den geologiska beskrivning som presenterats i kapitel 2. De kvartära avlagringar som presenteras i avsnitt 2.3.1 och 2.4.1 har definierats i modellen med en horisontal upplösning av 200×200 m. De kvartära avlagringarnas horisontala utbredning framgår av figur 4-12.

De kvartära avlagringarnas varierande mäktighet (tjocklek) och genomsläpplighet har av numeriska skäl, för att passa med beräkningsnätet, skalats till en ekvivalent mäktighet om 10 m.

Följande värden på genomsläpplighet har använts:

- Glacifluvium $K=1E-4$ m/s
- Morän $K=1E-6$ m/s

4.5 Litologiska enheter

Modellen bygger på den geologiska beskrivning som presenterats i kapitel 2. De litologiska enheter som presenteras i avsnitt 2.3 och 2.4 har i modellen definierats utifrån tredimensionella objekt med en horisontal upplösning av 333×333 m, vertikalt sträcker sig dessa enheter (i modellen) från de kvartära avlagringarna och ned till modellens botten; undantaget är två enheter i Almseåkra formationen (modellens östra del) som har en begränsad vertikal utsträckning. De inkluderade enheterna framgår av tabell 4-2. Enheternas horisontala utbredning framgår av figur 4-13.

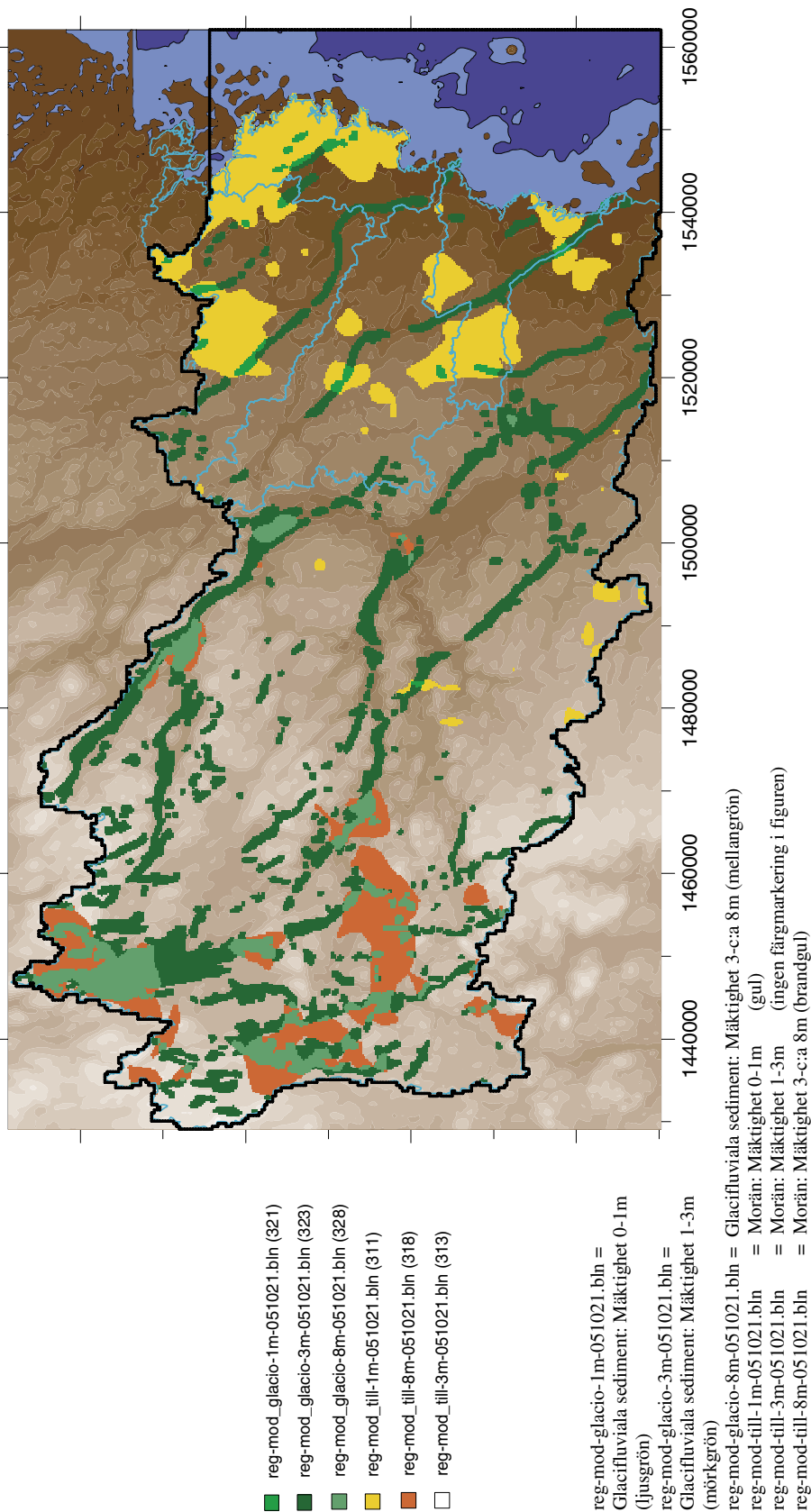
Tabell 4-2. Litologiska enheter inkluderade i modellen. (Se också tabell 2-2.)

Bergart *	Kod	Kommentar
Transskandinaviska granit-porfyrbältet**	1	
Sandsten, kambrium	338	
Yngsta diabas	503	Almseåkraformationen
Götemar-Jungfrungranit m fl	607	
Jotnisk sandsten, konglomerat, lerskiffer	610	Almseåkraformationen
Sura vulkaniska bergarter	754	
Smålands-Värmlandsgranit, Rätan- och Sorselegranit	756	Också specificerad under Almseåkra formationen
Gabbro, delvis ultrabasisk, diorit, amfibolit	757	
Äldsta graniter (urgraniter): tonalit, granodiorit, granit	758	
Basiska vulkaniska bergarter	767	
Sura vulkaniska bergarter	768	
Gråvacka, skiffer, kvartsit och arkos, delvis omvandlade till gnejs och migmatit	771	
Gråvacka, skiffer, kvartsit	775	

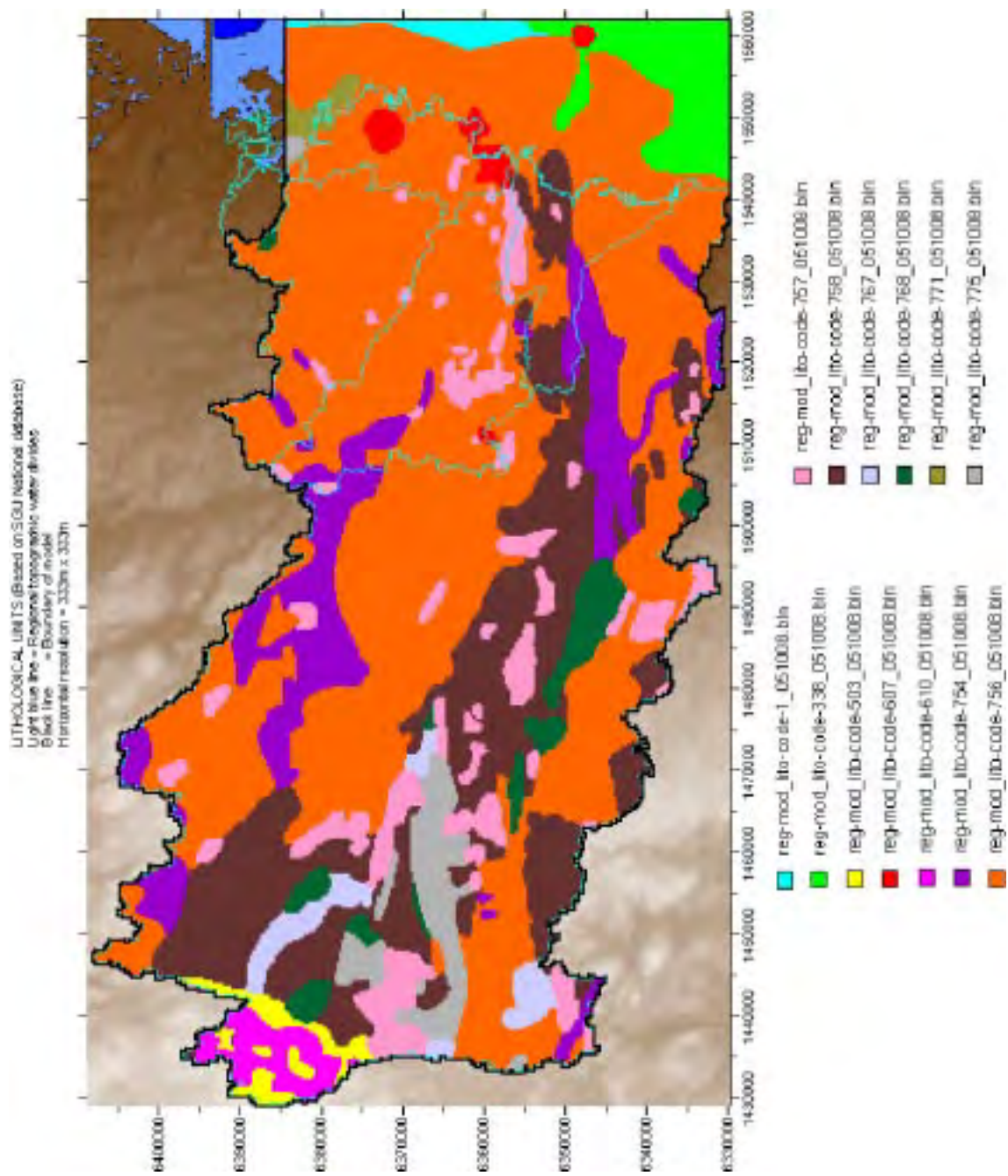
* Svensk översättning hämtad ifrån /SNA 1994/ för litologier ur den Svenska delen av den Fennoskandiska skölden /SGU 2005c/.

** Information om bergart saknas i litologisk databas /SGU 2005c/, information hämtad ifrån maringeologisk karta i /SNA 1994/.

JORDARTER (Baserad på SGU, Nationalatlas)
 Ljusblå linje = Regionala topografiska ytvattendelare.
 Svart linje = Modelldomän.
 Horisontell upplösning av jordarter = 200m x 200m



Figur 4-12. Horisontal utbredning av kvartära avlagringar som de är definierade i modellen (ingen färgmarkering motsvarar 1–3 m morän).



Figur 4-13. Horisontal utbredning på Litologiska enheter som de är definierade i modellen. De litologiska koderna anges som `_lito_code-xxx`, och refererar till tabell 4-2.

I modellen har de litologiska enheternas tilldelats värden på hydraulisk konduktivitet (genomsläpplighet) som baseras på: (i) värden lagrade i SGU:s brunnarkiv (se kapitel 2) och (ii) en bedömd trend för djupavtagande som baseras på mätningar vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn (se kapitel 2 och bilaga 5).

Följande metod har använts för varje litologisk enhet: Ett representativt värde för den litologiska enhetens varierande K-värden har tagits fram. Detta värde är ett geometriskt medelvärde baserat på värden i SGU:s brunnarkiv, se tabell 2-2. Detta värde gäller i modellen vid och ovanför djupet 67 m. Under djupet 67 m avtar K-värdena i modellen i enlighet med ett djupavtagande, trenden för detta djupavtagande baseras på observationer vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn, se figur 2-25 och figur 4-14). Det bör påpekas att den ovan nämnda trenden i djupavtagandet egentligen avser nivå och inte djup, men vi har valt att approximera dessa nivåer till olika djup; detta är möjligt eftersom den topografiska nivån i vid platundersökningarna inte är så mycket över noll. Följande ekvationer har använts:

$$d > 67m \rightarrow K = C d^L \quad \text{Ekvation 4-1}$$

$$d \leq 67m \rightarrow K = K_m$$

d = Djup

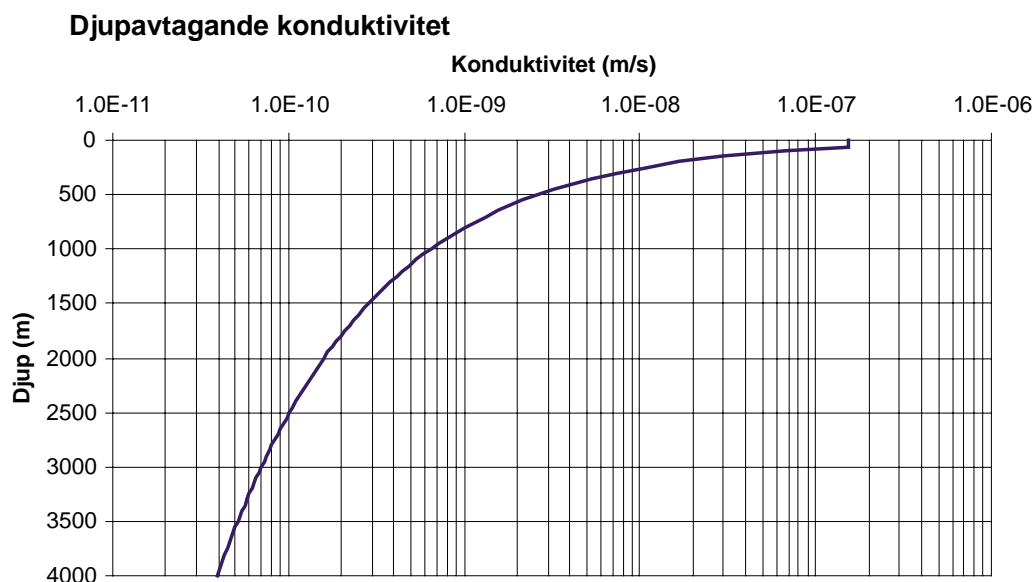
K = Bergets konduktivitet

K_m = Bergets konduktivitet, representativt värde från brunnarkivet

C = En koefficient som väljs på ett sådant sätt att K vid djupet $67m = K_m$

L = $-2,02$ (trend för djupavtagandet)

Med hjälp av ekvation 4-1 har djupavtagande K-värden beräknats för alla litologiska enheter. Resultatet ges i bilaga 2.



Figur 4-14. Bedömd trend för konduktivitetens djupavtagande i det regionala modellområdet vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn. Testskala 100 m. Deformationszoner är exkluderade. K-värdet ovanför djupet 67 m = K vid 67 m.

4.6 Vertikala deformationszoner

Modellen bygger på den geologiska beskrivning som presenterats i kapitel 2. De deformationszoner som presenteras i avsnitt 2.3.7 har definierats i modellen som kontinuerliga vertikala strukturer med en horisontal upplösning av 100×100 m, vertikalt sträcker sig dessa zoner från de kvartära avlagringarna och ned till modellens botten. Deformationszonernas horisontala utbredning som de har definierats i modellen framgår av figur 4-15.

Deformationszonernas genomsläpplighet med djupet baseras på mätningar vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn (se kapitel 2, figur 2-22). Ett konstant värde ansätts ovanför djupet 67 m. Under djupet 67 m avtar K-värdena i modellen i enlighet med ett djupavtagande, trenden för detta djupavtagande stämmer med observationer vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn. Det bör påpekas att den ovan nämnda trenden i djupavtagandet egentligen avser nivå och inte djup, men vi har valt att approximera dessa nivåer till olika djup; detta är möjligt eftersom den topografiska nivån i vid platsundersökningarna inte är så mycket över noll. Följande ekvationer har använts:

$$\text{Transmissivitet: } d > 67m \rightarrow T = C d^L \quad \text{Ekvation 4-2}$$

$$d \leq 67m \rightarrow T = T_{67m}$$

$$\text{Konduktivitet: } K = T/w$$

d = Djup

T = Deformationzonens transmissivitet

T_{67m} = Deformationzonens transmissivitet vid djupet 67m

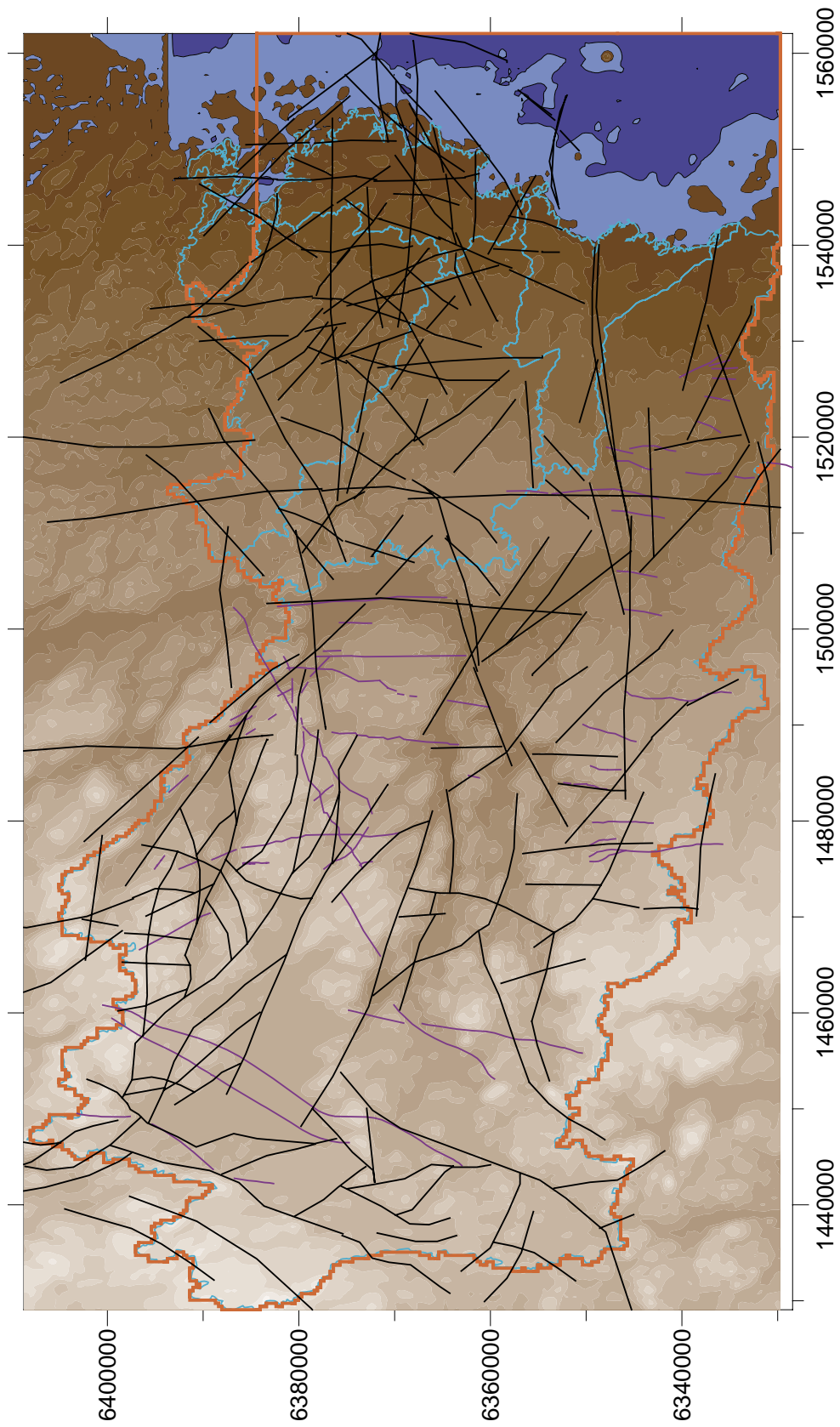
C = 0,219

L = -1,783 (trend för djupavtagandet)

K = Hydraulisk konduktivitet

w = Hydraulisk vidd

Genom att tillämpa ekvation 4-2 erhålls ett djupavtagande med avseende på transmissivitet. I modellen ansätts dock värden på hydraulisk konduktivitet. Den hydrauliska konduktiviteten har beräknats med hjälp av transmissivitet (enligt ekvation 4-2) och en hydraulisk vidd om 100 m. Denna vidd har använts eftersom det är storleken på beräkningscellerna som representerar deformationszonerna (se figur 4-7). Resultatet presenteras i figur 4-16.



Figur 4-15. Deformationszoner och diabasgångar; horisontal utbredning i modellen. Deformationszonerna är markerade med svarta streck, diabasgångarna är markerade med lila streck.

4.7 Diabasgångar

Modellen bygger på den geologiska beskrivning som presenterats i kapitel 2. De diabasgångar som diskuteras i avsnitt 2.3.7 har definierats i modellen som kontinuerliga vertikala strukturer med en horisontal upplösning av 100×100 m, vertikalt sträcker sig dessa zoner från de kvartära avlagringarna och ned till modellens botten. Diabasgångarnas horisontala utbredning framgår av figur 4-15.

I modellen har diabasgångarna definierats som mycket genomsläppliga längs med gångarna, men med en liten genomsläpplighet tvärs gångarna; således en anisotrop formulering för genomsläppligheten. Genom att gångarna är explicit definierade i beräkningsnätet så är det möjligt att införa en sådan formulering.

Längs med gångarna har samma djupavtagande konduktivitet används som för deformationszonerna (se figur 4-16), tvärs gångarna har genomsläppligheten reducerats med en faktor lika med 0,01. (Betydelsen av mindre värden på denna faktor har studerats i ett antal sensitivitetfall.) Således används följande ekvationer:

Transmissivitet

Ekvation 4-3

$$d > 67m \rightarrow T = C d^L$$

$$d \leq 67m \rightarrow T = T_{67m}$$

Konduktivitet längs med gången

$$K_L = T/w$$

Konduktivitet tvärs gången

$$K_T = 0,01 (T/w)$$

Variabler

$$d = \text{Djup}$$

$$T = \text{Deformationzonens transmissivitet}$$

$$T_{67m} = \text{Deformationzonens transmissivitet vid djupet } 67m$$

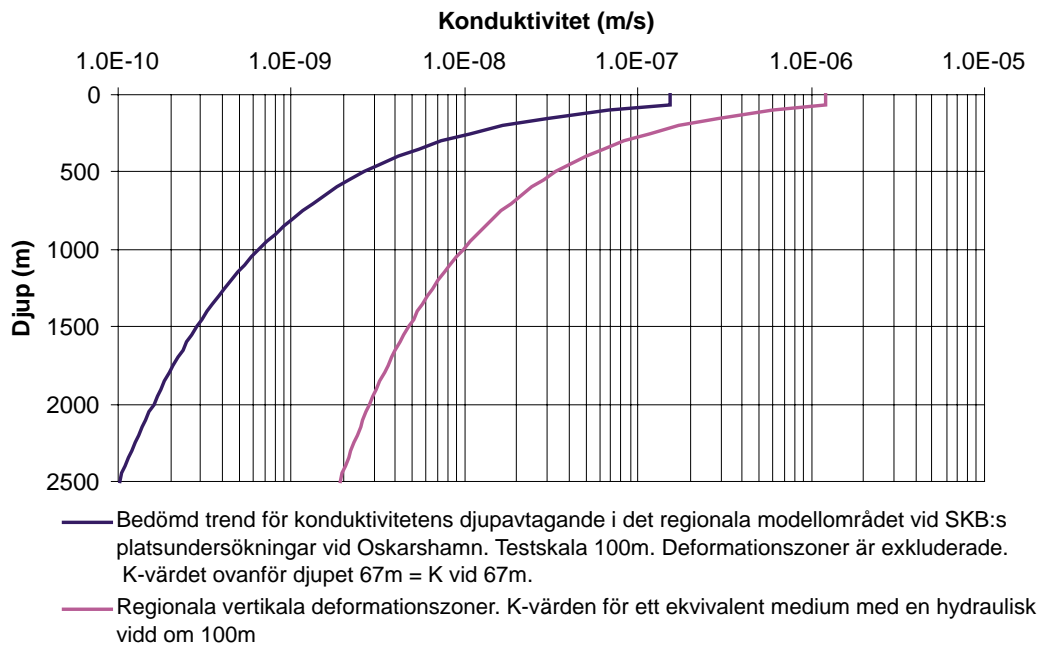
$$C = 0,219$$

$$L = -1,783 \text{ (trend för djupavtagandet)}$$

$$K = \text{Hydraulisk konduktivitet}$$

$$w = \text{Hydraulisk vidd}$$

I modellen genereras diabasgångarna efter de vertikala deformationszonerna, därmed kommer diabasgångarnas att skära genom deformationszonerna.

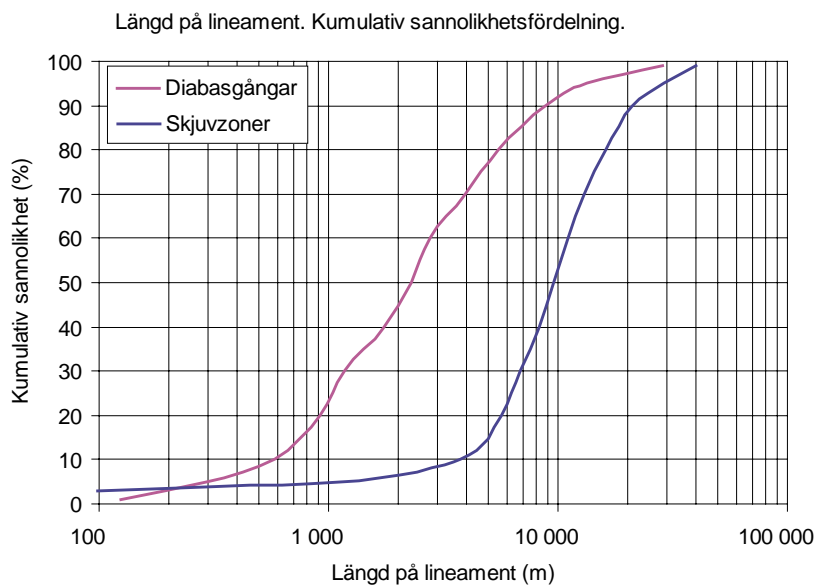


Figur 4-16. Vertikala deformationszoner och berget mellan zonerna. Hydrauliska konduktivitetens djupavtagande i modellen.

4.8 Horisontala deformationszoner

I ett antal sensitivitetfall har horisontala deformationszoner inkluderats i modellen. Dessa zoner har stokastiskt genererats utifrån längden på de vertikala deformationszonerna, följande metodik har använts.

Utifrån längden på de lineament vilka i modellen definierar de vertikala deformationszonerna har en sannolikhetsfördelning av lineamentlängder tagits fram, se figur 4-17.



Figur 4-17. Längd på observerade lineament, vilka definierar utsträckning på regionala vertikala deformationszoner. Kumulativ sannolikhetsfördelning.

De horisontala deformationszonerna har definierats som varande cirkulära. Sannolikhetsfördelningen i figur 4-17 (lineamentlängder) har använts för att stokastiskt generera värden på de horisontala deformationszonernas diameter.

Mängden horisontala zoner som inkluderas i modellen bestäms av ett P_{32} -värde. P_{32} beräknas som arean på zonerna delat med modellens volym. Det applicerade P_{32} -värdet är lika stort som P_{32} -värdet för de vertikala deformationszonerna, vilket är lika med: $3,7E-4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (modellens bas vid nivån -2 500 m över havet).

Det skall påpekas att detta P_{32} -värde ($3,7E-4 \text{ m}^2/\text{m}^3$) är betydligt mindre än det P_{32} -värde som har använts för de regionala deformationszonerna i SKB:s regionala platsmodelleringar. Orsaken till detta är att mängden vertikala (och subvertikala) deformationszoner i den databas som vi har använt för den storregionala modellen (se avsnitt 2.3.7) är betydligt mindre i den storregionala modellens östra del än i dess västra del, se figur 4-15. (De regionala platsmodelleringarna representerar bara en ringa del av den upprättade storregionala modellen.)

De horisontala deformationszonernas rumsliga placering i modellen baseras på en Poissionfördelning; genom att zonernas mittpunkter definieras utifrån en Poissionfördelning (utan att zonernas storlek beaktas). Dock, för att erhålla en mer jämn fördelning av de stora zonerna i modellen så introducerades dessutom en svag negativ rumslig korrelation, så att stora horisontala zoner tenderar att ej placeras ovanför varandra i modellen, utan sprids mer jämt över modellen. Med en strikt Poissionfördelning av mittpunkter är det fullt möjligt att många stora zoner placeras ovanför varandra i en viss del av modellen, detta bedömdes som mindre troligt från ett sprödtekoniskt perspektiv och därför infördes den negativa rumsliga korrelationen för stora zoner. Horisontala zoner genererades både under och över markytans nivå, på ett sådant sätt att zoner kan skära in genom markytan, detta demonstreras i figur 4-18.

Två olika realiseringar av horisontala deformationszoner har tagits fram, dessa presenteras i figur 4-19 och figur 4-20.

De horisontala deformationszonerna definieras med samma djupavtagande genomsläpplighet som de vertikala deformationszonerna, med den skillnaden att den ekvivalenta hydrauliska vidden är satt till 50 m (och inte till 100 m som för de vertikala zonerna).

Följande ekvationer har använts:

$$\begin{aligned} \text{Transmissivitet: } d > 67m &\rightarrow T = C d^L && \text{Ekvation 4-4} \\ d \leq 67m &\rightarrow T = T_{67m} \end{aligned}$$

$$\text{Konduktivitet: } K = T/w$$

d = Djup

T = Deformationzonens transmissivitet

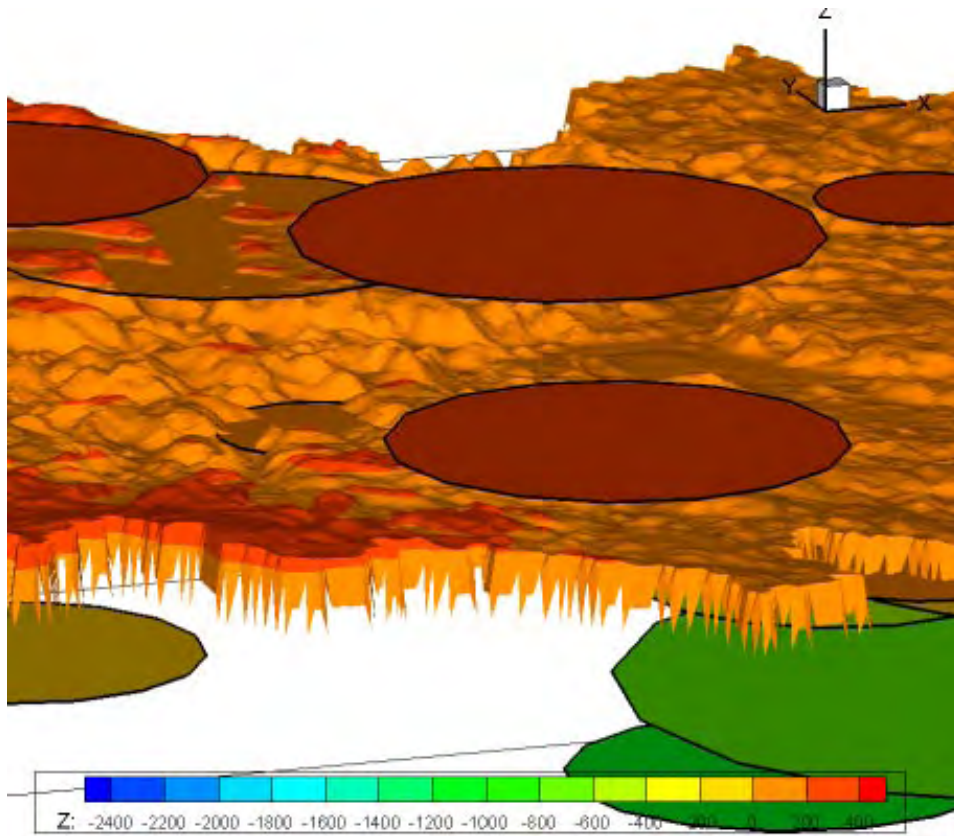
T_{67m} = Deformationzonens transmissivitet vid djupet $67m$

C = 0,219

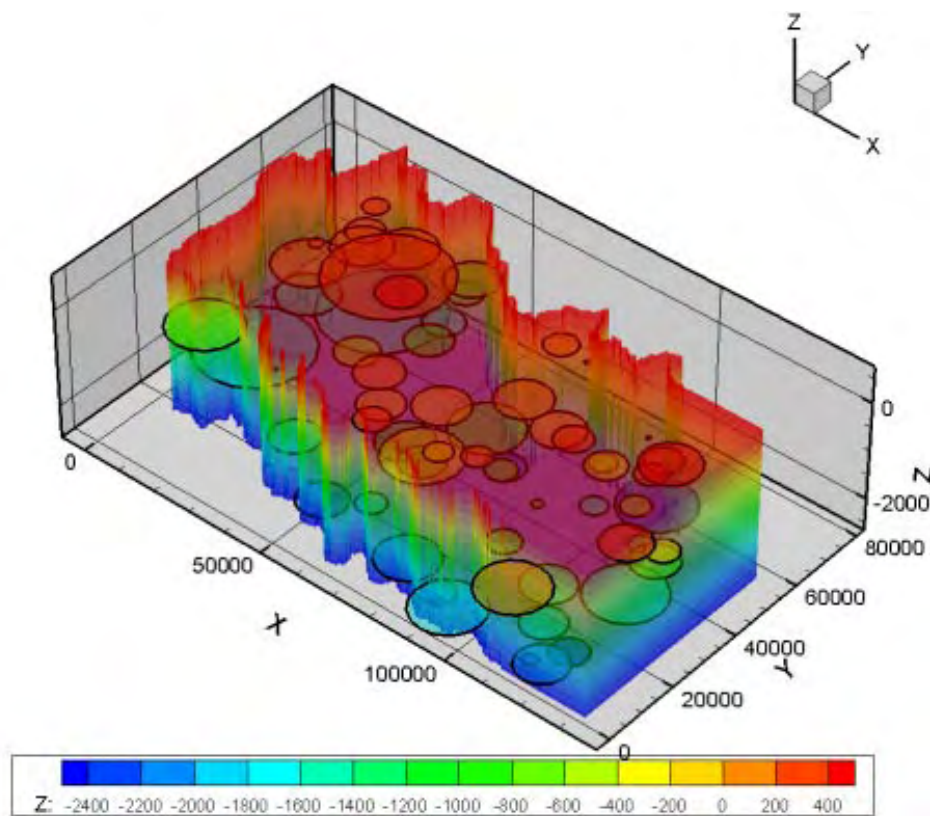
L = $-1,783$ (trend för djupavtagandet)

K = Hydraulisk konduktivitet

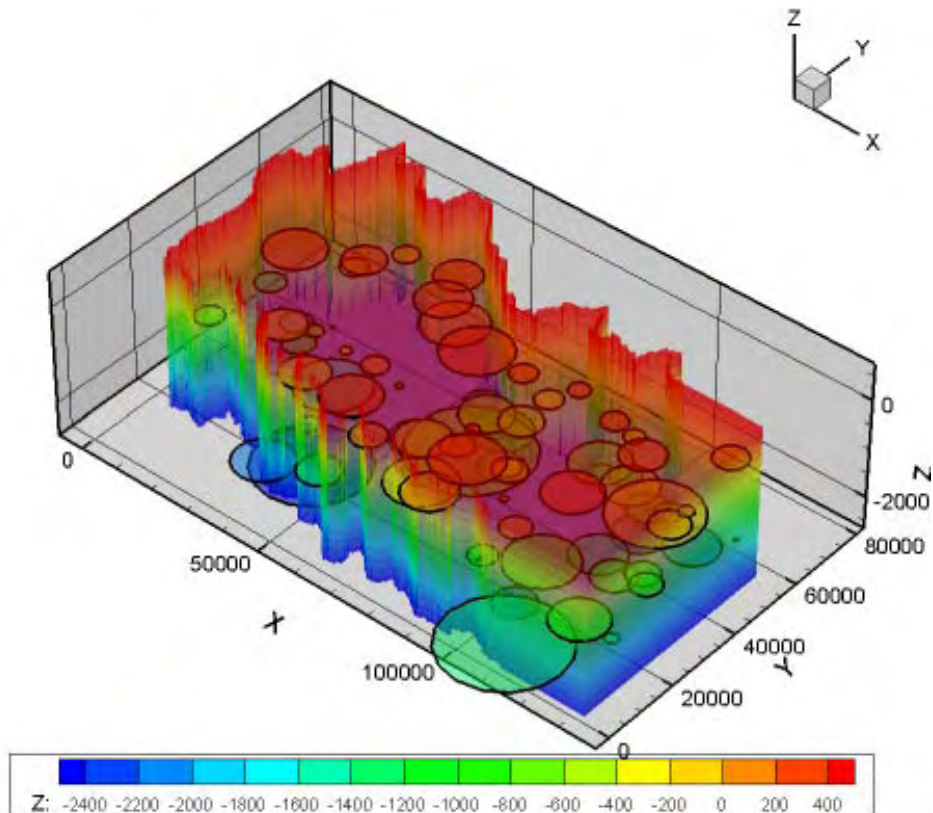
W = Hydraulisk vidd



Figur 4-18. Horisontala zoner genereras också över markytan, på ett sådant sätt att dessa zoner kan skära in genom markytan, detta demonstreras i figuren ovan.

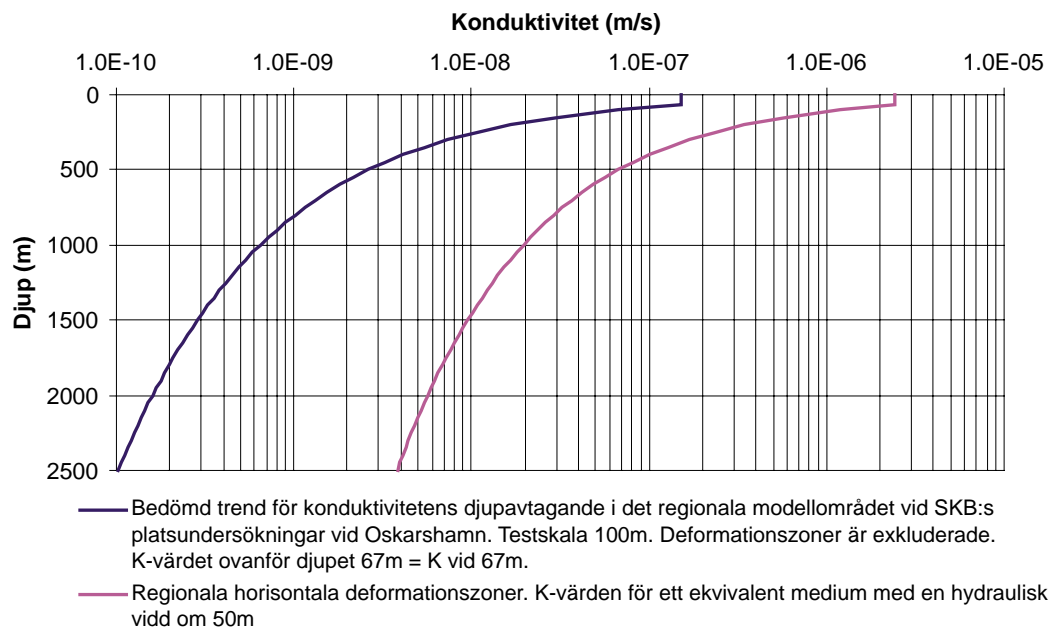


Figur 4-19. Fall 7A. Fördelning av horisontala deformationszoner.



Figur 4-20. Fall 7B. Fördelning av horisontala deformationszoner.

I modellen används värden på hydraulisk konduktivitet. Den hydrauliska konduktiviteten har beräknats med hjälp av transmissivitet (enligt ovan) och en hydraulisk vidd om 50 m. Denna vidd har använts eftersom detta är den vertikala utsträckningen på de beräkningsceller som representerar de horisontala deformationszonerna (se figur 4-7). Resultatet presenteras i figur 4-21



Figur 4-21. Horisontala deformationszoner Konduktivitetens djupavtagande i modellen. Notera att K-värdena för ett ekvivalent medium är skiljer sig från figur 4-16

4.9 Porositet

För alla studerade geologiska enheter, och för alla olika studerade beräkningsfall har den effektiva porositeten satts till **0,001**. Detta diskuteras också i avsnitt 2.6 och i avsnitt 3.11

4.10 Lokal heterogenitet

För några av de studerade beräkningsfallen har en lokal heterogenitet i den hydrauliska konduktiviteten införts för berget mellan deformationszonerna, i deformationszonerna och i diabasgångarna. Den lokala heterogeniteten har genererats enligt en metod presenterad i /Holmén 1997/. Teoretiska aspekter på denna metod diskuteras i avsnitt 3.6. Följande metodik har använts för varje litologisk enhet i modellen, för deformationszonerna och för diabasgångarna.

- i. Effektivvärdet för den hydrauliska konduktiviteten i modellen med lokal heterogenitet sätts till det värde som användes i motsvarande modell (och motsvarande struktur) med lokal homogenitet. Om konduktiviteten i den homogena modellen har definierats som djupavtagande så avtar också effektivvärdet med djupet i den heterogena modellen.
- ii. Varje cell i beräkningsnätet tilldelas en lognormalfördelning för konduktiviteten. Geometrisk medelvärden och standardavvikelser för dessa fördelning beräknas på ett sådant sätt att vid alla olika skalor så producerar lognormalfördelningarna samma effektivvärde för ett stokastiskt kontinuum. Dessutom är lognormalfördelningarnas egenskaper beräknade på ett sådant sätt att de på ett rimligt vis reproducerar den varians i uppmätt konduktivitet, vid skalan 100 m, som har iakttagits vid fältmätningar (hydraultester) utförda vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn. (Cellerna tilldelas olika fördelningar beroende på cellstorlek, eftersom celler av olika storlek representerar olika skalor, se bilaga 3.)
- iii. Varje cell i beräkningsnätet tilldelas slumpmässigt ett värde på den hydrauliska konduktiviteten utifrån den lognormalfördelning som tilldelats cellen.

Ekvationerna (och de tillhörande kurvorna) som använts vid generering av lokal heterogenitet presenteras i bilaga 3.

Exempel på genererade heterogena K-värden ges i bilaga 3, figur B3-3. Denna figur visar på lokala K-värden (cellväggarnas K-värden) i en modell med avtagande konduktivitet och ingen generell anisotropi (Fall 8A). Vi har också studerat beräkningsfall med lokal heterogenitet och generell anisotropi, exempel på genererade K-värden för dessa fall ges i figur B3-4 (Fall 8C) och figur B3-5 (Fall 8D).

5 Modelleringens omfattning och de olika studerade fallen

5.1 Metodik för val av beräkningsfall

I denna studie av det storregionala flödesmönstret har vi analyserat flödesvägar från ett djup som motsvarar djupet för ett tänkbart slutförvar för kärnbränsle, vilket betyder ett djup av 500 m.

Flödesvägarna har analyserats med avseende på följande resulterande egenskaper:

- Längd.
- Genombrottsid.
- Specifikt flöde vid startpunkterna.
- Flödesriktning vid startpunkterna (Rp-parameter, se avsnitt 3.9).

Följande systemegenskaper har studerats:

- Lokal topografisk undulation.
- Anisotropi i konduktivitetetsfältet (konstant och djupavtagande).
- Djupavtagande konduktivitet.
- Varierande konduktivitet i olika delar av modellen beroende på olika litologiska enheter.
- Regionala vertikala deformationszoner.
- Regionala horisontala deformationszoner.
- Diabasgångar.
- Lokal heterogenitet.
- Densitetsberoende flöde och tidsberoende aspekter av det studerade systemet.

Det är inte praktiskt möjligt att utföra en fullständig analys av de ovan presenterade systemegenskaper. Vi har dock med hjälp av olika beräkningsfall valt att belysa viktiga aspekter av hur systemegenskaperna påverkar flödesvägarnas resulterande egenskaper.

Den systematik som har använts för att tilldela de olika beräkningsfallen olika egenskaper bygger på ett stegvis ökande av det studerade systemets komplexitet. De enklaste fallen har homogena egenskaper och ingen lokal topografisk undulation, de mest komplexa fallen innehåller så mycket som möjligt av systemets komplexa egenskaper, t ex olika litologiska enheter, deformationszoner, diabasgångar, djupberoende K-värden, lokal heterogenitet, djupavtagande anisotropi, kvartära avlagringar, densitetsberoende flöde etc.

Genom att jämföra hur flödesvägarnas resulterande egenskaper förändras för olika beräkningsfall, som representerar olika aspekter på systemegenskaperna, kan betydelsen av olika systemegenskaper belysas.

5.2 De olika studerade fallen

Olika systembeskrivningar representeras i denna studie av olika beräkningsfall. Totalt har 30 olika beräkningsfall upprättats och analyserats. Dessa fall presenteras kortfattat i nedanstående tabell. Fall 5 har valts som referensfall. Referensfallet, och varianter på referensfallet med densitetsberoende flöde och/eller lokal heterogenitet, är de fall som ligger närmast den sammanställning av tillgängliga undersökningsdata som presenteras i kapitel 2; därför kan dessa fall betraktas som de mest rimliga och sannolika systembeskrivningarna. Vi har även studerat ett stort antal andra fall, som är mindre sannolika i jämförelse med de data som presenteras i kapitel 2, men som ändå är av visst intresse eftersom de representerar olika (mer eller mindre extrema) varianter på systemegenskaperna.

Referensfallet, Fall 5, innehåller inga stokastiska processer som kan ge upphov till egenskaper som är realisationsberoende, ej heller inkluderas densitetsberoende flöde. Referensfallet med densitetsberoende flöde analyseras som två separata fall med tre olika varianter av initialvillkor (Fall 5s1, 5s2 och 5s3).

Tabell 5-1. De olika studerade beräkningsfallen.

ID-nummer	Systemegenskaper Topografi Basnivå	Berget mellan regionala zoner	Regionala zoner Diabasgångar	Kvartära avlagringar	Densitet Tidsberoende
0A	Lutande plan Bas -2 500 m.ö.h.	Homogen	Ej inkluderad	Ej inkluderad	Sötvatten Stationär
0B	Lutande plan Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5	Som Fall 5	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
1	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Homogen	Ej inkluderad	Ej inkluderad	Sötvatten Stationär
1s1	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 1	Ej inkluderad	Ej inkluderad	Sötvatten Transient Initialv. s1.
2	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Homogen med anisotropi: • $K_x = K_y = 5E-8$ m/s • $K_z = 5E-9$ m/s	Ej inkluderad	Ej inkluderad	Sötvatten Stationär
3	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Homogen med anisotropi: • $K_x = K_y = 5E-9$ m/s • $K_z = 5E-8$ m/s	Ej inkluderad	Ej inkluderad	Sötvatten Stationär
4	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Homogen med djupavtagande K: K vid djupet 500 m = $5E-9$ m/s. Trend för djupavtagande enligt platsundersökningarna vid Osk.	Ej inkluderad	Ej inkluderad	Sötvatten Stationär
5 Ref.fall	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Olika litologiska enheter är inkluderade med djupavtagande K. Vid djupet 67 m (och ovanför) är K-värdet lika med medelvärdet i SGU:s brunnarkiv för varje studerad litologisk enhet. Trend för djupavtagande enligt platsundersökningarna vid Osk.	• Deformationszoner med djupavtagande K-värden enligt plats- undersökningarna vid Osk. • Diabasgångar med anisotropi. Längs med gångarna är K lika med K för deformationszonerna. Tvärs gångarna är K litet. • $K_{tvärs} = 0,01 * K$	Kvartära avlagringar med olika mäktighet: • Morän • Glacifluvium	Sötvatten Stationär

Fortsättning på tabell 5-1.

ID-nummer	Systemegenskaper		Regionala zoner Diabasgångar	Kvartära avlagringar	Densitet Tidsberoende
	Topografi Basnivå	Berget mellan regionala zoner			
5B	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5	Som Fall 5, förutom att: Tvärs diabasgångarna är K litet. • $K_{tvärs} = 0,001 * K$	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
5C	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5	Som Fall 5, förutom att: Tvärs diabasgångarna är K litet. • $K_{tvärs} = 0,0001 * K$	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
5D	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5, men med anisotropi i de litologiska enheterna. Anisotropi: K_x och K_y är 10 gånger större än K_z : • K_x och $K_y = 5 * K_{Fall5}$ • $K_z = 0,5 * K_{Fall5}$	Som Fall 5	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
5F	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5	Ej inkluderad. (Inga zoner inga diabasgångar)	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
5G	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5	Deformationszoner som i Fall 5, men inga diabasgångar.	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
5H	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5	Som Fall 5, men K -värdena i deformationszonerna är 10 gånger större.	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
5J (5J1 & 5J2)	Undulerande, men utjämnad. Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5	Som Fall 5	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
5s1	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5	Som Fall 5	Som Fall 5	Sötvatten Transient Initialv. s1.
5s2	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5	Som Fall 5	Som Fall 5	Sötvatten Transient Initialv. s2.
6A	Undulerande Bas -1 100 m.ö.h.	Som Fall 5	Som Fall 5	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
6B	Undulerande Bas -1 800 m.ö.h.	Som Fall 5	Som Fall 5	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
6C	Undulerande Bas -3 300 m.ö.h.	Som Fall 5	Som Fall 5	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
7A	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5	Som Fall 5, men med stokastiskt genererade horisontala deformationszoner. 7A = Realisering 1.	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
7B	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5	Som Fall 5, men med stokastiskt genererade horisontala deformationszoner. 7B = Realisering 2.	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
7Bs2	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 7B	Som Fall 7B	Som Fall 7B	Sötvatten Transient Initialv. s2.

Fortsättning på tabell 5-1.

ID-nummer	Systemegenskaper		Regionala zoner Diabasgångar	Kvartära avlagringar	Densitet Tidsberoende
	Topografi Basnivå	Berget mellan regionala zoner			
8A	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5, men med lokal heterogenitet i K-värdena. Stokastiskt kontinuum Djupavtagande K-värden enligt Fall 5. 8A = Realisering 1.	Som Fall 5, men med lokal heterogenitet i K-värdena. Stokastiskt kontinuum (Djupavtagande som i Fall 5.)	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
8B	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5, men med lokal heterogenitet i K-värdena. Stokastiskt kontinuum Djupavtagande K-värden enligt Fall 5. 8B = Realisering 2.	Som Fall 5, men med lokal heterogenitet i K-värdena. Stokastiskt kontinuum (Djupavtagande som i Fall 5.)	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
8As2	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 8A	Som Fall 8A	Som Fall 8A	Saltvatten Transient Initialv. s2.
8As3	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 8A	Som Fall 8A	Som Fall 8A	Saltvatten Transient Initialv. S3.
8C	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5, men med lokal heterogenitet i K-värdena. Stokastiskt kontinuum Djupavtagande K-värden enligt Fall 5. Dessutom med en generell anisotropi i K-värdena. Anisotropi: Kx och Ky är 10 gånger större än Kz:	Som Fall 5, men med lokal heterogenitet i K-värdena. Stokastiskt kontinuum (Djupavtagande som i Fall 5.)	Som Fall 5	Sötvatten Stationär
8D	Undulerande Bas -2 500 m.ö.h.	Som Fall 5, men med lokal heterogenitet i K-värdena. Stokastiskt kontinuum. Djupavtagande K-värden enligt Fall 5. Dessutom med en djupavtagande generell anisotropi: i K-värdena. Kx och Ky är 10 gånger större än Kz ovanför djupet 200 m. Mellan 200 m och 400 m avtar den generella anisotropin, Under djupet 400 m förekommer ingen generell anisotropi.	Som Fall 5, men med lokal heterogenitet i K-värdena. Stokastiskt kontinuum (Djupavtagande som i Fall 5.)	Som Fall 5	Sötvatten Stationär

Porositeten är lika med 0,001 i alla studerade fall och modeller.

6 Resultat och diskussion

6.1 Inledning

Resultat från de olika beräkningarna presenteras i detta kapitel. Förutom direkta resultat av analyserna av flödesvägar presenteras också jämförelser mellan olika fall och kortfattade diskussioner. Resultat från de olika fallen presenteras i en ordning som följer av de olika fallens komplexitet, de enklaste fallen först och de mest komplexa fallen sist, alltså i den ordning som fallen är numrerade (se tabell 5-1); allra först presenteras dock referensfallet eftersom övriga fall jämförs med referensfallet.

6.2 Fall 5 – Referensfallet

Nedan följer en kortfattad presentation av resultaten från referensfallet (Fall 5). Referensfallet presenteras också tillsammans med ett antal sensitivitetsfall i avsnitt 6.6 och särskilt i avsnitt 6.6.3.

Fall 5 har valts som referensfall. Detta fall inkluderar stor komplexitet och är en rimlig representation av det studerade systemet. Fall 5 innehåller inga stokastiska processer som kan ge upphov till egenskaper som är realisationsberoende, ej heller inkluderas densitetsberoende flöde då detta analyseras för referensfallet med två olika varianter av initialvillkor (Fall 5s1 och 5s2), se avsnitt 6.6.4.

Följande geologi är inkluderad i Fall 5:

- Litologiska enheter med djupavtagande genomsläpplighet, se avsnitt 4.5.
- Vertikala deformationszoner med djupavtagande genomsläpplighet, se avsnitt 4.6.
- Vertikala diabasgångar med djupavtagande genomsläpplighet, se avsnitt 4.7.
- Kvärtära avlagringar, se avsnitt 4.4.

Fall 5 visar på flödesvägar i en komplex modell som är en rimlig representation av det studerade systemet. För de studerade förvarsområdena (figur 3-2) presenteras medianvärden för flödesvägarnas (i) längder, (ii) genombrottstider och (iii) specifika flödet vid startpunkterna i figur 6-2. (Medianvärdena är valda som representativa värden för flödesmönstret från områden av storlek 1 km²; ett extremvärde för en viss punkt är av mindre intresse när det gäller att beskriva det allmänna flödesmönstret.) Medianen för flödesvägarnas representativa längder från förvarsområdena är 1 450 m, medianen för de representativa genombrotts-tiderna från förvarsområdena är 1 128 år, och medianen för de representativa värdena för det specifika flödet vid förvarsområdena är 0,29 Liter/(m²,år).

Genomsläppligheten i referensfallet avtar med djupet och är olika i modellens olika litologiska enheter; dock är genomsläppligheten i referensfallet definierad utan lokal heterogenitet. I verkligheten varierar genomsläpplighet och andra egenskaper i den lokala skalan. Eftersom den lokala heterogeniteten inte är inkluderad i referensfallet så blir spridningen i flödesvägarnas egenskaper (spridning i både längd och tid samt även flöden vid startpunkterna) mindre än vad som skulle ha erhållits med en modell som hade inkluderat en detaljerad beskrivning av den lokala heterogeniteten. Vi har inkluderat fall med lokal heterogenitet, se avsnitt 6.9 och 6.10, dock är den lokala heterogeniteten även i dessa fall definierade i en relativt stor skala, de minsta volymerna (cellstorleken) är ca 100×100×100 m. Anledningen

till denna förenkling är att modellen täcker ett mycket stort område. Det går inte att både beskriva det studerade systemets minsta delar och samtidigt täcka ett storregionalt område.

En visualisering av 1 000 flödesvägar från referensfallet ges i nästa avsnitt (se avsnitt 6.3).

Som tidigare diskuterats (se avsnitt 3.8 och 3.9) har vi också utfört en areabaserad analys av flödesvägar från förvarsområden. Resultaten från dessa analyser presenteras inte bara som statistiska fördelningar utan också som "kartor" i vilka flödesvägarnas längder, tider och specifika flöden, samt förvarsområdenas Rp-värden, plottas vid startpunkternas koordinater i form av konturer. Dessa kartor illustrerar tydligt hur flödesvägarnas resulterande egenskaper varierar inom det studerade modellområdet. För Fall 5 presenteras resultaten av dessa analyser i figur 6-36. Förekomsten av områden med uppåtriktade och nedåtriktade flöden, och i vilken omfattning förvarsområdena kan sägas vara dominerade av nedåtriktade flöden, kan beskrivas med hjälp av Rp-parametern. Rp-värden för de studerade förvarsområdena presenteras i figur 6-41.

Vi har särskilt studerat andelen långa flödesvägar. För Fall 5 presenteras andelen långa flödesvägar i tabell 6-1. Som framgår av tabellen är andelen flödesvägar som är längre än 10 km endast 0,6 %. Eftersom varje flödesväg representerar en viss area av det studerade modellområdet representerar procentsatserna i tabellen också andelar av modellområdets area.

Det är av intresse att studera hur flödesvägarnas egenskaper varierar med avstånd från strandlinjen. Vi har därför beräknat längd på flödesvägar, egentligen fördelningar av längder, som funktion av avståndet från strandlinjen. (Flödesvägar från förvarsdjup.) Resultat visas nedan i figur 6-1. Figuren visar att flödesvägarnas längder inte ökar med avståndet från strandlinjen, snarare tenderar längderna att minska med avståndet från havet. Detta följer av den mer accentuerade topografin i modellområdets inre delar. De längsta flödesvägarna förekommer på ett avstånd av ca 25 km från strandlinjen. Korta flödesvägar förekommer på alla avstånd från strandlinjen. Oavsett avstånd från strandlinjen så är medianen för längderna ca 1 500 m. (Genombrotstider och specifika flöden som funktion av avstånd från strandlinjen presenteras för Fall 8As2 i figur 6-66 (tider) och figur 6-67 (flöden)).

Utströmningsområdena för flödesvägarna från 500 m djup förekommer i hela modellområdet. Ovanför strandlinjen förekommer sådana områden främst längs med betydande topografiska dalgångar, sänkor, vattendrag och sjöar. Utströmningsområden förekommer inte på lokala topografiska maxima, utan i dalgångar och sänkor runtom sådana höjder. Detta framgår av figur 6-3.

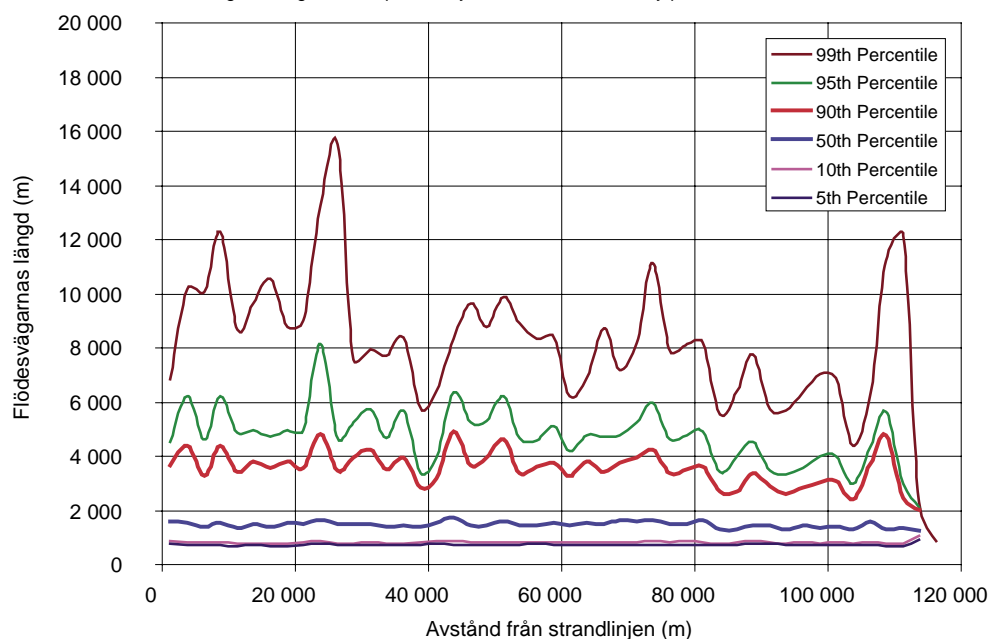
Grundvattenflödets djupavtagande och variation med djupet har beräknats. Vi har studerat olika djup från 50 m djup, ned till ett djup av 1 800 m. Resultatet presenteras i figur 6-4.

Tabell 6-1. Fall 5, referensfallet. Andel långa flödesvägar.

Längd	Antal långa flödesvägar i procent av alla flödesvägar * Fall 5 – Referensfallet
> 2 000 m	31
> 5 000 m	4,7
> 8 000 m	1,2
> 10 000 m	0,6

* Eftersom varje flödesväg representerar en viss area av det studerade modellområdet representerar procentsatserna i tabellen också andelar av modellområdets area.

Case 5. Length of flow paths Vs. Distance from Sea.
Flow paths from repository depth (500m). No start position below the Sea. Base -2500masl.
Lengths are given as a probability distributions, defined by percentiles.



Figur 6-1. Fall 5, referensfallet. Längd på flödesvägar som funktion av avståndet till strandlinjen.

Figuren ovan (och figur 6-12 samt figur 6-13) är baserad på följande metodik: Flödesvägarnas startpunkter (ca 220 000) är jämt fördelade över modellområdet, dessa startpunkter klassindelas efter avstånd från strandlinjen. Klassbredden sätts till 2 500 m. Således blir den första klassen 0 m från strandlinjen till 2 500 m från strandlinjen. Nästa klass blir 2 500 m till 5 000 m, osv. För varje klass beräknas fördelningen av flödesvägarnas egenskaper. Fördelningarnas percentiler plottades därefter mot den studerade klassens klassmitt.

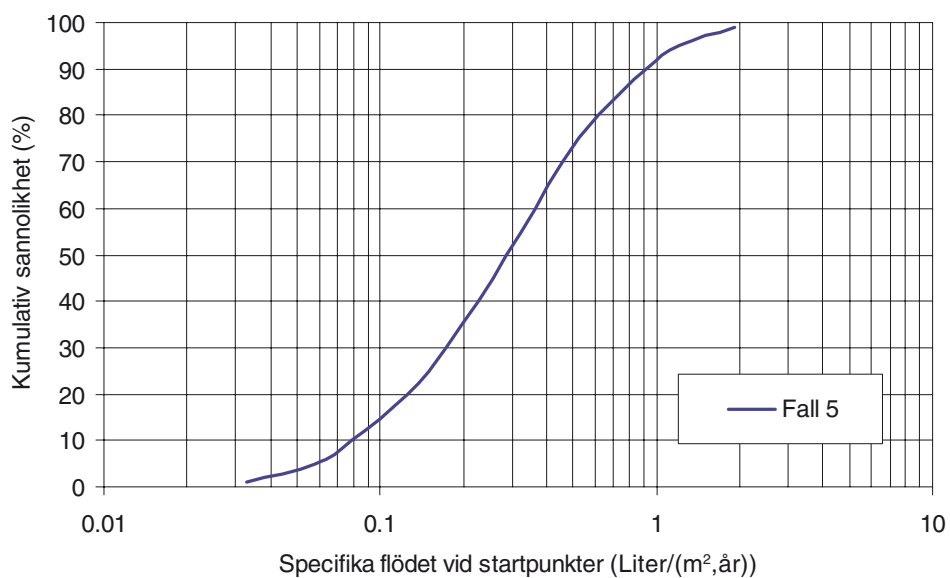
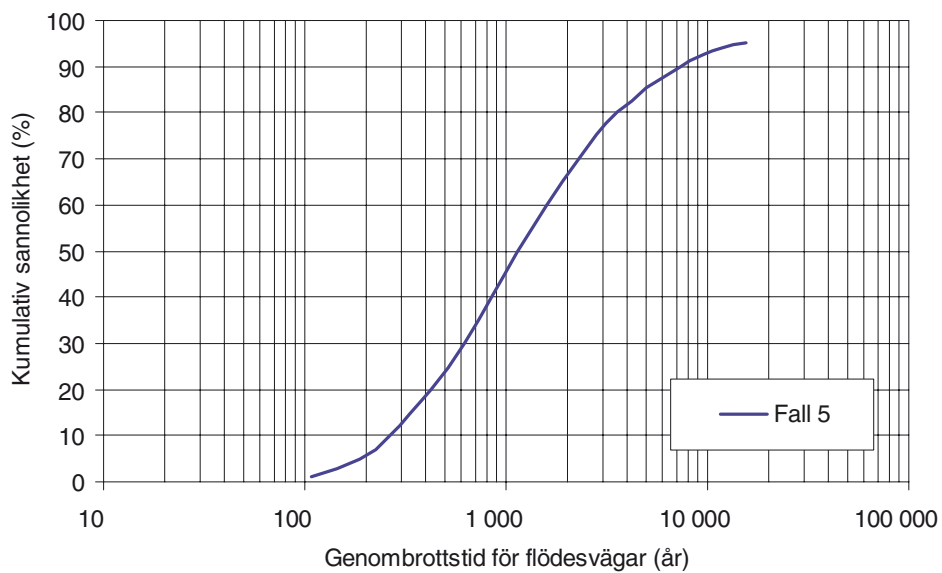
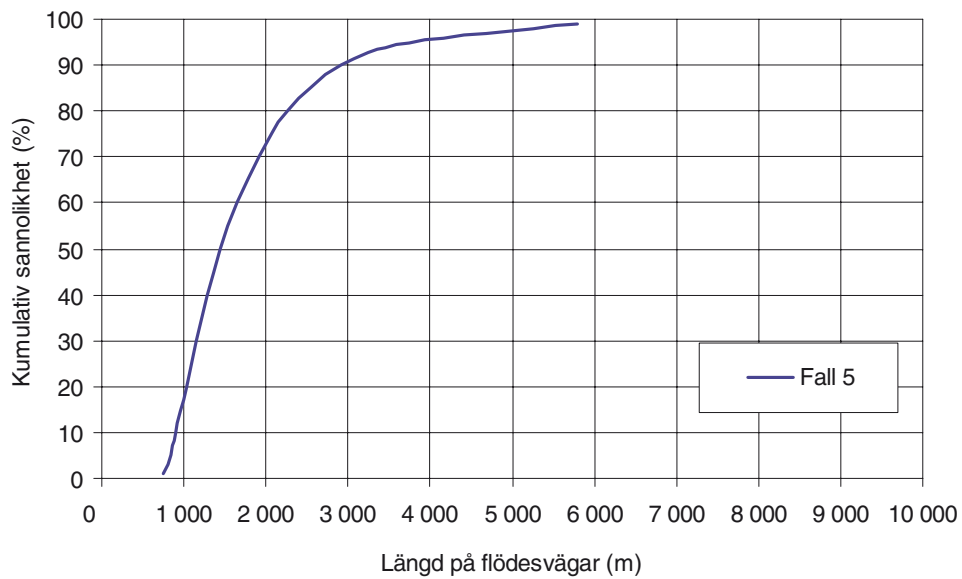
Av figuren framgår det att flödet avtar med djupet. Vid ett djup av 100 m är medianvärdet 10,1 Liter/(m²,år), vid förvarsdjup (500 m) är medianvärdet 0,3 Liter/(m²,år) och vid djupet 1 000 m är medianvärdet 0,06 Liter/(m²,år). Som jämförelse kan nämnas att enligt SMHI (se kapitel 2) är nettonederbörden vid kusten (avrinningen) ca 170 mm/år och vid den västra modellranden ca 310 mm/år (1 Liter/(m²,år) motsvarar 1 mm/år). Medianvärdet för det specifika flödet på förvarsdjup är alltså endast cirka en tusendel av avrinningen.

För referensfallet har vi även beräknat hur flödesvägarnas längder och genombrotstider varierar i modellen vid olika djup, vi har studerat startpunkter vid olika djup från 50 m djup, ned till ett djup av 1 800 m. Resultaten presenteras i figur 6-5. Av figuren framgår det att längder och tider ökar med djupet.

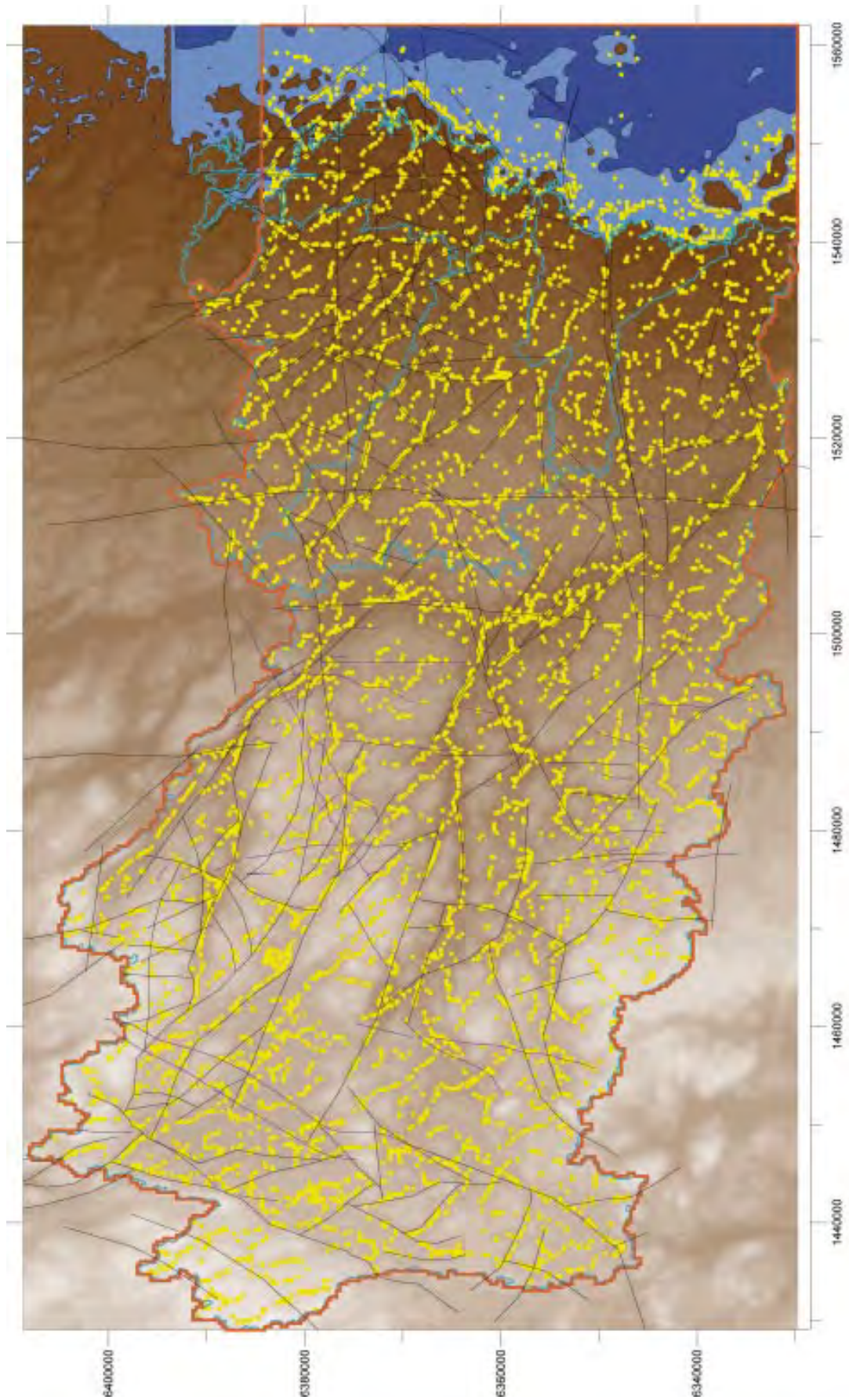
- För flödesvägarnas längder erhålles följande resultat: Vid ett djup av 100 m är medianvärdet 720 m, vid förvarsdjup (500 m) är medianvärdet 1 470 m och vid djupet 1 000 m är medianvärdet 2 300 m.
- För flödesvägarnas genombrotstider erhålles följande resultat: Vid ett djup av 100 m är medianvärdet 25 år, vid förvarsdjup (500 m) är medianvärdet 1 200 år och vid djupet 1 000 m är medianvärdet 9 100 år.

(Det är endast i den ovan presenterade analysen som flödesvägar från andra djup än förvarsdjup (500 m) har studerats.)

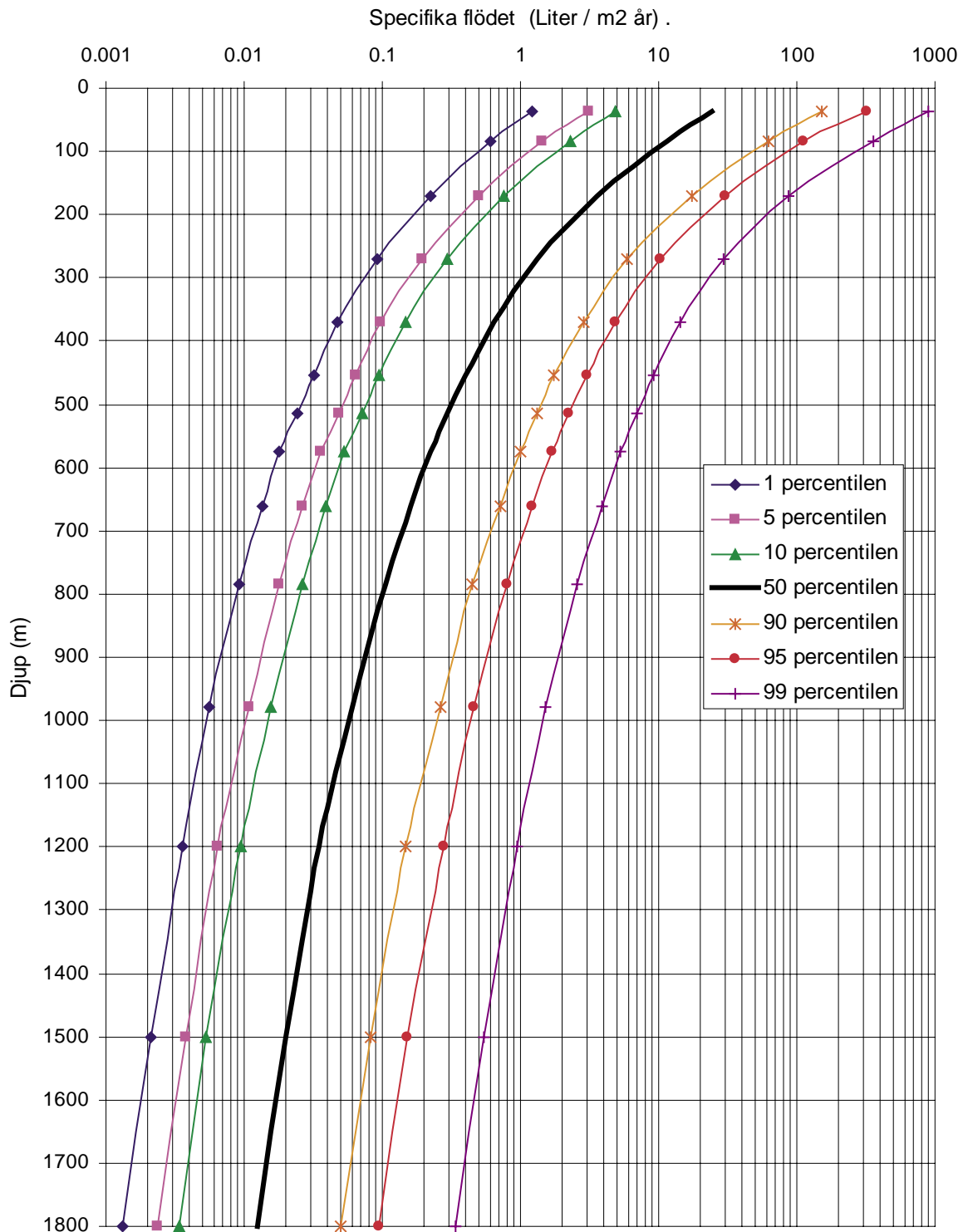
Fall 5 uppvisar följande allmänna flödesmönster. Grundvattnets flödesceller är i huvudsak lokala. Andelen storregionala flödesvägar från förvarsdjup är mycket liten.



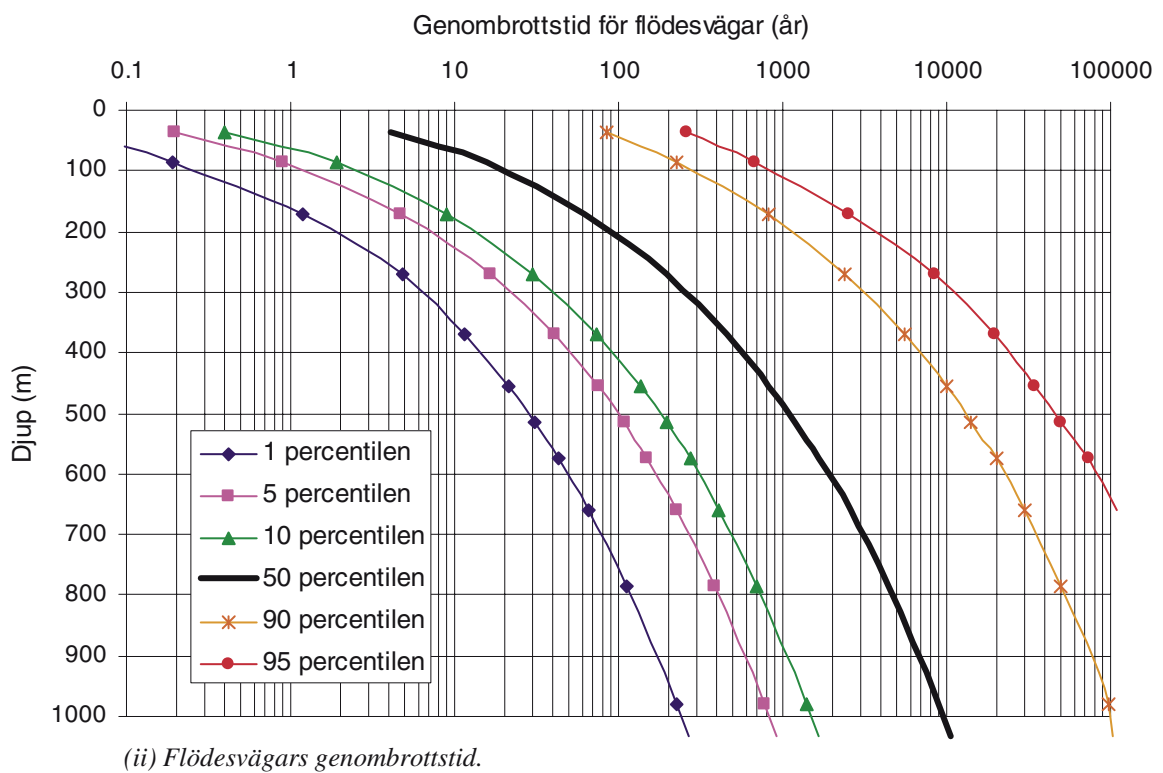
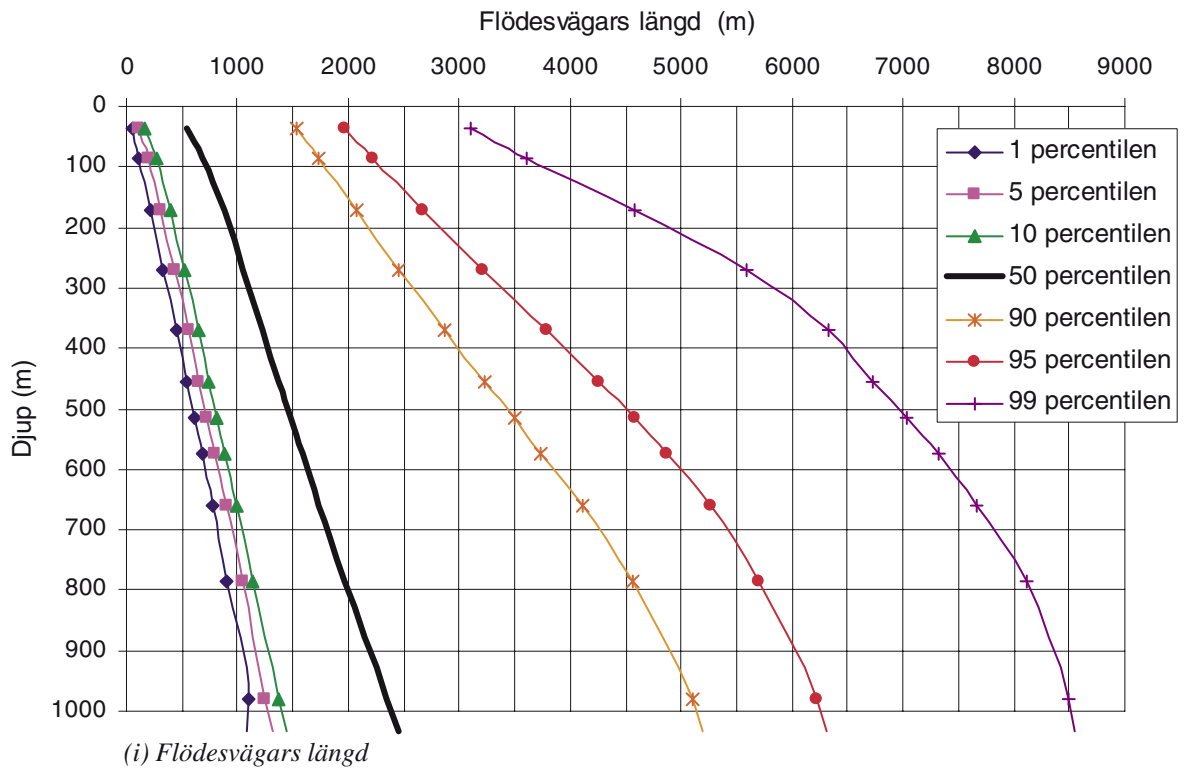
Figur 6-2. Fall 5, referensfallet. Flödesvägars egenskaper. Medianvärden för förvarsområden av storlek 1 km².



Figur 6-3. Fall 5, referensfallet. De gula ytorna markerar utströmningområden (på modellens övre yta) för 57 000 flödesvägar från 500 m djup. Flödesvägarnas startpunkter är jämt utspridda över modellområdet, dock förekommer inga startpunkter under havet (men väl under öar).



Figur 6-4. Fall 5, referensfallet. Specifika flödet vid olika djup i modellen. Vid olika djup i modellen har det specifika flödet beräknats vid ett stort antal punkter (57 000 punkter för varje djup), punkterna är jämnt fördelade i modellens horisontalplan, dock studeras inte områden under havet. Percentiler har beräknats för fördelningarna av värden vid de olika studerade djupen.



Figur 6-5. Fall 5, referensfallet. Längd och genombrottsid för flödesvägar från olika djup i modellen. Vid olika djup i modellen har det flödesvägarnas längder och genombrottsider beräknats vid ett stort antal startpunkter (57 000 punkter för varje djup), startpunkterna är jämnt fördelade i modellens horisontalplan, dock studeras inte områden under havet. Percentiler har beräknats för fördelningarna av värden vid de olika studerade djupen.

6.3 Visualisering av flödesvägar: Fall 5, Referensfallet.

Antalet studerade flödesvägar är mycket stort och täcker hela det studerade modellområdet (förutom under havet), se avsnitt 3.7. En figur med alla de drygt 220 000 flödesvägarna blir mycket överskådlig. Vi har därför valt att studera 1 000 flödesvägar från ett utvalt område.

Området bildar en cirkulär area med centrum inte allt för långt från Hultsfred (1505134; 6361240 i rikets koordinater) och med en radie av 10 km. Områdets area är 314 km², och överlappar alltså drygt 300 av de studerade förvarsområdena (av storlek 1 km²).

Startpunkterna ligger på djupet 500 m, punkternas horisontala koordinater är stokastiskt genererade enligt en Poissonfördelning inom det studerade cirkulära området. Startpunkternas horisontala positioner presenteras i figur 6-7.

De 1 000 visualiserade flödesvägarna uppvisar statistiska fördelningar för längder och genombrotstider som stämmer mycket väl med statistiken för alla de flödesvägar som studerades för referensfallet, detta framgår av figur 6-6. Andelen mycket långa flödesvägar är också ungefärligen densamma bland de 1 000 visualiserade flödesvägarna som för referensfallet, se tabell 6-2. Alltså är de 1 000 visualiserade flödesvägarna en god representation av alla de flödesvägar som studerades i referensfallet, och figurerna (se nedan) som presenterar de 1 000 flödesvägarna kan därför sägas ge en representativ bild av flödesmönstret från förvarsdjup i hela det studerade området.

Det bör påpekas att formen på en enskild visualiserad flödesväg beror av vald upplösning för plottning av denna linje, en mjukare kurvform erhålls med högre upplösning. När en flödesvägs längd och genombrotstid beräknas används en mycket större upplösning än den upplösning som används då kurvorna visualiseras.

De 1 000 visualiserade flödesvägarnas horisontala startpunkter och slutpunkter presenteras i figur 6-8. Av figuren framgår det att endast 2 flödesvägar av 1 000 når fram till havet.

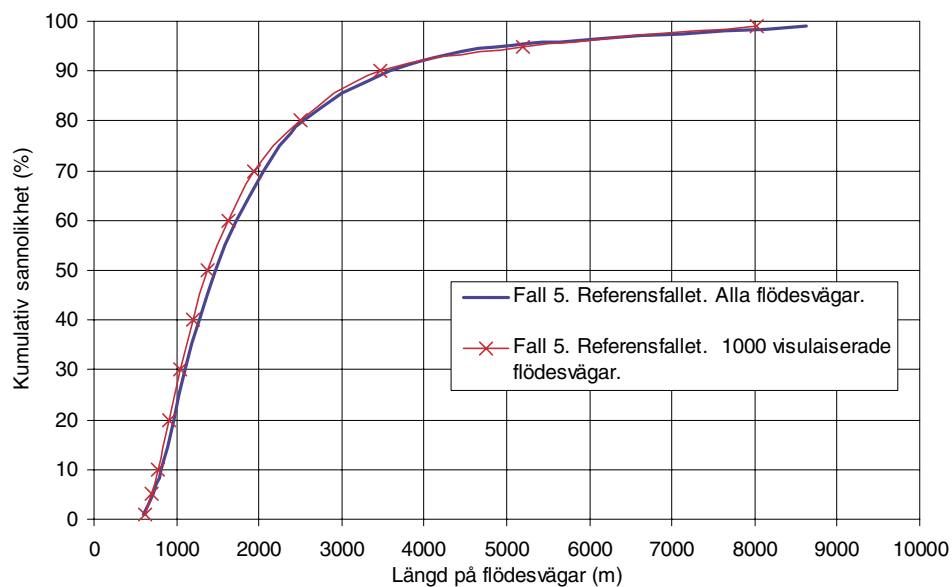
Flödesvägarnas horisontala utsträckning och modellområdets topografi presenteras i figur 6-9.

En perspektivbild av de 1 000 visualiserade flödesvägarna ges i figur 6-10.

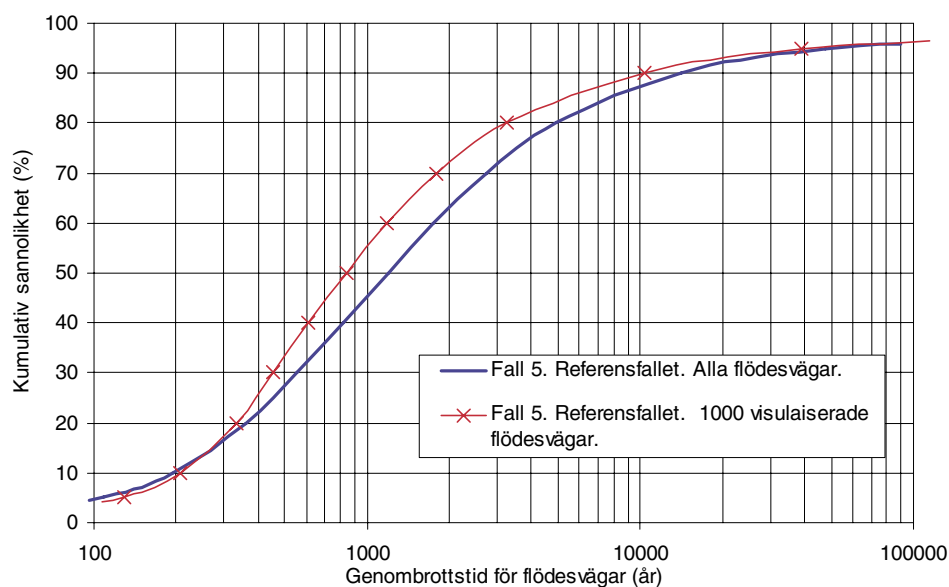
De ovan diskuterade figurerna, och kanske i synnerhet figur 6-9, bekräftar de slutsatser som gavs i föregående avsnitt: För referensfallet (Fall 5) är grundvattnets flödesceller i huvudsak lokala. Andelen storregionala flödesvägar är mycket liten.

En visualisering av flödesvägar från de 1 000 startpunkterna som diskuteras ovan har också utförts för Fall 1, Fall 2, Fall 3, Fall 8A och Fall 8D.

- Fall 1 presenteras i figur 6-19.
- Fall 2 och Fall 3 presenteras i figur 6-20.
- Fall 8A presenteras i figur 6-61.
- Fall 8D presenteras i figur 6-75.



(i) Flödesvägarnas längder.



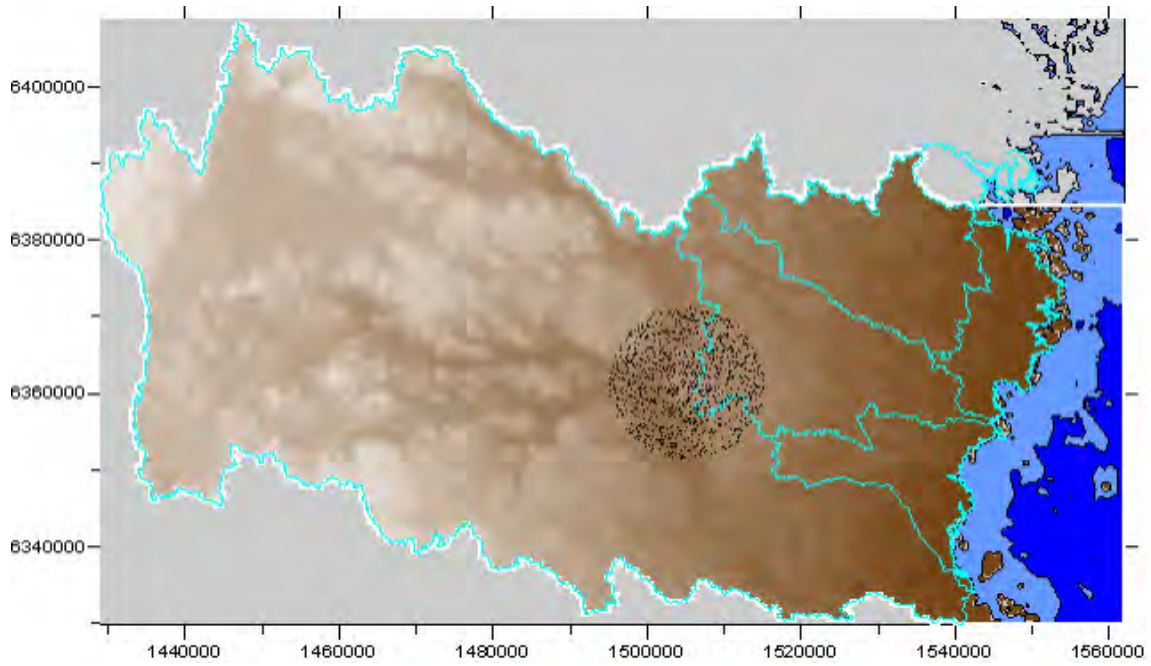
(ii) Flödesvägarnas genombrotts tider.

Figur 6-6. Fall 5. Referensfallet. Jämförelse av längd och genombrotts tid för alla flödesvägar och för de 1 000 visualiserade flödesvägarna.

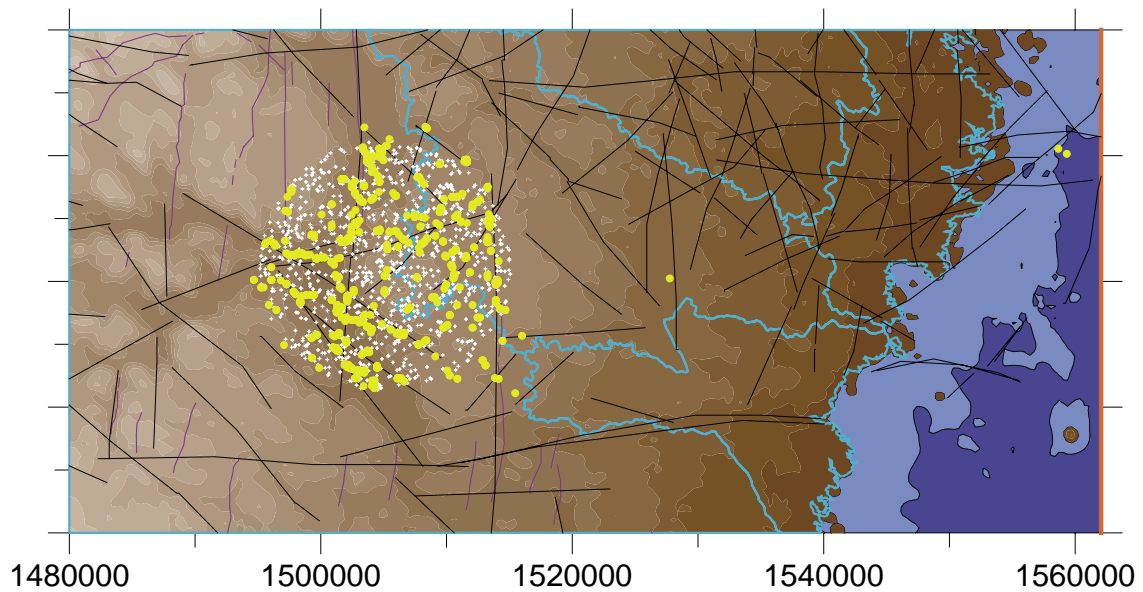
Tabell 6-2. Fall 5. Referensfallet. Andel långa flödesvägar i procent. Jämförelse av längder för alla flödesvägar och för de 1 000 visualiserade flödesvägarna.

Längd	Antal långa flödesvägar i procent av alla flödesvägar *	
	Fall 5. Alla flödesvägar	Fall 5. Visualiserade flödesvägar
> 2 000 m	31	30
> 5 000 m	4,7	5,7
> 8 000 m	1,2	1,1
> 10 000 m	0,6	0,6

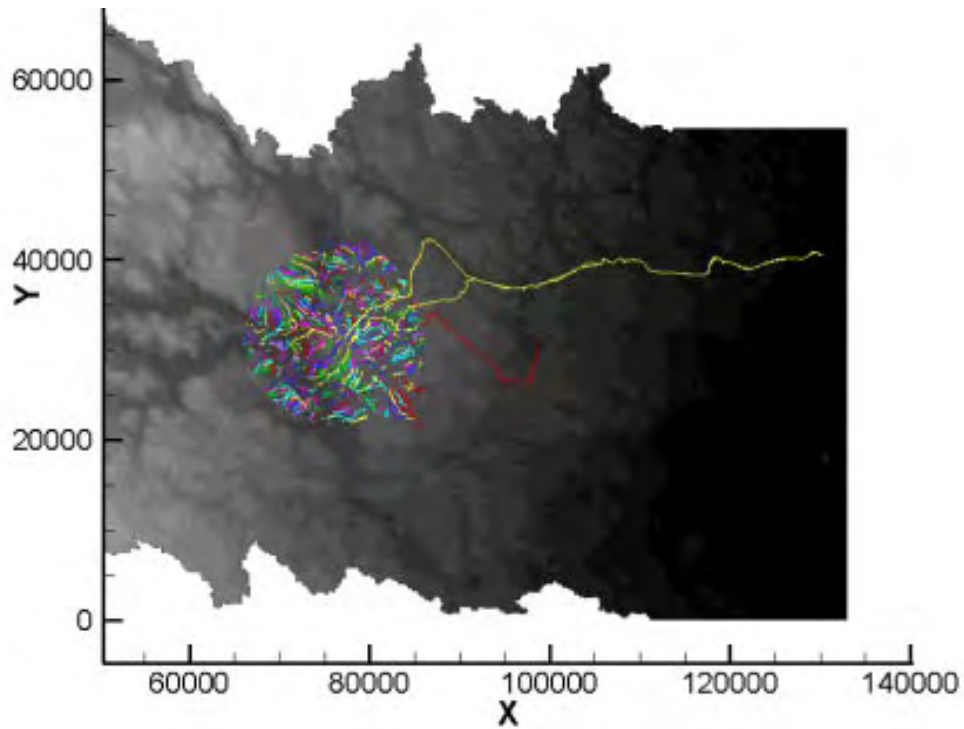
* Eftersom varje flödesväg representerar en viss area av det studerade modellområdet representerar procentsatserna i tabellen också andelar av modellområdets area.



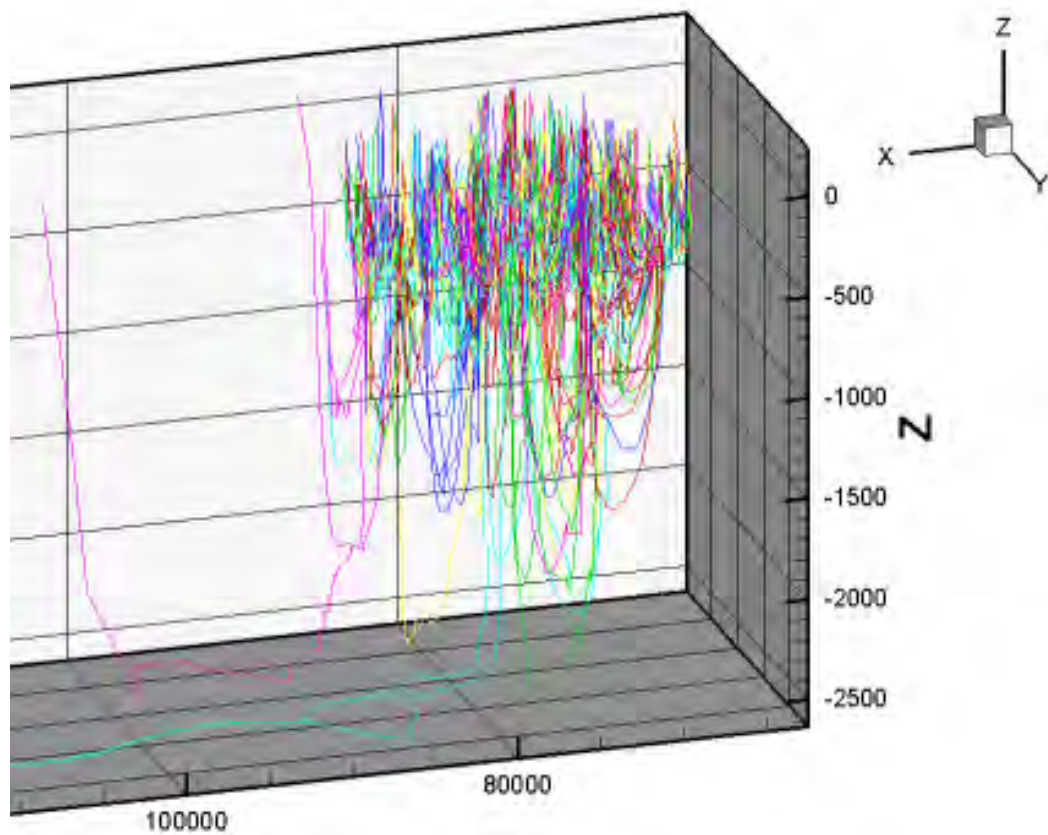
Figur 6-7. Startpunkter (svarta) för de visualiserade flödesvägarna; 1 000 startpunkter på djupet 500 m inom ett cirkulärt område med radie 10 km.



Figur 6-8. Startpunkter (vita) och slutpunkter (gula) för de visualiserade flödesvägarna; 1 000 flödesvägar från djupet 500 m inom ett cirkulärt område med radie 10 km. Endast 2 flödesvägar av 1 000 når fram till havet Endast 0,6 % av flödesvägar är längre än 10 km.



Figur 6-9. De 1 000 visualiserade flödesvägarnas horisontala utsträckning (olika färger), samt topografien (svart-vit). Pilen (VR) markerar vyriktning på den perspektivbild som presenteras nedan.



Figur 6-10. Fall 5. Referensfallet. En perspektivbild av de 1 000 visualiserade flödesvägarna (olika färger). Notera att den vertikala skalan är 12 gånger större än den horisontala skalan. Vyriktning för perspektivet presenteras i figuren ovan.

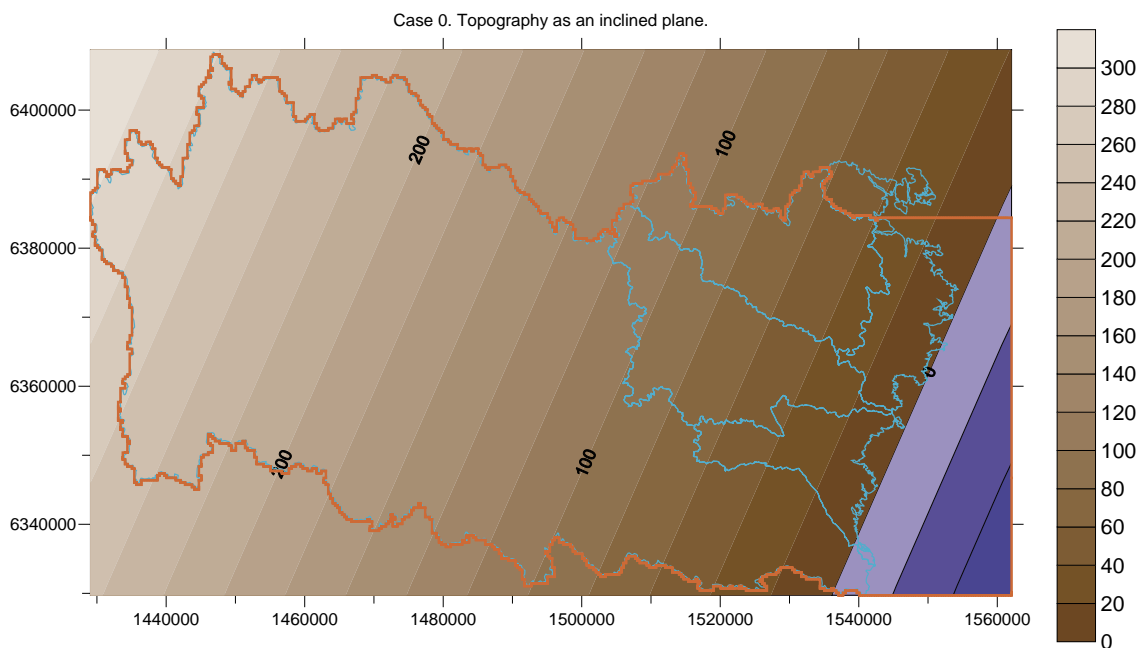
6.4 Fall 0A och 0B – Beräkningsfall med topografin definierad av ett lutande plan

Fall 0A och 0B har studerats för att visa på betydelsen av den lokala topografiska undulationen – dessa två fall saknar nämligen lokal topografisk undulation. För Fall 0A och 0B är modellens övre yta definierade som ett lutande plan. En jämförelse med övriga fall, som är definierade med en undulerande topografi, visar betydelsen av den lokala topografiska undulationen. Beräkningsfall utan topografisk undulation är naturligtvis mycket orealistiska, men vi har valt att ta med dem eftersom de illustrerar några intressanta aspekter på systemegenskaperna.

För dessa båda fall (0A och 0B) är topografin definierad som ett lutande plan; planet har nivån 0 m över havet längs med en rak linje som ungefärligen följer strandlinjen, nivån sjunker sedan linjärt under havet. Ovanför strandlinjen ökar topografins nivå linjärt till en maximal nivå som är lika med 300 m i modellens västra kant, denna nivå stämmer ungefärligen med den verkliga topografiska nivån i denna del av modellområdet. Det lutande planet framgår av figur 6-11. Fall 0A och 0B är båda simulerade utan densitetsberoende flöde.

Fall 0A är helt homogen, hydrauliska konduktiviteten är satt till $5E-9$ m/s. Detta är ett värde på konduktiviteten som ligger nära konduktiviteten i referensfallet vid djupet 500 m.

Eftersom randvillkoret för de studerade fallen är specificerat tryck längs med markytans topografi (och täta väggar), som löses för stationära förhållanden, så erhålls samma flödesmönster i modellen oavsett vilket K-värde som tilldelas modellen (med bibehållen isotropi eller anisotropi). Om K-värdet är stort blir flödena stora, och om K-värdet är litet blir flödena små, men flödesmönstret (t ex längder på flödesvägar) blir detsamma. Tider och storlek på flöden kan skalas direkt med K-värdet i en homogen modell där randvillkoret är specificerat tryck vid markytan. Ett dubbelt så stort K-värde betyder dubbelt så stora flöden, och därmed flödesvägar med hälften så långa tider, men samma längder på flödesvägarna.



Figur 6-11. Fall 0A och 0B. Topografin som ett lutande plan.

Fall 0B bär på samma egenskaper som referensfallet (Fall 5), förutom topografin Alltså inkluderar Fall 0B olika litologiska enheter, djupavtagande K-värde, vertikala deformationszoner, diabasgångar och kvartära avlagringar.

Vi har beräknat längd på flödesvägar, egentligen fördelningar av längder, som funktion av avståndet från strandlinjen. Resultat visas nedan i figur 6-12 och figur 6-13 (notera att i dessa figurer är skalan för flödesvägarnas längder ej densamma som i figur 6-1).

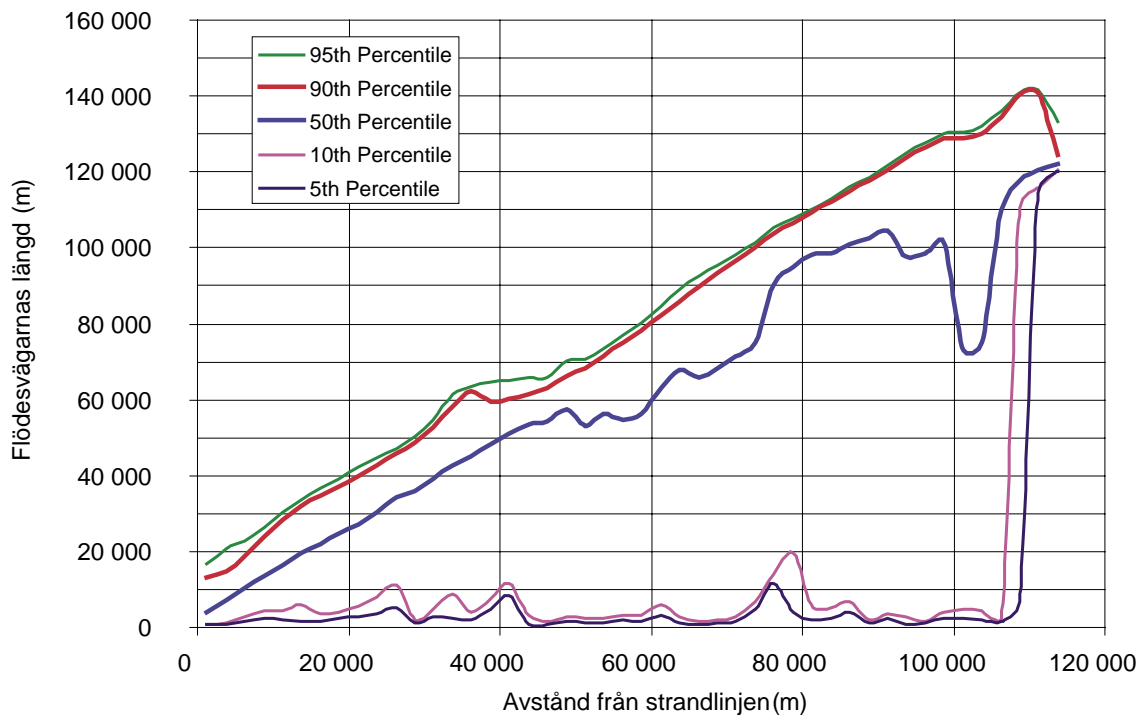
För Fall 0A når de flesta flödesvägar fram till havet, oavsett startpunktens avstånd från strandlinjen. De flesta flödesvägar blir mycket långa, medianen är 38 km, och andelen storregionala flödesvägar blir stort. De längsta flödesvägarna startar i modellens västra del och fortsätter hela vägen fram till modellens östra rand, längderna blir extremt långa t ex 140 km. Det finns dock alltid korta flödesvägar, från alla avstånd, men dessa är i minoritet.

För Fall 0B når många flödesvägar, med startpunkter inom 20 km från strandlinjen, fram till havet; men bortom avståndet 20 km, så är 95 % flödesvägarna kortare 40 km. Många av flödesvägarna är förvisso väldigt långa, men det är ändå en dramatisk skillnad mot Fall 0A. Den komplexa flödesdomänen i Fall 0B bryter upp det extremt långa flödesmönstret som förekom i Fall 0A och skapar regionala flödesceller. Medianlängden på flödesvägarna är 6 km i Fall 0B.

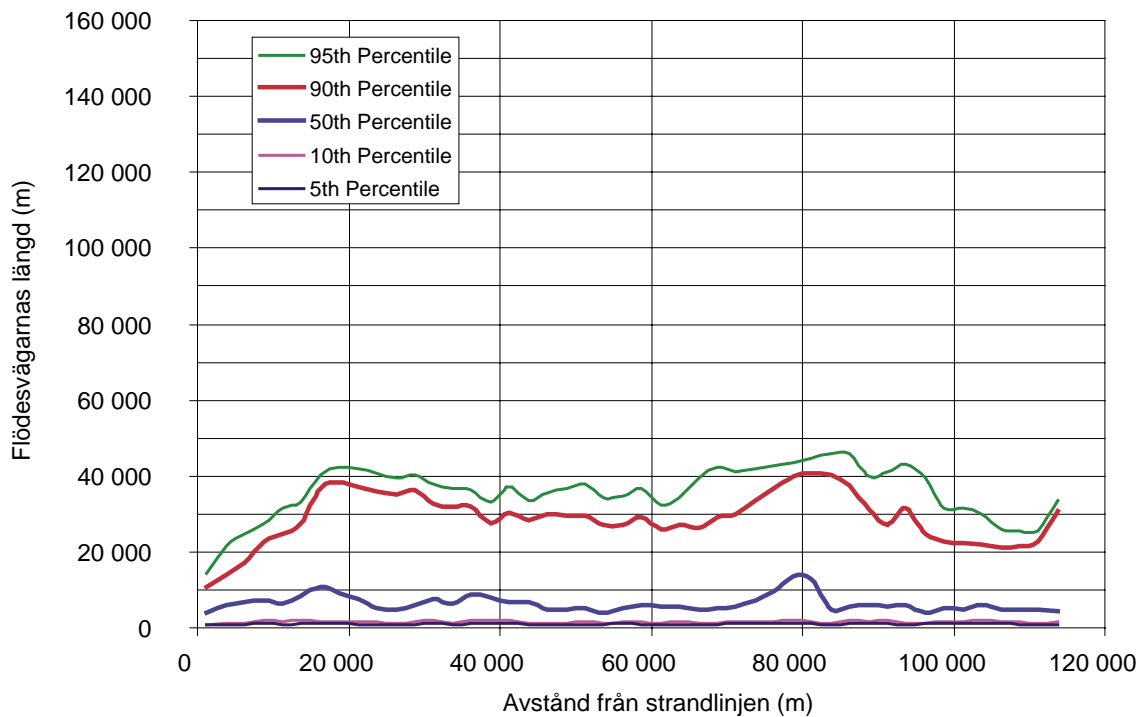
Flödesvägarnas längder presenteras också i figur 6-14. Detta är en mycket intressant figur som redan nu indikerar flera slutsatser av den storregionala modelleringen. Förutom Fall 0A och 0B, så ingår i figuren också resultat för Fall 1 och Fall 5 (vårt referensfall). Fall 1 är helt homogen som Fall 0A, men Fall 1 är dessutom definierad med en undulerande topografi.

Betydelsen av topografin framgår tydligt när man jämför Fall 0A och Fall 1. Med en undulerande topografi bryts det storregionala flödesmönstret upp i relativt små lokala flödesceller. Medianlängden i Fall 1 är 1 300 m, att jämföra med 38 km i Fall 0A. Om man dessutom lägger till den komplexitet som är inkluderad i Fall 0B till Fall 1, så erhåller man Fall 5. För Fall 5 blir de längsta flödesvägarna ännu kortare än för Fall 1. Det finns ett litet antal storregionala flödesvägar i Fall 1 och i Fall 5, men de är få.

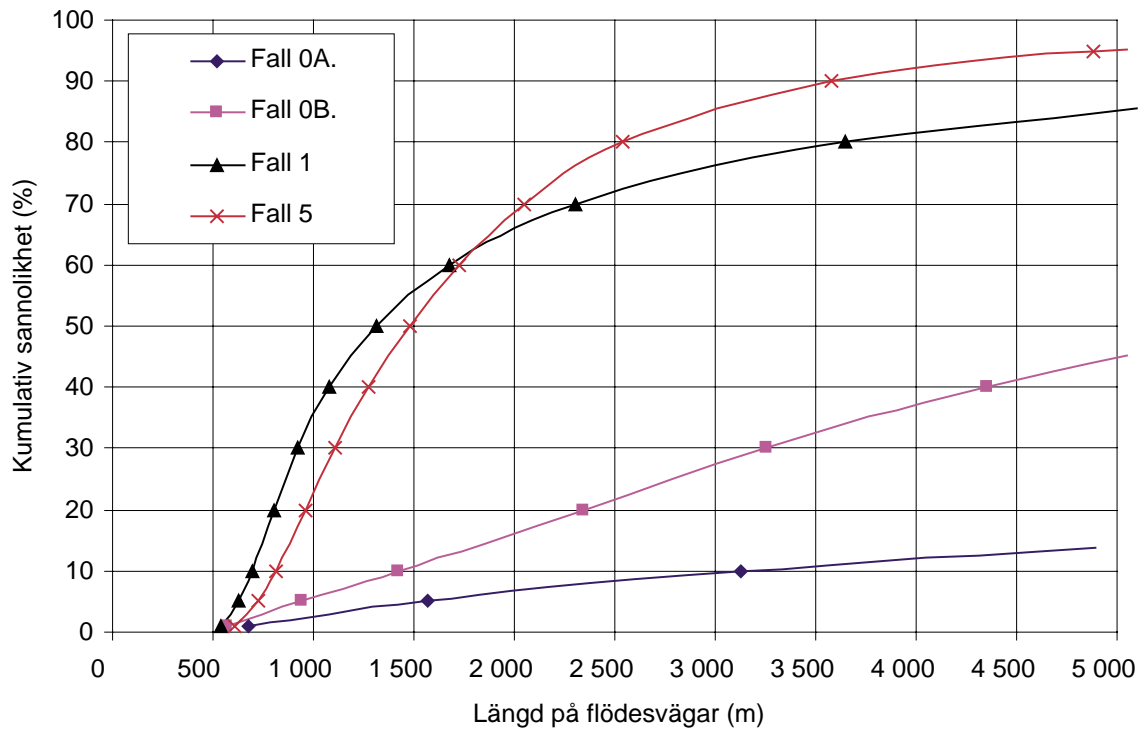
En slutsats som kan sägas redan nu är att den lokala topografiska undulationen är mycket betydelsefull, troligtvis den mest betydelsefulla systemegenskapen, vilket illustreras av den stora skillnaden mellan Fall 0A och Fall 1. Mycket komplexa egenskaper för flödesdomänen är också betydelsefullt, vilket illustreras av den stora skillnaden mellan Fall 0A och Fall 0B, men inte lika betydelsefullt som den topografiska undulationen; denna slutsats kommer av att skillnaden mellan Fall 0A och Fall 1 är större än skillnaden mellan Fall 0A och Fall 0B.



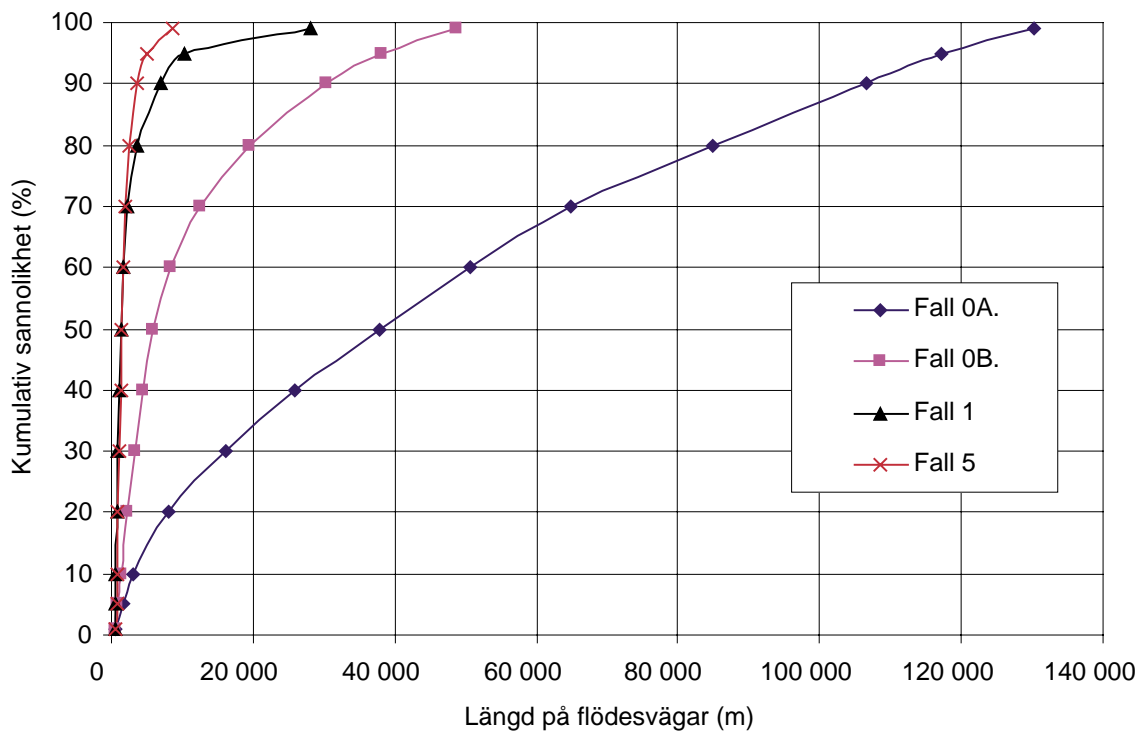
Figur 6-12. Fall 0A. Längd på flödesvägar som funktion av avståndet till strandlinjen.



Figur 6-13. Fall 0B. Längd på flödesvägar som funktion av avståndet till strandlinjen.



(i) Fall 0A, 0B, 1 och 5. Längd på flödesvägar. X-skalan från 0 m till 5 000 m



(ii) Fall 0A, 0B, 1 och 5. Längd på flödesvägar. X-skalan från 0 Km till 140 km.

Figur 6-14. Fall 0A, 0B, 1 och 5. Längd på flödesvägar. (Alla flödesvägar inkluderade).

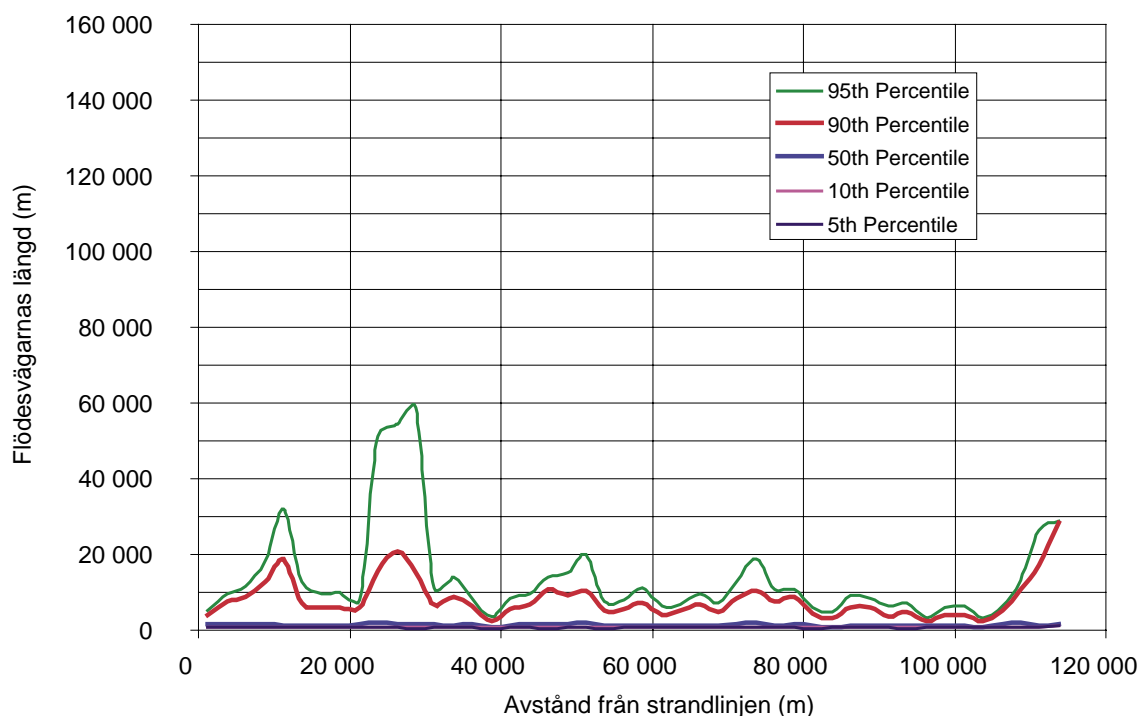
6.5 Fall 1, 2, 3 – Beräkningsfall med homogent K-värde men med olika anisotropi

Fall 1 har studerats för att visa på flödesvägar i en helt homogen modell. Fall 2 och 3 har studerats för att visa på betydelsen av anisotropi i en för övrigt helt homogen modell. (Alla studerade fall förutom Fall 0A och 0B är definierad med undulerande topografi, detta kommer inte att vidare påpekas i denna studie).

Fall 1 är definierat som isotropt och med en konduktivitet (K-värde) som är lika med $5E-9$ m/s. Detta K-värde har valts eftersom det är en rimlig representation av uppmätta K-värdena på djupet 500 m vid platsundersökningarna vid Oskarshamn (se kapitel 2).

Eftersom randvillkoret för de studerade fallen (Fall 1, 2 och 3) är specificerat tryck längs med markytans topografi (och täta väggar), som löses för stationära förhållanden, så erhålls samma flödesmönster i modellen oavsett vilket K-värde som tilldelas modellen (med bibehållen isotropi eller anisotropi). Om K-värdet är stort blir flödena stora, och om K-värdet är litet blir flödena små, men flödesmönstret (t ex längder på flödesvägar) blir detsamma. Tider och storlek på flöden kan skalas direkt med K-värdet i en homogen modell där randvillkoret är specificerat tryck vid markytan. Ett dubbelt så stort K-värde betyder dubbelt så stora flöden, och därmed flödesvägar med hälften så långa tider, men samma längder på flödesvägarna.

Vi har beräknat längd på flödesvägar för Fall 1, egentligen fördelningar av längder, som funktion av avståndet från strandlinjen. Resultat visas nedan i figur 6-15.



Figur 6-15. Fall 1. Längd på flödesvägar som funktion av avståndet till strandlinjen.

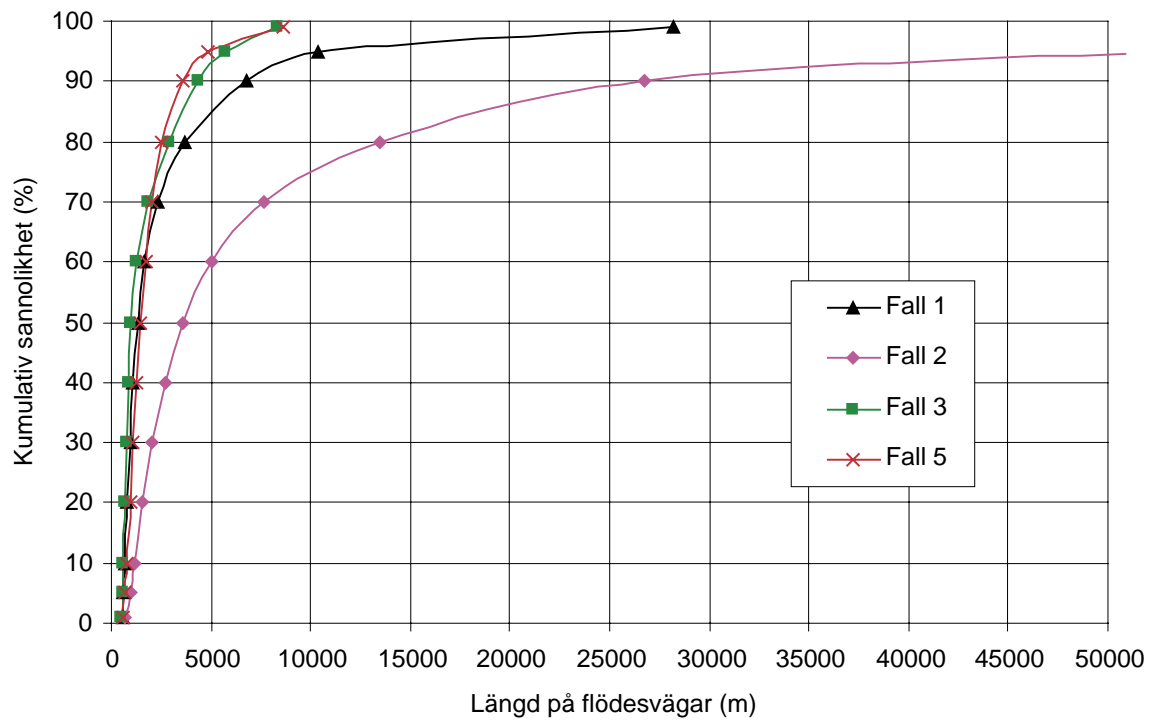
Figur 6-15 (Fall 1) kan jämföras med figur 6-12 (Fall 0A), och betydelsen av den lokala topografiska undulationen framgår då tydligt. I Fall 1 förekommer storregionala flödesvägar endast från ett område ca 30 km från strandlinjen, flödesvägar som når fram till havet (och vidare under havet till modellens östra rand). I Fall 0A förekommer sådana flödesvägar över hela modellområdet.

En visualisering av flödesvägar från de 1 000 startpunkterna som diskuteras i avsnitt 6.3 (se figur 6-7) har också utförts för Fall 1. En jämförelse av flödesvägar för Fall 5 (referens-fallet) och Fall 1 presenteras i figur 6-19.

Fall 2 är definierat med anisotropi. Konduktiviteten i horisontalplanet är $5E-8$ m/s och i vertikalplanet $5E-9$ m/s. I jämförelse med Fall 1 är alltså konduktiviteten 10 gånger större i horisontalplanet i Fall 2.

Fall 3 är definierat med anisotropi. Konduktiviteten i horisontalplanet är $5E-9$ m/s och i vertikalplanet $5E-8$ m/s. I jämförelse med Fall 1 är alltså konduktiviteten 10 gånger större i vertikalplanet i Fall 3.

Flödeslängder för dessa tre fall (1, 2 och 3) är presenterade i figur 6-16. Det framgår tydligt av figuren att en viss mängd mycket långa flödeslängder erhålls för Fall 2, och mycket färre långa flödesvägar i de övriga fallen.



Figur 6-16. Fall 1, 2, 3 och 5. Längd på flödesvägar. (Alla flödesvägar inkluderade).

Medianlängderna för Fallen 1, 3 och 5 skiljer sig inte så mycket åt: Fall 1 = 1 300 m, Fall 3 = 1 000 m och för Fall 5 = 1 500 m. Medianen för Fall 2 är 3 600 m.

För Fall 2 är mängden storregionala flödesvägar 25 % (längder över 10 km). För Fall 3 blir situationen helt annorlunda, storregionala flödesvägar förekommer nästan inte alls, mängden storregionala flödesvägar är bara 0,5 %. För Fall 1 är mängden storregionala flödesvägar 5 %; och för Fall 5 är mängden storregionala flödesvägar 0,6 %. Se tabell 6-3.

Visualisering av flödesvägar från de 1 000 startpunkterna som diskuteras i avsnitt 6.3 (se figur 6-7) har också utförts för Fall 2 och Fall 3, se figur 6-20.

Det är tydligt att om en generell anisotropi förekommer så kan denna vara av stor betydelse. Om flödesdomänen överallt är 10 gånger genomsläppligare i horisontalplanet så skapas ca 25 % storregionala flödesvägar, men om flödesdomänen överallt är 10 gånger genomsläppligare i vertikalplanet så skapas nästan inga storregionala flödesvägar (0,5 %). Resultaten från Fall 1 (5 % storregionala flödesvägar), ligger inte mellan resultaten från Fall 2 och 3, utan närmare resultaten från Fall 3.

För Fall 1, Fall 2 och Fall 3 presenterar figur 6-18 kumulativa fördelningar för flödesvägar-
nas egenskaper från förvarsområden.

En areabaserad analys av flödesvägar från förvarsområden har också utförts (metodikens diskuteras i avsnitt 3.8). Dessa kartor illustrerar tydligt hur flödesvägar-
nas resulterande egenskaper varierar inom det studerade modellområdet.

- För Fall 1 presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-21.
- För Fall 2 presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-22.
- För Fall 3 presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-23.

Vi har också beräknat R_p -värden (metodikens diskuteras i avsnitt 3.9) för de studerade förvarsområdena, resultaten presenteras i följande figurer:

- För Fall 1 i figur 6-25.
- För Fall 2 i figur 6-26.
- För Fall 3 i figur 6-27.

Genom att jämföra figurerna framgår det tydligt hur flödesmönstret ändras radikalt när flödesdomänens genomsläpplighet definieras med anisotropa egenskaper.

Tabell 6-3. Fall 1, Fall 2, Fall 3 och Fall 5. Andel långa flödesvägar.

Längd	Antal långa flödesvägar i procent av alla flödesvägar *			
	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 5
> 2 000 m	34	71	29	31
> 5 000 m	15	40	7,2	4,7
> 8 000 m	8	29	1,2	1,2
> 10 000 m	5,3	25	0,5	0,6

* Eftersom varje flödesväg representerar en viss area av det studerade modellområdet representerar procentsatserna i tabellen också andelar av modellområdets area.

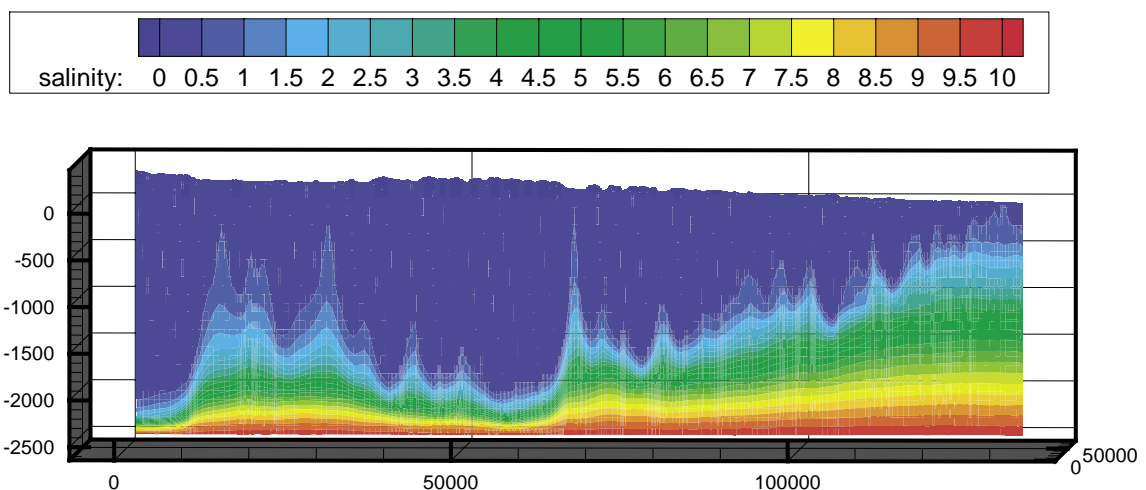
Fall 1 har också simulerats som en transient simulering med densitetsberoende flöde, och med initialvillkor "s1". Metodik för de transienta densitetsberoende simuleringarna och initialvillkoret, presenteras i avsnitt 4.3.5 och i figur 4-10. När Fall 1 simuleras med densitetsberoende flöde betecknas det som Fall 1s1.

Jämförelser av simuleringar med densitetsberoende flöde (Fall 1s1) och utan densitetsberoende flöde (Fall 1) presenteras i figur 6-18. Av figurerna framgår att skillnaderna är mycket små. Flödesvägarna blir något kortare då densitetsberoende flöde inkluderas. Genombrottstider mindre än cirka mediantiden blir något längre, genombrottstider större än cirka mediantiden blir något kortare. Skillnaderna är för större delen av fördelningarna bara några få procent.

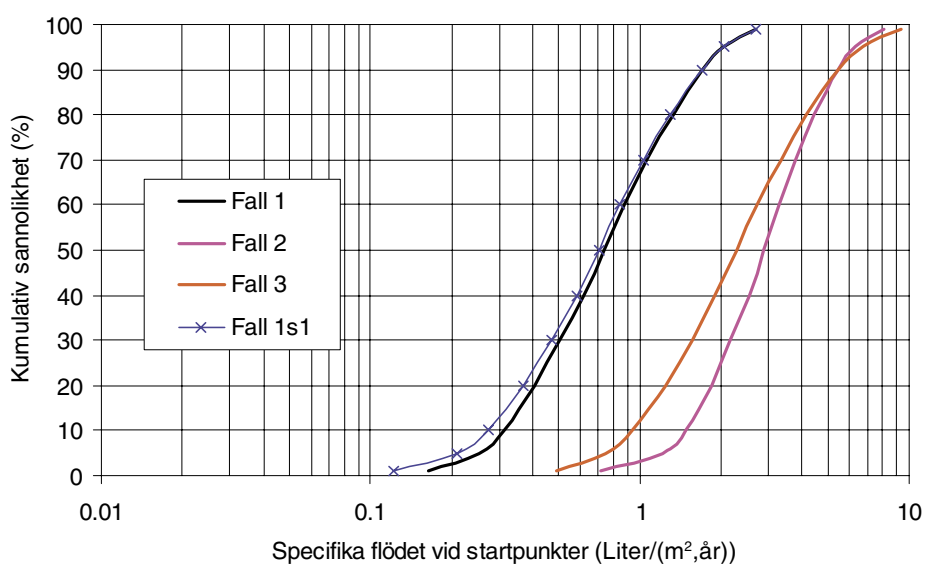
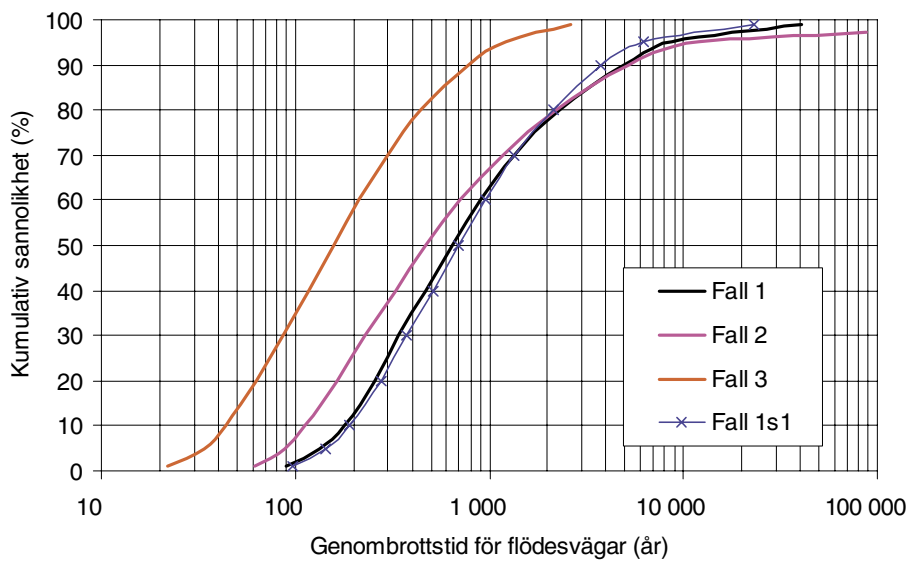
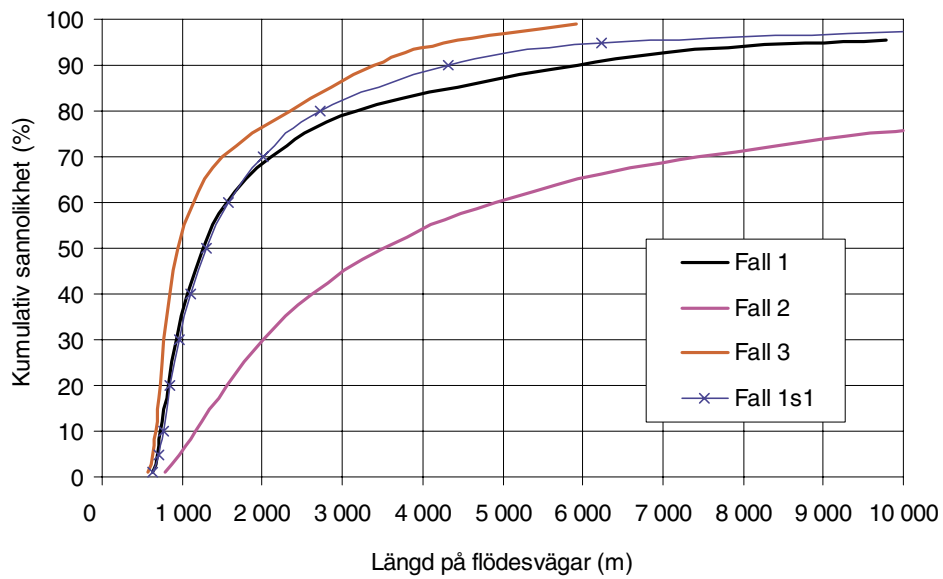
Ett exempel på beräknad salinitet mot djupet presenteras i figur 6-17. Det tunga saltvattnet med höga salthalter förekommer på ett djup under 1 500 m. På djupet 500 m (förvarsdjup) är salthalterna låga, förutom vid betydande utströmningsområden där högre salthalter kan förekomma. Det mesta av modellområdet är beläget långt från nuvarande kustlinje och ovanför tidigare högsta kustlinje. På förvarsdjup är salthalterna därför ofta låga, således får densitetseffekter ringa betydelse för flödesvägar från förvarsdjup i den storregionala modellen. Därav kan vi sluta oss till att stationära simuleringar utan densitetsberoende flöde är utmärkta approximationer i den storregionala skalan och för det studerade modellområdet, med avseende på flödesvägar från förvarsdjup.

För Fall 1s1 presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-24, och R_p -värden för de studerade förvarsområdena presenteras i figur 6-28.

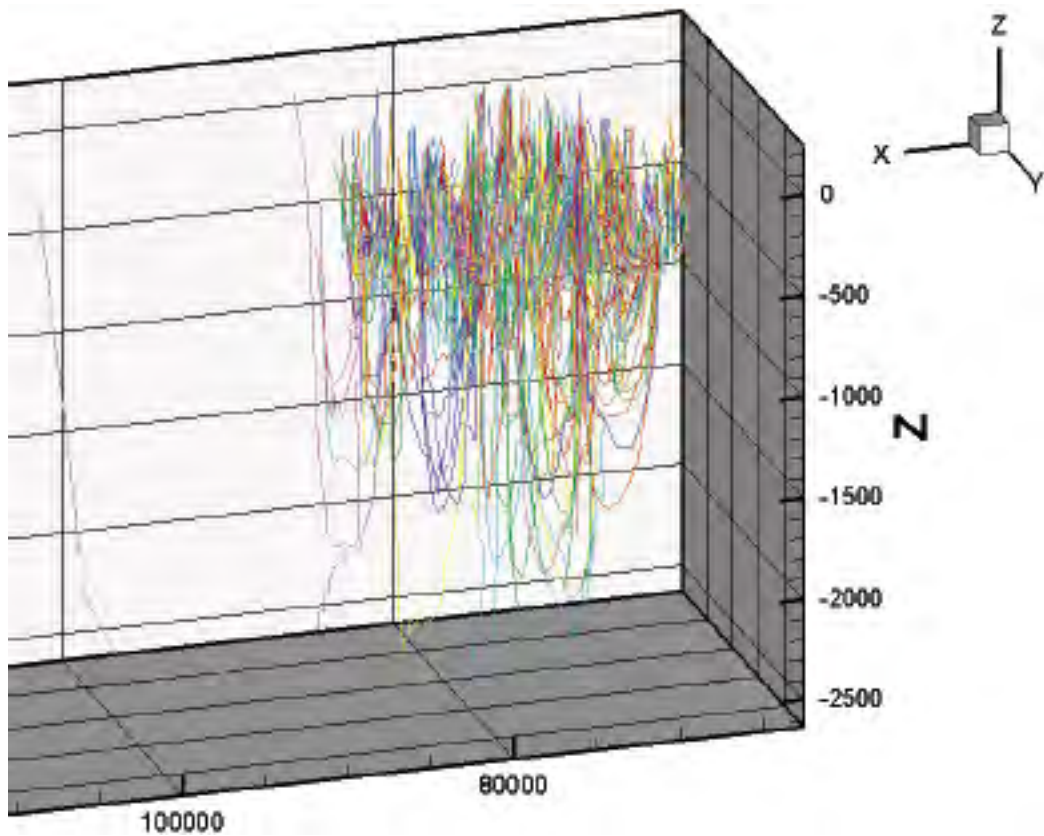
Det skall dock påpekas att lokalt kan densitetseffekter vara av betydelse (jämför t ex detaljer i figur 6-21 och i figur 6-24), men den statistiska analysen presenterad i figur 6-18 visar att i ett storregionalt perspektiv är effekterna av mindre betydelse.



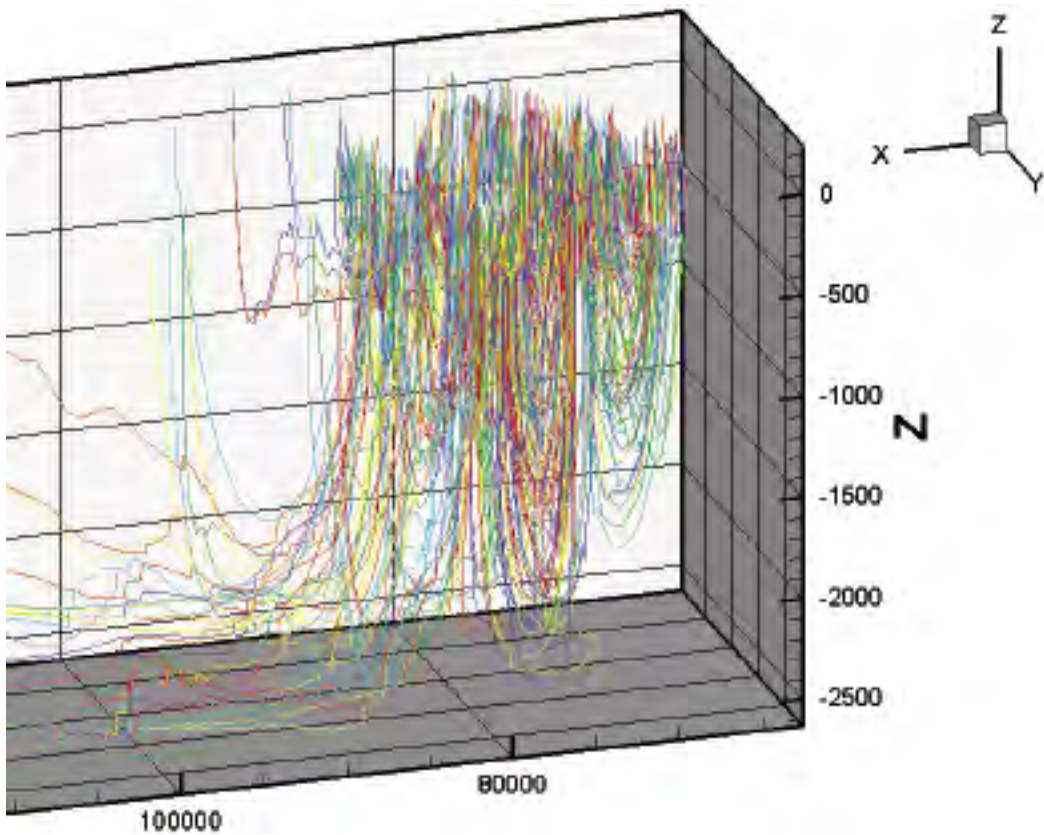
Figur 6-17. Fall 1s1. Beräknad salinitet (procent) längs med en sektion i väst-östlig riktning. Tid = 2000 AD. Profilen är placerad vid $Y = 6379700$ (rikets nät).



Figur 6-18. Fall 1, 2, 3 och 1s1. Jämförelse av flödesvägars egenskaper. Medianvärden för förvarsområden av storlek 1 km².

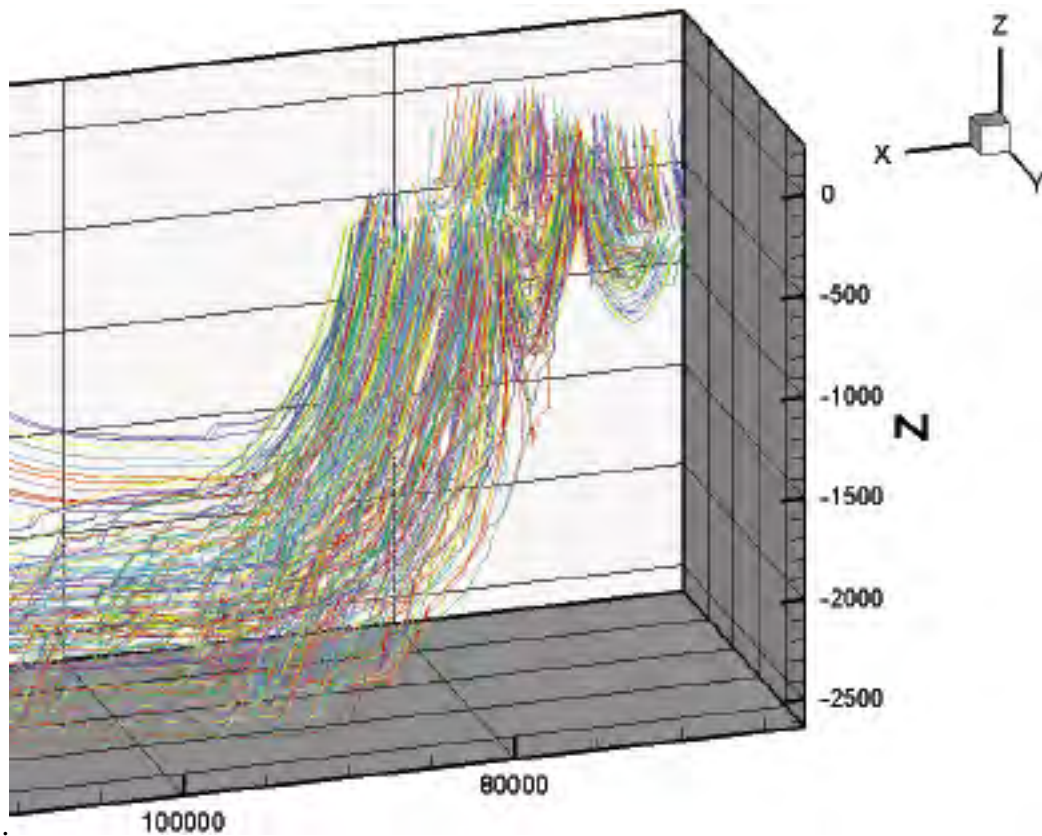


(i) Fall 5, referensfallet: Djupavtagande genomsläpplighet etc.

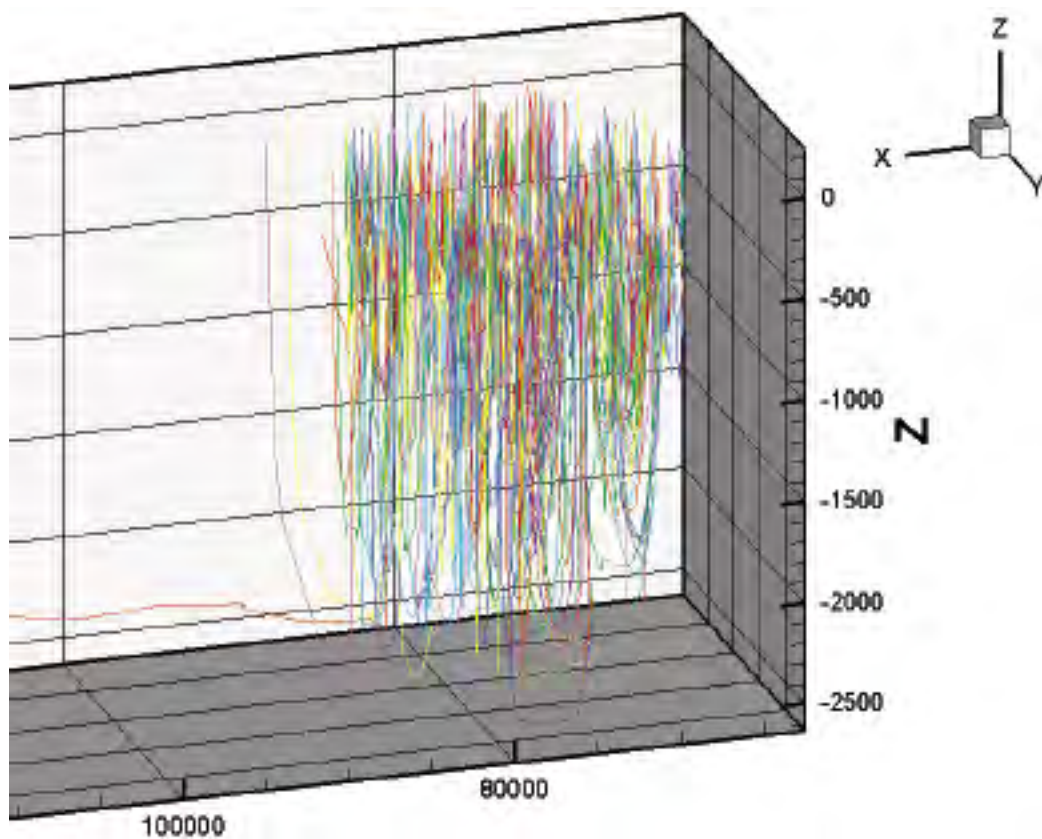


(ii) Fall 1: Konstant genomskäpplighet, isotropi.

Figur 6-19. Fall 5 och Fall 1. Perspektivbild av 1 000 visualiserade flödesvägar. Notera att den vertikala skalan är 12 gånger större än den horisontala skalan.

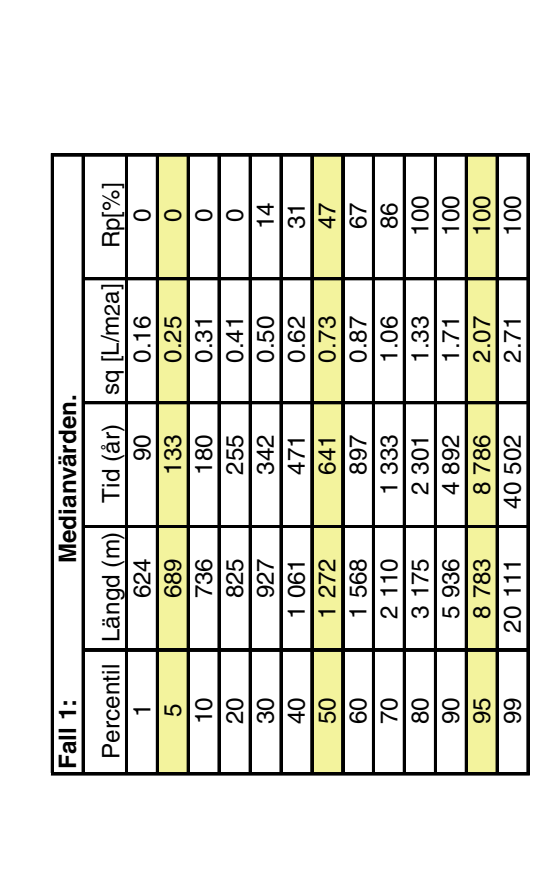
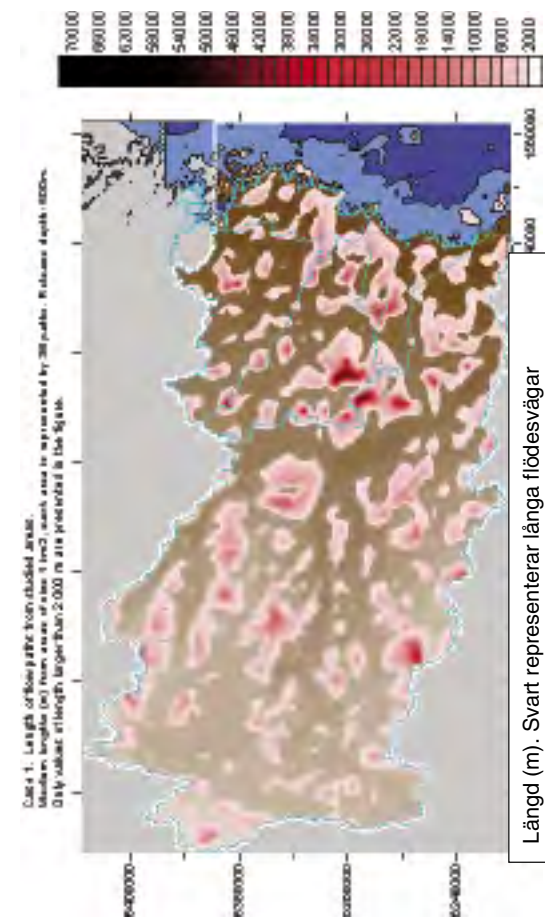
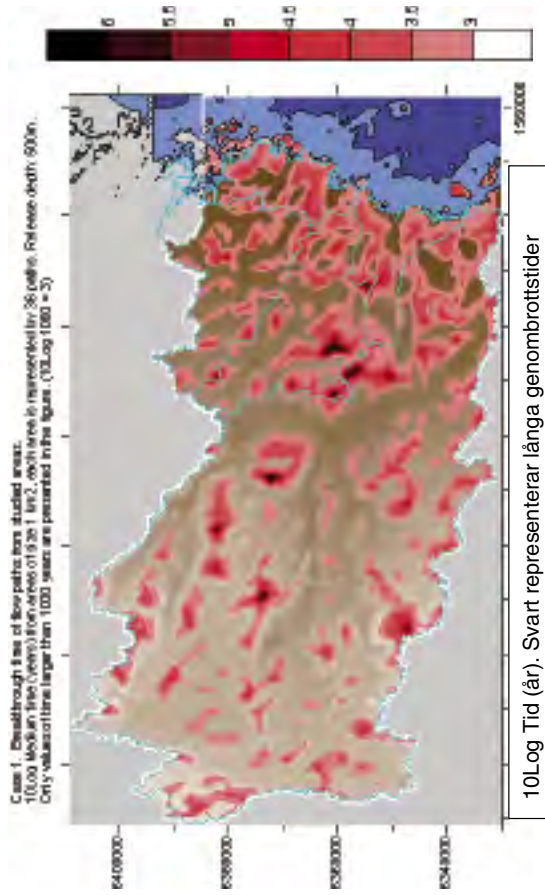


(i) Fall 2: Konstant genomsläpplighet med anisotropi. 10ggr större K -värden i horisontalplanet.



(ii) Fall 3: Konstant genomsläpplighet med anisotropi. 10ggr större K -värden i vertikalplanet.

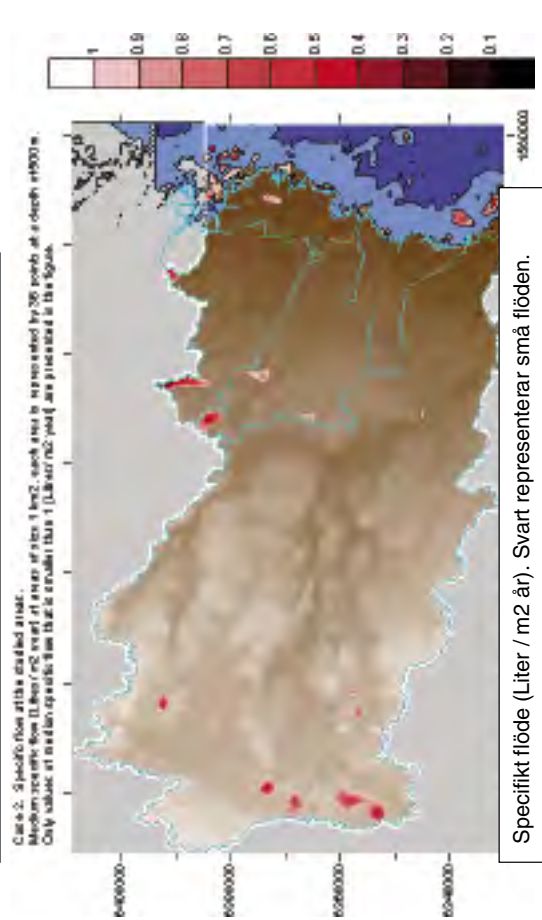
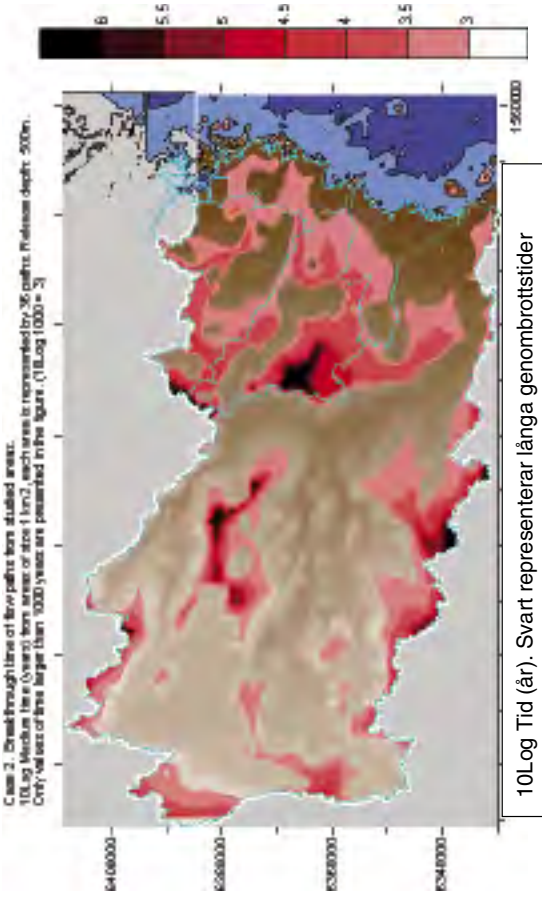
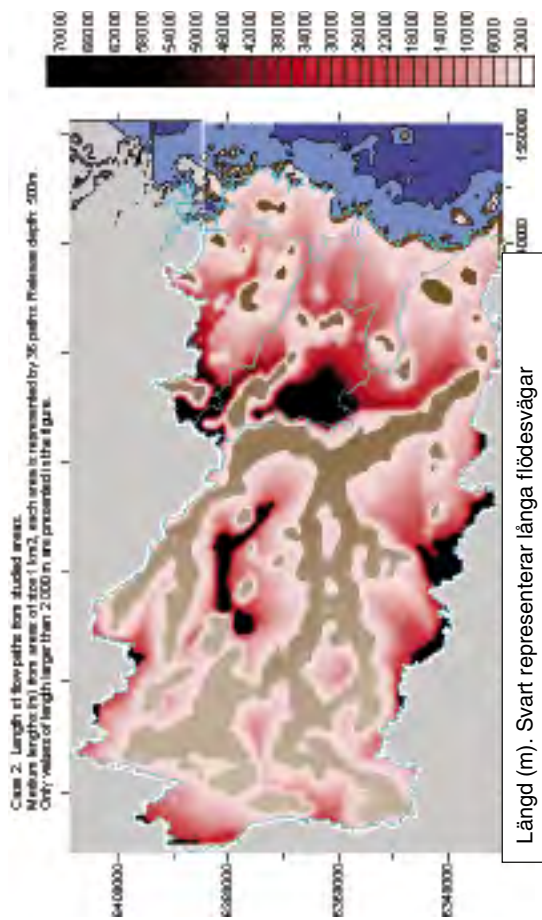
Figur 6-20. Fall 2 och Fall 3. Perspektivbild av 1 000 visualiserade flödesvägar. Notera att den vertikala skalan är 12 gånger större än den horisontala skalan.



Fall 1:

Medianvärden.					
Percentil	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]	
1	624	90	0.16	0	
5	689	133	0.25	0	
10	736	180	0.31	0	
20	825	255	0.41	0	
30	927	342	0.50	14	
40	1 061	471	0.62	31	
50	1 272	641	0.73	47	
60	1 568	897	0.87	67	
70	2 110	1 333	1.06	86	
80	3 175	2 301	1.33	100	
90	5 936	4 892	1.71	100	
95	8 783	8 786	2.07	100	
99	20 111	40 502	2.71	100	

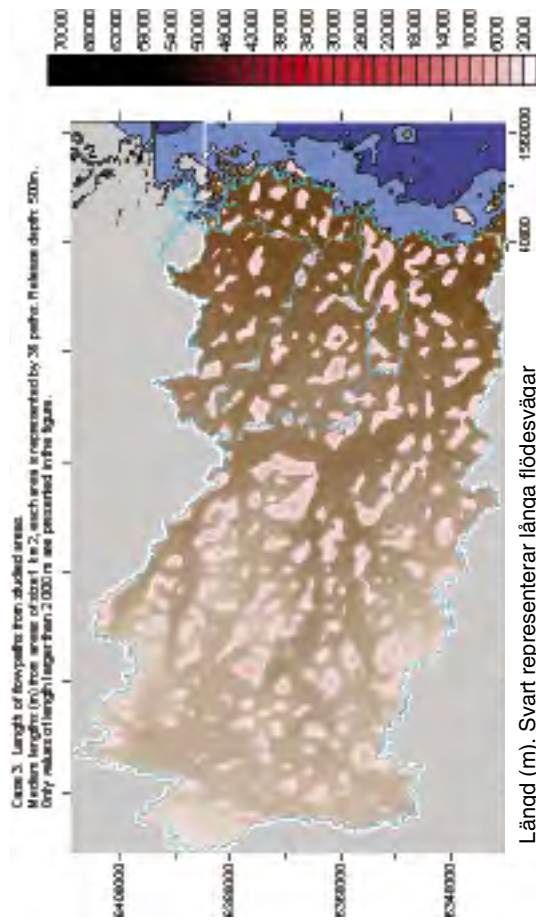
Figur 6-21. Resultat för Fall 1. Analys av 6 000 förvaransområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



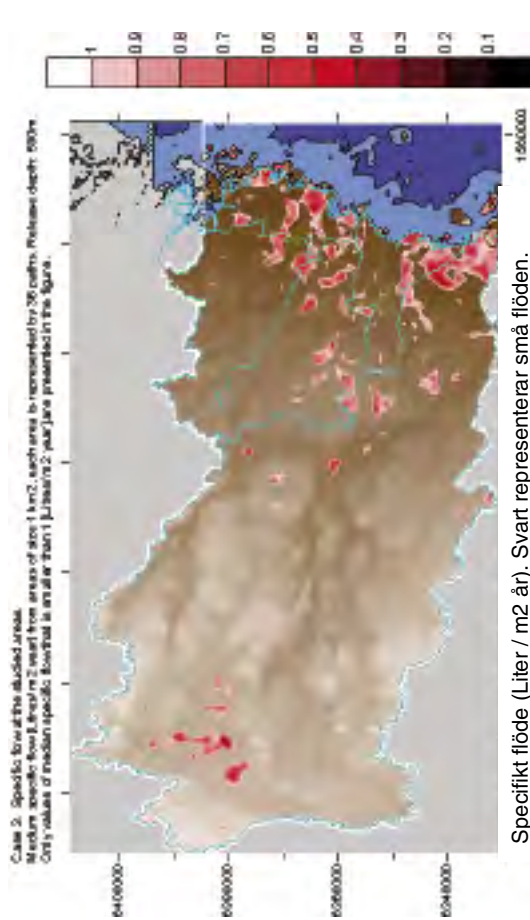
Fall 2: Medianvärden.

Percentil	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]
1	788	62	0.72	0
5	970	88	1.21	0
10	1 154	113	1.48	0
20	1 556	162	1.85	0
30	2 012	231	2.18	0
40	2 620	325	2.55	11
50	3 512	471	2.90	56
60	4 911	708	3.28	97
70	7 441	1 178	3.78	100
80	12 826	2 228	4.43	100
90	24 653	5 153	5.48	100
95	46 864	12 100	6.28	100
99	1.00E+05	1.00E+06	8.07	100

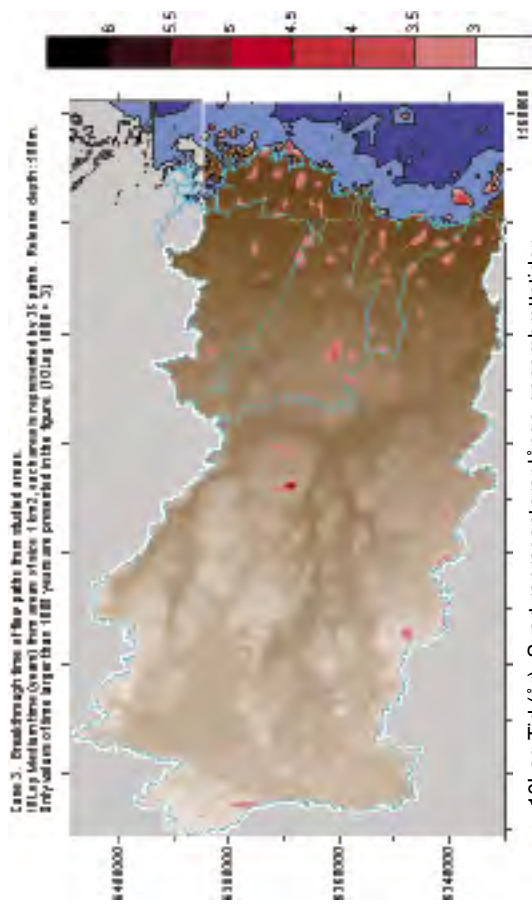
Figur 6-22. Resultat för Fall 2. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Längd (m). Svart representerar långa flödesvägar



Specifikt flöde (Liter / m² år). Svart representerar små flöden.

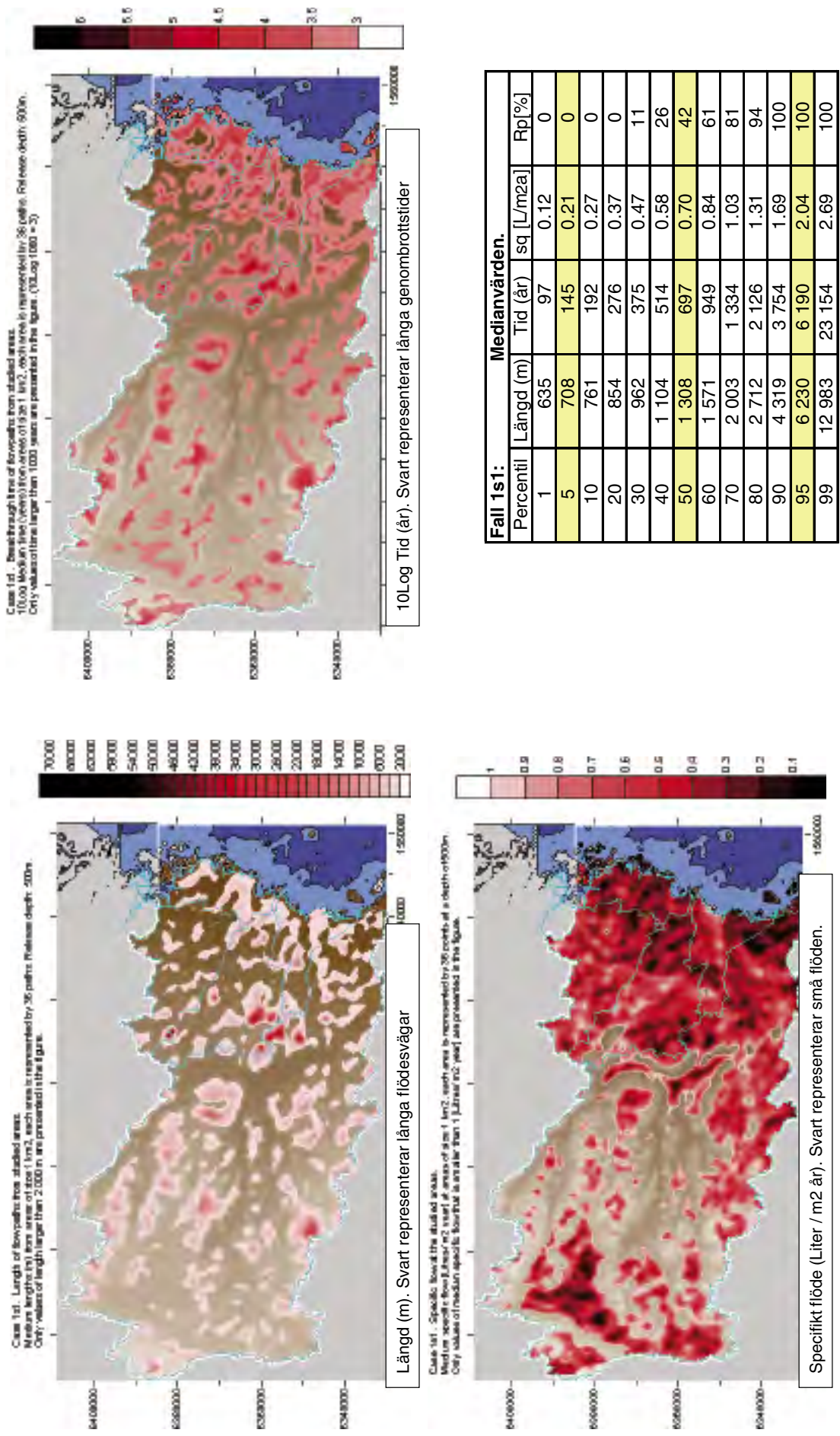


10Log Tid (år). Svart representerar långa genombrottsider

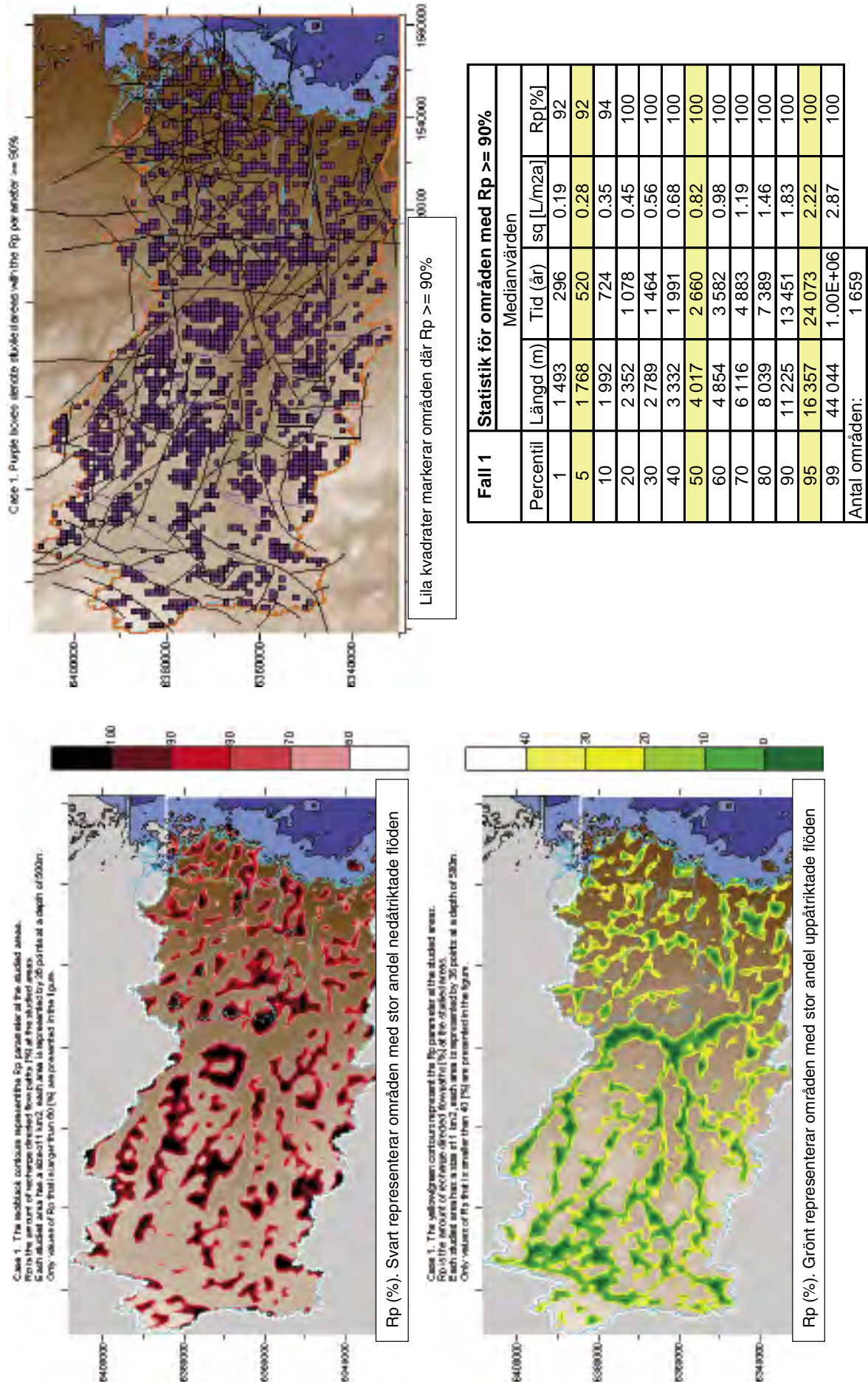
Fall 3: Medianvärden.

Percentil	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]
1	582	22	0.49	0
5	627	34	0.74	0
10	663	44	0.93	6
20	722	63	1.25	17
30	774	87	1.56	28
40	840	116	1.90	39
50	938	157	2.29	47
60	1 135	213	2.74	58
70	1 500	299	3.33	69
80	2 345	446	4.16	81
90	3 388	778	5.46	94
95	4 257	1 208	6.78	100
99	5 920	2 636	9.39	100

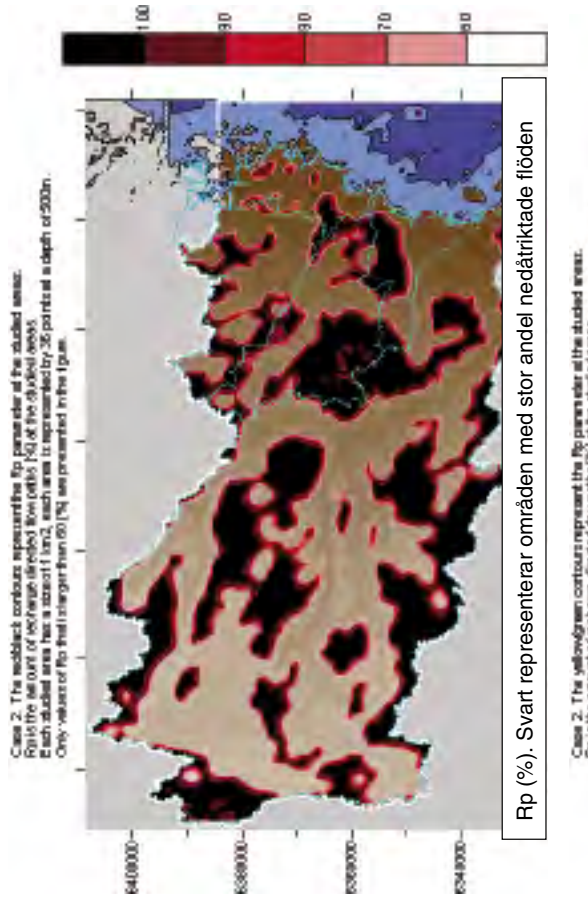
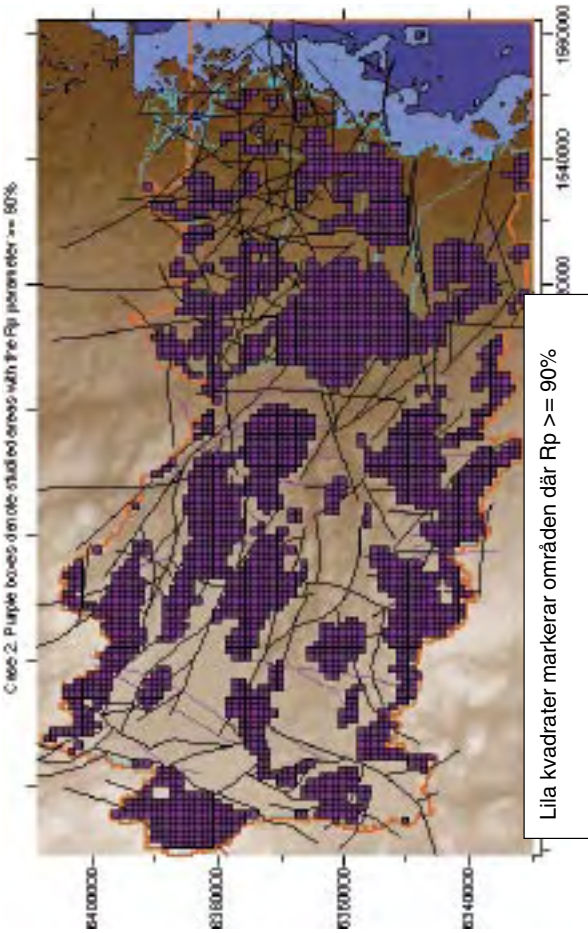
Figur 6-23. Resultat för Fall 3. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Figur 6-24. Resultat för Fall 1st. Analys av 6 000 förvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Figur 6-25. Rp-parameter för Fall 1. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².

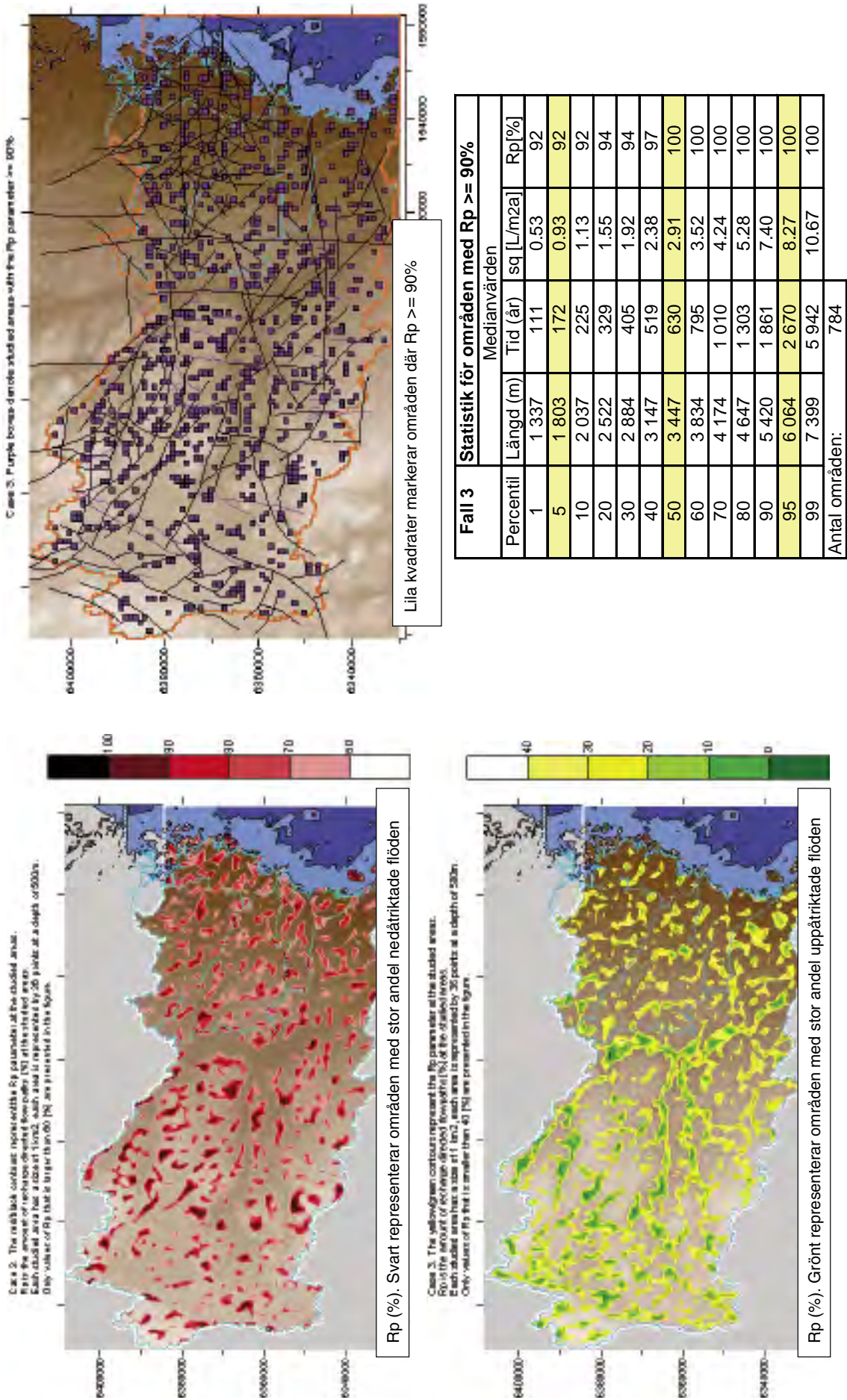


Case 2. The yellow/green contours represent the Rp parameter of the studied areas. Rp is the amount of return depth flow (Rp) [%] of the studied areas. Each studied area has a size of 1 km², each area is represented by 26 points at a depth of 500m. Only values of Rp that is smaller than 40 [%] are presented in the figure.

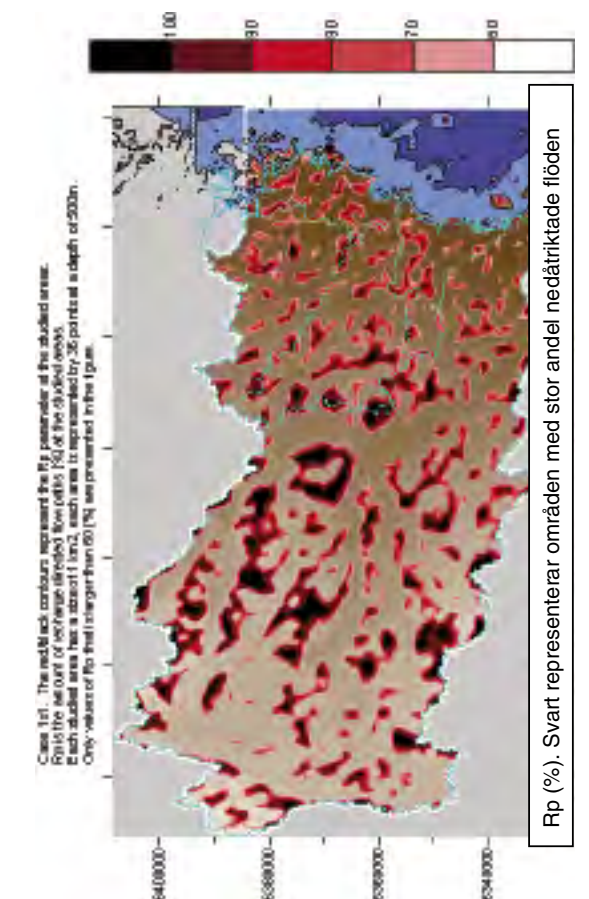
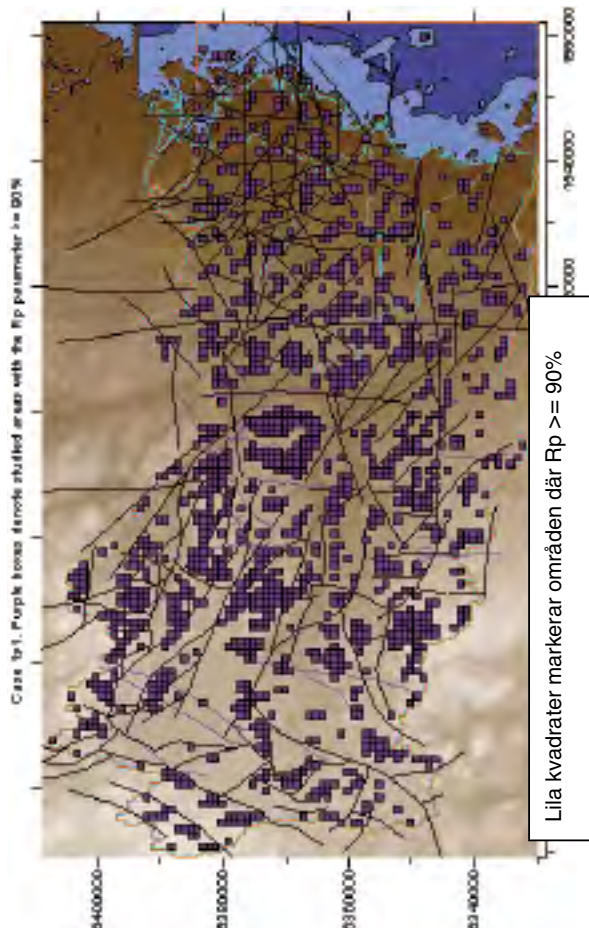
Rp (%). Grönt representerar områden med stor andel uppåtriktade flöden

Fall 2	Medianvärden			
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]
1	2 426	151	0.86	92
5	3 066	250	1.32	97
10	3 557	348	1.54	100
20	4 547	538	1.97	100
30	5 825	777	2.32	100
40	7 435	1 109	2.67	100
50	9 987	1 617	3.07	100
60	13 656	2 317	3.46	100
70	18 451	3 359	3.94	100
80	27 424	5 688	4.57	100
90	54 765	16 950	5.58	100
95	79 546	1.12E+05	6.42	100
99	1.12E+05	1.00E+06	8.12	100
Antal områden:				2 538

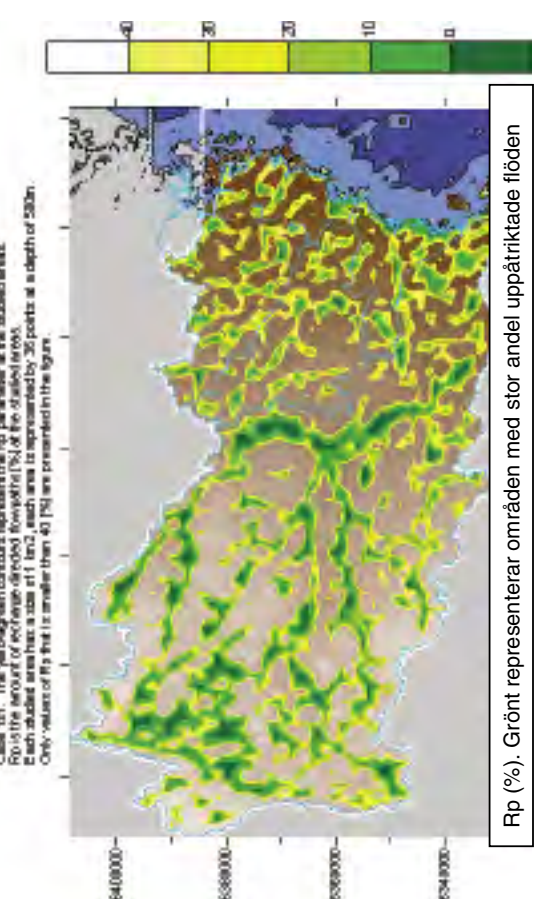
Figur 6-26. Rp-parameter för Fall 2. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Figur 6-27. Rp-parameter för Fall 3. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Fall 1s1	Medianvärden			
	Length[m]	BT-timela	sq[L/m2a]	Rp[%]
1	1 507	300	0.12	92
5	1 752	493	0.26	92
10	1 963	651	0.34	94
20	2 295	934	0.47	97
30	2 608	1 263	0.60	100
40	2 948	1 659	0.72	100
50	3 423	2 090	0.85	100
60	4 058	2 694	1.03	100
70	4 860	3 415	1.23	100
80	5 968	4 942	1.47	100
90	8 219	8 679	1.87	100
95	11 296	13 958	2.22	100
99	37 725	90 278	2.84	100
Antal områden:				1 384



Figur 6-28. Rp-parameter för Fall 1s1. Analys av 6 000 förvaransområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².

6.6 Fall 4 och 5 och tillhörande sensitivitetfall – Beräkningsfall med djupavtagande K-värden och komplexa egenskaper

6.6.1 Inledning – Djupavtagande genomsläpplighet

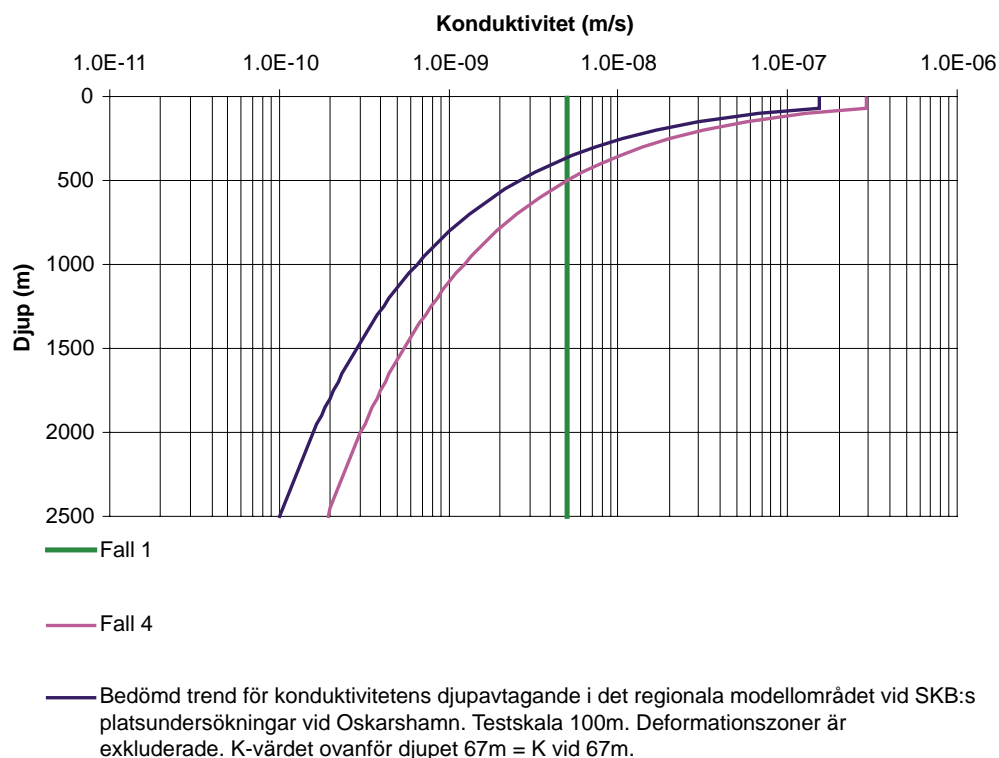
De fall som presenteras i följande avsnitt har alla definierats med djupavtagande konduktivitet. En tendens för mindre K-värden med djupet har observerats (uppmätts) vid fältmätningar vid SKB:s undersökningsområden, se kapitel 2. Eftersom berget är ett heterogent medium så varierar K-värdena vid varje djup, men det är möjligt att anpassa en trend för ett djupavtagande utifrån uppmätta K-värden.

6.6.2 Fall 4

Fall 4 är en helt homogen modell, förutom att K-värdena avtar med djupet. Funktionen för djupavtagandet har definierats med den ovan diskuterade trenden för djupavtagande som följer observationerna vid SKB:s platsundersökningar. Djupavtagandet har kalibrerats så att K-värdet vid djupet 500 m är lika med $5E-9$ m/s. Detta K-värde användes också i Fall 1. Figur 6-29 visar K-värden mot djupet för Fall 1 och Fall 4, dessutom visas en bedömd trend för djupavtagandet vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn.

En jämförelse mellan Fall 1 och Fall 4 demonstrerar betydelsen av ett djupavtagande K-värde. Naturligtvis kan olika trender för djupavtagande förekomma i verkligheten och Fall 4 representerar bara en variant, men en jämförelse mellan Fall 1 och Fall 4 visar på den principiella betydelsen av ett djupavtagande K-värde med avseende på flödesvägarnas resulterande egenskaper.

Flödeslängder för Fall 1, Fall 4 och Fall 5 presenteras i figur 6-30. Det framgår tydligt av figuren att de långa flödesvägarna som förekommer i Fall 1 försvinner nästan helt i Fall 4.



Figur 6-29. Fall 1 och Fall 4. K-värden mot djupet.

I en modell med djupavtagande K-värden blir genomsläppligheten på stort djup liten. I Fall 4 är genomskäppligheten över 500 m djup större än i Fall 1, men under 500 m djup är genomsläppligheten mindre i Fall 4 än i Fall 1. Följden av fördelning av genomsläpplighet i Fall 4 blir, i jämförelse med Fall 1, att flödet ovanför djupet 500 m tenderar att öka, men flödet under djupet 500 m tenderar att minska. Startpunkterna för flödesvägarna ligger på 500 m djup, långa flödesvägar erhålls ofta för partikelbanor som strömmar nedåt mot större djup än 500 m. Analysen av förvarsområden visar att i antalet områden med nedåtriktade flöden på 500 m djup ($R_p > 90\%$) är 1 659 stycken (1 659 km²), men i Fall 4 är antalet 984 (984 km²).

En jämförelse av andel långa flödesvägar för Fall 1, Fall 4 och Fall 5 ges i tabell 6-4. Tabellen visar att andelen storregionala flödesvägar (längre än 10 km) i Fall 4 bara är en tiondel av antalet i Fall 1. Medianlängderna för Fallen 1, 4 och 5 skiljer sig dock inte så mycket åt: Fall 1 = 1 300 m, Fall 4 = 1 360 m och för Fall 5 = 1 500 m.

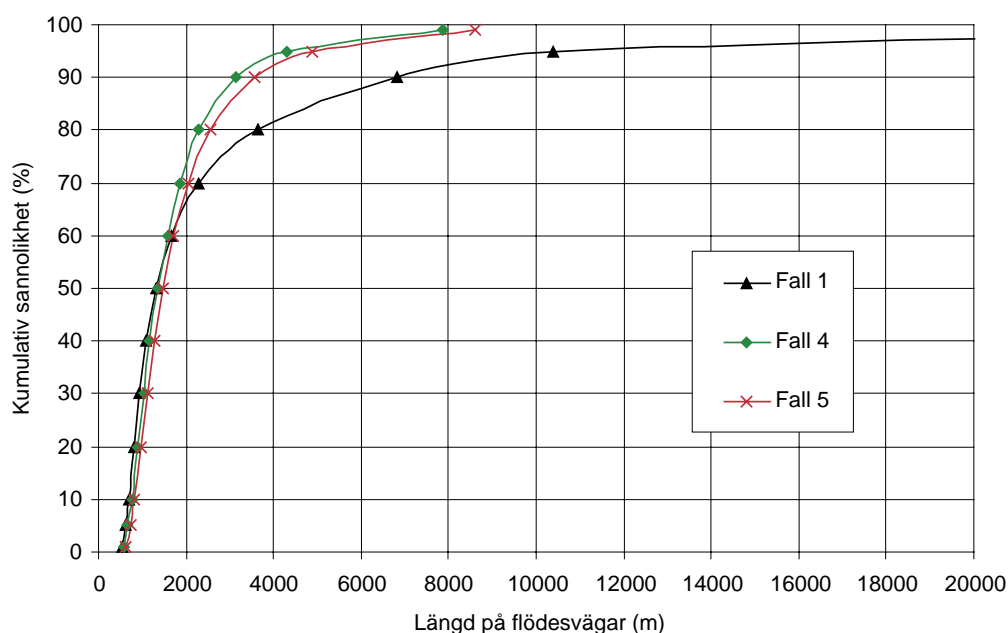
Jämförelserna mellan Fall 1 och Fall 4 visar att det är främst de långa flödesvägarna (längre än medianen) som påverkas av en djupavtagande genomsläpplighet. En slutsats av jämförelsen mellan Fall 1 och Fall 4 är att andelen mycket långa flödesvägar blir mycket liten om modellen tilldelas ett djupavtagande (som följer en bedömd trend för djupavtagandet vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn).

En areabaserad analys av flödesvägar från förvarsområden har också utförts (metodiken diskuteras i avsnitt 3.8). Dessa kartor illustrerar tydligt hur flödesvägarnas resulterande egenskaper varierar inom det studerade modellområdet.

- För Fall 1 presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-21.
- För Fall 4 presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-35.

Vi har också beräknat R_p -värden (metodiken diskuteras i avsnitt 3.9) för de studerade förvarsområdena, resultaten presenteras i följande figurer:

- För Fall 1 i figur 6-25.
- För Fall 4 i figur 6-40.



Figur 6-30. Fall 1, Fall 4 och Fall 5. Längd på flödesvägar. (Alla flödesvägar inkluderade.)

Tabell 6-4. Fall 1, Fall 4 och Fall 5. Andel långa flödesvägar.

Längd	Antal flödesvägar i procent av alla flödesvägar *		
	Fall 1	Fall 4	Fall 5
> 2 000 m	34	26	31
> 5 000 m	15	3,4	4,7
> 8 000 m	8	0,9	1,2
> 10 000 m	5,3	0,5	0,6

* Eftersom varje flödesväg representerar en viss area av det studerade modellområdet representerar procentsatserna i tabellen också andelar av modellområdets area.

Genom att jämföra figurerna framgår det hur flödesmönstret ändras när flödesdomänens genomsläpplighet definieras som djupavtagande.

6.6.3 Fall 5

Fall 5 har valts som referensfall. Detta fall inkluderar stor komplexitet och är en rimlig representation av det studerade systemet. Resultat för Fall 5 presenteras också i avsnitt 6.2. Följande geologi är inkluderad i Fall 5:

- Litologiska enheter med djupavtagande genomsläpplighet, se avsnitt 4.5.
- Vertikala deformationszoner med djupavtagande genomsläpplighet, se avsnitt 4.6.
- Vertikala diabasgångar med djupavtagande genomsläpplighet, se avsnitt 4.7.
- Kvantära avlagringar, se avsnitt 4.4.

Fall 5 visar på flödesvägar i en komplex modell som är en rimlig representation av det studerade systemet. En jämförelse av detta (Fall 5) mot Fall 4 visar på betydelsen av den komplexitet som följer av att modellen delas in i Litologiska enheter med olika egenskaper, vertikala deformationszoner och diabasgångar samt kvartära avlagringar.

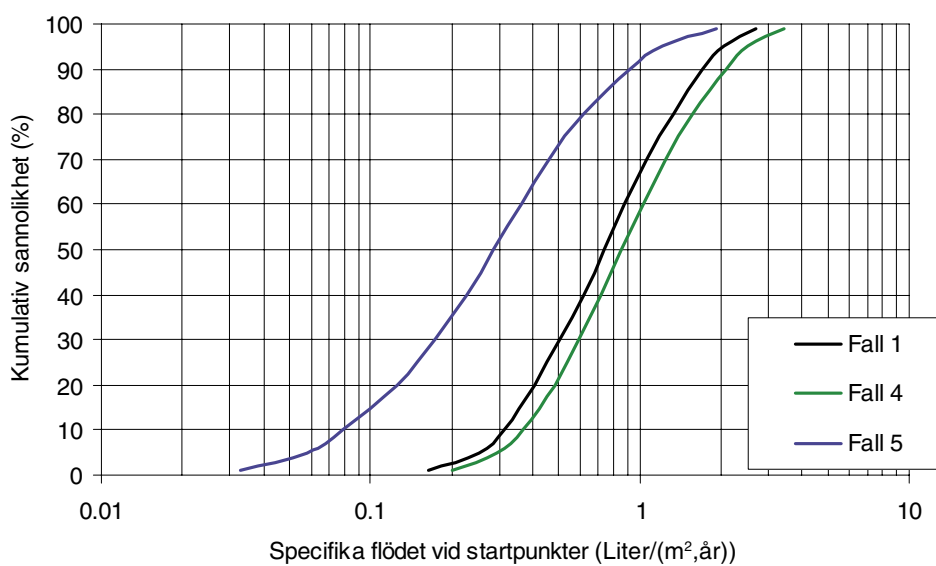
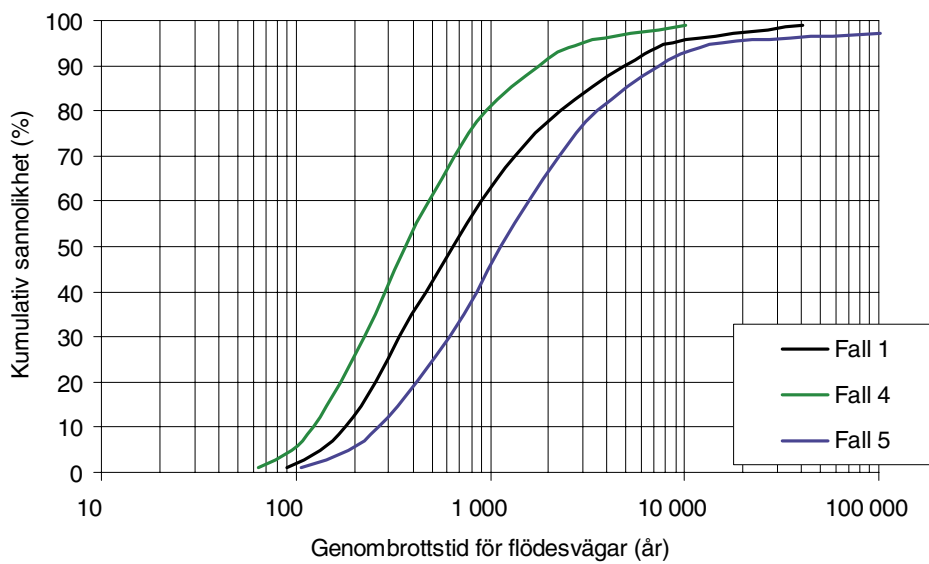
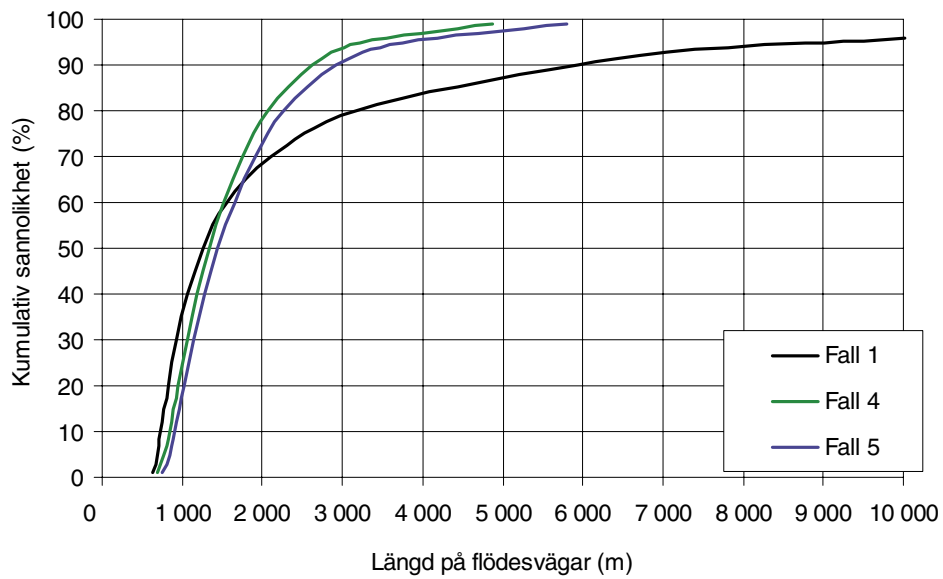
En jämförelse av flödeslängder för Fall 1, Fall 4 och Fall 5 presenteras i figur 6-16 och figur 6-31. Det framgår tydligt av figurerna att skillnaden mellan Fall 4 och Fall 5 inte är så stor, när det gäller längder på flödesvägarna. De skillnader i längder som uppkommer mellan Fall 4 och Fall 5 följer av den relativa skillnaden i K-värde mellan de olika litologiska enheterna och mellan dessa enheter och de vertikala strukturerna (deformationszoner och diabasgångar). Den absoluta storleken på K-värdena påverkar inte direkt längderna på flödesvägarna, detta följer av de applicerade randvillkoren. (Att det applicerade randvillkoret är rimligt demonstreras i Fall 5J, se nedan.)

Däremot påverkas genombrotstider och specifika flöden av den absoluta storleken på K-värdena (se figur 6-31), därför blir skillnaderna större när dessa värden jämförs.

Eftersom flödesvägarnas startpunkter ligger på djupet 500 m, och de kvartära avlagringarna endast förekommer inom de översta 10 m av modellområdet blir dessa inte särskilt betydelsefulla; i synnerhet inte eftersom randvillkoret längs med modellens övre yta är specificerat tryck.

En jämförelse av andel långa flödesvägar för Fall 1, Fall 4 och Fall 5 ges i tabell 6-4. Tabellen visar att för Fall 4 och Fall 5 är andelen storregionala flödesvägar (längre än 10 km) ungefär desamma (0,5 % och 0,6 %)

För Fall 1, Fall 4 och Fall 5 presenterar figur 6-31 kumulativa fördelningar för flödesvägar-egenskaper.



Figur 6-31. Fall 1, 4 och 5. Jämförelse av flödesvägars egenskaper. Medianvärden för förvarsområden av storlek 1 km².

En areabaserad analys av flödesvägar från förvarsområden har också utförts (se avsnitt 3.8).

- För Fall 1 presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-21.
- För Fall 4 presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-35.
- För Fall 5 presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-36.

Vi har beräknat R_p -värden (se avsnitt 3.9) för de studerade förvarsområdena, resultaten presenteras i följande figurer:

- För Fall 1 i figur 6-25.
- För Fall 4 i figur 6-40.
- För Fall 5 i figur 6-41.

Fall 5 uppvisar samma allmänna flödesmönster som Fall 4. Grundvattnets flödesceller är i huvudsak lokala. Andelen storregionala flödesvägar är mycket liten.

Följande slutsats erhålls efter jämförelse av Fall 1, Fall 4 och Fall 5: Med avseende på storleken på grundvattnets flödesceller och med avseende på grundvattnets flödesmönster från förvarsdjup är antagandet om en djupavtagande genomsläpplighet ett mycket mer betydelsefullt antagande än antagandet om olika litologiska enheter och förekomst av vertikala strukturer (deformationszoner och diabasgångar) och kvartärgeologiska avlagringar.

6.6.4 Fall 5s1 och Fall 5s2 – Densitetsberoende flöde

Fall 5 har också simulerats som en transient simulering med densitetsberoende flöde. Två olika initialvillkor har använts: "s1" och "s2". Metodik för de transienta densitetsberoende simuleringarna och initialvillkor, presenteras i avsnitt 4.3.5. När Fall 5 simuleras med densitetsberoende flöde betecknas det som Fall 5s1 och Fall 5s2, beroende på initialvillkor.

Jämförelser av simuleringar med densitetsberoende flöde (Fall 5s1 och Fall 5s2) och utan densitetsberoende flöde (Fall 5) presenteras i figur 6-34. Av figuren framgår att skillnaderna är mycket små. Flödesvägarna blir något litet kortare då densitetsberoende flöde inkluderas. Genombrottstider mindre än cirka mediantiden blir något längre, genombrottstider större än cirka mediantiden blir något kortare. Skillnaderna är för större delen av fördelningarna bara några få procent.

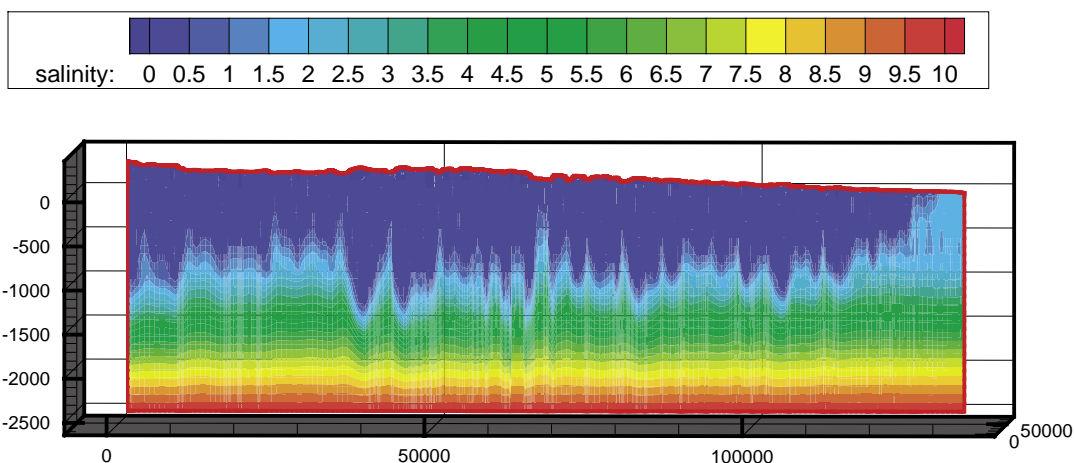
Ett exempel på beräknad salinitet mot djupet presenteras i figur 6-32 och figur 6-33. Det tunga saltvattnet med höga salthalter förekommer på ett djup under 1 600 m. På djupet 500 m är salthalterna låga, förutom vid betydande utströmningsområden där högre salthalter kan förekomma. Värt att notera är att i jämförelse med Fall 1s1 (figur 6-17) så är mer av den initiala saltvattensituationen bevarad i Fall 5s1 och 5s2 (figur 6-32 och figur 6-33). Detta beror på att när genomsläppligheten definieras som djupavtagande (enligt den trend som vi har använt) blir flödena på stora djup mycket mindre än då genomsläppligheten är konstant med djupet. Eftersom flödena är mindre på stort djup i Fall 5s1 och 5s2 blir också förändringarna i salthalt under den studerade tidsperioden mindre.

För Fall 5s1 presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-38, och för Fall 5s2 i figur 6-39. R_p -värden för de studerade förvarsområdena presenteras i figur 6-43 för Fall 5s1 och i figur 6-44 för Fall 5s2.

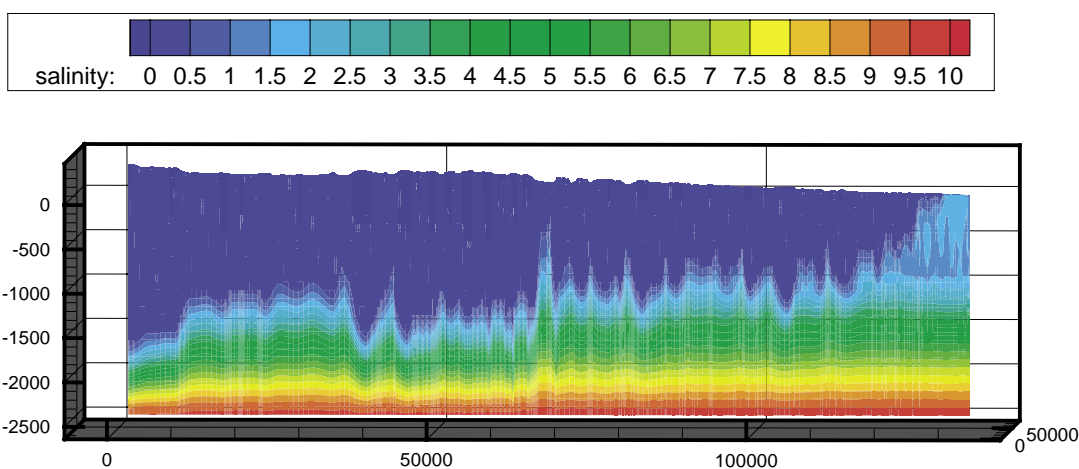
Som tidigare konstaterats i avsnitt 6.5 är det mesta av modellområdet är beläget långt från nuvarande kustlinje och ovanför tidigare högsta kustlinje. På förvarsdjup är salthalterna därför ofta låga, således får densitetseffekter ringa betydelse för flödesvägar från förvarsdjup i den storregionala modellen. Därav kan vi sluta oss till att stationära simuleringar utan

densitetsberoende flöde är utmärkta approximationer i den storregionala skalan och för det studerade modellområdet (med avseende på flödesvägar från förvarsdjup). Samtidigt noterar vi att andelen riktigt långa genombrotts-tider är noterbart mindre i simuleringarna med densitetsberoende flöde och komplexa fall, se figur 6-34, figur 6-56 och figur 6-62.

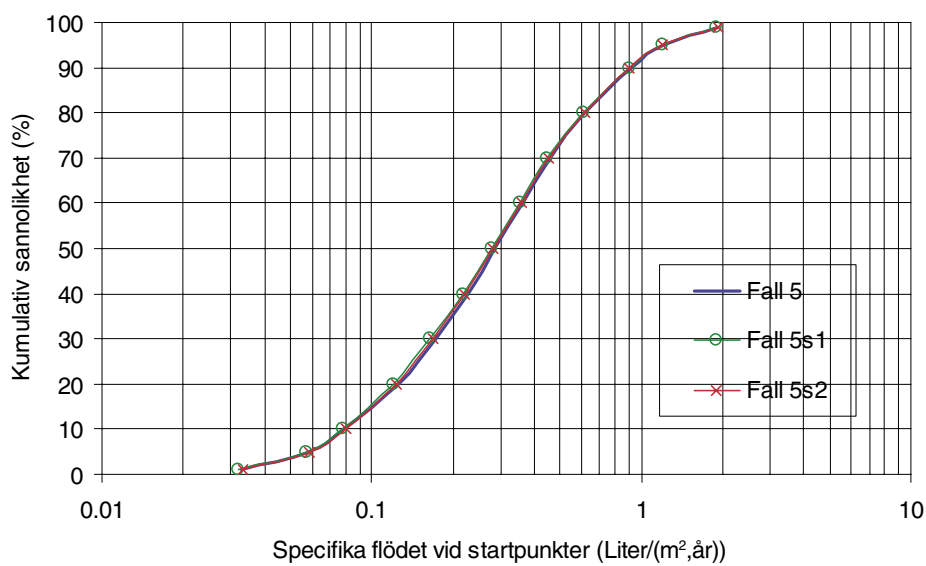
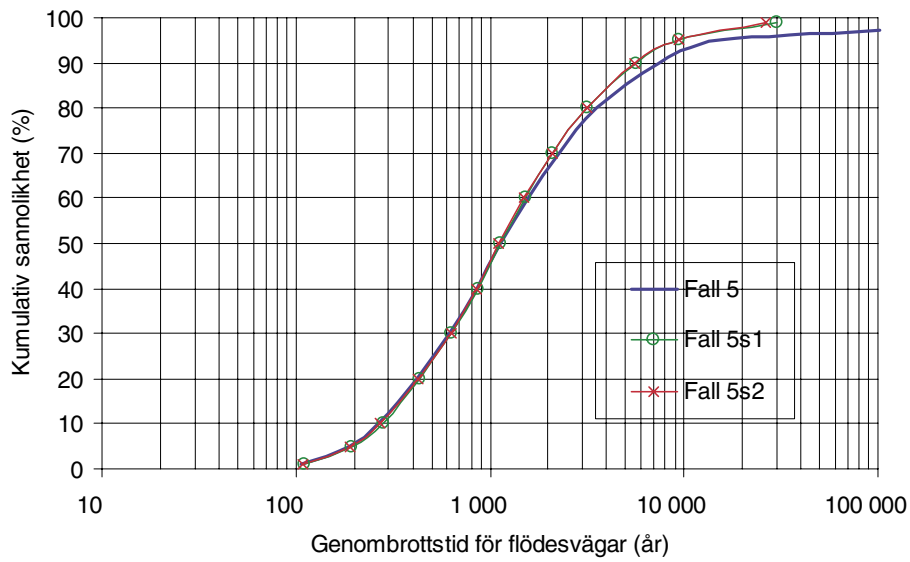
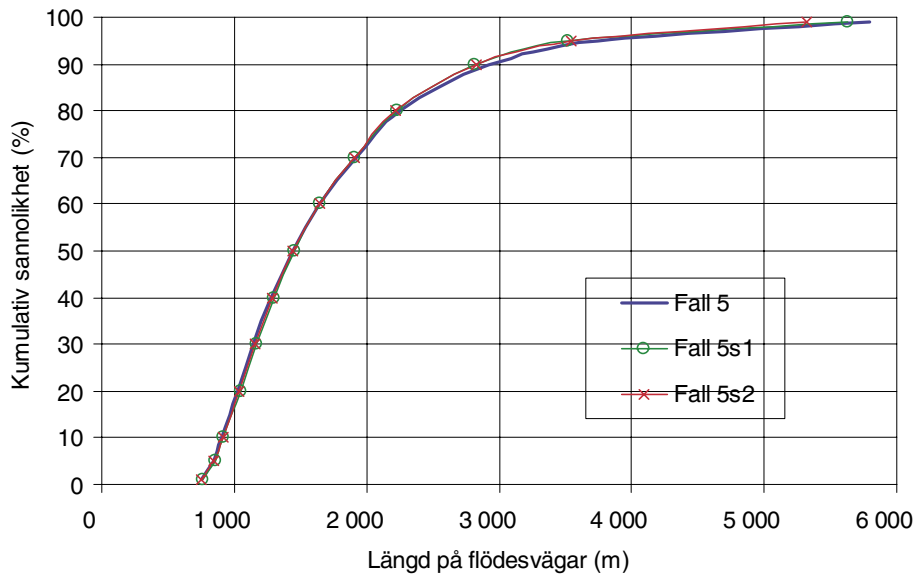
De studerade flödesvägarna simuleras i en flödessituation som representerar den nuvarande flödessituationen (2000 AD), se avsnitt 3.7. De transienta simuleringarna som diskuteras ovan initierades vid tidpunkten 10 000 BP. I avsnitt 4.3.5 nämns också transienta densitetsberoende simuleringar med en initial situation vid 14 000 BP. Ett fall med initialtillstånd vid 14 000 BP presenteras och diskuteras i avsnitt 6.9. Det skall dock redan här påpekas att en simulering med initialtillståndet vid 10 000 BP och en simulering med initialtillståndet vid 14 000 BP producerar nästan exakt samma resultat (givet att modellen i övrigt är identisk). Följande slutsats erhålls av denna jämförelse: Den simulerade tidsperioden som startar vid 10 000 BP är tillräckligt lång, en förlängning av den simulerade tidsperioden genom att flytta den initiala tidpunkten bakåt i tiden är av mycket ringa betydelse för de simulerade flödesvägarna från förvarsdjup, och de stora förändringarna i havets nivå före 10 000 BP (se figur 4-9) är därmed också av mycket ringa betydelse för de simulerade flödesvägarna från förvarsdjup.



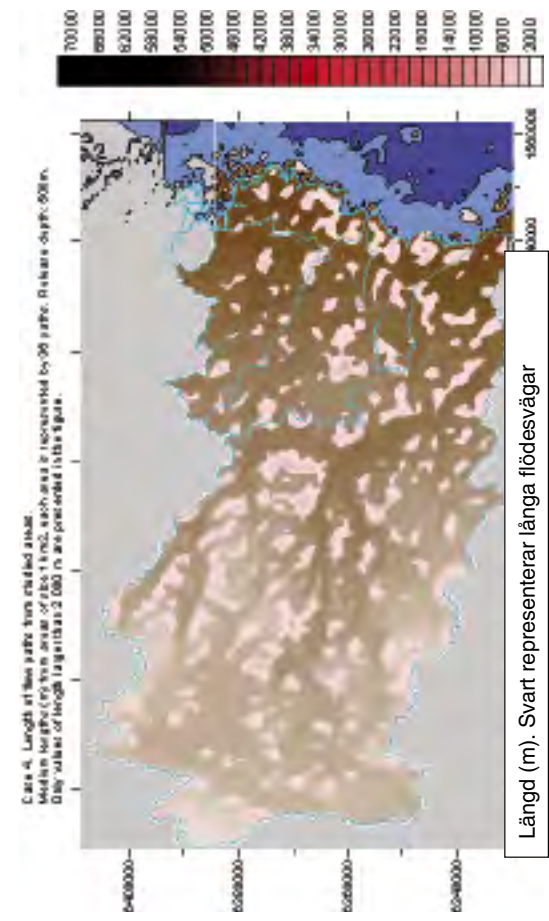
Figur 6-32. Fall 5s1. Beräknad salinitet (procent) längs med en sektion i väst-östlig riktning. Tid = 2000 AD. Profilen är placerad vid Y = 6379700 (rikets nät).



Figur 6-33. Fall 5s2. Beräknad salinitet (procent) längs med en sektion i väst-östlig riktning. Tid = 2000 AD. Profilen är placerad vid Y = 6379700 (rikets nät).

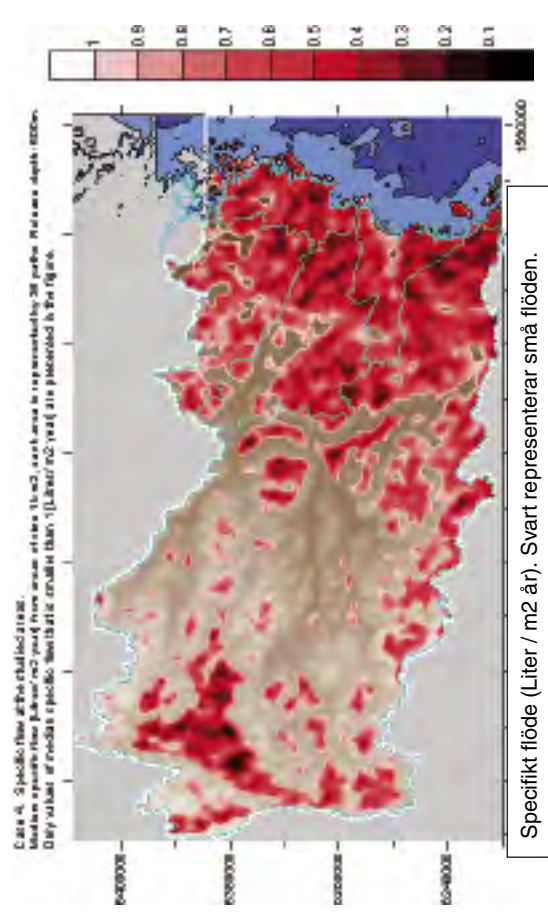


Figur 6-34. Fall 5, 5s1 och 5s2. Jämförelse av flödesvägars egenskaper. Medianvärden för förvarsområden av storlek 1 km².

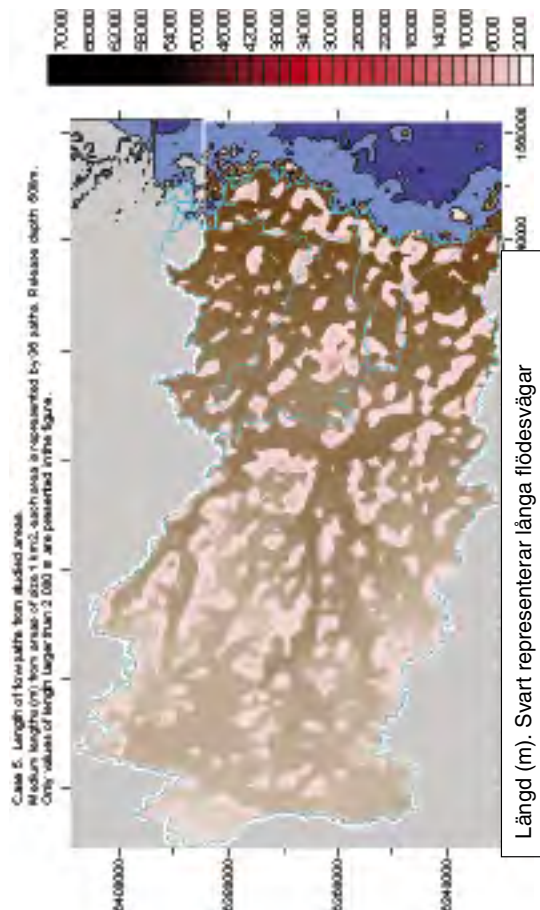


Fall 4: Medianvärden.

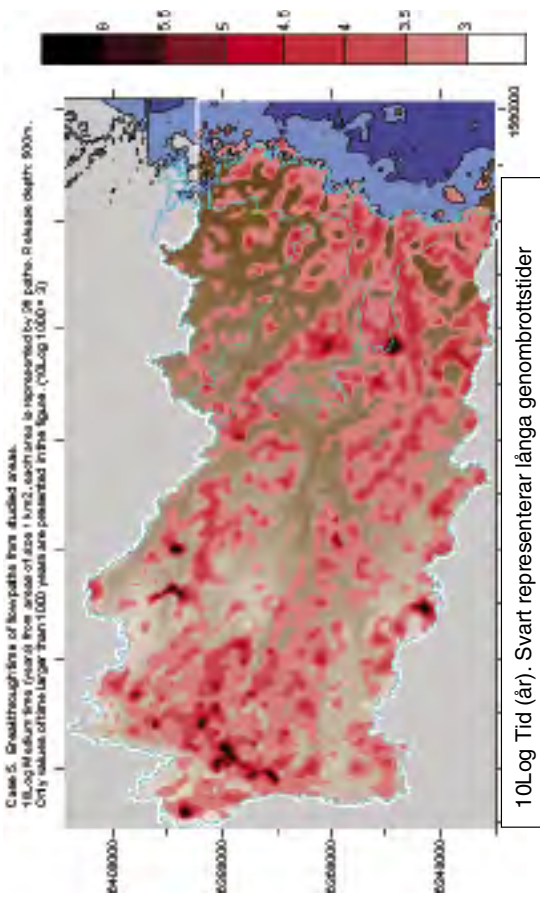
Percentil	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]
1	693	64	0.20	0
5	777	96	0.29	0
10	841	122	0.37	3
20	945	170	0.48	16
30	1 059	225	0.60	28
40	1 184	287	0.72	39
50	1 333	367	0.86	50
60	1 521	484	1.04	61
70	1 762	658	1.25	72
80	2 068	956	1.57	86
90	2 629	1 778	2.08	100
95	3 215	3 015	2.53	100
99	4 872	10 206	3.43	100



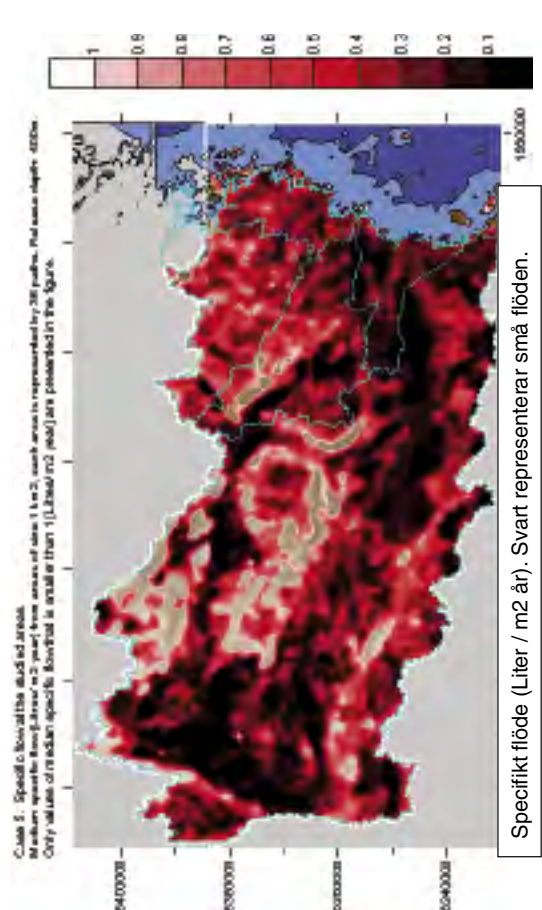
Figur 6-35. Resultat för Fall 4. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Längd (m). Svart representerar långa flödesvägar



10Log Tid (år). Svart representerar långa genombrottsider



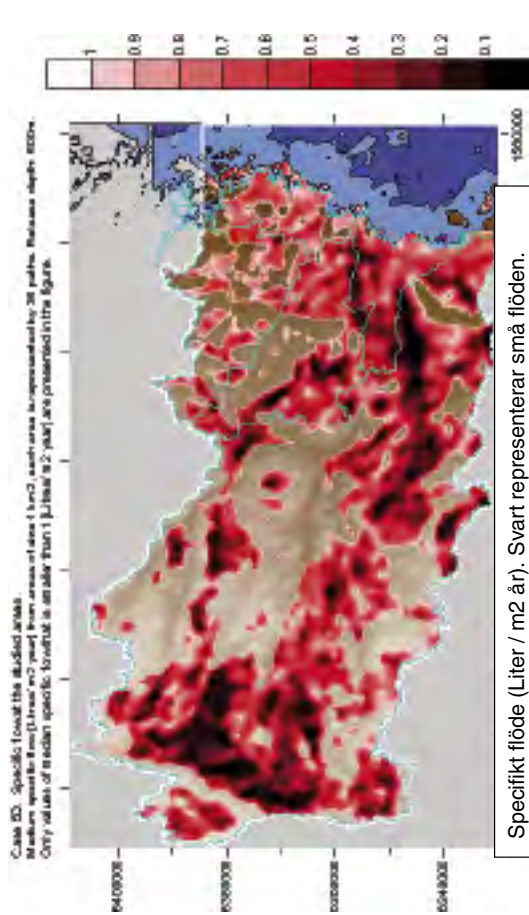
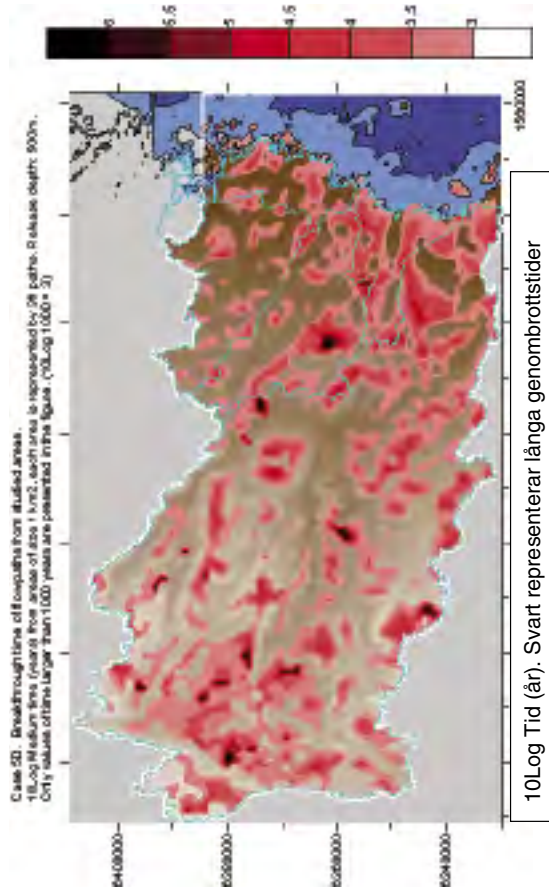
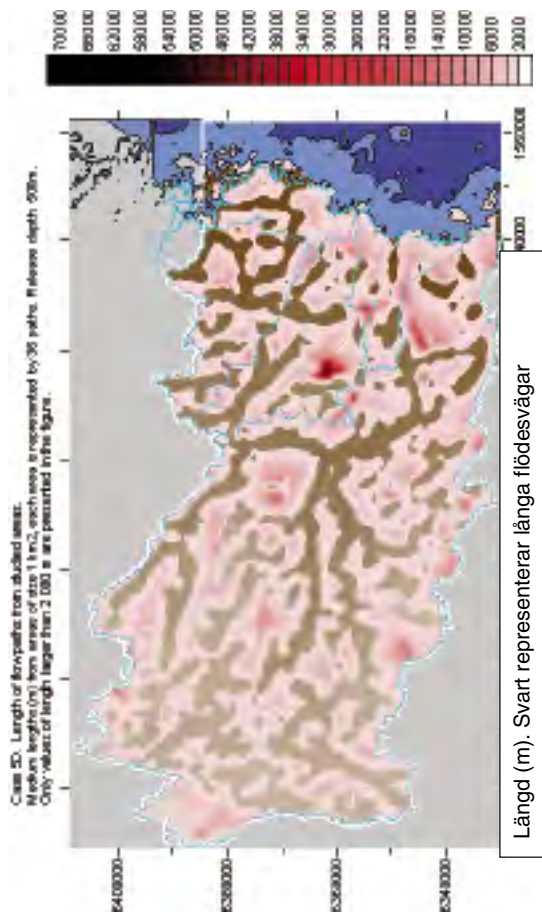
Specifikt flöde (Liter / m² år). Svart representerar små flöden.

Fall 5: Medianvärdet.

Percentil	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]
1	755	107	0.03	0
5	845	186	0.06	0
10	908	266	0.08	6
20	1 030	421	0.12	19
30	1 151	622	0.17	31
40	1 282	847	0.23	42
50	1 445	1 128	0.29	53
60	1 651	1 579	0.36	64
70	1 917	2 275	0.46	78
80	2 260	3 538	0.62	89
90	2 920	7 346	0.91	100
95	3 751	15 634	1.21	100
99	5 795	1.00E+06	1.92	100

Fall 5 är definierat som Referensfall

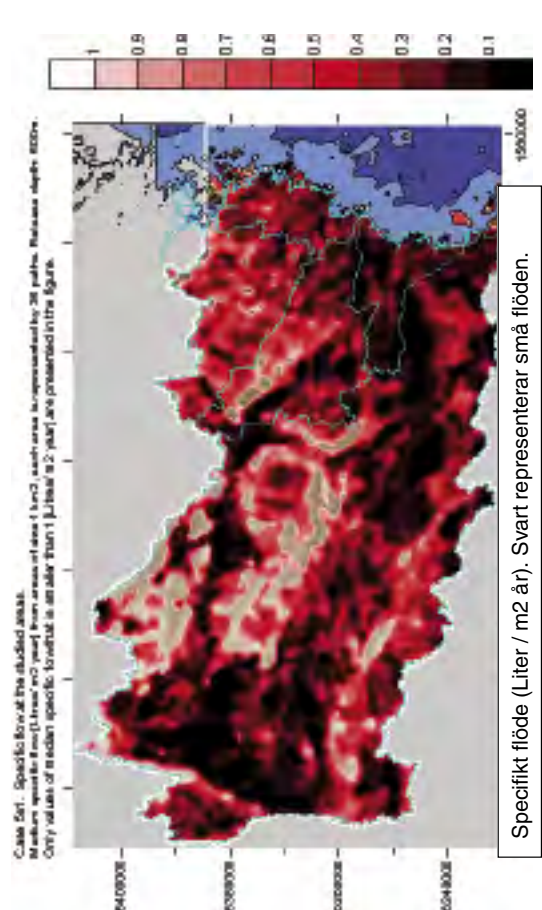
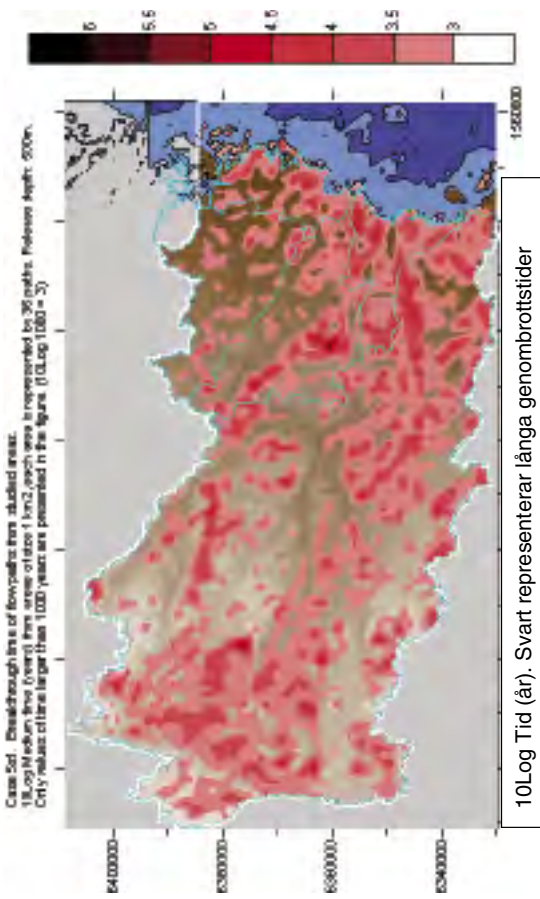
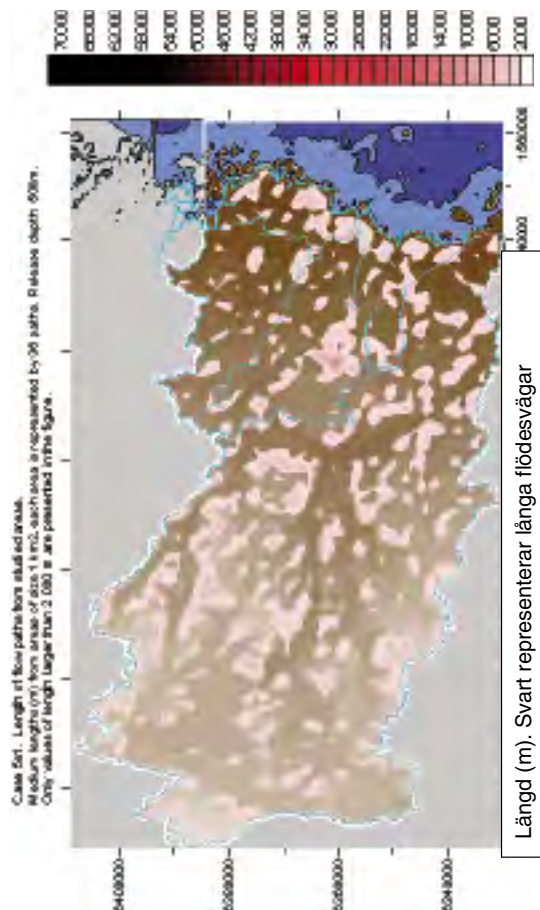
Figur 6-36. Resultat för Fall 5. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Fall 5D: Medianvärdet.

Percentil	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]
1	872	50	0.08	0
5	1 015	101	0.15	0
10	1 144	157	0.21	0
20	1 399	281	0.32	8
30	1 652	432	0.44	28
40	1 922	609	0.57	50
50	2 227	875	0.70	69
60	2 618	1 253	0.86	89
70	3 120	1 799	1.07	100
80	3 844	2 904	1.42	100
90	5 256	5 954	2.05	100
95	7 047	12 786	2.71	100
99	13 119	1.00E+06	4.52	100

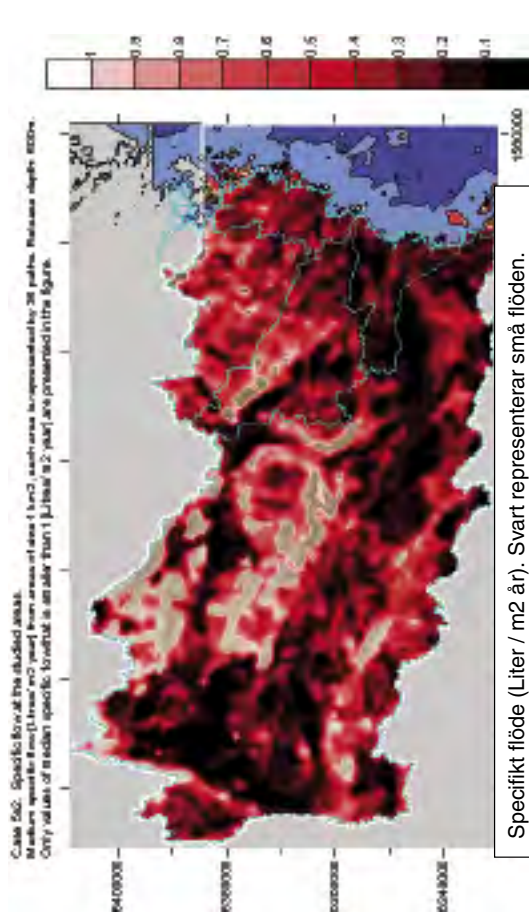
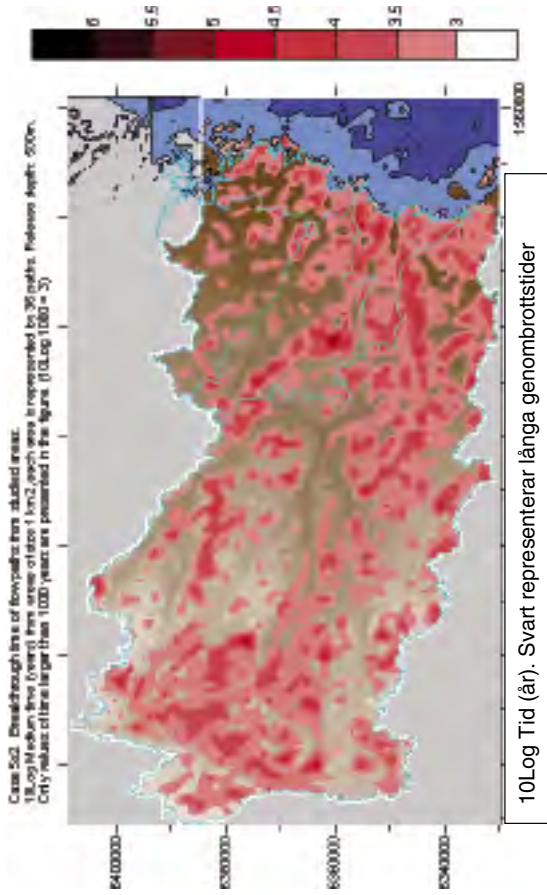
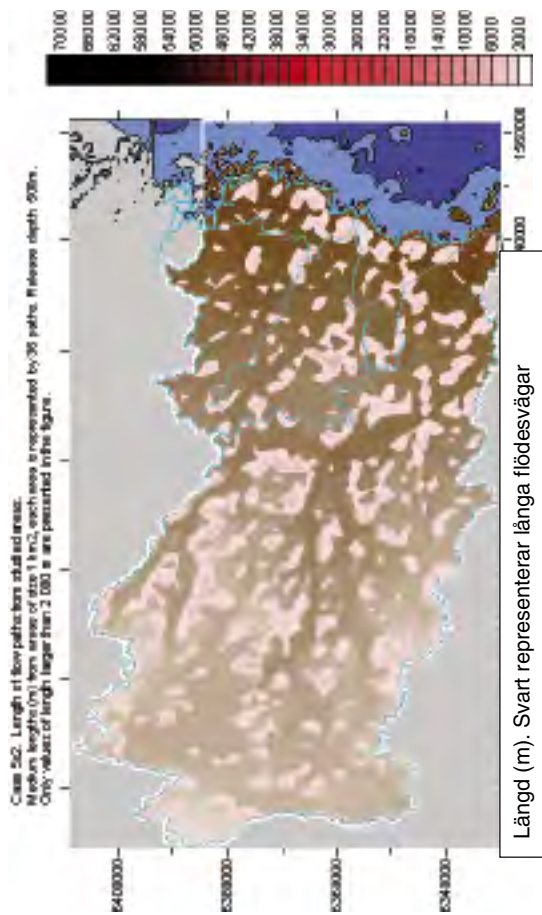
Figur 6-37. Resultat för Fall 5D. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Fall 5s1: Medianvärden.

Percentil	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]
1	759	110	0.03	0
5	859	194	0.06	0
10	919	280	0.08	6
20	1 048	433	0.12	17
30	1 166	636	0.17	28
40	1 299	867	0.22	39
50	1 450	1 128	0.28	50
60	1 648	1 516	0.35	61
70	1 909	2 100	0.45	75
80	2 231	3 151	0.61	86
90	2 812	5 637	0.90	100
95	3 522	9 420	1.20	100
99	5 625	30 252	1.91	100

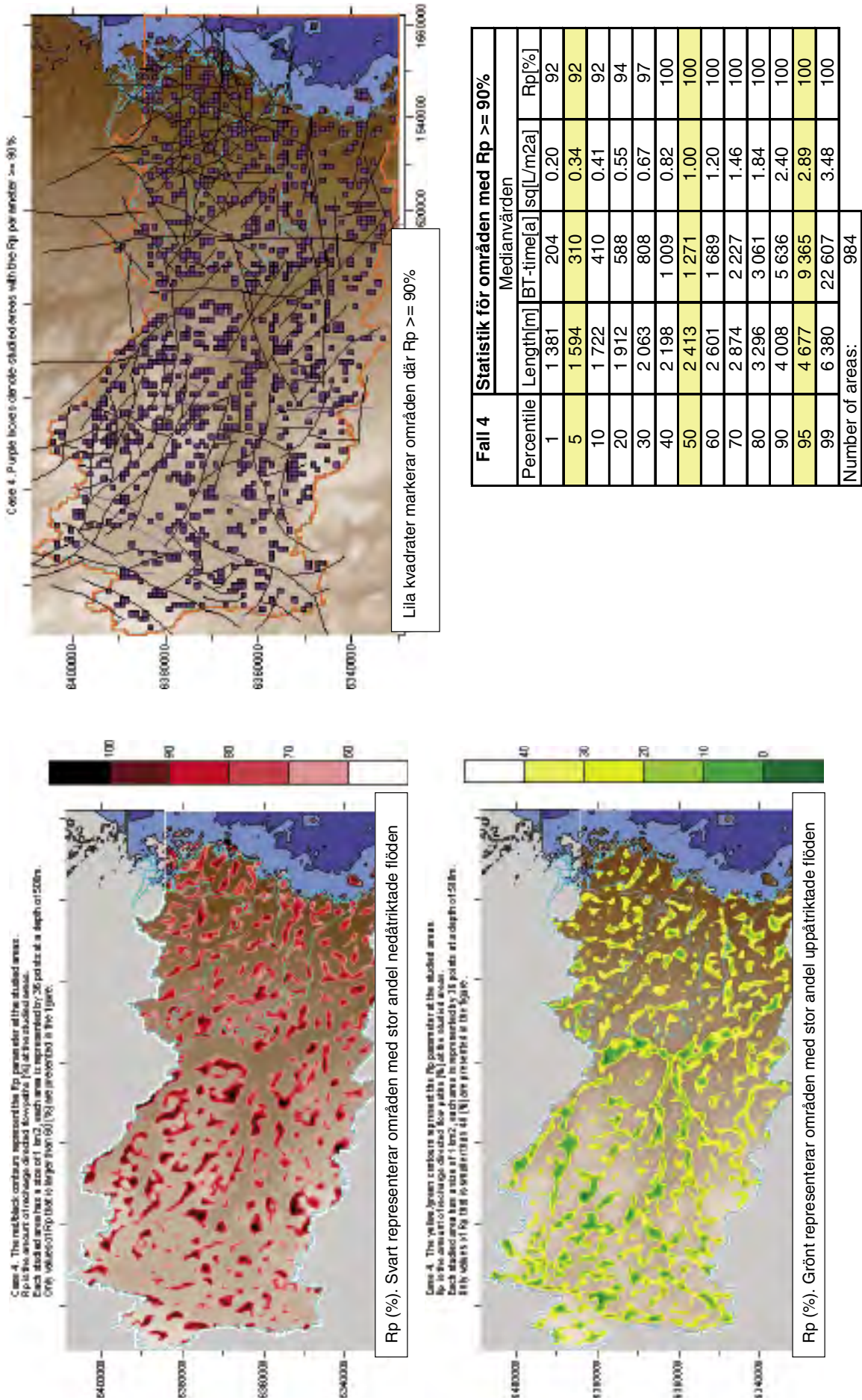
Figur 6-38. Resultat för Fall 5s1. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



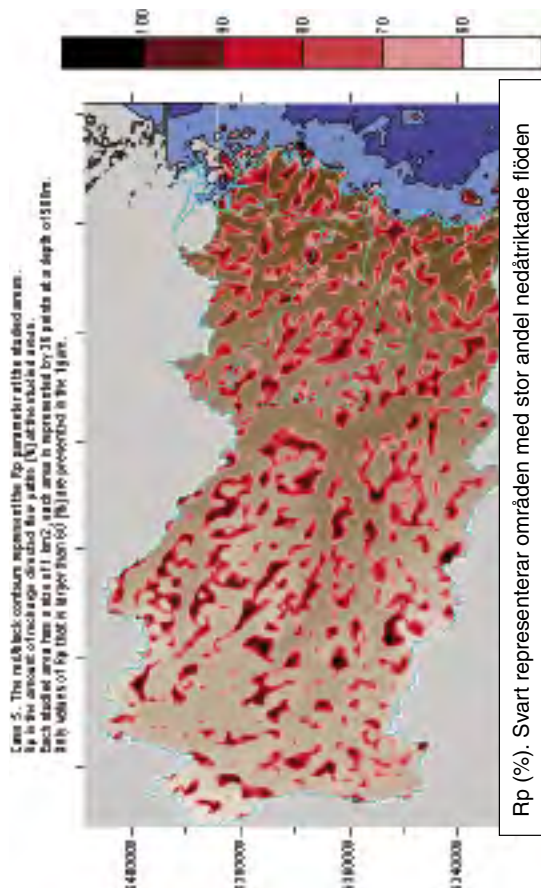
Fall 5s2:

Percentil	Medianvärdet.			
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]
1	749	109	0.03	0
5	850	190	0.06	0
10	914	273	0.08	6
20	1 043	426	0.12	17
30	1 157	630	0.17	31
40	1 293	846	0.22	42
50	1 447	1 101	0.28	53
60	1 647	1 498	0.36	64
70	1 910	2 105	0.45	75
80	2 224	3 157	0.62	86
90	2 827	5 542	0.90	100
95	3 545	9 348	1.21	100
99	5 323	26 462	1.92	100

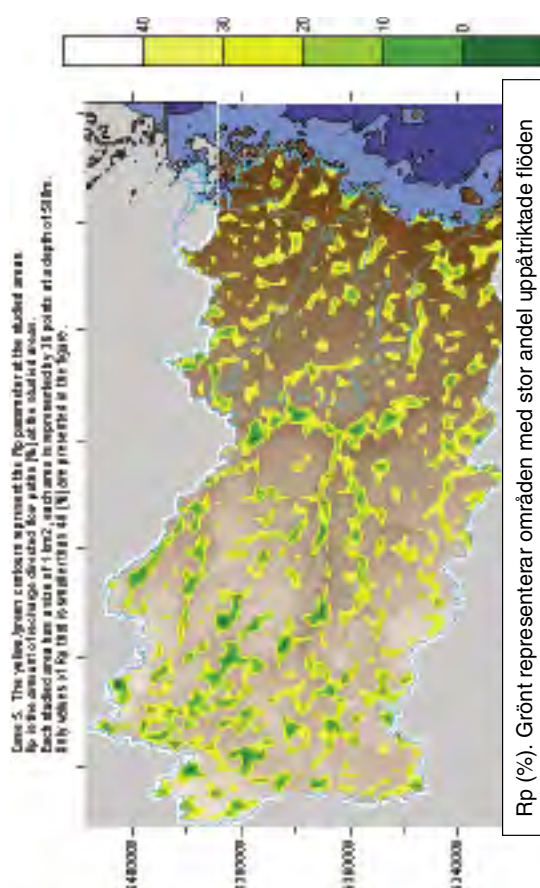
Figur 6-39. Resultat för Fall 5s2. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



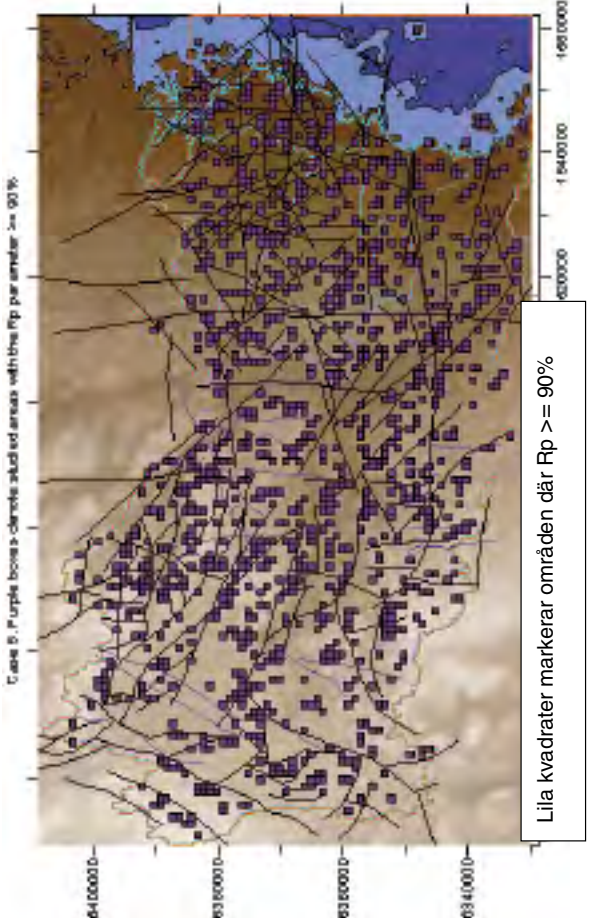
Figur 6-40. Rp-parameter för Fall 4. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Rp (%). Svart representerar områden med stor andel nedåtriktade flöden



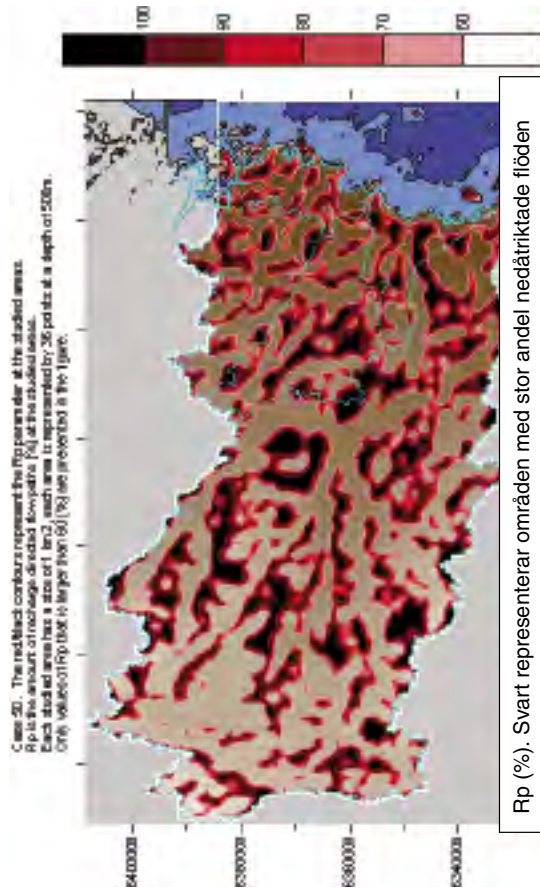
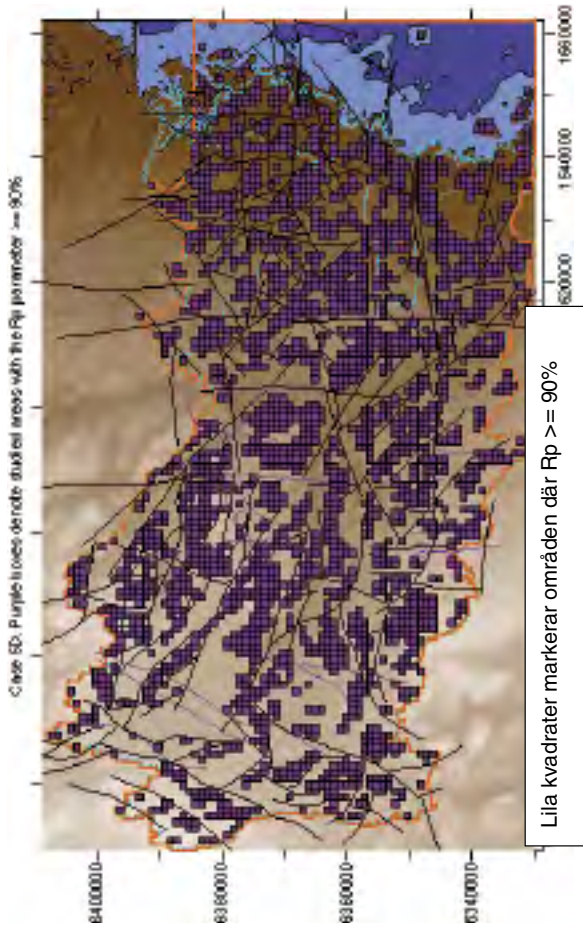
Rp (%). Grönt representerar områden med stor andel uppåtriktade flöden



Fall 5	Statistik för områden med Rp >= 90%				
	Percentile	Length[m]	BT-tim[e]a	sq[L/m2a]	Rp[%]
	1	1 409	265	0.04	92
	5	1 658	541	0.06	92
	10	1 797	776	0.09	92
	20	1 995	1 279	0.14	94
	30	2 159	1 804	0.19	97
	40	2 370	2 471	0.24	100
	50	2 626	3 331	0.31	100
	60	2 871	4 572	0.38	100
	70	3 174	6 909	0.50	100
	80	3 717	10 012	0.66	100
	90	4 533	21 457	1.02	100
	95	5 398	32 536	1.39	100
	99	7 673	3.08E+05	2.11	100
	Number of areas:		1 114		

Fall 5 är definerat som Referensfall

Figur 6-41. Rp-parameter för Fall 5. Analys av 6 000 förvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².

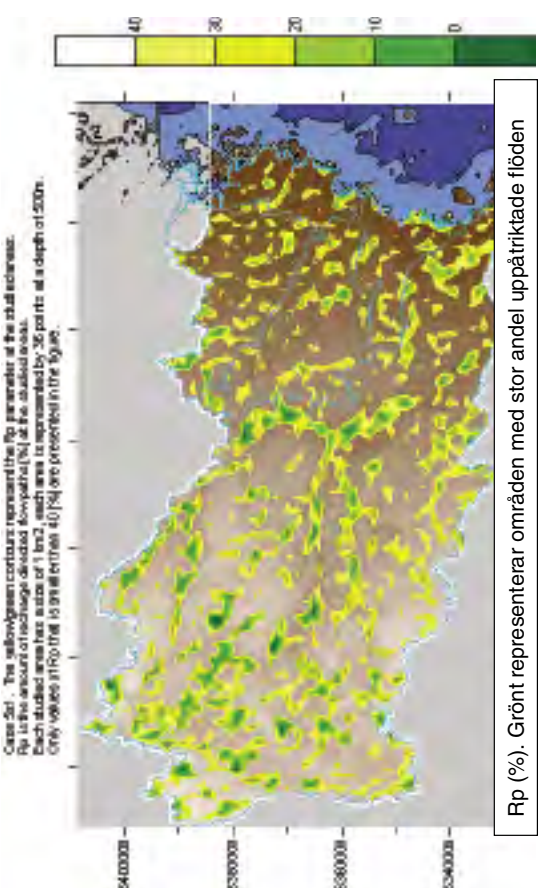
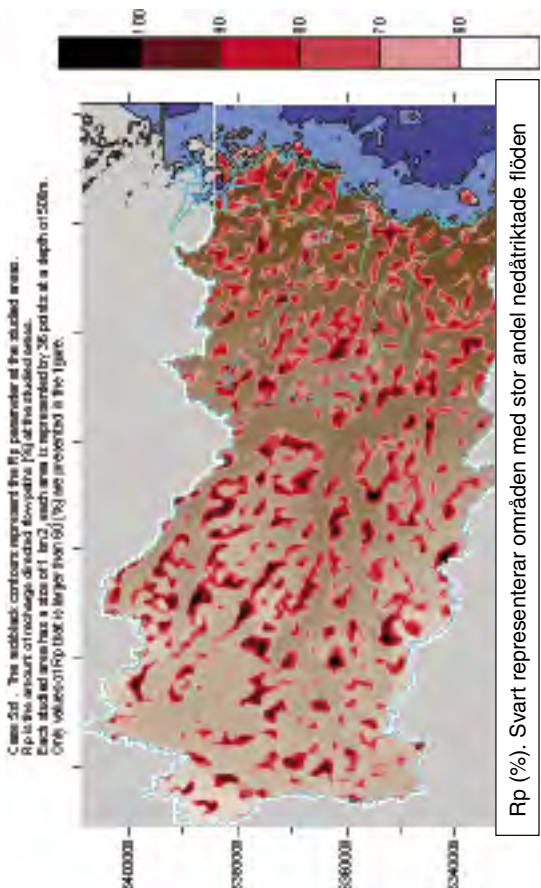
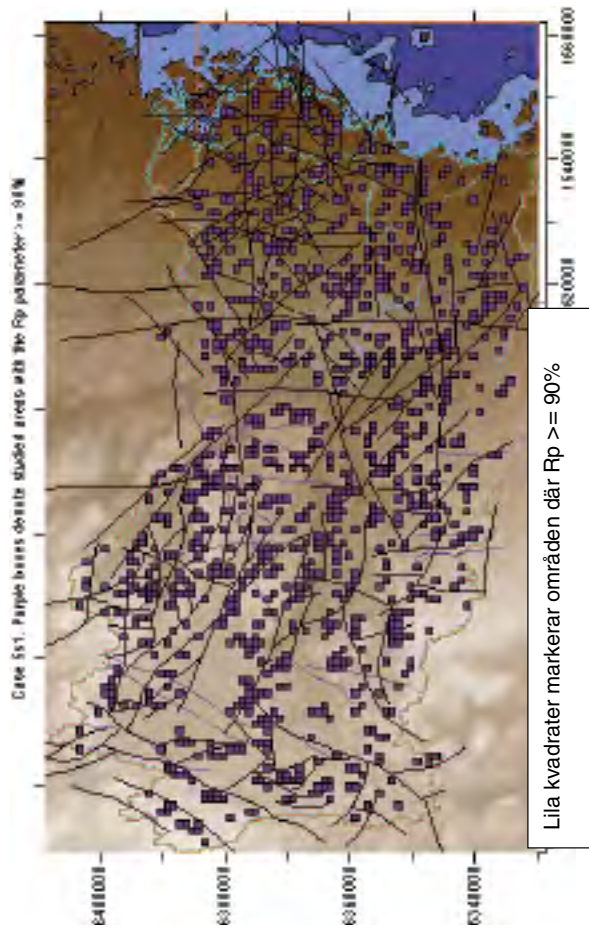


Case 5D. The yellow/green contours represent the Rp parameter at the studied areas. Rp is the Rp parameter for the studied area. Each studied area has a size of 1 km², and the Rp parameter is represented by 25 points at a depth of 50m. Only values of Rp that is larger than 60 (%) are presented in the figure.

Rp (%). Grönt representerar områden med stor andel uppåtriktade flöden

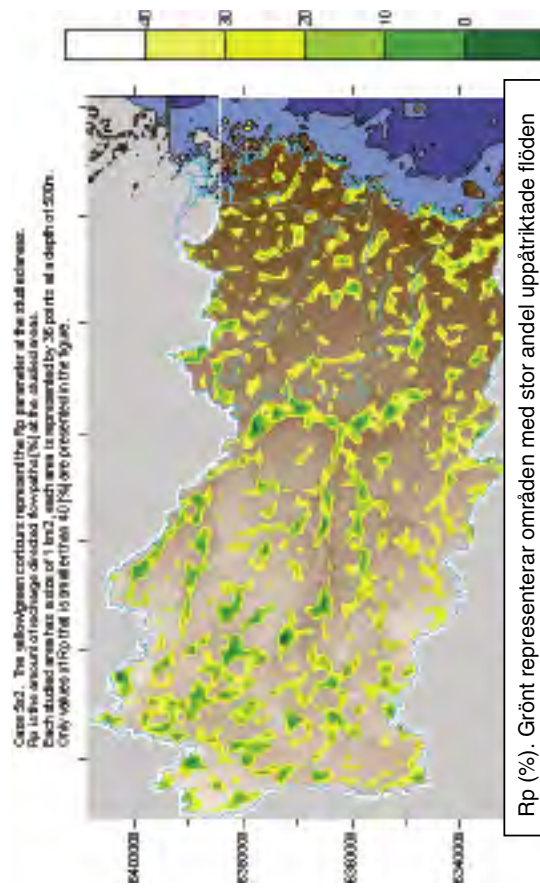
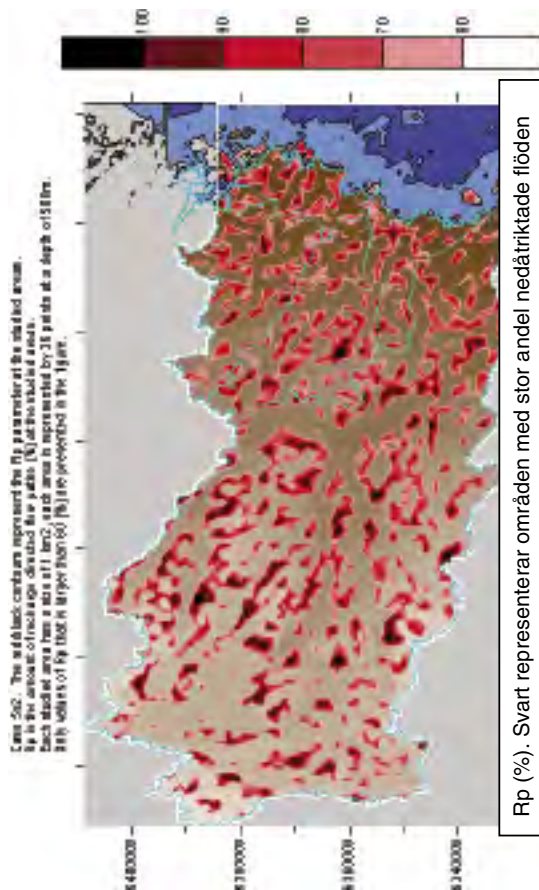
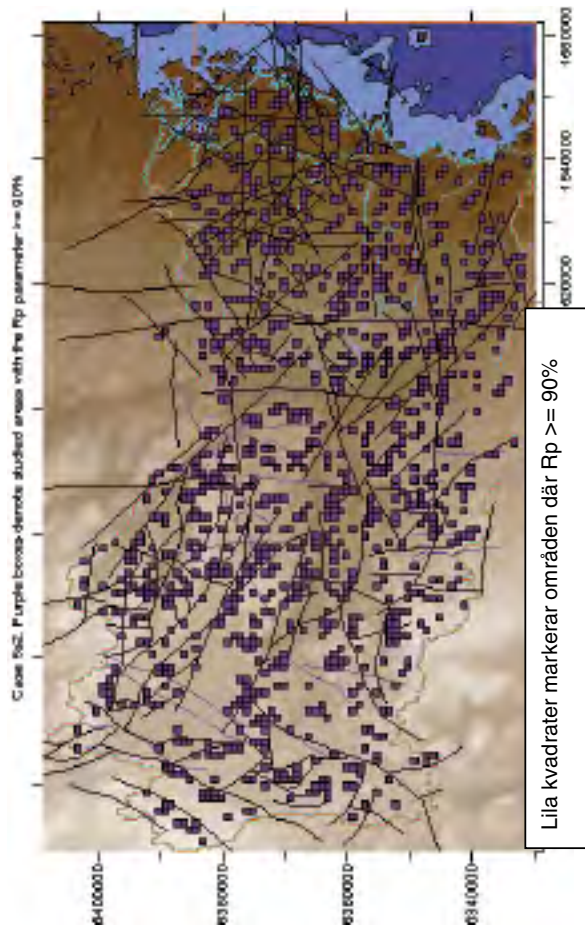
Fall 5D	Statistik för områden med $R_p \geq 90\%$			
	Medianvärden			
Percentil	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]
1	1 604	133	0.09	92
5	1 884	278	0.17	92
10	2 095	410	0.23	94
20	2 442	643	0.34	100
30	2 770	944	0.46	100
40	3 074	1 319	0.58	100
50	3 436	1 778	0.71	100
60	3 904	2 491	0.87	100
70	4 498	3 652	1.08	100
80	5 397	5 615	1.43	100
90	7 157	11 422	2.06	100
95	9 454	21 956	2.73	100
99	15 971	2.68E+05	4.31	100
Antal områden:				2 304

Figur 6-42. Rp-parameter för Fall 5D. Analys av 6 000 förvarområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Fall 5s1	Statistik för områden med Rp >= 90%			
	Medianvärden			
Percentil	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]
1	1 422	275	0.04	91
5	1 683	500	0.06	92
10	1 797	748	0.09	92
20	1 996	1 152	0.13	94
30	2 136	1 631	0.18	97
40	2 335	2 282	0.22	100
50	2 534	2 966	0.29	100
60	2 764	3 993	0.37	100
70	3 085	5 615	0.48	100
80	3 517	8 071	0.63	100
90	4 359	15 984	1.00	100
95	5 295	24 163	1.36	100
99	8 691	90 095	2.09	100
Antal områden:				995

Figur 6-43. Rp-parameter för Fall 5s1. Analys av 6 000 förvaransområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Fall 5s2					
Medianvärden					
Percentil	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]	
1	1 426	273	0.04	91	
5	1 659	510	0.07	92	
10	1 814	764	0.09	92	
20	1 997	1 181	0.14	94	
30	2 144	1 668	0.18	96	
40	2 311	2 319	0.23	100	
50	2 542	3 005	0.30	100	
60	2 749	4 035	0.37	100	
70	3 070	5 506	0.49	100	
80	3 527	8 246	0.65	100	
90	4 147	14 663	1.01	100	
95	5 058	23 448	1.36	100	
99	7 290	69 783	2.11	100	
Antal områden:					1 036

Figur 6-44. Rp-parameter för Fall 5s2. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².

6.6.5 Fall 5D – Sensitivitetsfall med generell anisotropi

Fall 5D är ett sensitivitetsfall baserat på Fall 5. Skillnaden mot Fall 5 är att anisotropa egenskaper har tilldelats genomsläppligheten i alla litologiska enheter, deformationszoner och diabasgångar. Anisotropin har definierats på följande vis:

- Den horisontala genomsläppligheten i Fall 5D är 5 gånger så stor som i Fall 5.
- Den vertikala genomsläppligheten i Fall 5D är 0,5 gånger så stor som i Fall 5.

Således är genomsläppligheten i horisontalled 10 gånger större än genomsläppligheten i vertikalled. Detta förhållande är detsamma som användes i Fall 2. I övrigt är Fall 5D identiskt med Fall 5.

En jämförelse mellan Fall 5, Fall 5D och Fall 2 presenteras i figur 6-45. De längsta flödesvägarna genereras av Fall 2 och de kortaste av Fall 5. Fall 5D ligger mellan Fall 2 och Fall 5. Införandet av anisotropi definierad som en ökad horisontal genomsläpplighet får inte lika stor effekt i en modell med djupavtagande genomsläpplighet (Fall 5D), som i en modell där genomsläppligheten är konstant med djupet (Fall 2). Detta framgår också av andelen storregionala flödesvägar (längre än 10 km) som presenteras i tabell 6-5. För Fall 2 är andelen 25 %, och för Fall 5D är andelen 3 %, vilket ligger närmare Fall 5 som har 0,5 % storregionala flödesvägar.

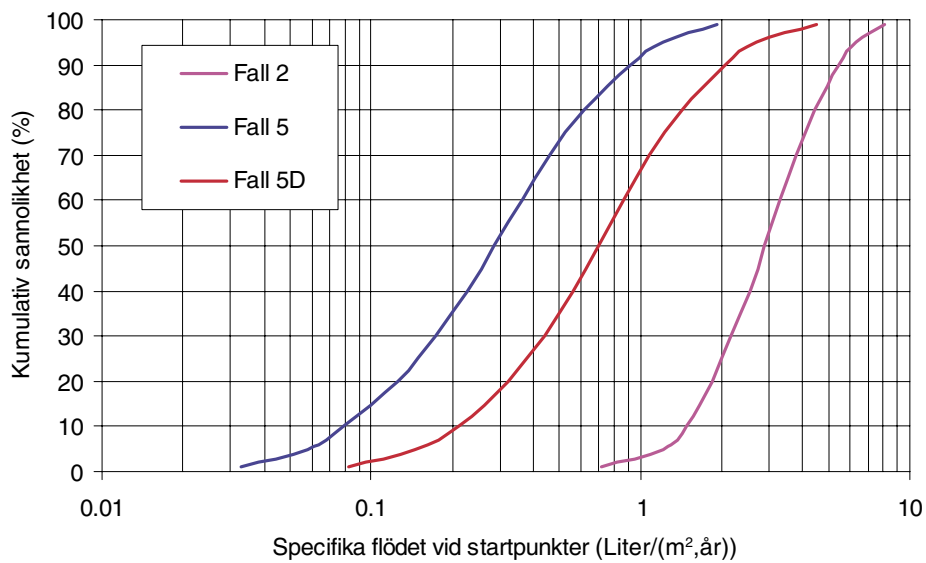
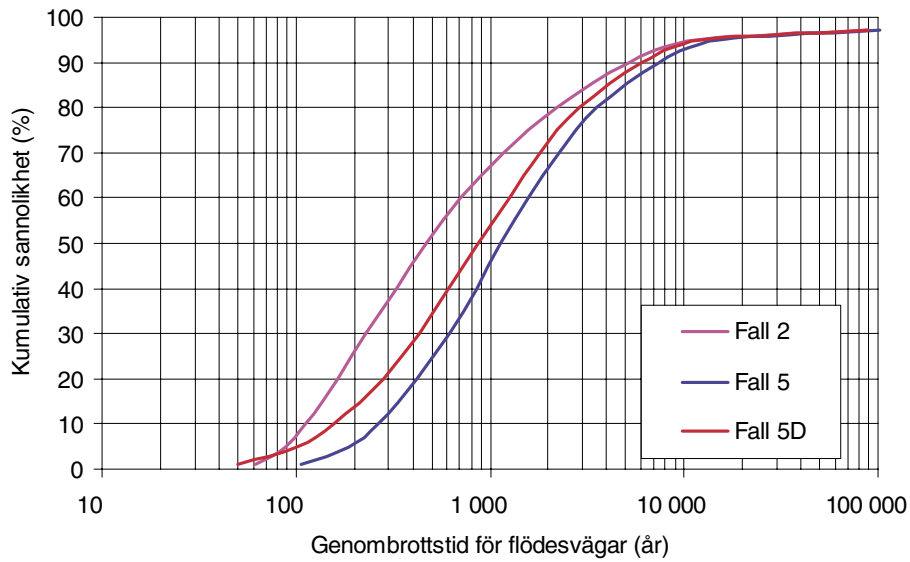
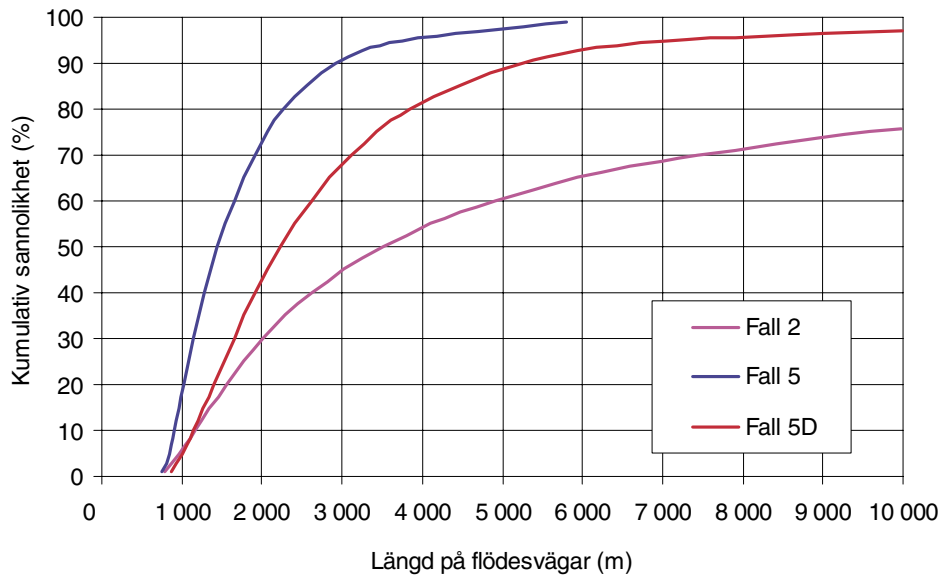
För Fall 5D presenteras den areabaserade analysen av flödesvägar från förvarsområden i figur 6-42. Resultat för Rp-parametern presenteras i figur 6-42.

Fall 5D uppvisar samma allmänna flödesmönster som Fall 5. Grundvattnets flödesceller är i huvudsak lokala. Andelen storregionala flödesvägar är liten.

Tabell 6-5. Fall 1, Fall 2, Fall 5 och Fall 5D. Andel långa flödesvägar.

Längd	Antal flödesvägar i procent av alla flödesvägar *			
	Fall 1	Fall 2	Fall 5	Fall 5D
>= 2 000 m	34	71	31	58
>= 5 000 m	15	40	4,7	14
>= 8 000 m	8	29	1,2	5
>= 10 000 m	5,3	25	0,6	3

* Eftersom varje flödesväg representerar en viss area av det studerade modellområdet representerar procentsatserna i tabellen också andelar av modellområdets area.



Figur 6-45. Fall 2, 5 och 5D. Jämförelse av flödesvägars egenskaper. Medianvärden för förvarsområden av storlek 1 km².

6.6.6 Fall 5B och 5C – Sensitivitetsfall med olika värden på diabasgångarnas lågpermeabla kärna

Diabasgångarnas egenskaper presenteras i avsnitt 4.7. Gångarna har stor genomsläpplighet i längsled och liten genomsläpplighet tvärs gångarna. Grundvatten kan alltså lätt strömma längs med en diabasgång, men endast med svårighet strömma tvärs genom en diabasgång.

Fall 5B och 5C är sensitivitetsfall baserat på Fall 5. Skillnaden mot Fall 5 är att diabasgångarnas genomsläpplighet tvärs gångarna har reducerats i Fall 5B och Fall 5C

- För Fall 5 är K-värdet tvärs gångarna 0,01 gånger K-värdet längs med gången.
- För Fall 5B är K-värdet tvärs gångarna 0,001 gånger K-värdet längs med gången.
- För Fall 5C är K-värdet tvärs gångarna 0,0001 gånger K-värdet längs med gången.

Resultatet av analysen av flödesvägar visar inte på några märkbara skillnader mellan de tre studerade fallen. Orsaken till detta är diabasgångarnas stora genomsläpplighet längs med gångarna. Grundvatten strömmar inte gärna tvärs över diabasgångarna i Fall 5, och det gör det heller inte när diabasgångarna görs ännu mindre genomsläppliga för flöde tvärs över gångarna. Grundvatten som når fram till en diabasgång tenderar att strömma längs med gången, där genomsläppligheten är stor, istället för tvärs över gången där genomsläppligheten är liten.

Följande slutsats erhålls genom att jämföra de ovan diskuterade fallen:

I den upprättade modellen, där diabasgångarna har hög genomsläpplighet längs med gången och liten genomsläpplighet tvärs gången, fungerar diabasgångarna som genomsläppliga strukturer som leder grundvattenflödet längs med gångarna. Att gångarna har låg genomsläpplighet för flödet tvärs över gången har ingen större betydelse.

6.6.7 Fall 5F, 5G och 5H – Sensitivitetsfall med och utan deformationszoner och diabasgångar, eller med ökade K-värden i zonerna

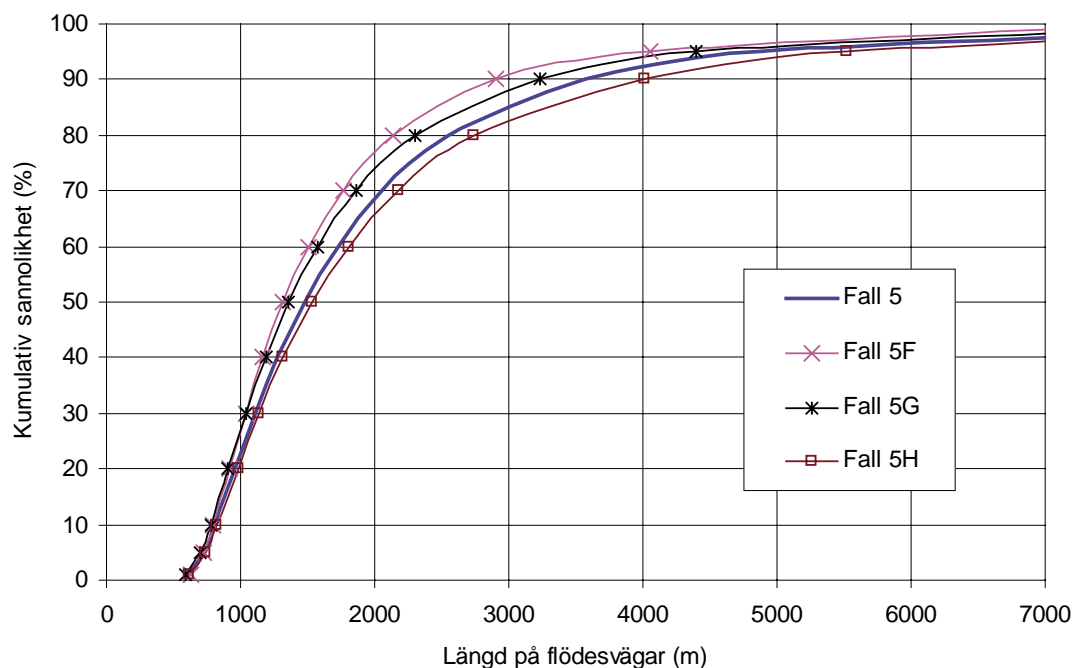
Fall 5F, 5G och 5H är sensitivitetsfall baserade på Fall 5. Syftet med fallen är att studera betydelsen av deformationszoner och diabasgångar.

- Fall 5 är referensfallet och inkluderar både deformationszoner och diabasgångar.
- Fall 5F är identiskt med Fall 5 förutom både deformationszoner och diabasgångar är borttagna.
- Fall 5G är identiskt med Fall 5 förutom att diabasgångar är borttagna.
- Fall 5H är identiskt med Fall 5 förutom att K-värdena i deformationszonerna är 10 gånger större än i Fall 5.

En jämförelse av flödesvägarnas längder ges i figur 6-46. Figuren visar att de längsta flödesvägarna erhålls för Fall 5 och Fall 5H, skillnaden mellan dessa två fall är liten. De kortaste flödesvägarna produceras av Fall 5F. Fall 5G faller mellan Fall 5 och Fall 5F.

Som nämnts ovan så fås de kortaste flödesvägarna för Fall 5F, orsaken till detta är att grundvatten, som i Fall 5 strömmade en lång väg via deformationszoner och diabasgångar, tvingas till en kortare flödesväg när inte deformationszoner och diabasgångar är med i modellen. Deformationszoner och diabasgångar erbjuder grundvattenflödet en längre väg, men en väg med mindre resistans eftersom genomsläppligheten är stor i dessa strukturer.

Length of flow paths considering different sensitivity cases.



Figur 6-46. Fall 5, 5F, 5G och 5H. Flödesvägarnas längd.

Skillnaderna mellan de fyra studerade fallen får dock anses vara ringa. En orsak till detta är att större deformationszoner ofta förekommer längs med topografiskt betingade dalgångar. I modellen är dalgångarna utströmningsområden vare sig deformationszonerna är med i modellen eller inte. Därför förändras inte flödesmönstret dramatiskt när zonerna inkluderas eller exkluderas.

Följande slutsats erhålls genom att jämföra de ovan diskuterade fallen:

Lokalt har deformationszoner och diabasgångar stor betydelse för grundvattnets flödesmönster, men i ett storregionalt perspektiv är de inte särskilt betydelsefulla (för det studerade modellområdet). Andra systemegenskaper är av större betydelse för det regionala flödesmönstret, såsom topografien.

6.6.8 Fall 5J – Sensitivitetsfall där grundvattenytan är utjämnad i förhållande till topografien

Modellens randvillkor på dess övre yta diskuteras i avsnitt 4.3.4. I modellen antas det att grundvattenytans position kan approximeras till markytans topografi (med undantag för områden med glacifluviala sediment och under havet).

Det är dock troligt att grundvattenytan i inströmningsområden ligger någon meter under markytans nivå, vi har därför upprättat Fall 5J, som består av Fall 5J1 och Fall 5J2. Dessa två sensitivitetsfall har upprättats för att demonstrerar betydelsen av att grundvattenytan i inströmningsområden är belägen någon meter under markytans nivå.

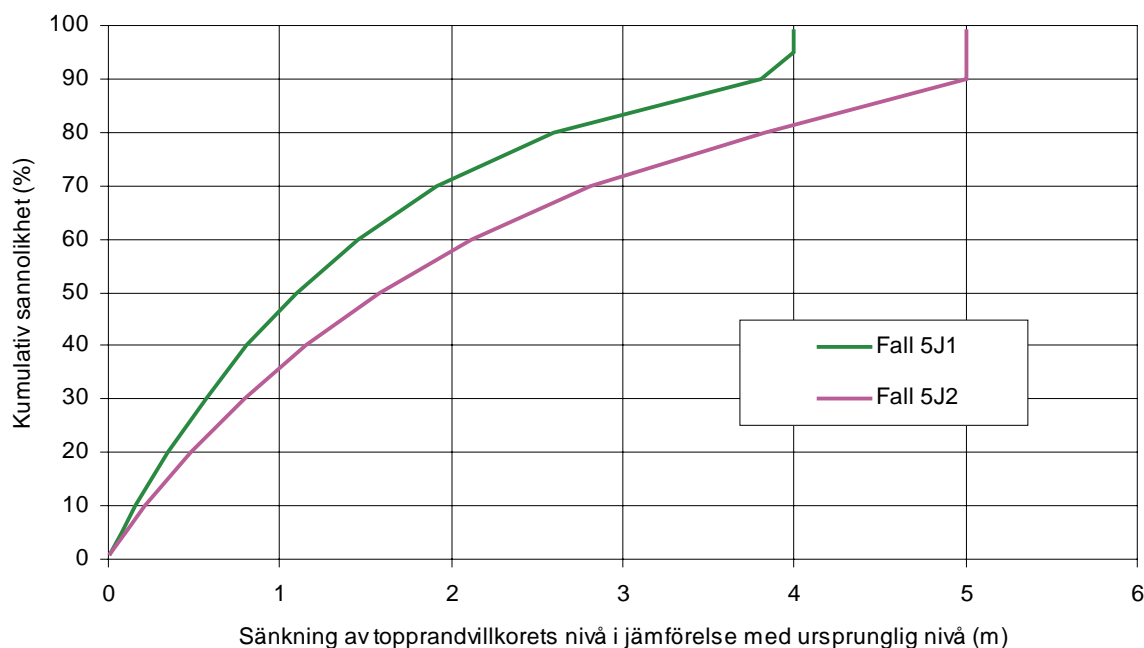
När grundvattenytans nivå uppskattades för Fall 5J1 och Fall 5J2 så utgick vi från de nivåer som har använts för de övriga fallen, två olika metoder användes:

- Metod 1. Lokala maxima i topprandvillkorets nivå identifierades (topografin). Utgående från dessa maxima sänktes och utjämnades sedan nivåerna stegvis runt dessa områden. Den maximala sänkningen definierades till 4 m (Fall 5J1) eller 5 m (Fall 5J2). Vid topografiska minima och längs med dalgångar förändrades inte nivåerna.
- Metod 2. Denna metod är identisk med Metod 1 förutom att nivåerna dessutom inte förändrades i de områden (celler) som i flödeslösningen för Fall 5 identifierades som utströmningsområden.

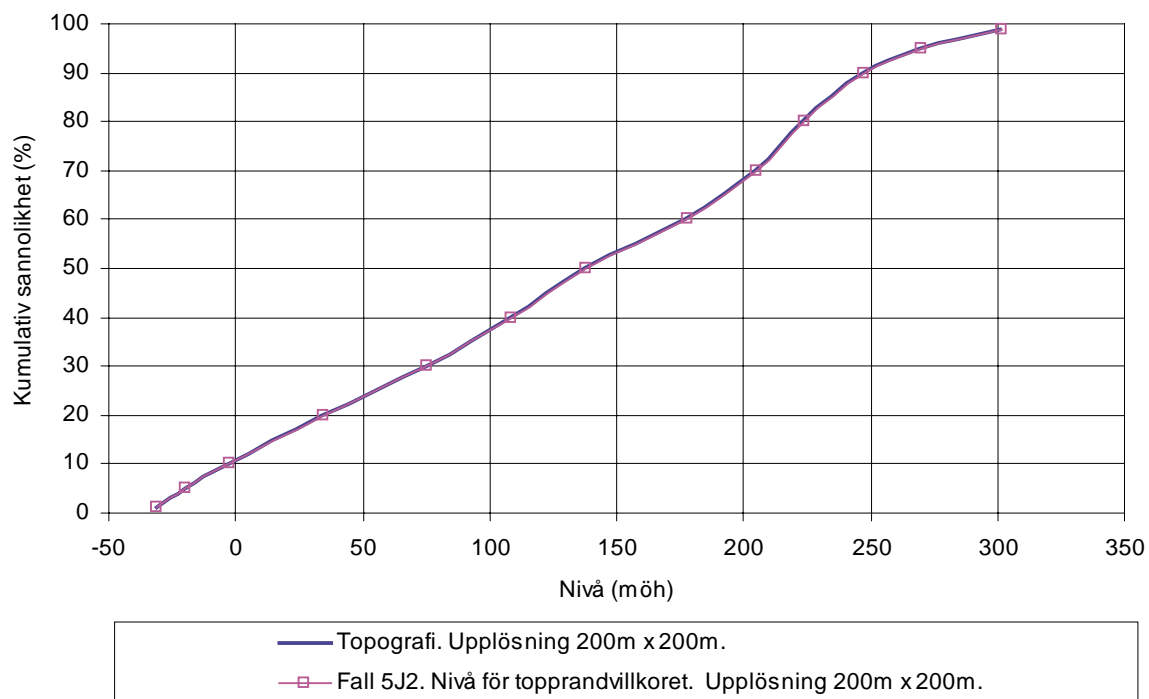
Båda metoderna ger i princip samma svar, eftersom lokala minima och dalgångar ofta är utströmningsområden och därför är det i princip samma områden som påverkas (och inte påverkas) i bägge metoderna. När metod 1 används påverkas ca 31 % av arean (vid markytan), när metod 2 används påverkas ungefär 30 % av arean. Storlek på sänkningen av den topografiska nivån framgår av figur 6-47. Denna avsänkning kan tolkas som ett uppskattat (ej beräknat) djup till grundvattenytan i inströmningsområden.

Metod 2 valdes för att erhålla nivåer för Fall 5J1 och Fall 5J2. Förändringen i topprandvillkorets nivå, i jämförelse med de nivåer som använts i övriga fall, presenteras i figur 6-49.

Den kumulativa fördelningen av topografins absoluta nivåer (i en upplösning av 200×200 m) presenteras i figur 6-48. I samma figur presenteras också topprandvillkorets nivå för Fall 5J2. Av figuren framgår det att när de absoluta nivåerna jämförs är skillnaden mellan topografins nivå och topprandvillkorets nivå mycket liten. Vid medianen är topografins nivå 137,7 m över havet, randvillkorets nivå i Fall 5J2 ligger vid medianen på 136,8 m över havet. Förutom de förändrade nivåerna för topprandvillkoret är Fall 5J1 och Fall 5J2 identiska med Fall 5.



Figur 6-47. Fall 5J. Förändring i topprandvillkorets nivå (topografi) för att erhålla en uppskattad nivå för grundvattenytan. Den maximalt tillåtna sänkningen i nivå är satt till 4 m (Fall 5J1) eller 5 m (Fall 5J2). Kurvorna ovan avser endast areor vid vilka en förändring har ägt rum. 30 % av arean vid markytan påverkas



Figur 6-48. Kumulativ fördelning av topografins nivå och nivån för topprandvillkoret i Fall 5J2.

Flödesvägar beräknades för Fall 5J1 och Fall 5J2 på samma sätt som för Fall 5. Längderna på flödesvägarna i Fall 5J1 och Fall 5J2 och längderna för flödesvägarna i Fall 5 presenteras i figur 6-50. En jämförelse mellan (i) Fall 5 och (ii) Fall 5J1 och Fall 5J2 demonstrerar skillnader i flödesvägarnas längder som är mindre än 1 %. Se tabell 6-6.

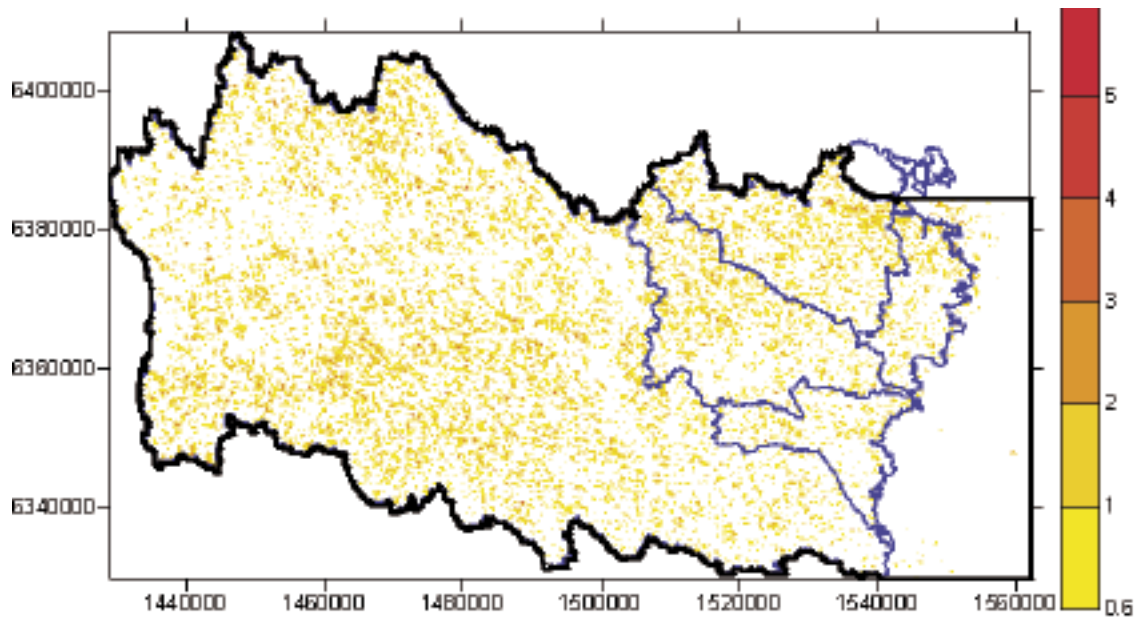
Tabell 6-6. Fall 5J. Skillnad i längd för flödesvägar mellan Fall 5J1 och Fall 5.

Skillnad i längd för flödesvägar. Fall 5J1 och Fall 5													
Percentil av längder	1	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	99
Fall 5J1	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,0	0,2
Skillnad (*) (%)													

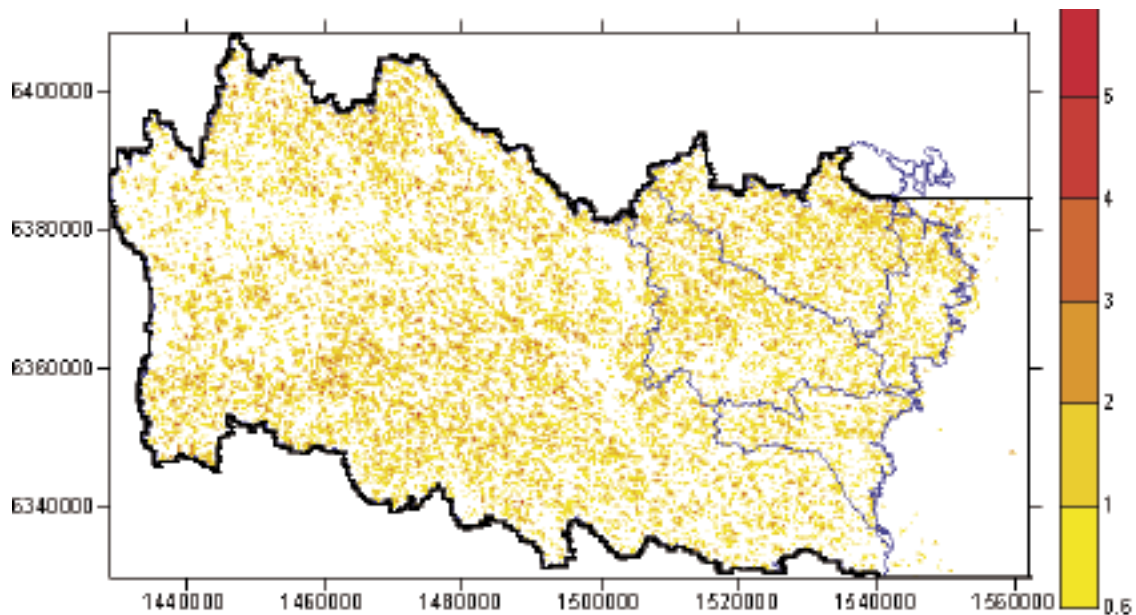
(*) Skillnad (%) = $100 \left[\frac{(\text{Fall5J1}-\text{Fall5})}{(\text{Fall5J1}+\text{Fall5})} \right]$

Skillnad i längd för flödesvägar. Fall 5J2 och Fall 5													
Percentil av längder	1	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	99
Fall 5J2	-0,3	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2
Skillnad (*) (%)													

(*) Skillnad (%) = $100 \left[\frac{(\text{Fall5J2}-\text{Fall5})}{(\text{Fall5J2}+\text{Fall5})} \right]$



(i) Fall 5J1

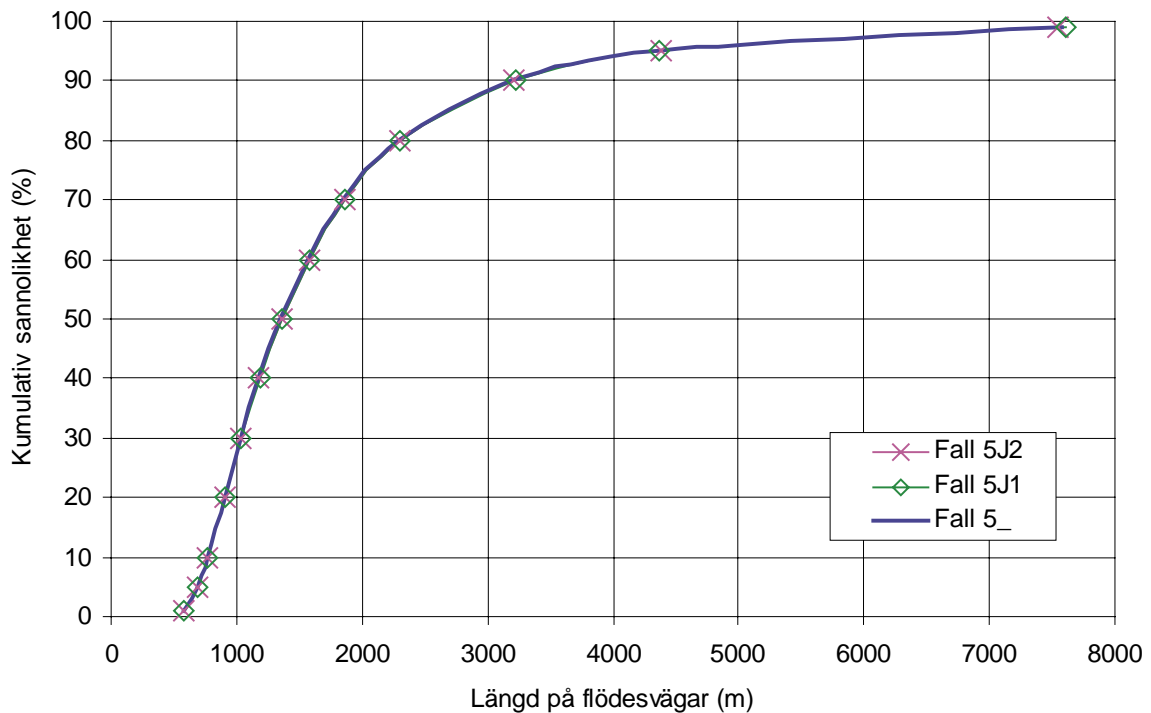


(ii) Fall 5J2

Figur 6-49. Fall 5J1 och Fall 5J2. Förändring i topprandvillkorets nivå (sänkning) för att erhålla en lägre nivå för grundvattenytan i inströmningsområden. Figuren är baserad på en upplösning av 333×333 m.

Flödesvägarna i Fall 5J1 och Fall 5J2 är något litet längre än i Fall 5. Detta kan förklaras med att den lokala undulationen i topprandvillkorets nivå har minskats något i Fall 5J1 och Fall 5J2, men inte så mycket att den lokala undulationen har upphört att vara den mest betydelsefulla systemegenskapen. Följande slutsats fås genom att jämföra Fall 5J1, Fall 5J2 och Fall 5. För det studerade modellområdet har en förändring (sänkning) av grundvattennivåerna i inströmningsområden på någon enstaka meter (upp till 5 m) endast en ringa betydelse för längderna på flödesvägarna från förvarsdjup. De två sensitivitetfallen demonstrerar dessutom att det randvillkor på modellens övre yta som har använts i Fall 5, och i de övriga fallen, är ett rimligt randvillkor.

Length of flow paths considering different sensitivity cases.



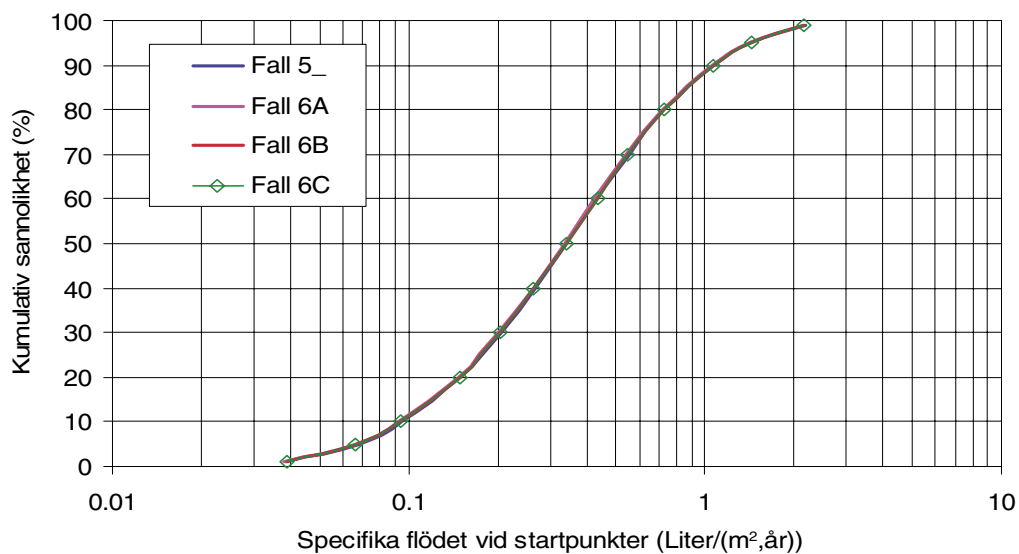
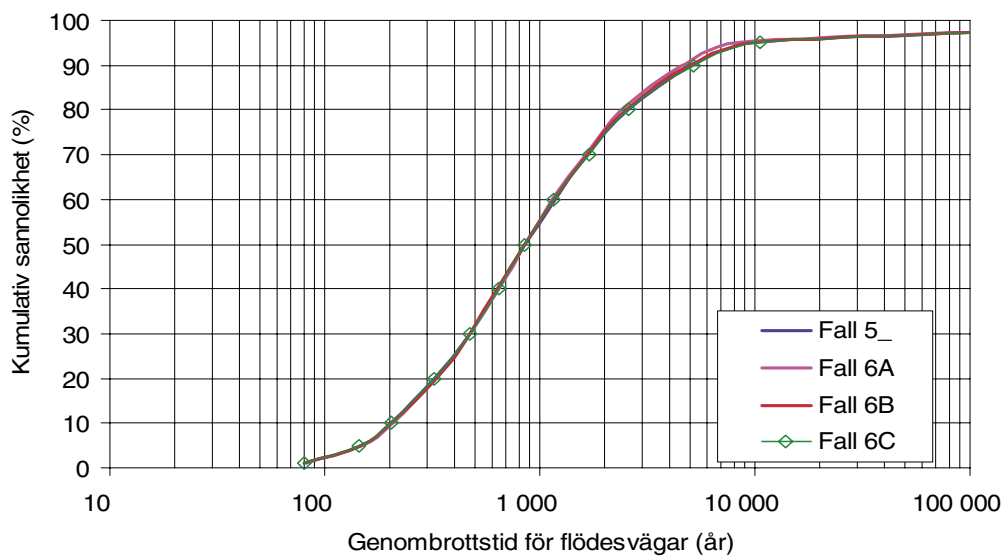
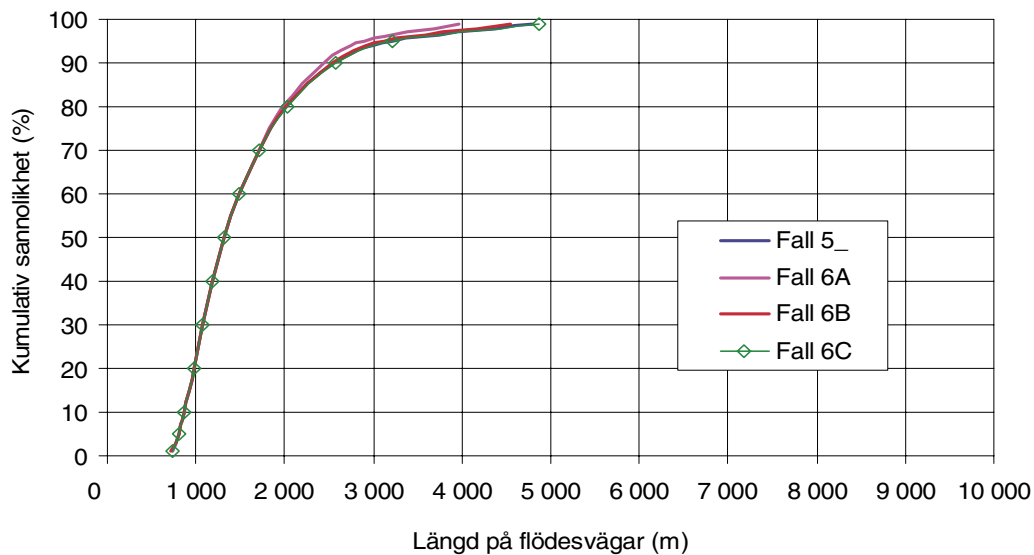
Figur 6-50. Fall 5J1, Fall 5J2 och Fall 5. Flödesvägarnas längd. De tre kurvorna plottade i figuren representerar nästan exakt samma värden. Skillnaderna presenteras i tabellen nedan.

6.7 Fall 6A, 6B och 6C – Modeller med olika basnivåer

Som tidigare diskuterats i avsnitt 4.3.3 är modellens basnivå definierad till $-2\,500$ m över havet, denna basnivå gäller för alla beräkningsfall förutom för tre fall som diskuteras i detta avsnitt. De tre fallen presenteras nedan:

- Fall 6A. Detta beräkningsfall är identiskt med referensfallet förutom att basnivån är satt till $-1\,100$ m över havet. (Stationär lösning. Inga densitetseffekter.)
- Fall 6B. Detta beräkningsfall är identiskt med referensfallet förutom att basnivån är satt till $-1\,800$ m över havet. (Stationär lösning. Inga densitetseffekter.)
- Fall 6C. Detta beräkningsfall är identiskt med referensfallet förutom att basnivån är satt till $-3\,300$ m över havet. (Stationär lösning. Inga densitetseffekter.)

Flödesvägar beräknades för Fall 6A, 6B och 6C på samma sätt som för Fall 5. En jämförelse mellan de dessa fyra fall presenteras i figur 6-51 med avseende på förvarsområden av storlek 1 km^2 . Jämförelsen i figur 6-51 visar på mycket små skillnader mellan de olika fallen. För att tydliggöra skillnaderna mellan de olika fallen har skillnaderna beräknats i procent och presenteras i tre tabeller nedan (tabell 6-7, tabell 6-12 och tabell 6-14). Av tabellerna framgår att skillnaderna är små mellan de olika fallen under den 99 percentilen. Emellertid är det för de långa flödesvägarna och för flödesvägar med långa genombrotstider som skillnaderna är störst, därför kan det vara av intresse att jämföra andelen storregional flödesvägar (längre än 10 km). En sådan jämförelse presenteras i tabell 6-7.



Figur 6-51. Fall 6A, 6B, 5 och 6C. Jämförelse av flödesvägars egenskaper. Medianvärden för förvarsområden av storlek 1 km². (Modeller med olika basnivå.)

Tabell 6-7. Fall 6A, Fall 6B, Fall 5 och Fall 6C. Andel långa flödesvägar från 500 m djup.

Längd	Antal flödesvägar i procent av alla flödesvägar *			
	Fall 6A Bas: -1 100 m.ö.h.	Fall 6B Bas: -1 800 m.ö.h.	Fall 5 Bas: -2 500 m.ö.h.	Fall 6C Bas: -3 300 m.ö.h.
>= 10 000 m	0,13	0,34	0,59	0,92

* Eftersom varje flödesväg representerar en viss area av det studerade modellområdet representerar procentsatserna i tabellen också andelar av modellområdets area.

Tabellen ovan demonstrerar att andelen storregionala flödesvägar ökar då modellens basnivå definieras på allt lägre nivåer. Skillnaden skall dock inte tolkas som att det storregionala flödesmönstret radikalt förändras då modellens basnivå förändras från t ex -2 500 m över havet till -3 300 m över havet; för mer än 99 % av flödesmönstret är nämligen förändringarna minimal (se tabell 6-10 och figur 6-51).

En annan intressant frågeställning är om de långa flödesvägarna kommer från samma områden även då modellens basnivå varierar. Vi har testat detta genom att markera försvarsområden med medianlängder större än 4 000 m för fyra olika fall med olika basnivå, Fall 6A, 6B, 5 och 6C. Resultatet visas i figur 6-52, figur 6-53, figur 6-54 och figur 6-55. Av dessa figurer framgår att antalet försvarsområden med långa flödesvägar ökar då modellens basnivå sänks, men det är från ungefärligen samma areor (områden) som de långa flödesvägarna kommer, oavsett vilken basnivå som används.

Tabell 6-8. Fall 6A och Fall 5. Jämförelse av flödesvägar från djupet 500 m, skillnad i procent.

Jämförelse mellan Fall 6A (basnivå -1 100 m) och Fall 5 (basnivå -2 500 m). Försvarsområden av storlek 1 km ²			
Percentil	Skillnad i längd i %	Skillnad i genombrottsid i %	Skillnad i specifika flödet vid startpunkterna i %
1	0,4	2,5	-1,3
5	0,1	1,1	-2,3
10	0,4	1,8	-3,3
50	0,3	-1,2	-1,2
60	0,3	-3,0	-1,8
70	-0,6	-3,1	-1,7
80	-2,0	-6,0	-1,0
90	-4,5	-10,4	-1,4
95	-10,3	-15,9	-1,6
99	-18,8		-0,5

Skillnaden beräknas som: $100 * [(Fall6A - Fall5) / ((Fall6A + Fall5) / 2)]$

Tabell 6-9. Fall 6B och Fall 5. Jämförelse av flödesvägar från djupet 500 m, skillnad i procent.

Jämförelse mellan Fall 6B (basnivå –1 800 m) och Fall 5 (basnivå –2 500 m).
Förvarssområden av storlek 1 km²

Percentil	Skillnad i längd i %	Skillnad i genombrottsid i %	Skillnad i specifika flödet vid startpunkterna i %
1	-1,2	0,0	0,6
5	-0,3	-0,2	-2,9
10	0,5	0,0	-1,4
50	0,2	0,0	0,3
60	0,5	-1,0	0,8
70	-0,1	-0,8	-0,9
80	-0,1	-1,2	-0,4
90	-0,1	-3,9	-0,5
95	-2,9	2,0	-0,9
99	-4,9		-0,6

Skillnaden beräknas som: $100 * [(Fall6B - Fall5) / ((Fall6B + Fall5) / 2)]$

Tabell 6-10. Fall 6C och Fall 5. Jämförelse av flödesvägar från djupet 500 m, skillnad i procent.

Jämförelse mellan Fall 6C (basnivå –3 300 m) och Fall 5 (basnivå –2 500 m).
Förvarssområden av storlek 1 km²

Percentil	Skillnad i längd i %	Skillnad i genombrottsid i %	Skillnad i specifika flödet vid startpunkterna i %
1	-0,8	0,0	1,1
5	-0,3	-0,7	-2,1
10	0,5	-0,2	-1,9
50	0,1	0,4	0,4
60	0,7	-0,5	1,0
70	0,1	0,8	-0,8
80	0,6	0,5	-0,2
90	0,8	1,2	-0,6
95	-0,2	5,9	-0,8
99	1,6		-0,5

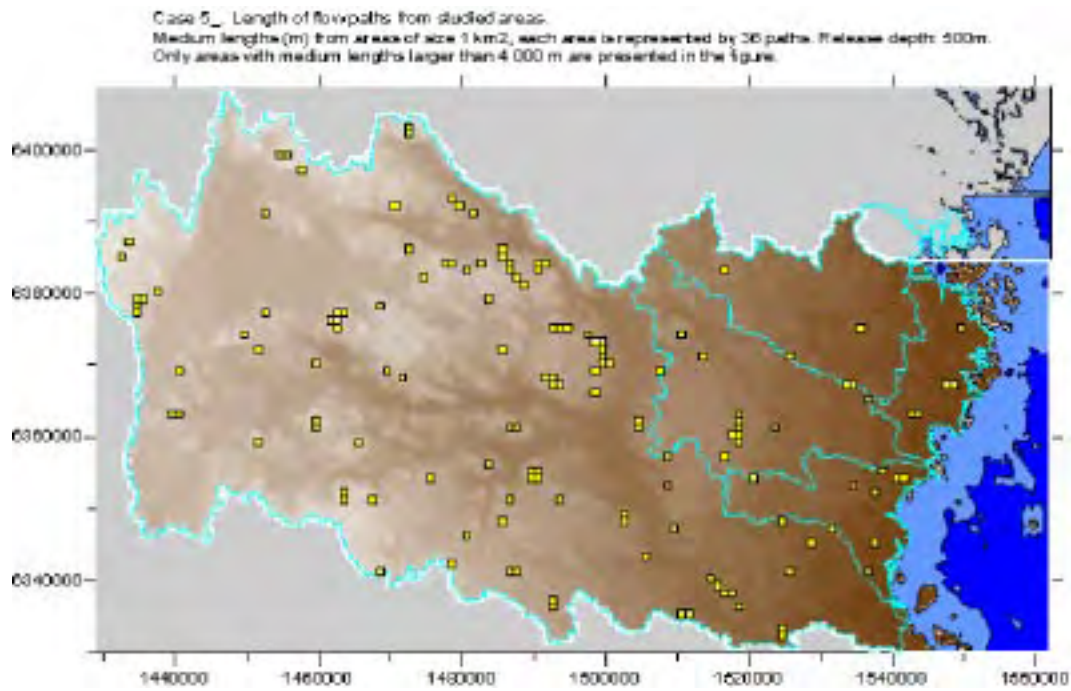
Skillnaden beräknas som: $100 * [(Fall6C - Fall5) / ((Fall6C + Fall5) / 2)]$



Figur 6-52. Fall 6A. Modell med basnivån vid -1 100 m över havet. Gula rutor markerar försvarsområden (storlek 1 km²) med medianlängd på flödesvägarna som är större än 4 000 m.



Figur 6-53. Fall 6B. Modell med basnivån vid -1 800 m över havet. Gula rutor markerar försvarsområden (storlek 1 km²) med medianlängd på flödesvägarna som är större än 4 000 m.



Figur 6-54. Fall 5. Modell med basnivån vid $-2\ 500\text{ m}$ över havet. Gula rutor markerar försvarsområden (storlek 1 km^2) med medianlängd på flödesvägarna som är större än $4\ 000\text{ m}$.



Figur 6-55. Fall 6C. Modell med basnivån vid $-3\ 300\text{ m}$ över havet. Gula rutor markerar försvarsområden (storlek 1 km^2) med medianlängd på flödesvägarna som är större än $4\ 000\text{ m}$.

6.8 Fall 7A, 7B och 7Bs2 – Horisontala deformationszoner

I denna studie ingår tre fall med horisontala deformationszoner. Metodiken för hur dessa deformationszoner har genererats och inkluderats i de upprättade fallen diskuteras i avsnitt 4.8.

Fall 7A och 7B representerar två olika realiseringar av horisontala deformationszoner, dessa deformationszoner är så stora att de kan kallas för regionala deformationszoner.

Fall 7A och 7B är identiska med Fall 5, förutom den de horisontala deformationszonerna. Fall 7Bs2 är identiskt med Fall 7B, förutom att densitetsberoende flöde är inkluderat med initialvillkor s2 (se avsnitt 4.3.5).

Fall 7A, 7B och 7Bs2 visar på flödesvägar i en komplex modell med horisontala deformationszoner. En jämförelse av dessa fall mot Fall 5 visar på betydelsen av horisontala deformationszoner.

En jämförelse av flödeslängder från förvarsområden för Fall 7A och Fall 7B presenteras i figur 6-56. Det framgår tydligt av figurerna att statistiskt sett är skillnaderna mellan Fall 7A och 7B mycket små. Lokalt där de horisontala zonerna förekommer (eller inte förekommer) är skillnaderna stora, men när hela modellområdet studeras så blir statistiken nästan identisk.

En jämförelse mellan (i) fallen med horisontala zoner (7A och 7B) och (ii) Fall 5 demonstrerar det följande (se figur 6-56 och tabell 6-11), avseende median värden för flödesvägar från förvarsområden.

- Längder: För Fall 7A är längderna ca 1–20 % längre.
- Genombrotts tid: För Fall 7A är tiderna ca 6 % kortare till 18 % längre.
- Specifika flödet vid startpunkterna: För Fall 7A är flödet från ca 6 % mindre till 40 % större. Ännu större skillnader förekommer över den 99 percentilen. De största värdena på specifika flöden produceras av förvarsområden som är placerade i direkt anslutning till en horisontal zon. Anledningen till att flödet i modellen, på vissa positioner, kan minska är att den hydrauliska gradienten kan minska i anslutning till zonerna. Anledningen till att flödena huvudsakligen ökar är naturligtvis att zonerna ökar modellens genomsläpplighet.

En jämförelse mellan Fall 7B och 7Bs2 visar på betydelsen av densitetsberoende flöde då horisontala zoner är inkluderade i modellen. Figur 6-56 visar på små skillnader mellan Fall 7B och 7Bs2. Detta stämmer med de slutsatser som presenterats i avsnitt 6.6.4.

Samtidigt noterar vi att andelen riktigt långa genombrotts tider är noterbart mindre i simuleringarna med densitetsberoende flöde och komplexa fall, se figur 6-34, figur 6-56 och figur 6-62.

Andelen långa flödesvägar visas i tabell 6-12. De presenterade fallen är 7A, 7B, 7Bs2 samt Fall 5 och 5D. Fall 5D är inkluderad därför att detta fall är definierat med en ökad horisontal genomsläpplighet och en jämförelse med fallen som inkluderar horisontala zoner är av visst intresse. Tabellen visar att andelen långa flödesvägar är ungefär densamma, förutom för Fall 5D som har en större andel långa flödesvägar. Av detta kan vi sluta oss till att de inkluderade horisontala zonerna inte är tillräckligt hydrauliskt betydelsefulla för att förändra flödesmönstret i en storregional skala. Större effekt erhålls om genomsläppligheten överallt ökas i det horisontal planet genom en viss anisotropi, som i Fall 5D.

En areabaserad analys av flödesvägar från förvarsområden har också utförts (se avsnitt 3.8).

- För Fall 7A presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-57.
- För Fall 7B presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-58.

Vi har beräknat Rp-värden (se avsnitt 3.9) för de studerade förvarsområdena, resultaten presenteras i följande figurer:

- För Fall 7A i figur 6-59.
- För Fall 7B i figur 6-60.

Följande slutsatser erhålles: Fall 7A och 7B och 7Bs2 uppvisar samma allmänna flödesmönster som Fall 5. Grundvattnets flödesceller är i huvudsak lokala. Andelen storregionala flödesvägar är mycket liten. De inkluderade horisontala zonerna är inte tillräckligt hydrauliskt betydelsefulla för att förändra flödesmönstret i en storregional skala.

Tabell 6-11. Fall 7A och Fall 5. Jämförelse av flödesvägar från djupet 500 m, skillnad i procent.

Jämförelse mellan Fall 7A (med horisontala zoner) och Fall 5 (utan horisontala zoner).
Förvarsområden av storlek 1 km²

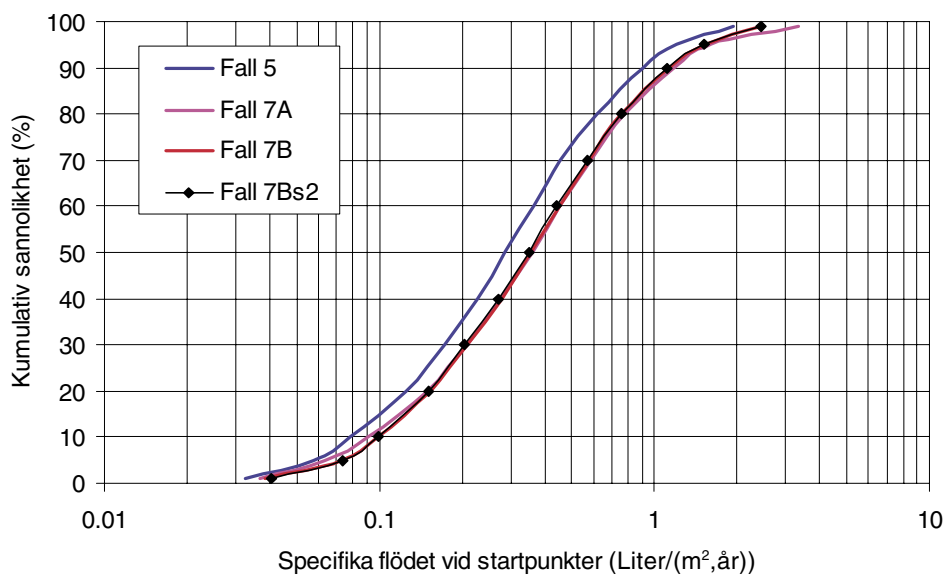
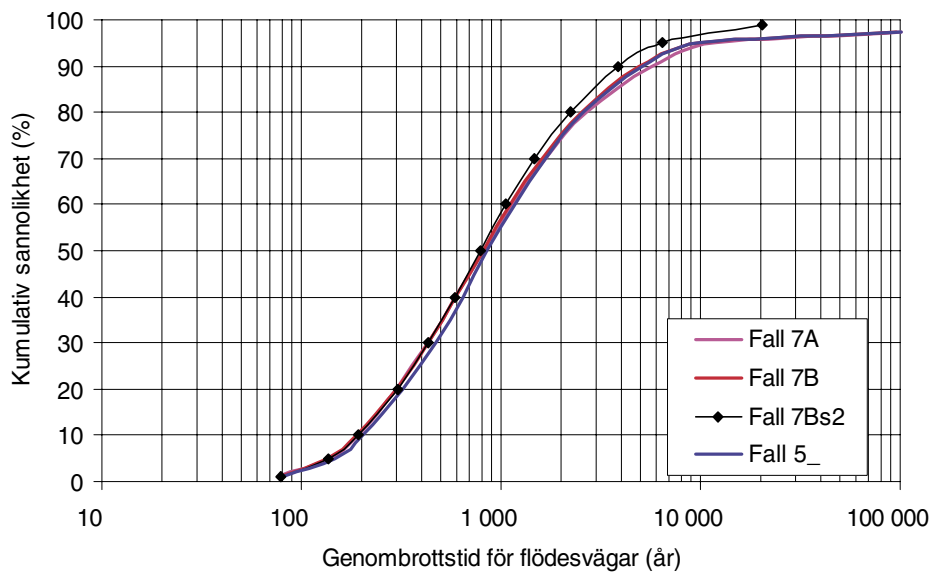
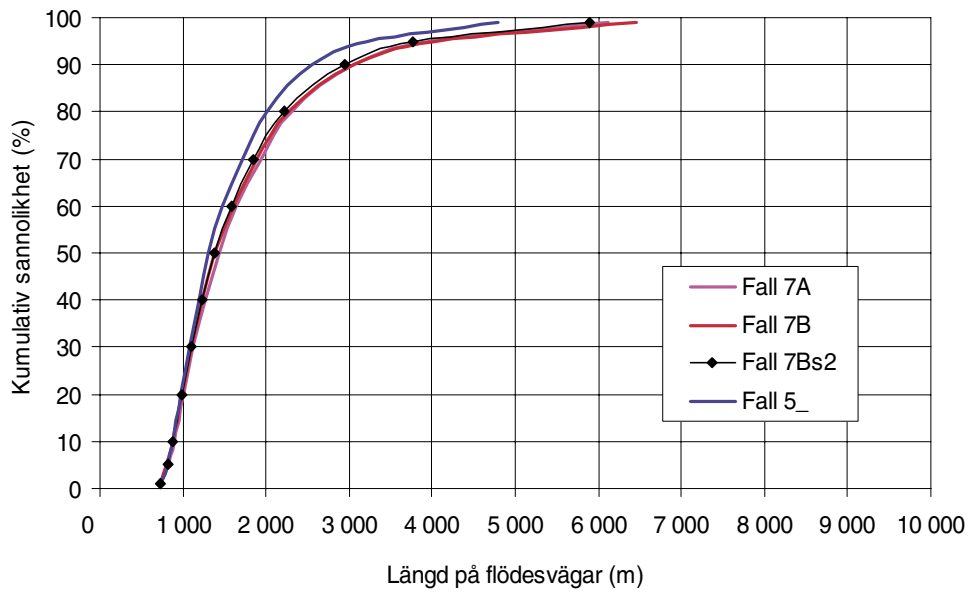
Percentil	Skillnad i längd i %	Skillnad i genombrotts-tid i %	Skillnad i specifika flödet vid startpunkterna i %
1	0,6	-5,2	-3,7
5	1,2	-6,4	-6,3
10	2,3	-6,8	-4,7
50	9,0	-3,5	4,8
60	11,1	-2,8	5,1
70	12,3	0,2	6,1
80	13,6	4,5	6,7
90	18,4	10,2	9,3
95	20,3	18,5	10,7
99	24,5		41,5

Skillnaden beräknas som: $100 * [(Fall7A - Fall5) / ((Fall7A + Fall5) / 2)]$

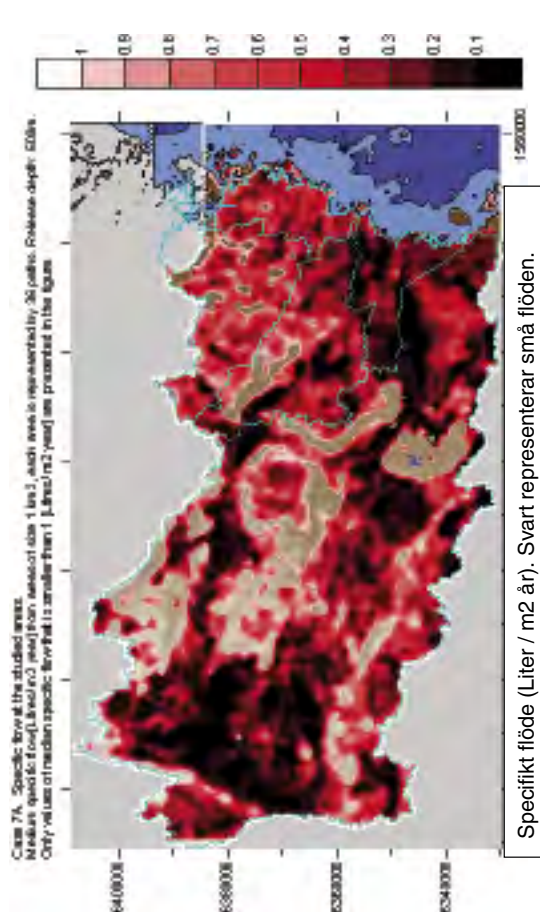
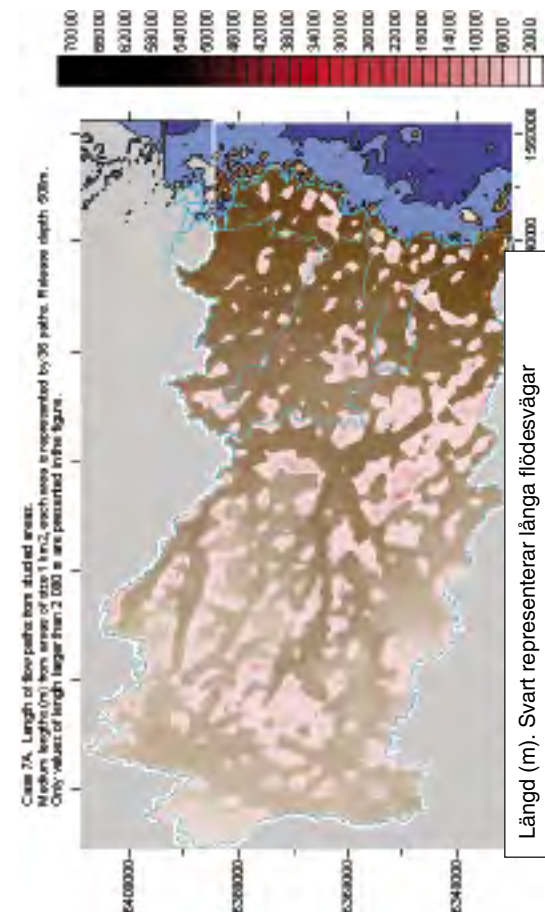
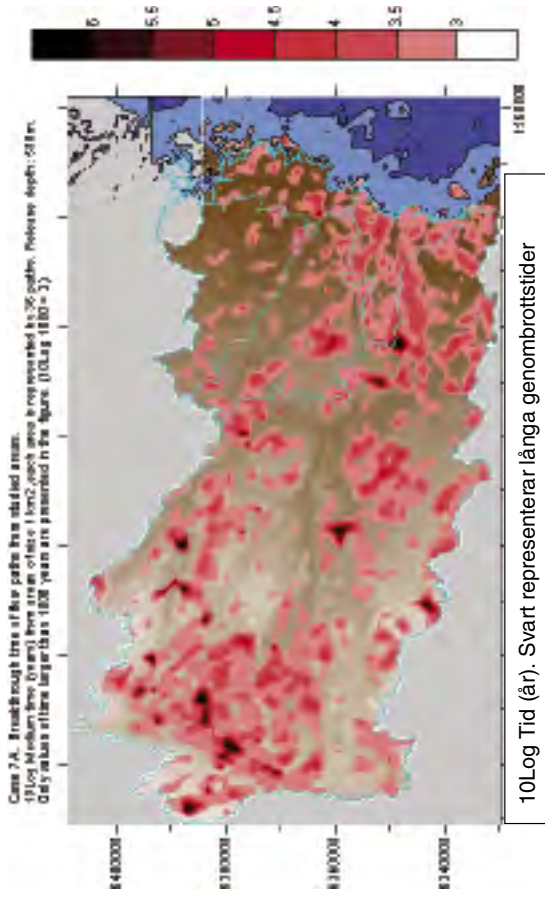
Tabell 6-12. Fall 7A, 7B, 7Bs2 samt Fall 5 och Fall 5D. Andel långa flödesvägar.

Längd	Antal flödesvägar i procent av alla flödesvägar *				
	Fall 7A	Fall 7B	Fall 7Bs2	Fall 5	Fall 5D
>= 2 000 m	32	31	30	31	58
>= 5 000 m	5	5	4	5	14
>= 8 000 m	1,6	1,6	1,1	1,2	5
>= 10 000 m	0,8	0,7	0,5	0,6	3

* Eftersom varje flödesväg representerar en viss area av det studerade modellområdet representerar procentsatserna i tabellen också andelar av modellområdets area.



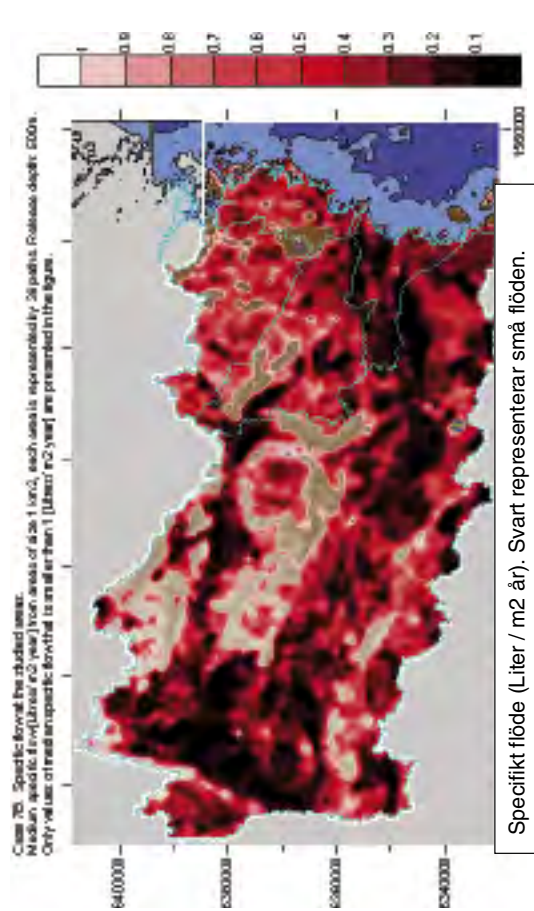
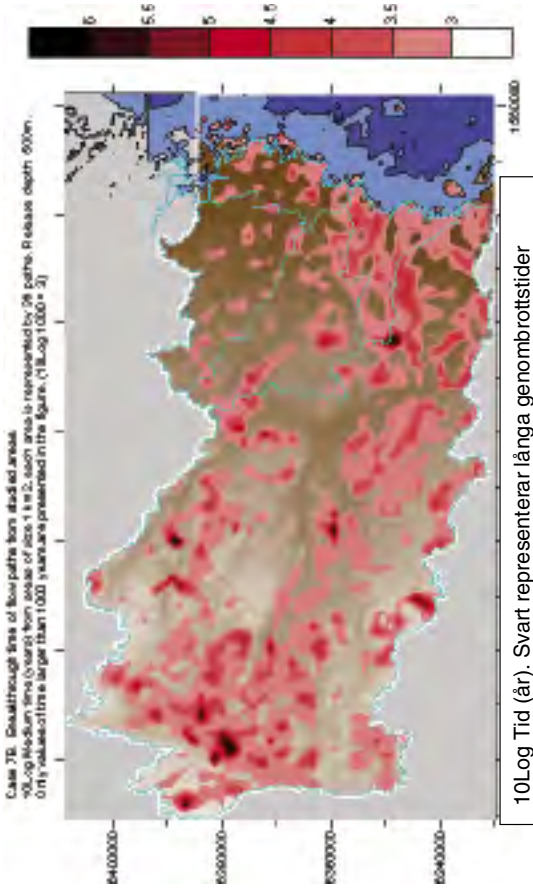
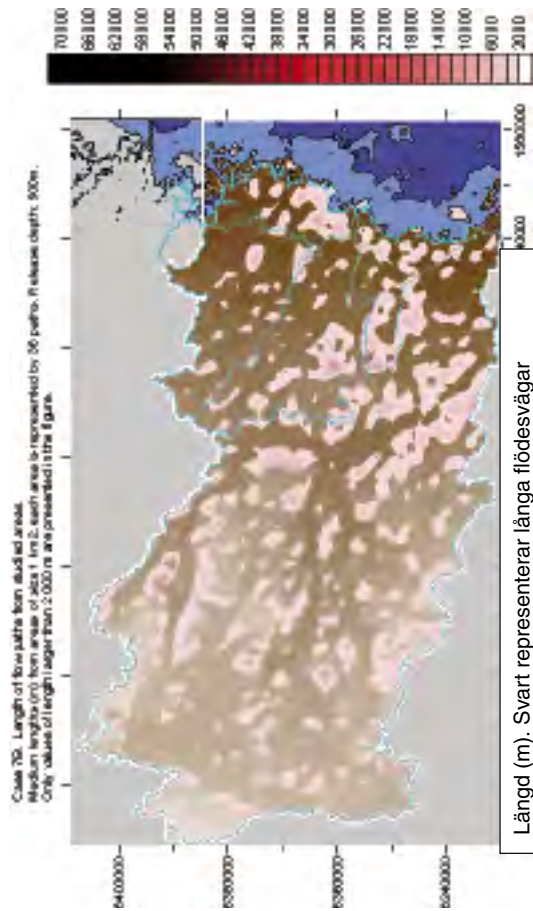
Figur 6-56. Fall 7A, 7B, 7Bs2 och 5. Jämförelse av flödesvägars egenskaper. Medianvärden för förvarsområden av storlek 1 km².



Fall 7A: Medianvärden.

Percentil	Medianvärden.			Rp[%]
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	
1	735	76	0.04	0
5	823	137	0.06	0
10	889	192	0.09	9
20	1 006	300	0.15	22
30	1 128	430	0.21	33
40	1 260	592	0.28	42
50	1 436	822	0.36	53
60	1 651	1 140	0.45	64
70	1 936	1 681	0.59	75
80	2 312	2 681	0.78	83
90	3 066	5 637	1.17	97
95	3 940	12 043	1.61	100
99	6 123	1.00E+06	3.32	100

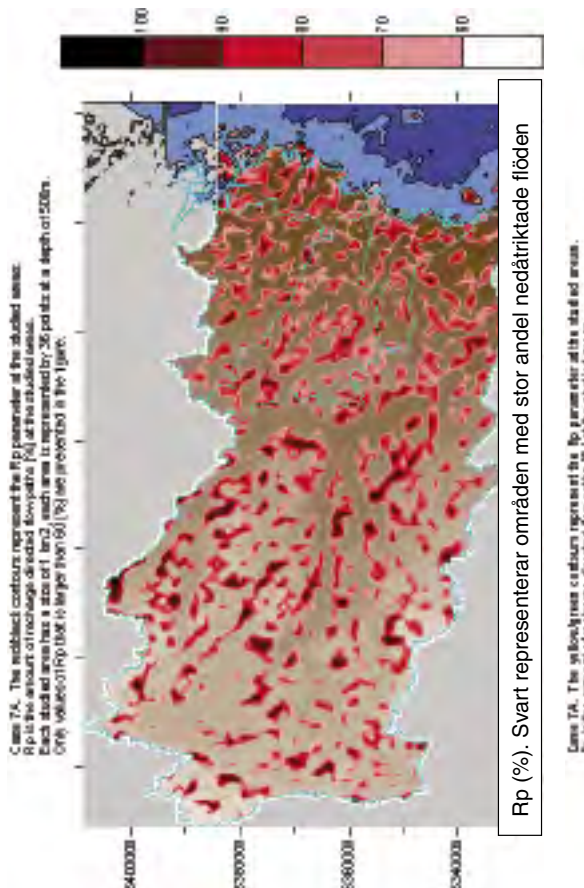
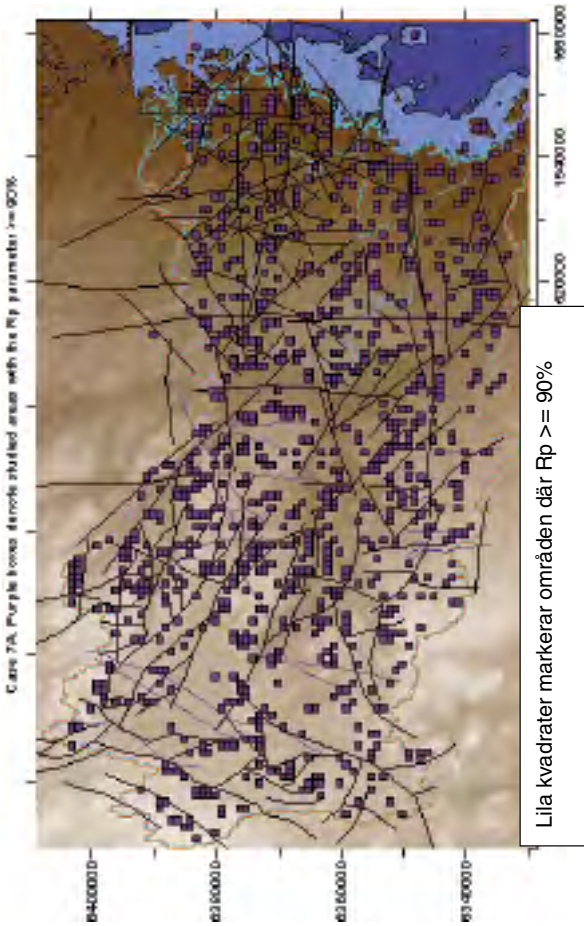
Figur 6-57. Resultat för Fall 7A. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km². Exempel på positionen för en horisontal zon är markerat med ett blått "H" i figuren som presenterar det specifika flödet.



Fall 7B:

Percentil	Medianvärdet.			
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	Rp[%]
1	729	77	0.04	0
5	810	134	0.07	0
10	878	189	0.10	8
20	989	300	0.15	22
30	1 100	430	0.21	33
40	1 227	593	0.28	42
50	1 383	813	0.36	53
60	1 603	1 110	0.45	64
70	1 879	1 610	0.58	75
80	2 278	2 537	0.76	86
90	3 053	4 928	1.12	97
95	4 004	10 239	1.54	100
99	6 464	1.00E+06	2.43	100

Figur 6-58. Resultat för Fall 7B. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km². Exempel på positionen för en horisontal zon är markerat med ett blått "H" i figuren som representerar det specifika flödet.

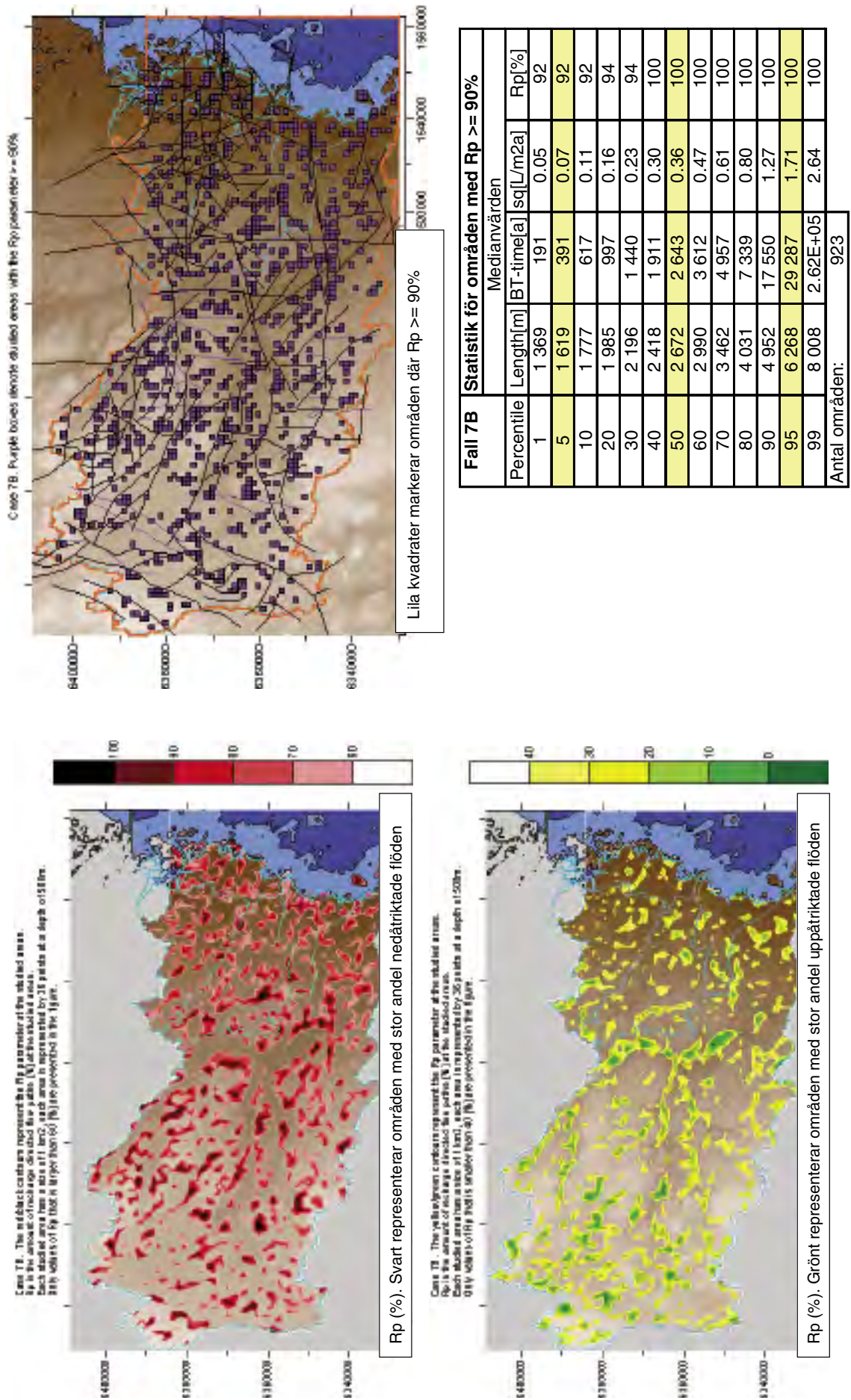


Case 7A. The yellow/green contours represent the Rp parameter at the studied areas. Rp is the amount of recharge divided flowrate [%] at the studied areas. Each studied area has a size of 1 km², each area is represented by 36 pixels at a depth of 250m. Only values of Rp that is smaller than 50 [%] are presented in the figure.

Rp (%). Grönt representerar områden med stor andel uppåtriktade flöden

Fall 7A	Statistik för områden med $R_p \geq 90\%$				Medianvärdet
	Percentile	Length[m]	BT-time[a]	sq[L/m ² a]	
	1	1 328	188	0.05	92
	5	1 567	372	0.08	92
	10	1 721	559	0.11	92
	20	1 984	954	0.18	94
	30	2 196	1 326	0.24	94
	40	2 440	1 851	0.31	97
	50	2 693	2 568	0.39	100
	60	3 040	3 610	0.51	100
	70	3 435	5 148	0.66	100
	80	4 024	8 087	0.90	100
	90	4 827	15 422	1.39	100
	95	5 881	30 286	1.96	100
	99	8 310	1.34E+05	4.99	100
Antal områden:					896

Figur 6-59. Rp-parameter för Fall 7A. Analys av 6 000 förvaransområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Figur 6-60. Rp-parameter för Fall 7B. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².

6.9 Fall 8A, 8B, 8As2 och 8As3 – Lokal heterogenitet och isotropi

I denna studie ingår ett antal fall för vilka en lokal heterogenitet har definierats för bergets genomsläpplighet (K-värden): (i) mellan deformationszonerna och (ii) för deformationszonerna och diabasgångar. Alltså är alla delar av modellen, förutom de kvartära avlagringarna, definierade med lokalt heterogena K-värden. Metodiken för hur denna heterogenitet har genererats och inkluderats i de upprättade fallen diskuteras i avsnitt 3.6 och 4.10, samt i bilaga 3.

De fall som presenteras i detta avsnitt (Fall 8A, 8B, 8As2 och 8As3) har alla definierats utan att någon generell anisotropi har inkluderats i modellen med avseende på genomsläpplighet (K-värden). Fall med både lokal heterogenitet och generell anisotropi presenteras i nästa avsnitt.

Fall 8A och 8B representerar två olika realiseringar av den lokala heterogeniteten. Fall 8A och 8B är identiska med Fall 5, förutom den lokala heterogeniteten. Det teoretiska effektivvärdet är detsamma i alla tre fallen. Fall 8As2 är identiskt med Fall 8A, förutom att densitetsberoende flöde är inkluderat med initialvillkor s_2 (se avsnitt 4.3.5). Fall 8As3 är identiskt med Fall 8A, förutom att densitetsberoende flöde är inkluderat med initialvillkor s_3 (se avsnitt 4.3.5).

De fall som presenteras i detta avsnitt visar på flödesvägar i en komplex modell där genomsläppligheten har definierats med lokal heterogenitet. En jämförelse av dessa fall mot Fall 5 visar på betydelsen av den lokala heterogeniteten.

En jämförelse av flödeslängder från förvarsområden för Fall 8A och 8B presenteras i figur 6-62 och tabell 6-13. Det framgår tydligt av figurerna att statistiskt sett är skillnaderna mellan Fall 8A och Fall 8B mycket små. Lokalt kan skillnaderna vara stora, men när hela modellområdet studeras så blir statistiken nästan identisk.

En jämförelse mellan (i) fallen med lokal heterogenitet (8A och 8B) och (ii) Fall 5 demonstrerar det följande (se figur 6-62 och tabell 6-13), avseende median värden för flödesvägar från förvarsområden.

- Längder: För fallen med lokal heterogenitet är längderna ca 30–50 % längre.
- Genombrotts tid: För fallen med lokal heterogenitet är tiderna ca 40–80 % längre.
- Specifika flödet vid startpunkterna: För fallen med lokal heterogenitet är flödena ca 20–30 % mindre.

Med lokal heterogenitet i modellen blir flödesvägarna genom modellen mer ”slingriga” än då modellen är definierad som homogen i den lokala skalan; från de slingriga flödesvägarna följer större flödeslängder och genombrotts tider.

Den ovan diskuterade slingrigheten (eller kanske hackigheten) framgår av en visualisering av flödesvägar från de 1 000 startpunkterna som diskuteras i avsnitt 6.3. Flödesvägar som simulerats i en modell utan lokal heterogenitet (Fall 5) presenteras i figur 6-61(i); flödesvägar som simulerats i en modell med lokal heterogenitet visas i figur 6-61(ii). Se också figur 6-75(ii), som presenterar flödesvägar för Fall 8D.

En jämförelse mellan Fall 8A och 8As2 visar på betydelsen av densitetsberoende flöde då lokal heterogenitet är inkluderad i modellen. Figur 6-62 visar på små skillnader mellan Fall 8A och 8As2. Detta stämmer med de slutsatser som presenterats i avsnitt 6.6.4. Samtidigt noterar vi att andelen riktigt långa genombrotts tider är noterbart mindre i simuleringarna med densitetsberoende flöde och komplexa fall, se figur 6-34, figur 6-56 och figur 6-62.

En jämförelse mellan Fall 8As2 och 8As3 visar på betydelsen av tidpunkten då de transienta simuleringarna initieras. För Fall 8As2 är den initiala tidpunkten satt till 10 000 BP, för Fall 8As3 är den initiala tidpunkten satt till 14 000 BP. De studerade flödesvägarna simuleras i en flödessituation som representerar den nuvarande flödessituationen (2000 AD), se avsnitt 3.7. Med avseende på flödesvägar från förvarsdjup producerar de två olika fallen nästan exakt samma resultat. Se figur 6-63. Följande slutsats erhålls av denna jämförelse: Den simulerade tidsperioden som startar vid 10 000 BP är tillräckligt lång, en förlängning av den simulerade tidsperioden genom att flytta den initiala tidpunkten 4 000 år bakåt i tiden är av mycket ringa betydelse för de simulerade flödesvägarna från förvarsdjup vid nuvarande flödessituation (2000 AD), och de stora förändringarna i havets nivå före 10 000 BP (se figur 4-9) är därmed också av mycket ringa betydelse för de simulerade flödesvägarna från förvarsdjup (vid 2000 AD).

Andelen långa flödesvägar visas i tabell 6-14. De presenterade fallen är 8A, 8B, 8As2 samt Fall 5. Tabellen visar att andelen storregionala flödesvägar (> 10 km) är ungefär densamma för fallen med lokal heterogenitet: ca 2 %. För Fall 5 är andelen 0,6 %. Andelen storregionala flödesvägar ökar alltså något då lokal heterogenitet inkluderas i modellen. Skillnaden skall dock inte tolkas som att det storregionala flödesmönstret radikalt förändras då lokal heterogenitet inkluderas i modellen. Flödesmönstret i en större skala än den lokala skalan är huvudsakligen detsamma, detta framgår av figur 6-61. Lokalt ger den lokala heterogeniteten upphov till ett mer komplext slingrande flödesmönster, men i en storregional skala är flödesmönstret i huvudsakligen detsamma.

För Fall 8As2 (som referensfallet men med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde) har vi här beräknat längd på flödesvägar, egentligen fördelningar av längder, som funktion av avståndet från strandlinjen. Resultat visas nedan i figur 6-65. Figuren visar att flödesvägarnas längder inte ökar med avståndet från strandlinjen. Andelen riktigt långa flödesvägar tenderar snarare att minska med avståndet från havet. Detta följer av den mer accentuerade topografin i modellområdet inre delar. De längsta flödesvägarna förekommer på ett avstånd av ca 10–20 km från strandlinjen, långa flödesvägar förekommer också på avstånden ca 50 km och ca 75 km, och dessutom vid modellen västra rand (största avstånd från strandlinjen). Korta flödesvägar förekommer på alla avstånd från strandlinjen. Oavsett avstånd från strandlinjen så är medianen för längderna ca 2 km.

Fördelningen av genombrotstider för flödesvägarna, för Fall 8As2, som funktion av avståndet till strandlinjen presenteras i figur 6-66. Figuren visar att flödesvägarnas genombrotstider inte ökar med avståndet från strandlinjen. Korta och långa genombrotstider förekommer på alla avstånd från strandlinjen. Oavsett avstånd från strandlinjen så varierar medianen för genombrotstiderna huvudsakligen mellan 1 000 år och 2 000 år.

För Fall 8As2 presenterar figur 6-67 fördelningen av specifika flödet vid flödesvägarnas startpunkter (på djupet 500 m) som funktion av avståndet till strandlinjen. Figuren visar att flödena inte minskar med avståndet från strandlinjen. En svag trend kan observeras i figuren för ökande flöden med avstånd från strandlinjen fram till ett avstånd av ca 75 km från strandlinjen. För avstånd större än ca 75 km förekommer en svag trend för minskande flöden. Flöden mindre än 0,05 Liter/(m²,år) och flöden större än 5 Liter/(m²,år) förekommer på alla avstånd från strandlinjen. Oavsett avstånd från strandlinjen så varierar medianen för flödena huvudsakligen mellan 0,1 Liter/(m²,år) och 0,4 Liter/(m²,år).

En areabaserad analys av flödesvägar från förvarsområden har också utförts (se avsnitt 3.8).

- För Fall 8A presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-68.
- För Fall 8As2 presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-69.

Vi har beräknat Rp-värden (se avsnitt 3.9) för de studerade förvarsområdena, resultaten presenteras i följande figurer:

- För Fall 8A i figur 6-70.
- För Fall 8As2 i figur 6-71.

Följande slutsatser erhålles: Fall 8A, 8B, 8As2 och 8As3 uppvisar samma allmänna flödesmönster som Fall 5. Grundvattnets flödesceller är i huvudsak lokala. Andelen storregionala flödesvägar är liten. Den lokala heterogeniteten är inte tillräckligt betydelsefull för att förändra flödesmönstret i en storregional skala.

Tabell 6-13. Fall 8A och Fall 5. Jämförelse av flödesvägar från djupet 500 m, skillnad i procent.

Jämförelse mellan Fall 8A (lokal heterogenitet) och Fall 5 (ingen lokal heterogenitet).
Förvarsområden av storlek 1 km²

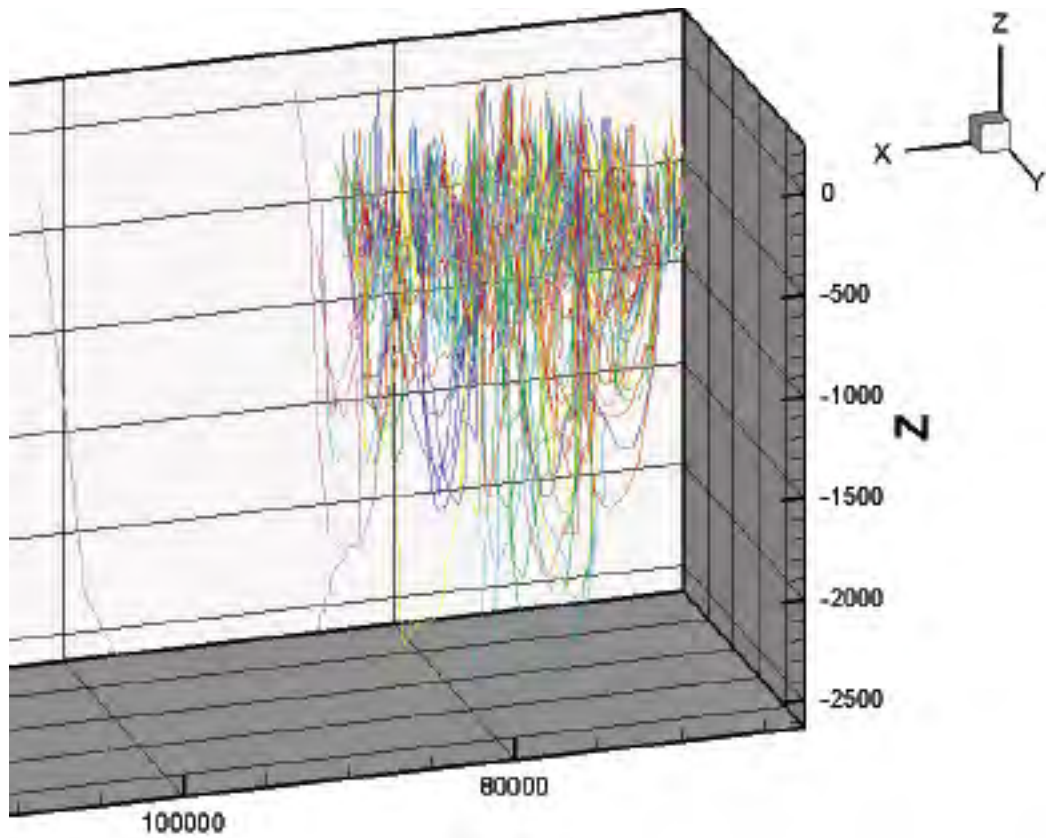
Percentil	Skillnad i längd i %	Skillnad i genombrottsid i %	Skillnad i specifika flödet vid startpunkterna i %
1	31	38	-37
5	33	44	-30
10	36	52	-30
20	39	57	-30
30	42	56	-31
40	44	60	-31
50	46	62	-28
60	48	63	-28
70	48	63	-28
80	49	65	-27
90	50	70	-21
95	51	79	-21
99	59		-8

Skillnaden beräknas som: $100 * [(Fall8A - Fall5) / ((Fall8A + Fall5) / 2)]$

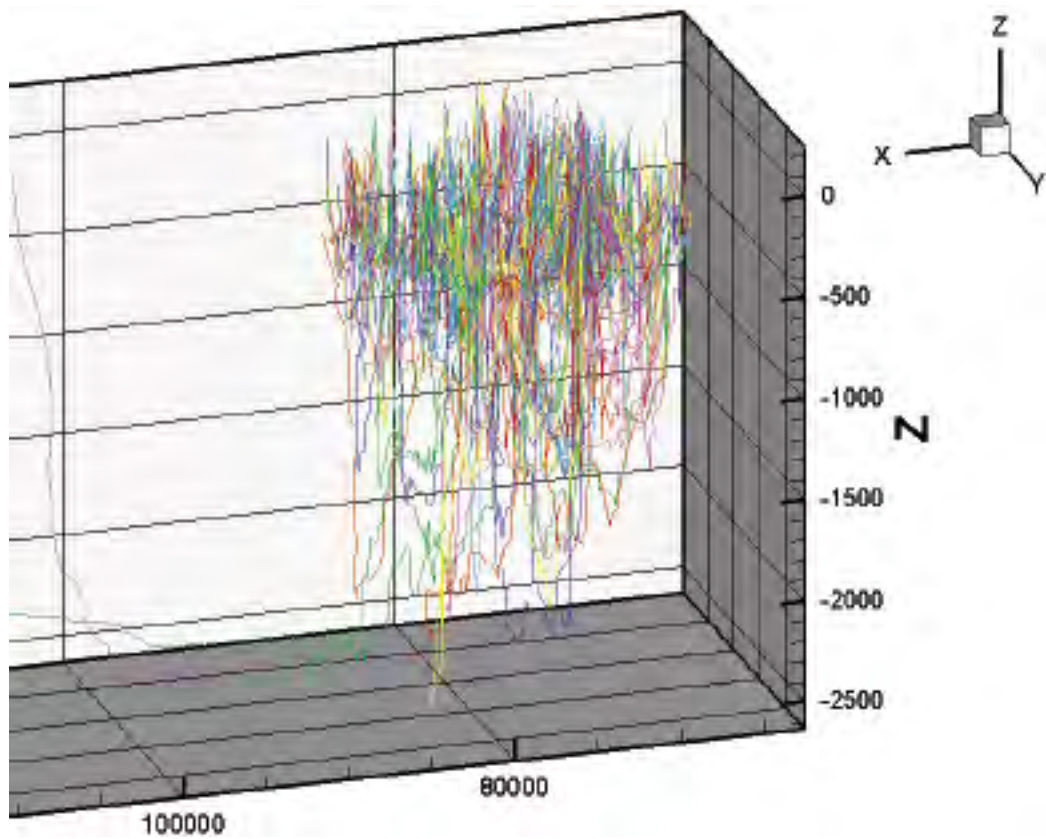
Tabell 6-14. Fall 8A, 8B, 8As2 samt Fall 5. Andel långa flödesvägar.

Längd	Antal flödesvägar i procent av alla flödesvägar *			
	Fall 8A	Fall 8B	Fall 8As2	Fall 5
>= 2 000 m	54	53	54	31
>= 5 000 m	11	11	9	5
>= 8 000 m	4	4	3	1,2
>= 10 000 m	2,3	2,2	1,7	0,6

* Eftersom varje flödesväg representerar en viss area av det studerade modellområdet representerar procentsatserna i tabellen också andelar av modellområdets area.

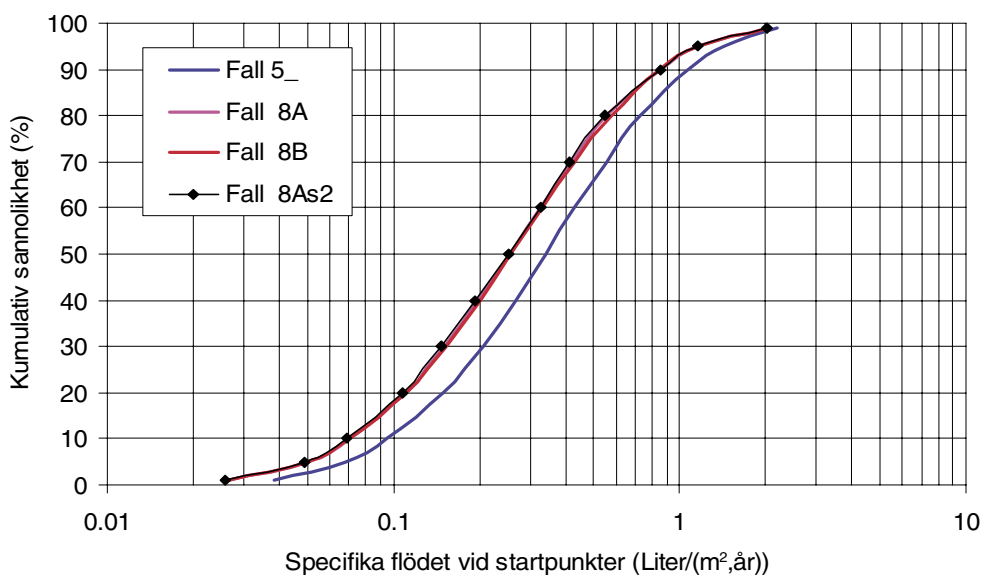
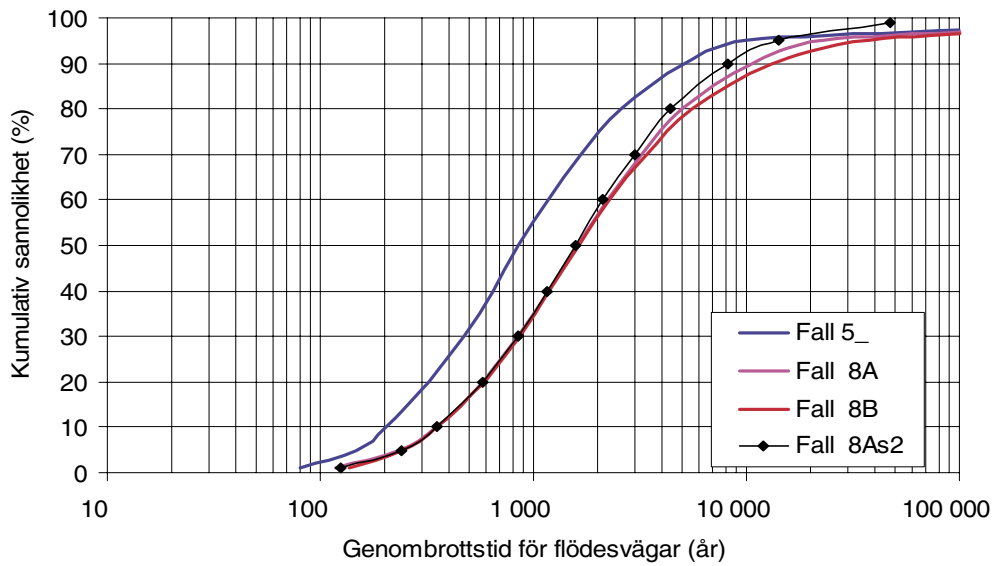
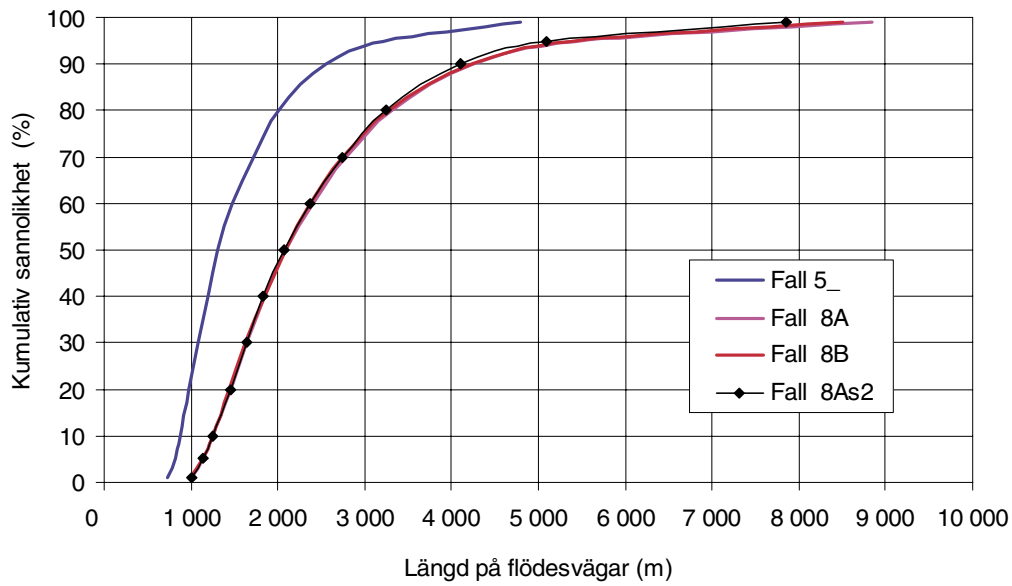


(i) Fall 5, referensfallet (ingen lokal heterogenitet).

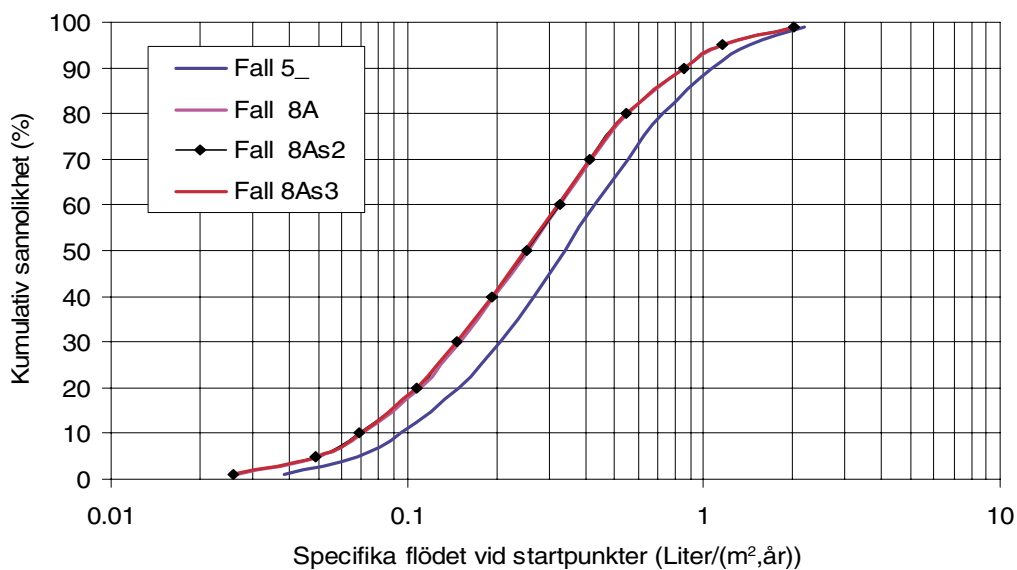
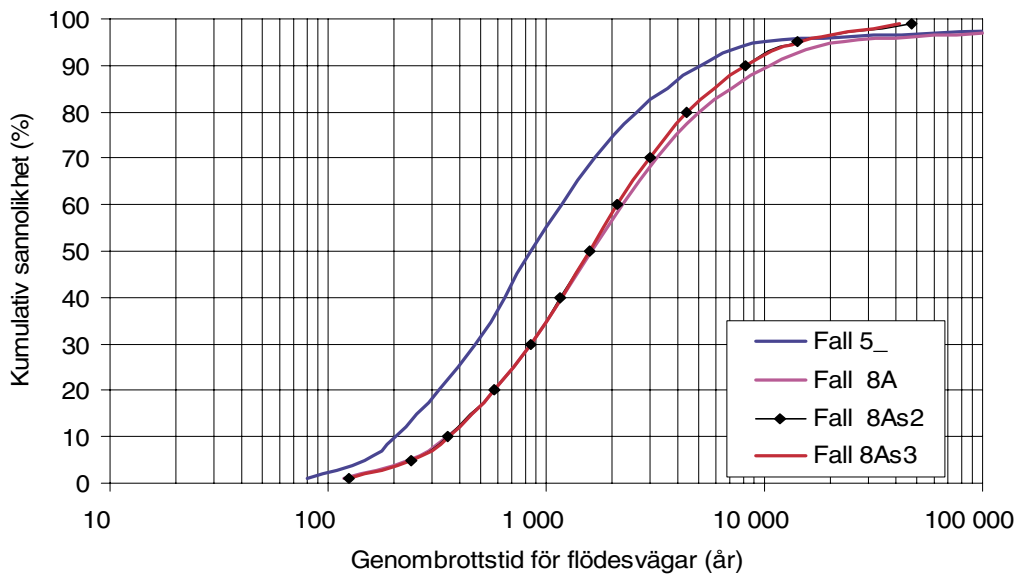
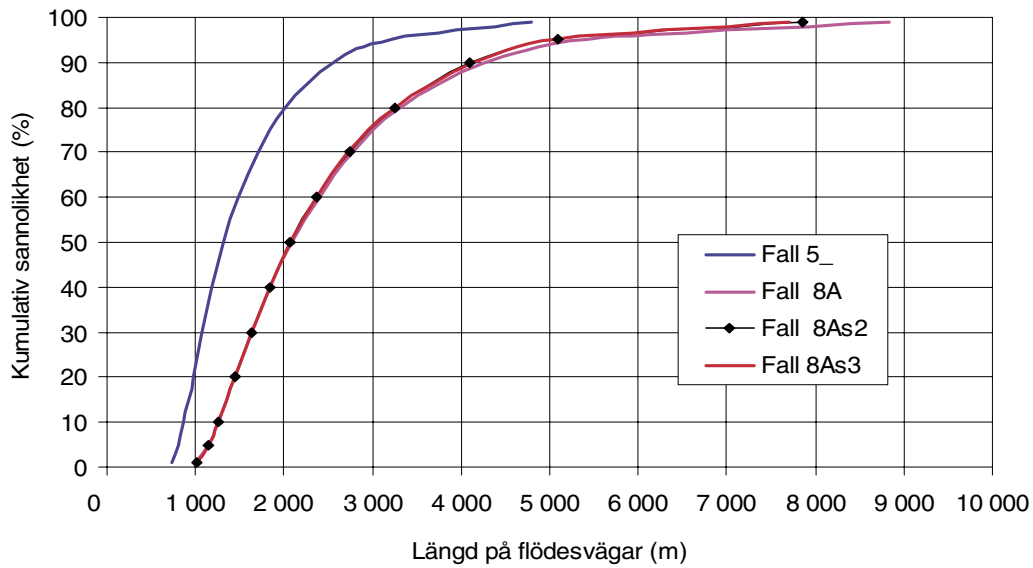


(ii) Fall 8A, lokal heterogenitet.

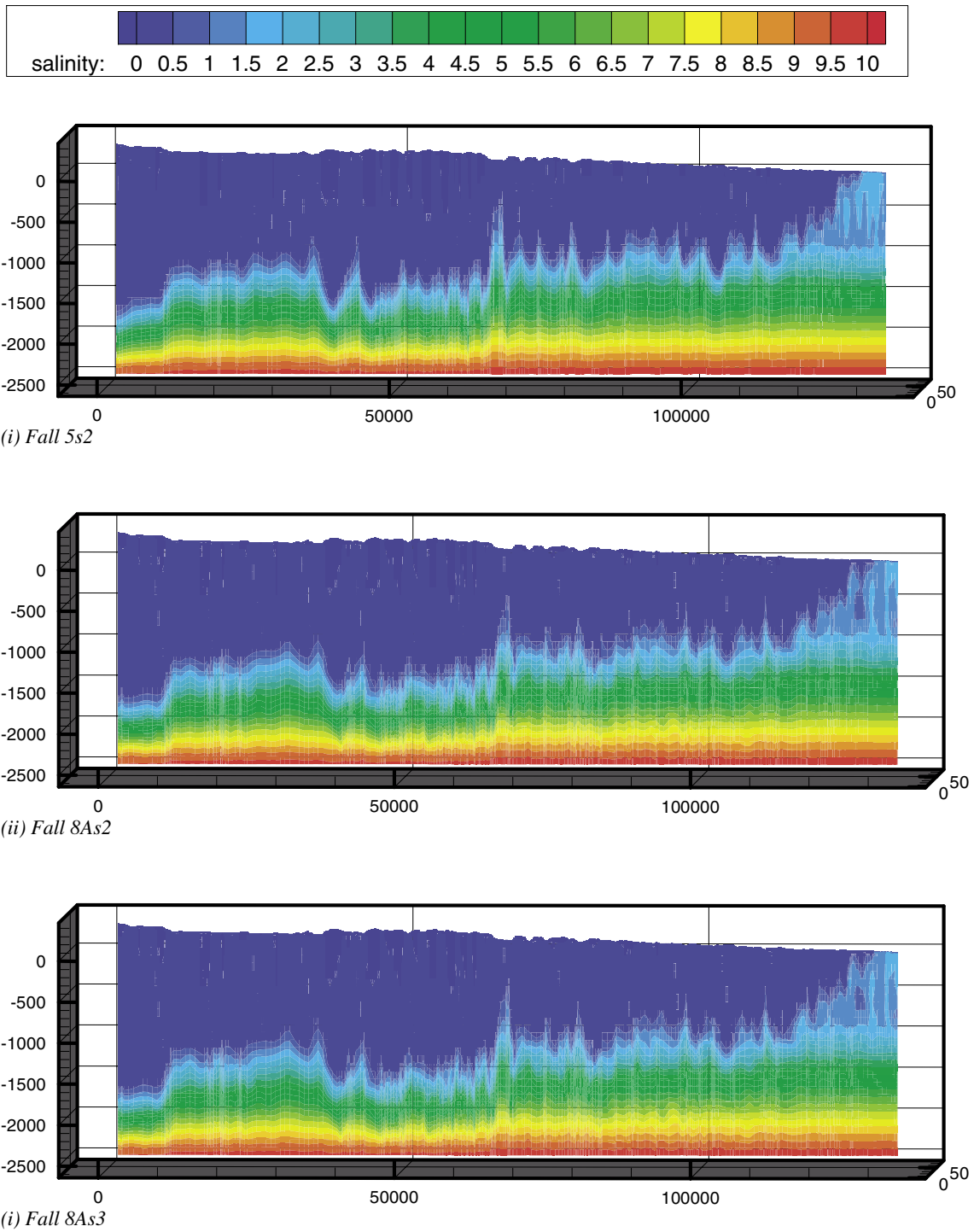
Figur 6-61. Fall 5 och Fall 8A. Perspektivbild av 1 000 visualiserade flödesvägar. Notera att den vertikala skalan är 12 gånger större än den horisontala skalan.



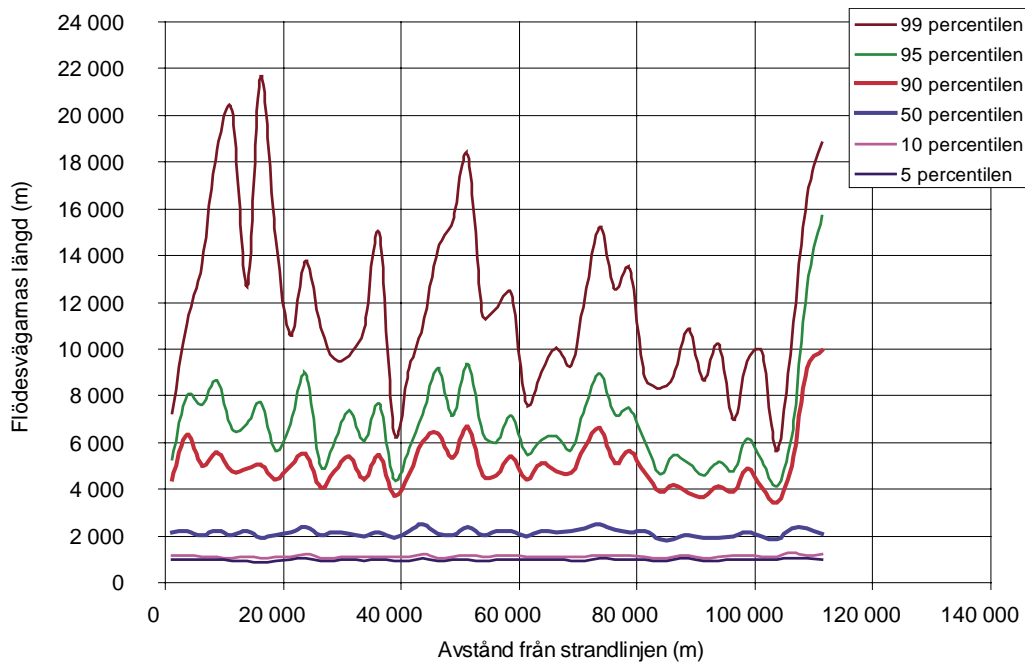
Figur 6-62. Fall 8A, 8B, 8As2 och 5. Jämförelse av flödesvägars egenskaper. Medianvärden för försvarsområden av storlek 1 km².



Figur 6-63. Fall 8A, 8As2, 8As3 och 5. Jämförelse av flödesvägars egenskaper. Medianvärden för försvarsområden av storlek 1 km².

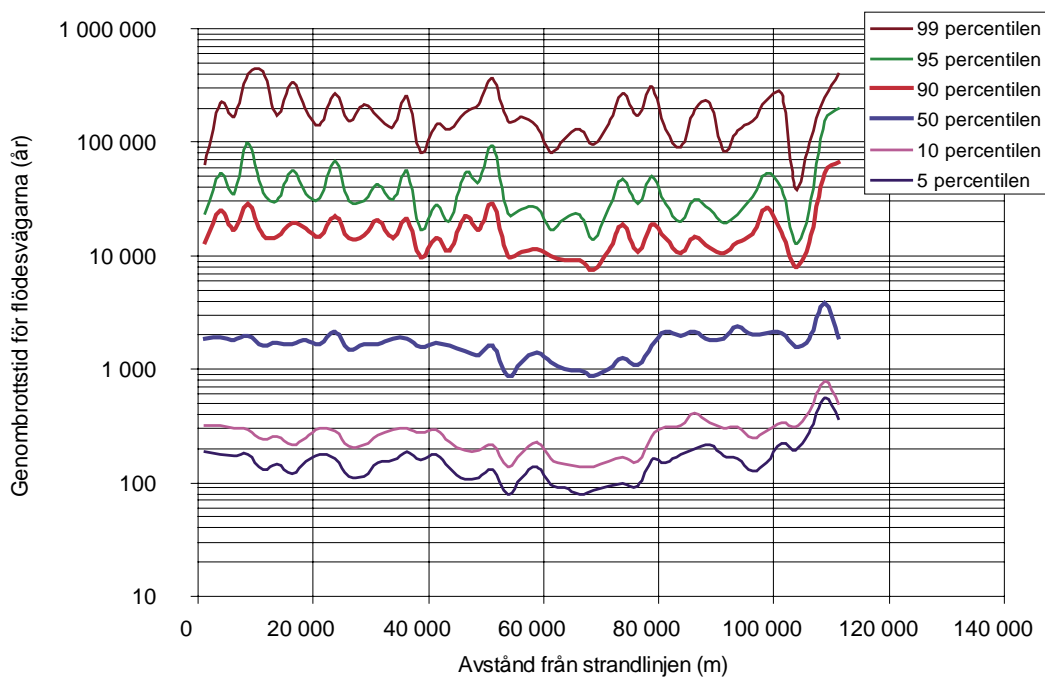


Figur 6-64. Fall 5s2, Fall 8A8s2 och Fall 8As3. Beräknad salinitet (procent) längs med en sektion i väst-östlig riktning. Tid = 2000 AD. Profilen är placerad vid $Y = 6379700$ (rikets nät).

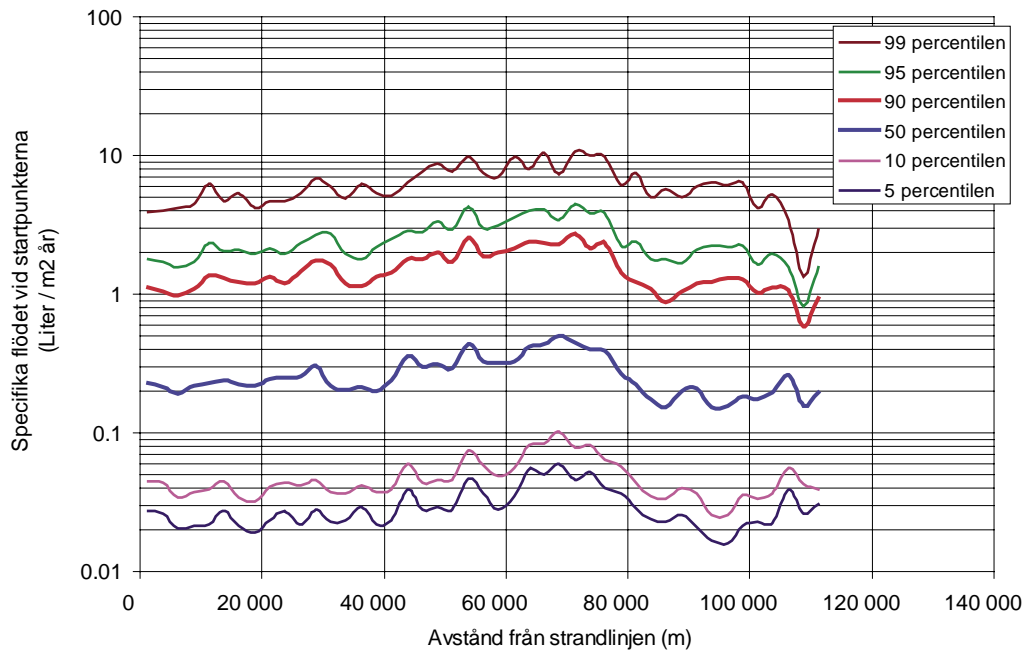


Figur 6-65. Fall 8As2, (som referensfallet men med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde). Längd på flödesvägar som funktion av avståndet till strandlinjen.

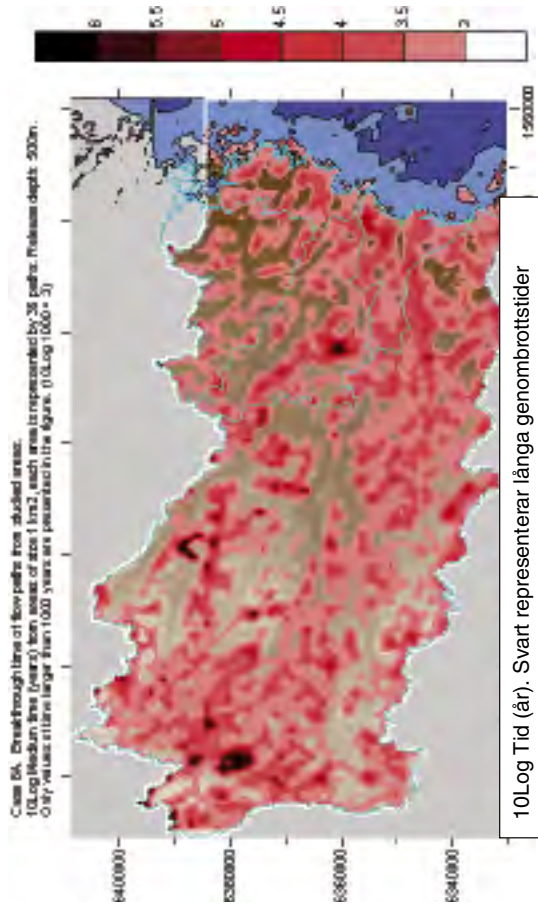
Figuren ovan, och de två följande figurerna, är baserad på följande metodik: Flödesvägarnas startpunkter (ca 220 000) är jämt fördelade över modellområdet, dessa startpunkter klassindelas efter avstånd från strandlinjen. Klassbredden sätts till 2 500 m. Således blir den första klassen 0 m från strandlinjen till 2 500 m från strandlinjen. Nästa klass blir 2 500 m till 5 000 m, osv. För varje klass beräknas fördelningen av flödesvägarnas egenskaper. Fördelningarnas percentiler plottas därefter mot den studerade klassens klassmitt.



Figur 6-66. Fall 8As2, (som referensfallet men med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde). Genombrottsid för flödesvägar som funktion av avståndet till strandlinjen.

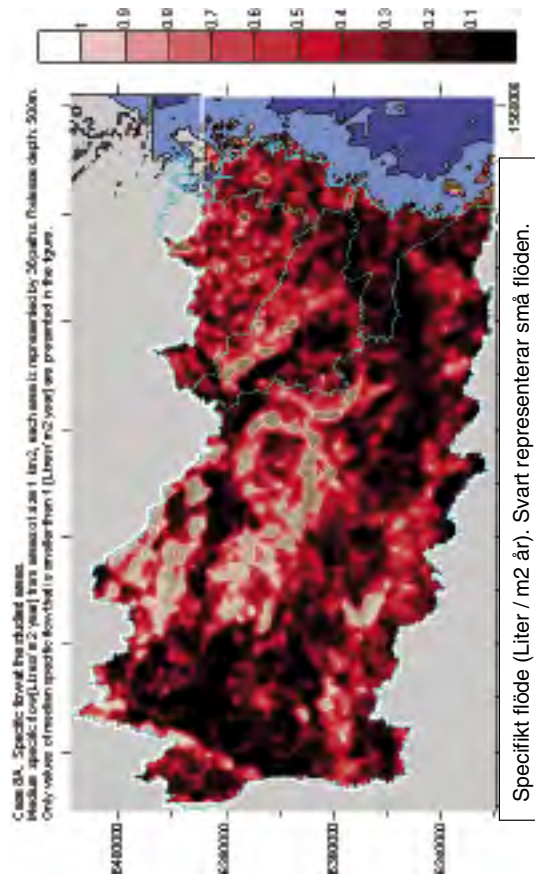
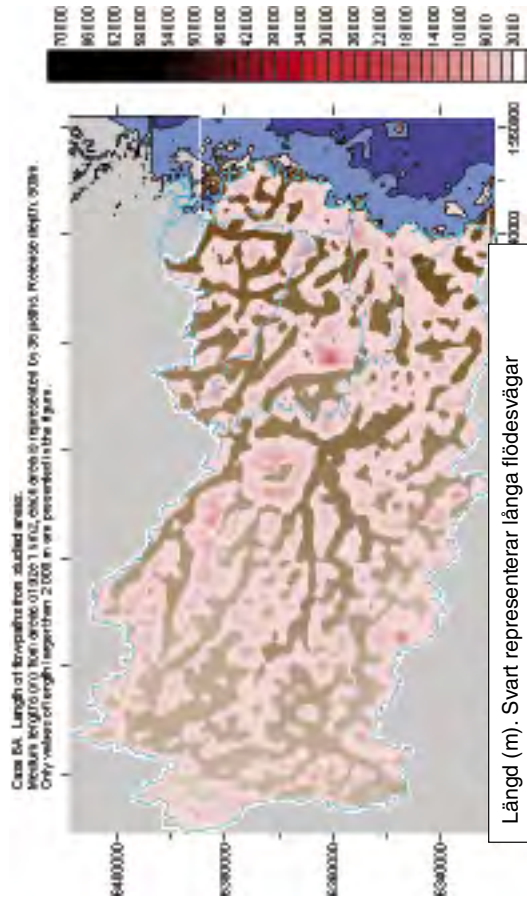


Figur 6-67. Fall 8As2, (som referensfallet men med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde). Specifika flödet vid flödesvägarnas startpunkter (på djupet 500 m) som funktion av avståndet till strandlinjen.

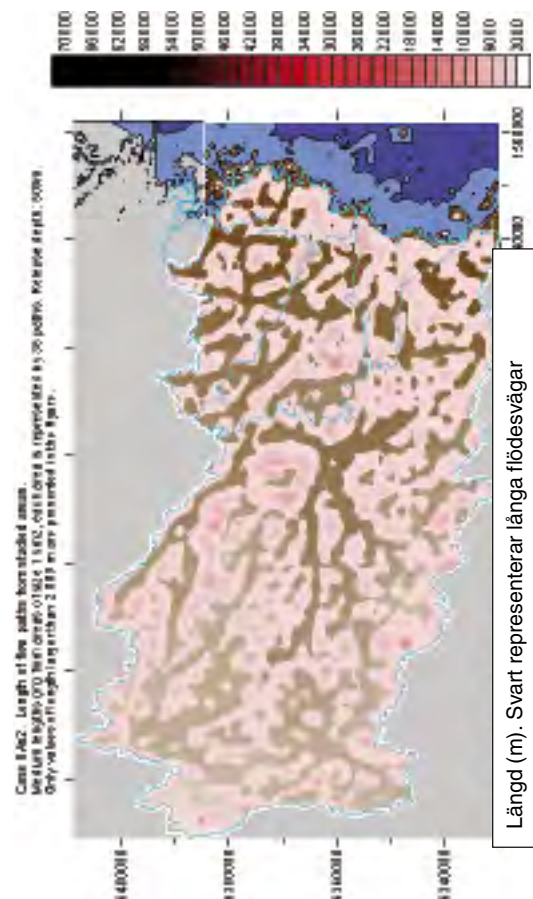


Fall 8A: Medianvärdet.

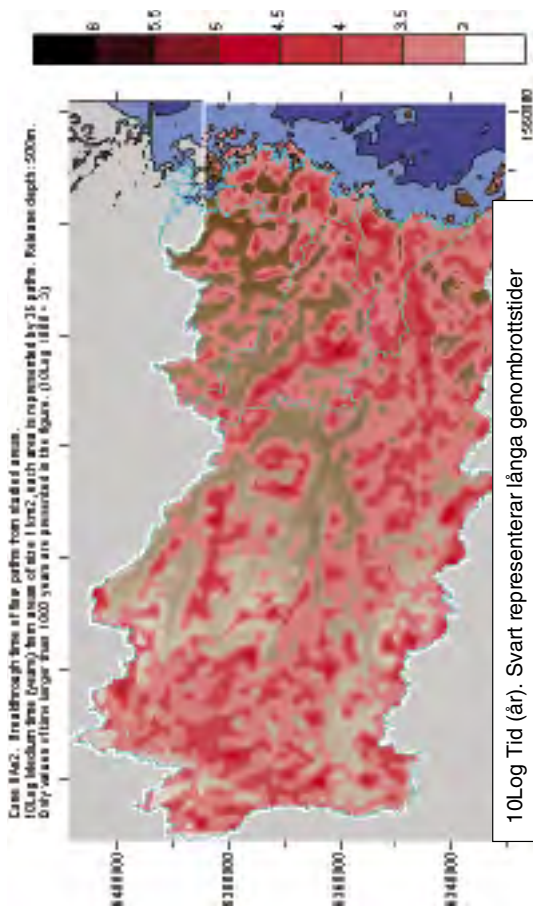
Percentil	Medianvärdet			Rp[%]
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m ² a]	
1	1 003	118	0.03	0
5	1 140	230	0.05	6
10	1 251	351	0.07	14
20	1 450	583	0.11	25
30	1 638	844	0.15	36
40	1 845	1 186	0.20	44
50	2 087	1 622	0.26	56
60	2 402	2 251	0.33	64
70	2 779	3 224	0.42	72
80	3 312	5 007	0.55	81
90	4 258	10 586	0.86	92
95	5 436	22 980	1.17	97
99	8 834	1.00E+06	2.01	100



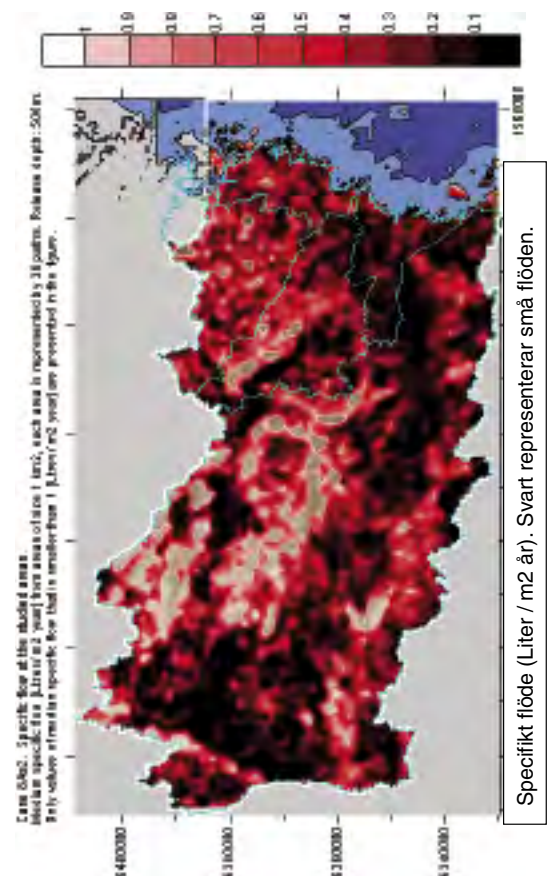
Figur 6-68. Resultat för Fall 8A. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Längd (m). Svart representerar långa flödesvägar



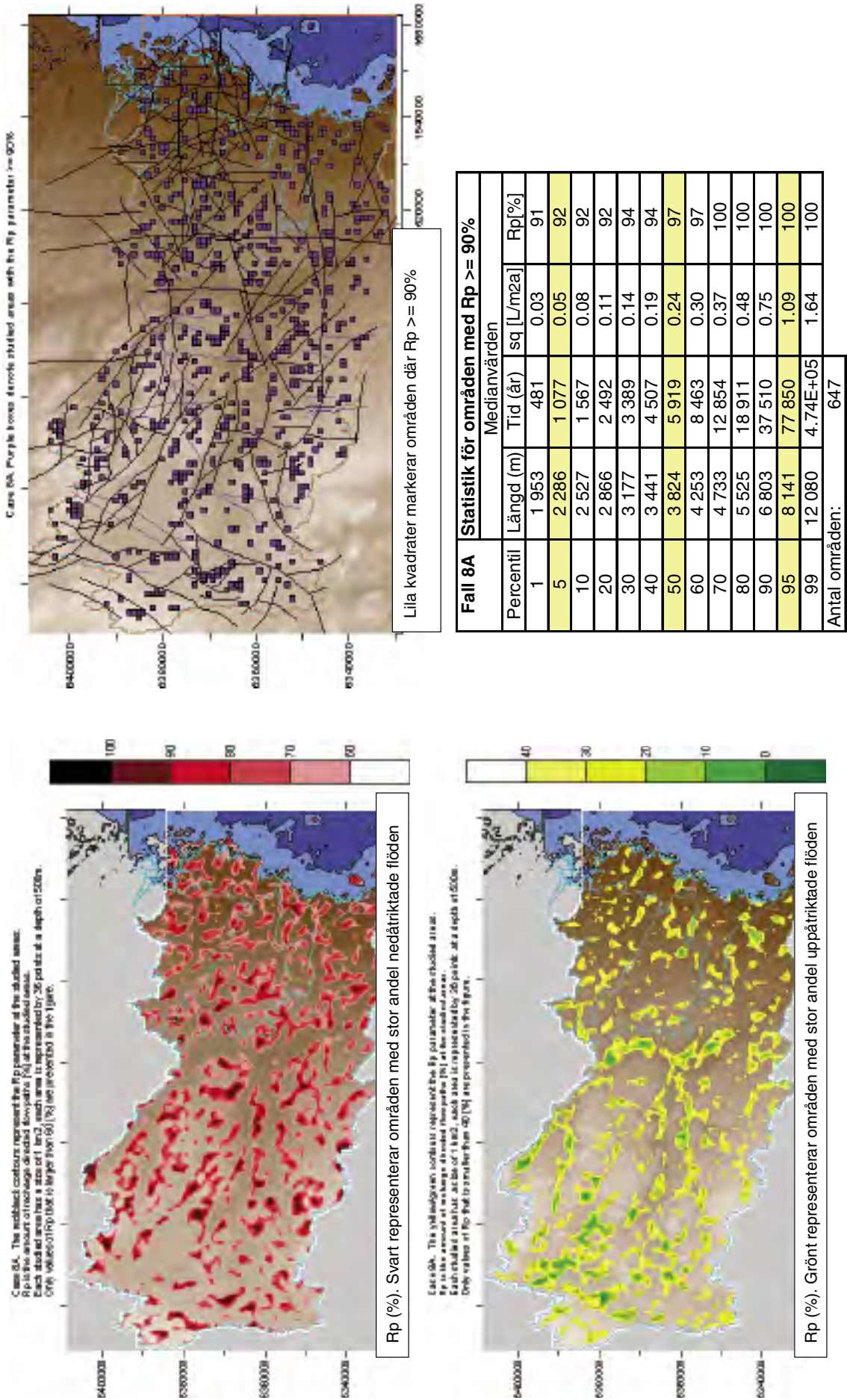
10Log Tid (år). Svart representerar långa genombrottsförlängningar



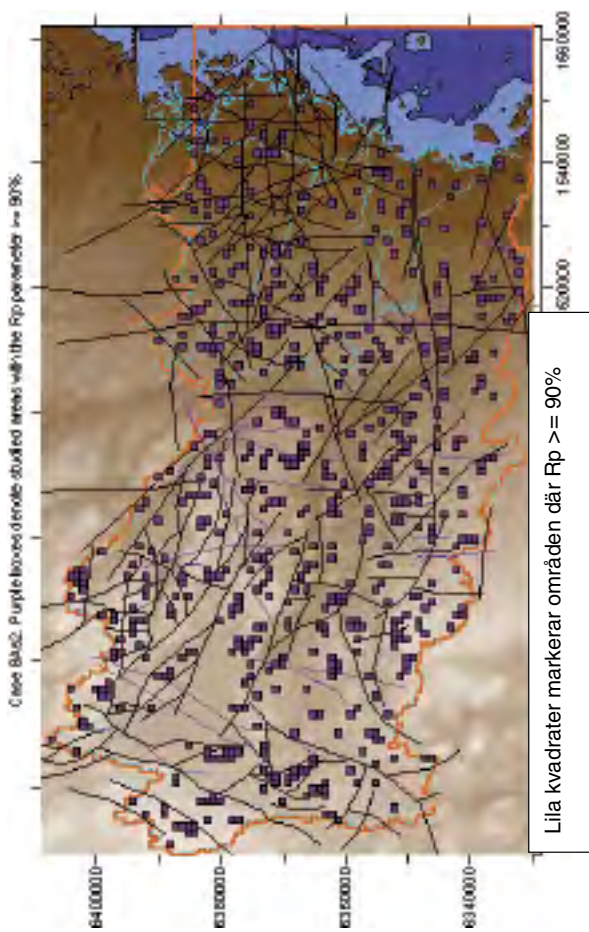
Specifikt flöde (Liter / m² år). Svart representerar små flöden.

Fall 8As2:		Medianvärdet.		
Percentil	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m²a]	Rp[%]
1	1 009	125	0.03	0
5	1 143	239	0.05	6
10	1 256	354	0.07	14
20	1 453	582	0.11	25
30	1 637	845	0.15	36
40	1 835	1 163	0.19	44
50	2 070	1 565	0.25	53
60	2 373	2 134	0.33	62
70	2 737	3 002	0.41	71
80	3 249	4 429	0.55	81
90	4 101	8 148	0.85	91
95	5 087	14 105	1.16	97
99	7 851	4.71E+04	2.02	100

Figur 6-69. Resultat för Fall 8As2. Analys av 6 000 förvaransområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².

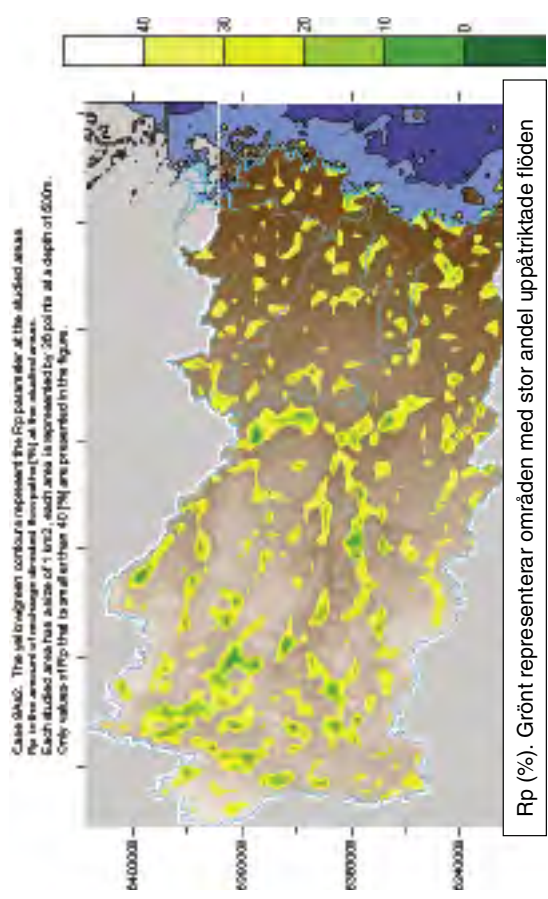
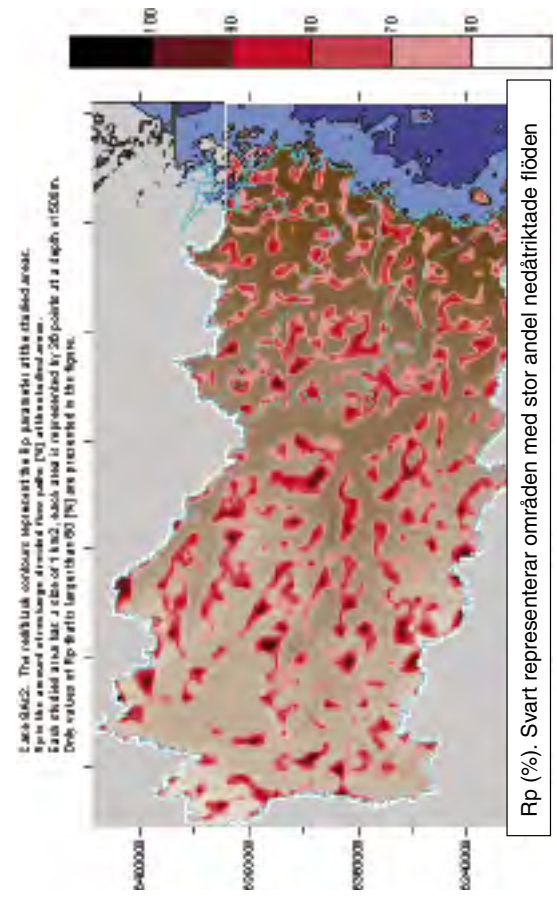


Figur 6-70. Rp-parameter för Fall 8A. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².



Fall 8As2 Statistik för områden med $R_p \geq 90\%$

Percentile	Length[m]	Medianvärden		
		[BT-timela]	[sq[L/m2a]	[Rp[%]
1	1 900	485	0.03	90
5	2 243	1 012	0.05	91
10	2 500	1 475	0.08	92
20	2 813	2 463	0.11	92
30	3 139	3 304	0.15	94
40	3 403	4 165	0.19	94
50	3 735	5 171	0.24	97
60	4 120	7 267	0.31	100
70	4 539	10 549	0.37	100
80	5 216	15 575	0.49	100
90	6 492	29 530	0.79	100
95	7 547	47 634	1.07	100
99	10 793	1.43E+05	1.68	100
Antal områden:				608



Figur 6-71. R_p -parameter för Fall 8As2. Analys av 6 000 försvarsområden på djupet 500 m, varje område är av storlek 1 km².

6.10 Fall 8C och 8D – Lokal heterogenitet och anisotropi

I denna studie ingår ett antal fall för vilka en lokal heterogenitet har definierats för bergets genomsläpplighet (K-värden): (i) mellan deformationszonerna och (ii) för deformationszonerna och diabasgångarna. Alltså är alla delar av modellen, förutom de kvartära avlagringarna, definierade med lokalt heterogena K-värden. Metodiken för hur denna heterogenitet har genererats och inkluderats i de upprättade fallen diskuteras i avsnitt 3.6 och 4.10, samt i bilaga 3. De fall som presenteras i detta avsnitt (Fall 8C och 8D) har förutom den lokala heterogeniteten i K-värden också definierats med en generell anisotropi med avseende på K-värden. De två fallen presenteras nedan:

Fall 8C. Detta beräkningsfall är identiskt med referensfallet förutom att en lokal heterogenitet har definierats för K-värdena i de litologiska enheterna (berg), zoner och diabasgångar. Dessutom är en generell anisotropi definierad för berg, zoner och diabasgångar, denna anisotropi är densamma för alla djup, se figur 6-72. Fall 8C löstes för stationära förhållanden och utan densitetsberoende flöde.

- Den effektiva horisontala genomsläppligheten i Fall 8C är 5 gånger så stor som i referensfallet och i Fall 8A och 8B.
- Den effektiva vertikala genomsläppligheten i Fall 8C är 0,5 gånger så stor som i referensfallet och i Fall 8A och 8B.

Således är genomsläppligheten i horisontalplanet 10 gånger större än genomsläppligheten i vertikalplanet. Detta förhållande är detsamma som användes i Fall 5D (och i Fall 2). Exempel på genererade K-värden ges i figur B3-4.

Fall 8D. Detta beräkningsfall är identiskt med referensfallet förutom att en lokal heterogenitet har definierats för K-värdena i de litologiska enheterna (berg), zoner och diabasgångar. Dessutom är en generell djupavtagande anisotropi definierad för berg, zoner och diabasgångar. Anisotropins djupavtagande presenteras i figur 6-73. Fall 8D löstes för stationära förhållanden och utan densitetsberoende flöde.

- *På djup mellan 0 m och 200 m:*

Den effektiva horisontala genomsläppligheten i Fall 8D är 5 gånger så stor som i referensfallet och i Fall 8A och 8B.

Den effektiva vertikala genomsläppligheten i Fall 8D är 0,5 gånger så stor som i referensfallet och i Fall 8A och 8B.

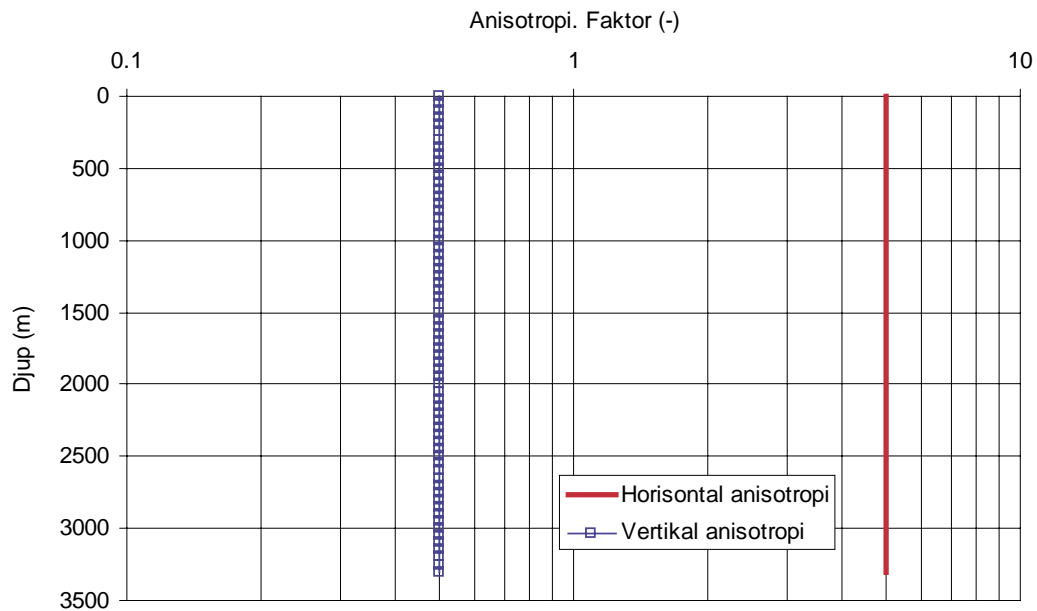
Således är genomsläppligheten i horisontalplanet 10 gånger större än genomsläppligheten i vertikalplanet. Detta förhållande är detsamma som användes i Fall 5D och Fall 8C (och i Fall 2).
- *På djup mellan 200 m och 400 m:*

Anisotropin avtar linjärt med djupet.
- *På djup under 400 m:*

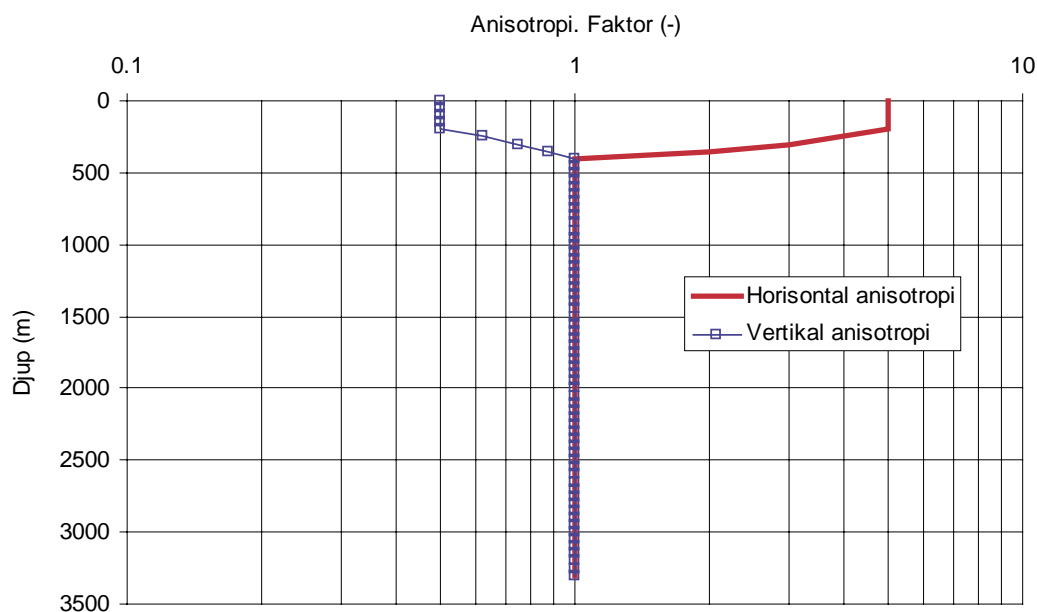
Ingen anisotropi.

Exempel på genererade heterogena K-värden ges i bilaga 3 (lokala K-värden, cellväggarnas K-värden). I figur B3-3 presenteras K-värden från Fall 8A, figur B3-4 presenterar K-värden från Fall 8C och figur B3-5 presenterar K-värden från Fall 8D. En jämförelse mellan figur B3-3 (Fall 8A) och figur B3-4 (Fall 8C) visar att om de genererade K-värdena betraktas som skalärer så har K-värdena i figur B3-4 (Fall 8C) en något större varians än K-värdena i figur B3-3 (Fall 8A), detta följer av att anisotropin ger upphov till en extra spridning i de genererade K-värdena (om de betraktas som skalärer). Som en alternativ

formulering av K-värdena i Fall 8C hade vi alltså kunnat specificera en mindre varians då den lokala heterogeniteten genererades, så att den totala variansen orsakad av lokal heterogenitet och anisotropi hade passat optimalt med variansen i Fall 8A. Denna metod valdes dock inte eftersom vi önskar studera effekten av anisotropi, och inte kalibrera ett fall med anisotropi mot ett fall utan anisotropi.



Figur 6-72. Fall 8C. Definition av anisotropi med avseende på genomsläpplighet. För Fall 8C är anisotropin densamma för alla djup. Anisotropi definieras för litologiska enheter (berg), deformation zoner och diabasgångar, dock ej för de kvartära avlagringarna.



Figur 6-73. Fall 8D. Definition av djupavtagande anisotropi med avseende på genomsläpplighet. På djup mellan 0 m och 200 m är anisotropin konstant. Mellan djupen 200 m och 400 m avtar anisotropin. Under djupet 400 m förekommer ingen anisotropi. Anisotropi definieras för litologiska enheter (berg), deformation zoner och diabasgångar, dock ej för de kvartära avlagringarna.

En jämförelse av flödesvägar från förvarsområden för Fall 8A, 8B, 8C och 8D presenteras i figur 6-74. Fall 8C och 8D visar på flödesvägar i en komplex modell där genomsläppligheten har definierats med lokal heterogenitet och dessutom med en generell anisotropi, konstant eller djupavtagande. En jämförelse av Fall 8C och 8D mot Fall 5 (referensfallet) visar på betydelsen av lokal heterogenitet och generell anisotropi. En jämförelse av Fall 8C och 8D mot Fall 8A visar på betydelsen av generell anisotropi i en modell med lokal heterogenitet.

Betydelse av lokal heterogenitet och konstant anisotropi i jämförelse med referensfallet

En jämförelse mellan (i) Fall 8C och (ii) Fall 5 (referensfallet), visar på det följande (se figur 6-74 och tabell 6-16), avseende median värden för flödesvägar från förvarsområden.

- Längder: För Fall 8C är längderna ca 40–90 % längre.
- Genombrottsid: För Fall 8C är tiderna ca 7–50 % längre.
- Specifika flödet vid startpunkterna: För Fall 8C är flödena ca 50 % större.

Betydelse av konstant anisotropi för modeller med lokal heterogenitet

En jämförelse mellan (i) Fall 8C och (ii) Fall 8A visar på det följande (se figur 6-74, tabell 6-17), avseende median värden för flödesvägar från förvarsområden.

- Längder: För Fall 8C är längderna ca 10–40 % längre.
- Genombrottsid: För Fall 8C är tiderna ca 30–40 % mindre.
- Specifika flödet vid startpunkterna: För Fall 8C är flödena ca 70–80 % större.

Betydelse av lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi i jämförelse med referensfallet

En jämförelse mellan (i) Fall 8D och (ii) Fall 5 (referensfallet), visar på det följande (se figur 6-74 och tabell 6-18), avseende median värden för flödesvägar från förvarsområden.

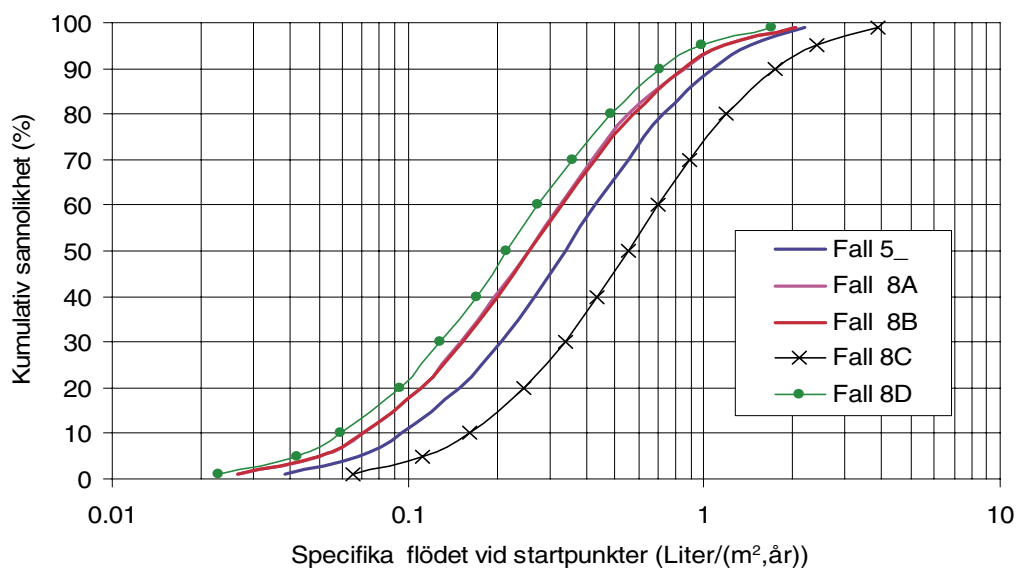
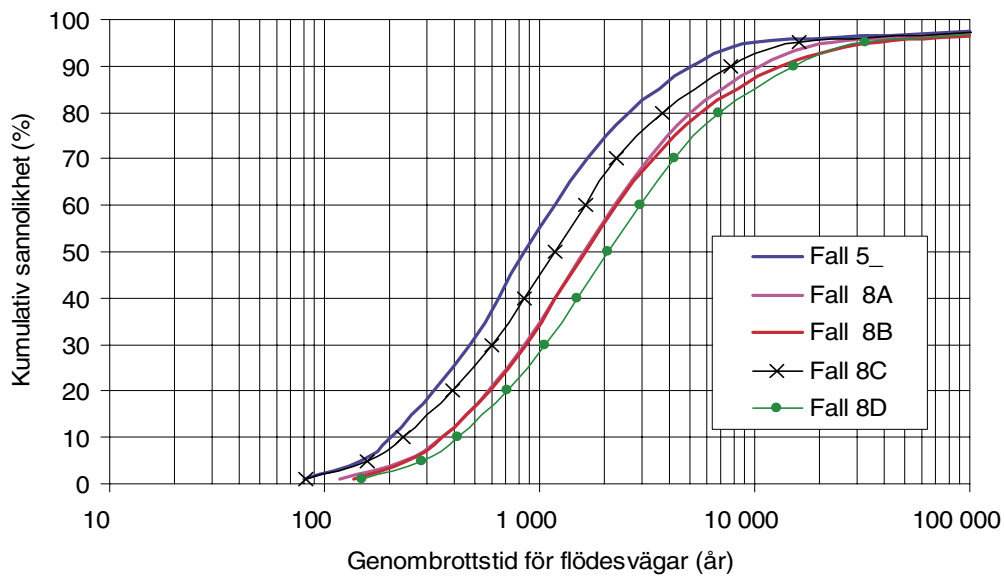
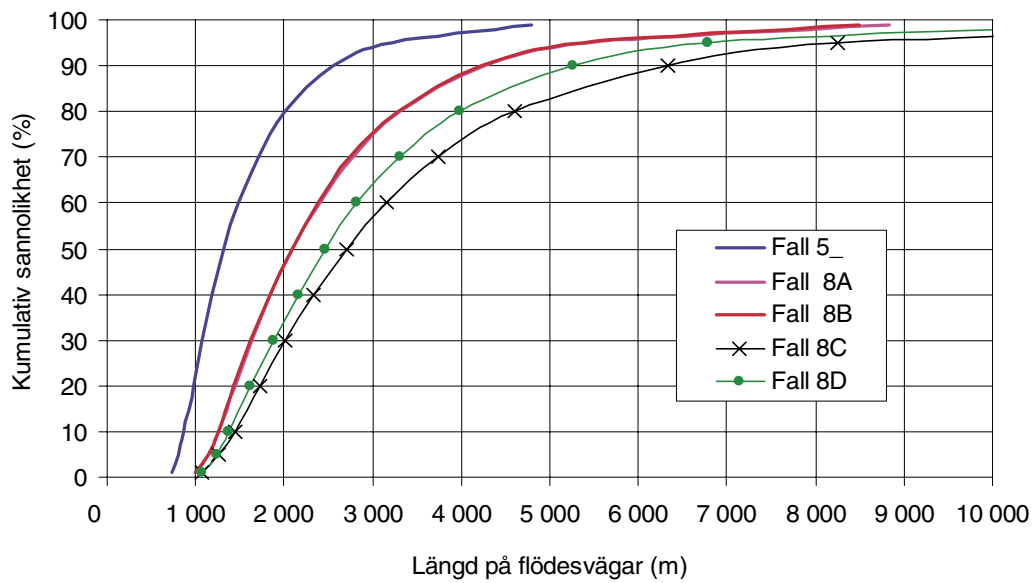
- Längder: För Fall 8D är längderna ca 40–70 % längre.
- Genombrottsid: För Fall 8D är tiderna ca 60–100 % längre.
- Specifika flödet vid startpunkterna: För Fall 8D är flödena ca 30–50 % mindre.

Betydelse av djupavtagande anisotropi för modeller med lokal heterogenitet

En jämförelse mellan (i) Fall 8D och (ii) Fall 8A visar på det följande (se figur 6-74, tabell 6-19), avseende median värden för flödesvägar från förvarsområden.

- Längder: För Fall 8D är längderna ca 10–20 % längre.
- Genombrottsid: För Fall 8D är tiderna ca 20–40 % mindre.
- Specifika flödet vid startpunkterna: För Fall 8D är flödena ca 14–20 % mindre.

Med lokal heterogenitet i modellen blir flödesvägarna genom modellen mer ”slingriga” än då modellen är definierad som homogen i den lokala skalan; från de slingriga flödesvägarna följer större flödeslängder och genombrottsider. Den inkluderade anisotropin i Fall 8C och 8D gör också att flödesvägarna blir ytterligare längre. Störst betydelse har anisotropin då den är definierad som konstant med djupet, när anisotropin avtar med djupet blir dess betydelse mindre.



Figur 6-74. Fall 8A, 8B, 8C och 8D. Jämförelse av flödesvägars egenskaper. Medianvärden för förvarsområden av storlek 1 km².

Andelen långa flödesvägar visas i tabell 6-15. De presenterade fallen är 8A, 8C, 8D samt Fall 5. Tabellen visar att andelen storregionala flödesvägar (> 10 km) är ca 2 % i en modell med lokal heterogenitet men ingen generell anisotropi. Då generell anisotropi införs ökar andelen storregionala flödesvägar till ca 5 %. Om modellen definieras med lokal heterogenitet och dessutom med djupberoende anisotropi (enligt figur 6-73) så blir andelen storregionala flödesvägar ca 3 %.

Andelen storregionala flödesvägar ökar alltså något då lokal heterogenitet inkluderas i modellen, en ytterligare ökning sker då anisotropi införs. Skillnaden skall dock inte tolkas som att det storregionala flödesmönstret radikalt förändras då lokal heterogenitet och anisotropi inkluderas i modellen. Med lokal heterogenitet och djupberoende anisotropi (Fall 8D) så är ca 90 % av alla flödesvägar kortare än 5,3 km, vilket kan betraktas som ett huvudsakligen lokalt flödesmönster.

En areabaserad analys av flödesvägar från förvarsområden har också utförts (se avsnitt 3.8).

- För Fall 8A presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-68.
- För Fall 8As2 presenteras resultaten av förvarsområdesanalysen i figur 6-69.

Vi har beräknat Rp-värden (se avsnitt 3.9) för de studerade förvarsområdena, resultaten presenteras i följande figurer:

- För Fall 8A i figur 6-70.
- För Fall 8As2 i figur 6-71.

Figur 6-75 presenterar en visualisering av flödesvägar från de 1 000 startpunkterna som diskuteras i avsnitt 6.3. Flödesvägar som simulerats i en modell utan lokal heterogenitet (Fall 5) presenteras i figur 6-75 (i); flödesvägar som simulerats i en modell med lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi (Fall 8D) visas i figur 6-75 (ii).

Följande slutsatser erhålles: Fall 8C och 8D uppvisar samma allmänna flödesmönster som Fall 5. Grundvattnets flödesceller är i huvudsak lokala. Andelen storregionala flödesvägar är liten. Den lokala heterogeniteten och en horisontal anisotropi (10 gånger större K i horisontalplanet än i vertikal planet) är inte tillräckligt betydelsefulla systemegenskaper för att förändra flödesmönstret i en storregional skala.

Tabell 6-15. Fall 8A, 8C, 8D samt Fall 5. Andel långa flödesvägar.

Längd	Antal flödesvägar i procent av alla flödesvägar *			
	Fall 8A	Fall 8C	Fall 8D	Fall 5
>= 2 000 m	54	70	64	31
>= 5 000 m	11	20	15	5
>= 8 000 m	4	8	6	1,2
>= 10 000 m	2,3	5,5	3,4	0,6

* Eftersom varje flödesväg representerar en viss area av det studerade modellområdet representerar procentsatserna i tabellen också andelar av modellområdets area.

Tabell 6-16. Fall 8C och Fall 5. Skillnader mellan flödesvägar från djupet 500 m.

Jämförelse mellan Fall 8C och Fall 5. Förvarsområden av storlek 1 km ²			
Percentil	Skillnad i längd i %	Skillnad i genombrottsid i %	Skillnad i specifika flödet vid startpunkterna i %
1	38	3	51
5	44	7	49
10	50	12	51
50	70	32	48
90	85	42	48
95	88	46	50
99	104		55

Skillnaden beräknas som: $100 * [(Fall8C - Fall5) / ((Fall8C + Fall5) / 2)]$

Tabell 6-17. Fall 8C och Fall 8A. Skillnader mellan flödesvägar från djupet 500 m.

Jämförelse mellan Fall 8C och Fall 8A. Förvarsområden av storlek 1 km ²			
Percentil	Skillnad i längd i %	Skillnad i genombrottsid i %	Skillnad i specifika flödet vid startpunkterna i %
1	6	-35	84
5	11	-38	76
10	14	-41	78
50	26	-32	73
90	39	-31	67
95	41	-36	69
99	53		63

Skillnaden beräknas som: $100 * [(Fall8C - Fall8A) / ((Fall8C + Fall8A) / 2)]$

Tabell 6-18. Fall 8D och Fall 5. Skillnader mellan flödesvägar från djupet 500 m.

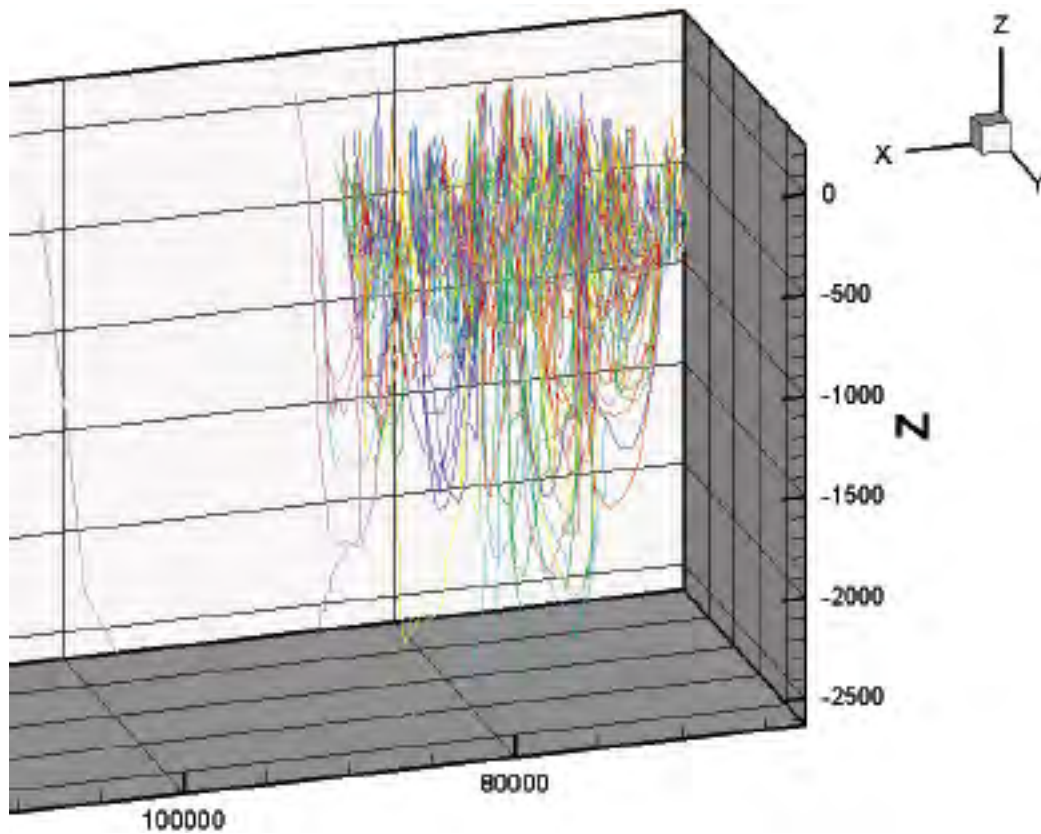
Jämförelse mellan Fall 8D och Fall 5. Förvarsområden av storlek 1 km ²			
Percentil	Skillnad i längd i %	Skillnad i genombrottsid i %	Skillnad i specifika flödet vid startpunkterna i %
1	38	61	-50
5	41	63	-46
10	45	67	-47
50	61	84	-46
90	70	99	-40
95	72	107	-38
99	79		-25

Skillnaden beräknas som: $100 * [(Fall8D - Fall5) / ((Fall8D + Fall5) / 2)]$

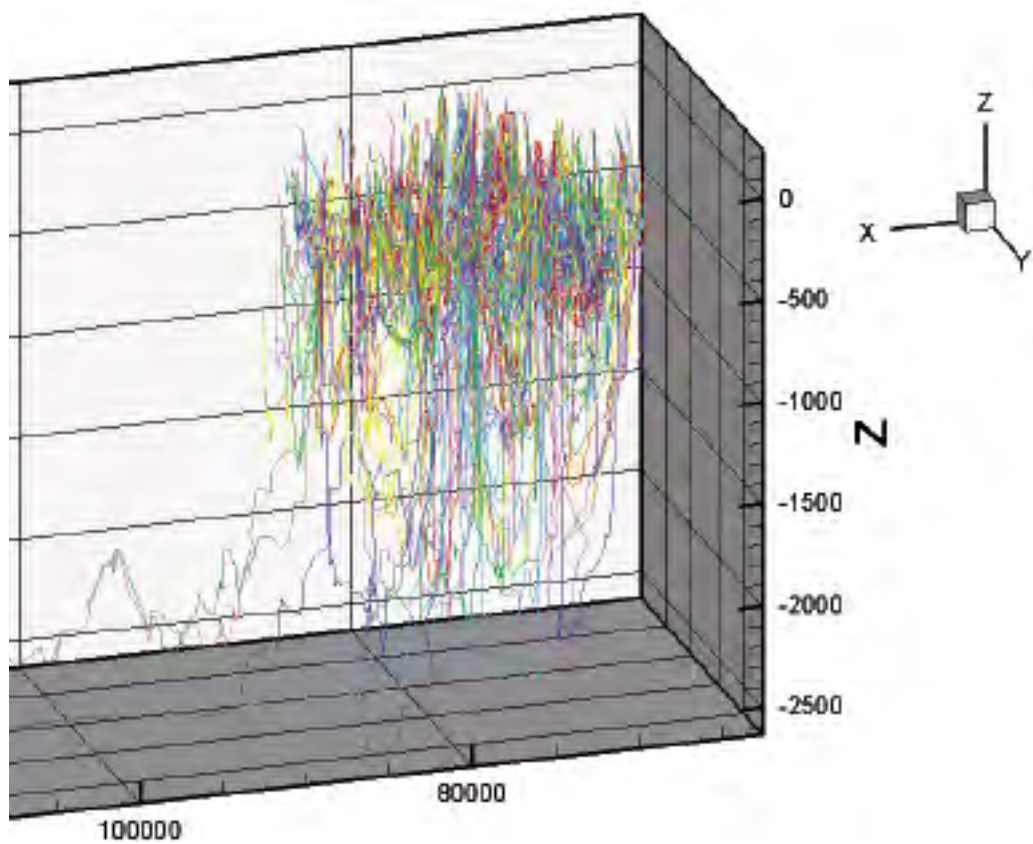
Tabell 6-19. Fall 8D och Fall 8A. Skillnader mellan flödesvägar från djupet 500 m.

Jämförelse mellan Fall 8D och Fall 8A. Förvarsområden av storlek 1 km ²			
Percentil	Skillnad i längd i %	Skillnad i genombrottsid i %	Skillnad i specifika flödet vid startpunkterna i %
1	7	25	-14
5	8	20	-17
10	10	17	-17
50	16	24	-18
90	21	35	-19
95	22	36	-17
99	22		-17

Skillnaden beräknas som: $100 * [(Fall8D - Fall8A) / ((Fall8D + Fall8A) / 2)]$



(i) Fall 5, referensfallet (djupavtagande genomsläpplighet, ingen lokal heterogenitet etc).



(ii) Fall 8D, djupavtagande genomsläpplighet, och lokal heterogenitet samt djupavtagande anisotropi.

Figur 6-75. Fall 5 och Fall 8D. Perspektivbild av 1 000 visualiserade flödesvägar. Notera att den vertikala skalan är 12 gånger större än den horisontala skalan.

6.11 Betydelse av anisotropi – en jämförelse av resultat från olika beräkningsfall

En horisontal anisotropi för genomsläppligheten – en ökning av genomsläppligheten med 10 gånger i horisontalplanet – har studerats i fyra olika fall i denna studie: (i) Fall 2 som är en homogen modell med anisotropi. (ii) Fall 5D som är en komplex modell med djupavtagande genomsläpplighet och anisotropi. (iii) Fall 8C som är en komplex modell med djupavtagande genomsläpplighet, lokal heterogenitet och anisotropi, samt (iv) Fall 8D som är en komplex modell med djupavtagande genomsläpplighet, lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi.

För att visa betydelsen av anisotropin har vi jämfört dessa fyra fall med motsvarande fall utan anisotropi, resultat ges i tabell 6-20.

Om vi summerar betydelsen av anisotropi och längd får vi följande resultat:
(Den studerade anisotropin är lika med en ökning av den horisontala genomsläppligheten så att den blir 10 gånger så stor som den vertikala.)

Homogen modell: Fall 1 och Fall 2

När anisotropin införs i en homogen modell utan djupavtagande genomsläpplighet så påverkas flödesvägarna från förvarsområden enligt det följande (i jämförelse med en modell utan anisotropi):

Längd: Vid medianen en ökning med 94 %
Genombrottsid: Vid medianen en minskning med 31 %

Modell med djupavtagande K: Fall 5 och Fall 5D

När anisotropin införs i en modell med djupavtagande genomsläpplighet så påverkas flödesvägarna enligt det följande (i jämförelse med en modell med djupavtagande genomsläpplighet men ingen anisotropi):

Längd: Vid medianen en ökning med 43 %
Genombrottsid: Vid medianen en minskning med 25 %

Modell med djupavtagande K och lokal heterogenitet: Fall 8A och Fall 8C

När anisotropin införs i en modell med djupavtagande genomsläpplighet och lokal heterogenitet så påverkas flödesvägarna enligt det följande (i jämförelse med en modell med djupavtagande genomsläpplighet och lokal heterogenitet men ingen anisotropi):

Längd: Vid medianen en ökning med 26 %
Genombrottsid: Vid medianen en minskning med 32 %

Modell med djupavtagande K och lokal heterogenitet: Fall 8A och Fall 8D

När djupavtagande anisotropi införs i en modell med djupavtagande genomsläpplighet och lokal heterogenitet så påverkas flödesvägarna enligt det följande (i jämförelse med en modell med djupavtagande genomsläpplighet och lokal heterogenitet men ingen anisotropi):

Längd: Vid medianen en ökning med 16 %
Genombrottsid: Vid medianen en ökning med 24 %

(Djupavtagande anisotropi är definierad som: Mellan djupen 0 m och 200 m är anisotropin konstant. Mellan djupen 200 m och 400 m avtar anisotropin. Under djupet 400 m förekommer ingen anisotropi.)

Slutsats av simuleringar med anisotropi (ökade genomsläpplighet i horisontalplanet)

Resultaten visar att en generell anisotropi är av stor betydelse i en modell med homogena egenskaper, för den homogena modellen påverkar horisontal anisotropi (ökad genomsläpplighet i horisontalplanet) det storregionala flödesmönstret. I en komplex modell med djupavtagande genomsläpplighet är generell horisontal anisotropi inte lika betydelsefull. Ännu mindre betydelsefull är generell horisontal anisotropi i en modell med djupavtagande genomsläpplighet och lokal heterogenitet. Om en generell horisontal anisotropi slutligen definieras som tydligt avtagande med djupet (på djup över förvarsdjup) i en modell med djupavtagande genomsläpplighet och lokal heterogenitet så blir betydelsen av horisontal anisotropi relativt ringa för flödesvägar från förvarsdjup (ringa betydelse i jämförelse med t ex topografins betydelse).

Tabell 6-20. Betydelse av anisotropi. Skillnader mellan flödesvägar från djupet 500 m.

Percentil	Skillnad i procent då de olika fallen jämförs parvis *							
	Fall 2 mot Fall 1		Fall 5D mot Fall 5		Fall 8C mot Fall 8A		Fall 8D mot Fall 8A	
	Längd	Tid	Längd	Tid	Längd	Tid	Längd	Tid
1	23	-38	14	-72	6	-35	7	25
5	34	-41	18	-59	11	-38	8	20
10	44	-45	23	-52	14	-41	10	17
50	94	-31	43	-25	26	-32	16	24
90	122	5	57	-21	39	-31	21	35
95	137	32	61	-20	41	-36	22	36
99	133		77		53		22	

* Skillnaden beräknas som: $100 * [(FallX - FallY) / ((FallX + FallY) / 2)]$

7 Jämförelse av förvarsområden

7.1 Inledning och metodik

I detta kapitel jämförs beräknade hydrogeologiska egenskaper för de olika studerade förvarsområdena. Förutom de egenskaper som jämförs i denna studie har ett verkligt förvarsområde ett mycket stort antal andra egenskaper som inte analyseras och jämförs i denna studie tex, bergmekaniska och geokemiska. Jämförelserna som presenteras i detta kapitel baseras endast på ett fåtal hydrogeologiska aspekter.

Bergets egenskaper kan variera kraftigt i den lokala skalan inom ett studerat förvarsområde (t ex i skalan för olika kapselpositioner), en sådan detaljerad variation i bergets egenskaper är inte inkluderad i denna studie. Simulerade flödesvägar i en detaljerad skala (från t ex kapselpositioner) uppvisar ofta en mycket stor spridning i flödesvägarnas egenskaper; sådana detaljerade flödesvägar har inte simulerats i denna studie. Det är fullt möjligt att spridningen i egenskaperna hos teoretiska flödesvägar från kapselpositioner inom ett studerat förvarsområde kan vara större än den spridning i medelvärden för flödesvägarnas egenskaper som vi erhåller när vi jämför olika förvarsområden. Denna studies resultat bör endast användas för att översiktligt bedöma olika platsers hydrogeologiska lämplighet.

De 6 000 studerade förvarsområdena presenteras i figur 3-2, förvarsområdena är fyrkantiga och av storleken 1 km². Varje förvarsområde representeras av 36 flödesvägar och för varje förvarsområde beräknas ett antal olika egenskaper, baserat på flödesvägarna från det studerade förvarsområdet. Metodik för dessa beräkningar diskuteras i avsnitt 3.8 och 3.9.

För varje förvarsområde har vi beräknat följande egenskaper:

- Medianvärden för flödesvägarnas längd.
- Minimivärden för flödesvägarnas längd.
- Medianvärden för genombrotts tid
- Medianvärden för det specifika flödet vid flödesvägarnas startpunkter.
- Värdet på Rp-parametern (Rp definieras i avsnitt 3.9).

Jämförelsen av förvarsområden som presenteras i detta kapitel baseras på dessa fem egenskaper, men inte nödvändigtvis på alla fem egenskaperna samtidigt.

Jämförelserna (sorteringarna) avser alla de 6 000 teoretiska förvarsområdena; alltså inte bara områden som förekommer i bergarter (litologiska enheter) som är klassificerade som olika typer av granit, utan testerna avser även områden i andra bergarter, som är klassificerade som t ex "sura vulkaniska bergarter".

En test för flöden blir känslig både för den hydrauliska gradienten och för bergarternas genomsläpplighet. Storlek på grundvattenflöde är nära kopplat till genomsläpplighet. Av denna anledning kommer en icke obetydlig andel av de förvarsområden som har passerat en flödestest avseende små flöden att förekomma i litologiska enheter med små värden på genomsläpplighet (små effektivvärden), och där den lokala genomsläppligheten är liten.

En test för flödesvägars längd är mindre känslig för bergarternas genomsläpplighet eftersom längderna huvudsakligen beror av grundvattnets flödesmönster, som i sin tur huvudsakligen beror av topografin.

En test för genombrotts-tider beror av både flödesmönster, genomsläpplighet och hydraulisk-gradient (och porositet).

Långa genombrotts-tider kan erhållas från förvarsområden under sjöar, nära kustlinjen (och under öar). Detta beror på att flödet under havet, och under stora sjöar, är mycket litet på grund av att den hydrauliska gradienten är liten under hav och stora sjöar. Denna effekt bör dock ställas i relation till landhöjningprocessen som kan påverka flödesvägar under havet med långa genombrotts-tider och gör genombrotts-tiderna kortare för sådana flödesvägar. (De flödesvägar som har analyserats i denna studie är beräknade för ett stationärt flödesfält representerande situation för år 2000 AD.)

Som diskuterats i avsnitt 3.11 representerar genombrotts-tiderna i den upprättade modellen också transportmotståndet (även om de absoluta värdena inte är desamma), alltså är en jämförelse av förvarsområden baserad på specifika flöden och genombrotts-tiderna också en jämförelse av specifika flödet och transportmotståndet (detta gäller för den upprättade modellen eftersom porositeten är konstant).

En jämförelse av transportmotstånd är mycket intressant eftersom transportmotståndet bestämmer hur mycket olika nuklider fördröjs på grund av matrisdiffusion och sorption. Vid höga värden på transportmotståndet kommer de flesta radionuklider som eventuellt skulle kunna frigöras från ett förvar att fördröjas kraftigt.

Med avseende på de simulerade flödesvägarna från olika förvarsområden är det två egenskaper som är särskilt intressanta: (i) stort transportmotstånd och (ii) små flöden vid startpunkterna. Detta diskuteras också i t ex /Andersson et al. 2000/.

De resulterande egenskaperna från ett förvarsområde (dvs flödesvägarnas längd, genombrotts-tid och flödet vid startpunkterna) kan för en del förvarsområden uppvisa en stor varians (t ex kan det förekomma både långa och korta flödesvägar inom samma område). En orsak till denna varians är att de studerade förvarsområdenas form inte har optimerats för att enbart inkludera t ex långa flödesvägar utan områdenas form följer ett i förhand givet rutnät. Detta kan leda till en viss underskattning av egenskaperna hos förvarsområden med potentiellt intressanta egenskaper, eftersom sådana områden i modellen ofta också inkluderar en viss andel mindre bra flödesvägar. Det är teoretiskt möjligt att optimera områdenas form och därmed erhålla områden med mer homogena egenskaper. En sådan optimering är dock inte utförd i denna studie.

Ett antal olika jämförelser och tester (ca 22 stycken) har utförts för de studerade förvarsområdena och flödesvägarna från dessa områden. För att få en överblick av de olika utförda testerna (jämförelserna) presenteras dessa kortfattat i tabell 7-1.

Tabell 7-1. Kortfattad presentation av olika utförda tester och jämförelser av förvarsområden.

Olika tester och jämförelser av förvarsområden			
Test ID	Metodik	Studerade Fall	Resultat
Test 1B	Snittet av: 1 000 områden med längsta tiderna. 1 000 områden med minsta flödena.	5s2	Figur 7-1 Tabell 7-2
		8As2	Figur 7-3 Tabell 7-4
		8D	Figur 7-5
Test 1C	Snittet av: 1 000 områden med längsta tiderna. 1 000 områden med minsta flödena. Dessutom: Nedåtriktat flöde: Rp > 90 %	5s2	Figur 7-2 Tabell 7-3
		8As2	Figur 7-4 Tabell 7-5
		8D	Figur 7-6
Test 1A	Snittet av: 1 000 områden med längsta tiderna. 1 000 områden med minsta flödena. 1 000 områden med längsta vägarna.	5s2	Figur 7-7 Tabell 7-6
		8As2	Figur 7-8 Tabell 7-7
		8D	Figur 7-9
Test RA	Jämförelse av områden med Rp > 90 % (nedåtriktat flöde) för ett antal fall med delvis mycket olika systemegenskaper. Förvarsområden med Rp > 90 % som förekommer gemensamt i de studerade fallen (en serie av utvalda fall) har passerat Test RA.	Serie 1. Fall: 1, 2, 3, 4, 5	Figur 7-10
		Serie 2. Fall: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1, 5s2	Figur 7-11
		Serie 3. Fall: 1, 2, 3, 4, 5, 8A	Figur 7-12
		Serie 4. Fall: 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2, 8As2	Figur 7-13
		Serie 5. Fall: 1, 2, 3, 4, 5, 8B	Figur 7-14
Test RB1	Avser endast förvarsområden som utvalts av (passerat) Test RA. Serie 2 (Figur 7-11). Dessutom: Medianvärdet för genombrottstiden måste vara bland de 20 % största tiderna.	5s2	Figur 7-15 Tabell 7-9
Test RB2	Som Test RB1, men dessutom: Det specifika flödet vid flödesvägarnas startpunkter < 0,5 Liter/(m ² ,år). Minimivärde för flödesvägarnas längd inom ett område > 1 500 m.	5s2	Figur 7-16 Tabell 7-10

Tabell 7-1. Fortsättning.

Olika tester och jämförelser av förvarsområden			
Test ID	Metodik	Studerade Fall	Resultat
Test P1	Jämförelse av områden med långa genombrottstider och långa flödesvägar för ett antal fall med olika systemegenskaper. Snittet av: 1 000 områden med längsta tiderna. 1 000 områden med längsta vägarna. För ett antal olika fall. Områden som passerar testen ovan och dessutom förekommer gemensamt i de studerade fallen har passerat Test P1.	Serie 2. Fall: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1, 5s2 Serie 4. Fall: 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2, 8As2	Figur 7-22 Tabell 7-11 Figur 7-23 Tabell 7-12
Test P2	Jämförelse av områden med långa genombrottstider och små flöden för ett antal fall med olika systemegenskaper. Snittet av: 1 000 områden med längsta tiderna. 1 000 områden med minsta flödena. För ett antal olika fall. Områden som passerar testen ovan och dessutom förekommer gemensamt i de studerade fallen har passerat Test P2.	Serie 2. Fall: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1, 5s2 Serie 4. Fall: 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2, 8As2	Figur 7-24 Tabell 7-13 –
Test P3	Jämförelse av områden med långa flödesvägar, långa genombrottstider och små flöden för ett antal fall med olika systemegenskaper. Snittet av: 1 000 områden med längsta vägarna. 1 000 områden med längsta tiderna. 1 000 områden med minsta flödena. För ett antal olika fall. Områden som passerar testen ovan och dessutom förekommer gemensamt i de studerade fallen har passerat Test P3.	Serie 2. Fall: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1, 5s2 Serie 4. Fall: 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2, 8As2	Figur 7-25 Tabell 7-14 –

7.2 Test avseende långa genombrottstider och små flöden – Test 1B och Test 1C

Förvarsområden med långa genombrottstider och små specifika flöden är potentiellt intressanta områden. Vi har därför sorterat de 6 000 studerade förvarsområdena efter medianvärden på flödesvägarnas genombrottstid och storlek på det specifika flödet.

Två olika listor har upprättats:

- De 1 000 förvarsområdena med de längsta genombrottstiderna (medianvärden).
- De 1 000 förvarsområdena med de minsta specifika flödena (medianvärden).

De studerade värdena motsvarar 17 % av alla värden (1 000 värden av total 6 026). Alltså de längsta genombrottstiderna (17 % av alla värden). Och de minsta specifika flödena (17 % av alla värden). Listorna är oberoende av varandra, olika förvarsområden kan således förekomma i de båda listorna.

Test 1B. Förvarsområden som förekommer i båda listorna är områden med långa genombrottstider och små specifika flöden. Sådana områden har passerat det vi kallar Test 1B.

Test 1B kan också matematiskt beskrivas som: Snittet (gemensamma områden) bland delmängderna: (i) De 1 000 förvarsområdena med de längsta genombrotstiderna och (ii) De 1 000 förvarsområdena med de minsta specifika flödena.

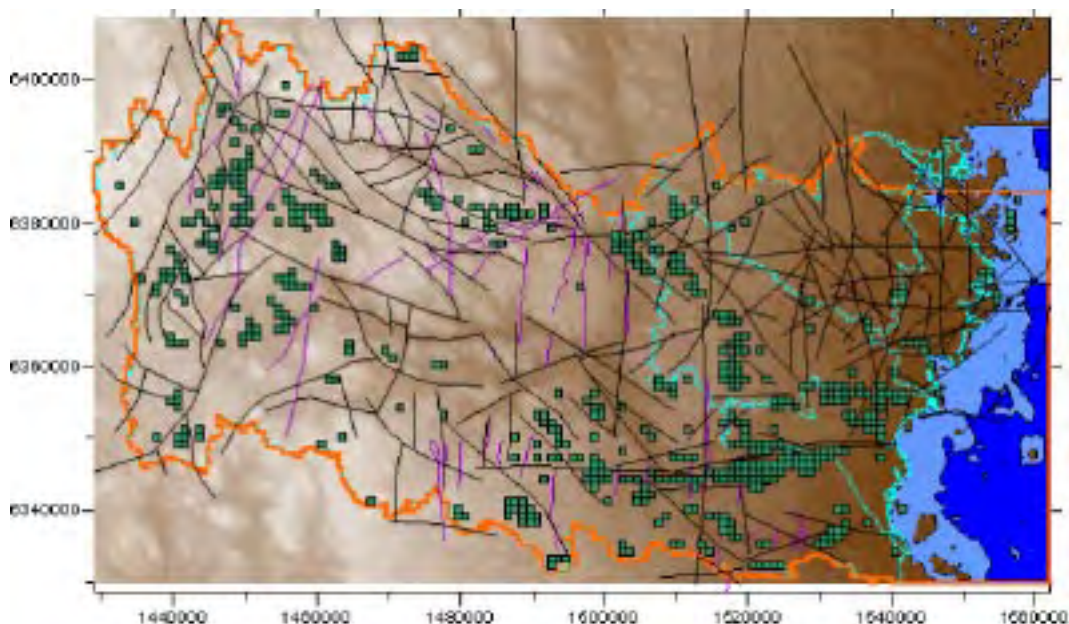
Test 1C. Ytterligare villkor kan dessutom läggas till den ovan beskrivna testen, till exempel att bara acceptera förvarsområden med enbart nedåtriktat grundvattenflöde. Områden som har passerat det vi kallar Test 1B, och som dessutom är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$), sådana områden har passerat det vi kallar Test 1C.

Vi har valt att utföra dessa analyser för Fall 5s2, Fall 8As2 och Fall 8D. Fall 5s2 är referensfallet simulerat med densitetsberoende flöde. Fall 8As2 är identiskt med Fall 5s2 förutom att lokal heterogenitet är inkluderad i bergets egenskaper. Fall 8D är ett fall där berget är definierat med lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi.

7.2.1 Test 1B för Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde)

Förvarsområden som förekommer i båda listorna är områden med långa genombrotstider och små specifika flöden. En jämförelse av de två listorna avslöjar att för Fall 5s2 förekommer 526 områden i båda listorna (9 % av alla områden). Dessa områdens placering framgår av figur 7-1. Statistik för dessa områden presenteras i tabell 7-2.

De specifika flödena är små för alla förvarsområden som passerat Test 1B, mindre än 0,11 Liter/(m²,år) (percentil 99). Genombrotstiderna varierar mellan 3 700 år (percentil 1) och 124 000 år (percentil 99), medianen är 7 000 år, detta illustrerar den stora variation i genombrotstider som förekommer även bland områden som passerat Test 1B. De presenterade R_p -värdena i tabell 7-2 demonstrerar att bland de områdena som passerat Test 1B finns områden med både uppåtriktat grundvattenflöde och områden med nedåtriktat grundvattenflöde.



Figur 7-1. Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde). Test 1B. Förvarsområden med långa genombrotstider och små specifika flöden. Förvarsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrotstiderna och (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet. 526 förvarsområden finns på båda listorna, dessa områden är markerade med gröna rutor i figuren ovan.

Tabell 7-2. Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde). Test 1B. Förfvarsområden med långa genombrottsstider och små specifika flöden. Förfvarsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrottsstiderna och (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet. 526 förfvarsområden finns på båda listorna, statistik för dessa områden presenteras i tabellen nedan. (Värdena i varje kolumn är beräknade som oberoende av värdena i övriga kolumner, dvs en viss percentil representerar inte samma förfvarsområde i de olika kolumnerna.)

Fall 5s2: Statistik för områden som passerat Test 1B					
Percentil	Medianvärden				Minimum
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
1	801	3 733	0.02	0	558
5	1 023	3 878	0.03	10	625
10	1 122	4 050	0.03	22	676
20	1 333	4 545	0.04	39	728
30	1 497	5 146	0.05	50	790
40	1 718	6 001	0.06	61	859
50	1 970	6 996	0.06	72	930
60	2 184	8 351	0.07	81	1011
70	2 621	10 643	0.08	89	1189
80	3 249	13 212	0.09	94	1416
90	4 371	23 677	0.10	100	1873
95	5 512	43 358	0.10	100	2183
99	8 217	1.24E+05	0.11	100	2988
Antal områden		526			

Förfvarsområden som har passerat Test 1B förekommer över hela det studerade modellområdet, förutom i områdets centrala delar där den topografiska gradienten är stor. (Stora topografiska gradienter leder ofta till flödesvägar med korta genombrottsstider.)

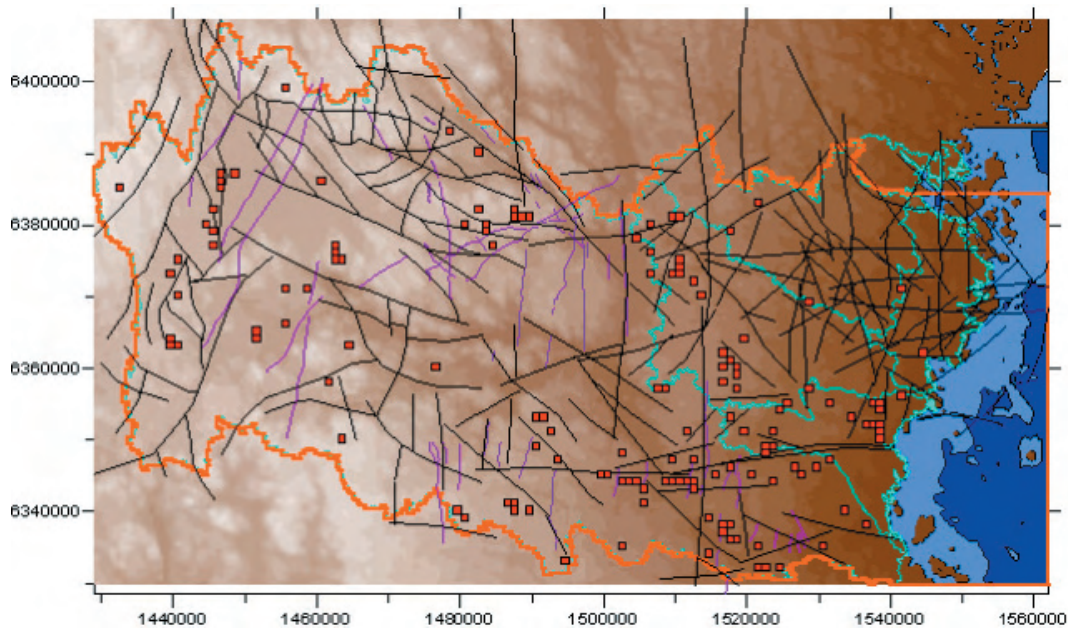
7.2.2 Test 1C för Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde)

Områden som har passerat det vi kallar Test 1B och dessutom är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$), sådana områden har passerat det vi kallar Test 1C.

Tilläggs villkoret att bara godkänna områden från Test 1B med enbart nedåtriktade grundvattenflöden ($R_p > 90\%$) leder till att bara 140 områden passerar Test 1C (2 % av alla områden). Dessa områdens placering framgår av figur 7-2. Statistik för dessa områden presenteras i tabell 7-3

De specifika flödena är små för alla förfvarsområden som passerat Test 1C, mindre än 0,11 Liter/(m²,år) (percentil 99). Genombrottsstiderna varierar mellan 4 000 år (percentil 1) och 149 000 år (percentil 99), medianen är 11 600 år, detta illustrerar den stora variation i genombrottsstider som förekommer även bland områden som passerat Test 1C.

Förfvarsområden som har passerat Test 1C förekommer över hela det studerade modellområdet, förutom i områdets centrala delar där den topografiska gradienten är stor. (Stora topografiska gradienter leder ofta till flödesvägar med korta genombrottsstider.)



Figur 7-2. Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde). Test 1C. Förvarsområden med långa genombrottsstider, små specifika flöden och nedåtriktade grundvattenflöden. Förvarsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrottsstiderna och (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet. Dessutom godkänns endast områden med Rp-värden > 90 %. 140 förvarsområden passerar testen, dessa områden är markerade med röda rutor i figuren ovan.

Tabell 7-3. Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde). Test 1C. Förvarsområden med långa genombrottsstider, små specifika flöden och nedåtriktade grundvattenflöden. Förvarsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrottsstiderna och (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet. Dessutom godkänns endast områden med Rp-värden > 90 %. 140 förvarsområden passerar testen, statistik för dessa områden presenteras i tabellen nedan. (Värdena i varje kolumn är beräknade som oberoende av värdena i övriga kolumner, dvs en viss percentil representerar inte samma förvarsområde i de olika kolumnerna.)

Fall 5s2: Statistik för områden som passerat Test 1C					
Percentil	Medianvärden				Minimum
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
1	1 334	3 948	0.03	90	632
5	1 726	4 989	0.04	91	827
10	1 970	5 749	0.04	92	887
20	2 131	6 723	0.05	92	986
30	2 416	8 545	0.06	94	1090
40	2 653	9 979	0.07	100	1290
50	3 012	11 569	0.08	100	1418
60	3 287	15 170	0.08	100	1603
70	3 614	21 042	0.09	100	1791
80	4 467	29 382	0.10	100	2010
90	5 616	47 698	0.11	100	2447
95	7 077	76 510	0.11	100	2756
99	9 174	1.49E+05	0.11	100	4321
Number of areas:		140			

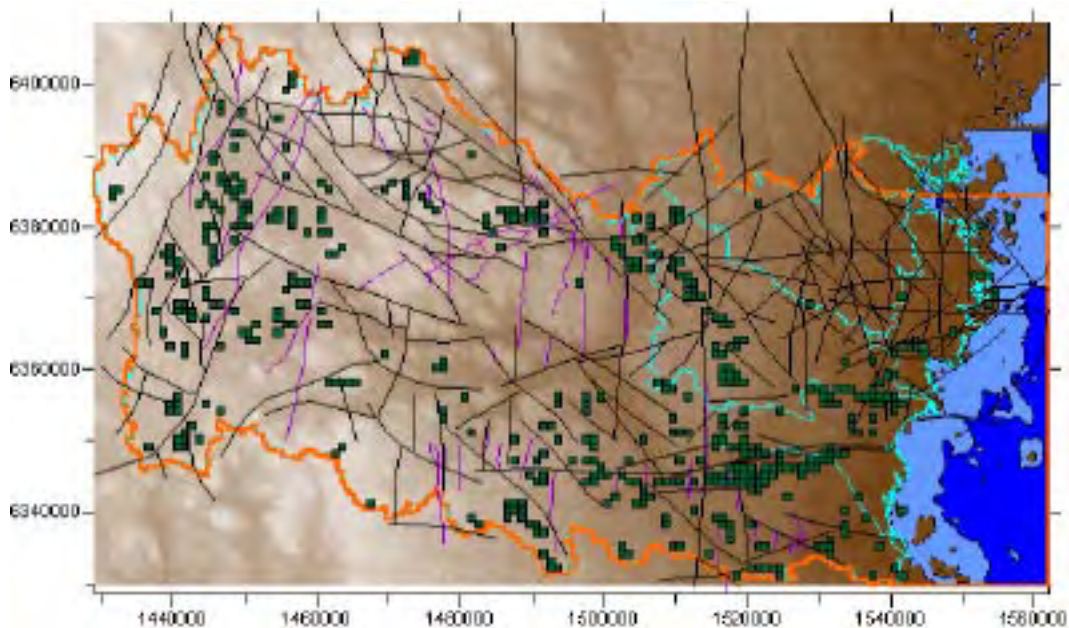
7.2.3 Test 1B för Fall 8As2 (som referensfallet men med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde)

Förvarsområden som förekommer i de båda listorna som diskuteras i avsnitt 7.2 är områden med långa genombrotstider och små specifika flöden. För Fall 8As2 visar en jämförelse av de två listorna att 457 förvarsområden förekommer i båda listorna (8 % av alla områden). Dessa områdens placering framgår av figur 7-3. Statistik för dessa områden presenteras i tabell 7-4

De specifika flödena är små för alla förvarsområden som passerat Test 1B, mindre än 0,09 Liter/(m²,år) (percentil 99). Genombrotstiderna varierar mellan 5 200 år (percentil 1) och 166 000 år (percentil 99), medianen är 10 100 år, detta illustrerar den stora variation i genombrotstider som förekommer även bland områden som passerat Test 1B. Rp-värdena i tabell 7-4 demonstrerar att bland de områden som passerar Test 1B finns områden med både uppåtriktat grundvattenflöde och områden med nedåtriktat grundvattenflöde.

En jämförelse av figur 7-1 (Fall 5s2) och figur 7-3 (Fall 8As2) visar på det följande:

Färre förvarsområden passerar Test 1B när Fall 8As2 studeras än när Fall 5s2 studeras. För Fall 8As2 förekommer godkända förvarsområden i samma delar av modellen som för Fall 5s2, dock finns det tydliga skillnader mellan figurerna i den lokala skalan. De små skillnaderna i den större regionala skalan visar att den lokala heterogeniteten inte påverkar det regionala flödesmönstret, de större skillnaderna i den lokala skalan indikerar dock att den lokala heterogeniteten påverkar det lokala flödesmönstret.



Figur 7-3. Fall 8As2 (lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde). Test 1B. Förvarsområden med långa genombrotstider och små specifika flöden. Förvarsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrotstiderna och (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet. 457 förvarsområden finns på båda listorna, dessa områden är markerade med gröna rutor i figuren ovan.

Tabell 7-4. Fall 8As2 (lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde). Test 1B. Förvarsområden med långa genombrottstider och små specifika flöden. Förvarsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrottstiderna och (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet. 457 förvarsområden finns på båda listorna, statistik för dessa områden presenteras i tabellen nedan. (Värdena i varje kolumn är beräknade som oberoende av värdena i övriga kolumner, dvs en viss percentil representerar inte samma förvarsområde i de olika kolumnerna.)

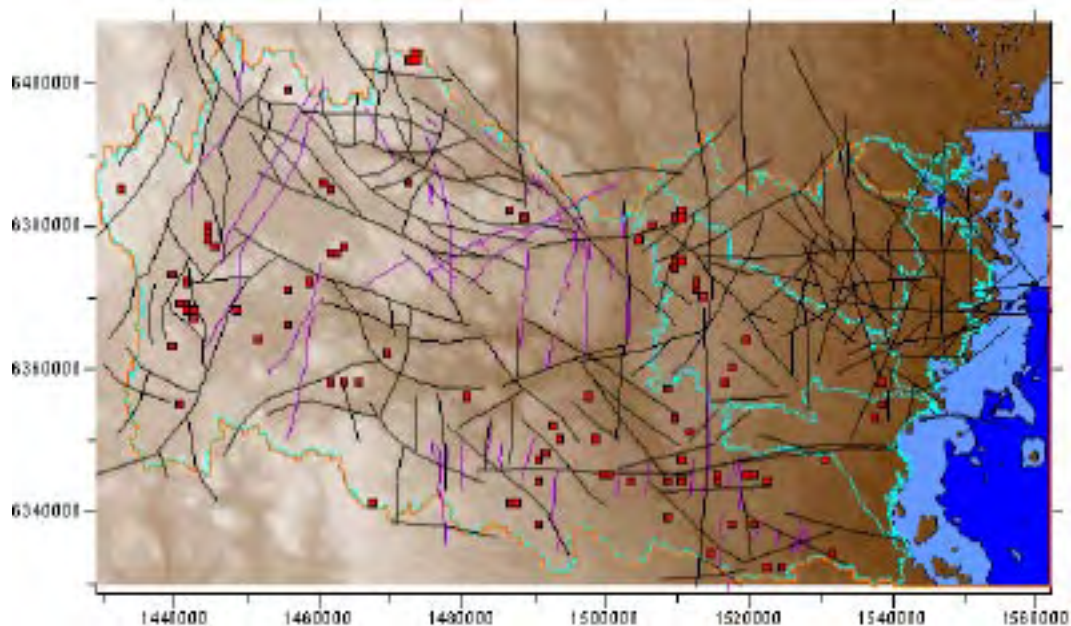
Fall 8As2: Statistik för områden som passerat Test 1B					
Percentil	Medianvärden				Minimum
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
1	1 346	5 206	0.01	5	683
5	1 571	5 476	0.02	19	823
10	1 814	5 748	0.03	29	878
20	2 119	6 682	0.03	47	1003
30	2 436	7 664	0.04	56	1114
40	2 803	8 439	0.05	65	1224
50	3 255	10 112	0.06	71	1368
60	3 601	11 855	0.06	78	1512
70	4 025	14 901	0.07	83	1735
80	5 023	21 833	0.08	89	2054
90	6 677	37 804	0.08	100	2492
95	7 907	62 893	0.09	100	2980
99	11 137	1.66E+05	0.09	100	5013
Antal områden		457			

7.2.4 Test 1C för Fall 8As2 (som referensfallet men med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde)

Områden som har passerat det vi kallar test Test 1B och dessutom är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$), sådana områden har passerat det vi kallar Test 1C. För Fall 8As2 leder tilläggs villkoret att bara godkända områden från Test 1B med enbart nedåtriktade grundvattenflöden ($R_p > 90\%$) till att endast 86 områden passerar Test 1C (drygt 1 % av alla områden). Dessa områdens placering framgår av figur 7-4. Statistik för dessa områden presenteras i tabell 7-5.

De specifika flödena är små för alla förvarsområden som passerat Test 1C, mindre än 0,09 Liter/(m²,år) (percentil 95). Genombrottstiderna varierar mellan 7 000 år (percentil 5) och 112 000 år (percentil 95), medianen är 19 000 år, detta illustrerar den stora variation i genombrottstider som förekommer även bland områden som passerat Test 1C.

En jämförelse av figur 7-2 (Fall 5s2) och figur 7-4 (Fall 8As2) visar att placeringen av områden som passerat Test 1C är regionalt sett ungefär desamma för Fall 5s2 och för Fall 8As2, men lokalt förekommer skillnader, på grund av den lokala heterogeniteten i Fall 8As2. Förvarsområden som har passerat Test 1C förekommer över hela det studerade modellområdet, förutom i områdets centrala delar där den topografiska gradienten är stor, och i områdets nordvästra delar inom Marströmmens avrinningsområde



Figur 7-4. Fall 8As2 (lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde). Test 1C. Förvarsområden med långa genombrottstider, små specifika flöden och nedåtriktade grundvattenflöden. Förvarsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrottsledningarna och (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet. Dessutom godkänns endast områden med Rp-värden > 90 %. För Fall 8As2 passerar 86 förvarsområden testen, dessa områden är markerade med röda rutor i figuren ovan.

Tabell 7-5. Fall 8As2 (lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde). Test 1C. Förvarsområden med långa genombrottsleder, små specifika flöden och nedåtriktade grundvattenflöden. Förvarsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrottsledningarna och (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet. Dessutom godkänns endast områden med Rp-värden > 90 %. För Fall 8As2 passerar 86 förvarsområden testen, statistik för dessa områden presenteras i tabellen nedan. (Värdena i varje kolumn är beräknade som oberoende av värdena i övriga kolumner, dvs en viss percentil representerar inte samma förvarsområde i de olika kolumnerna.)

Fall 8As2: Statistik för områden som passerat Test 1C					
	Medianvärden				Minimum
Percentil	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
5	2 401	6 975	0.02	92	1059
10	2 755	8 943	0.03	93	1339
20	3 198	10 542	0.04	94	1551
30	3 736	11 825	0.05	96	1722
40	4 074	15 622	0.06	100	1807
50	4 514	19 010	0.06	100	2056
60	5 439	26 252	0.07	100	2222
70	5 981	37 744	0.08	100	2536
80	6 910	54 559	0.08	100	2867
90	8 320	85 805	0.09	100	3891
95	10 060	1.12E+05	0.09	100	4975
Antal områden		86			

7.2.5 Test 1B och Test 1C för Fall 8D (som referensfallet men med lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi)

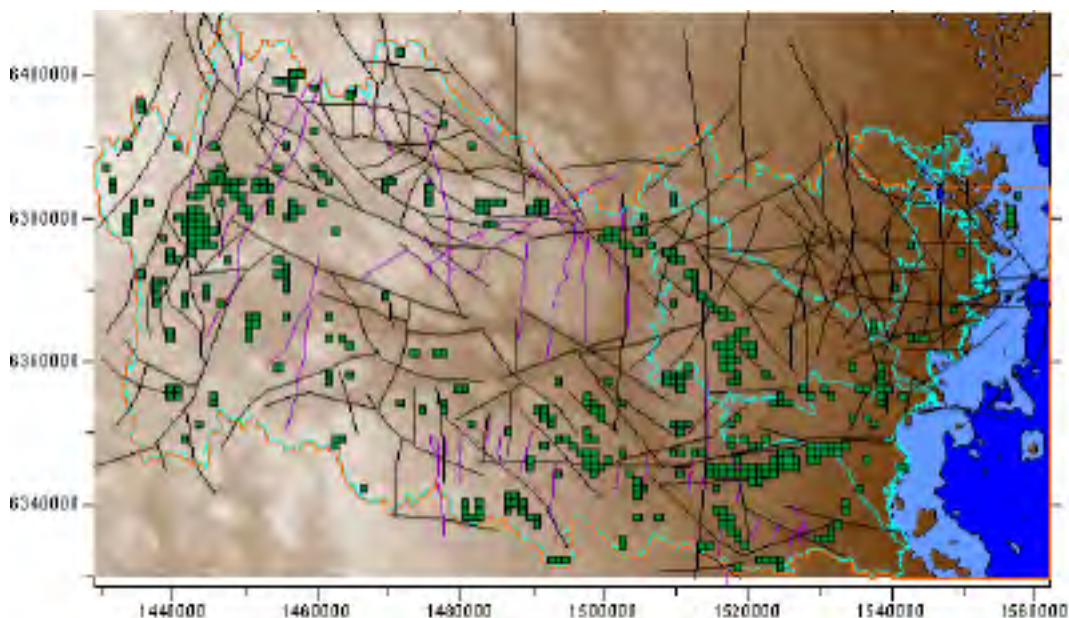
Test 1B som diskuterats i föregående avsnitt har också utförts för Fall 8D (referensfallet med berget definierat med lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi). Med avseende på Fall 8D passerar 419 förvarsområden Test 1B (7 % av alla områden). Dessa områdens placering framgår av figur 7-5.

En jämförelse av figur 7-3 (Fall 8As2) och figur 7-5 (Fall 8D) visar på det följande:

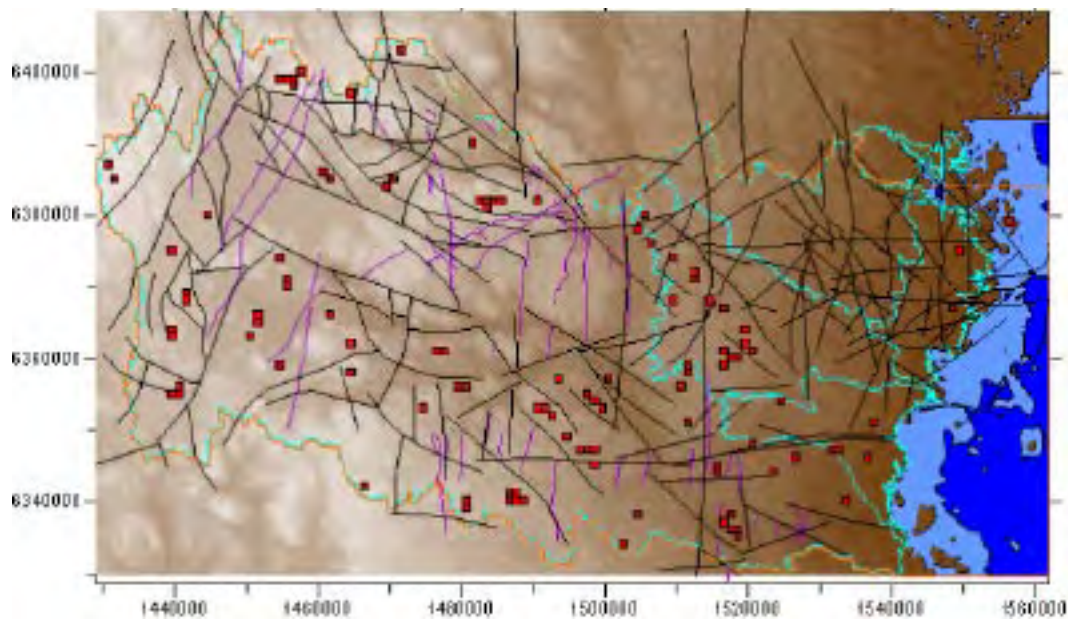
För Fall 8D förekommer godkända förvarsområden i samma delar av modellen som för Fall 8As2 (och Fall 5s2), dock finns det skillnader mellan figurerna i den lokala skalan. De små skillnaderna i den större regionala skalan visar att den lokala heterogeniteten och anisotropin inte påverkar det regionala flödesmönstret, de större skillnaderna i den lokala skalan indikerar dock att den lokala heterogeniteten och anisotropin påverkar det lokala flödesmönstret.

Test 1C som diskuterats i föregående avsnitt har också utförts för Fall 8D. Med avseende på Fall 8D passerar 106 förvarsområden Test 1C. Dessa områdens placering framgår av figur 7-6. En jämförelse av figur 7-4 (Fall 8As2) och figur 7-6 (Fall 8D) visar att placeringen av områden som passerat Test 1C är ungefär desamma för Fall 8As2 och för Fall 8D, dock förekommer lokala skillnader.

Förvarsområden som har passerat Test 1B och 1C förekommer över hela det studerade modellområdet, förutom i områdets centrala delar där den topografiska gradienten är stor, och i områdets nordvästra delar inom Marströmmens avrinningsområde.



Figur 7-5. Fall 8D (lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi). Test 1B. Förvarsområden med långa genombrottstider och små specifika flöden. 419 förvarsområden passerade testen, dessa områden är markerade med gröna rutor i figuren ovan.



Figur 7-6. Fall 8D (lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi). Test 1C. Förvarsområden med långa genombrottsstider, små specifika flöden och nedåtriktade grundvattenflöden. 106 förvarsområden passerade testen, dessa områden är markerade med röda rutor i figuren ovan.

7.3 Test avseende långa flödeslängder, långa genombrottsstider och små flöden – Test 1A

7.3.1 Metodik

Som tidigare diskuterats så finns det ingen direkt koppling mellan långa flödesvägar och långsiktig säkerhet för ett förvar för kärnavfall; det kan dock ändå vara av intresse att studera flödesvägarnas längd och detta görs bl a i detta avsnitt. Förvarsområden med långa genombrottsstider och små specifika flöden är områden med goda egenskaper, dessutom är långa flödesvägar av visst intresse. Vi har därför sorterat de 6 000 studerade förvarsområdena efter medianvärden på flödesvägarnas längd, genombrottsstid och storlek på det specifika flödet.

Tre olika listor har upprättats:

- De 1 000 förvarsområdena med de längsta genombrottsstiderna (medianvärden).
- De 1 000 förvarsområdena med de minsta specifika flödena (medianvärden).
- De 1 000 förvarsområdena med de längsta flödesvägarna (medianvärden).

Varje studerad lista innehåller 17 % av alla värden (1 000 värden av total 6 026). Listorna är oberoende av varandra, olika förvarsområden kan således förekomma i de tre listorna.

Test 1A. Förvarsområden som förekommer i alla tre listorna är områden med långa genombrottsstider, små specifika flöden och dessutom förvarsområden från vilka flödesvägarna är långa. Sådana områden har passerat det vi kallar Test 1A.

Vi har valt att utföra dessa analyser för Fall 5s2, Fall 8As2 och Fall 8D. Fall 5s2 är referensfallet simulerat med densitetsberoende flöde. Fall 8As2 är identiskt med Fall 5s2 förutom att lokal heterogenitet är inkluderad i bergets egenskaper. Fall 8D är ett fall där berget är definierat med lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi.

7.3.2 Test 1A för Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde)

Förvarsområden som förekommer i alla tre listorna är områden med långa genombrotstider, små specifika flöden och dessutom områden med långa flödesvägar. En jämförelse av de tre listorna avslöjar att för Fall 5s2 förekommer 186 områden i alla tre listorna (3 % av alla områden). Dessa områdens placering framgår av figur 7-7. Statistik för dessa områden presenteras i tabell 7-6

De specifika flödena är små för alla förvarsområden som passerat Test 1A, mindre än 0,11 Liter/(m²,år) (percentil 99). Genombrotstiderna varierar mellan 3 900 år (percentil 1) och 196 000 år (percentil 99), medianen är 13 100 år. Flödeslängderna varierar mellan 2 400 m (percentil 1) och 10 600 m (percentil 99), medianen är 3 400 m. Variationen i värden illustrerar den stora variation i förvarsområdena egenskaper som förekommer bland områden som passerat Test 1A.

Rp-värdena i tabell 7-6 demonstrerar att bland de områden som passerar Test 1A finns områden med både uppåtriktat grundvattenflöde och områden med nedåtriktat grundvattenflöde, men områden med nedåtriktade flöden dominerar tydligt fördelningen, medianen är Rp = 92 %. Detta följer av att långa flödesvägar främst förekommer från områden med nedåtriktade flöden.

Tabell 7-6 visar också flödesvägarnas minimilängder för förvarsområden som passerat Test 1A. De kortaste minimilängderna är små (ca 600 m), fastän Test 1A inkluderar en sortering efter de längsta medianlängderna. Detta är en intressant illustration till hur flödesvägarnas längder kan variera inom förvarsområdena. Således, inom förvarsområden vilka uppvisar stora medianvärden för flödesvägarnas längd kan det också förekomma flödesvägar som är mycket korta. Detta följer delvis av att områdena inte är optimerade med avseende på form, utan de studerade områdena är alla fyrkantiga (storlek 1 km²) och följer ett givet rutnät.

En jämförelse av figur 7-7 (Test 1A Fall 5s2) och figur 7-2 (Test 1C Fall 5s2) visar att områden som passerat Test 1A i ofta är placerade nära (eller samma) områden som passerar Test 1C. Detta beror på att långa flödesvägar främst förekommer från områden med nedåtriktade grundvatten flöden. Införandet av ett villkor om nedåtriktat flöde (Test 1C) får alltså ungefärligen samma effekt som att införa ett testkriterium som avser sortering efter de längsta flödesvägarna.

Förvarsområden som har passerat Test 1A förekommer över hela det studerade modellområdet, förutom i områdets centrala delar och i Marströmmens avrinningsområde.

7.3.3 Test 1A för Fall 8As2 (som referensfallet men med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde)

Test 1A som diskuterats i föregående avsnitt har också utförts för Fall 8As2 (referensfallet men med lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde). Med avseende på Fall 8As2 passerar 186 förvarsområden Test 1A (3 % av alla områden). Dessa områdens placering framgår av figur 7-8. Statistik för dessa områden presenteras i tabell 7-7

Rp-värdena i tabell 7-7 demonstrerar att bland de områden som passerar Test 1A finns områden med både uppåtriktat grundvattenflöde och områden med nedåtriktat grundvattenflöde, men områden med nedåtriktade flöden dominerar tydligt fördelningen, medianen är Rp = 81 %. Detta följer av att långa flödesvägar främst förekommer från områden med nedåtriktade flöden. För Test 1A och Fall 5s2 är medianen för Rp-värdena 92 % att medianvärdet för Fall 8As2 är mindre (81 %) beror av det mer heterogena flödesfältet som erhålls med lokal heterogenitet.

En jämförelse av figur 7-8 (Test 1A Fall 8As2) och figur 7-4 (Test 1C Fall 8As2) visar att områden som passerat Test 1A i ofta är placerade nära (eller samma) områden som passerar Test 1C. Detta diskuterades också i föregående avsnitt.

Tabell 7-7 visar också flödesvägarnas minimilängder för försvarsområden som passerat Test 1A. Slutsatsen som erhöles för Test 1A och Fall 5s2 gäller också för Fall 8As2.

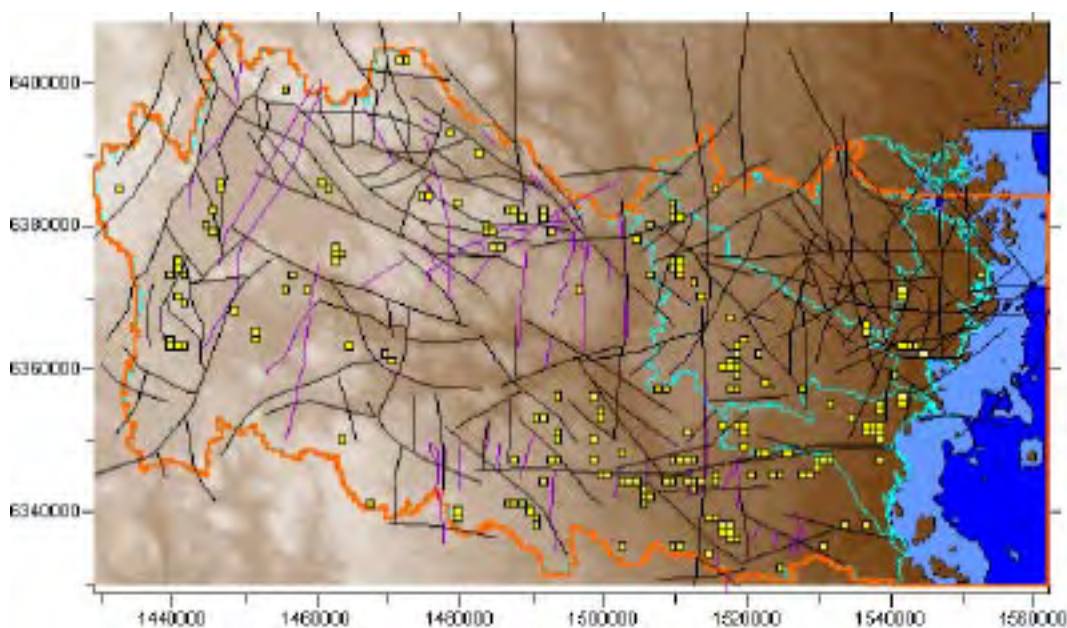
En jämförelse av figur 7-8 (Fall 8As2) och figur 7-7 (Fall 5s2) visar att i den regionala skalan så är placeringen av områden som passerat Test 1A är ungefär desamma för Fall 5s2 och för Fall 8As2 (även om antalet godkända områden är något större för Fall 8As2). I den lokala skalan är skillnaderna dock större. De små skillnaderna i den regionala skalan visar att den lokala heterogeniteten inte påverkar det regionala flödesmönstret, de större skillnaderna i den lokala skalan indikerar dock att den lokala heterogeniteten påverkar det lokala flödesmönstret.

Försvarsområden som har passerat Test 1A förekommer över hela det studerade modellområdet, förutom i områdets centrala delar och i Marströmmens avrinningsområde.

7.3.4 Test 1A för Fall 8D (som referensfallet men med lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi)

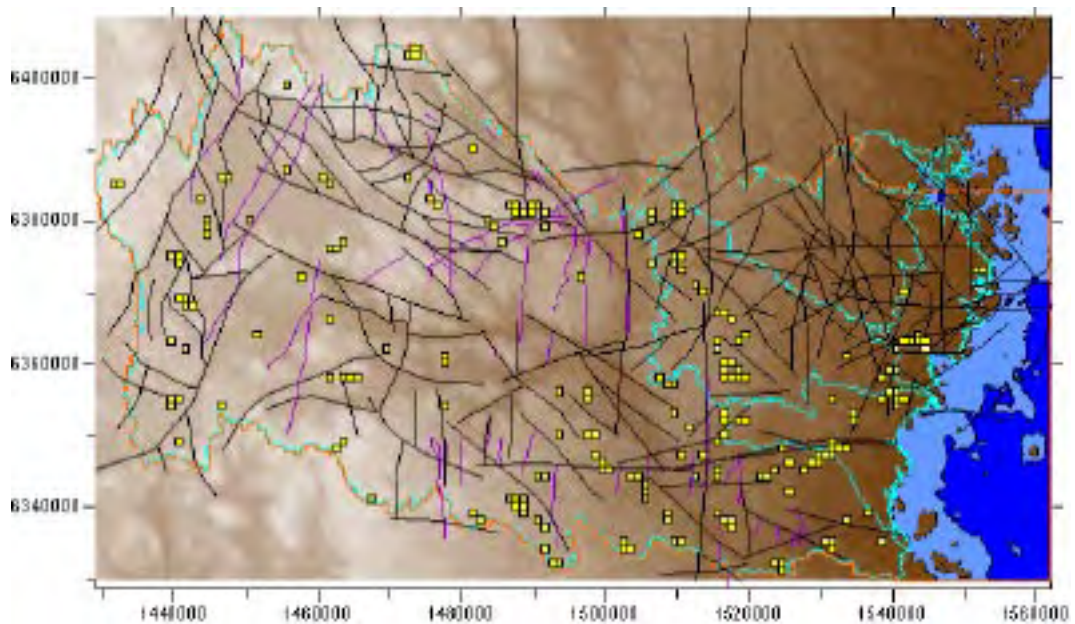
Test 1A som diskuterats i föregående avsnitt har också utförts för Fall 8D (referensfallet men med lokal heterogenitet och djupavtagande anisotropi). Med avseende på Fall 8D passerar 203 försvarsområden Test 1A. Dessa områdens placering framgår av figur 7-9.

En jämförelse av figur 7-7 (Fall 5s2), figur 7-8 (Fall 8As2) och figur 7-9 (Fall 8D) visar på det följande: För Fall 8D förekommer godkända försvarsområden i samma delar av modellen som för Fall 8As2 och Fall 5s2, dock finns det tydliga skillnader mellan figurerna i den lokala skalan. De små skillnaderna i den större skalan visar att den lokala heterogeniteten

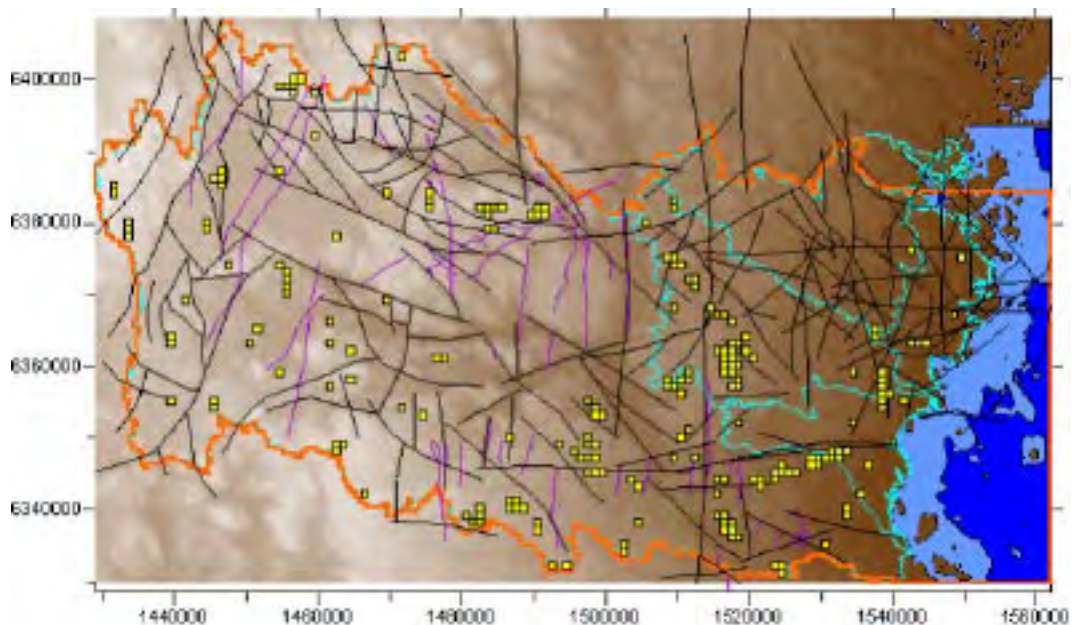


Figur 7-7. Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde). Test 1A. Försvarsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrotstiderna, (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet och (iii) 1 000 områdena med längsta flödesvägarna. För Fall 5s2 passerar 186 försvarsområden testen, dessa områden är markerade med gula rutor i figuren ovan.

och anisotropin inte påverkar det regionala flödesmönstret, de större skillnaderna i den lokala skalan indikerar dock att den lokala heterogeniteten och anisotropin påverkar det lokala flödesmönstret.



Figur 7-8. Fall 8As2 (lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde). Test 1A. Förforsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrotstiderna, (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet och (iii) 1 000 områdena med längsta flödesvägarna. För Fall 8As2 passerar 198 förforsområden testen, dessa områden är markerade med gula rutor i figuren ovan.



Figur 7-9. Fall 8AD (lokal heterogenitet och djupavragande anisotropi). Test 1A. Förforsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrotstiderna, (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet och (iii) 1 000 områdena med längsta flödesvägarna. För Fall 8D passerar 203 förforsområden testen, dessa områden är markerade med gula rutor i figuren ovan.

Tabell 7-6. Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde). Test 1A. Förvarsområden med långa genombrottstider och små specifika flöden. Förvarsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrottsiderna, (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet och (iii) 1 000 områdena med längsta flödesvägarna. 186 förvarsområden finns på båda listorna, statistik för dessa områden presenteras i tabellen nedan. (Värdena i varje kolumn är beräknade som oberoende av värdena i övriga kolumner, dvs en viss percentil representerar inte samma förvarsområde i de olika kolumnerna.)

Fall 5s2: Statistik för områden som passerat Test 1A					
Percentil	Medianvärden				Minimum
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
1	2 397	3 870	0.02	19	586
5	2 466	4 909	0.03	44	650
10	2 559	5 721	0.04	56	779
20	2 668	6 906	0.05	72	862
30	2 900	8 954	0.06	80	949
40	3 224	11 035	0.07	88	1123
50	3 425	13 037	0.08	92	1375
60	3 775	17 667	0.08	97	1618
70	4 204	21 771	0.09	100	1811
80	5 074	30 654	0.10	100	2004
90	5 984	49 298	0.10	100	2447
95	7 398	88 469	0.11	100	2734
99	10 643	1.96E+05	0.11	100	3960
Antal områden		186			

Tabell 7-7. Fall 8As2 (lokal heterogenitet och densitetsberoende flöde). Test 1A. Förvarsområden med långa genombrottstider och små specifika flöden. Förvarsområden som finns bland de: (i) 1 000 områdena med de längsta genombrottsiderna, (ii) 1 000 områdena med minsta specifika flödet och (iii) 1 000 områdena med längsta flödesvägarna. 198 förvarsområden finns på båda listorna, statistik för dessa områden presenteras i tabellen nedan. (Värdena i varje kolumn är beräknade som oberoende av värdena i övriga kolumner, dvs en viss percentil representerar inte samma förvarsområde i de olika kolumnerna.)

Fall 8As2: Statistik för områden som passerat Test 1A					
Percentil	Medianvärden				Minimum
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
1	3 472	5 276	0.02	25	772
5	3 547	6 787	0.03	39	913
10	3 649	7 763	0.03	50	985
20	3 827	9 274	0.04	60	1131
30	4 014	11 015	0.05	69	1295
40	4 409	13 617	0.05	75	1461
50	4 763	16 848	0.06	81	1749
60	5 411	21 834	0.07	86	2030
70	6 082	27 254	0.08	93	2264
80	6 876	39 267	0.08	100	2544
90	8 605	69 582	0.09	100	3098
95	9 965	1.07E+05	0.09	100	3866
99	12 729	2.01E+05	0.09	100	5586
Antal områden		198			

7.4 Tester av olika systembeskrivningar baserad på ett villkor om nedåtriktat grundvattenflöde: Test RA

7.4.1 Metodik

Det kan vara av intresse att särskilt analysera förvarsområden med nedåtriktade grundvattenflöden. Från nedåtriktade flöden förväntas nämligen följa långa flödesvägar och ofta även långa genombrotstider; även om båda dessa egenskaper också kan förekomma i områden som inte domineras av nedåtriktade flöden. Det bör också påpekas att långa flödesvägar, men med relativt korta genombrotstider (i förhållande till flödesvägarnas längd), mycket väl kan erhållas från områden med nedåtriktade flöden, t ex där den topografiska gradienten är stor.

I den upprättade modellen kan förekomsten av förvarsområden med tydligt nedåtriktat grundvattenflöde variera beroende på vilka systemegenskaper som har tilldelats modellen. Skillnaderna mellan olika fall kan dock förväntas vara relativt begränsad så länge topografien är densamma. Detta följer av den tidigare presenterade slutsatsen att den mest betydelsefulla systemegenskapen är topografins undulation (se avsnitt 6.4).

Rp-parametern är ett mått på andelen nedåtriktade flödesvägar (se avsnitt 3.9). Områden där mer än 90 % av flödesvägarna är nedåtriktade presenteras i en lång rad figurer i kapitel 6, se t ex figur 6-28 (Fall 1), figur 6-41 (Fall 5) figur 6-44 (Fall 5s2) och figur 6-71 (Fall 8As2).

De tester som presenteras i detta avsnitt är ett försök att inkludera betydelsen av en variation (osäkerhet) i systemegenskaperna när förvarsområden med nedåtriktat grundvattenflöde skall identifieras. Den inkluderade variationen är den variationen som beskrivs av skillnaderna mellan de olika studerade fallen systemegenskaper. Testerna baseras på en jämförelse av förvarsområden och Rp-värden i en serie av utvalda fall.

För att erhålla en robust bestämning av områden med nedåtriktade flöden har vi valt att jämföra och kombinera Rp-värden från ett stort antal olika fall. Vi har jämfört områden med $R_p > 90\%$ för ett antal fall med delvis mycket olika systemegenskaper. Varje studerat fall analyseras separat, förvarsområden med $R_p > 90\%$ som förekommer gemensamt i de studerade fallen (en serie av utvalda fall) har passerat en kombinerad test som vi kallar Test RA. Eller med andra ord vi har jämfört de lila rutorna (förvarsområden) som förekommer i figurer i kapitel 6 (t ex figur 6-28 och figur 6-41). Om en lila ruta förekommer i alla de utvalda figurerna (utvalda fallen) representerar denna ruta ett förvarsområde som har passerat Test RA.

Fall med stokastiskt genererade egenskaper är något problematiska i detta sammanhang. Eftersom olika realiseringar av t ex horisontala zoner och lokal heterogenitet kan leda till att olika förvarsområden passerar testen vid olika realiseringar av de stokastiska egenskaperna. Vi har därför valt att studera olika serier av beräkningsfall, med och utan stokastiska egenskaper.

Följande serier av beräkningsfall har studerats för Test RA

- Serie 1. Utan densitetsberoende flöde och utan realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4, 5.
- Serie 2. Med densitetsberoende flöde och utan realisationsberoende lokal heterogenitet:: Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1, 5s2.
- Serie 3. Utan densitetsberoende flöde och med realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4, 5 och 8A.

- Serie 4. Med densitetsberoende flöde och med realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4, 5 8A, 1s1, 5s1, 5s2 och 8As2.
- Serie 5. Utan densitetsberoende flöde och med realisationsberoende lokal heterogenitet (alternativ realisering): Fall 1, 2, 3, 4, 5 och 8B.

7.4.2 Resultat för Serie 1 – Fall 1, 2, 3, 4 och 5

Denna test avser Serie 1, som är en serie av beräkningsfall utan densitetsberoende flöde och utan realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4 och 5. Resultatet av denna analys presenteras nedan i figur 7-10. Totalt passerade 472 förvarsområden den applicerade testen (8 % av alla områden). Förvarsområden som har passerat denna test förekommer över hela det studerade modellområdet förutom under större sjöar.

Det relativt stora antal förvarsområden som passerar denna test visar att områden med tydligt nedåtriktat grundvattenflöde är ganska okänsliga för olika beskrivningar av bergets genomsläpplighet, detta följer av den tidigare presenterade slutsatsen att den mest betydelsefulla systemegenskapen är topografins undulation. Denna slutsats gäller för alla de nedan presenterade RA-testerna.

7.4.3 Resultat för Serie 2 – Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2

Denna test avser Serie 2, som är en serie av beräkningsfall med densitetsberoende flöde, men utan realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2. Resultatet av denna analys presenteras nedan i figur 7-11.

Totalt passerade 454 förvarsområden den applicerade testen (8 % av alla områden). Skillnaden mellan Serie 1 och Serie 2 är att Serie 2 också inkluderar ett antal fall med densitetsberoende flöde. De förvarsområden som passerar testen för Serie 2 är ungefär samma områden som passerar testen för Serie 1, vilket illustrerar att densitetsberoende flöde är av mindre betydelse i den storregionala skalan för det studerade modellområdet.

Förvarsområden som har passerat denna test förekommer över hela det studerade modellområdet förutom under större sjöar.

7.4.4 Resultat för Serie 3 – Fall 1, 2, 3, 4, 5 och 8A

Denna test avser Serie 3, som är en serie av beräkningsfall utan densitetsberoende flöde men med realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4, 5 och 8A. Resultatet av denna analys presenteras nedan i figur 7-12. Totalt passerade 264 förvarsområden den applicerade testen (4 % av alla områden).

Antalet förvarsområden som passerar testen minskar markant då fallet med lokal heterogeniteten införs. Detta följer av den lokala heterogenitetens realisationsberoende egenskaper som varierar från realisation till realisation. Förvarsområden är lokala områden i den studerade modellen, alltså kommer delvis olika områden att passera testen vid olika realiseringar av den lokala heterogeniteten, även om många godkända förvarsområden är desamma som för Serie 1. Detta illustreras av en jämförelse med resultaten från Serie 1 (figur 7-10), Serie 3 (figur 7-12) och Serie 5 (figur 7-14).

Förvarsområden som har passerat denna test förekommer över hela det studerade modellområdet förutom under större sjöar.

7.4.5 Resultat för Serie 4 – Fall 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2 och 8As2

Denna test avser Serie 4, som är en serie av beräkningsfall med densitetsberoende flöde och dessutom med realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2 och 8As2. Resultatet av denna analys presenteras nedan i figur 7-13.

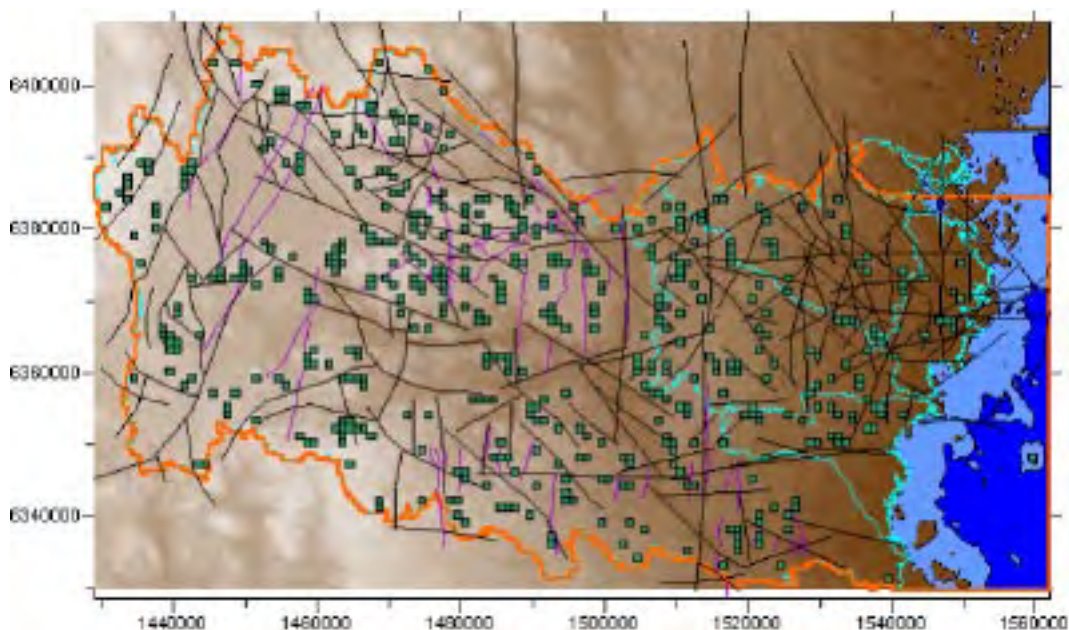
Totalt passerade 245 förvarsområden den applicerade testen (4 % av alla områden). Skillnaden mellan Serie 3 och Serie 4 är att Serie 4 också inkluderar ett antal fall med densitetsberoende flöde. Färre förvarsområden passerar testen då densitetsberoende flöde inkluderas, dock är det ungefär samma förvarsområden som passerar testen för Serie 4 som för Serie 3, vilket illustrerar att densitetsberoende flöde är av mindre betydelse i den storregionala skalan för det studerade modellområdet.

Förvarsområden som har passerat denna test förekommer över hela det studerade modellområdet förutom under större sjöar.

7.4.6 Resultat för Serie 5 – Fall 1, 2, 3, 4, 5 och 8B

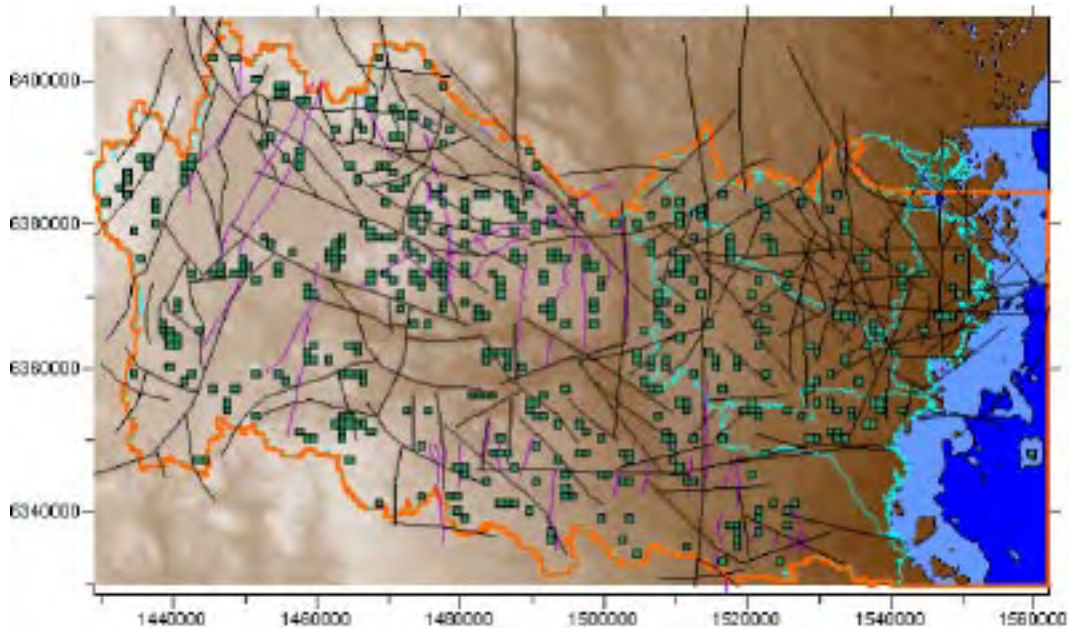
Denna test avser Serie 5, som är en serie av beräkningsfall utan densitetsberoende flöde men med realisationsberoende lokal heterogenitet som inte är densamma som i Serie 3. Följande fall ingår i Serie 5 Fall 1, 2, 3, 4, 5 och 8B. Resultatet av denna analys presenteras nedan i figur 7-14. Totalt passerade 256 förvarsområden den applicerade testen (4 % av alla områden).

Enda skillnaden mellan Serie 5 och Serie 3 är att den stokastiska lokala heterogeniteten är representerad med en annan realisering. Som tidigare diskuterats för Serie 3 så påverkas testresultaten av den lokala heterogeniteten, egentligen av den lokala heterogenitetens stokastiska variation. Förvarsområden är lokala områden i den studerade modellen, alltså kommer delvis olika områden att passera testen vid olika realiseringar av den lokala heterogeniteten. Detta illustreras av en jämförelse med resultaten från Serie 3 (figur 7-12) och Serie 5 (figur 7-14).

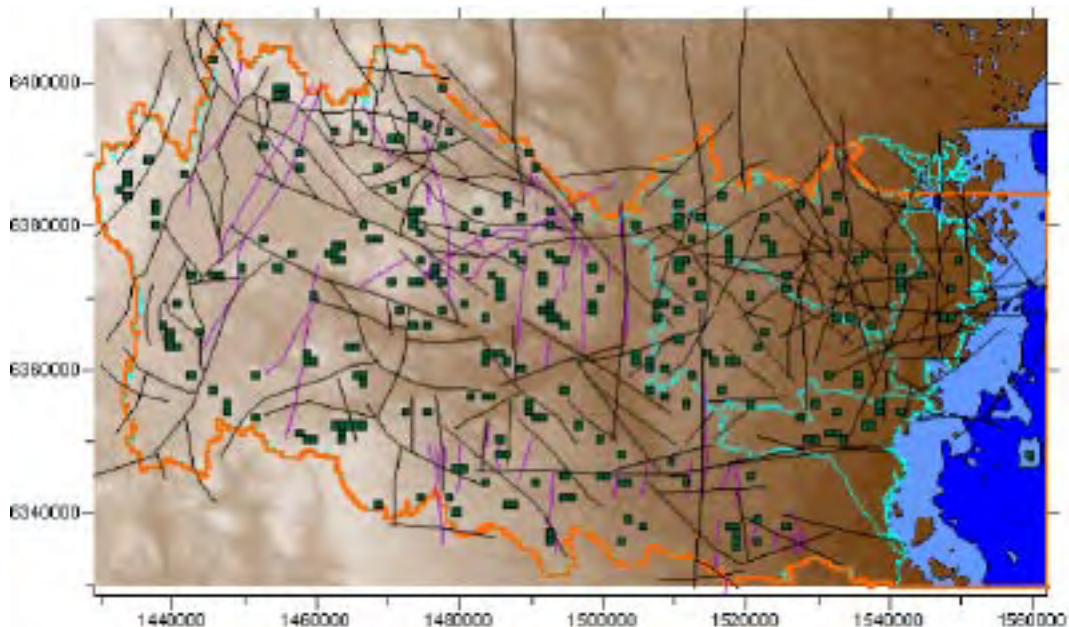


Figur 7-10. Test för R_p -värden med olika systembeskrivningar – Test RA Serie 1. Studerade fall: 1, 2, 3, 4 och 5. Förvarsområden markerade med gröna rutor är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$) i alla de studerade fallen. 472 områden passerade testen.

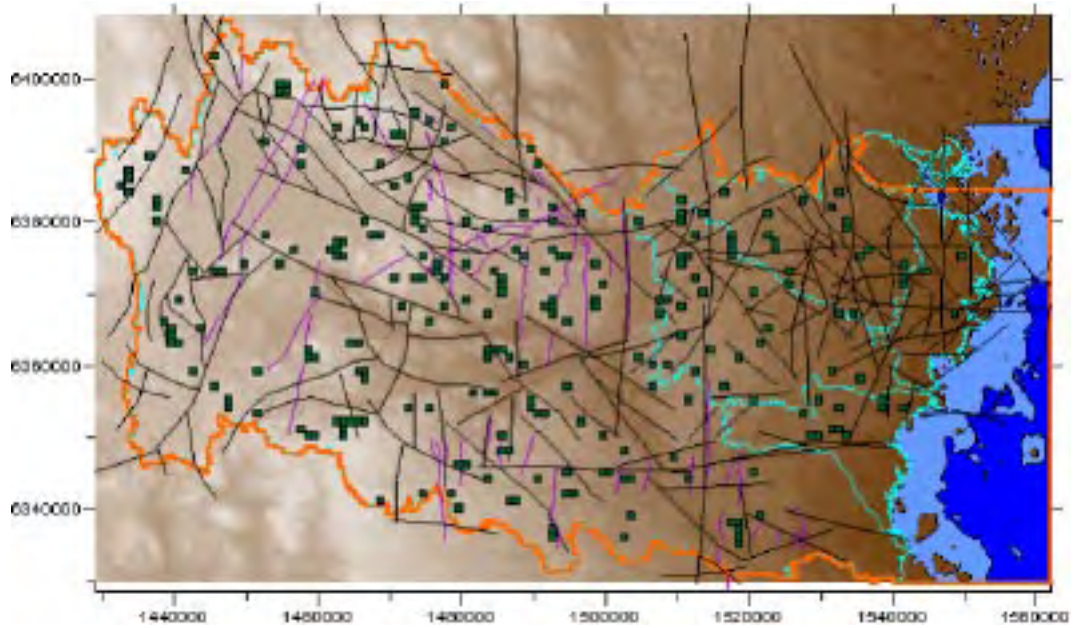
Förvarsområden som har passerat denna test förekommer över hela det studerade modellområdet förutom under större sjöar.



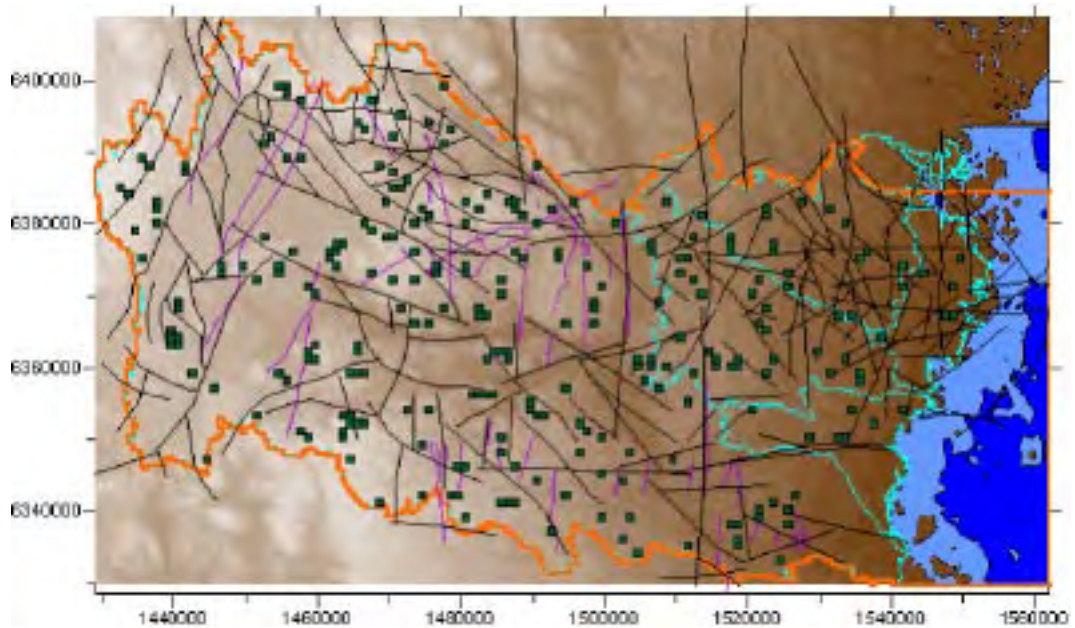
Figur 7-11. Test för R_p -värden med olika systembeskrivningar – Test RA Serie 2. Studerade fall: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2. Förvarsområden markerade med gröna rutor är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$) i alla de studerade fallen. 454 områden passerade testen.



Figur 7-12. Test för R_p -värden med olika systembeskrivningar – Test RA Serie 3. Studerade fall: 1, 2, 3, 4, 5 och 8A. Förvarsområden markerade med gröna rutor är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$) i alla de studerade fallen. 264 områden passerade testen.



Figur 7-13. Test för Rp-värden med olika systembeskrivningar – Test RA Serie 4. Studerade fall: 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2 och 8As2. Förvarsområden markerade med gröna rutor är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$) i alla de studerade fallen. 245 områden passerade testen.



Figur 7-14. Test för Rp-värden med olika systembeskrivningar – Test RA Serie 5. Studerade fall: 1, 2, 3, 4, 5 och 8B. Förvarsområden markerade med gröna rutor är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$) i alla de studerade fallen. 256 områden passerade testen.

7.5 Kombinerad test av olika systembeskrivningar baserad på områden med nedåtriktade grundvattenflöden – Test RB

7.5.1 Metodik

Den test för olika systembeskrivningar som presenterades i föregående avsnitt (Test RA) testas bara för Rp-värden och resultatet är inte kopplat till ett visst fall eller systembeskrivning. Ytterligare ett steg är att koppla de förvarsområden som passerar Test RA till ett utvalt fall som kan anses vara en god beskrivning av det studerade systemet, t ex referensfallet. Därigenom erhålls statistiska egenskaper för de förvarsområden som passerat Test RA. En sådan analys presenteras nedan i tabell 7-8.

Det framgår av tabell 7-8 att bland de förvarsområden som passerar Test RA förekommer det områden med korta genombrotstider, korta flödeslängder (särskilt minimilängder) och specifika flöden som är relativt stora i jämförelse med variationen av flöden inom modellområdet.

En ytterligare test är därför att kombinera resultaten från Test RA med ett visst fall och med ett antal tilläggsvillkor. Till exempel kan vi sortera bort alla förvarsområden med korta genombrotstider, stora flöden och korta minimilängder. En sådan test kallar vi Test RB.

Vi har valt att införa följande villkor i två olika tester Test RB1 och RB2:

1. Studerade förvarsområden i Test RB1 och RB2 baseras på de områden som passerade Test RA för Serie 2 (se figur 7-11). Följande fall ingår i Serie 2: Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2. Serie 2 är en serie av beräkningsfall som inkluderar ett antal mycket olika systembeskrivningar, dessutom inkluderas fall med densitetsberoende flöde, men inga fall med stokastisk lokal heterogenitet. Det följer av att förvarsområden från Test RA studeras i Test RB1 och RB2 att alla områden som inkluderas i dessa två tester uppvisar Rp-värden $> 90 \%$ (nedåtriktade flöden).
2. För att passera Test RB1 och RB2 måste ett förvarsområde uppvisa ett medianvärde för genombrotstiden som är bland de 20 % längsta tiderna av alla förvarsområden.

Som ett alternativ har vi dessutom infört följande villkor, förutom de ovan angivna villkoren (Test RB2):

3. För att passera Test RB2 måste ett förvarsområde uppvisa ett medianvärde för det specifika flödet vid flödesvägarnas startpunkter som är mindre än $0,5 \text{ Liter}/(\text{m}^2, \text{år})$. Detta villkor är mycket mer diskriminerande än de krav som diskuteras i /Andersson et al. 2000/, där det sägs att flöden under $10 \text{ Liter}/(\text{m}^2, \text{år})$ är accepterbara.
4. För att passera Test RB2 måste ett förvarsområde uppvisa ett minimivärde för flödesvägarnas längd som är större än 1 500 m.

Tabell 7-8. Test RA – Serie 1 – Fall 5 (referensfallet). Förvarsområden som passerat Test RA Serie 1 appliceras på flödeslösningen för Fall 5. Den då erhållna statistiken presenteras i tabellen nedan. (Värdena i varje kolumn är beräknade som oberoende av värdena i övriga kolumner, dvs en viss percentil representerar inte samma förvarsområde i de olika kolumnerna.)

Statistik för områden som passerat Test RA: Serie 1. Fall 5					
Percentil	Medianvärden				Minimum
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
1	1 620	371	0.04	92	717
5	1 836	775	0.07	92	834
10	1 988	1 145	0.09	94	940
20	2 280	1 944	0.14	97	1068
30	2 540	2 647	0.20	100	1167
40	2 751	3 560	0.25	100	1322
50	2 997	4 657	0.30	100	1440
60	3 360	6 900	0.38	100	1567
70	3 807	9 001	0.50	100	1734
80	4 237	13 804	0.68	100	1983
90	5 279	27 490	1.01	100	2429
95	6 134	41 977	1.33	100	2875
99	7 960	3.39E+05	1.79	100	3760
Antal områden		472			

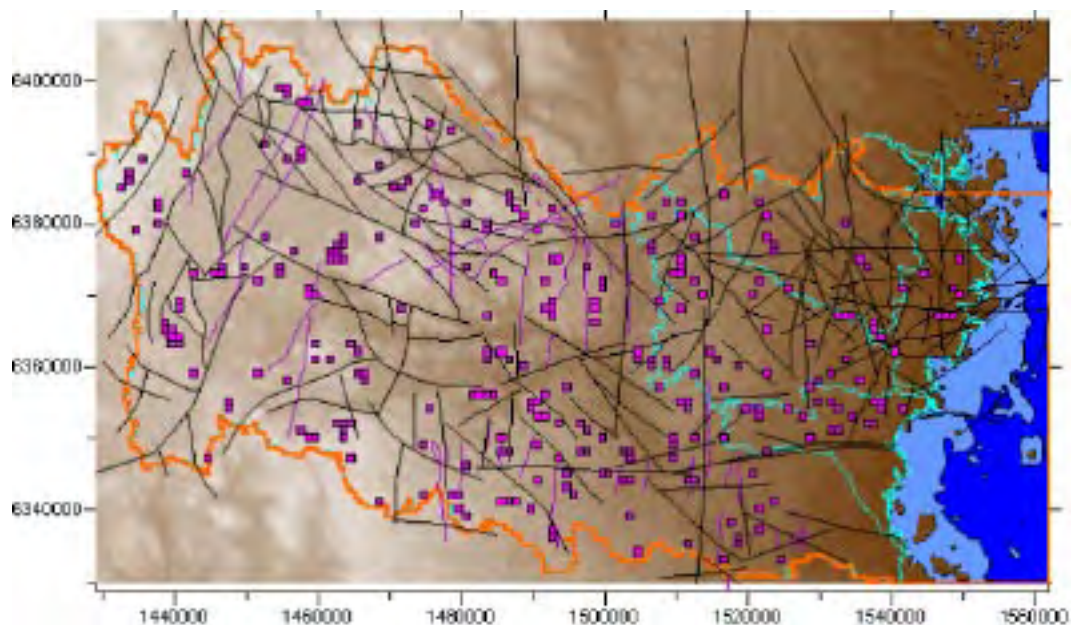
7.5.2 Test RB1 för Fall 5s2

Test RB1 inkluderar villkor 1 och 2, som de är definierade i avsnitt 7.5.1. Vi har valt att utföra denna test för Fall 5s2, detta fall är identiskt med referensfallet förutom att det inkluderar densitetsberoende flöde.

Resultaten presenteras i figur 7-15 och tabell 7-9. Totalt passerade 270 förvarsområden den applicerade testen (drygt 4 % av alla områden). Förvarsområden som har passerat denna test förekommer över hela det studerade modellområdet förutom under större sjöar.

För de förvarsområden som passerar testen varierar de specifika flödena mellan 1,25 Liter/(m²,år) (percentil 99) och 0,04 Liter/(m²,år) (percentil 1), medianen är 0,2 Liter/(m²,år). Genombrottsiderna varierar mellan 3 200 år (percentil 1) och 100 000 år (percentil 99), medianen är 16 900 år. Medianvärden för flödeslängderna från förvarsområdena varierar mellan 1 800 m (percentil 1) och 8 300 m (percentil 99), medianen är 3 300 m. Minimumvärden för flödeslängderna från förvarsområdena varierar mellan 700 m (percentil 1) och 4 300 m (percentil 99), medianen är 1 500 m.

Den stora variationen i värden illustrerar det studerade systemets komplexa egenskaper.



Figur 7-15. Test RB1 för Fall 5s2. Kombinerad Test för Rp-värden med olika systembeskrivningar och för vissa givna kriterier. Förvarsområden markerade med lila rutor är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$) i de följande fallen: 1,2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2l. Ett tilläggs-villkor applicerades dessutom: Genombrottstiden (medianvärde) för ett utvalt område är bland de 20 % längsta tiderna (i jämförelse med alla områden). 270 områden passerade testen.

Tabell 7-9. Test RB1 för Fall 5s2. Kombinerad Test för Rp-värden med olika systembeskrivningar och för vissa givna kriterier. De analyserade förvarsområdena är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$) i de följande fallen: 1,2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2l. Ett tilläggs-villkor applicerades dessutom: Genombrottstiden (medianvärde) för ett utvalt område är bland de 20 % längsta tiderna (i jämförelse med alla områden). 270 områden passerade testen. (Värdena i varje kolumn är beräknade som oberoende av värdena i övriga kolumner, dvs en viss percentil representerar inte samma förvarsområde i de olika kolumnerna.)

Statistik för områden som passerat Test RB1 Fall 5s2					
Percentil	Medianvärden				Minimum
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
1	1 798	3 237	0.04	92	694
5	2 042	3 479	0.06	92	846
10	2 266	3 824	0.08	94	1001
20	2 547	4 326	0.10	97	1098
30	2 826	5 095	0.14	100	1266
40	3 105	5 911	0.17	100	1381
50	3 356	7 398	0.22	100	1534
60	3 655	9 409	0.26	100	1666
70	4 004	12 333	0.29	100	1913
80	4 524	18 616	0.36	100	2150
90	5 342	2.79E+04	0.51	100	2684
95	6 400	4.32E+04	0.66	100	2950
99	8 319	1.01E+05	1.25	100	4321
Antal områden		270			

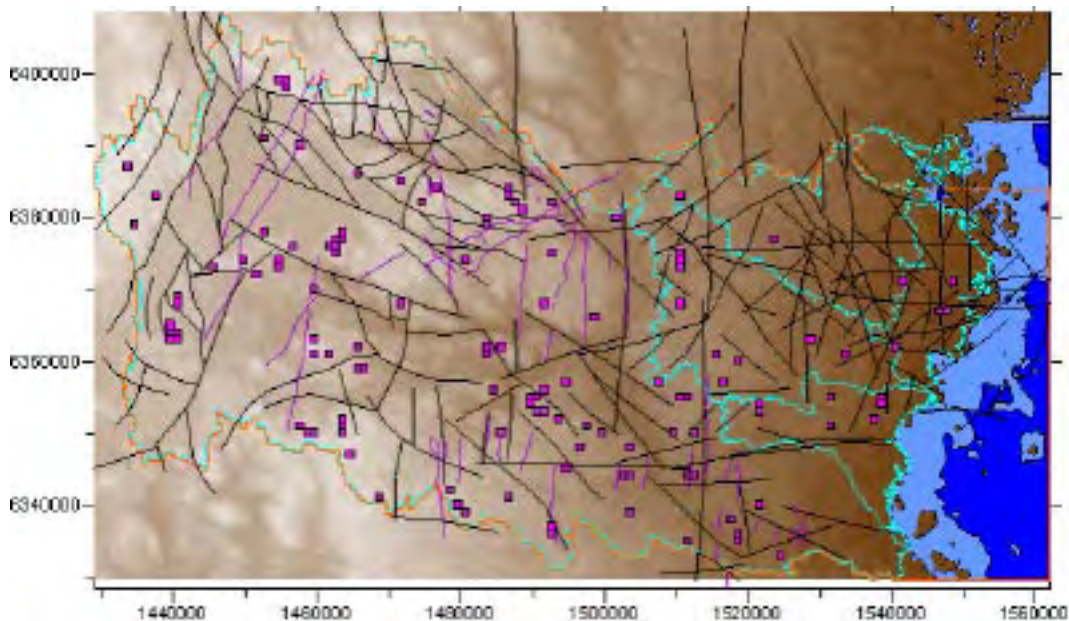
7.5.3 Test RB2 för Fall 5s2

Test RB2 inkluderar villkor 1, 2, 3 och 4, som de är definierade i avsnitt 7.5.1. Vi har valt att utföra denna test för Fall 5s2, detta fall är identiskt med referensfallet förutom att det inkluderar densitetsberoende flöde.

Resultaten presenteras i figur 7-16 och tabell 7-10. Totalt passerade 123 försvarsområden den applicerade testen (2 % av alla områden). Försvarsområden som har passerat denna test förekommer över hela det studerade modellområdet förutom under större sjöar.

För de försvarsområden som passerar testen varierar de specifika flödena mellan 0,5 Liter/(m²,år) (percentil 99) och 0,04 Liter/(m²,år) (percentil 1), medianen är 0,2 Liter/(m²,år). Genombrottstiderna varierar mellan 3 400 år (percentil 1) och 156 000 år (percentil 99), medianen är 10 200 år. Medianvärden för flödeslängderna från försvarsområdena varierar mellan 2 200 m (percentil 1) och 8 500 m (percentil 99), medianen är 3 600 m. Minimivärden för flödeslängderna från försvarsområdena varierar mellan 1 500 m (percentil 1) och 4 700 m (percentil 99), medianen är 2 000 m.

Den stora variationen i värden illustrerar det studerade systemets komplexa egenskaper.



Figur 7-16. Test RB2 för Fall 5s2. Kombinerad Test för R_p -värden med olika systembeskrivningar och för vissa givna kriterier. Försvarsområden markerade med lila rutor är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$) i de följande fallen: 1,2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2l. Följande tilläggs villkor applicerades dessutom: (i) Genombrottstiden (medianvärde) för ett utvalt område är bland de 20 % längsta tiderna (i jämförelse med alla områden). (ii) Det specifika flödet är mindre än 0,5 Liter/(m²,år). (ii) Flödesvägarnas minimilängd är större än 1 500 m. 123 områden passerade testen.

Tabell 7-10. Test RB2 för Fall 5s2. Kombinerad Test för Rp-värden med olika systembeskrivningar och för vissa givna kriterier. De analyserade förvarsområdena är områden med nedåtriktat grundvattenflöde ($R_p > 90\%$) i de följande fallen: 1,2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2l. Följande tilläggsvillkor applicerades dessutom: (i) Genombrottstiden (medianvärde) för ett utvalt område är bland de 20 % längsta tiderna (i jämförelse med alla områden). (ii) Det specifika flödet är mindre än 0,5 Liter/(m²,år). (iii) Flödesvägarnas minimilängd är större än 1 500 m. 123 områden passerade testen. (Värdena i varje kolumn är beräknade som oberoende av värdena i övriga kolumner.)

Statistik för områden som passerat Test RB2 Fall 5s2					
Percentil	Medianvärden				Minimum
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
1	2 208	3 382	0.04	92	1504
5	2 372	3 833	0.06	92	1536
10	2 548	4 440	0.07	97	1589
20	2 818	5 397	0.09	100	1639
30	3 082	6 455	0.12	100	1720
40	3 229	8 115	0.16	100	1889
50	3 576	10 215	0.19	100	1981
60	3 841	12 432	0.22	100	2100
70	4 143	16 941	0.26	100	2358
80	4 703	23 614	0.29	100	2663
90	5 825	3.44E+04	0.33	100	2935
95	6 924	6.15E+04	0.39	100	3434
99	8 539	1.56E+05	0.48	100	4665
Antal områden		123			

7.6 Korrelation mellan Rp-värden och flödesvägarnas egenskaper

7.6.1 Inledning och metodik

Som tidigare diskuterats kan det vara attraktivt att placera ett förvar för kärnavfall i ett område med nedåtriktade grundvattenflöden. Från nedåtriktade flöden förväntas nämligen följa långa flödesvägar och ofta även långa genombrottstider. De tester för Rp-värden som presenterats i text avsnitt 7.4 och 7.5, indikerar dock att en stor spridning i flödesvägars egenskaper kan förekomma från förvarsområden med stora Rp-värden, alltså från förvarsområden med nedåtriktade flöden. Från dessa iakttagelser följer att en analys av korrelationen mellan Rp-värden och flödesvägarnas egenskaper är av intresse. En sådan analys presenteras nedan.

Korrelationsanalysen bygger på följande metodik. Rp-värden för ett studerat fall klassindelas med en klassbredd motsvarande 10 %. Den första klassen innehåller Rp-värden mellan 0 % och 10 %, den andra klassen inkluderar Rp-värden mellan 10 % och 20 %, och så vidare upp till 100 %. För varje klass av Rp-värden analyseras de korresponderande egenskaperna för flödesvägarna. Resultaten plottas i figurer, i dessa figurer demonstreras hur flödesvägarnas egenskaper (egentligen fördelningar av egenskaper) varierar med ökande värden på Rp. Resultat presenteras i figur 7-17, figur 7-18, figur 7-19 och figur 7-20.

Resultat av korrelationsanalysen presenteras också i figur 7-21. Figuren visar sannolikheten för att ett parametervärde (t ex längd på flödesvägar) som förekommer i klassen Rp 90–100 % skall överskridas av parametervärden som kommer från klasser med mindre Rp-värden. Noll hypotesen för analysen som presenteras i figur 7-21 är lika med 50 %, dvs att om det inte är någon skillnad mellan parametervärdena i klassen Rp 90–100 % och övriga parametervärden så blir sannolikheten lika med 50 %.

7.6.2 Resultat för Fall 8As2

Fall 8As2 är identiskt med referensfallet (Fall 5) förutom att en stokastisk lokal heterogenitet är inkluderad med avseende på genomsläpplighet, dessutom simuleras Fall 8As2 med densitetsberoende flöde.

7.6.2.1 Medianvärden för genombrottstiden på flödesvägar från förvarsområden

Av figur 7-17 framgår det att en viss korrelation förekommer mellan höga Rp-värden och långa genombrottstider (medianvärden för förvarsområden), men att variationen bland de studerade tiderna är stor för alla värden på Rp. Följande slutsatser erhålls med avseende på Rp och flödesvägarnas genombrottstid.

- Rp-värden mellan 50 % och 60 %.
 - Med 90 % sannolikhet är flödesvägarna kortare än 6 570 år.
 - Med 50 % sannolikhet är flödesvägarna kortare än 1 450 år.
- Rp-värden mellan 90 % och 100 %.
 - Med 90 % sannolikhet är flödesvägarna kortare än 18 600 år.
 - Med 50 % sannolikhet är flödesvägarna kortare än 4 480 år.

Figur 7-17, figur 7-21 och jämförelsen ovan visar att skillnaden mellan ett förvarsområde där nästan alla flödesvägarna är riktade nedåt ($R_p > 90\%$) och ett område med flöden både uppåt och nedåt inte nödvändigtvis är mycket stor. Statistiken ovan visar att det är fullt möjligt (och inte helt ovanligt) att medianvärdet för genombrottstiderna är längre från ett område med $R_p = 55\%$ än från ett område med $R_p = 95\%$, dock är det sannolikare att tiderna är längre då R_p är stort.

Figur 7-21 visar att sannolikheten är 20 % att medianvärdet för genombrottstiden från ett förvarsområde med Rp-värde mellan 90 % och 100 % skall överskridas av genombrottstiden från ett förvarsområde med ett Rp-värde som är mindre än 90 %.

7.6.2.2 Medianvärden för specifika flödet vid förvarsområden

Av figur 7-18 framgår det att ingen tydlig korrelation förekommer mellan Rp-värden och specifika flödet vid förvarsområdena. Detta bekräftas av figur 7-21, som visar att sannolikheten är mycket nära 50 % att medianvärdet för flödet vid ett förvarsområde med Rp-värde mellan 90 % och 100 % skall överskridas av flödet vid ett förvarsområde med ett Rp-värde som är mindre än 90 %. (Noll hypotesen är 50 % detta diskuteras ovan).

7.6.2.3 Medianvärden för längden på flödesvägar från förvarsområden

Av figur 7-19 framgår det att en viss korrelation förekommer mellan höga Rp-värden och stora medianvärden för längden på flödesvägar, men att variationen bland de studerade längderna är stor för alla värden på Rp. Små värden (korta flödesvägar) förekommer för alla värden på Rp. Följande slutsatser erhålls med avseende på Rp och flödesvägarnas medianlängd:

- Rp-värden mellan 50 % och 60 %.
Med 90 % sannolikhet är flödesvägarna kortare än 3 680 m.
Med 50 % sannolikhet är flödesvägarna kortare än 2 080 m.
- Rp-värden mellan 90 % och 100 %.
Med 90 % sannolikhet är flödesvägarna kortare än 5 800 m.
Med 50 % sannolikhet är flödesvägarna kortare än 3 500 m.

Figur 7-19, figur 7-21 och jämförelsen ovan visar att skillnaden mellan ett förvarsområde där nästan alla flödesvägarna är riktade nedåt ($R_p > 90\%$) och ett område med flöden både uppåt och nedåt (R_p ca 50 %) inte nödvändigtvis är stor.

Figur 7-21 visar att sannolikheten är 15 % att medianvärdet för flödesvägarnas längder från ett förvarsområde med Rp-värde mellan 90 % och 100 % skall överskridas av genombrotts-tiden från ett förvarsområde med ett Rp-värde som är mindre än 90 %.

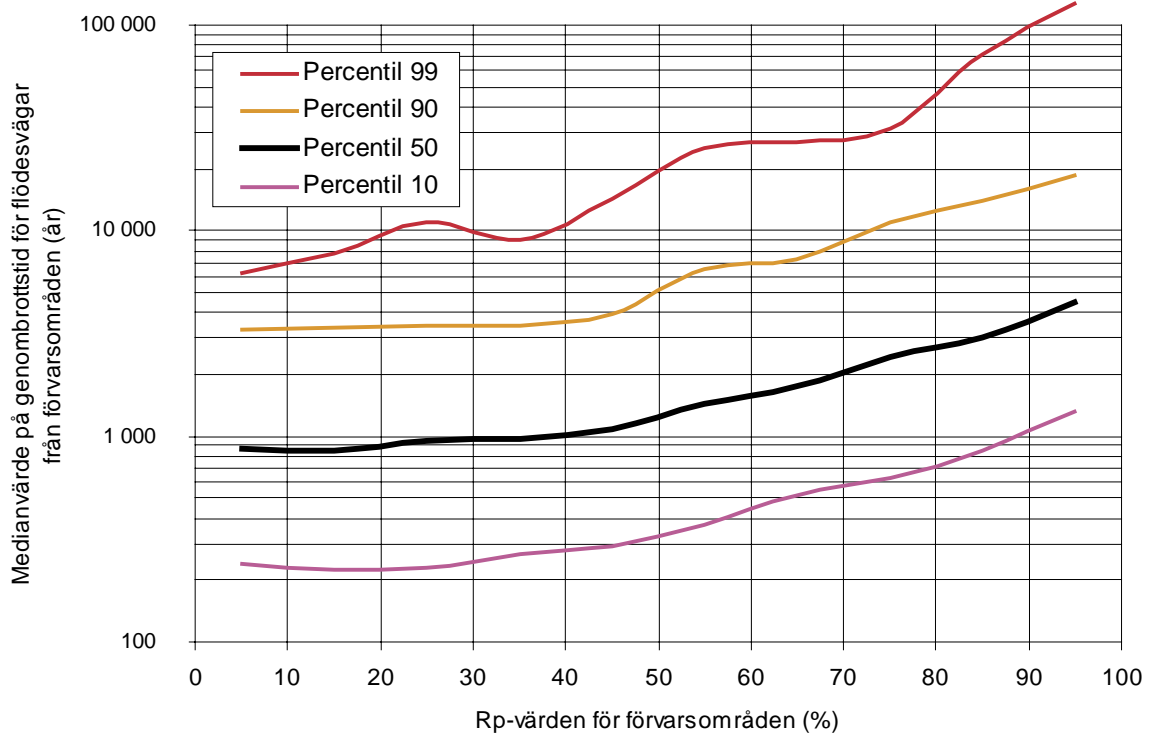
7.6.2.4 Minimivärden för längden på flödesvägar från förvarsområden

Av figur 7-20 framgår det att en viss korrelation förekommer mellan höga Rp-värden och stora minimivärden för flödesvägarnas längder, men att variationen av minimilängder är stor för alla värden på Rp. Korta flödesvägar förekommer för alla värden på Rp. Följande slutsatser erhålls med avseende på Rp och flödesvägarnas minimilängd:

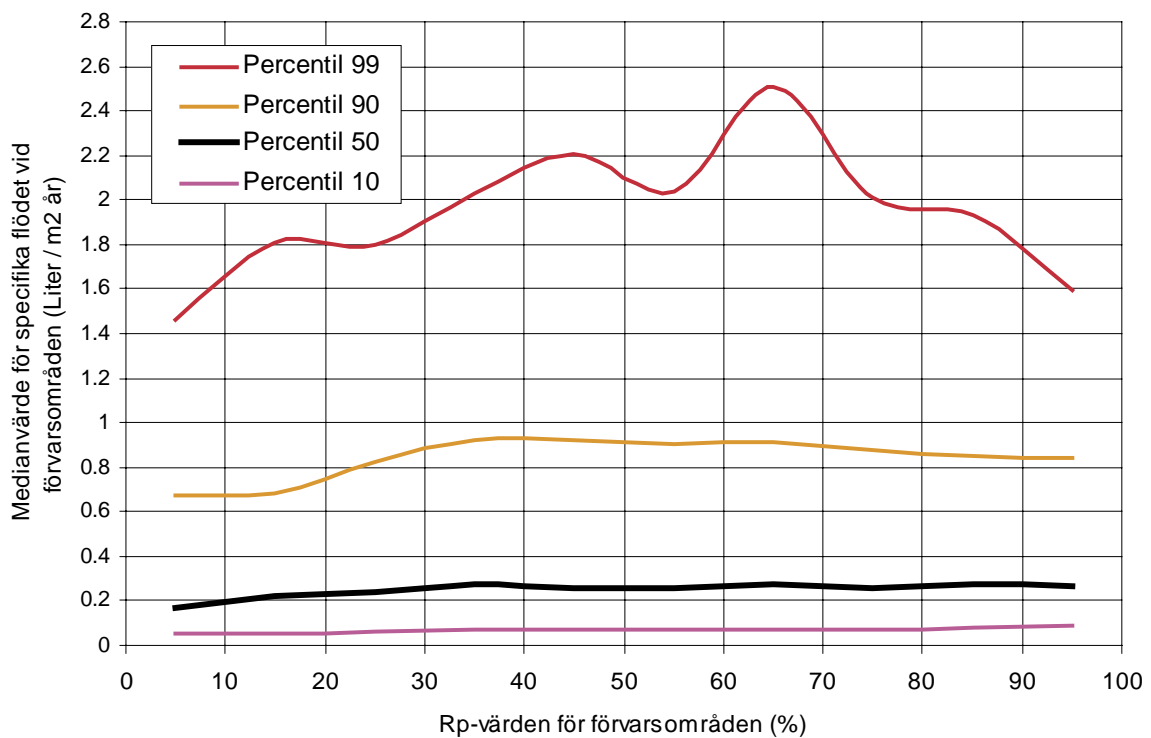
- Rp-värden mellan 50 % och 60 %.
Med 90 % sannolikhet är flödesvägarna kortare än 1 860 m.
Med 50 % sannolikhet är flödesvägarna kortare än 1 100 m.
- Rp-värden mellan 90 % och 100 %.
Med 90 % sannolikhet är flödesvägarna kortare än 2 680 m.
Med 50 % sannolikhet är flödesvägarna kortare än 1 730 m.

Figur 7-20, figur 7-21 och jämförelsen ovan visar att skillnaden mellan ett förvarsområde där nästan alla flödesvägarna är riktade nedåt ($R_p > 90\%$) och ett område med flöden både uppåt och nedåt (R_p ca 50 %) inte nödvändigtvis är stor.

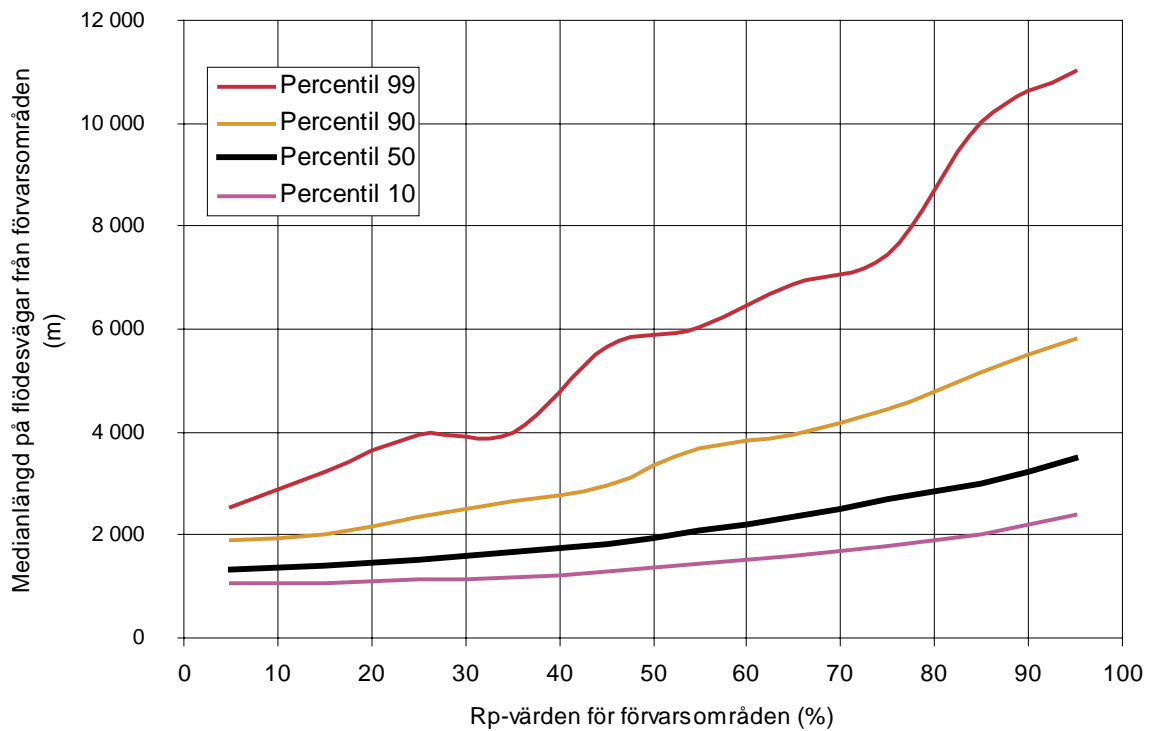
Figur 7-21 visar att sannolikheten är 19 % att minimivärdet för flödesvägarnas längder från ett förvarsområde med Rp-värde mellan 90 % och 100 % skall överskridas av minimivärdet för flödesvägarnas längder från ett förvarsområde med ett Rp-värde som är mindre än 90 %.



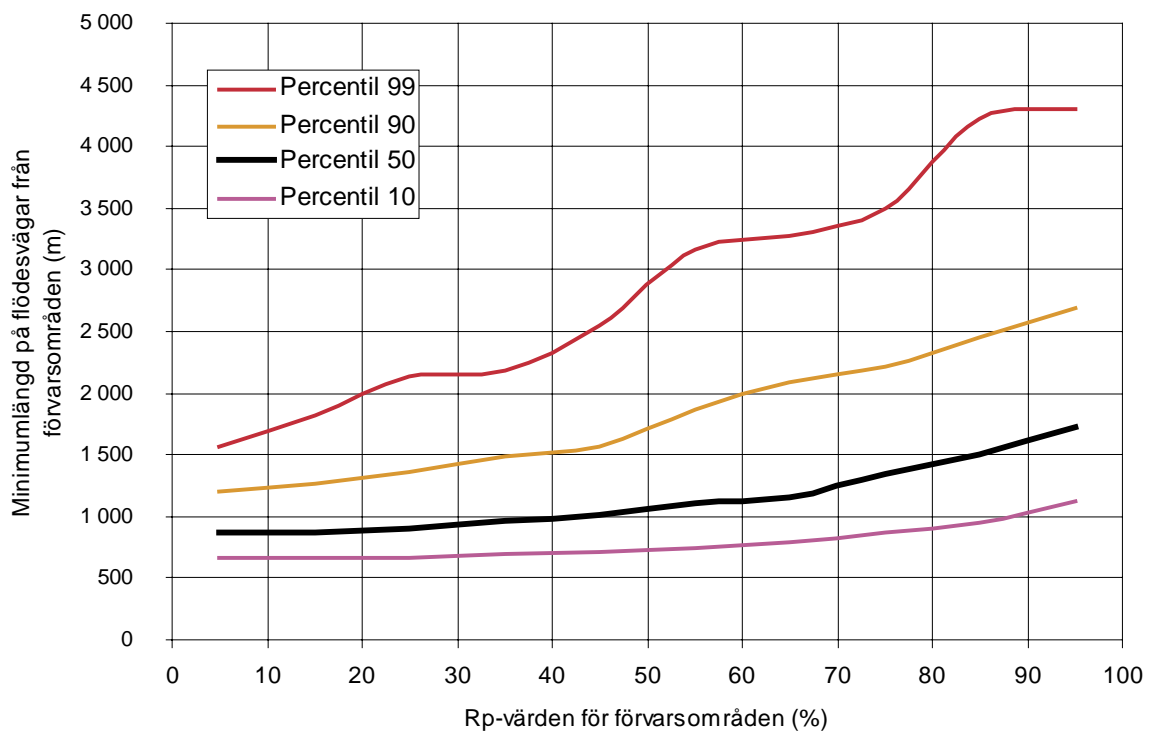
Figur 7-17. Fall 8As2. Korrelationsanalys av Rp-värden och medianvärden för genombrotts-tiderna på flödesvägar från försvarsområden.



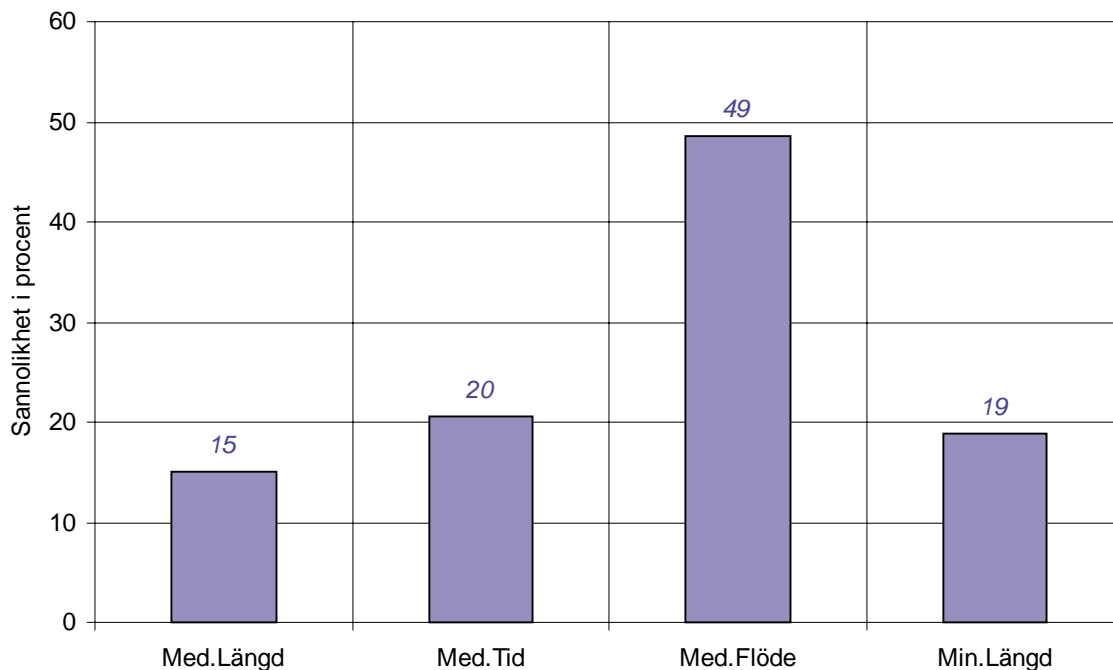
Figur 7-18. Fall 8As2. Korrelationsanalys av Rp-värden och specifika flödet vid försvarsområden.



Figur 7-19. Fall 8As2. Korrelationsanalys av Rp-värden och medianvärden för längden på flödesvägar från försvarsområden.



Figur 7-20. Fall 8As2. Korrelationsanalys av Rp-värden och minimivärden för längden på flödesvägar från försvarsområden.



Figur 7-21. Fall 8As2. Analys av förvarsområden. Resultat av korrelationsanalys av Rp-värden och flödesvägarnas egenskaper. Jämförelse mellan parametervärden i klassen Rp 90–100 %, och parametervärden i övriga klasser.

Korrelationsanalysen bygger på följande metodik. Rp-värden för ett studerat fall klassindelas med en klassbredd motsvarande 10 %. Den första klassen innehåller Rp-värden mellan 0 % och 10 %, den andra klassen inkluderar Rp-värden mellan 10 % och 20 %, och så vidare upp till 100 %. För varje klass av Rp-värden analyseras de korresponderande egenskaperna för flödesvägarna.

Figuren visar sannolikheten för att ett parametervärde (t ex längd på flödesvägar) som förekommer i klassen Rp 90–100 % skall överskridas av parametervärden som kommer från klasser med mindre Rp-värden. Noll hypotesen är 50 %, dvs att om det inte är någon skillnad mellan parametervärdena i klassen Rp 90–100 % och övriga parametervärden så blir sannolikheten lika med 50 %.

Till exempel så visar figuren att sannolikheten är 20 % att medianvärdet för genombrotts-tiderna från ett förvarsområde med Rp-värde mellan 90 % och 100 % skall överskridas av genombrotts-tiderna från ett förvarsområde med ett Rp-värde som är mindre än 90 %.

Figuren visar också att för medianvärden på det specifika flödet (vid förvarsområden) finns det ingen korrelation mellan Rp-värden och flödets storlek, detta framgår av att sannolikheten är mycket nära 50 %. att medianvärdet för flödet vid ett förvarsområde med Rp-värde mellan 90 % och 100 % skall överskridas av flödet vid ett förvarsområde med ett Rp-värde som är mindre än 90 %.

7.7 Kombinerade tester av olika systembeskrivningar baserad på flödesvägarnas egenskaper: Test P1, P2 och P3

7.7.1 Metodik

Olika systembeskrivningar representeras i denna studie av olika beräkningsfall. Det fall vi kallar referensfallet (Fall 5), och varianter på referensfallet med densitetsberoende flöde (Fall 5s1, 5s2 och 5s3) och/eller lokal heterogenitet (Fall 8A, 8B, 8As2), är de fall som ligger närmast den sammanställning av tillgängliga undersökningsdata som presenteras i kapitel 2; därför kan dessa fall betraktas som de mest rimliga och sannolika systembeskrivningarna. Vi har även studerat ett stort antal andra fall, som är mindre sannolika i jämförelse med de data som presenteras i kapitel 2, men som ändå är av visst intresse eftersom de representerar olika (mer eller mindre extrema) varianter på systemegenskaperna. Som en avslutande jämförelse har vi sammanvägt de olika systembeskrivningarna i en och samma test, systembeskrivningar som är sannolika och rimliga tillsammans med beskrivningar som är mindre rimliga och kanske till och med extrema.

En sådan sammanvägning är ett försök att inkludera betydelsen av en variation (osäkerhet) i systemegenskaperna när olika förvarsområden skall jämföras med varandra. Den studerade (inkluderade) variationen är den variationen som beskrivs av skillnaderna mellan de olika studerade fallens systemegenskaper. Testerna baseras på en jämförelse av förvarsområden och flödesvägar som de förekommer i en serie av utvalda fall. (Metodiken påminner om den som användes i avsnitt 7.4, men testerna som presenteras i detta avsnitt avser inte Rp-parametern.)

I detta avsnitt presenteras tre olika tester: Test P1, P2 och P3. Dessa tester jämför och kombinerar olika systembeskrivningar (olika fall) med avseende på flödesvägar från förvarsområden och följande resulterande egenskaper

- Längsta genombrotstiderna (medianvärden).
- Längsta flödesvägarna (medianvärden).
- Minsta specifika flödena (medianvärden).

För att erhålla en robust bestämning av områden med de ovan nämnda resulterande egenskaperna har vi valt att jämföra och kombinera områden med dessa egenskaper från ett antal olika fall med delvis mycket olika systemegenskaper.

Varje studerat fall (systembeskrivning) har analyserats separat. För varje studerat fall identifieras de förvarsområden som passerar tester för de ovan nämnda resulterande egenskaperna. Därefter jämförs de identifierade förvarsområden för de olika fallen. Identifierade förvarsområden som är gemensamma för samtliga studerade fall har passerat en kombinerad test som vi kallar Test P.

När identifierade förvarsområden från olika fall jämförs i de nedan presenterade testerna så beaktas alltså inte de absoluta värdena på flödesvägarnas resulterande egenskaper, utan bara rumslig förekomst av gemensamma områden.

En orsak till att det överhuvudtaget kan förekomma områden som passerar de ovan diskuterade testerna och är gemensamma för studerade beräkningsfall med mycket olika systemegenskaper, är att topografin är densamma i samtliga studerade fall, och topografin är den mest betydelsefulla systemegenskapen för grundvattnets flödesmönster (för det studerade modellområdet). Topografin är särskilt viktigt för flödesvägarnas längd (se t ex avsnitt 6.4). Det skall dock påpekas att när grundvattenflödets absoluta storlek skall beaktas så blir genomsläppligheten en mycket betydelsefull systemegenskap.

Tre olika testvarianter har använts för att pröva olika resulterande egenskaper:

Test P1:

För varje studerat fall beräknas snittet (gemensamma områden) bland delmängderna:

De 1 000 förvarsområdena med de längsta genombrottstiderna (medianvärden).

De 1 000 förvarsområdena med de längsta flödesvägarna (medianvärden).

Identifierade förvarsområden som är gemensamma för samtliga studerade fall har passerat testen.

Test P2:

För varje studerat fall beräknas snittet (gemensamma områden) bland delmängderna:

De 1 000 förvarsområdena med de längsta genombrottstiderna (medianvärden).

De 1 000 förvarsområdena med de minsta specifika flödena (medianvärden).

Identifierade förvarsområden som är gemensamma för samtliga studerade fall har passerat testen.

Test P3:

För varje studerat fall beräknas snittet (gemensamma områden) bland delmängderna:

De 1 000 förvarsområdena med de längsta genombrottstiderna (medianvärden).

De 1 000 förvarsområdena med de minsta specifika flödena (medianvärden).

De 1 000 förvarsområdena med de längsta flödesvägarna (medianvärden).

Identifierade förvarsområden som är gemensamma för samtliga studerade fall har passerat testen.

Som tidigare nämnts i avsnitt 7.7.1 är fall med stokastiskt genererade egenskaper något problematiska i detta sammanhang. Eftersom olika realiseringar av t ex horisontala zoner och lokal heterogenitet kan leda till att olika förvarsområden passerar tester vid olika realiseringar av de stokastiska egenskaperna. Vi har därför valt att studera olika serier av beräkningsfall, med och utan stokastiska egenskaper.

Följande serier av beräkningsfall har studerats för Test P

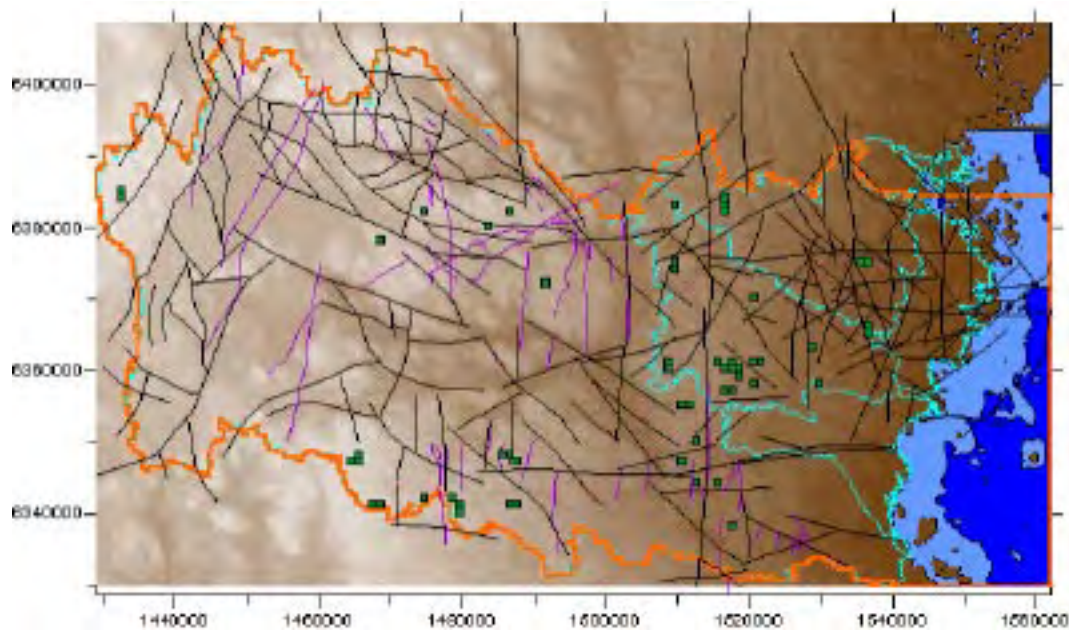
- Serie 2. Med densitetsberoende flöde och utan realisationsberoende lokal heterogenitet:
Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1, 5s2.
- Serie 4. Med densitetsberoende flöde och med realisationsberoende lokal heterogenitet:
Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1, 5s2 och 8As2.

7.7.2 Test P1 – Långa tider och långa vägar

Metoden för Test P1 diskuteras ovan i avsnitt 7.7.1. Testen avser förvarsområden med långa genombrottstider och långa flödesvägar, vid olika systembeskrivningar.

7.7.2.1 Resultat för Serie 2 – Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2

Denna test avser Serie 2, som är en serie av beräkningsfall med och utan densitetsberoende flöde, men utan realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2. Resultatet av denna analys presenteras nedan i figur 7-22.



Figur 7-22. Test P1 – Serie 2. Test av förvarsområden vid olika systembeskrivningar: flödesvägarnas längd och genombrottsid. Studerade fall: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2. 53 förvarsområden passerade testen. Förvarsområdena är markerade med gröna rutor. Dessa områden är områden med långa flödesvägar och långa genombrottsider för samtliga de fall som ingår i Serie 2.

Totalt passerar 53 förvarsområden den applicerade testen (0,9 % av alla områden). Förvarsområden som har passerat denna test förekommer över stora delar av det studerade modellområdet, dock ej under sjöar, eftersom flödesvägarna under sjöar tenderar att vara korta (och uppåtriktade). De områden som presenteras i figuren nedan är alltså områden som demonstrerar långa genombrottsider och långa flödesvägar för samtliga beräkningsfall (systembeskrivningar) som ingår i Serie 2.

Den test för olika systembeskrivningar som presenterades ovan är inte kopplad till ett visst fall eller systembeskrivning. Ytterligare ett steg är att koppla de förvarsområden som passerar Test P1 – Serie 2 till ett utvalt fall, som kan anses vara en god beskrivning av det studerade systemet, t ex Fall 5s2. Därigenom erhålles statistiska egenskaper för de förvarsområden som passerat Test P1 – Serie 2. En sådan analys presenteras nedan i tabell 7-11. Tabellen visar bl a på att korta flödesvägar (minimivärden) kan förekomma bland områdena som passerar testen, en orsak till detta är att de studerade förvarsområdenas form inte har optimerats för att enbart inkludera långa flödesvägar utan områdenas form följer det i förhand givna rutnätet. Test P1 inkluderar inte någon test för flödets storlek; av tabell 7-11 framgår dock att flödena bland de utvalda områdena är relativt små, mindre än 0,62 Liter/(m²,år). Medianen för alla förvarsområden är för Fall 5s2 lika med 0,28 Liter/(m²,år). Tabell 7-11 visar att 70 % av de utvalda förvarsområdena har flöden som är mindre än medianen för alla områden i Fall 5s2.

Tabell 7-11. Test P1 – Serie 2 – Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde). Förvarsområden som passerat Test P1 Serie 2 appliceras på flödeslösningen för Fall 5s2. Den då erhållna statistiken presenteras i tabellen nedan. (Värdena i varje kolumn är beräknade som oberoende av värdena i övriga kolumner, dvs en viss percentil representerar inte samma förvarsområde i de olika kolumnerna.)

Statistik för områden som passerat Test P1 Serie 2: Fall 5s2					
Percentil	Medianvärden				Minimum
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
1					
5	2 596	4 059	0.03	67	664
10	2 718	5 052	0.05	76	735
20	3 127	5 911	0.06	86	864
30	3 286	7 476	0.08	90	1090
40	3 606	10 368	0.11	92	1223
50	3 958	12 092	0.16	99	1448
60	4 215	15 014	0.21	100	1612
70	4 908	28 324	0.27	100	1950
80	5 681	39 993	0.36	100	2282
90	6 867	83 840	0.40	100	2557
95	9 072	1.19E+05	0.48	100	2964
99					
Antal områden		53			

7.7.2.2 Resultat för Serie 4 – Fall 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2 och 8As2

Denna test avser Serie 4, som är en serie av beräkningsfall med och utan densitetsberoende flöde, dessutom med realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2 och 8A. Resultatet av denna analys presenteras nedan i figur 7-23.

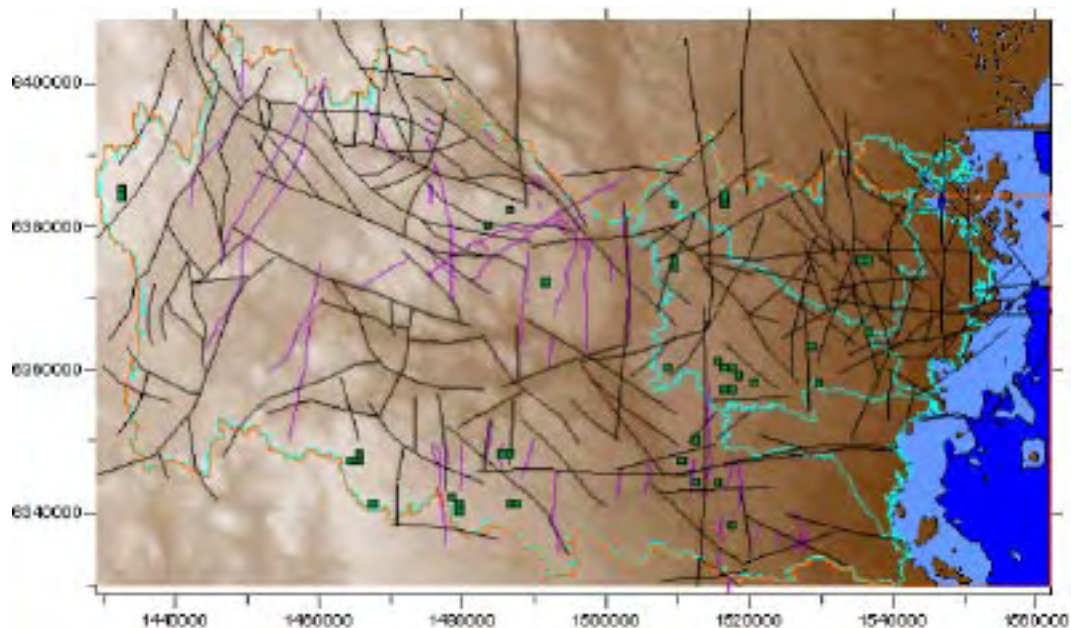
Totalt passerar 39 förvarsområden den applicerade testen (0,7 % av alla områden). Förvarsområden som har passerat denna test förekommer över stora delar av det studerade modellområdet, dock ej under sjöar, eftersom flödesvägarna under sjöar tenderar att vara korta (och uppåtriktade). De områden som presenteras i figuren nedan är alltså områden som demonstrerar långa genombrotstider och långa flödesvägar för samtliga beräkningsfall (systembeskrivningar) som ingår i Serie 4.

Vi har kopplat de förvarsområden som passerar Test P1 – Serie 4 till ett utvalt fall, som kan anses vara en god beskrivning av det studerade systemet, Fall 8As2. Därigenom erhålles statistiska egenskaper för de förvarsområden som passerat Test P1 – Serie 4. En sådan analys presenteras nedan i tabell 7-12. Tabellen visar bl a på att flödena är relativt små, mindre än 0,48 Liter/(m²,år).

7.7.2.3 Diskussion

Orsaken till att ett inte obetydligt antal förvarsområden passerar Test P1, för de olika beräkningsfallen i Serie 2 och Serie 4, är att test P1 endast avser flödesvägarnas längd och genombrotstid. Eftersom topografin är densamma i alla beräkningsfallen blir flödesmönstren i de olika beräkningsfallen inte helt olika varandra; topografin är nämligen den mest betydelsefulla systemegenskapen för grundvattnets flödesmönster i det studerade modellområdet (se t ex avsnitt 6.4).

Topografin är särskilt viktig för flödesvägarnas längd. Dessutom är flödesvägarnas genombrotstider beroende av flödesvägarnas längd, även om genombrotstiderna även beror av andra systemegenskaper såsom genomsläpplighet och hydraulisk gradient (och porositet). Långa flödesvägar har ofta, om än inte alltid, långa genombrotstider.



Figur 7-23. Test P1 – Serie 4. Test av försvarsområden vid olika systembeskrivningar: flödesvägars längd och genombrottsid. Studerade fall: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1, 5s2, 8A och 8As2. 39 försvarsområden passerade testen. Försvarsområdena är markerade med gröna rutor. Dessa områden är områden med långa flödesvägar och långa genombrottsider för samtliga de fall som ingår i Serie 4.

Tabell 7-12. Test P1 – Serie 4 – Fall 8As2 (referensfallet med densitetsberoende flöde och lokal heterogenitet). Försvarsområden som passerat Test P1 Serie 4 appliceras på flödeslösningen för Fall 8As2. Den då erhållna statistiken presenteras i tabellen nedan. (Värdena i varje kolumn är beräknade som oberoende av värdena i övriga kolumner, dvs en viss percentil representerar inte samma försvarsområde i de olika kolumnerna.)

Statistik för områden som passerat Test P1 Serie 2: Fall 8As2					
Percentil	Medianvärden				Minimum
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
1					
5	3 624	5 470	0.03	64	1382
10	3 867	7 007	0.04	71	1593
20	4 031	9 590	0.06	83	1867
30	4 216	10 932	0.07	88	2226
40	4 934	18 586	0.10	91	2355
50	5 546	25 079	0.14	94	2561
60	6 069	34 329	0.16	97	2644
70	7 320	46 067	0.22	100	2905
80	10 256	57 665	0.25	100	3192
90	11 793	1.24E+05	0.37	100	3757
95	13 344	1.64E+05	0.40	100	4846
99					
Antal områden		39			

Så om man sorterar försvarsområden med avseende på långa längder på flödesvägarna från försvarsområden så uppvisar dessa områden ofta också långa genombrotstider; och det är denna grupp av försvarsområden som återfinns bland de områden som passerar test P1. (Det är dock inte alltid så att långa längder ger långa tider) Sorterar man försvarsområden med avseende på långa genombrotstider så finner man ofta försvarsområden med korta (uppåtriktade) flödesvägar, dessa områden är belägna under sjöar (och hav om sådana områden är inkluderade i analysen) där gradienten och flödet är litet, vilket producerar långa genombrotstider. Dessa områden passerar dock inte Test P1 eftersom längderna är för korta från dessa områden.

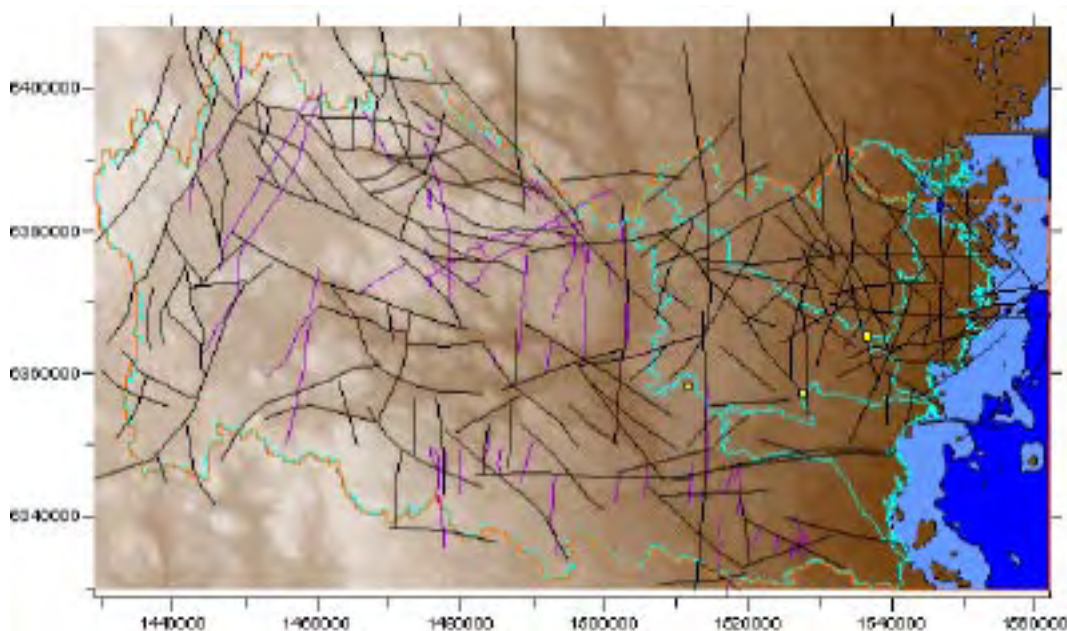
7.7.3 Test P2 – Långa tider och små flöden

Metoden för Test P2 diskuteras ovan i avsnitt 7.7.1. Testen avser försvarsområden med långa genombrotstider och små specifika flöden, vid olika systembeskrivningar.

7.7.3.1 Resultat för Serie 2 – Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2

Denna test avser Serie 2, som är en serie av beräkningsfall med och utan densitetsberoende flöde, men utan realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2. Resultatet av denna analys presenteras nedan i figur 7-24.

Totalt passerar tre (3) försvarsområden den applicerade testen. Försvarsområden som har passerat denna test förekommer endast vid vattendelare och inom ett avstånd av ca 30 km från kusten. De områden som presenteras i figuren nedan är alltså områden som demonstrerar långa genombrotstider och små specifika flöden för samtliga beräkningsfall (systembeskrivningar) som ingår i Serie 2.



Figur 7-24. Test P2 – Serie 2. Test av försvarsområden vid olika systembeskrivningar: flödesvägars genombrotstid och flöde. Studerade fall: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2. Tre (3) försvarsområden passerade testen. Försvarsområdena är markerade med gula rutor. Dessa områden är områden med långa genombrotstider och små specifika flöden för samtliga de fall som ingår i Serie 2.

Vi har kopplat de förvarsområden som passerar Test P2 – Serie 2 till ett utvalt fall, som kan anses vara en god beskrivning av det studerade systemet, Fall 5s2. Därigenom erhålls statistiska egenskaper för de förvarsområden som passerat den i detta avsnitt diskuterade testen. En sådan analys presenteras nedan i tabell 7-13. Tabellen visar bl a på små flödena, ca 0,1 Liter/(m²,år), men också på en anmärkningsvärt stor spridning i genombrotstider.

Tabell 7-13. Test P2 – Serie 2 – Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde). Förvarsområden som passerat Test P2 Serie 2 appliceras på flödeslösningen för Fall 5s2. Den då erhållna statistiken presenteras i tabellen nedan. (Värdena i varje kolumn är oberoende av värdena i övriga kolumner, dvs en viss rad representerar inte nödvändigtvis samma förvarsområde i de olika kolumnerna.)

Statistik för områden som passerat Test P2. Serie 2. Fall 5s2					
	Medianvärden				Minimum
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
Minsta	1 369	3 854	0.10	78	643
Största	6 275	43 112	0.11	88	2494
Antal områden	3				

7.7.3.2 Resultat för Serie 4 – Fall 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2 och 8As2

Denna test avser Serie 4, som är en serie fall med och utan densitetsberoende flöde, dessutom med realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2 och 8A. Inga förvarsområden passerar Test P2 och Serie 4. Detta följer av variationen i genomsläpplighet mellan de olika studerade beräkningsfallen och den lokala heterogenitetens betydelse, vilket diskuteras i avsnitt 7.7.3.3, nedan.

7.7.3.3 Diskussion

Till skillnad från Test P1 så inkluderar Test P2 storleken på grundvattenflödet (små specifika flöden). Få eller inga förvarsområden passerar Test P2 för Serie 2 och Serie 4. Detta följer av variationen i genomsläpplighet mellan de olika studerade beräkningsfallen. Storleken på det specifika flödet är nämligen nära kopplat till genomsläppligheten. Olika värden på genomsläpplighet, i olika delar av modellen, i olika beräkningsfall, får därför stor betydelse för antalet gemensamma områden.

Fall 1, 2, 3 och 4 är definierade med en homogen genomsläpplighet, även om genomsläppligheten i Fall 2 och 3 är definierad med olika typer av anisotropi och Fall 4 är definierad med djupavtagande genomsläpplighet. En kombination av fallen 1, 2, 3 och 4 (analyserade med Test P2) uppvisar 19 gemensamma områden. Fall 5 är definierat med olika litologiska enheter, vilka alla har olika genomsläpplighet. När Fall 5 introduceras till serien av jämförda beräkningsfall så minskar antalet gemensamma områden från 19 stycken till 4 stycken. När dessutom fall med densitetsberoende flöde inkluderas så minskar antalet gemensamma områden till 3 stycken. Det ringa antalet förvarsområden som passerar Test P2 och Serie 2 visar på betydelsen av den regionala variationen i genomsläpplighet för fördelningen av potentiellt intressanta förvarsområden.

När dessutom fall med lokal heterogenitet introduceras (Fall 8A och 8As2) till serien av jämförda beräkningsfall så passerar inget förvarsområde Test P2. Detta visar på betydelsen av den lokala heterogeniteten i genomsläpplighet, tillsammans med den regionala variationen i genomsläpplighet. Den lokala heterogeniteten är alltså betydelsefull i de studerade förvarsområdenas skala. Endast en realisering av den lokala heterogeniteten ingår i Serie 4. För en annan realisering av den lokala heterogeniteten är det möjligt att något av de tre områden som passerade Test P2 Serie 2 också skulle ha passerat Test P2 och Serie 4.

7.7.4 Test P3 – Långa tider, långa vägar och små flöden

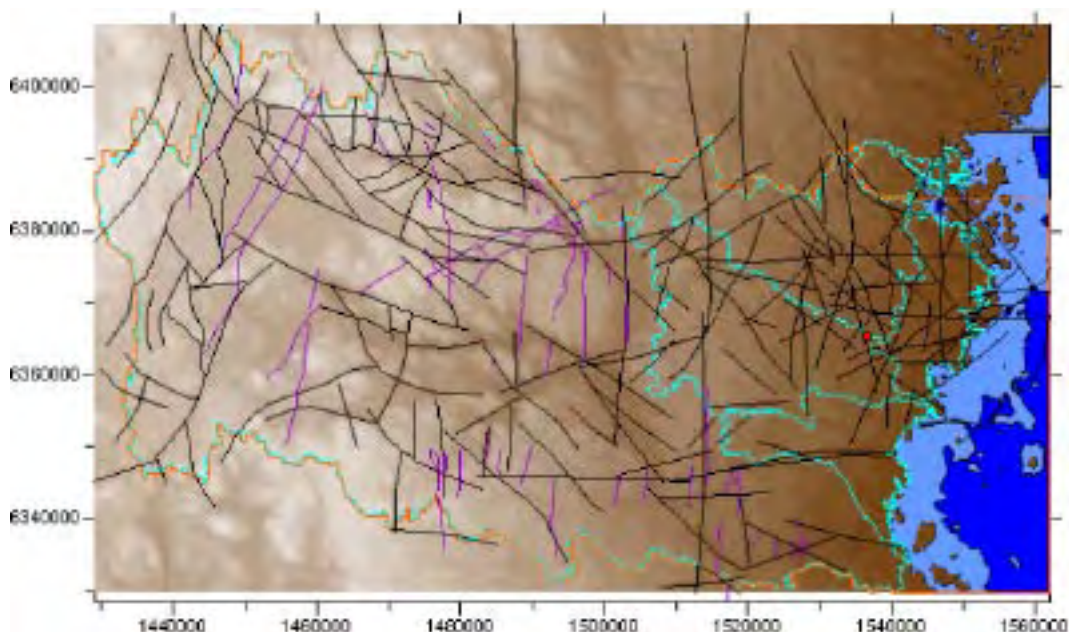
Metoden för Test P3 diskuteras ovan i avsnitt 7.7.1. Testen avser förvarsområden med långa flödesvägar, långa genombrottsstider och små specifika flöden, vid olika systembeskrivningar.

7.7.4.1 Resultat för Serie 2 – Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2

Denna test avser Serie 2, som är en serie av beräkningsfall med och utan densitetsberoende flöde, men utan realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2. Resultatet av denna analys presenteras nedan i figur 7-25.

Totalt passerar ett (1) förvarsområde den applicerade testen. Förvarsområdet som passerar denna test är lokaliserat till ett område där två vattendelare sammanstrålar ca 8 km från kusten. Detta område (som presenteras i figuren nedan) är alltså ett område som demonstrerar långa flödesvägar, långa genombrottsstider och små specifika flöden för samtliga beräkningsfall (systembeskrivningar) som ingår i Serie 2.

Vi har kopplat förvarsområdet som passerar Test P3 – Serie 2 till ett utvalt fall, som kan anses vara en god beskrivning av det studerade systemet, Fall 5s2. Därigenom erhålles statistiska egenskaper för förvarsområdet som passerat den i detta avsnitt diskuterade testen. En sådan analys presenteras nedan i tabell 7-14. Tabellen visar på ett område med potentiellt goda egenskaper.



Figur 7-25. Test P3 – Serie 2. Test av förvarsområden vid olika systembeskrivningar: flödesvägars längd, genombrottsstid, och flöde. Studerade fall: 1, 2, 3, 4, 5, 1s1, 5s1 och 5s2. Ett (1) förvarsområde passerade testen, området är markerat med en röd ruta i figuren. Detta område demonstrerar långa flödesvägar, långa genombrottsstider och små specifika flöden för samtliga de fall som ingår i Serie 2.

Tabell 7-14. Test P3 – Serie 2 – Fall 5s2 (referensfallet med densitetsberoende flöde). Förvarsområdet som passerat Test P3 Serie 2 appliceras på flödeslösningen för Fall 5s2. Den då erhållna statistiken presenteras i tabellen nedan.

Statistik för områden som passerat Test P3. Serie 2. Fall 5s2					
	Medianvärden				Minimum
	Längd (m)	Tid (år)	sq [L/m2a]	Rp[%]	Längd (m)
Värde	6 370	44 268	0.11	78	643
Antal områden	1				

7.7.4.2 Resultat för Serie 4 – Fall 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2 och 8As2

Denna test avser Serie 4, som är en serie fall med och utan densitetsberoende flöde, dessutom med realisationsberoende lokal heterogenitet: Fall 1, 2, 3, 4, 5, 8A, 1s1, 5s1, 5s2 och 8A. Inga förvarsområden passerar Test P3 och Serie 4. Detta följer främst av variationen i genomsläpplighet mellan de olika studerade beräkningsfallen och den lokala heterogenitetens betydelse, vilket diskuteras i avsnitt 7.7.3.3 ovan och i avsnitt 7.7.4.3 nedan.

7.7.4.3 Diskussion

Test P1 och Test P2 prövade var och en två olika kombinationer av de resulterande egenskaperna, Test P3 inkluderar alla tre resulterande egenskaper i samma test. Därför är Test P3 den mest diskriminerande testen av de tre P testerna. Endast ett förvarsområde passerar Test P3 för Serie 2. Detta följer främst av den tidigare diskuterade variationen i genomsläpplighet mellan de olika studerade beräkningsfallen, men även av att Test P3 testar för tre olika egenskaper.

För Test P3 och Serie 4 passerar inga områden testen. Detta följer främst av variationen i genomsläpplighet mellan de olika studerade beräkningsfallen och den lokala heterogenitetens betydelse. Den lokala heterogeniteten är alltså betydelsefull i de studerade förvarsområdenas skala. För en annan realisering av den lokala heterogeniteten är det möjligt att det område som passerade Test P3 och Serie 2 också skulle ha passerat Test P3 och Serie 4.

8 Slutsatser

Störst betydelse för det regionala flödesmönstret (från förvarsdjup) har topografien. Den topografiska undulationen är av större betydelse än konduktivitetens egenskaper. Olika litologiska enheter, regionala deformationszoner, lokal heterogenitet, kvartära avlagringar etc är av mindre betydelse än topografins undulation. Detta kommer sig av att grundvattenytan tenderar att följa topografien.

Grundvattnets flödesmönster kan beskrivas som i huvudsak lokalt. För referensfallet med densitetsberoende flöde och lokal heterogenitet är medianlängden på flödesvägarna ca 2 km och andelen storregionala flödesvägar (längre än 10 km) är mycket liten. Det är med andra ord viktigt vid jämförelser av verkliga förvarsområden att ha kunskap om de lokala plats-specifika egenskaperna. Denna modelleringsstudie indikerar att kunskap om det hydrauliska konduktivitetens anisotropi och djupavtagande är väsentlig för förståelse av förvarsplatsen i sitt regionala hydrogeologiska sammanhang.

Förvarsområden i inlandet har generellt sett inte längre genombrotstider, längre flödeslängder eller mindre specifika flöden än förvarsområden närmare kustlinjen.

Förvarsområden med långa genombrotstider och små flöden förekommer över hela det studerade modellområdet, förutom i områdets centrala delar, där de topografiska gradienterna är stora. Kombinerat långa genombrotstider och små flöden dessutom med långa flödesvägar förekommer förvarsområdena också över hela det studerade modellområdet, förutom i områdets centrala delar och under stora sjöar (eftersom flödesvägarna under sjöar ofta är korta).

Nedåtriktat grundvattenflöde är inte en garanti för långa flödesvägar och långa genombrotstider, och särskilt inte för storleken på flödet. Referensfallet visar på att en stor spridning förekommer i egenskaper för flödesvägar från förvarsområden som domineras av nedåtriktade flöden. Dock är det sannolikare att flödesvägarna och genombrotstiderna är långa om flödet är nedåtriktat än om flödet har en annan riktning. För referensfallet finns det ingen tydlig korrelation mellan flödets riktning och flödets storlek.

En gemensam analys av förvarsområden med långa genombrotstider, långa flödesvägar och små flöden vid olika systembeskrivningar (olika konceptuella modeller) är ett sätt att analysera osäkerheter i systembeskrivningarna. Grundvattenflödets storlek påverkas mer av olika systembeskrivningar än grundvattnets flödesmönster. En beräkning av grundvattnets flödesmönster är alltså en mer robust analys än en beräkning av storleken på grundvattenflödet. Av detta följer att vid en jämförelse av olika systembeskrivningar med avseende på förvarsområdets egenskaper så förekommer det ett icke obetydligt antal gemensamma förvarsområden som alla har långa flödesvägar och/eller nedåtriktade flöden, även för systembeskrivningar som är mycket olika varandra. Betydligt färre är antalet gemensamma områden då flödets storlek (små flöden) och långa genombrotstider skall beaktas (för olika systembeskrivningar). Med avseende på flödets storlek så är de lokala egenskaperna av stor betydelse och därför blir det få gemensamma områden då flödets storlek skall jämföras för olika systembeskrivningar. Detta illustrerar att förvarsområden med potentiellt intressanta flödesmönster kan identifieras med viss konfidens, men när också grundvattenflödets storlek skall inkluderas i analysen blir osäkerheterna betydligt större. Grundvattenflödet beror i hög utsträckning på den lokala vattengenomsläppligheten, vilken måste bestämmas i förvarsplatsens lokala perspektiv genom borrhålsundersökningar.

9 Referenser

Albom K, Andersson J-E, Nordqvist R, Ljunggren C, Tirén S, Voss C, 1991.

Gideå study site. Scope of activities and main results, SKB TR 91-51.

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.

Bear J, Verruit A, 1987. “Modeling groundwater flow and pollution”. D. Reidel publishing company, Dordrecht, Holland.

Bear J, Bachmat Y, 1990. “Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media.” Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Botha J F, Viviers J J, 1999. Unpublished lecture notes, Institute for Groundwater Studies, Bloemfontein, Republic of South Africa.

Carlsson L, Gustafsson G, 1984. Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik. Byggeforskningsrådet R41:1984.

Ericsson L O, Ronge B, 1986. Correlation between tectonic lineaments and

permeability values of crystalline rock in the Gideå area. SKB TR 86-19.

Svensk Kärnbränslehantering AB.

EU RETROCK, 2005. RETROCK 2005, Treatment of geosphere retention phenomena in safety assessments. Final report of the RETROCK Concerted Action, Work performed as part of the European Atomic Energy Community’s (Euratom) framework of the specific research and training programme. Contract No FIKW-CT-2001-20201, EUR 21230EN, European Commission.

Follin S, 2006. Correlation between intensity of ductile deformation and specific yield of wells. SKB rapport (in prep). Svensk Kärnbränslehantering AB.

Follin S, Stigsson M, Svensson U, 2005. Regional hydrogeological simulations of Forsmark – numerical modelling using DarcyTools. Preliminary site description. Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-60. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Follin S, Svensson U, 2003. On the role of mesh discretisation and salinity for the occurrence of local flow cells. Results from a regional-scale groundwater flow model of Östra Götaland. SKB R-03-23. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1989. Swedish hard rock laboratory evaluation of 1988 year preinvestigations and description of the target area, the island of Äspö. SKB TR 89-16. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Gustafsson B, 2004. Millennial changes of the Baltic Sea salinity – studies of the salinity to climate change. SKB TR-04-12. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Haggerty R, Gorelick S M, 1995.** Multi-rate mass transfer for modelling diffusion and surface reactions in media with pore-scale heterogeneity. *Water Resources Research*, 31(10), pp 2383–2400.
- Hermansson J, Hansen L M, Follin S, 1997.** Update of the geological models of the Gideå study site. SKB R-97-05. Svensk Kärnbränslehantering AB
- Holmén J G, Forsman J, 2005.** Flow of groundwater from great depths into the near surface deposits – modelling of a local domain in northeast Uppland. SKB R-04-31, 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 G, Stigsson M, Marsic N, Gylling B, 2003.** Modelling of groundwater flow and flow paths for a large regional domain in northeast Uppland., SKB R-03-24, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- KASAM, 2001.** Kunskapsläget på kärnavfallavfallområdet 2001, SOU 2001:35. Stockholm.
- KASAM, 2005.** KÄRNAVFALL – barriärerna, biosfären och samhället, SOU 2005:47. (KASAM:s yttrande över SKB:s FUD-program 2004), Stockholm.
- Knutsson G, Morfeldt C-O, 2002.** Grundvatten – teori & tillämpning. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- Landau L D, Lifshitz E M, 1969.** “Electrodynamics of continuous media” Pergamon, Oxford.
- Lantmäteriet,** GSD elevation database (500 m resolution).
- Lantmäteriverket, 2000.** GSD-Elevation database (50 m resolution), Lantmäteriet.
- Matheron G, 1967.** “Eléments pour une théorie des milieux poreux.” Masson, Paris, France.
- Neuman S P, 1987.** Stochastic continuum representation of fractured rock permeability as an alternative REV and fracture network concepts. In: Farmer I.W. et al. (eds.) Proc.28th U.S. Symp. Rock. Mech., 533–561, Balkema, Rotterdam.
- Nordenskjöld C E, 1944.** Morfologiska studier inom övergångsområdet mellan Kalmarslätten och Tjust. Geografiska institutionen, Lunds universitet. Monografi: 216pp. Carl Bloms Boktryckeri.
- Påsse T, 2001.** An empirical model of glacio-isostatic movements and shore-level displacement in Fennoscandia. SKB Rapport R-01-41. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rhén I, Forsmark T, Forssman I, Zetterlund M, 2006** (in prep). Evaluation of hydrogeological properties for Hydraulic Conductor Domains (HCD) and Hydraulic Rock Domains (HRD), Preliminary site description, Laxemar subarea – version 1.2, SKB R-06-22. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rodhe A, 1986.** Geochemistry and clay mineralogy of argillites in the Late Proterozoic Almesåkra group, south Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, Vol. 107, Pt. 3, pp. 175–182. Stockholm.

- Rodhe A, 1987.** Depositional environments and lithostratigraphy of the middle proterozoic Almesåkra group southeastern Sweden. SGU ser Ca nr 69. Uppsala.
- SGU, 1981.** Hydrogeologisk karta över Kalmar län, SGU ser Ah1.
- SGU, 1987.** Hydrogeologisk karta över Kronoberg län, SGU ser Ah10.
- SGU, 1989.** Hydrogeologisk karta över Jönköping län, SGU ser Ah11.
- SGU, 2003.** Berggrundsgeologisk undersökning. Sammanfattning av pågående verksamhet 2002. SGU Rapporter och meddelanden 112, Hans Delin (red). Uppsala.
- SGU, 2005.** Databaser © Sveriges geologiska undersökning, Dnr: 30-414/2005, Uppsala.
- SGU, 2005a.** Bedrock map of Kalmar county, SGU ser Ba 66.
- SGU, 2005b.** Beskrivning till berggrundskarta över Kalmar län, SGU ser Ba 66.
- SGU, 2005c.** Den svenska delen av den digitala geologiska kartan över Fennoskandiska skölden från; Koistinen T, Stephens M B, Bogatchev V, Nordgulen Ö, Wennerström M and Korhonen J, 2001. Geological map of the Fennoscandian Shield, scale 1:2 000 000. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and the North-West Department of Natural Resources of Russia.
- SGU, 2005d.** Nationell jordartsdatabas (databas), Databaser © Sveriges geologiska undersökning, Dnr: 30-414/2005, Uppsala.
- Sjöfartsverket-Svenska Kryssarklubben, 2003.** Det levande sjökortet (digital sea charts).
- SKB, 1987.** Regional well data analysis, SKB Progress Report 25-87-07. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1991.** Fjällveden study site. Scope of activities and main results, SKB TR 91-52. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1992.** Klipperås study site. Scope of activities and main results, SKB TR 92-22. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1997.** Regional characterization of hydraulic properties of rock using well test data, SKB TR 97-29. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm.
- SKB, 1998a.** Översiktsstudie av Kalmar län, SKB R-98-24. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1998b.** Översiktsstudie Östergötland, SKB R-98-26. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1998c.** Cross-prediction of the groundwater chemistry at the SKB sites in Sweden, SKB R-98-01 (fig p. 6–7). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1998d.** Nord-syd/Kust-inland – Generella skillnader i förutsättningar för lokalisering av djupförvar mellan olika delar av Sverige, SKB R-98-16 (fig p. 37). Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1998e.** The very deep hole concept – Geoscientific appraisal of conditions at great depth, SKB TR 98-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.

- SKB, 1999a.** Översiktsstudie av Jönköping län, SKB R-99-35. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 1999b.** Översiktsstudie av Kronoberg län, SKB R-99-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2003.** Grundvattnets regionala flödesmönster och sammansättning – betydelse för lokalisering av djupförvaret, SKB R-03-01. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2004a.** Recent geoscientific information relating to deep crustal studies, SKB R-04-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2004b.** The amount of glacial erosion of the bedrock, SKB TR-04-25. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2004c.** Fud-program 2004. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall, inklusive samhällsforskning. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2005.** Preliminary site description Simpevarp subarea-version 1.02, SKB R-05-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB/Sjöfartsverket, 2005.** Djup uppgifter – Simpevarp delområde (SKB databas).
- SKI, 2004.** SKI, Brev daterat 2004-09-28. ”Ang. Grundvattnets regionala flödesmönster samt betydelsen av salta respektive söta grundvatten på förvarsdjup – SKI:s bedömning.” Stockholm.
- SMHI, 1996.** Avrinningen i Sverige, medelvärden l/(s, km²) 1961–90.
- SMHI, 2002a.** Avrinningsområden (databas).
- SMHI, 2002b.** Vattendrag och sjöar (databas).
- SNA, 1994.** Sveriges Nationalatlas – Berg och jord.
- SSI, 2004.** PM date 2004-08-30. Stockholm.
- Svensson N-O, 1989.** Late Weichselian and Early Holocene shore displacement in the Central Baltic, based on stratigraphical and morphological records from Eastern Småland and Gotland, Sweden. Lund University, Department of Quaternary Geology 25, pp 1–195. Lund.
- Svensson U, Kuylentierna H-O, Ferry M, 2004.** DarcyTools, Version 2.1. Concepts, methods, equations and demo simulations. SKB R-04-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Toth J, Sheng G, 1996.** Enhancing safety of nuclear waste disposal by exploiting regional groundwater flow: The recharge area concept. Hydrogeology Journal Vol. 4, No 4.
- Voss C I, Provost A M, 2001.** Recharge-area nuclear waste repository in Southeastern Sweden, Demonstration of hydrogeologic siting concepts and techniques, SKI rapport 01:44, Stockholm.
- Westman P, Wastegård S, Schoning K, Gustafsson B, Omstedt A, 1999.** Salinity change in the Baltic Sea during the last 8 500 years: evidence, causes and models. SKB TR-99-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Wikberg P (ed), Gustafson G, Rhén I, Stanfors R, 1991. Äspö Hard Rock Laboratory. Evaluation and conceptual modelling based on the pre-investigations 1986–1990. SKB TR 91-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Woodford A C, Chevallier L, 2002. Hydrogeology of main Karoo basin: Current knowledge and future research needs. Water Research Commission Report No. TT 179/02, Republic of South Africa.

Översikt av tillgängliga data

Med ALLMÄNNA REFERENSER menas i nedanstående tabeller sådan information som givit generell geovetenskaplig förståelse för regionen och dess konceptuella beskrivning. I vissa fall har dessa referenser en spatial upplösning som för delar av regionen vore fördelaktiga att använda. Eftersom strävan emellertid varit att använda de för **hela regionen** mest enhetliga och relevanta databaserna har detaljinformation i vissa delområden exkluderats som digitaliserad indata.

Topografi

	ANVÄND	ALLM. REF
Höjddata		
/Lantmåteriverket 2000/, GSD-Höjddatabas (50 m upplösning), Lantmåteriet	X	
/Lantmåteriet/, GSD-Höjddatabas (500 m upplösning)		X

Batymetri

	ANVÄND	ALLM. REF
Batymetri		
/SKB/Sjöfartsverket 2005/: djupuppgifter – Simpevarpsområdet	X	
/Sjöfartsverket-Svenska Kryssarklubben 2003/: Det levande sjökortet (digitala sjökort)	X	

Hydrologi

	ANVÄND	ALLM. REF
Hydrologi		
/SMHI 2002a/: Avrinningsområden (databas)	X	
/SMHI 2002b/: Vattendrag och sjöar	X	

Kvartära avlagringar

	ANVÄND	ALLM. REF
Kvartära avlagringar		
Sveriges geologiska undersökning /SGU 2005d/: Nationell jordartskarta (databas)		X
/SKB 1998a/: Översiktsstudie av Kalmar län, R-98-24 (kvartära avlagringar – utdrag från Nationalatlas Berg och jord /SNA 1994/)		X
/SKB 1999a/: Översiktsstudie av Jönköping län, R-99-35 (kvartära avlagringar – utdrag från Nationalatlas Berg och jord /SNA 1994/)		X
/SKB 1998a/: Översiktsstudie av Kalmar län, R-98-24 (grundvattentillgångar)	X	

	ANVÄND	ALLM. REF
/SKB 1999a/: Översiktsstudie av Jönköping län, R-99-35 (grundvattentillgångar)	X	
Sveriges geologiska undersökning (SGU): Jordartsgeologiska kartor		
Nässjö 6E NO Ae 144, 2001		X
Nässjö 6E SO Ae 145, 2001		X
Vetlanda 6F NV Ae 146, 2001		X
Vetlanda 6F SV Ae 147, 2001		X
Oskarshamn 5G NO Ae 94, 1992		X
Tranås 7F SO (delvis karterat)		X
Tranås 7G SV (delvis karterat)		X
Vetlanda 6F NO (delvis karterat)		X
Vetlanda 6F SO (delvis karterat)		X
Vimmerby 6G NV (delvis karterat)		X
Vimmerby 6G SV (delvis karterat)		X
Jordmäktighet		
/SKB 1998a/: Översiktsstudie av Kalmar län, R-98-24	X	
/SKB 1999a/: Översiktsstudie av Jönköping län, R-99-35	X	
/SKB 2004b/: The amount of glacial erosion of the bedrock, TR-04-25		X

Berggrund

	ANVÄND	ALLM. REF
Berggrund		
Sveriges geologiska undersökning /SGU 2005c/: Den svenska delen av den digitala geologiska kartan över Fennoskandiska skölden från; Koistinen T, Stephens M B, Bogatchev V, Nordgulen Ö, Wennerström M and Korhonen J. 2001. Geological map of the Fennoscandian Shield, scale 1:2 000 000. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and the North-West Department of Natural Resources of Russia	X	
/SKB 1998a/: Översiktsstudie av Kalmar län, R-98-24		X
/SKB 1999a/: Översiktsstudie av Jönköping län, R-99-35		X
Sveriges geologiska undersökning /SGU 2005ab/: Berggrundskartan över Kalmar län, SGU Ba 66		X
Almesåkrgruppen		
/Rodhe A, 1986/. Geochemistry and clay mineralogy of argillites in the Late Proterozoic Almesåkra group, south Sweden. Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar, Vol. 107, Pt. 3, pp. 175–182. Stockholm	X	
/Rodhe A, 1987/. Depositional environments and lithostratigraphy of the middle proterozoic Almesåkra group southeastern Sweden. SGU ser Ca nr 69	X	

Deformationszoner och diabasgångar

	ANVÄND	ALLM. REF
Structures		
Sveriges geologiska undersökning /SGU 2005a/: Berggrundskarta över Kalmar län, SGU Ba 66	X	
/SKB 1998a/: Översiktsstudie av Kalmar län, R-98-24	X	
/SKB 1999a/: Översiktsstudie av Jönköping län, R-99-35	X	
Sveriges geologiska undersökning /SGU 1981/: Hydrogeologisk karta över Kalmar län, SGU ser Ah1		X
Sveriges geologiska undersökning /SGU 1989/: Hydrogeologisk karta över Jönköping län, SGU ser Ah11		X

Transmissivitet hos deformationszoner

	ANVÄND	ALLM. REF
/Rhén et al. 2006/ (in prep). Evaluation of hydrogeological properties for Hydraulic Conductor Domains (HCD) and Hydraulic Rock Domains (HRD), Preliminary site description, Laxemar subarea – version 1.2, SKB R-06-22.	X	

Hydraulisk konduktivitet

	ANVÄND	ALLM. REF
K-värde (spatiell)		
/SKB 1998a/: Översiktsstudie av Kalmar län, R-98-24		X
/SKB 1999a/: Översiktsstudie av Jönköping län, R-99-35		X
Sveriges geologiska undersökning /SGU 1981/: Hydrogeologisk karta över Kalmar län, SGU ser Ah1	X	
Sveriges geologiska undersökning /SGU 1989/: Hydrogeologisk karta över Jönköping län, SGU ser Ah11	X	
/SKB 1987/: Regional well data analysis, progress report 25-87-07		X
K-värde (djupberoende)		
/SKB 1997/: Regional characterization of hydraulic properties of rock using well test data, TR 97-29	(X)	
/SKB 1998e/: The very deep hole concept – Geoscientific appraisal of conditions at great depth, TR 98-05 (fig p. 86)	(X)	
/SKB 1991/: Fjällveden study site. Scope of activities and main results, TR 91-52	(X)	
/SKB 1992/: Klipperås study site. Scope of activities and main results, TR 92-22	(X)	

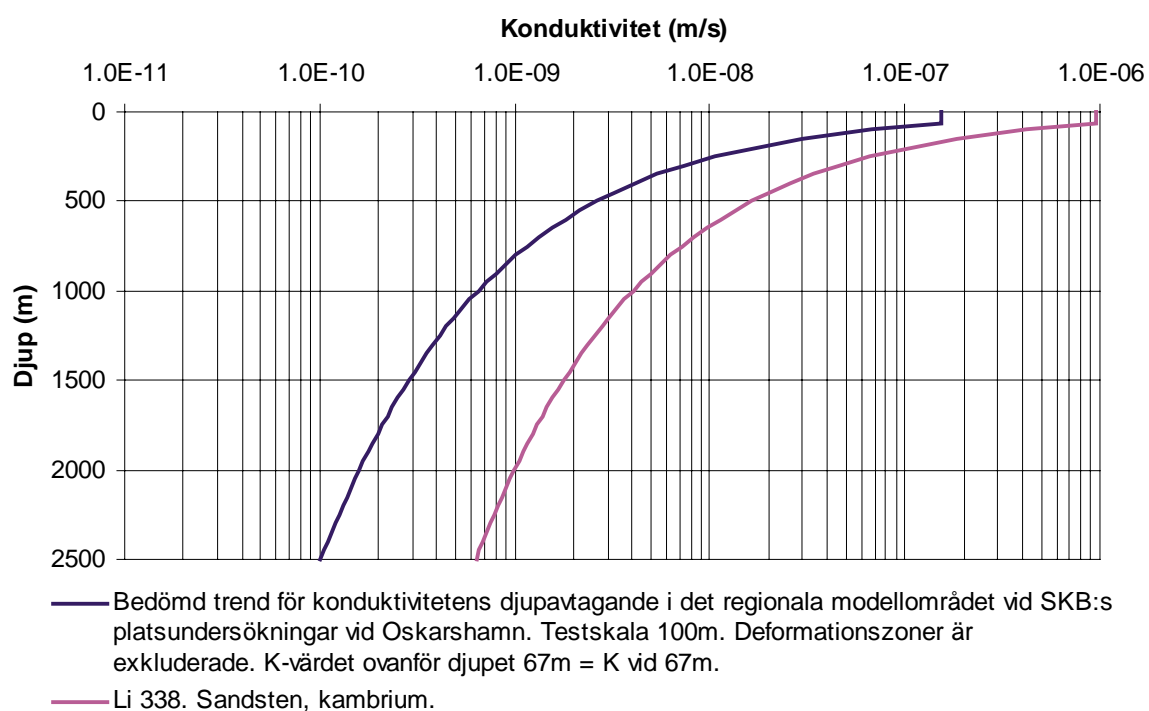
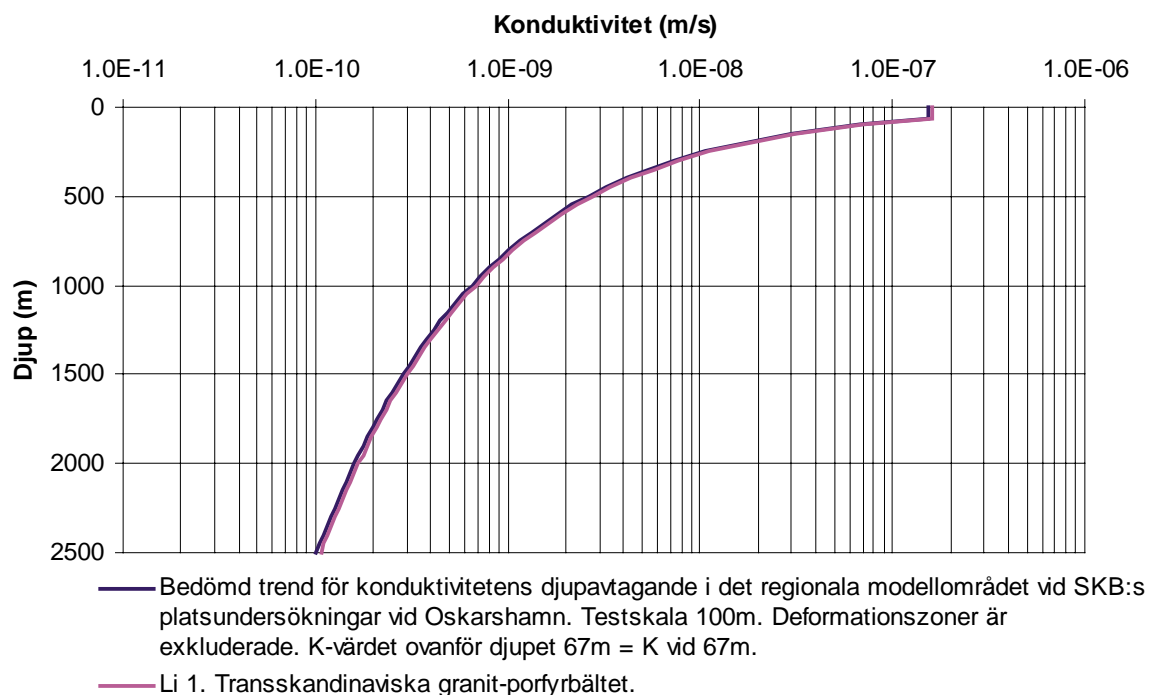
	ANVÄND	ALLM. REF
/SKB 2004a/: Recent geoscientific information relating to deep crustal studies, R-04-09	(X)	
/Rhén et al. 2006/ (in prep). Evaluation of hydrogeological properties for Hydraulic Conductor Domains (HCD) and Hydraulic Rock Domains (HRD), Preliminary site description, Laxemar subarea – version 1.2, SKB R-06-22.	X	

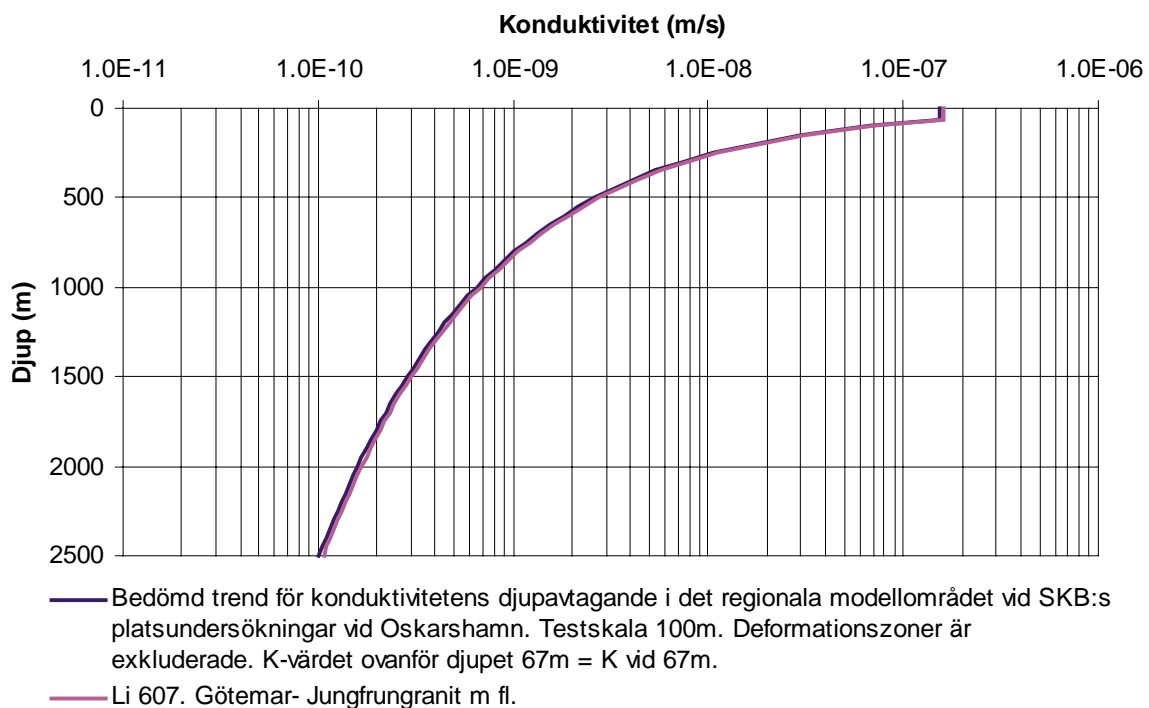
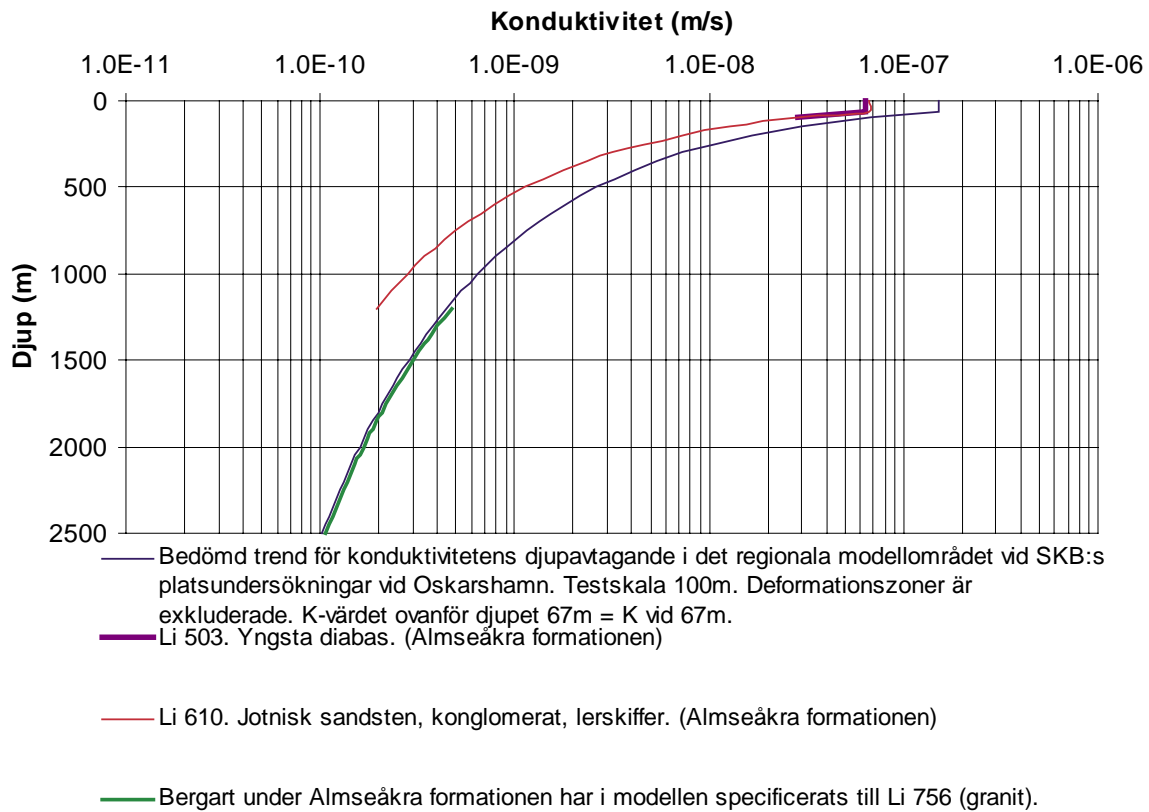
Salthalt

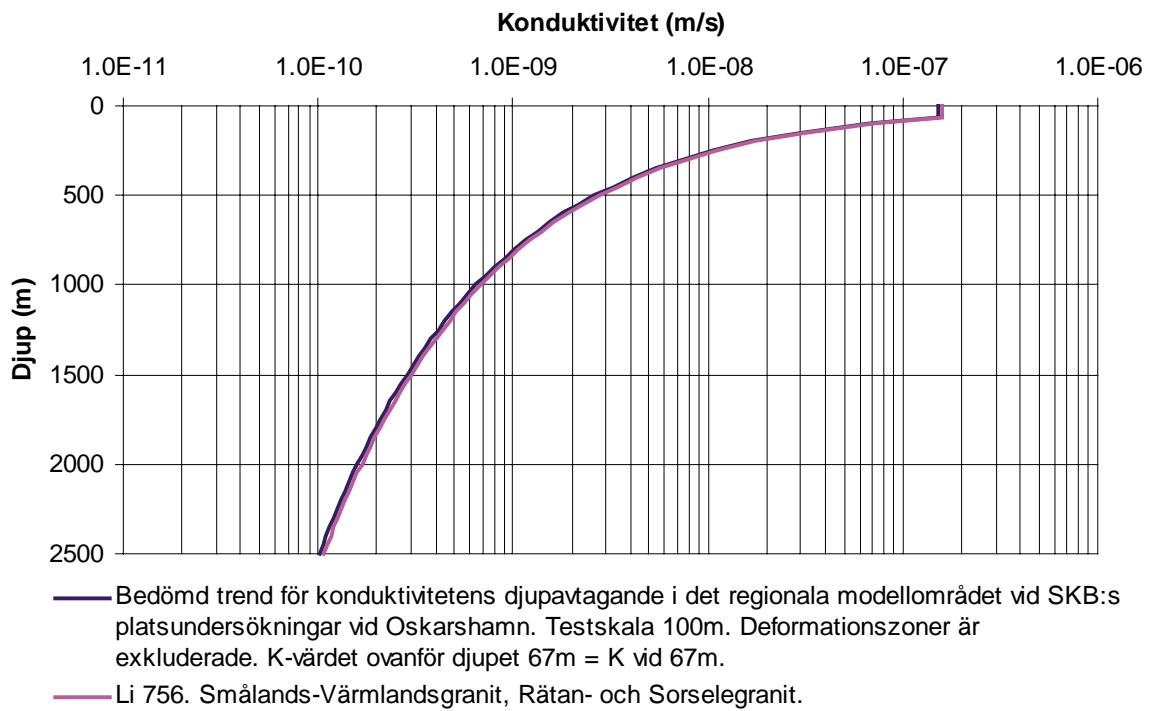
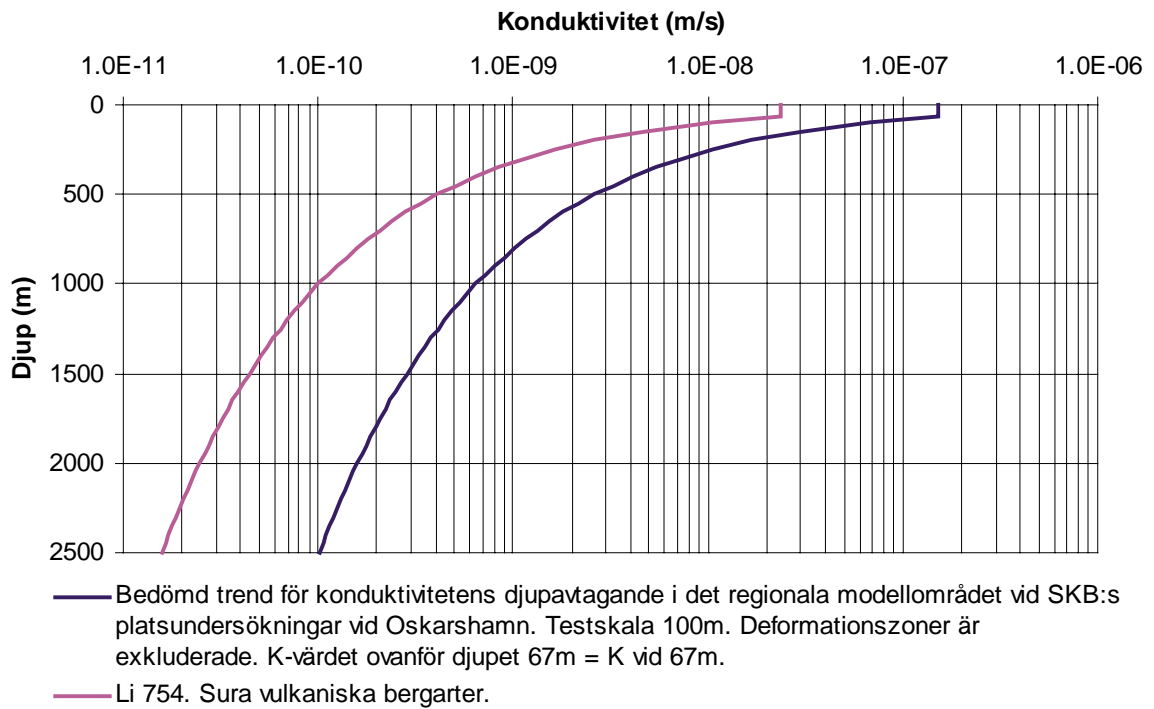
	ANVÄND	ALLM. REF
Salthalt (spatiell)		
Sveriges geologiska undersökning /SGU 1981/: Hydrogeologisk karta över Kalmar län, SGU ser Ah1	X	
Sveriges geologiska undersökning /SGU 1989/: Hydrogeologisk karta över Jönköping län, SGU Ah11	X	
Sveriges geologiska undersökning /SGU 1987/: Hydrogeologisk karta över Kronoberg län, SGU ser Ah10	X	
/SKB 1998b/: Översiktsstudie Östergötland, R-98-26	X	
/SKB 1999b/: Översiktsstudie av Kronoberg län, R-99-19		X
/SKB 1998a/: Översiktsstudie av Kalmar län, R-98-24		X
/SKB 1999a/: Översiktsstudie av Jönköping län, R-99-35		X
Salthalt (djupberoende)		
/SKB 2005/: Preliminary site description Simpevarp subarea – version 1.02, R-05-08 (fig p. 311)	X	
/SKB 1998e/: The very deep hole concept - Geoscientific appraisal of conditions at great depth, TR 98-05 (fig p. 86)	(X)	
/SKB 2003/: Grundvattnets regionala flödesmönster och sammansättning – betydelse för lokalisering av djupförvaret, R-03-01 (fig p. 35)	X	
/SKB 1998d/: Nord-syd/Kust-inland – Generella skillnader i förutsättningar för lokalisering av djupförvar mellan olika delar av Sverige, R-98-16 (fig p. 37)		X
/SKB 2004a/: Recent geoscientific information relating to deep crustal studies, R-04-09 (table p. 20)		X
/SKB 1998c/: Cross-prediction of the groundwater chemistry at the SKB sites in Sweden, R-98-01 (fig p. 6–7)		X

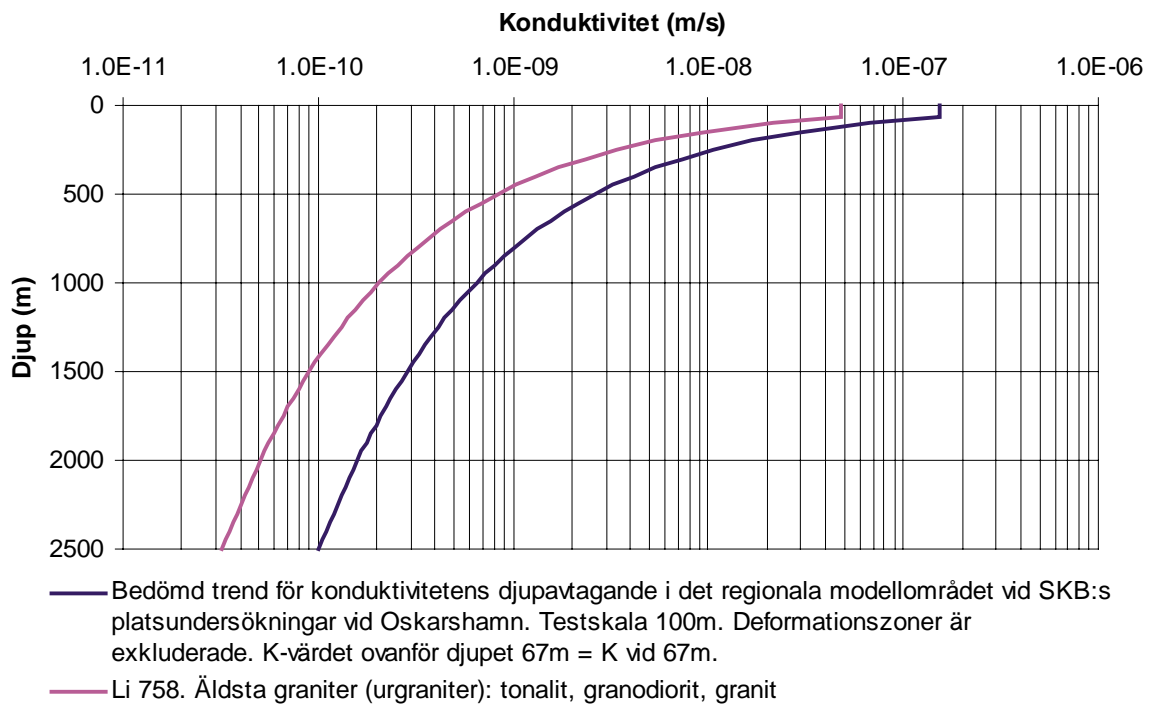
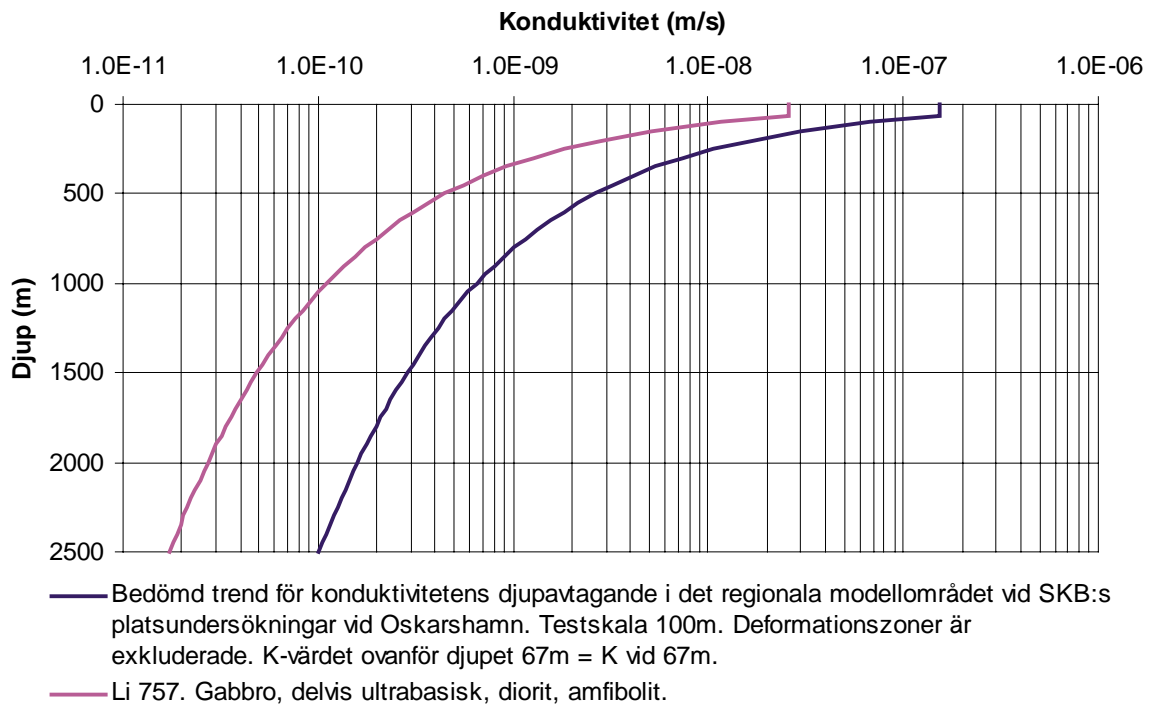
Djupavtagande konduktivitet för litologiska enheter i modell

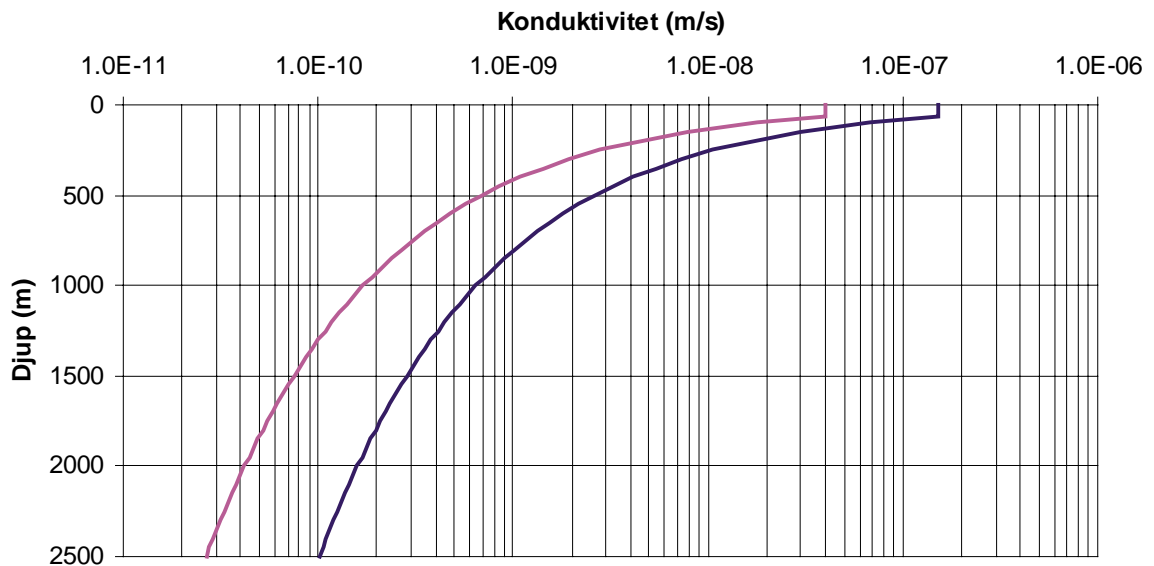
Nedan följer ett antal figurer som demonstrerar det djupavtagande för konduktiviteten som har använts för de olika litologiska enheterna.





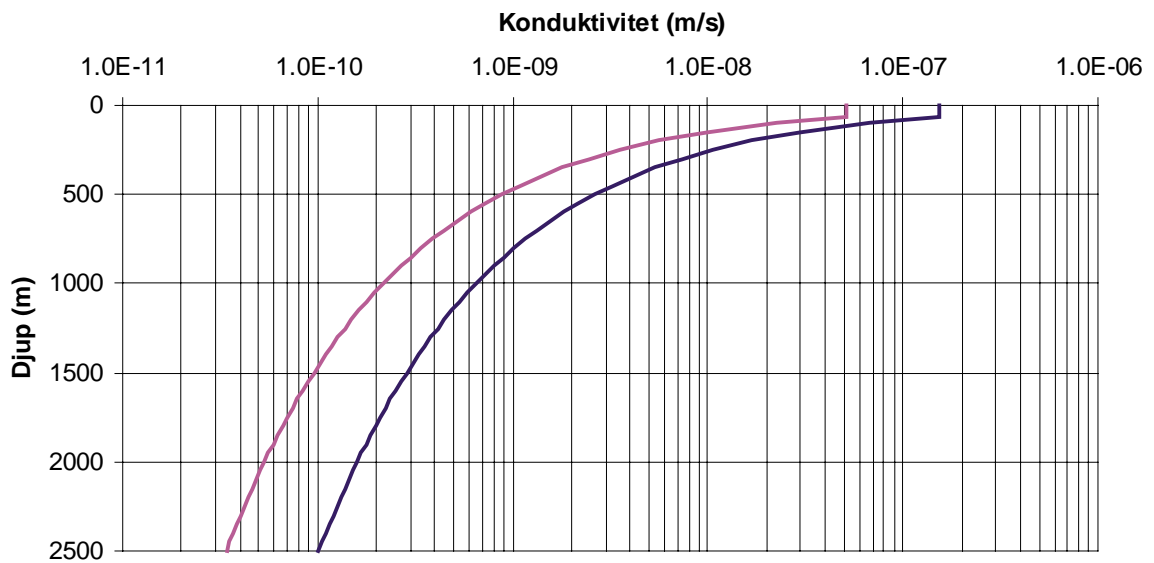






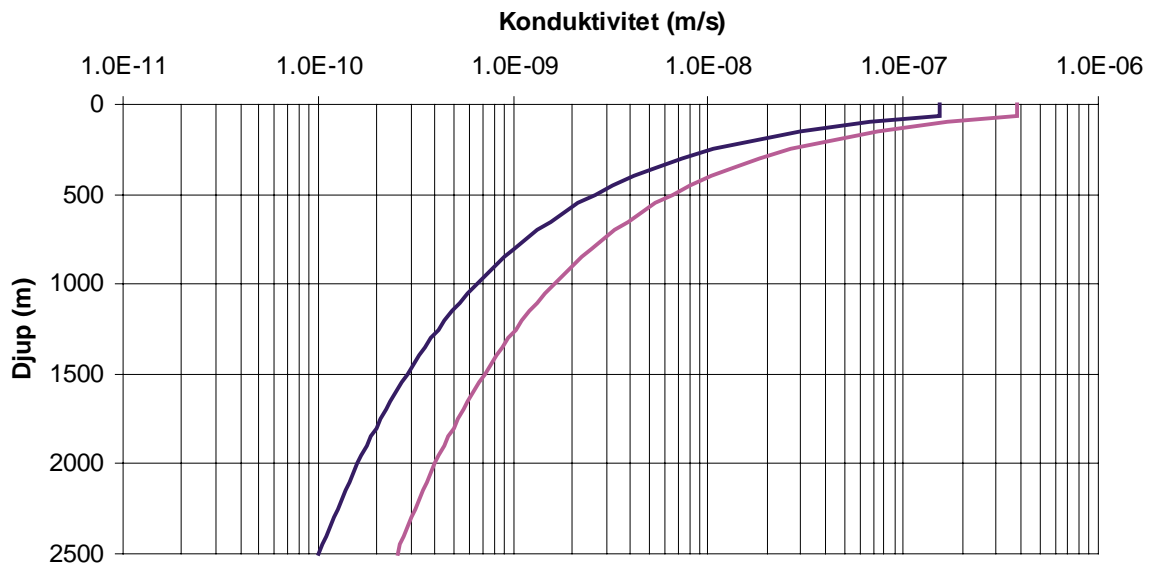
— Bedömd trend för konduktivitetens djupavtagande i det regionala modellområdet vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn. Testskala 100m. Deformationszoner är exkluderade. K-värdet ovanför djupet 67m = K vid 67m.

— Li 767. Basiska vulkaniska bergarter.

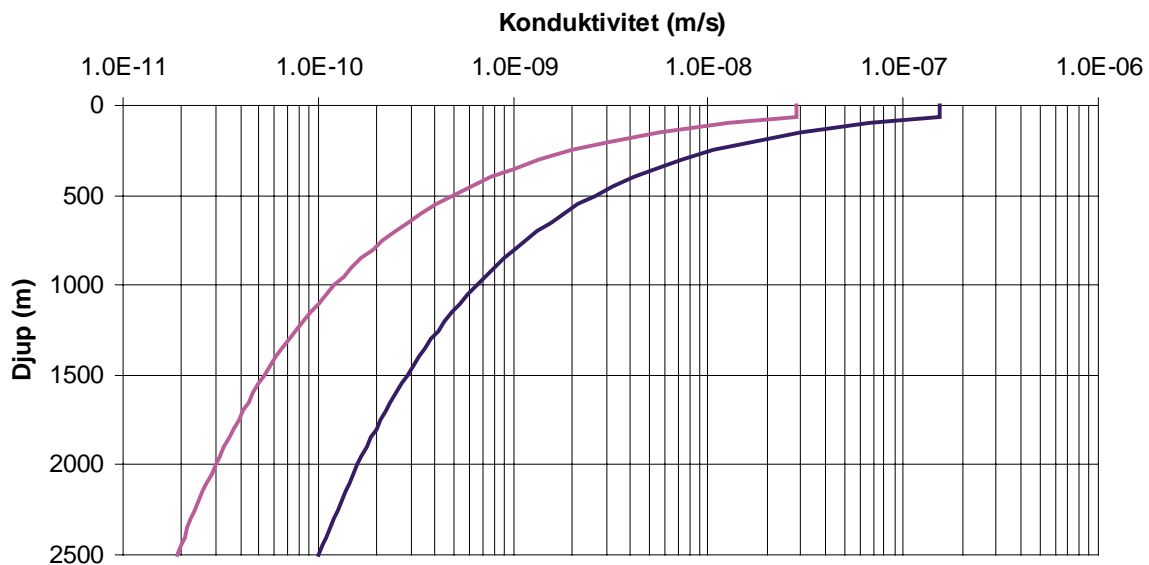


— Bedömd trend för konduktivitetens djupavtagande i det regionala modellområdet vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn. Testskala 100m. Deformationszoner är exkluderade. K-värdet ovanför djupet 67m = K vid 67m.

— Li 768. Sura vulkaniska bergarter.



- Bedömd trend för konduktivitetens djupavtagande i det regionala modellområdet vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn. Testskala 100m. Deformationszoner är exkluderade. K-värdet ovanför djupet 67m = K vid 67m.
- Li 771. Gråvacka, skiffer, kvartsit och arkos, delvis omvandlade till gnejs och migmatit.



- Bedömd trend för konduktivitetens djupavtagande i det regionala modellområdet vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn. Testskala 100m. Deformationszoner är exkluderade. K-värdet ovanför djupet 67m = K vid 67m.
- Li 775. Gråvacka, skiffer, kvartsit

Ekvationer för stokastisk generering av lokal heterogenitet. Exempel på genererade K-värden

Ekvationer som beskriver den lokala heterogenitetens skalberoende (stokastiskt kontinuum)

Geometriskt medelvärde för lognormalfördelning som definierar bergblockens hydrauliska konduktivitet. Det geometriska medelvärdet baseras på en interpolerad kurva (A) se figur B3-1.

$$K_{BG} = \frac{2(a \tan(X)^{P_2}) - a \tan(P_1)^{P_2}}{a \tan(P_1)^{P_2}} \frac{a \tan(X P_3)}{a \tan(P_1 P_3)} \frac{X^{P_4}}{P_1^{P_4}} K_E$$

Standardavvikelse (för eLog värden) för lognormalfördelningen som definierar bergblockens hydrauliska konduktivitet. /Matheron 1967/. Se kurva (B) i figur B3-2.

$$\sigma_{eLog KB} = \sqrt{6eLog\left(\frac{K_E}{K_{BG}}\right)}$$

K_E = Effektivvärdet för den hydrauliska konduktiviteten (stokastiskt kontinuum).

K_{BG} = Geometriskt medelvärde för lognormalfördelningen som definierar bergblockens hydrauliska konduktivitet.

$\sigma_{eLog KB}$ = Standardavvikelse (för eLog värden) för lognormalfördelningen som definierar bergblockens hydrauliska konduktivitet.

X = Representativ skala för fältmätningar och för bergblocken i modellen (stokastiskt kontinuum).

Kurvpassningsparametrar

P_1 = Kurvpassningparameter som representerar den skala där skillnaden mellan den ekvivalenta konduktiviteten och effektivvärdet kan anses vara försumbar.

P_2 = Kurvpassningparameter.

P_3 = Kurvpassningparameter.

P_4 = Kurvpassningparameter.

Kurvpassningsparametrar som definierar kurvorna A och B (se figur B3-1 och figur B3-2)

	P_1	P_2	P_3	P_4	K_E
Kurva A och B	1 000	2,65	0,14	0,5	Definieras av den homogena modellens konduktivitet

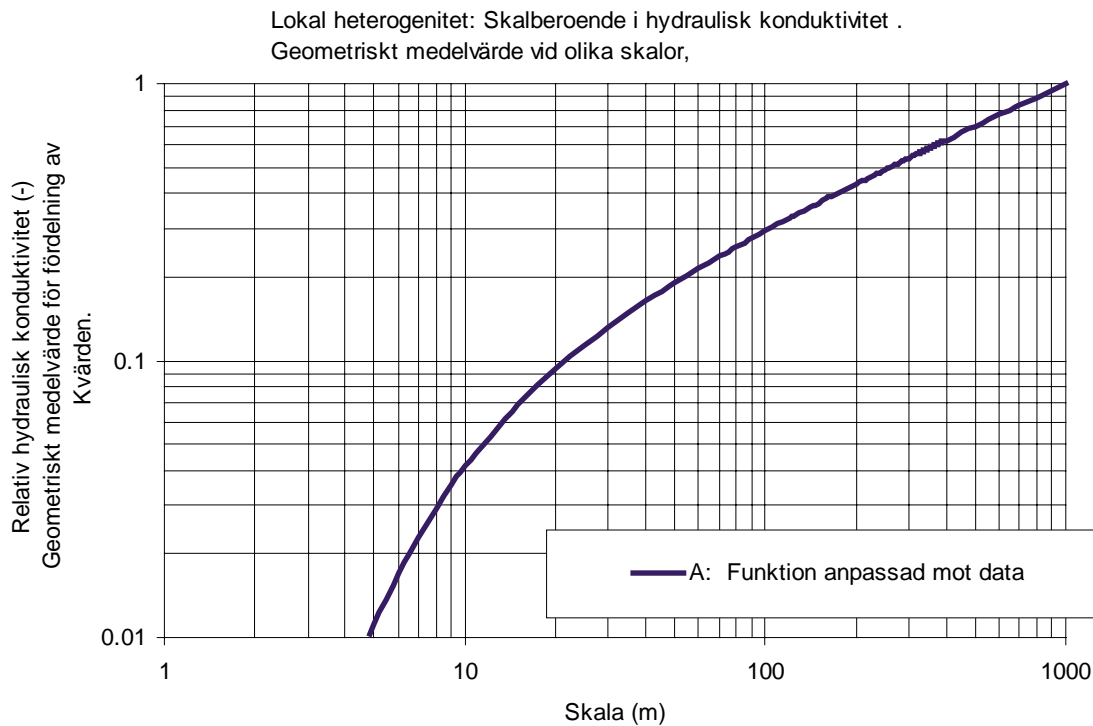
Modellen inkluderar beräkningsceller av olika storlek. Den representativa skalan beräknas som sidan på en kub med samma volym.

$$X = \sqrt[3]{C_x C_y C_z}$$

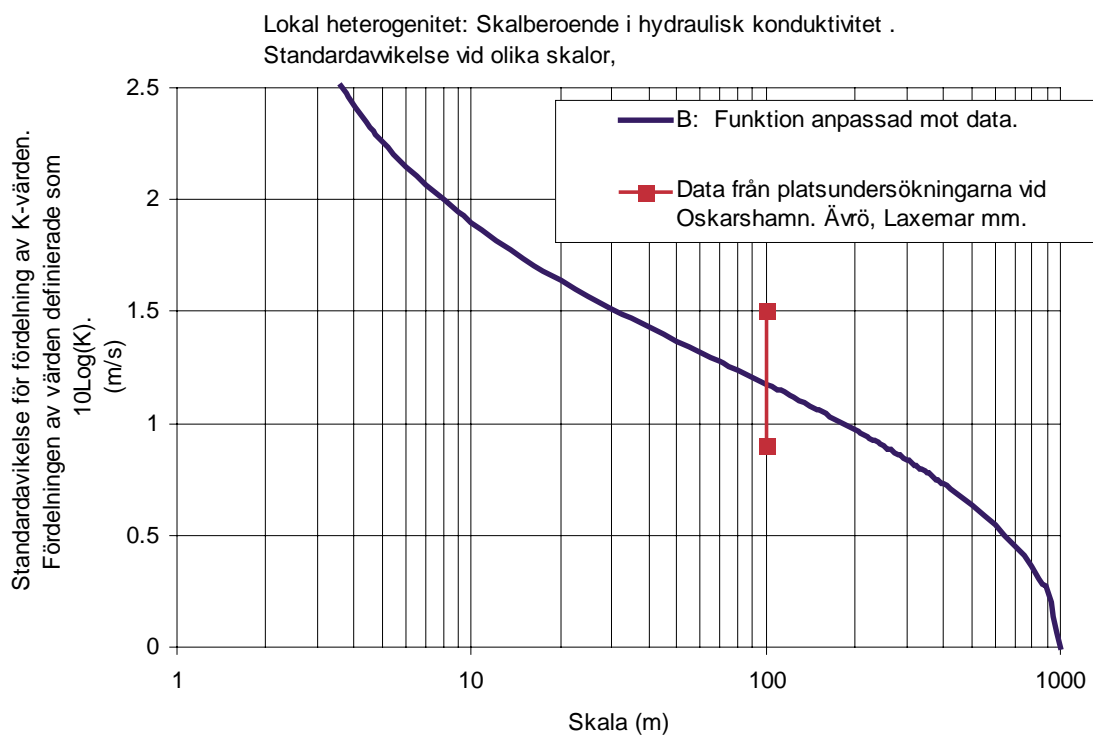
C_x = Cellens längd i X-riktning.

C_y = Cellens längd i Y-riktning.

C_z = Cellens längd i Z-riktning.

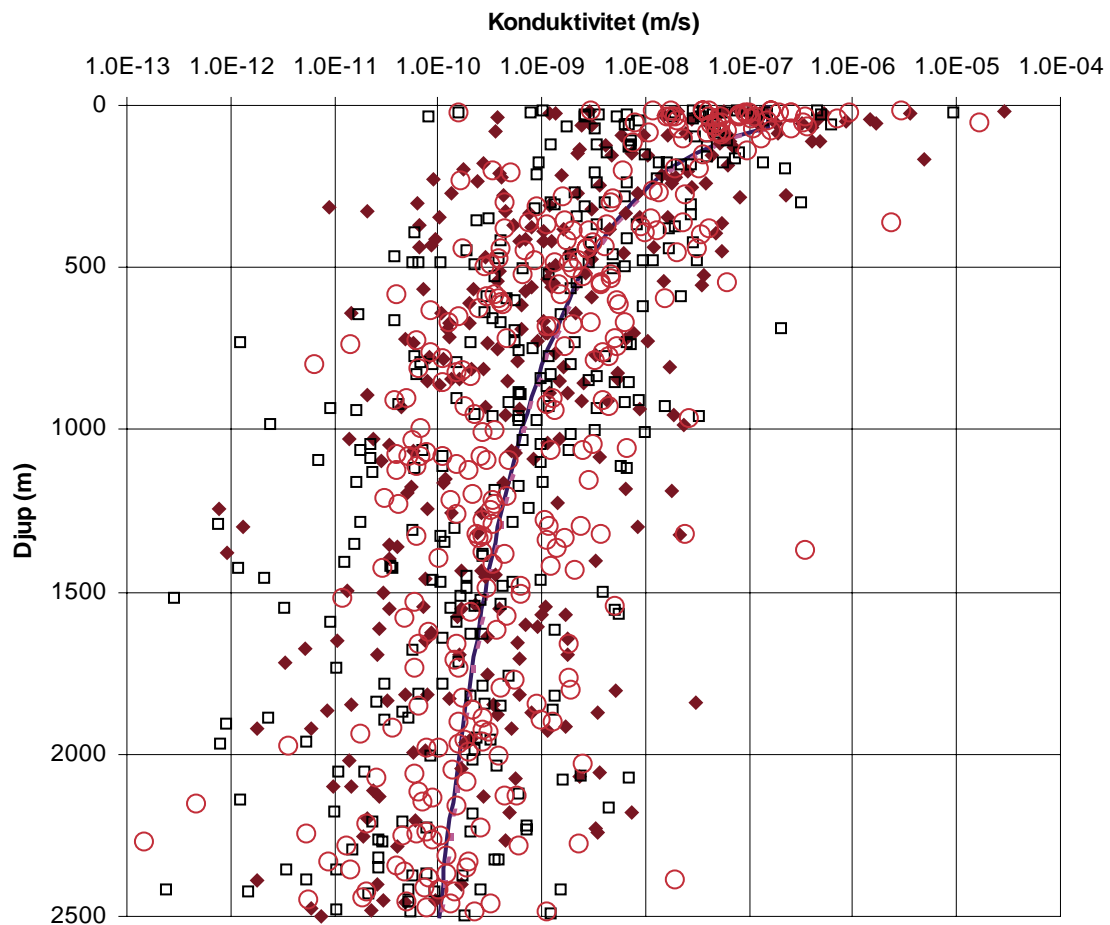


Figur B3-1. Lokal heterogenitet. Skalberoende i konduktivitet. Geometriskt medelvärde (relativt) vid olika skalor.



Figur B3-2. Lokal heterogenitet. Skalberoende i konduktivitet. Standardavvikelse (för 10Log värden) vid olika skalor.

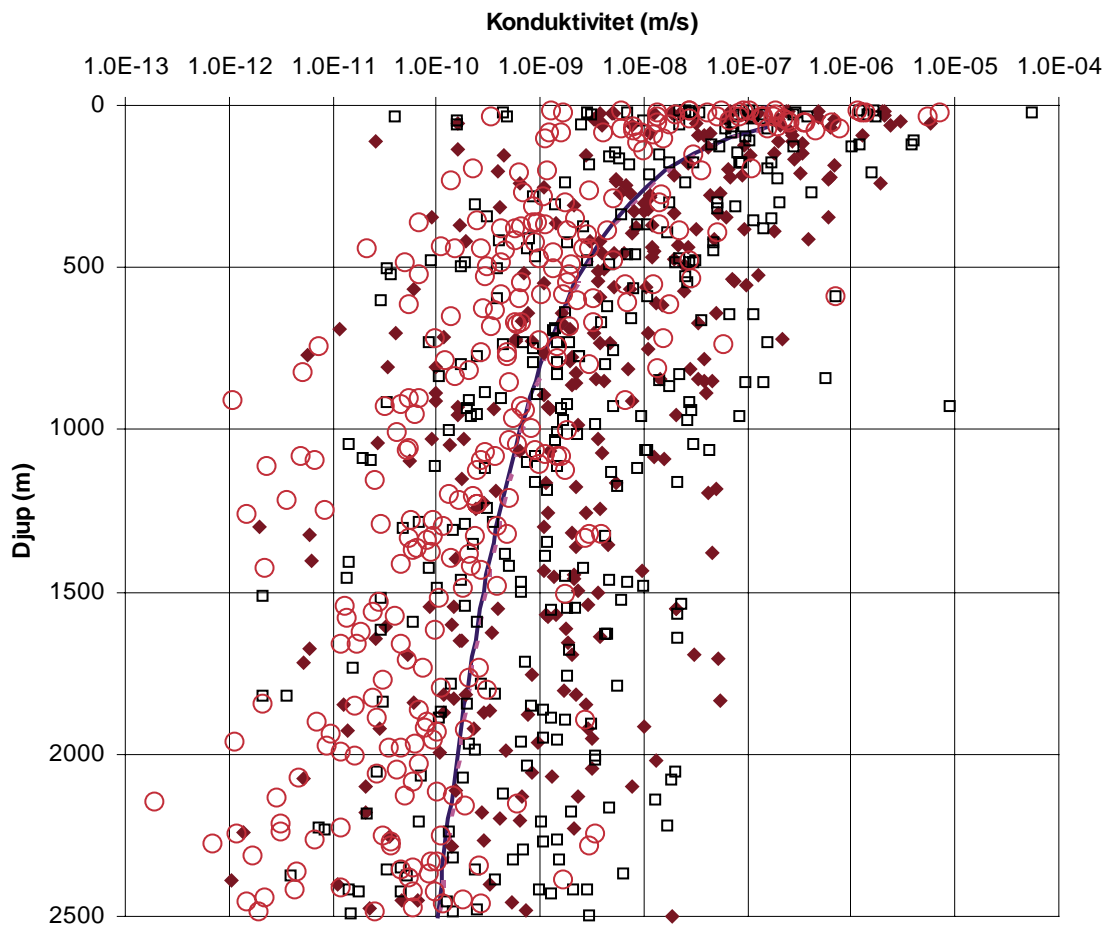
Konduktivitet och djup



- Bedömd trend för konduktivitetens djupavtagande i det regionala modellområdet vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn. Testskala 100m. Skjuvzoner är exkluderade. K-värdet ovanför djupet 67m = K vid 67m.
- - - Homogen modell: Litologisk enhet Li 756. Granite, Granodiorite, Quartz-monzonite, Monzonite, Syenite and metamorphic equivalents.
- ◆ Heterogen modell: Li 756. K-värde som tilldelats en cellvägg i modellen, X-vägg.
- Heterogen modell: Li 756. K-värde som tilldelats en cellvägg i modellen, Y-vägg.
- Heterogen modell: Li 756. K-värde som tilldelats en cellvägg i modellen, Z-vägg.

Figur B3-3. Fall 8A. Lokal heterogenitet. Exempel på stokastiskt genererade värden på hydraulisk konduktivitet. Figuren visar lokala K-värden (cellväggarnas K-värden) i litologiska enheten No756, i en modell med djupavtagande konduktivitet och ingen generell anisotropi (Fall 8A).

Konduktivitet och djup



— Bedömd trend för konduktivitetens djupavtagande i det regionala modellområdet vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn. Testskala 100m. Skjuvzoner är exkluderade. K-värdet ovanför djupet 67m = K vid 67m.

- - - Homogen modell: Litologisk enhet Li 756. Granite, Granodiorite, Quartz-monzonite, Monzonite, Syenite and metamorphic equivalents.

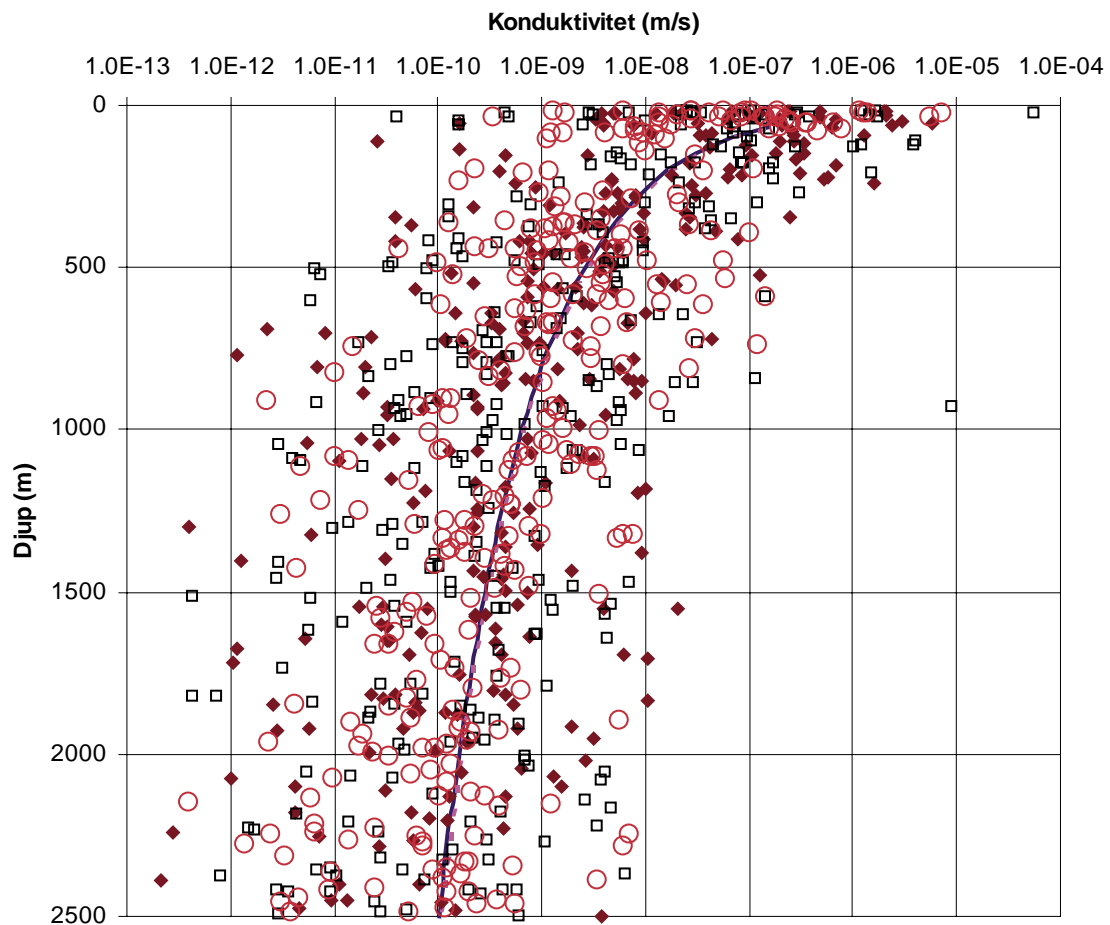
◆ Heterogen modell: Li 756. K-värde som tilldelats en cellvägg i modellen, X-vägg.

□ Heterogen modell: Li 756. K-värde som tilldelats en cellvägg i modellen, Y-vägg.

○ Heterogen modell: Li 756. K-värde som tilldelats en cellvägg i modellen, Z-vägg.

Figur B3-4. Fall 8C. Lokal heterogenitet. Exempel på stokastiskt genererade värden på hydraulisk konduktivitet. Figuren visar lokala K-värden (cellväggarnas K-värden) i litologiska enheten No756, i en modell med djupavtagande konduktivitet och generell anisotropi (Fall 8C). Genomsläppligheten i horisontalplanet är 10 gånger större än genomsläppligheten i vertikalplanet.

Konduktivitet och djup



- Bedömd trend för konduktivitetens djupavtagande i det regionala modellområdet vid SKB:s platsundersökningar vid Oskarshamn. Testskala 100m. Skjuvzoner är exkluderade. K-värdet ovanför djupet 67m = K vid 67m.
- - - Homogen modell: Litologisk enhet Li 756. Granite, Granodiorite, Quartz-monzonite, Monzonite, Syenite and metamorphic equivalents.
- ◆ Heterogen modell: Li 756. K-värde som tilldelats en cellvägg i modellen, X-vägg.
- Heterogen modell: Li 756. K-värde som tilldelats en cellvägg i modellen, Y-vägg.
- Heterogen modell: Li 756. K-värde som tilldelats en cellvägg i modellen, Z-vägg.

Figur B3-5. Fall 8D. Lokal heterogenitet. Exempel på stokastiskt genererade värden på hydraulisk konduktivitet. Figuren visar lokala K-värden (cellväggarnas K-värden) i litologiska enheten No756, i en modell med djupavtagande konduktivitet och djupavtagande generell anisotropi (Fall 8D). På djup mellan 0 m och 200 m är anisotropin konstant; genomsläppligheten i horisontalplanet är 10 gånger större än genomsläppligheten i vertikalplanet. Mellan djupen 200 m och 400 m avtar anisotropin. Under djupet 400 m förekommer ingen anisotropi.

Diabasgångars hydrauliska konduktivitet (engelsk version)

Dolerite dykes – Hydraulic conductivity

Dolerite dykes are found in the model area. There are no literature found that shows the hydraulic properties of the Dolerite dykes found within the area. However, it is expected that the dykes may play a significant role in the regional groundwater flow pattern and therefore general findings of structural concepts and hydraulic properties may be useful for scoping calculations.

For assessing properties three main sources have been used:

1. SKB investigation data from Gideå.
2. SOU 2001 – KASAM.
3. Hydrogeology of the main Karoo basin.
4. SKB Site investigations – Hydraulic conductivity of rock types with mafic composition.

There are probably more useful references but the concepts and data given in the above references are judged to give sufficient information for conceptualizing and assessing properties for the groundwater flow modelling.

SKB investigation data from Gideå

SKB have performed extensive investigations at the Gideå site in north of Sweden /Ahlbom et al. 1983, Ericsson and Ronge 1986, Albom et al. 1991, Hermansson et al. 1997, Walker and Gylling 1999/. In that area there are several subvertical Dolerite dykes. In these reports some observations of the Dolerite dykes are made and summarized in the following.

The surrounding rock types to the Dolerite dykes are mainly Migmatite and Veined gneiss. Most of the dykes are less than 1 m wide and a few dikes are 2–10 m thick /Ahlbom et al. 1983, Albom et al. 1991/. The specific capacity values of wells in the SGU well archive for an area (laccolith) near the Gideå site indicate that Dolerite has about 3 times lower specific capacity compared to wells in Younger granite and Migmatite /Ericsson and Ronge 1986/.

The reporting and modelling of the Gideå site have covered many aspects but have not attempted to discuss the hydraulic function of the Dolerite dykes in detail. Therefore the hydraulic data and the core mapping have been examined in order to distinguish the hydraulic properties of the:

1. Hydraulic properties of interior of the Dolerite dykes.
2. Hydraulic properties of contact zone between the Dolerite dykes and the surrounding rock.
3. Hydraulic properties of the surrounding rock compared to Dolerite dykes.

The injection tests performed were made in test section lengths 2, 3, 5 and 25 m, and only the 25 m sections are performed systematically along the boreholes. In Attachment A1 the tests with 25 m test sections are plotted to show an overview of the data. As can be seen all boreholes except three (Gi04, Gi05, Gi12) are intersected by Dolerite dykes and test sections only covers contact zones (including also the interior of the dykes) and surrounding

rock to the Dolerite dykes. This is not surprising as the intersection length in the borehole of the dykes is rather small. Test section lengths 2, 3, 5 m should give better possibilities to distinguish between the three classes above. However, only one test section in one borehole is entirely within Dolerite (see Figure B4-2). It can then be concluded that the tests available show the hydraulic properties of the contact zone between a Dolerite dyke and surrounding rock but not the properties of the Dolerite dyke itself, which generally is assumed to have a lower hydraulic conductivity than the surrounding rock.

In Figure B4-1 the probability distributions of the tests in 25 m scale is shown for the hydraulic conductivity, assuming that the test section has to include the contact between the Dolerite and the host rock to be mapped as “contact zone relevant hydraulic properties”. The statistics (mean and standard deviation of $^{10}\text{Log}(K)$) shown in the figures take into account the measurement limit in a proper way by using options for analysing censored distributions. As can be seen in the plots, there is hardly any difference. This may of course partly be due to the rather long test section length. However, it can be concluded that no larger difference can be expected between the contact zone and the host rock in terms of hydraulic conductivity.

Due to the size of the Dolerite dykes, tests with shorter tests section lengths may be more appropriate. In Figure B4-2 and B4-3 the hydraulic conductivity distributions are shown. As can be seen in Figure B4-2 the contact zone has a lower conductivity compared to the host rock. However, the result may be due to that a significant part of the test section is within the less conductive Dolerite dyke. No attempt has been made to only choose test sections that only to a very small degree include the Dolerite dyke. This could perhaps be a better assumption as it is generally described that most of the increased fracturing around a Dolerite dyke is in the host rock.

A test was also made to accept test sections in the host rock up to 10 m from the dyke contact mapped as “contact zone”, assuming that increased fracturing around the Dolerite dyke could generate higher conductivity. The hydraulic conductivity distributions for the cases “test section has to include the contact between the Dolerite and the host rock”, equal to Panel variable = “Rock (0 m)” and “test section has to include or be less than X m from the dyke contact between the Dolerite and the host rock”, equal to Panel variable = “Rock (X m)”. Already with $X = 2.5$ m, there is hardly any difference between the host rock and the contact zone. This indicates that there is no dramatic increase of the hydraulic conductivity just near the Dolerite dyke. Increasing X up to 10 m gives as result that the hydraulic conductivity is almost the same for the contact zone and the host rock.

The data from the Gideå area with narrow dykes indicates that the contact zone may be modelled with the same hydraulic properties as the host rock.

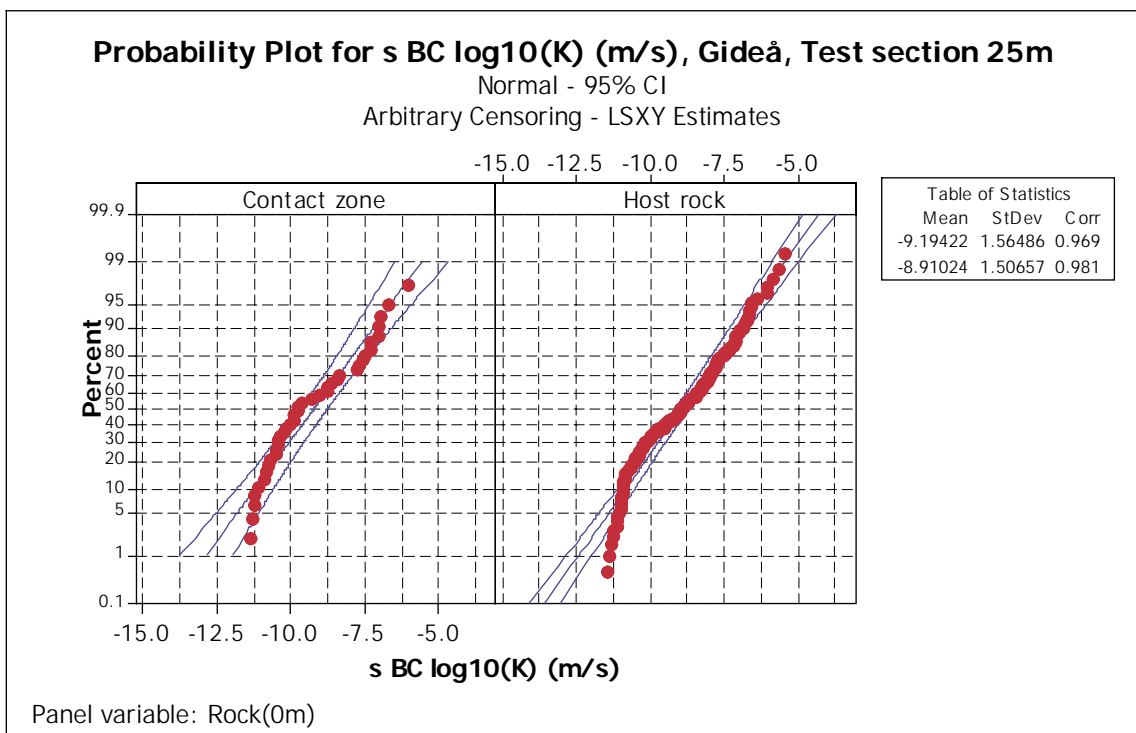
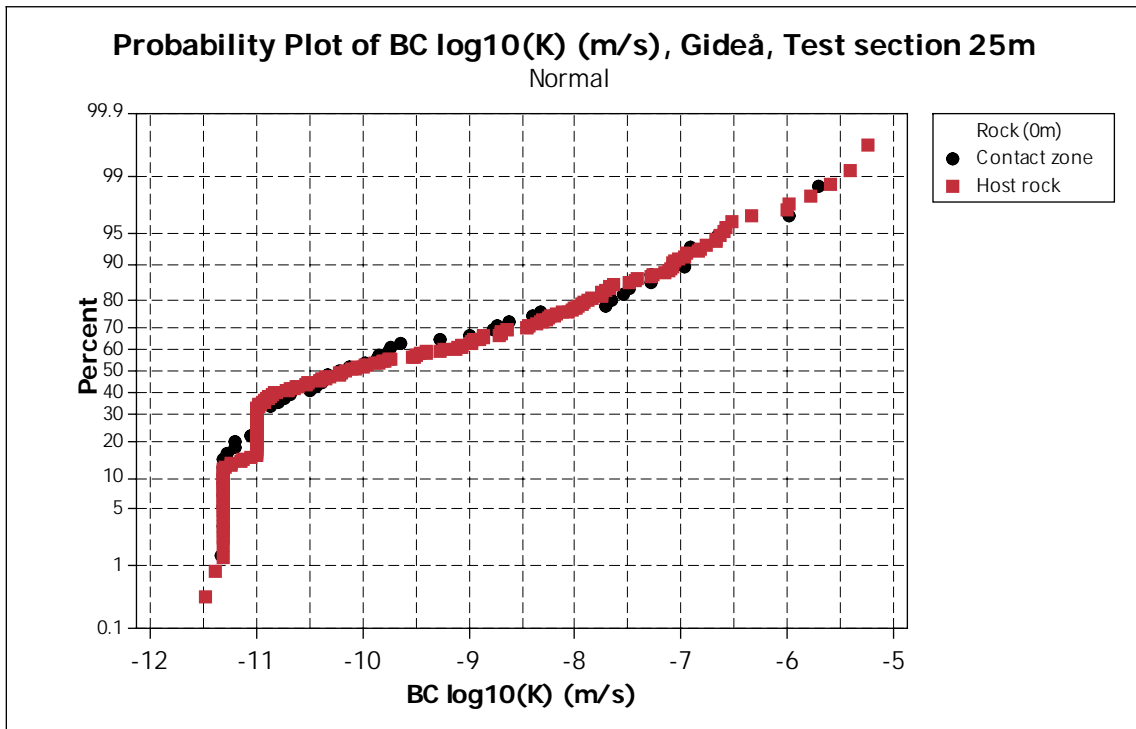


Figure B4-1. Probability plots of the hydraulic conductivity of the host rock and the contact zone between the Dolerite dykes and the host rock. Test section = 25 m, Gideå data. “Contact zone” represents test sections with the contact within the test section.

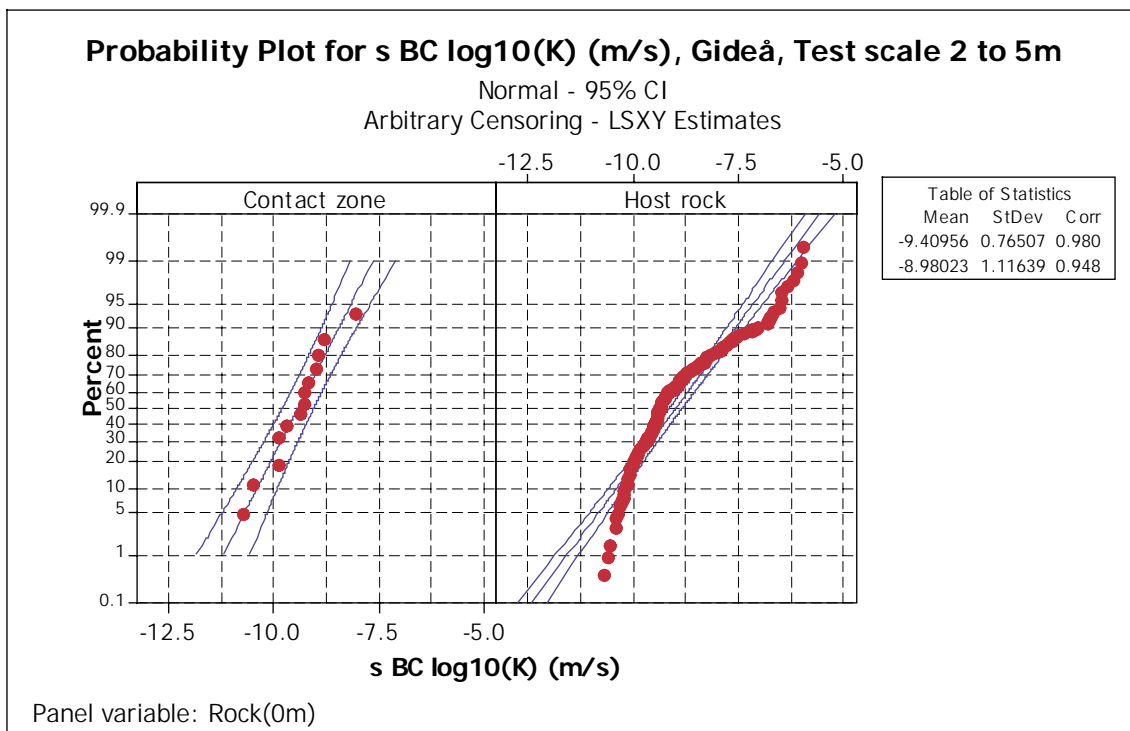
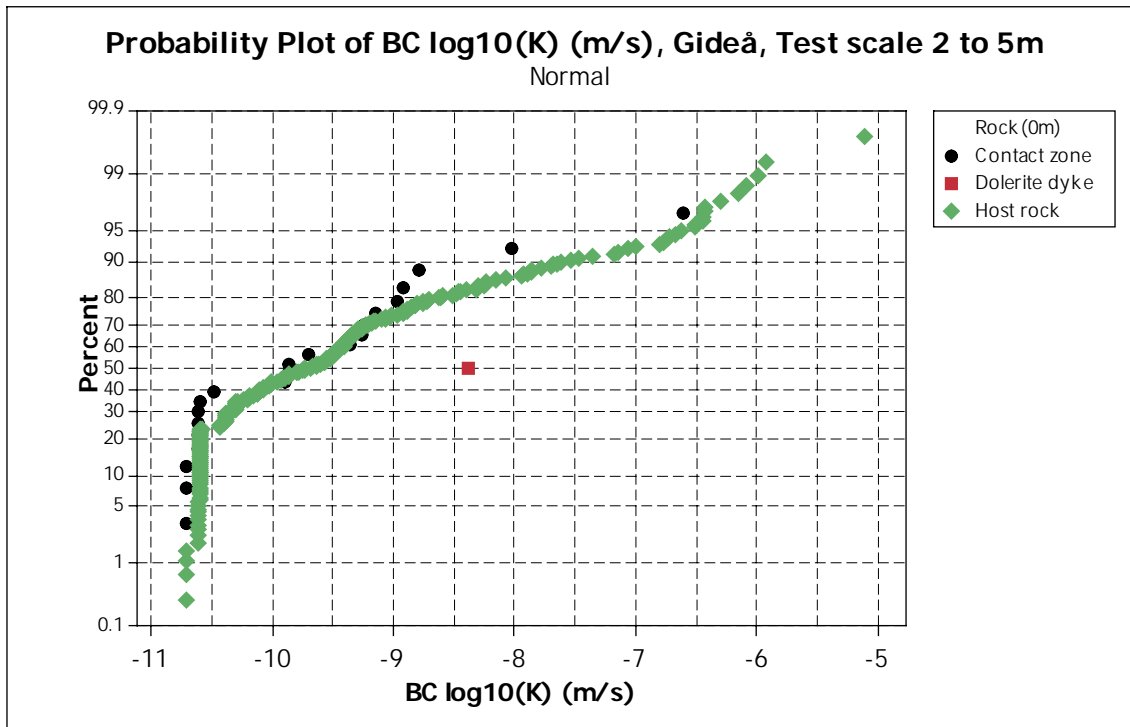


Figure B4-2. Probability plots of the hydraulic conductivity of the host rock and the contact zone between the Dolerite dykes and the host rock. Test section = 25 m, Gideå data. “Contact zone” represents test sections with the dyke contact within the test section.

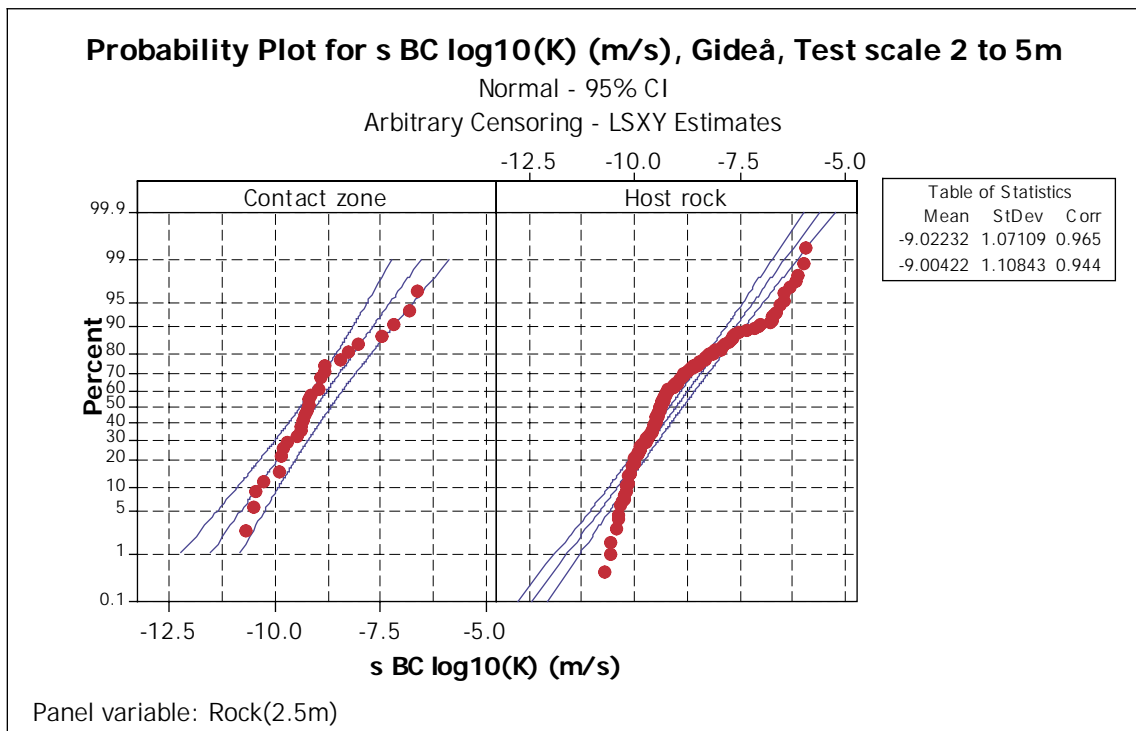


Figure B4-3. Probability plots of the hydraulic conductivity of the host rock and the contact zone between the Dolerite dykes and the host rock. Test scale 2–5 m, Gideå data. “Contact zone” represents test sections with the dyke contact within the test section or < 2.5 m from the dyke contact.

SOU 2001 – KASAM

/SOU 2001/ covers a large number of aspects concerning the deep repository, and one is the hydraulic properties of the bed rock. In this report hydraulic data from a few counties in Sweden have been compiled, based on the well archive at the Swedish Geological Survey (SGU). One may observe that wells drilled in “Greenstone” (i.e. mafic rocks) generally have low capacity compared to other main rock types. However, in the County Kronoberg the capacities of the wells in “Greenstone” have the highest capacity of all rock types.

Hydrogeology of the main Karoo basin

Hydrogeology of main Karoo basin in the Republic of South Africa is described in /Woodford and Chevallier 2002/ and Dolerite dykes are in that report considered as important targets for drilling water wells. They describe that the Dolerite dykes can be considered as linear zones of relatively higher permeability than the host rock but also that they may act as semi- to impermeable barriers to movement of groundwater. The contact zone is considered the best target for getting higher permeability rock but they say that sometimes also the dyke itself may be more permeable than the host rock. Borehole yields versus distances from dykes indicate that the more permeable contact zone is approximately 2–5 m from the dyke contact. In some cases increased permeability is indicated up to 10–30 m from the dyke contact. They also say that thin dykes (width < 2 m) are less permeable than larger dykes. Dykes with widths around 10 m gave yields around 20 m³/h compared to around 1 m³/h for a dyke with width of 2 m. These values possibly indicate the relative difference between the hydraulic conductivity of contact zone and the host rock.

In /Botha and Viviers 1999/ the geological process forming Dolerite intrusions as dykes, sills (rather thin subvertical and subhorizontal intrusions respectively), laccoliths (dome-shaped, roof convex-up and known or flat floor, intrusions) and lopoliths (disk shaped, floor convex-down and roof convex-down or flat, intrusions) are discussed. If the intruding mechanism may be matrix melting (hot magma intruding) and slow cooling (metamorphosing the host rock) no extensive fracturing will be generated. If however the tip of the intruding magma exceeds the rock strength a fracture will propagate and the magma can follow the fracture. This rapid fracturing and the later relatively fast cooling of the dyke may cause the fracturing along the dyke.

Hydraulic conductivity of rock types with mafic composition

The hydraulic properties during the SKB Site Investigations are estimated with different methods and evaluation methodologies as well as different test scales. The Posiva Flow Logg (PFL) with test scale 5 m is a standard tool used. The hydraulic conductivity (K) estimated from these test can be separated on different rock types.

There is a clear difference in mean hydraulic conductivity between rock types. As seen in Table B4-1 the Granite and Fine-grained granite (rock type codes 501058, 511058) are the most permeable. Ävrö granite (rock code 501044) has a lower hydraulic conductivity and the lowest hydraulic conductivity is found in the more mafic rock types (rock type codes 501030, 501033, 501036, 505102). On the confidence level 0.95 these three groups have different geometric mean values.

Table B4-1. Hydraulic conductivity of different rock types based on PFL-s measurements. Test scale 5 m. Data from KAV01, KAV04A, KSH01, KSH02A, KLX02, KLX03 and KLX04. Data divided according to the SICADA code "Rock type". Deformation zones in the geological single-hole interpretation and the deterministic deformation zones defined in RVS for version LAXEMAR 1.2 have not been excluded in the statistics presented. (Excluding the deformation zones would decrease the mean values, but the analysis have not yet been made). (Confidence limits for mean ¹⁰Log K is expressed as the deviation D from mean in the table; for confidence level of 0.95 the mean of ¹⁰Log K will be within value "Mean ¹⁰Log K" ±D.) /Rhén et al. 2006/.

Rock code	Rock type	Sample size	Mean ¹⁰ Log K (m/s)	Std ¹⁰ Log K (m/s)	D Conf.lim ¹⁰ Log T: Mean±D, conf.level 0.95: (m/s)	Comments
All	All rock types	1,426	-10.01	1.72	0.09	
501033	Diorite/gabbro	5	-	-	-	Only one measurement above measlimit. Possibly similar to 501030 and 501036
501030	Fine-grained dioritoid	327	-10.33	1.58	0.17	
505102	Fine-grained diorite-gabbro	28	-11.30	2.99	1.16	
501036	Quartz monzodiorite	167	-10.76	2.05	0.31	
501044	Ävrö granite	827	-9.92	1.74	0.12	
501058	Granite	20	-8.82	1.74	0.81	
511058	Fine-grained granite	50	-8.74	1.29	0.37	
501061	Pegmatite	2	-	-	-	Only one measurement above measlimit: K = 1.1E-9 m/s

The mafic rock types may have a hydraulic conductivity 0.05–0.5 of the hydraulic conductivity observed in the granite. Observe that these data also include contacts zones between mafic rock and other rock types. Thus, the mafic rocks may probably be less than 0.5 times K for granite.

Modelling Dolerite dykes – recommended properties

The present data indicate an interval for the properties of the Dolerite dyke and its contact zone. However, the suggested values below must be considered uncertain.

Dolerite dyke: 0.05 to 0.5 times the hydraulic conductivity (K) of the host rock.

Contacts zone Dolerite – host rock: width 3–30 m (tendency to the lower end), 1 to 20 times the K of the host rock.

References

Ahlbom K, Albino B, Carlsson L, Nilsson G, Olsson O, Stenberg L, Timje H, 1983.

Evaluation of geological, geophysical and hydrogeological conditions at Gideå, SKBF/KBS – Technical report-83-53.

Albom K, Andersson J-E, Nordqvist R, Ljunggren C, Tirén S, Voss C, 1991.

Gideå study site. Scope of activities and main results, SKB TR 91-51. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Botha J F, Viviers J J, 1999. Unpublished lecture notes, Institute for Groundwater Studies, Bloemfontein, Republic of South Africa.

Ericsson L O, Ronge B, 1986. Correlation between tectonic lineaments and

permeability values of crystalline rock in the Gideå area, SKB TR 86-19.

Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hermansson J, Hansen L M, Follin S, 1997. Update of the geological models of the Gideå study site. SKB R-97-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.

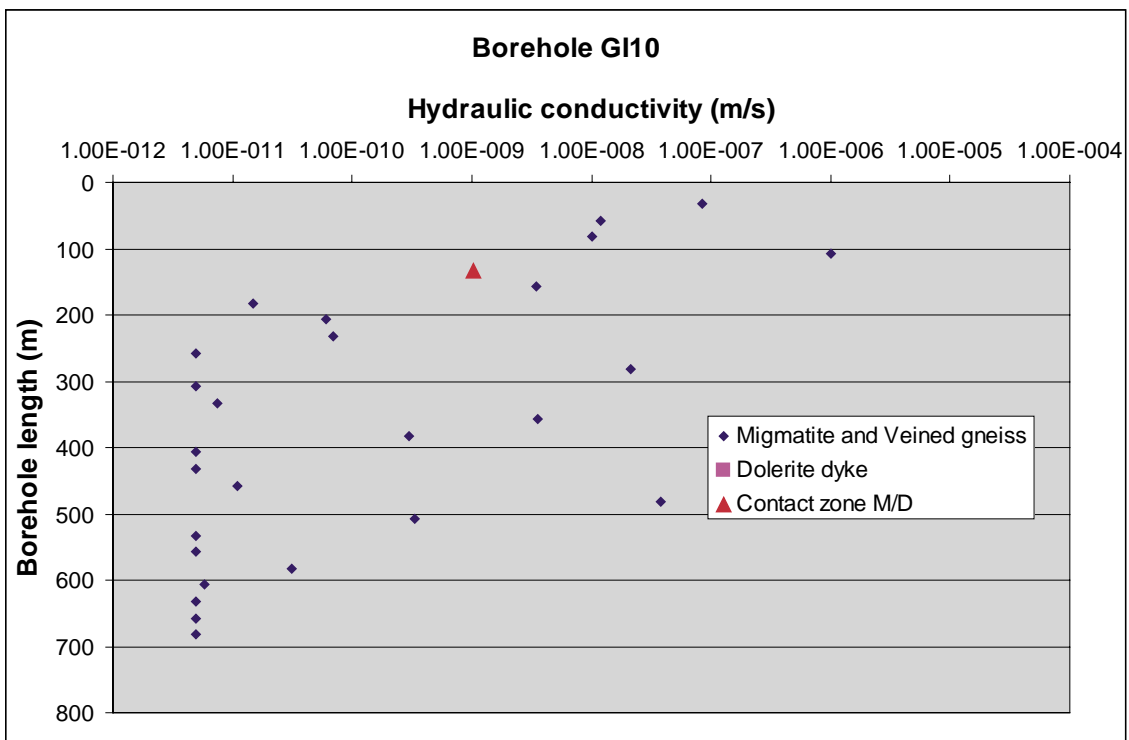
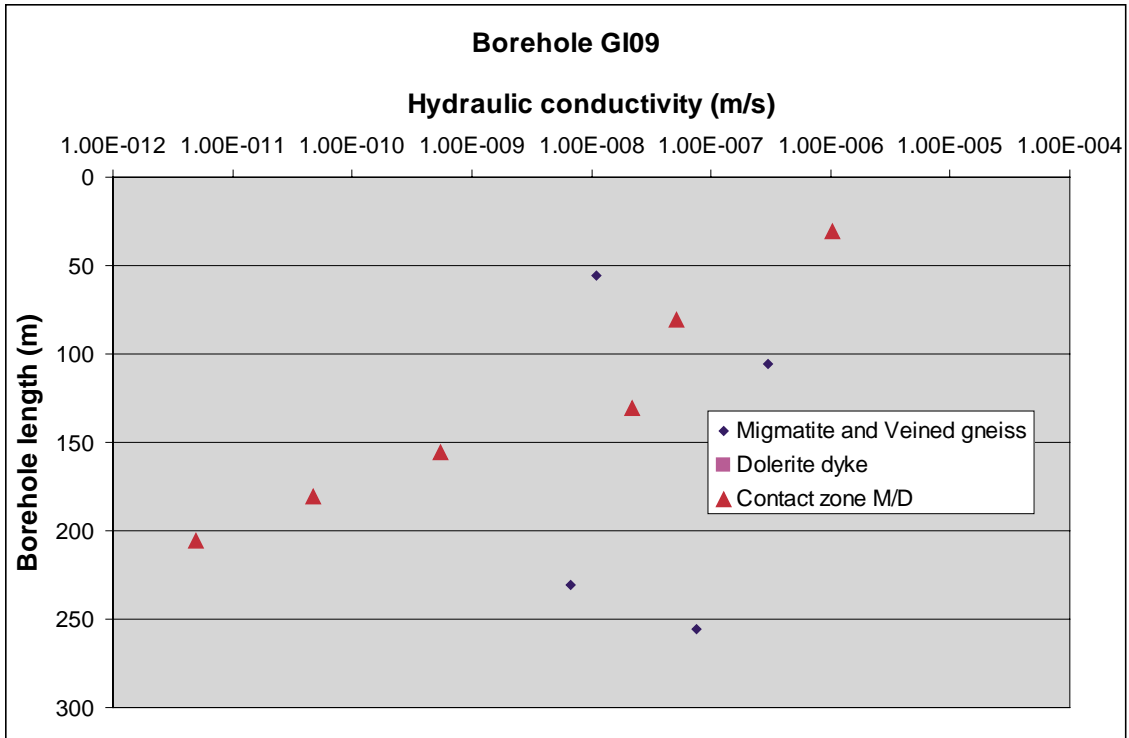
Rhén I, Forsmark T, Forssman I, Zetterlund M, 2006 (in prep). Evaluation of hydrogeological properties for Hydraulic Conductor Domains (HCD) and Hydraulic Rock Domains (HRD), Preliminary site description, Laxemar subarea – version 1.2, SKB R-06-22. Svensk Kärnbränslehantering AB.

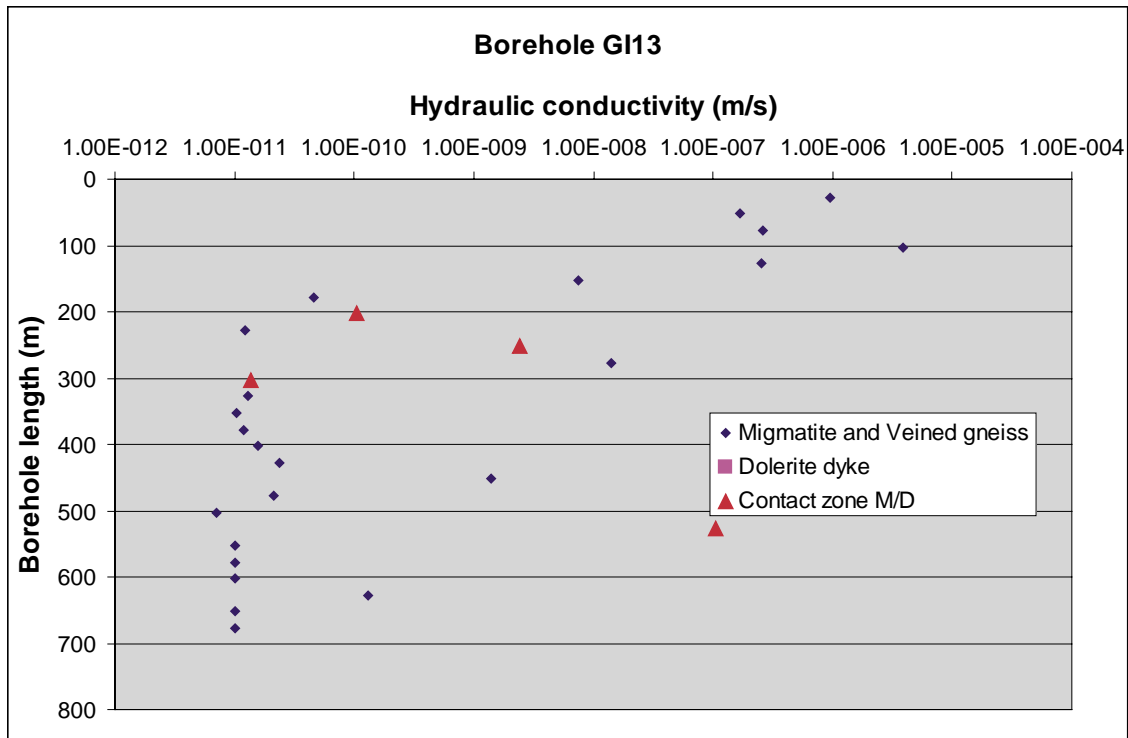
SOU, 2001. Kunskapsläget på kärnavfallavfallområdet 2001, KASAM, SOU 2001:35.

Walker D, Gylling B, 1999. Site-scale groundwater flow modelling of Ceberg.

SKB TR-99-13. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm.

Woodford A C, Chevallier L, 2002. Hydrogeology of main Karoo basin: Current knowledge and future research needs. Water Research Commission Report No. TT 179/02, Republic of South Africa.





Generellt djupavtagande för hydraulisk konduktivitet, klassning 100 m och 200 m

