

R-01-32

Projekt JADE

Geovetenskapliga studier

Raymond Munier, Svensk Kärnbränslehantering AB

Sven Follin, SF Geologic AB

Ingvar Rhén, SWECO VBB VIAK AB

Gunnar Gustafson, Chalmers Tekniska Högskola

Roland Pusch, Geodevelopment AB

Augusti 2001

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



Projekt JADE

Geovetenskapliga studier

Raymond Munier, Svensk Kärnbränslehantering AB

Sven Follin, SF Geologic AB

Ingvar Rhén, SWECO VBB VIAK AB

Gunnar Gustafson, Chalmers Tekniska Högskola

Roland Pusch, Geodevelopment AB

Augusti 2001

Förord

Slutsatserna från ett antal jämförelser av olika koncept för geologisk deponering innebär att KBS-3 systemet med vertikal deponering förblir referenssystem i SKB:s program, vilket lanserades 1992 med avsikt att påbörja deponering av använt kärnbränsle i svensk berggrund så snart som möjligt. Fältundersökningar planeras att genomföras stegvis, och påbörjas med platsundersökningar på mer än en plats och innefatta en kontinuerlig utvärdering och jämförelse av de geovetenskapliga förhållandena så väl som andra tekniska, sociala och ekonomiska frågeställningar av betydelse. Informationen som samlas in under platsundersökningarna används för platsanpassningen av förvarets utformning, vilket även detta är aktiviteter som bedrivs stegvis med ökande detaljeringsgrad i varje steg. Innan anpassningen av förvaret till en vald plats kan påbörjas ska alla tekniska system vara definierade.

I en studie 1992 (PASS - Project on Alternative System Study) identifierades flera varianter av KBS-3 systemet som intressanta och projektet JADE (Jämförelse av DEponeringsmetoder) initierades 1996 för att visa om någon eller några av dessa varianterna ska utredas vidare.

JADE-projektet fokuserar på detaljerade utredningar av viktiga tekniska frågeställningar i anslutning till horisontell deponering av kapslar med använt kärnbränsle kompletterat med en fördjupad jämförelse av alternativen och referenssystemet KBS-3 med vertikal deponering. Slutsatserna är att KBS-3 med vertikal deponering bibehålls som referensmetod, och att deponering i medellånga horisontella deponeringshål studeras ytterligare i syfte att klargöra deponeringsteknikens tekniska genomförbarhet liksom sätt att handskas med vatteninflöde. KBS-3 med deponering i horisontella deponeringshål studeras ej vidare.

Resultaten från JADE-projektet presenteras här, betydligt senare än vad som planerades vid projektstarten, vilket innebär att vissa resultat redan har använts i SKB:s fortsatta arbete. Denna rapport innehåller därför viss information som kan uppfattas som inaktuell.

Stockholm, augusti 2001



Håkan Sandstedt

Projektledare

Abstract

In the present report an evaluation of the geological impact on various deposition methods is presented. The studied methods are KBS-3 V, KBS-3 H and MLH. The investigation has been subdivided into three separate studies concerning rock mechanics, hydrogeology and structural geology. These are included as appendices. Various methods have been used for the analyses for example DFN-models (Discrete Fracture Networks), DFN, FEM (Finite Element Method), BEM (Boundary Element Method), DEM (Discrete Element Method) and BayMar (Bayesian-Markov).

The prerequisites used for these investigations are based on earlier investigations of the TBM tunnel at the Äspö Hard Rock Laboratory. As a consequence thereof, the results presented here are specific to the locale but some conclusions of general character still can be made.

In short the results of the investigations can be concluded as follows:

If the rock mass exhibits a hydraulic anisotropy, the level of acceptance is strongly correlated to the direction of the deposition tunnels (applies to MLH and KBS-3 H).

Differences between the methods concerning mechanical stability have been identified. The final choice of method will depend on the possibility to place the deposition tunnels in a favorable orientation. However, engineering can solve the problems associated to instability in the tunnels.

KBS-3 (bored deposition tunnels) is recommended for rock masses in which the stress field has a moderate variation in magnitude and orientation.

KBS-3 V (drilled & blasted deposition tunnels) and MLH are considered more robust and therefore recommended for rock masses in which the stress field has a large variation in magnitude or orientation.

The impact of the fracture array differs for the studied methods. The level of acceptance differs but the differences are considered to be of no practical importance.

For the studied rock mass (Äspö), KBS-3 is recommended.

MLH can only be recommended for rock masses in which the density of fractures of type D2-D3 is low. Further, MLH can only be recommended if the amount of discriminating rock types is low. As a consequence thereof MLH is considered unsuitable for the studied rock mass.

Sammanfattning

I föreliggande studie jämförs hur bergmassan och dess inneboende diskontinuiteter påverkar olika deponeringsmetoder. De metoder som jämförs är KBS-3 V (vertikal deponering), KBS-3 H (horisontell) deponering, och MLH (medellånga hål).

Arbetet har delats upp i tre ämnesområden, bergmekanik, hydrogeologi och strukturgeologi vilka redovisas separat som bilagor. Olika metoder har använts för analyserna exempelvis DFN-modeller (Discrete Fracture Network), FEM (Finite Element Method), BEM (Boundary Element Method), DEM (Discrete Element Method) och BayMar (Bayesian-Markov).

Det underlag som använts för denna studie baseras på tidigare utförda undersökningar i Äspölaboratoriet, främst från den TBM borrarade delen av tunneln. Därmed är resultaten i vissa delar plats specifika men slutsatser av generell natur kan ändå härledas.

I korthet kan slutsatserna av studierna sammanfattas sålunda:

Om en utvecklad hydraulisk anisotropi föreligger i en given bergmassa kan, för horisontell deponering, riktningen på tunnelsystemen, i förhållande till (den lokala) anisotropin, i stor utsträckning påverka bortfallet av kapselpositioner.

Skillnader i bergmekanisk stabilitet mellan de olika metoderna har påvisats. Valet av deponeringsmetod beror på möjligheten att orientera tunnelsystemet på den för deponeringshålen fördelaktigaste riktningen. De problem som uppstår på grund av instabilitet i tunnarna bedöms emellertid kunna åtgärdas.

KBS-3, med borrarade deponeringstunnlar, rekommenderas generellt som metod för bergmassor där variationen i såväl magnitud som riktning av spänningsförhållanden förväntas vara liten.

KBS-3 V (sprängd deponeringstunnel) och MLH bedöms vara mer robusta, och rekommenderas generellt som metoder för bergmassor där variationen i såväl magnitud som riktning av spänningsförhållandena förväntas vara stor.

Skillnader föreligger mellan de olika deponeringsmetoderna vad avser sprickmatrisens påverkan. Detta påverkar kapselbortfallet olika för de olika metoderna. Baserat på data från Äspö bedöms skillnaden emellertid vara marginell. Denna slutsats är generell om det kan antas att densiteten kapselhåldiskriminerande strukturer ej överstiger den som karterats på Äspö.

För den studerade bergmassan (Äspö) rekommenderas KBS-3.

MLH kan endast rekommenderas för bergmassor med låg densitet av strukturer med funktionsklass D2-D3. Vidare kan MLH endast rekommenderas om densiteten kapselhåldiskriminerande bergarter är låg. MLH kan därför ej rekommenderas för Äspötypiskt berg.

Innehållsförteckning

Förord	3
Abstract	5
Sammanfattning	7
1 Bakgrund	11
2 Mål	13
3 Förutsättningar	15
3.1 Nomenklatur och definitioner	15
3.2 Dimensioner och typsektioner	18
3.3 Underlag	19
3.4 Problemformulering	20
4 Metodik	23
5 Resultat	25
5.1 Allmänt	25
5.2 Hydrogeologi	25
5.3 Bergmekanik	27
1.4 Strukturgeologi	29
6 Diskussion	31
6.1 BayMar-analyser	31
6.2 FracMan-analyser	32
6.3 Hydraulisk anisotropi	33
6.4 MLH-specifika problem	34
6.5 Strukturgeologiska analyser	36
7 Slutsatser	39
8 Referenser	43

Bilagor:

- Bilaga 1: Follin, S., et al., Projekt JADE, Simulering av blockegenskaper med hänsyn till bergstrukturers geometriska och hydrauliska egenskaper, 1996, Golder associates.
- Bilaga 2: Rhén, I. and T. Forsmark, Projekt JADE, Hydrogeologiska analyser - Statistisk analys av hydrauliska testdata från Äspölaboratoriet, 1996, VBB VIAK.
- Bilaga 3: Rosén, L. and G. Gustafson, Projekt JADE, Hydrogeologiska analyser - Förändring av antal möjliga deponeringspositioner med hänsyn till anisotropi hos hydraulisk konduktivitet, 1996, Chalmers Tekniska Högskola.
- Bilaga 4: Pusch, R., Projekt JADE, Jämförelse av bergmekaniska funktionssätt hos KBS-3 V, KBS-3 H och MLH, 1996, Clay Technology.
- Bilaga 5: Munier, R., Projekt JADE, Strukturgeologins betydelse för val av deponeringsmetod, 1999, Scandiaconsult Sverige AB.

1 Bakgrund

KBS-3 metoden med vertikal deponering av kapslar utgör sedan 1984 referensmetod för deponering av använt kärnbränsle. KBS-3 metoden baseras på ett flerbarriärssystem där förvaret placeras i urberget, 400-700 meter under markytan, och det använda kärnbränslet placeras i koppar kapslar med en insats av gjutjärn som omges av en bentonit buffert.

Sedan 1984 har SKB utvecklat och värderat även andra deponeringsmetoder. Under 1986 till 1989 analyserades och jämfördes WP-Cavemetoden med KBS-3. Resultatet av utvärderingen visade att WP-Cavemetoden bedömdes kunna klara högt ställda krav vad gäller långsiktig funktion och säkerhet men att fördelarna med KBS-3 befanns överväga.

Tre andra metoder; Djupa borrhål (VDH), Långa hål (VLH), Medellånga hål (MLH) har därefter utvecklats och analyserats samt jämförts med KBS-3 V metoden. Resultatet har rapporterats i PASS /SKB, 1992/

Jämförelsen av förvarskoncept i PASS-studien delades upp i jämförelser av långsiktig funktion och säkerhet, teknik samt kostnader. Samtliga metoder ansågs uppfylla mycket högt ställda funktions- och säkerhetskrav. Resultatet blev dock att KBS-3 och MLH i ett första skede rangordnades på första plats. Utfallet av jämförelsen mellan KBS-3 och MLH blev inte entydig. Avseende teknik bedömdes KBS-3 som mer robust och mera flexibel i deponeringsprocessen. I fråga om kostnader fanns det en signifikant skillnad till förmån för MLH. Vid den slutliga bedömningen, där hänsyn togs till nackdelar för MLH i deponeringsprocessen, rangordnades KBS-3 före MLH.

För KBS-3 har även möjligheten att deponera kapslarna i horisontella borrhål borrade i väggen av deponeringstunnlarna studerats (KBS-3 H). Denna metod har bedömts attraktivt ur ekonomisk synvinkel då den totala längden av deponeringstunnlar kan reduceras jämfört med deponering i vertikala deponeringshål (KBS-3 V).

För att studera och jämföra olika deponeringsmetoder initierade SKB 1996 ett projekt benämnt JADE (Jämförelse Av DEponeringsmetoder). Syftet med projekt JADE var att fördjupa analyserna av tekniska nyckelfrågor avseende horisontella deponeringssystem samt att göra en detaljerad jämförelse av metoderna KBS-3 H (horisontell deponering) och MLH (deponering i medellånga horisontella deponeringshål) med referensmetoden KBS-3 V (vertikal deponering) /SKB, 2001/.

Syftet med projekt Geovetenskapliga studier är att utreda hur bergmassan och dess inneboende diskontinuiteter påverkar de olika deponeringsmetoderna. Studierna har främst utförts som en jämförelse av de olika deponeringsmetoderna med beaktande av långsiktig funktion och säkerhet, mekanisk stabilitet och storlek på förvaret. Föreliggande utredning utgör en oberoende sammanfattning av ett antal underlagsrapporter, beskrivna nedan, vilka redovisas separat i form av bilagor. De slutsatser som redovisas här överensstämmer ej nödvändigtvis med de slutsatser som redovisas i bilagorna.

2 Mål

Huvudsyftet med föreliggande utredning är att skapa ett geovetenskapligt underlag för jämförelse av deponeringsmetoder. Utredningen kan sammanfattas i nedanstående delmål:

- Identifiera och sammanställa de struktureologiska parametrar som bedöms ha betydelse vid jämförelse av deponeringsmetoder.
- Utvärdera och jämföra den påverkan som bergmassans hydrogeologiska egenskaper kan ha på de olika deponeringsmetoderna.
- Utvärdera och jämföra den påverkan som bergmassans bergmekaniska egenskaper kan ha på de olika deponeringsmetoderna.
- Definiera parametrar att användas för värdering och rangordning av deponeringsmetoderna med avseende på långsiktig funktion och säkerhet.
- Beräkna bortfallet av kapslar (kapselpositioneringsindex) för de olika deponeringsmetoderna.
- Identifiera kunskapsluckor och eventuella utredningsbehov.

3 Förutsättningar

3.1 Nomenklatur och definitioner

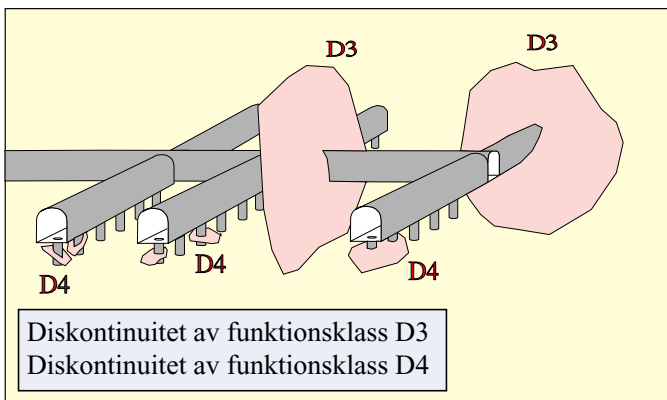
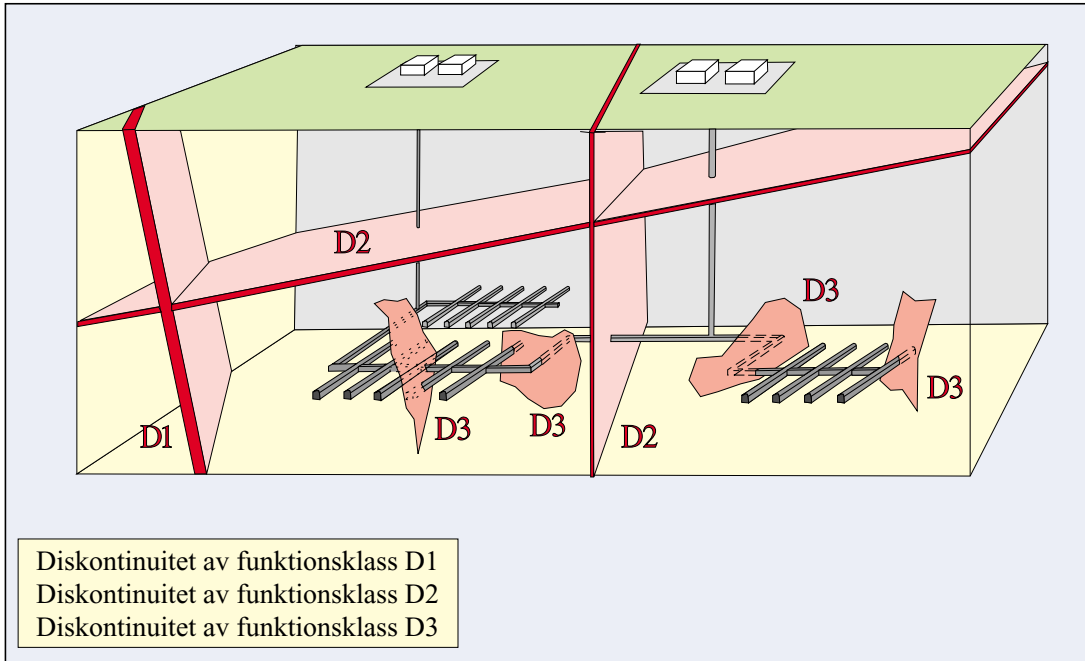
Den nomenklatur och de definitioner som används i denna rapport baseras där så är tillämpligt på /Almén et al., 1996/.

Med diskontinuitet avses varje mekaniskt avvikande struktur i bergmassan exempelvis en spricka, ett skiffrihetsplan eller en zon. Diskontinuiteter har generellt en 2-dimensionell utsträckning och lägre hållfasthet än den omgivande bergmassan.

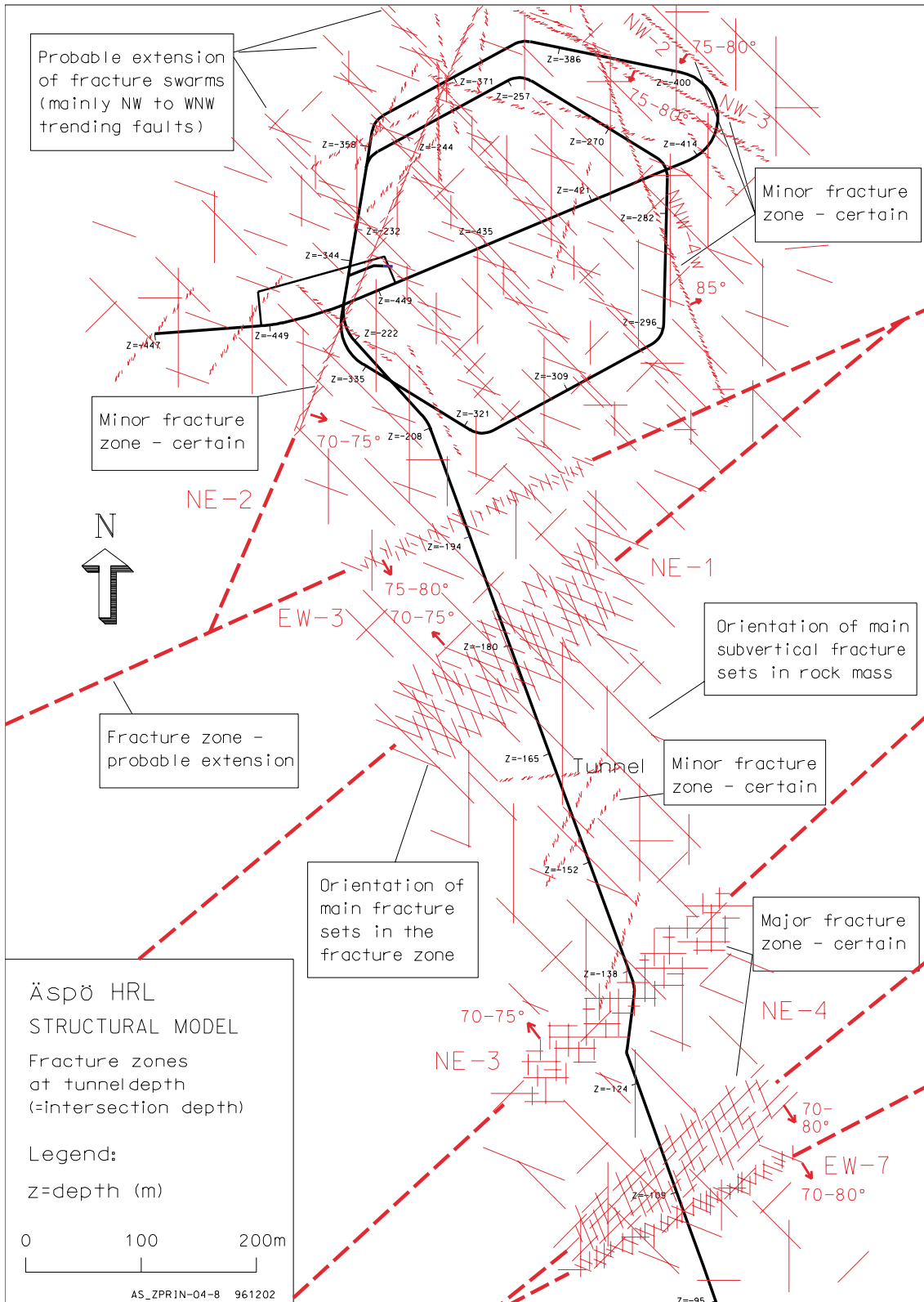
Med hänsyn till projektets koppling till slutförvar i berg klassas diskontinuiteterna ur funktionssynpunkt i följande fyra klasser:

1. **D1.** Diskontinuiteter med sådana egenskaper att de ej tillåts förekomma inom förvarsvolymen och endast i undantagsfall tillåts att passeras av tillfartstunnel. Diskontinuiteter av funktionsklass D1 utgör storskaliga mekaniska och/eller hydrauliska ränder för djupförvaret. Diskontinuiteter av funktionsklass D1 framträder ofta som lineament med mils utbredning. Typfall Äspö: NE-1.
2. **D2.** Diskontinuiteter med sådana egenskaper att de ej tillåts passeras av deponeringstunnlar. Diskontinuiteter av funktionsklass D2 tillåts dock vara avgränsande mellan förvarets olika huvuddelar eller deponeringsområden. D2 har liknande egenskaper som D1 men är i allmänhet mer lokala och mindre intensiva till sin karaktär. Typfall Äspö: EW-3.
3. **D3.** Diskontinuiteter med sådana egenskaper att de tillåts förekomma inom förvarsdelar och passeras av såväl transporttunnlar som deponeringstunnlar. D3 utgörs oftast av mindre sprickzoner men även enstaka sprickor, exempelvis kraftigt vattenförande sprickor med stor utbredning, kan uppvisa egenskaper som motiverar tillhörighet till denna klass. Typfall Äspö: NE-2, NNW-4.
4. **D4.** Diskontinuiteter med sådana egenskaper att de tillåts korsa deponeringsposition, och således inte påverkar förvarets utnyttjandegrad. Diskontinuiteter av funktionsklass D4 består vanligen av enskilda sprickor eller förskiffringsplan vars huvudorienteringar dock kan påverka förvarets tunnelriktningar. Diskontinuiteter av funktionsklass D4 kan även ha betydelse för närområdets funktion, m.a.p. grundvattenströmning och nuklidtransport samt för kapselhålets bergmekaniska stabilitet.

För diskontinuiteter av funktionsklass D1 och D2 krävs, för långsiktig säkerhet, respektavstånd till närmaste kapselposition. Respektavståndet är en funktion av diskontinuitetens geometriska-, bergmekaniska-, kemiska-, kinematiska, seismiska och hydrauliska egenskaper. I föreliggande studie har ingen hänsyn tagits till respektavstånd då dessa antas påverka samtliga studerade deponeringsmetoder lika.



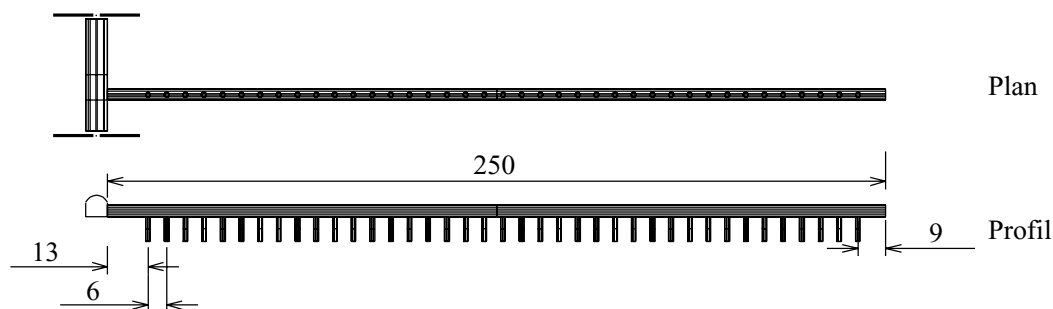
Figur 3-1 Schematisk illustration av den klassificering av diskontinuiteter som används inom Projekt JADE (efter /Almén et al.,1996/).



Figur 3-2 Figuren illustrerar med typfall (Äspö) den klassificering av diskontinuiteter som gäller för Projekt JADE. Snitt genom zoner representerar karterat djup av skärning med tunnel och/eller borrhål.

3.2 Dimensioner och typsektioner

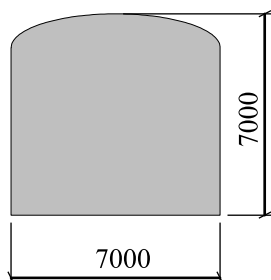
De dimensioner som används inom projektet redovisas schematiskt nedan. För detaljerade beskrivningar och ritningar hänvisas till /SKB, 2001/. Avsteg från dessa dimensioner redovisas i förekommande fall i respektive underlagsrapport /Birgersson et al, 2001/, /Ageskog, 2001/, /Sandstedt och Munier, 2001/, /Sandstedt et al., 2001/.



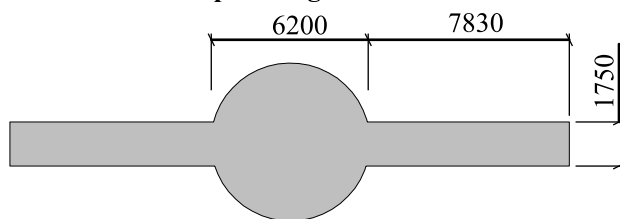
Figur 3-3 Figuren illustrerar schematiskt deponeringstunnlarnas layout. Exemplet i figuren avser deponeringskoncept KBS-3 V; deponeringstunnlarna, 250 m långa rymmande 39 kapslar vardera, har ett inbördes avstånd av 40 m. Det inbördes avståndet antas vara lika för samtliga deponeringsmetoder men antalet kapslar per längdenhet deponeringstunnel varierar.

KBS-3 H

Transporttunnel

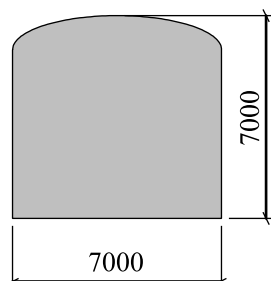


Deponeringstunnel

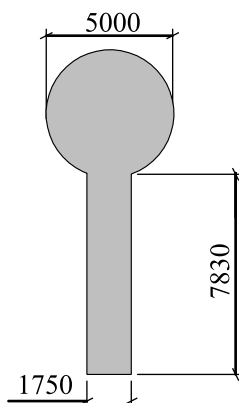


KBS-3 V

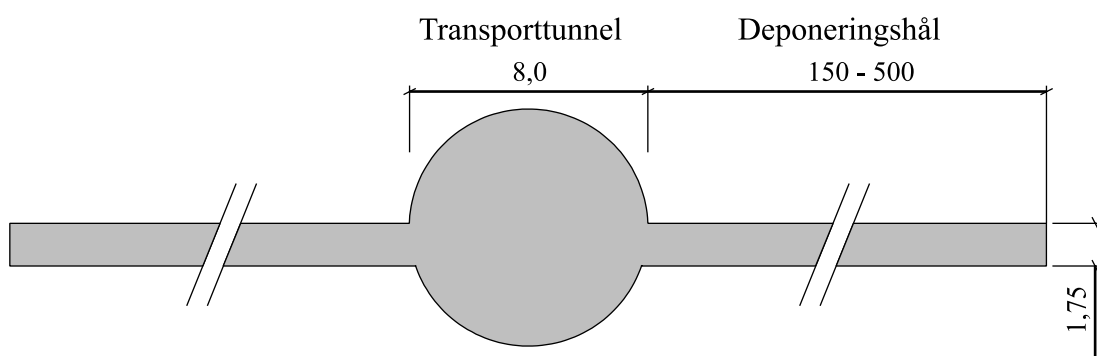
Transporttunnel



Deponeringstunnel



MLH



Figur 3-4 Figuren illustrerar preliminära typsektioner för de studerade deponeringsmetoderna.

3.3 Underlag

För att erhålla resultat för jämförelser av deponeringsmetoderna, i enlighet med den för projektet angivna tidsplanen, har en målsättning varit att analyserna, i största möjliga utsträckning, skall vara baserade på tidigare utförda utredningar.

Den TBM borrade tunnelsträckan av Äspölaboratoriet valdes som underlag för studierna. Detta för att primärdata från tidigare utförda studier i stor utsträckning kunde återanvändas vilket ansågs fördelaktigt för de geometriska definitionerna för DFN-, BEM- och FEM-modelleringar vilka är tidskrävande. För de studier där data från den TBM borrade tunnelsträckan ansågs otillräcklig användes information från övriga delar av Äspölaboratoriet; målsättningen har varit att all information skall vara spårbar till SICADA.

3.4 Problemformulering

Syftet med delprojekt geovetenskapliga studier är att utröna huruvida det finns någon skillnad i hur bergmassans geologiska egenskaper påverkar resultatet av olika metoder för deponering samt om möjligt kvantifiera dessa skillnader. En viktig förutsättning är att ställda krav på långsiktig funktion och säkerhet för varje kapselposition är lika och kan uppfyllas för samtliga studerade deponeringsmetoder. Föreliggande studie har därför inriktats på att studera hur olika kriterier för godkännande/underkännande av deponeringshål påverkar förvarets utformning för varje studerad deponeringsmetod. Dessa kriterier är dock i dagsläget endast delvis kvantifierade. Det har därför endast varit möjligt att kvantifiera den relativa nyttjandegraden för de olika deponeringsmetoderna och ej de absoluta bortfallen vilket krävs för en jämförelse av förvarens slutliga storlek och kostnad

En bergmassa kan sägas utgöra ett aggregat av mer eller mindre oregelbundna block av varierande storlek och egenskaper vilka är avgränsade med diskontinuiteter (sprickor och sprickzoner). Studier av bergmassans strukturella egenskaper omfattar blocken, dessas inneboende strukturer, och de avgränsande diskontinuiteterna. Vid bland annat strukturegeologiska studier är det av stor vikt att beakta skalan inom vilken studien avses att bedrivas. Detta på grund av att bergmassans egenskaper, under vissa omständigheter, är skalberoende.

Bergmassans plastiska anisotropi, det vill säga dess planparallella foliation, skjuvzoner och bergartskontakter kan vara mer eller mindre starkt utvecklad. Den plastiska anisotropin påverkar bergmassans mekaniska egenskaper olika beroende på vilken skala som beaktas. De för denna studie aktuella skalorna omfattar tunnlars ($\approx 10^2$ m) och deponeringshål ($\approx 10^1$ m).

Bergmassans hydrauliska anisotropi, det vill säga dess konduktivitet i tre dimensioner, påverkar troligen vatteninflödet i tunnlars och kapselhål olika beroende på dessas utformning och orientering. Det är därför av stor vikt att definiera, och om möjligt även kvantifiera, denna anisotropi.

Spänningstillståndet i en bergmassa påverkar stabiliteten av tunnlars och deponeringshål olika beroende på metoden för berguttag, utformning och orientering. Spänningstillståndet påverkar även sprickors konduktivitet i närområdet, sprickors potential till propagering, länkning mm.

Problematiken kan sammanfattas i nedanstående frågeställningar:

1. Är det möjligt att, givet vissa kravgränser, påvisa någon skillnad i antalet godkända kapselpositioner mellan de olika deponeringsmetoderna och i så fall hur stor är denna skillnad?
2. Hur stor är påverkan av den hydrauliska anisotropin, dvs. inläckage och genomströmning av vatten, på layouternas utformning och orientering?
3. Vilken skillnad finns det mellan de olika deponeringsmetoderna vad avser bergmekanisk stabilitet?
4. Vilka bergmekaniska effekter kan identifieras som inte kan lösas med ingenjörsmässiga konstruktioner?

För att ge svar på dessa frågor krävs modellering av sprickgeometrier, vattenflöde, bergspänningar och stabilitet samt, för kvantifiering av skillnaderna, beräkningar av sannolikheter för att kapselpositioner, i de olika studerade metoderna, skärs av diskontinuiteter som av expertis bedöms påverka långsiktig funktion och säkerhet. Antalet godkända deponeringshål, i relation till de förkastade, påverkar längden av deponeringstunnlarna, mängden urtaget berg, mängden återfyllnad och därmed även kostnaden för djupförvaret. Kapselbortfallet påverkar även den areella utbredningen av förvaret. Denna aspekt berörs dock ej närmre i detta dokument.

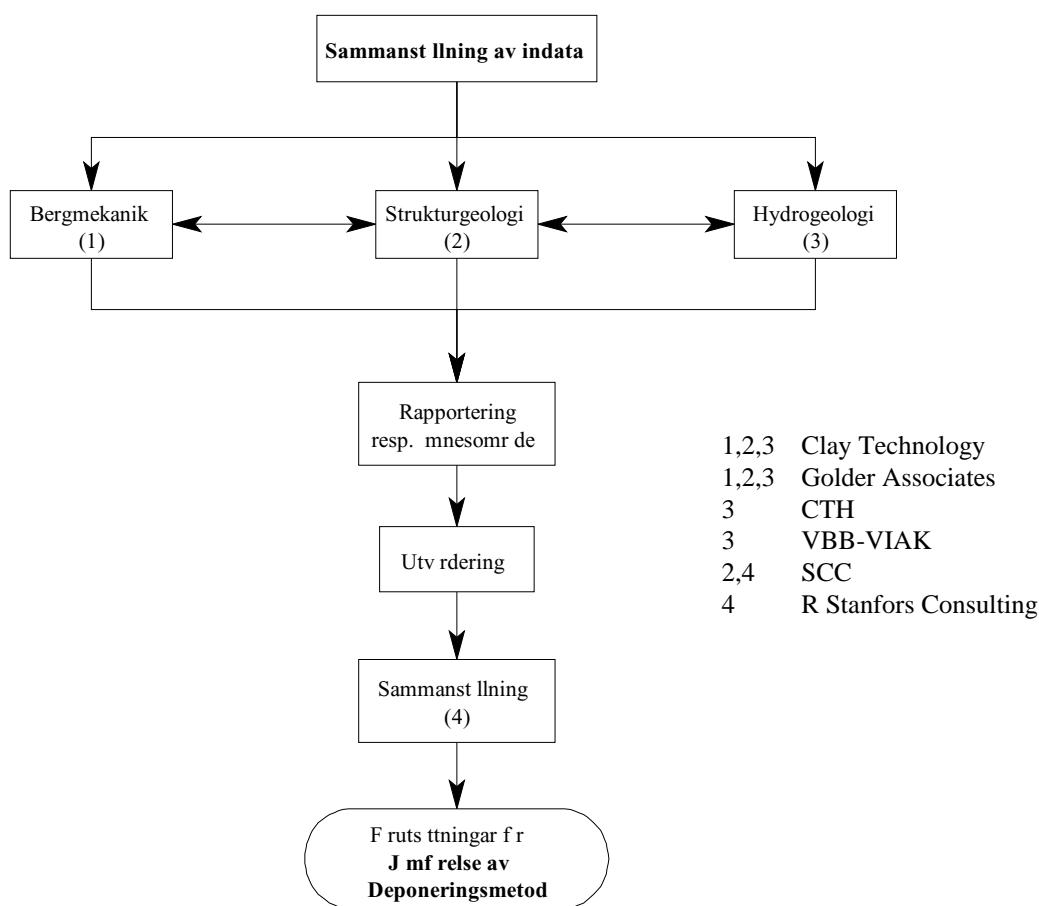
4 Metodik

Projekt Geovetenskapliga Studier är indelat i tre delvis separata studier. Dessa omfattar ämnesområden:

- strukturgeologi
- bergmekanik
- hydrogeologi

SKB har medverkat vid utvecklingen av analysverktyg och metodik för modellering av flöde i berg, diskontinuiteter etc. För detta uppdrag har befintliga, och inom ramen för SKB:s verksamhet tidigare utvecklade, verktyg och metoder använts.

Delprojekten har till övervägande del löpt oberoende av varandra. Sambedömning av de olika delresultaten har skett i en grupp bestående av SKB:s representant Roy Stanfors, projektledaren samt resp ämnesansvarig. Utredningsprocessen för projekt Geovetenskapliga Studier är schematiskt representerad i figur 4-1.



Figur 4-1 Schematiskt flödesdiagram som visar utredningsprocessen inom projekt Geovetenskapliga Studier.

Delstudierna har utförts av Sven Follin, Peter Wallman, Paul LaPointe och Bill Dershowitz, Golder Associates (analyser av sprickintensitet, flödesvägar, blockutfall), Roland Pusch och Harald Hökmark, Clay Technology (bergmekaniska analyser) Ingvar Rhén och Torbjörn Forsmark, VBB-VIAK (beräkning av hydraulisk anisotropi, fördelning av transmissivitet mm) samt Gunnar Gustafson och Lars Rosén, Chalmers Tekniska Högskola. (BayMar analyser av hydraulisk anisotropi).

Tolkning och använd metodik för varje delprojekt beskrivs detaljerat i respektive rapport vilka redovisas som bilagor.

5 Resultat

5.1 Allmänt

Fem delrapporter har upprättats som underlag för en samlad analys av skillnaderna mellan olika deponeringsmetoder med hänsyn till de ovan redovisade geovetenskapliga förutsättningarna. Sambedomningen har utförts av Raymond Munier, SCC i samarbete med Roy Stanfors och efter överläggningar med respektive projektansvarig. Resultatens signifikans för uppdraget diskuteras i kapitel 6. Notera att den här redovisade sambedomningen är oberoende av underlagsrapporterna så till vida att slutsatserna som framförs i föreliggande utredning ej nödvändigtvis är desamma som de slutsatser som redovisas i underlagsrapporterna. Följande underlagsrapporter har ingått i bedömningen:

Rapport	Konsult
Statistisk analys av hydrauliska testdata från Äspölaboratoriet	VBB-VIAK
Hydrogeologiska analyser - förändring av antal möjliga deponeringspositioner med hänsyn till anisotropi hos hydraulisk konduktivitet	CTH
Simulering av blockegenskaper med hänsyn till bergstrukturers geometriska och hydrauliska egenskaper	Golder Associates
Jämförelse av Bergmekaniska funktionssätt hos KBS-3 V, KBS-3 H och MLH	Clay Technology
Strukturgeologins betydelse för val av deponeringsmetod	SCC

I nedanstående avsnitt (kapitel 5.2, 5.3 och 5.4) redovisas kortfattat resultaten av de olika delstudierna. Dessa sambedöms och diskuteras i kapitel 6. För detaljerade analyser, primärdata och djupare resonemang hänvisas till respektive delrapport (bilagorna 1-5).

5.2 Hydrogeologi

En studie av den hydrauliska anisotropin på Äspö utfördes av VBB-VIAK, se bilaga 2. Underlaget för undersökningen var subvertikala kärnborrhål borrade från markytan (injektionstester) och subhorisontella sonderingshål borrade från tunneln (tryckuppbyggnadstester).

En empirisk relation, härledd från arbetet med förundersökning och byggandet av Äspölaboratoriet, användes för att skala om transmissiviteterna då dessa erhållits från tester utförda i olika skalor som ej är direkt jämförbara. Ett grundantagande för transmissivitetens riktningberoende har varit att den vattenförande strukturen skär undersökningshålet i rät vinkel. Då undersökningshålen har olika riktningar har statistik kunnat utföras på dessa med avseende på transmissivitetens variation. Variationen över

rummet beräknades som aritmetiska medelavstånd mellan hydrauliska strukturer med en transmissivitet överstigande definierade gränsvärden.

Utredningen visar att transmissiviteten i den studerade bergmassan är rikttningsberoende och varierar mellan (sonderingshål) 4×10^{-7} (m^2/s) inom rikttningsintervallet $120\text{-}140^\circ$ och 2×10^{-9} (m^2/s) inom $20\text{-}80^\circ$. Det vill säga transmissiviteten är ca 100 gånger större i vertikala plan med nordvästlig riktning än i motsvarande struktur i nordostlig riktning. I kärnbrorhål, vilka enligt ovan representerar flödet i horisontalplanet, har transmissiviteten beräknats till 2×10^{-8} (m^2/s).

Avståndet mellan de hydrauliska strukturerna beräknades och avståndsfördelningen visades följa lognormal fördelning. Det aritmetiska medelavståndet mellan strukturer större än ett givet värde har beräknats enligt tabell 5-1.

Tabell 5-1 Aritmetiskt medelavstånd mellan hydrauliska strukturer med en transmissivitet större än ett visst givet värde (baserad på bilaga 2).

Transmissivitet (m^2/s)	medelavstånd (m)
<i>Sonderingshål (subhorisontella)</i>	
>10-5	70
>10-7	35
>10-9	20
<i>Kärnbrorhål (subvertikala)</i>	
>10-5	45
>10-7	14
>10-9	8

Undersökningarna av transmissivitetens anisotropi i bergmassan användes som indata för en tillämpning av ett egenutvecklat geostatistiskt analysverktyg kallat BayMar (Bayesian Markov Geostatistisk Modell, se bilaga 3).

Den geostatistiska analysen bestod av två moment:

En beräkning av den isotropa, ekvivalenta konduktiviteten utfördes för varje konduktivitetstest.

Dessa beräkningar utgjorde basen för en generering av kartor över sannolikheten att ett fastställt, värde på konduktiviteten vid en given position ej överskrids. Antalet möjliga deponeringspositioner i olika deponeringsriktningar beskrevs med ett s.k. hydrauliskt positioneringsindex vilket uttrycker sannolikheten att en deponeringsposition är acceptabel givet vald kravgräns för hydrauliska konduktivitet.

De utförda geostatistiska analyserna visar att tydliga skillnader mellan olika riktningar på deponeringshålen. Studierna visade att horisontell deponering (MLH + KBS-3 H) i 310° , dvs parallellt med den hydrauliska anisotropin, resulterar i ca dubbelt så många acceptabla kapselpositioner som horisontell deponering i 040° (vinkelrätt den hydrauliska anisotropin). Sannolikheten för acceptans av kapselpositioner med vertikal deponering ligger mellan de ovan angivna ytterlighetsfallen. Tabell 5-2 sammanfattar resultatet som en känslighetsanalys av det använda K-värdet. Ur tabellen kan bland

annat utläsas att acceptansen av horisontella kapselpositioner orienterade mot NE är 30% medan vertikala kapselpositioner och horisontella kapselpositioner orienterade mot NV medför acceptans av 53% respektive 60% vid användandet av en kritisk konduktivitet, K_{cr} , av 10^{-9} m/s (se bilaga 3 för detaljer).

Tabell 5-2 Hydrauliskt positioneringsindex, HPI, för deponering i olika riktningar (omarbetad efter bilaga 3). Värden avser sannolikheten för acceptans; exempelvis avser värdet 0.53 (Vert. Dep, $K_{cr}= 10^{-9}$ m/s) att 53% av kapselpositionerna är acceptabla medan resterande 47 % refuseras.

K_{cr} (m/s)	Vert. Dep.	Dep. i 310°	Dep. i 040°	Dep. Para. Med TBM
10^{-9}	0,53	0,60	0,30	0,32
10^{-8}	0,63	0,74	0,45	0,47
10^{-7}	0,81	0,90	0,57	0,59

Diskreta spricknätverksmodeller (Discrete Fracture Network) används av Golder Associates för olika typer av analyser. DFN-verktyget FracMan med dess olika tilläggsmoduler har använts inom ramen för detta projekt för analyser av bergmassans hydrauliska och strukturella egenskaper i relation till deponeringsriktningen. Till skillnad från många andra koder som används för geanalyser betraktas bergmassan inte som ett kontinuum (homogent medium) utan som ett nätverk av diskreta sprickor vilka kan tillskrivas olika egenskaper (heterogenitet). Spricknätverket genereras stokastiskt efter karterad information från tunnlar, borrhål och, i förekommande fall, markytan så att sprickstatistiken i nätverket återspeglar den karterade.

Analyser med PAWorks och MAFIC (Golder Associates), vilka är tilläggsmoduler till FracMan, har givit annorlunda resultat än de analyser som utförts med BayMar; för valda flödesriktningar är spricknätverken mer konnekterade, det vill säga antalet potentiella flödeskanaler är större, i vertikal- än i horisontell led. Studierna av deponering i horisontell led är dock analoga med BayMar analyserna, d.v.s. konnektionen är större i nordvästlig- än i nordostlig riktning. Resultatet av dessa analyser redovisas i underlagsrapporten (bilaga 1) som diagram av antalet konduktiva realiseringar för strömning i olika riktningar och olika deponeringsalternativ (Se bilaga 1 för diagram). Det är emellertid viktigt att notera att den relativa skillnaden mellan olika deponeringsriktningar som beräknades med FracMan är betydligt mindre än den som beräknades med BayMar (jämför bilaga 1). I bilaga 1 redovisas att skillnaderna som föreligger är små och kan anses vara marginella. Man bör dock notera att det i bilaga 1 endast redovisas beräkningar på statistik från TBM-tunneln i Äspö.

5.3 Bergmekanik

De bergmekaniska aspekterna av deponering i olika riktningar studerades av Clay Technology (bilaga 4). För de olika deponeringsmetoderna utfördes främst två typer av analyser. Dels analyserades konstruktionernas stabilitet i relation till rådande bergspänningar och diskontinuitetsmatris i bergmassan närmast deponeringshålet (närfältsberget), dels studerades den bergmekaniska inverkan på vattenomsättningen i närfältet.

För att studera de olika aspekterna har två olika angreppssätt tillgripits. Dels har kritiska konstellationer av strukturer, bergspänningar och tunnelgeometrier urskilts vilka givit resultat av generell karaktär. Dels har en förenklad bergstrukturmodell, baserad på den FracMan-modell, eller delar därav, som använts av Golder Associates använts för studierna av Äspötypisk bergmassa i relation till de olika deponeringsmetoderna (se bilaga 4).

Tre olika typer av numeriska koder, vilka fokuserar på delvis olika frågeställningar, har använts för beräkningarna; BEM (Boundary Element Model), FEM (Finite Element Model) och DEM (Discrete Element Model) representeras av BEASY, PlastFEM respektive 3DEC.

Det primära resultatet av analyserna är att relativt små skillnader i funktionssätt har kunnat detekteras vid en jämförelse av de olika deponeringsmetoderna. En förutsättning är att deponeringshålerna, inkl MLH, kan orienteras i en från bergmekanisk synpunkt gynnsam riktning; deponeringshålets längdaxel riktas fördelaktigast parallellt med σ_1 (Största horisontalspänningen, kompressivt spänningsfält), vilken på Äspö stryker ca 310°.

Nedanstående tabeller sammanfattar resultaten av de bergmekaniska studierna. Från tabellerna 5-3 och 5-4, vilka omarbetats efter bilaga 4 kan följande härledas:

1. MLH och KBS-3 V, med sprängd deponeringstunnel, är de deponeringsmetoder som är mest robusta; det vill säga vid en jämförelse med andra metoder påverkas dessa mindre av variationer i riktningen av σ_1 .
2. KBS-3 H, borrarad tunnel är det bästa alternativet om tunnelriktningen kan optimeras i förhållande till rådande spänningsförhållanden men samtidigt det alternativ som är känsligast för variationer i spänningsfältet. Endast måttliga variationer i orienteringen av σ_1 inom bergmassan förutsätts kunna accepteras.

Tabell 5-3 Tabellen visar den relativa stabiliteten hos deponeringshål i berg med förenklad bergstruktur. Hänsyn är tagen till konduktivitet och vattenomsättning (omarbetad efter bilaga 4). För kapslarna studeras fallen vinkelrätt resp parallellt med största huvudspänningsriktningen (σ_1). Symbolerna \perp respektive \parallel innebär vinkelrät respektive parallell kapselorientering i förhållande till σ_1 , 1 = liten betydelse och frekvens, 4 = stor betydelse och hög frekvens.

Koncept	Orientering	Blockutfall	Överbelastning	Sprickrörelse	Vattenomsätt.	Σ
KBS3-V, borrarad tunnel*	\perp	2	4	3	2	11
KBS3-V, sprängd tunnel*	\perp	3	3	3	4	13
KBS3-H, borrarad tunnel	\perp	2	4	3	2	11
KBS3-H, sprängd tunnel	\perp	2	3	4	4	13
MLH	\perp	2	2	2	2	8
KBS3-V, borrarad tunnel**	\parallel	2	2	2	1	7
KBS3-V, sprängd tunnel**	\parallel	3	2	2	4	11
KBS3-H, borrarad tunnel	\parallel	2	2	1	1	6
KBS3-H, sprängd tunnel	\parallel	2	1	1	4	8
MLH	\parallel	2	1	1	4	8

*Deponeringstunnlarna orienterade vinkelrätt σ_1 , **deponeringstunnlarna orienterade parallellt σ_1 .

Tabell 5-4 Tabellen sammanställer summor och kvoter av de bergmekaniska effekterna i tabell 5-3. Låga värden indikerar större relativ robusthet m.a.p. orientering av tunnlarna än höga värden (jämför tabell 5-5). En kvot nära ett tyder på att metoden är relativt okänslig för riktningen av tunnlarna; högre kvoter att skillnader föreligger.

Koncept	⊥	∥	Summa	Kvot
KBS3-V, borrarad tunnel	11	7	18	1,57
KBS3-V, sprängd tunnel	13	11	24	1,18
KBS3-H, borrarad tunnel	11	6	17	1,83
KBS3-H, sprängd tunnel	13	8	21	1,63
MLH	8	8	16	1,00

Tabell 5-5 Som tabell 5-4 men endast ”sprickrörelse” och ”vattenomsättning” från tabell 5-3 har beaktats.

Koncept	⊥	∥	Summa	Kvot
KBS3-V, borrarad tunnel	5	3	8	1,67
KBS3-V, sprängd tunnel	7	6	13	1,17
KBS3-H, borrarad tunnel	5	2	7	2,50
KBS3-H, sprängd tunnel	8	5	13	1,60
MLH	4	5	9	1,25

Det är viktigt, i detta sammanhang, att påpeka att de flesta av de bergmekaniska konsekvenserna går att åtgärda. Exempelvis kan instabilt berg åtgärdas med bultning och sprutbetonering; inläckage av vatten kan i viss utsträckning åtgärdas med injektering. En jämförelse bör därför inriktas på de effekter som ej direkt eller uppenbart kan åtgärdas vid konstruktion av förvaret eller som kan påverka långsiktig funktion och säkerhet. Sprickrörelser, d.v.s. initiering, reaktivering och propagering av diskontinuiteter, och vattenomsättning i närfältet (se bilaga 4 för detaljer) ger dock, om de isoleras från övriga effekter, en påverkan på de olika deponeringsmetoderna som är snarlik den av de sammanlagda effekterna (jämför tabellerna 5-3 och 5-5). Även ur denna aspekt förefaller KBS-3 H och KBS-3 V, med borrarade deponeringstunnlar, vara de bästa alternativen under förutsättningen att de kan orienteras i valfri riktning och att spänningsfältet kan anses vara homogent inom deponeringsvolymen.

Blockutfallen har studerats med två olika metoder vilka ger snarlika resultat. Clay Technology baserade beräkningarna på den för uppdraget upprättade förenklade bergstrukturen medan Golder Associates använde ett stokastiskt spricknätverk (DFN). Analyserna kan ej påvisa signifikanta skillnader i frekvensen blockutfall mellan de olika deponeringskoncepten.

5.4 Strukturgeologi

En utredning om strukturgeologins betydelse för valet av deponeringsmetod baserades på nuvarande geokunskap om bergmassan inom Äspöområdet, se bilaga 5. Äspötypiskt berg från ca 350-450 m djup och data från den TBM borrarade delen av Äspölaboratoriet

användes som bas för sprickstatistik och de därpå baserade resonemangen. FracMan analyser (Golder Associates, bilaga 1) användes för beräkning av sprickintensiteter och konnektivitet för olika riktningar i bergmassan.

För tydlighet återges endast resultaten av de strukturgeologiska analyserna. För detaljer hänvisas till bilagorna 1 och 5.

1. Andelen kapselhålsdiskriminerande sprickor med kinematiska indicier (förkastningar) bedöms utgöra ca 1-2% av sprickmatrisen, d.v.s. av det totala antalet sprickor. Skall dessa beaktas vid jämförelsen av deponeringsmetoder är sannolikheten för skärning med sådana strukturer störst för vertikal deponering (KBS-3 V) och horisontell deponering i nordostlig riktning (KBS-3 H och MLH) medan den är lägre för horisontell deponering i NV riktning (KBS-3 H och MLH).
2. Andelen vattenförande, kapselhålsdiskriminerande sprickor bedöms utgöra ca 2% av sprickmatrisen. Denna grupp omfattar även vattenförande förkastningar (gäller enskilda diskontinuiteter; sprickzonerna ingår ej i analysen). För att optimera förvarslayouten ur denna aspekt bör kapselhålen orienteras vertikalt eller, vid horisontell deponering, mot NV.
3. Densiteten av kapselhålsdiskriminerande sprickor, enligt punkterna 1 och 2 ovan, bedöms vara tillräckligt låg (< 5 % av den totala densiteten), inom den studerade bergmassan, för att dessa ej behöver beaktas vid jämförelsen av bortfallet av kapselpositioner för de olika deponeringsmetoderna.
4. Analyser med FracMan visar att ingen signifikant skillnad i sprickintensitet kan påvisas i kapselhålen vid jämförelse av de olika deponeringsmetoderna (KBS-3), se bilaga 1.
5. Analyser med PAWorks och MAFIC visar att för de valda flödesriktningarna är spricknätverken mer konnekterade, det vill säga antalet potentiella flödeskanaler är större, i vertikal- än i horisontell led. Vidare visar analyserna att konnektionen är större för horisontell deponering i nordvästlig- än i nordostlig riktning, se bilaga 1.

Den bergart som på Äspö benämns finkornig granit bedöms generellt vara kapselhålsdiskriminerande som bergart på grund av dess höga sprickintensitet. MLH tunnlar, vilka på grund av sin längd i förhållande till de andra studerade kapselhålskonfigurationerna ej helt kan undvika denna bergart, bör riktas mot NV för att minimera skärningsytan av densamma i tunnlar. Denna riktning är dessutom gynnsam ur bergmekanisk synvinkel. Nackdelen med en sådan riktning på MLH är dock att tunnlar löper parallellt med de vattenförande strukturerna och den hydrauliska anisotropin vilket, om långa sprickor är vanliga, kan försvåra tätning.

6 Diskussion

I föreliggande kapitel diskuteras resultaten av de olika delstudierna, framför allt för de fall där tolkningsskillnader föreligger. Diskussioner har fortlöpande skett med R. Stanfors, C. Svemar, H. Sandstedt samt respektive projektledare. Nedanstående resonemang utgör underlag för rekommendationer vilka redovisas i kapitel 7.

6.1 BayMar-analyser

De analyser som utförts med verktyget BayMar pekar på att bortfallet, i absoluta tal, är mycket stort inom en bergmassa liknande den på Äspö och i nivå med TBM tunneln. Med en konduktivitet om $K=10^{-9}$ m/s är sannolikheten för refusering i bästa fall ca 40% (Deponering I NV) och i sämsta fall 70% (deponering i NE).

Tabell 6-1 visar att horisontell deponering mot NO ($K = 10^{-9}$ m/s) ger en ca dubbelt så stor refusering av kapselpositioner som horisontell deponering mot NV. Vertikal deponering ger acceptansvärden som är något sämre än för deponering mot NV. Det vill säga om, i en given bergmassa, den hydrauliska anisotropin är konstant i riktning och storlek och tunnelsystemet kan roteras till en optimal riktning är positionering vinkelrätt anisotropin fördelaktigast; på Äspö motsvarar detta deponering i nordvästlig riktning. Om däremot en riktningsoptimering ej kan ske eller om anisotropin varierar avsevärt inom en given bergmassa pekar BayMar analyserna på att vertikal deponering är mer robust.

De värden som beräknats för HPI strider mot den uppfattningen som, efter ingående diskussioner med de berörda, råder inom arbetsgruppen för projekt JADE. Det anses allmänt att beräknade HPI-värden är underskattade; bergmassan verkar, vid okulärbesiktning av TBM tunneln och angränsande bergutrymmen på motsvarande nivåer, betydligt bättre än vad HPI antyder. Det är dock möjligt att den uppfattningen som råder inom arbetsgruppen är felaktig; beräkningarna med BayMar, och dessas begynnelsevillkor, är korrekta. Det anses därför angeläget att metodens beroende av begynnelsevillkoren utreds vidare och att resultaten jämförs med alternativa beräkningsmetoder.

Notera därför att Baymar, som bygger på Bayesiansk statistisk, tillåter en s.k. *a priori skattning* ("...på förhand, utan föregående undersökning...", SAOL) av den statistiska fördelningen. En *a priori skattning* är ett begynnelsevärde som kan utgöras av mätdata, en kvalificerad gissning eller en kombination av båda. Ett system med hög variabilitet, som Äspö, uppvisar korta korrelationslängder ("range" i variogram). Detta innebär att för en hög säkerhet i analyserna måste data erhållas nära de sökta (okända) cellerna. Densiteten observationspunkter är dock otillräcklig på Äspö varför resultaten av Baymar beräkningarna blir beroende av *a priori skattningarna*. Utifrån konduktivitetsdata och de korrelationslängder som kunnat observeras angav BayMar-analysen att HPI-skattningarna har en hög grad av osäkerhet. Detta i synnerhet med hänsyn tagen till den på subjektiva grunder antagna kravgränsen $K = 10^{-9}$ m/s. Antalet kapselpositioner som kan komma att accepteras beror därför främst på hur kravgränserna sätts.

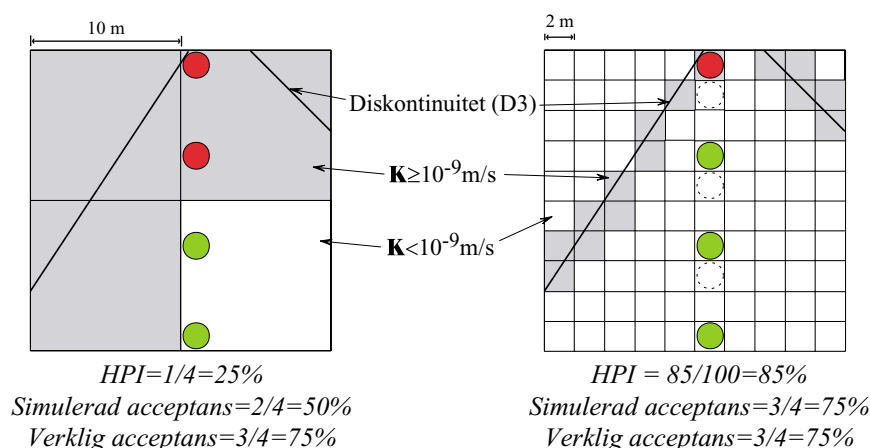
BayMar-modellen utgår ifrån ett antagande om ergodicitet, dvs det globala tillståndet för den hydrauliska konduktiviteten antas vara en god representation om förhållandet i

den mindre skalan. Skulle graden av ergodicitet vara överskattad i detta grundantagande kan resultatet av BayMar-analyserna i stor utsträckning påverkas av den använda upplösningen (Figur 6-1).

Vid verklig positionering av kapselhål är det emellertid möjligt att lokalt anpassa avståndet mellan kapslarna för acceptans av en kritisk kapselposition (Figur 6-1). Andelen kapslar som i verkligheten accepteras bedöms därför kunna bli betydligt högre än vad BayMar analyserna visar.

Tabell 6-1 Tabellen redovisar hur acceptansen av kapselpositioner, HPI, (Hydrauliskt PositioneringsIndex) varierar för olika deponeringsmetoder. Det använda K-värdet är 10^{-9} m/s (omarbetat efter bilaga)

Riktning	Acceptans
Vertikal Deponering	53,0%
Deponering i 310°	60,0%
Deponering i 040°	30,0%
Deponering parallellt med TBM	32,0%

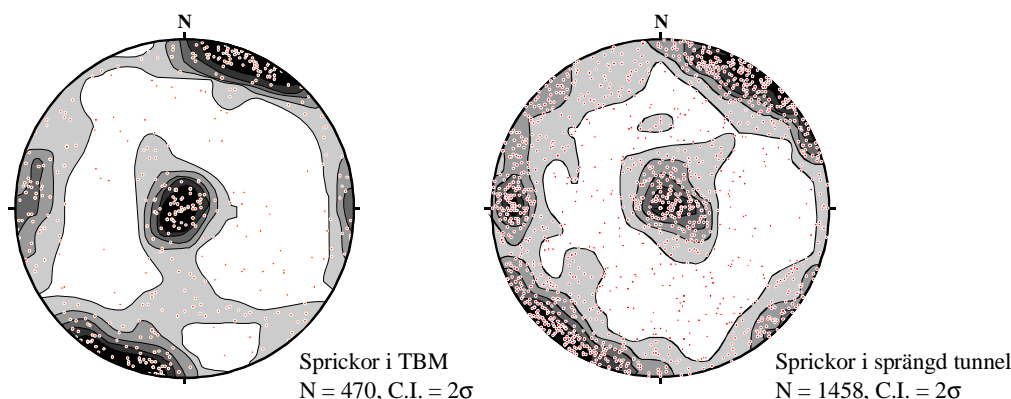


Figur 6-1 Figuren illustrerar schematiskt effekten av upplösning i BayMar analyserna (se text för detaljer). Konduktiviteten i cellen är en kombination av konduktiviteten i bergmassan och konduktiviteten in dess inneboende diskontinuiteter. HPI = sannolikhet för acceptans, Simulerad acceptans = beräknad acceptans vid stokastisk simulering, verklig acceptans = andelen kapselpositioner som ej skärs av vattenförande, kapselhåldiskriminerande diskontinuitet. Streckad cirkel anger lokal anpassning av layouten till rådande geologiska förutsättningar

6.2 FracMan-analyser

En förutsättning för arbetet med FracMan har varit att en tidigare uppförd DFN-modell över TBM tunneln skulle användas. Sprickdata från TBM tunneln skiljer sig på flera sätt från data karterad eller uppmätt i den sprängda tunneln. TBM tunneln är borrarad i en enda riktning medan den sprängda tunneln går i spiral genom bergmassan. Därmed skulle sprickmatrisen i den sprängda tunneln vara mindre utsatt för mätfel (eng.

sampling bias). I den sprängda tunneln har emellertid ett antal inducerade (artificiella) sprickor karterats. En jämförelse av de två sprickmatriserna (Figur 6-2) visar dock att de är mycket lika. Skillnaden mellan sprickmatriserna är dels att det nordvästliga klustret i TBM tunneln har en VNV strykning och att det nordsydliga klustret är svagare. Det senare kan dock vara orsakat av att observationsmängden är mindre. Sprickmatrisens variation med



Figur 6-2 Jämförelse av sprickor karterade i den sprängda- och TBM borrade delen av tunneln (Äspö).

Sprickorna i SICADA har ej kodats individuellt med avseende på vattenföring med tillräcklig noggrannhet varför samtliga sprickor i DFN-modellen betraktas som potentiella konduktorer. Konnektiviteten (frekvensen sprickskärningar) av dessa sprickor har använts för bedömning av konduktiviteten i deponeringspositioner med olika riktningar. Denna konduktivitet bedöms dock kunna skilja sig från den som kan erhållas vid modellering av endast de vattenförande sprickorna då dessa utgör en mer anisotrop sprickmatris (se bilaga 5). En konsekvens av det använda betraktelsesättet är att skillnaden mellan de olika deponeringsmetoderna, vad avser vattenomsättning och konduktivitet, utjämnas. Ett problem är emellertid att avgöra vilka sprickor som är vattenförande i ostört berg; dessa behöver inte vara desamma som karterats som vattenförande i SICADA. Problem uppstår även vid fastställandet av kritiska gränser för flödet i sprickorna; uppenbara skillnader föreligger mellan karteringar av borrhälen och kartering i den tunnel där borrhälen borrats. Det bedöms med anledning av detta lämpligt att dessa frågeställningar utreds närmare.

Blockutfall har endast studerats gravimetriskt utan hänsyn till rådande spänningsfält. Ett cirkulärt eller hästskoformat tvärsnitt är, till skillnad från det rektangulära tvärsnitt som använts, stabilare och skillnaden mellan metoderna blir mindre. Detta påverkar dock inte den utförda studien då slutsatsen var att skillnaderna var insignifikanta mellan deponeringsmetoderna.

6.3 Hydraulisk anisotropi

Ett grundantagande för beräkningen av den hydrauliska anisotropin har varit att sprickorna skär borrhälen vinkelrätt. Resultatet av analyserna stämmer väl med de

analyser som utförts med andra metoder. Icke desto mindre anses det vara angeläget att grunderna för detta antagande och de eventuella effekter det får på resultatet utreds. Vidare anses det troligt att borrhålens fördelning över tunneln, både vad gäller antal och riktning, direkt påverkar resultatet. Metodens användbarhet demonstreras icke desto mindre av att resultatet så väl sammanfaller med riktningen av σ_1 och de vattenförande strukturerna. Ett visst utredningsbehov bedöms emellertid föreligga vad avser metodens känslighet för dess grundantagande då betraktelsesättet uppfattas som attraktivt för framtida analyser av djupförvar.

6.4 MLH-specifika problem

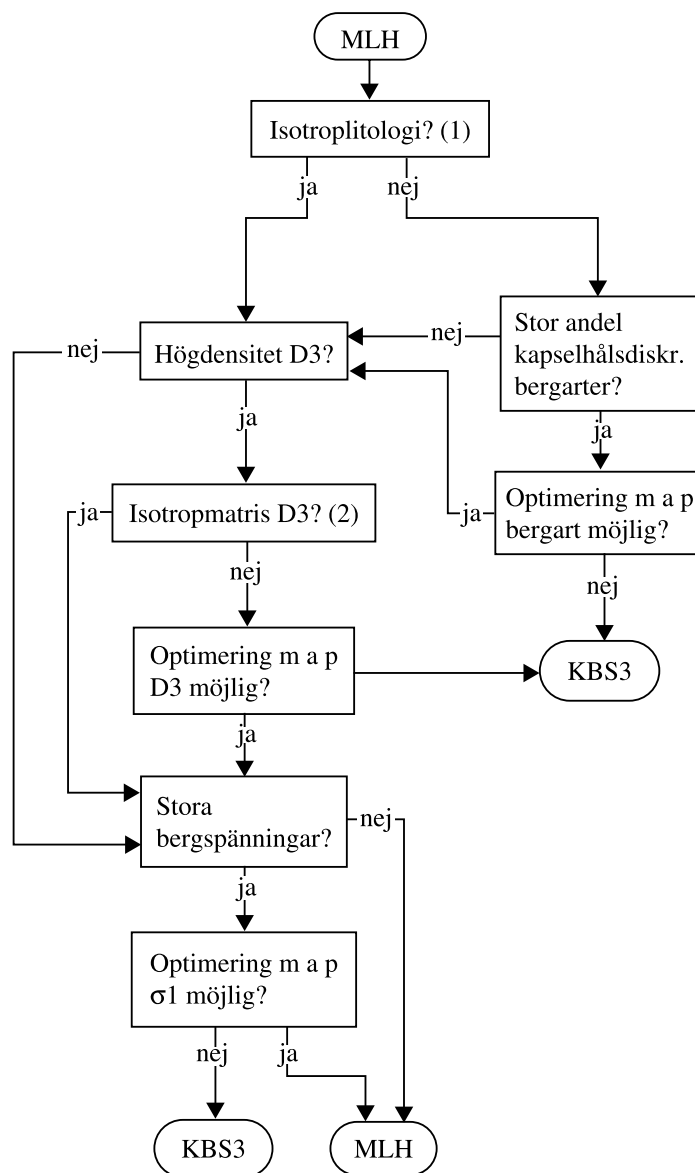
Deponering i medellånga hål (MLH) är fördelaktigt ur många aspekter varav den bergmekaniska stabiliteten kanske är den mest tydliga. Moderna borrhålsmetoder för horisontella tunnlar av aktuell dimension gör MLH kostnadsmässigt attraktivt ur byggnadshänseende. MLH är emellertid behäftad med nackdelar som är unika för metoden.

Kroppar av finkornig granit kan troligen inte undvikas helt i någon MLH tunnel i Äspö berg vilket också gäller diskontinuiteter av klass D3. Förstärkningsarbeten mm är komplicerade i tunnlar med små tvärsnitt. Det är dock ännu oklart hur MLH tunnlar kan förseglas lokalt vid de diskriminerande diskontinuiteterna och dessa förseglingar kan påverka förvarets långsiktiga funktion och säkerhet.

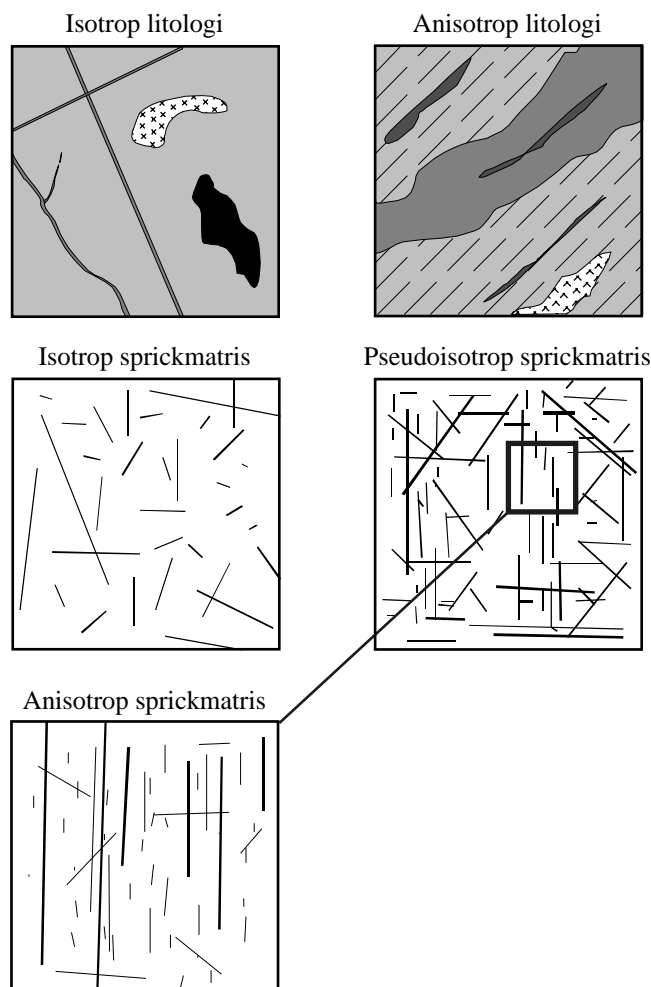
För att minimera skärningsytan med finkorniga graniter och sprickzoner har i föreliggande studie rekommenderats att MLH tunnlar orienteras i NV-riktning. Denna riktning är även gynnsam ur en bergmekanisk synpunkt. En stor nackdel är dock att tunnlar orienteras parallellt med den hydrauliska anisotropin, vattenförande strukturer och förkastningar (enskilda diskontinuiteter, ej zoner). Dessa är, då skärningsytan kan bli lång, svårare att injektera och förstärka än om tunnlar orienteras mot de vattenförande sprickorna med trubbig vinkel.

En fördel med MLH är att man tidigt kan få information om bergmassan i deponeringshålen (se /Sandstedt et al., 2001/ för utförligare diskussion). Detta för att borrhålspositioner erhålls från kapselpositionerna innan tunnlar borrhåls. Diverse geofysiska metoder såsom radar m.m. behöver endast sondera bergmassan någon meter radiellt från borrhålspositionerna. Säkerheten i prediktionerna av bergmassans egenskaper i kapselhålen kan därmed anses vara relativt god. För jämförelse krävs, för deponering enligt någon av KBS-3 varianterna, sondering ett tiotal meter radiellt från borrhålet då undersökningshålet ej kan positioneras närmre kapselpositionerna än i sulan på deponeringstunneln. Därmed ökar osäkerheten i den första geologiska prediktionen. Borrhålspositionering i deponeringshålet kan endast ske efter det att deponeringstunnlar för KBS-3 byggts. Det är dock inte alltid nödvändigt att borra i kapselpositioner för KBS-3 då 3D modellering av sprickgeometrier erhållna från kartering av deponeringstunneln tidigt kan diskvalificera en position. Ovanstående resonemang gäller ej för vattenförande diskontinuiteter. Dessa kan vara svåra att upptäcka med kärnborrhålspositionering på grund av kanalbildningen på sprickytan. Ur denna aspekt är predikterbarheten i MLH sämre än för någonting av KBS-3 koncepten.

Även om analyserna inom JADE baseras på platsspecifika data finns ändå generella slutsatser vad gäller MLH som kan appliceras i beslutsprocessen vid valet av deponeringsmetod. En förenklad beslutsprocess, vilken endast omfattar strikt geologiska parametrar, redovisas för MLH i figur 6-3. Denna beslutsprocess kan på erforderligt sätt anpassas till att omfatta även valet mellan KBS-3 H och KBS-3 V.



Figur 6-3 Figuren illustrerar schematiskt en principiell beslutsprocess vid ett eventuellt val mellan MLH och KBS-3 och sammanfattar de frågeställningar som behandlats inom JADE. Notera att en riskanalys, vilken omfattar långsiktig funktion och säkerhet samt kostnader, ingår i varje steg. För definition av (1) och (2) se figur 6-4.



Figur 6-4 Figuren illustrerar schematiskt begreppen isotrop respektive anisotrop vilka använts i figur 6-3. Med isotrop litologi avses en bergart inom vilken sekundärbergarter är slumpmässigt fördelade inom bergmassan i såväl position, form som riktning (t.ex. en granitpluton med diabasgångar). Motsatsen avser antingen att sekundärbergarter har en dominerande riktning (t.ex. vissa gnejser) eller att många typer av bergarter dominerar inom samma volym (multipla intrusioner). Med isotrop sprickmatrix avses en sprick mängd inom vilken det ej förekommer någon dominerande riktning eller att flera riktningar dominerar. Hänsyn har ej tagits till undergrupper indelade efter t.ex. mineralogi, hydrauliska egenskaper etc. Motsatsen, anisotrop sprickmatrix, karaktäriseras av en dominerande sprickriktning (kluster). En bergmassa kan vara isotrop i en skala men anisotrop i en annan (pseudoisotropi).

6.5 Strukturgeologiska analyser

De strukturgeologiska studierna som utförts, vilka är redovisade i bilaga 5 är baserade på den datamängd som insamlats av SKB och som redovisas i SICADA. Detta enligt de förutsättningar som fastställts för projekt JADE-Geovetenskapliga studier. Som underlag för studierna har den obearbetade datamängden använts, då främst från TBM tunneln. Detta för att full spårbarhet skall kunna uppnås.

För noggrannare skattningar av sprickmatriens påverkan på de olika deponeringsmetoderna måste en modifierad version av sprickinformationen i SICADA användas. Detta främst på grund av följande:

1. Noggranna analyser kan göras med den befintliga tunnelkarteringen som underlag vilket dock endast kan ske genom att sprickorna (och zonerna) i SICADA kodas med avseende på funktionsklasserna D3-D5 /Almén et al., 1996/. Med detta förfarande kan det verkliga bortfallet i befintlig tunnel undersökas med Äspöspecifikt resultat.
2. Spricklängderna som använts vid analysen är baserade på den karterade sprickskärningen med tunnelväggarna. Dessa bör justeras med avseende på därför uppkomna trunkerings effekter. Datamängden är också trunkerad till en minsta spricklängd av 1 m. De verkliga spricklängderna är av fundamental betydelse vid beräkningar av geometriska sannolikheter men anses ej relevanta för den utförda studien då skillnaderna endast kvantifierats relativt.
3. Den viktigaste slutsatsen av strukturgeologiska analyser är att densiteten kapselhålsdiskriminerande diskontinuiteter är tillräckligt låg för att endast marginella skillnader skall uppkomma vid deponering med olika metoder. I praktiken finns dessutom möjligheten att flytta en kapselposition några meter för att undvika en diskriminerande struktur eller bergart. Transporttunneln kan förlängas med motsvarande belopp under förutsättningen att det inbördes avståndet mellan kapslarna ej understiger 6 m. Troligen väljs för framtida slutförvar ett område inom vilken densiteten kapselhålsdiskriminerande strukturer är låg. Med Äspö som referens, vilken ur de flesta aspekter kan betraktas som en ogynnsam bergmassa för slutförvar, torde densiteten i en vald förvarsvolym bli ännu lägre än den som uppskattats för Äspö.

7 Slutsatser

En sambedömning av de olika delprojekten har utförts av SCC i samråd med respektive projektledare, Roy Stanfors Consulting och SKB. Diskussioner med samtliga berörda har förts under olika delar av projektet. Arbetet har utförts med Äspö som utgångspunkt. Där ej annat framgår är resultaten generella och kan appliceras på andra platser. De slutsatser som redovisas här är ej nödvändigtvis desamma som framförs i de olika delrapporterna (bilagorna 1-5). Läsaren uppmanas därför att även tillgodogöra sig den information som framgår av de bilagda delrapporterna. Slutsatserna sammanfattas punktvis nedan för tydlighet:

1. Skillnader föreligger mellan de olika deponeringsmetoderna vad avser omgivande strukturers påverkan vilket påverkar acceptansgraden av kapselpositioner för de olika metoderna. Skillnaden bedöms emellertid vara marginell.
2. Den hydrauliska anisotropin påverkar i stor utsträckning acceptansgraden av kapselpositioner för de olika metoderna. Beräkningar (BayMar) baserade på Äspödata visar att, beroende på deponeringsriktning, acceptansgraden vid horisontell deponering kan variera med en faktor 2.
3. Skillnader i bergmekanisk stabilitet mellan de olika metoderna har påvisats. Stabiliteten för respektive deponeringsmetod beror på möjligheten att orientera tunnelsystemen på den för deponeringshålen fördelaktigaste riktningen. De problem som uppstår på grund av instabilitet i tunnlarna bedöms emellertid kunna åtgärdas.
4. De strukturer, främst förkastningar och hydrauliska konduktorer av funktionsklass D3, som bedöms kunna påverka acceptansgraden för respektive metod förekommer på Äspö ej i tillräcklig stor mängd för att signifikanta skillnader mellan metoderna kan påvisas.
5. MLH kan endast rekommenderas för bergmassor med låg densitet av strukturer med funktionsklass D2-D3. Vidare kan MLH endast rekommenderas om densiteten kapselhålsdiskriminerande bergarter är låg. Därmed rekommenderas MLH ej för Äspötypiskt berg.
6. För den studerade bergmassan rekommenderas KBS-3. KBS-3 H och KBS-3 V bedöms kunna användas i kombination inom samma försvarsvolym beroende på de olika bergplintarnas geologiska karaktär.
7. KBS-3, borrade tunnlar, rekommenderas generellt som metod för bergmassor där variationen i såväl magnitud som riktning av spänningsförhållanden förväntas vara liten.
8. KBS-3 V (sprängd deponeringstunnel) och MLH bedöms vara mer robusta, och rekommenderas generellt som metod för bergmassor där variationen i såväl magnitud som riktning av spänningsförhållandena förväntas vara stor.

Ett delmål med projekt JADE var att identifiera kunskapsluckor. Under arbetet med JADE-Geovetenskapliga studier har ett antal frågeställningar diskuterats vilka fortfarande till stora delar anses vara obesvarade. Andra problem som dykt upp under

arbetets gång är av principiell natur. Följande frågeställningar bedöms vara relevanta och bli föremål för ytterligare utredning:

1. För KBS-3 H gäller följande (tillämpliga delar gäller även KBS-3 V): Optimering av kapselhålen, d v s minimering av bortfallet, med avseende på hydrauliska diskontinuiteter är även fördelaktigt för deponeringstunnlarna då skärningsytan med sådana strukturer blir liten (trubbig skärningsvinkel) och tätningsinsatserna förväntas bli relativt okomplicerade. En sådan optimering får dock nackdelen att deponeringstunnlarna orienteras vinkelrätt σ_1 som på Äspö är parallell med de vattenförande strukturerna. Detta verkar menligt på deponeringstunnlarnas stabilitet vilket kan medföra ökade förstärkningsinsatser. Om däremot deponeringstunnlarna optimeras i förhållande till σ_1 (orienteras parallellt med σ_1) ökar det teoretiska bortfallet av deponeringspositioner på grund av den ökade sannolikheten för skärning med hydraulisk diskontinuitet av typ D3. Dessutom blir skärningen mellan deponeringstunnlar och diskontinuiteten längre vilket kan komplicera och fördyra tätnings- och förstärkningsinsatserna. Således måste de negativa effekterna av olika layouter på deponeringstunnlar respektive kapselhål vägas mot varandra. Om slutsatserna av de strukturgeologiska studierna (bilaga 5) är korrekta, är skillnaden i geologins påverkan på KBS-3 marginell vad avser kapselhålen. Därmed uppstår ett val mellan olika grader av bergmekanisk påverkan och injekterings- och förstärkningsförhållanden i deponeringstunnlarna. Detta val skall baseras på tunnlaras långsiktiga säkerhet och funktion och om dessa inte äventyras för någondera konfigurationen, skillnaden i åtgärder. Primärt har i underlagsrapporterna deponeringstunnlarnas påverkan på kapselhålen belysts och ej effekten av varierande tunnelriktningar på själva deponeringstunnlarna. Det anses därför motiverat att utreda effekterna av dessas orientering i förhållande till σ_1 och strukturer av typ D3. De merkostnader som är förknippade med utökade förstärknings- och tätningsinsatser i deponeringstunnlarna måste kvantifieras och vägas mot de fördelar som en deponering i en viss riktning innebär. Det är kanske lämpligt att jämka effekterna genom att deponeringstunnlarna orienteras i en viss vinkel, förslagsvis $< 30^\circ$, till rådande spänningsfält (och hydrauliska strukturer på Äspö).
2. I dagsläget råder relativ stor osäkerhet om vad som är kapselhåldiskriminerande faktorer. Experter är emellertid oftast överens om vilka egenskaper en struktur skall ha för att vara kapselhåldiskriminerande men dessa egenskaper har ej kvantifierats, främst på grund av problemets komplexa natur. En ansats har tidigare presenterats där s.k. ordningar, motsvarande funktionsklasserna D1-D5, tabulerats med strukturernas förväntade egenskaper. Detta har dock inte fått någon praktiskt tillämpning främst på grund av den stora variationen mellan strukturer av samma ordning. Snarare borde en funktionsklass tillskrivas en struktur först när en kapselhåldiskriminerande egenskap, eller avsaknaden därav, kan påvisas. Det anses vara av stor vikt att sådana parametrar kvantifieras så att framtida scenarier i ett modellerat förvar kan simuleras. Vare sig kvantifieringen av gränsvärden, vilka bör vara tämligen konservativa, visar sig vara korrekt eller ej, finns det ett behov av ett beslutsunderlag för de olika projekteringsfaserna. Sådana gränser kan exempelvis påverka förvarslayouten (säkerhetsavstånd, blockens form etc), storleken (kapselhålsbortfall), kostnaden mm.

3. Geovetenskapliga studier har identifierat skillnader, där sådana föreligger, mellan de olika deponeringsmetoderna. Anlitade experter har utfört bedömningar av de effekter som valet av deponeringsmetod medför. Det saknas emellertid i dagsläget en lämplig metod för beräkning av kapselbortfallet i absoluta tal. Med anledning av detta föreslås en utredning med syfte att utföra beräkningar av det förväntade kapselbortfallet. Detta dels för jämförelse av olika deponeringsmetoder, dels för uppskattningar om förvarets slutliga storlek. Statistiker med inriktning på stokastisk geometri, topologi och liknande matematiska subdiscipliner är väl lämpade att studera denna typ av frågeställningar och bör med rimliga antaganden, fastställda i samråd med hydrologer, bergsingenjörer och strukturgeologer, kunna utarbeta en metodik lämplig för besvarandet av ovanstående problem.
4. Ett komplement till punkt 3 ovan är att Äspödata kodas med avseende på funktionsklasser. Detta skulle medföra att det absoluta kapselbortfallet relativt enkelt kan beräknas med befintligt karteringsunderlag och bedömningsgrunder. Beräkningarna kan därmed utgöra en kontroll av metodiken föreslagen i punkt 3.
5. Det är ännu oklart om MLH-tunnlar kan förseglas lokalt vid skärningen med diskriminerande diskontinuiteter av typ D2 och D3. En sådan bedömning baseras troligen på strukturens (lokala) egenskaper och omfattningen av de för strukturen nödvändiga tätningar och förstärkningarna. Det saknas emellertid i dagsläget gränsvärden för tillåten konduktivitet.
6. För projekt inom ramen för SKB:s verksamhet används begreppet respektavstånd, eller influensvolym, vilket kort kan definieras som det minsta avstånd en kapsel, av olika orsaker, kan positioneras från befintliga strukturer. Storleken på dessa respektavstånd har inte haft relevans för projekt JADE då effekterna bedömdes vara desamma för samtliga studerade deponeringsmetoder. I praktiken är en definition endast nödvändig för diskontinuiteter av funktionsklasserna D1-D3. Dessa tillåts per definition ej skära någon kapselposition men D3 kan troligen inte undvikas i MLH tunnlar. För en beräkning av positionsbortfallet i MLH tunnlar, vilket kan anses vara nödvändigt för en kostnadsjämförelse av de olika deponeringsmetoderna, anses det nödvändigt att respektavstånden till diskontinuiteter av funktionsklass D3 kvantifieras.
7. En utredning för fastställandet av riktvärden för respektavstånd, D1-D3, bedöms nödvändig då dessa i nuläget endast bedöms subjektivt av berörda utredare.

8 Referenser

Ageskog, L., 2001. Projekt JADE. Jämförande kostnadsanalys mellan olika deponeringsmetoder. SKB R-01-31 Svensk Kärnbränslehantering AB.

Almén, K., Stanfors, R. och Svemar, C., 1996. Nomenklatur och klassificering av geologiska strukturer vid platsundersökningar för SKB:s djupförvar, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Birgersson, L., Pers, K. och Wiborgh, M., 2001. Project JADE. Long-term and safety Comparison of repository systems. SKB TR-01-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sandstedt, H. och Munier, R., 2001. Projekt JADE. Jämförelse av teknik. SKB R-01-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sandstedt, H., Munier, R., Wichmann, C. och Isaksson, T., 2001. Projekt JADE, Beskrivning av MLH metoden, SKB R-01-29, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

SKB, 1992. Project on alternative system study (PASS). Final report SKB TR 93-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2001, Project JADE. Comparison of Repository Systems. Summary of results. SKB TR-01-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

BILAGA 1

Projekt JADE Geovetenskapliga studier

Simulering av blockegenskaper med hänsyn till bergstrukturers geometriska och hydrauliska egenskaper

Sven Follin

Golder Associates AB, Stockholm

Peter Wallman, Paul La Pointe och Bill Dershowitz

Golder Associates, Inc., Seattle

November 1996

Denna studie har gjorts på uppdrag av svensk Kärnbränslehantering AB. Slutsatser och åsikter framförda är författarens egna och behöver nödvändigtvis inte sammanfalla med beställarens.

Nyckelord: Djupförvar, deponeringsmetoder, sprickor, konnektivitet

Sammanfattning

Föreliggande studie har gjorts inom ramen för de geovetenskapliga studierna i JADE. Rapporten demonstrerar hur spricknätverksmodeller kan användas för att simulera/undersöka olika deponeringsalternativ med hänsyn till bergstrukturernas geometriska och hydrauliska egenskaper. Den använda spricknätverksmodellen bygger på statistik från sammanlagt 470 karterade sprickskärningar med TBM-delen av Äspötunneln. Enligt den kartering varifrån data till denna rapport är härrör är ingen av dessa sprickskärningar klassad som deformationszon. Rapporten undersöker två olika deponeringsalternativ i 20 m blockskala:

- I. *Ett horisontellt tunnelsegment med två horisontella kapselhål (KBS3-H)*
- II. *Ett horisontellt tunnelsegment med ett vertikalt kapselhål (KBS3-V)*

De 20 m långa tunnelsegmenten löper mellan två motstående blocksidor. Tunnelsegmentens tvärsnitt är rektangulära där bredden är större än höjden för alternativ I ($b = 4$ m, $h = 3.6$ m) och tvärtom för alternativ II. Kapselhålen är ca 8 m långa med cirkulära tvärsnitt ($\varnothing = 1.75$ m).

100 simuleringar av de två alternativen med spricknätverksgeneratoren *FracMan* ger högst värde på intensitetsmättet P_{21} (spricklängd /ytenuhet) för ett tunnelsegment med bäring $45-60^\circ$ och lägst för ett tunnelsegment med bäring $105-135^\circ$. Skillnaden mellan en bred och låg tunnel (alt. I) resp. en smal och hög (alt. II) är marginell med ett något lägre P_{21} -värde för alt. II. Vidare erhålls ett något högre P_{21} -värde för två horisontella kapselhål än för ett vertikalt kapselhål förutsatt att de horisontella hålen orienteras i bäring $60-75^\circ$. Om däremot de horisontella hålen orienteras i bäring $105-120^\circ$ erhålls ett något lägre P_{21} -värde än för det vertikala kapselhålet. Sammantaget (tunnel+kapselhål) verkar det inte föreligga några större skillnader mellan alt. I och alt. II m.a.p. intensitetsmättet P_{21} för olika orienteringar.

I rapporten undersöks vidare fyra fixa deponeringsalternativ i 20 m blockskala med blockutfallsprogrammet *RockBlok*, flödesvägsprogrammet *PAWorks* och flödeslösaren *MAFIC*. De fyra deponeringsalternativen är:

- A. **KBS3-H**: *N-S tunnelsegment med två horisontella hål orienterade i E-W*
- B. **KBS3-H**: *E-W tunnelsegment med två horisontella hål orienterade i N-S*
- C. **KBS3-V**: *N-S tunnelsegment med ett vertikalt hål*
- D. **KBS3-H**: *E-W tunnelsegment med ett vertikalt hål*

Analys av 30 stycken spricknätverk med *RockBlok* ger för alt. A, 2 fall där skärningen mellan tunnelsegment och spricknätverk skapar block som faller fritt från tunnelsegmentets tak och väggar. Skärningen mellan de två kapselhålen i alt. A och genererade spricknätverk skapar inte i något fall block som faller fritt. Motsvarande siffror för alt. B är 1 fall med blockutfall i tunnelsegmentet och 1 fall med blockutfall i de två kapselhålen. För alt. C och D erhålls vardera 1 fall med blockutfall i resp. tunnelsegment och inga fall med blockutfall i det vertikala kapselhålet. Sammanfattningsvis påvisar analysen inte några signifikanta skillnader i resultat för de fyra alternativen.

Analys av antalet flödesvägar med *PAWorks* i tre ortogonala riktningar för 30 stycken spricknätverk, utan tunnelsegment och kapselhål, ger följande resultat: I 8 fall föreligger konnektivitet mellan blockens ovan-/undersidor, i 2 fall föreligger konnektivitet mellan blockens nord-/sydsidor och 1 fall föreligger konnektivitet mellan blockens öst-/och västsidor. Antalet flödesvägar i de fall som är konnekterade varierar mellan 1-20 med en median på 3.

En motsvarande analys med *MAFIC* av flödet genom 100 stycken spricknätverk, utan tunnelsegment och kapselhål, ger 22 fall med flöde mellan blockens ovan-/undersidor, 10 fall med flöde mellan blockens nord-/sydsidor och 9 fall med flöde mellan blockens öst-/och västsidor. (För gradientriktningar som är subparallella med största huvudspänningsriktningen (312°) resp. med minsta huvudspänningsriktningen (42°) erhålls 20 resp. 15 fall med flöden.) En jämförelse av de konduktiva spricknätverkens hydrauliska konduktivitet K ger tämligen likartade kumulativa fördelningar för strömning i Ö->V riktning och i N->S riktning. För strömning i O->U ritning erhålls en brantare kumulativ fördelning, vilket kan tolkas som en lägre heterogenitet i denna strömningsriktning än för strömning i horisontalplanet.

Om man antar att mantelytorna hos tunnelsegment och kapselhål är permeabla (jmf begreppet störd zon) samtidigt som volymen innanför dessa är impermeabel, ger en förnyad analys med *PAWorks* följande resultat: För alt. A och B ökar antalet fall av konnektivitet mellan blockens ovan-/undersidor med 1, dvs. från 8 fall till 9. För alt. C ökar antalet fall av konnektivitet med 2, dvs. från 1 fall till 3 och för alt. D ökar antalet fall av konnektivitet med 4, dvs. från 2 fall till 6.

En motsvarande analys med *MAFIC* av flödet genom 100 stycken spricknätverk, med tunnelsegment och kapselhål, ger följande resultat: För alt. A och B ökar antalet fall med flöde mellan blockens ovan-/undersidor med 11, dvs. från 22 till 33. För alt. C ökar antalet fall med flöde med 20, dvs. från 9 fall till 29 och för alt. D ökar antalet fall med flöde med 8, dvs. från 10 fall till 18. En analys av den hydrauliska konduktiviteten i 20 m blockskala för alt. A och B ger ingen signifikant skillnad mellan dessa två alternativ.

Analyserna med *PAWorks* och *MAFIC* leder till följande tolkning:

- För de valda riktningarna är de studerade spricknätverken mest konnekterade i vertikal led. Detta innebär sannolikt också störst vattengenomsläpplighet i vertikal led.
- Om man antar att mantelytorna hos tunnelsegment och kapselhål är permeabla samtidigt som volymen innanför dessa är impermeabel pekar denna studie på att tunnlar och kapselhål ger en viss ökning av blockkonduktiviteten för samtliga studerade orienteringsalternativ.

Sammanfattningsvis konstateras i denna rapport:

Eftersom studerade strukturer till synes har bäst konnektering i vertikal led kan ett vertikalt kapselhål vara det mest fördelaktiga alternativet om låg exponeringsgrad för vertikala strukturer eftersträvas. Bästa val av orienteringsriktning på förvarstunnlarna är svårare att bedöma. Väljer man att lägga tunnlar parallellt med största huvudspänningsriktningen (ca $300-315^\circ$) är det risk för höga flöden längs med tunnlar. Väljer man en riktning som är vinkelrätt mot största huvudspänningsriktningen ökar risken för s.k. smällberg (Pusch, 1996).

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
1 Inledning	7
1.1 Syfte	7
1.2 Indata	7
1.3 Metod	8
2 Uppskattning av sprickintensitet med <i>FracMan</i>.....	13
3 Uppskattning av antalet flödesvägar med <i>PAWorks</i>.....	15
4 Uppskattning av hydraulisk konduktivitet med <i>MAFIC</i>.....	19
5 Uppskattning av blockutfall med <i>RockBlok</i>.....	25
6 Slutsatser	27
7 Referenser.....	29

1 Inledning

Föreliggande rapport har gjorts inom ramen för de geovetenskapliga studierna i JADE. Målet för de geovetenskapliga analyserna inom JADE är att ge ett underlag för en relativ bedömning av lämpligheten för följande tre deponeringsalternativ:

- **KBS3-H**, Horisontell deponering
- **KBS3-V**, Vertikaldeponering
- **MLH**, Horisontell deponering i medellånga hål

1.1 Syfte

Denna rapport demonstrerar möjligheterna att med spricknätverksmodeller undersöka olika deponeringsalternativ med hänsyn till bergstrukturers geometri och hydrauliska egenskaper. Rapporten har begränsats till att analysera olika orienteringar av *KBS3-H* och *KBS3-V*. Konkret uttryckt har spricknätverk och deponeringsalternativ simulerats i kuber med 20 m sidlängd. *KBS-H* alternativet representeras i modellen av ett tunnel-segment med två horisontella kapselhål. *KBS3-V* representeras av ett tunnelsegment med ett vertikalt kapselhål. De två alternativet illustreras i figur 1-1. Olika orienteringar (bäringar) på tunnelsegmenten i horisontalplanet har studerats. En förutsättning för analysen har varit att den skall göras så långt som möjligt på strukturgeologiska och hydrauliska data från TBM-delen av Äspötunneln.

1.2 Indata

Den spricknätverksanalys som redovisats av Follin & Hermanson (1996) har legat till grund för utfört arbete. Den använda spricknätverksmodellen bygger på statistik från sammanlagt 470 karterade sprickskärningar i TBM-delen av Äspötunneln, se tabell 1. Enligt den kartering varifrån data till denna rapport är härrör är ingen av sprick-skärningarna klassad som tillhörande en deformationszon. Spricknätverksmodellen enligt Follin & Hermanson (1996) hanterar alla sprickskärningar som ett (1) sprickset oavsett orientering. Figur 1-2 visar normalerna till de karterade sprickskärningarna i ett s.k. Schmidtnät.

P.g.a. brist på tillräckligt kvalitativa uppgifter om sprickfrekvens har transmissivitetsdata från de ca 15 m långa sondhålen i TBM-delen av Äspötunneln inte använts i utfört arbete. I stället har en analys av spricktransmissiviteter från 3 m långa packertestmätningar i kärnborrhålen KAS2 och KAS3 använts (La Pointe m.fl., 1995), se tabell 1.

Tabell 1 Sammanställning av indata som har använts i denna rapport.

Rumslig modell	Enhanced Baecher (sprickplanens centumpunkter är Poissonfördelade)
Total sprickintensitet, P_{32}	0.47 m^{-1}
Orientering	Bootstrappad, Fisherdispersion 300.
Sprickradiefördelning (FracMan)	Lognormal, $R_{\text{geom}} 5.4 \text{ m}$, $\sigma_{\log R} 0.31$
Konduktiv sprickintensitet, P_{32t}	0.0664 m^{-1}
Spricktransmissivitetsfördelning	Lognormal, $T_{\text{geom}} 1.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $\sigma_{\log T} 1.22$
“Störda zonen” - transmissivitet	$10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

1.3 Metod

Rapporten undersöker två olika deponeringsalternativ i 20 m blockskala. De två deponeringsalternativen är:

- I. Ett horisontellt tunnelsegment med två horisontella kapselhål (KBS3-H)
- II. Ett horisontellt tunnelsegment med ett vertikalt kapselhål (KBS3-V)

Undersökningarna utgörs av numerisk spricknätverkssimulering med *FracMan* för vidare analys med *PAWorks*, *MAFIC* och *RockBlok*, vilka alla är s.k. “in house” program utvecklade av Golder Associates, Inc. Mycket kortfattat kan programmens karaktäristika beskrivas som:

- *FracMan* är ett program för analys av sprickskärningar och generering av plana spricknätverk i 3-D. I *FracMan* kan man analysera t.ex. “trace maps”, dvs. kartor som visar hur en plan yta skär sprickor i rymden.
- *PAWorks* är ett program för flödesvägsanalys i spricknätverk genererade med *FracMan*. Med *PAWorks* kan man ta fram antalet flödesvägar mellan en eller flera källor och en eller flera sänkor. Med *PAWorks* kan man vidare beräkna flödesvägarnas effektiva hydrauliska egenskaper (jmf strömrörsbegreppet).
- *MAFIC* är ett program för analys av flöde och transport i spricknätverk genererade med *FracMan*. Med *MAFIC* kan man lösa strömnings- och transportproblem under stationära och transienta hydrauliska förhållanden.
- *RockBlok* är ett program för analys av blockutfall i hålrum som är inlagda i spricknätverk genererade med *FracMan*. Analysen bygger på samspelet mellan gravitation och friktion och tar inte hänsyn till rådande spänningsfält.

Tunnelsegmentets längd är i båda alternativen 20 m och löper mellan två motstående blocksidor. Tunnelsegmentens tvärsnitt är rektangulära. Bredden är större än höjden för alt. I

($b = 4$ m, $h = 3.6$ m) och tvärtom för alt. II. Kapselhålen är ca 8 m långa vardera och har cirkulära tvärsnitt ($\varnothing = 1.75$ m). Figur 1-1 visar perspektivbilder av de två alternativen.

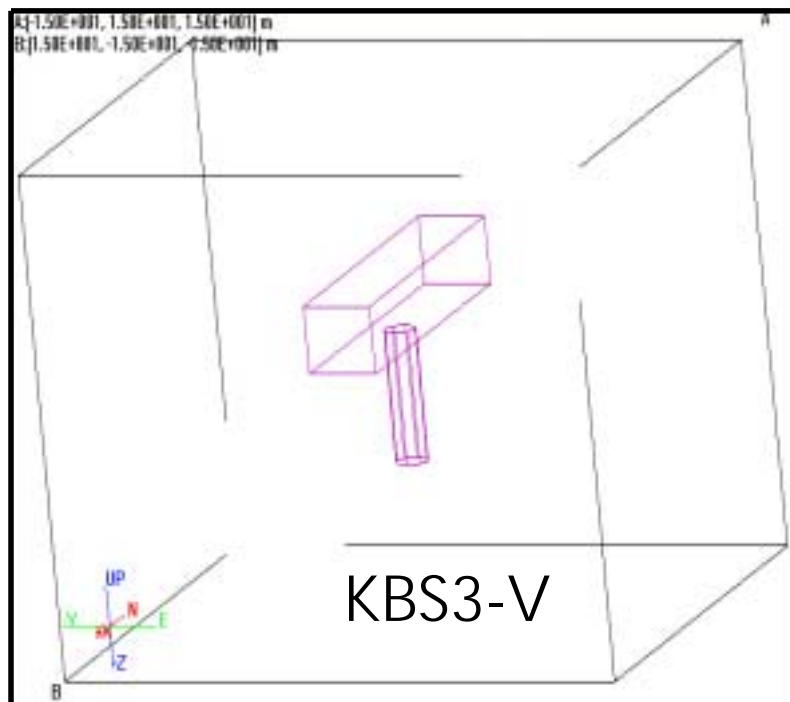
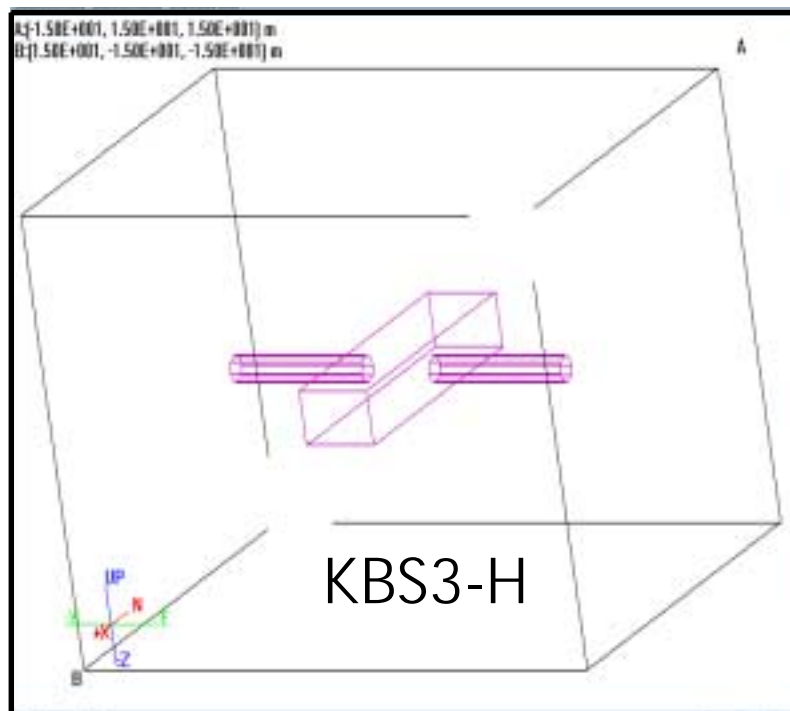
Simulering och analys med FracMan har utförts i 12 olika riktningar av de två alternativen, dvs. 12 tunnelorienteringar mellan $0-165^\circ$ har studerats i intervall om 15° . För övriga program har spricknätverk med två olika orienteringar på tunnelsegment och kapselhål har studerats för resp. deponeringsalternativ:

A. **KBS3-H:** *N-S tunnelsegment med två horisontella hål orienterade i E-W*

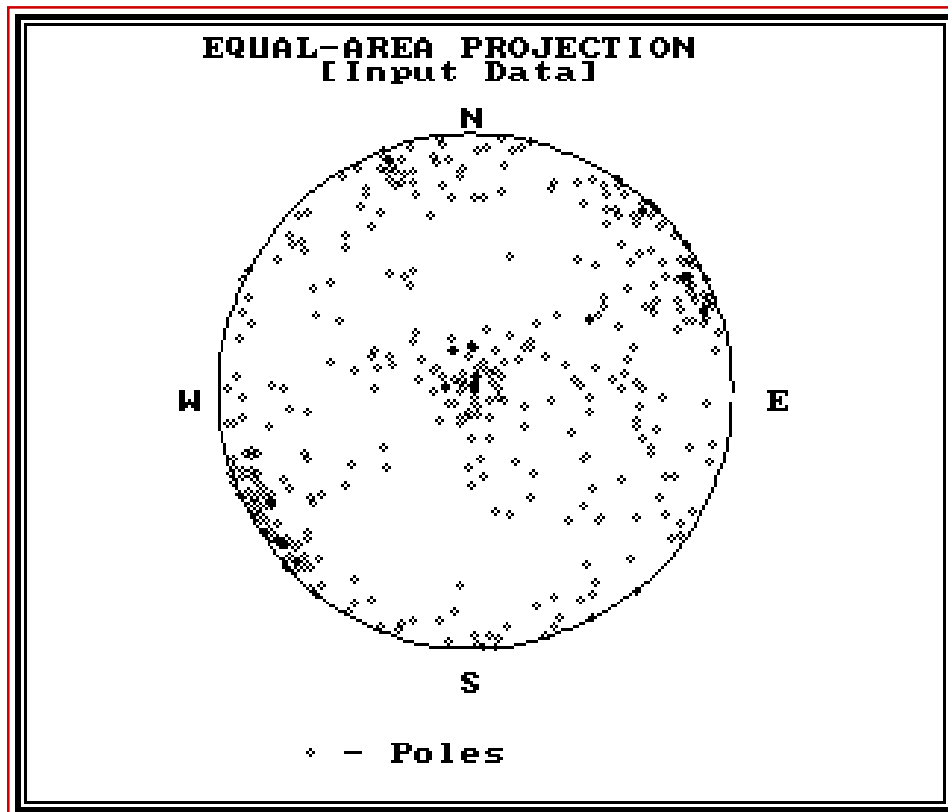
B. **KBS3-H:** *E-W tunnelsegment med två horisontella hål orienterade i N-S*

C. **KBS3-V:** *N-S tunnelsegment med ett vertikalt hål*

D. **KBS3-V:** *E-W tunnelsegment med ett vertikalt hål*



Figur 1-1 Perspektivbilder av KBS3-H och KBS3-V. Tunnelsegmenten är 20 m långa och kapselhålen ca 8 m.



Figur 1-2 Schmidnät för polpunkter till de 470 sprickskärningar som karterats i TBM-delen av Äspötunneln. Polpunkter i figurmitt representerar flacka sprickskärningar medan polpunkter nära periferin representerar branstående.

2 Uppskattning av sprickintensitet med *FracMan*

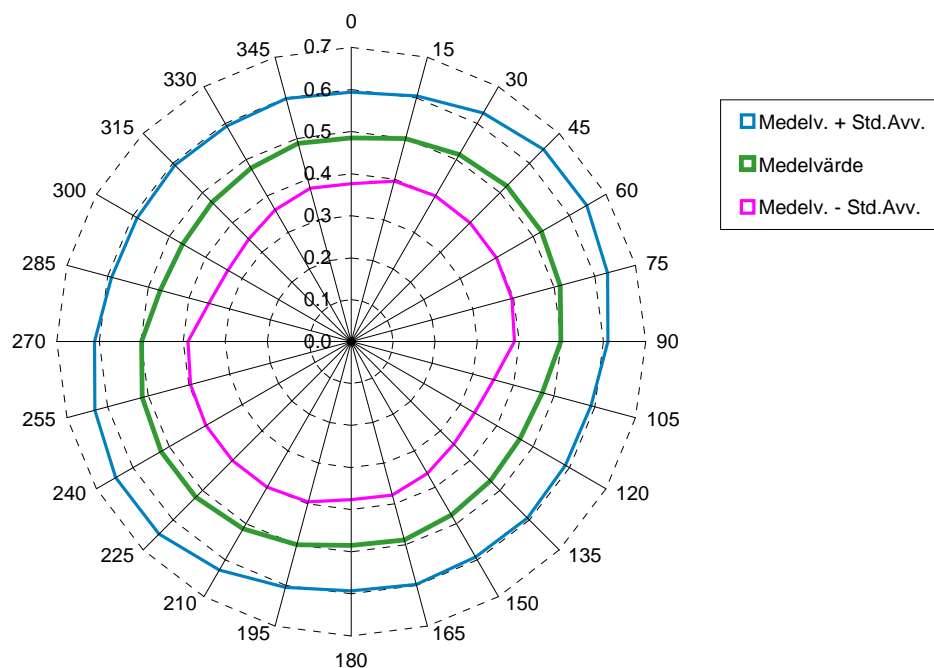
De två studerade deponeringsalternativen är:

- I. Ett horisontellt tunnelsegment med två horisontella kapselhål (KBS3-H)
- II. Ett horisontellt tunnelsegment med ett vertikalt kapselhål (KBS3-V)

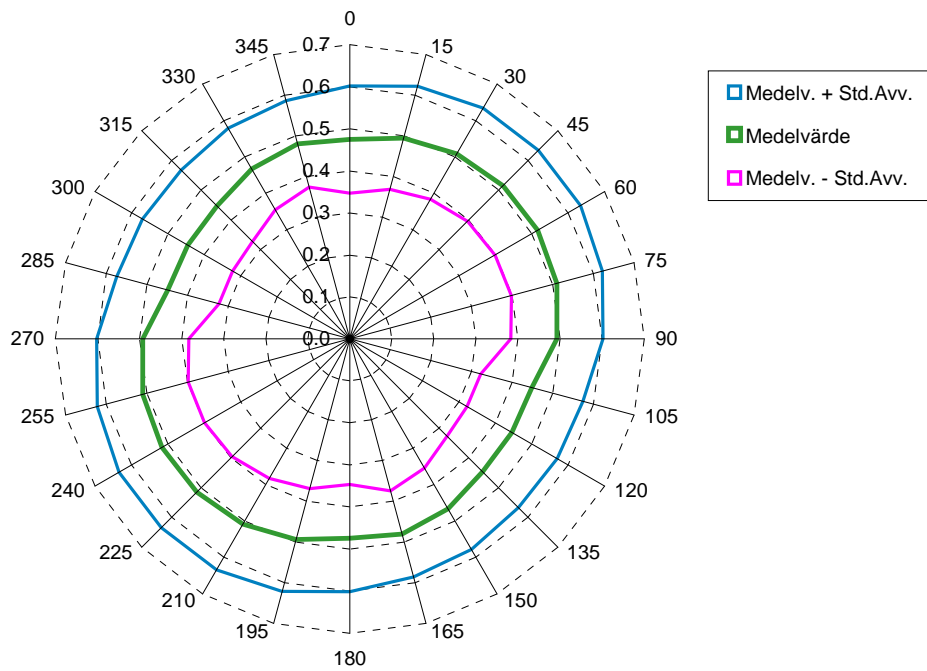
Simulering och analys av intensitetsmättet P_{21} (spricklängd/ytenhet) med *FracMan* har utförts för 12 olika riktningar för båda alternativen, dvs. 12 bäringar mellan 0-165° har studerats i intervall om 15°.

Högst värde på P_{21} erhålls för tunnelsegment/horisontella kapselhål med bäring 45-60° och lägst för tunnelsegment/horisontella kapselhål med bäring 105-135°. Skillnaden mellan en bred och låg tunnel (alt. I) resp. en smal och hög (alt. II) är marginell med ett något lägre P_{21} -värde för alt. II. Vidare erhålls ett något högre P_{21} -värde vid horisontell deponering än vid vertikal förutsatt att tunnelsegmentets bäring är 105-135°. Om däremot tunnelsegmentets bäring väljs till 45-60° erhålls ett något lägre P_{21} -värde vid horisontell deponering än vid vertikal. Sammantaget (tunnel + kapselhål) tar skillnaderna ut varandra eftersom tunnelsegment och kapselhål i resp. fall alltid är orienterade vinkelrätt mot varandra. M.a.o. verkar det inte föreligga några större skillnader mellan alt. I och alt. II m.a.p. intensitetsmättet P_{21} för olika orienteringar om man betraktar tunnelsegment och kapselhål som en helhet.

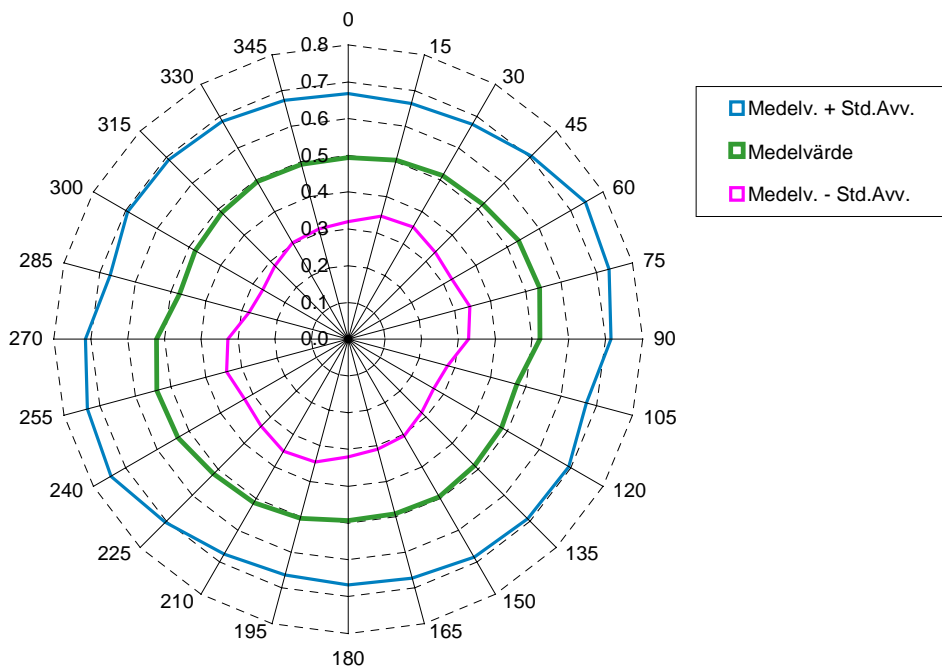
Resultatet av simuleringarna med *FracMan* visas i figurerna 2-1 t.o.m. 2-3. Som framgår är utfallsrummet (området mellan \pm en standardavvikelse) relativt stort, vilket innebär att det inte finns någon grund för att skilja de olika fallen åt statistiskt sett.



Figur 2-1 Rosdiagram för P_{21} . Figuren avser en 20 lång deponeringstunnel enligt KBS3-H.



Figur 2-2 Rosdiagram för P_{21} . Figuren avser en 20 lång deponeringstunnel enligt KBS3-V.



Figur 2-3 Rosdiagram för P_{21} . Figuren avser två st. ca 8 m långa kapselhål enligt KBS3-H. Som jämförelse kan nämnas att för ett vertikalt kapselhål enligt KBS3-V erhålls: $m = 0.51$, $m + sd = 0.78$ och $m - sd = 0.25$.

3 Uppskattning av antalet flödesvägar med *PAWorks*

Spricknätverk med två olika orienteringar på tunnelsegment och kapselhål har studerats för resp. deponeringsalternativ:

A. **KBS3-H**: N-S tunnelsegment med två horisontella hål orienterade i E-W

B. **KBS3-H**: E-W tunnelsegment med två horisontella hål orienterade i N-S

C. **KBS3-V**: N-S tunnelsegment med ett vertikalt hål

D. **KBS3-V**: E-W tunnelsegment med ett vertikalt hål

Spricknätverk utan tunnelsegment och kapselhål kallas i det följande för basfall. Analysen av antalet flödesvägar med *PAWorks* har utförts följande sätt:

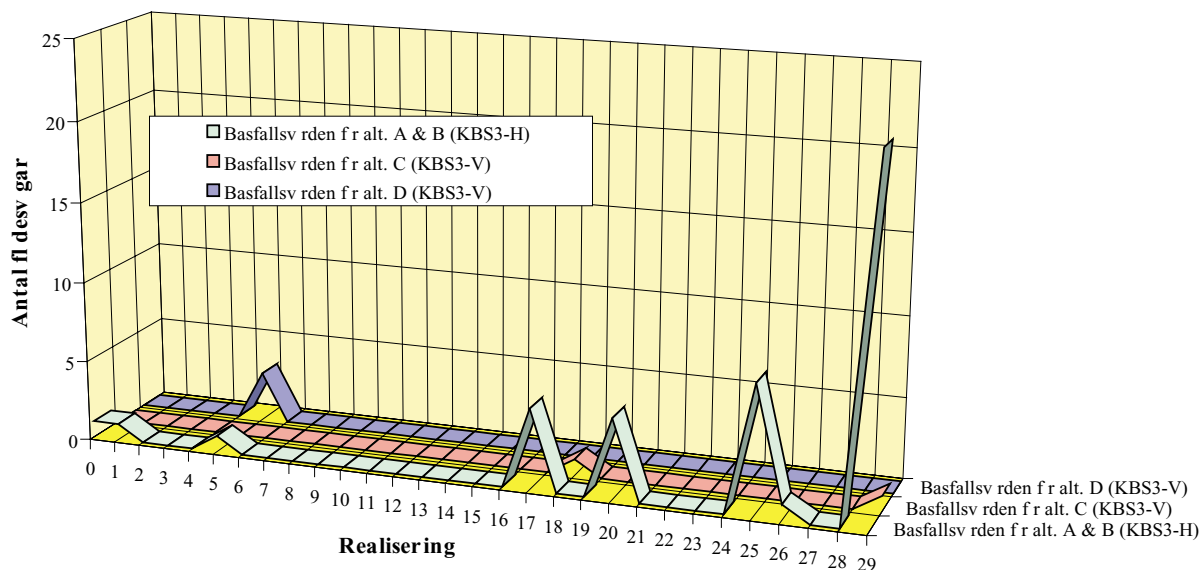
1. Generering av 30 spricknätverk med *FracMan*. Spricknätverken är alla olika men har samma statistiska egenskaper (se tabell 1). Spricknätverken innehåller inga tunnelsegment och kapselhål.
2. Analys av antalet flödesvägar med *PAWorks* i 3 ortogonala strömningsriktningar. Detta ger 90 basfallsvärden, dvs. 30 värden i varje strömningsriktning. De 3 strömningsriktningarna betecknas i figurerna med O->U (Ovansida till Undersida), Ö->V (Östsida till Västsida) och N->S (Nordsida till Sydsida).
3. Inläggning av resp. alt. A-D i var och en av de 30 realiseringarna. Detta ger sammanlagt 120 fall.
4. Analys av antalet flödesvägar med *PAWork* för var och en av de 120 fallen. För alt. A och B beräknas antalet flödesvägar för strömning i riktning O->U. För alt. C beräknas antalet flödesvägar för strömning i riktning Ö->V. För alt. D beräknas antalet flödesvägar för strömning i riktning N->S.
5. Jämförelse av antalet flödesvägar.

Analys av antalet flödesvägar med *PAWorks* i tre ortogonala riktningar för 30 stycken spricknätverk ger följande basfallsvärden: I 8 fall föreligger konnektivitet mellan blockens ovan-/undersidor, i 2 fall föreligger konnektivitet mellan blockens nord-/sydsidor och 1 fall föreligger konnektivitet mellan blockens öst-/och västsidor. Antalet flödesvägar i de fall som är konnekterade varierar mellan 1-20 med en median på 3.

Om man antar att mantelytorna hos tunnelsegment och kapselhål är permeabla (jmf begreppet störd zon) samtidigt som volymen innanför dessa är impermeabel, ger en förnyad analys med *PAWorks* följande resultat: För alt. A och B ökar antalet fall av konnektivitet mellan blockens ovan-/undersidor med 1, dvs. från 8 fall till 9. För alt. C ökar antalet fall av konnektivitet med 2, dvs. från 1 fall till 3 och för alt. D ökar antalet fall av konnektivitet med 4, dvs. från 2 fall till 6.

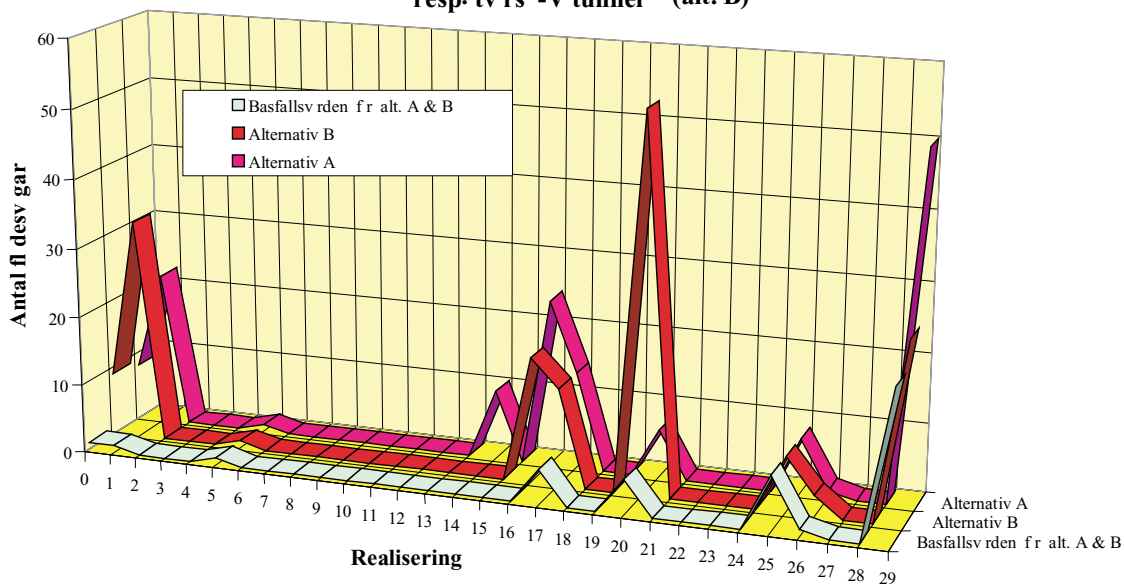
Resultatet av simuleringarna med *PAWorks* visas i figurerna 3-1 t.o.m. 3-3.

Basfallsv rden fr KBS3-H och KBS3-V



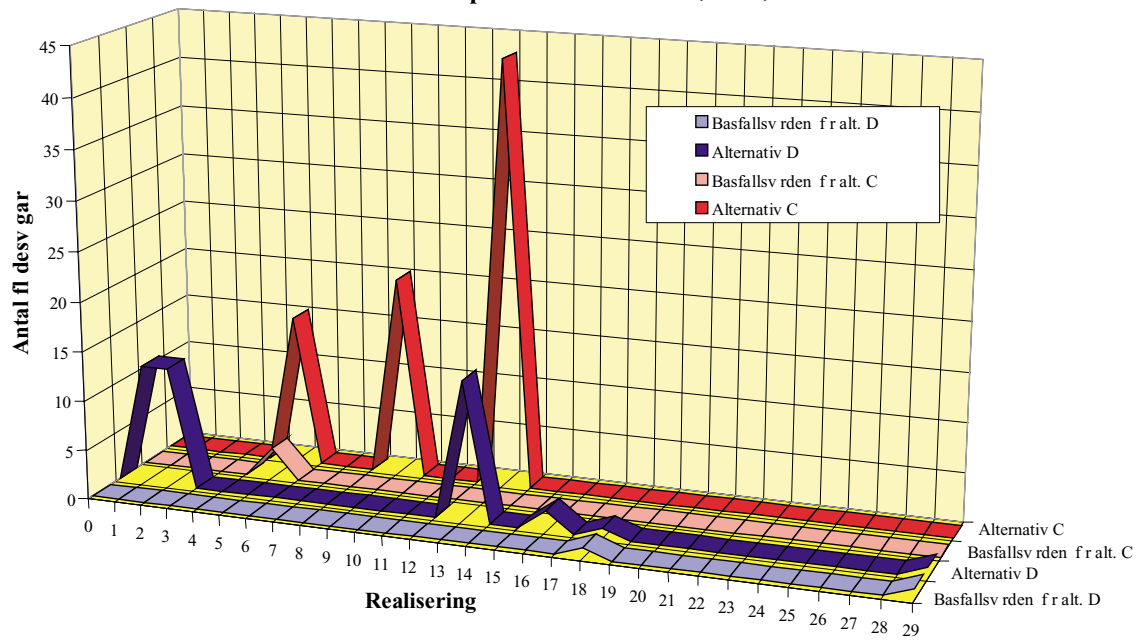
Figur 3-1 Antalet flödesvägar för strömning i riktning O->U (alt. A och B), N->S (alt. C) och Ö->V (alt. D).

KBS3-H: Strömning tvärs N-S tunnel (alt. A) resp. tvärs -V tunnel (alt. B)



Figur 3-2 Antalet flödesvägar för strömning tvärs en KBS3-H-tunnel i N-S (alt. A) resp. en KBS3-H-tunnel i Ö-V (alt. B).

**KBS3-V: Strömning tvärs N-S tunnel (alt. C)
resp. tvärs Ö-V tunnel (alt. D)**



Figur 3-3 Antalet flödesvägar för strömning tvärs en KBS3-V-tunnel i N-S (alt. C) resp. en KBS3-V-tunnel i Ö-V (alt. D).

4 Uppskattning av hydraulisk konduktivitet med *MAFIC*

Spricknätverk med två olika orienteringar på tunnelsegment och kapselhål har studerats för resp. deponeringsalternativ:

- A. **KBS3-H:** *N-S tunnelsegment med två horisontella hål orienterade i E-W*
- B. **KBS3-H:** *E-W tunnelsegment med två horisontella hål orienterade i N-S*
- C. **KBS3-V:** *N-S tunnelsegment med ett vertikalt hål*
- D. **KBS3-V:** *E-W tunnelsegment med ett vertikalt hål*

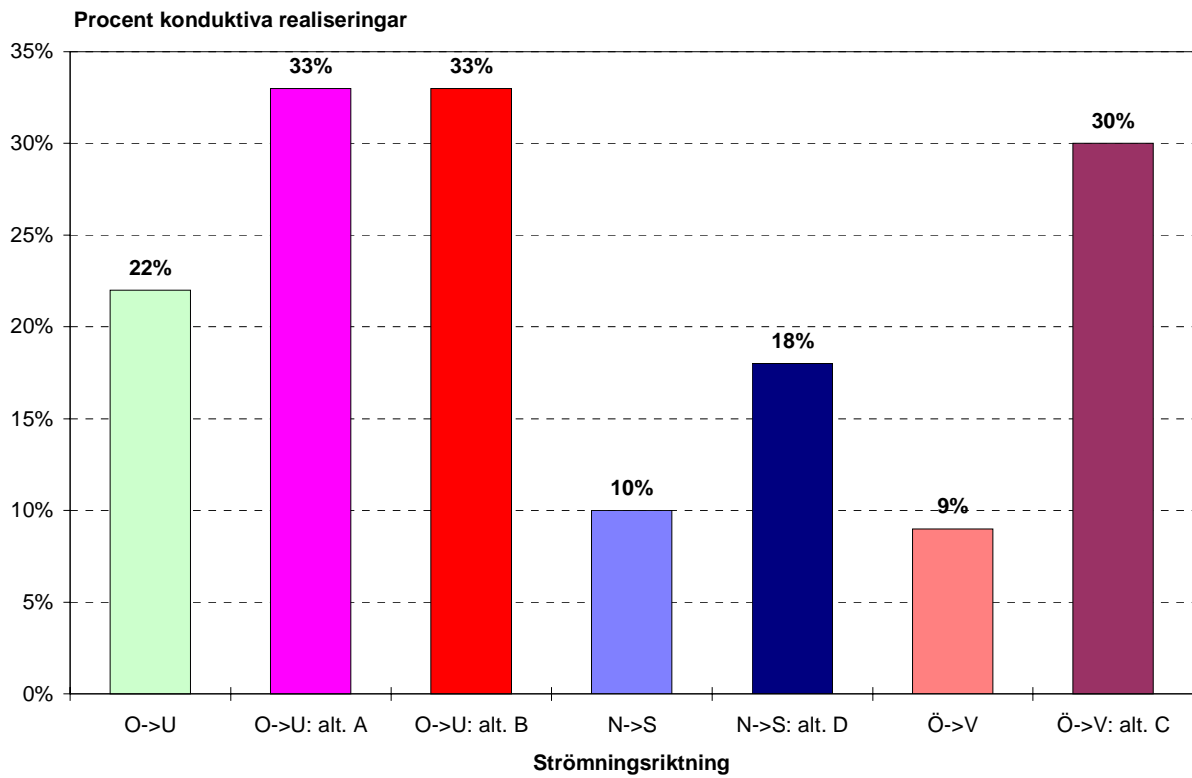
Spricknätverk utan tunnelsegment och kapselhål kallas i det följande för basfall. Analysen av antalet flödesvägar med *MAFIC* har utförts följande sätt:

1. Generering av 100 spricknätverk med *FracMan*. Spricknätverken är alla olika men har samma statistiska egenskaper (se tabell 1). Spricknätverken innehåller inga tunnelsegment och kapselhål.
2. Flödesanalys med *MAFIC* i 3 ortogonala strömningsriktningar. Detta ger 300 basfallsvärden, dvs. 100 värden i varje strömningsriktning. De 3 strömningsriktningarna betecknas i figurerna med O->U (Ovansida till Undersida), Ö->V (Östsida till Västsida) och N->S (Nordsida till Sydsida).
3. Inläggning av resp. alt. A-D i var och en av de 100 realiseringarna. Detta ger sammanlagt 400 fall.
4. Flödesanalys med *MAFIC* för de 400 fallen. För alt. A och B beräknas flödet för strömning i riktning O->U. För alt. C beräknas flödet för strömning i riktning Ö->V. För alt. D beräknas flödet för strömning i riktning N->S.
5. Jämförelse av flöden.

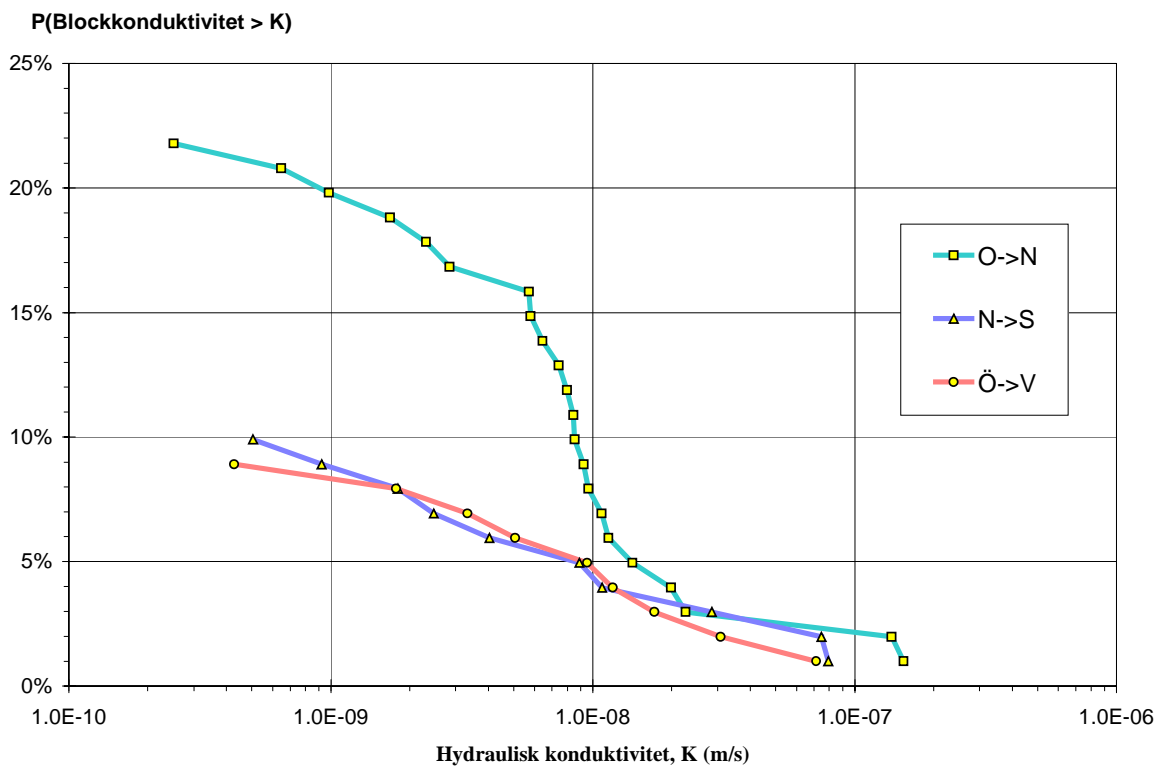
En analys av flödet i tre ortogonala riktningar för 100 stycken spricknätverk ger följande basfallsvärden: 22 fall med flöde mellan blockens ovan-/undersidor, 10 fall med flöde mellan blockens nord-/sydsidor och 9 fall med flöde mellan blockens öst-/och västsidor. (För en gradientriktning som är subparallell med största huvudspänningsriktningen (312°) resp. med minsta huvudspänningsriktningen (42°) erhålls 20 resp. 15 fall med flöden.) En jämförelse av de konduktiva spricknätverkens hydrauliska konduktivitet ger tämligen likartade kumulativa fördelningar för strömning Ö->V och N->S. För strömning O->U erhålls en brantare kumulativ fördelning, vilket kan tolkas som en lägre heterogenitet i denna strömningsriktning än för strömning i horisontalplanet.

En motsvarande flödesanalys av de fyra alternativen A-D ger följande resultat: För alt. A och B ökar antalet fall med flöde mellan blockens ovan-/undersidor med 11, dvs. från 22 till 33. För alt. C ökar antalet fall med flöde med 20, dvs. från 9 fall till 29 och för alt. D ökar antalet fall med flöde med 8, dvs. från 10 fall till 18. En analys av den hydrauliska konduktiviteten i 20 m blockskala för alt. A och B ger ingen signifikant skillnad mellan dessa två riktningar.

Resultatet av simuleringarna med *MAFIC* visas i figurerna 4-1 t.o.m. 4-7.

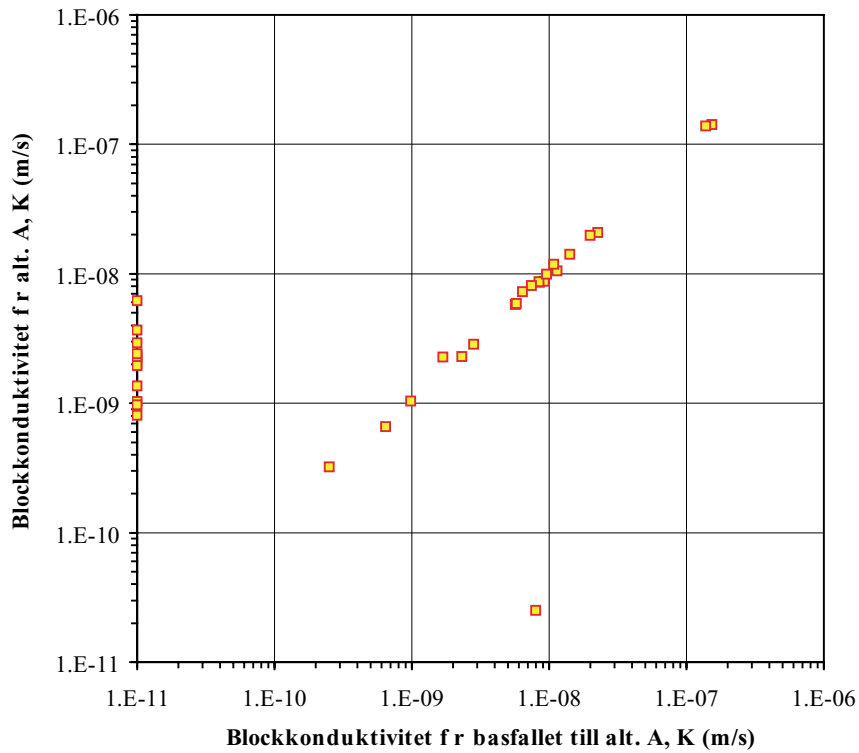


Figur 4-1 Jämförelse av antalet konduktiva realiseringar för strömning i riktning O->U, N->S och Ö->V.



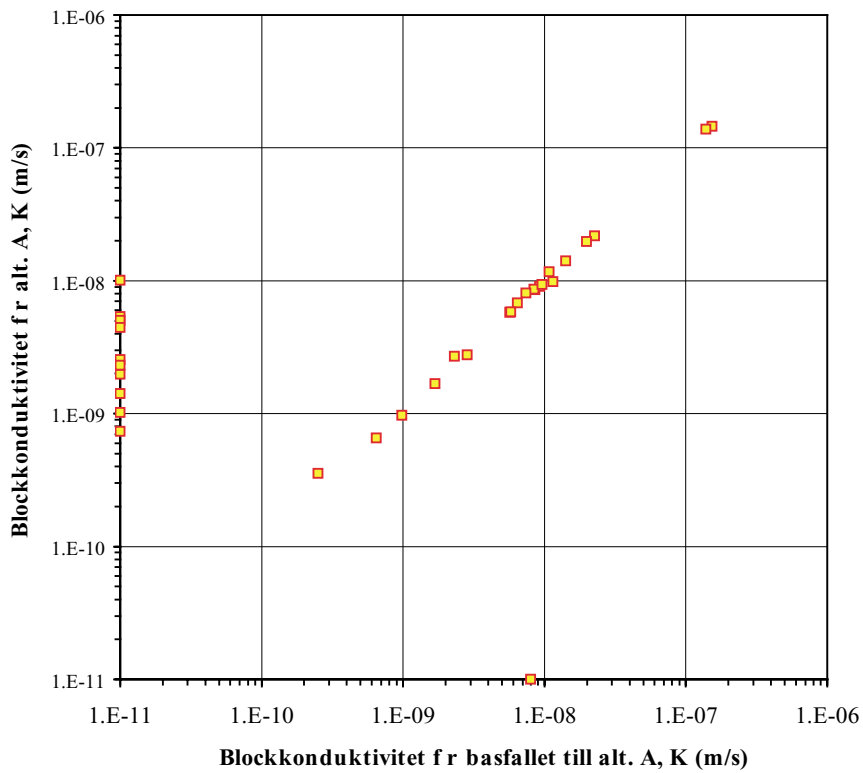
Figur 4-2 Komplementära fördelningskurvor för basfallens konduktiviteter.

KBS3-H: Blockkonduktivitet f r str mning O->U, alt. A



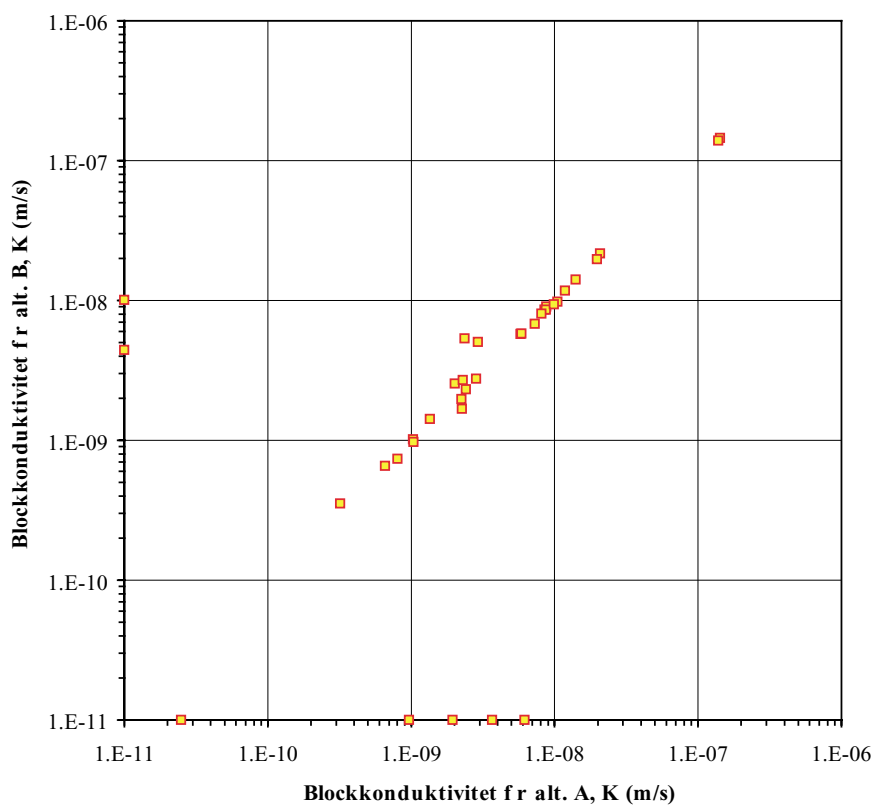
Figur 4-3 XY-plot för blockkonduktivitet, KBS3-H: alt. A.

KBS3-H: Blockkonduktivitet f r str mning O->U, alt. B



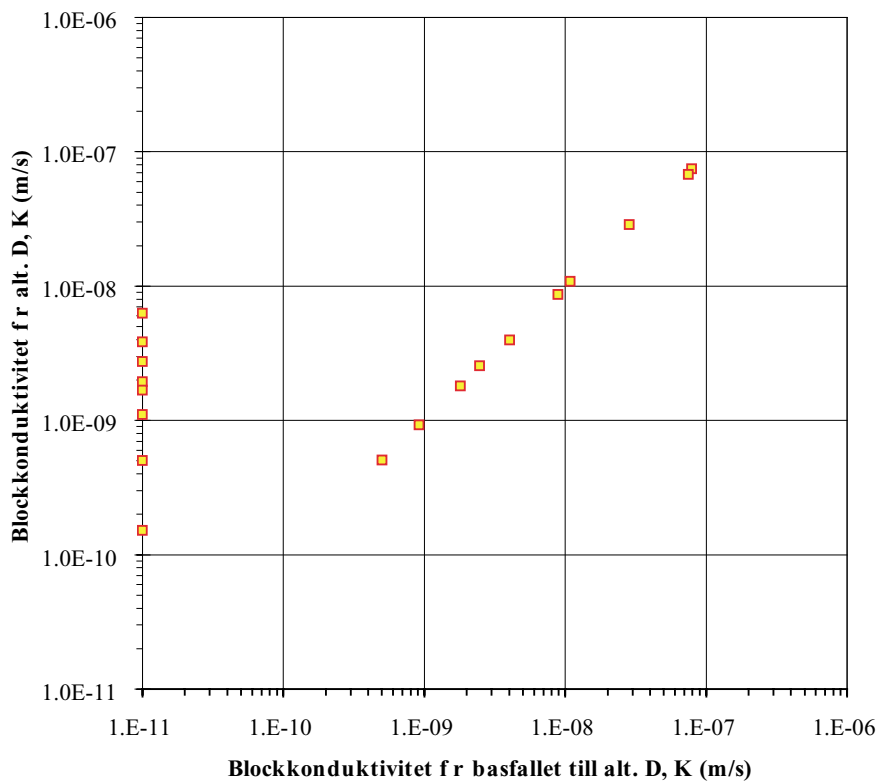
Figur 4-4 XY-plot för blockkonduktivitet, KBS3-H: alt. B.

KBS3-H: Blockkonduktivitet f r str mning O->U, alt. A och B



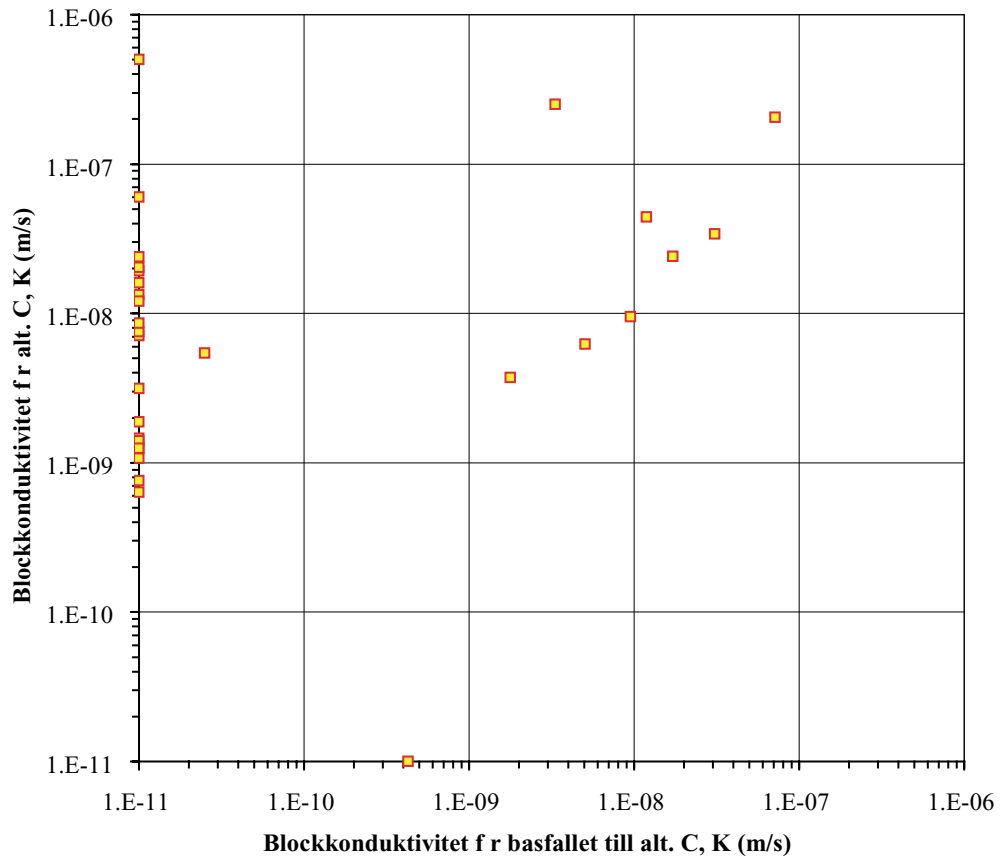
Figur 4-5 XY-plot för blockkonduktivitet, KBS3-H: alt. A och B.

KBS3-V: Blockkonduktivitet f r str mning N->S, alt. D



Figur 4-6 XY-plot för blockkonduktivitet, KBS3-V: alt. D.

KBS3-V: Blockkonduktivitet för strömning ->V, alt. C



Figur 4-7 XY-plot för blockkonduktivitet, KBS3-V: alt. C.

5 Uppskattning av blockutfall med *RockBlok*

Spricknätverk med två olika orienteringar på tunnelsegment (rektangulärt) och kapselhål (cirkulärt) har studerats för resp. deponeringsalternativ:

A. **KBS3-H**: N-S tunnelsegment med två horisontella hål orienterade i E-W

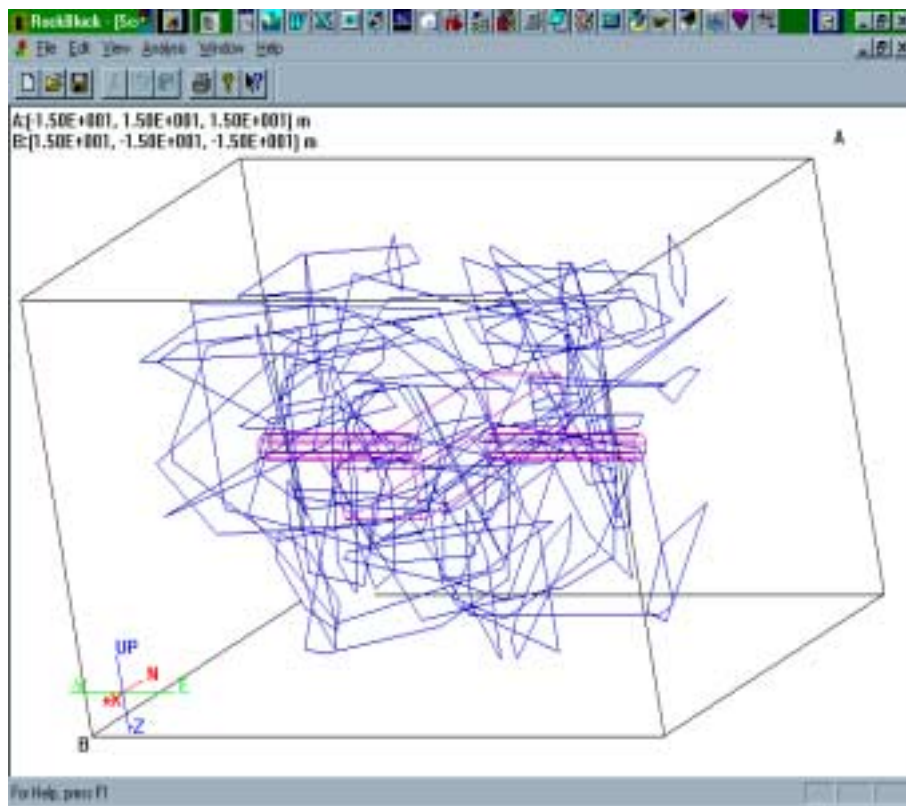
B. **KBS3-H**: E-W tunnelsegment med två horisontella hål orienterade i N-S

C. **KBS3-V**: N-S tunnelsegment med ett vertikalt hål

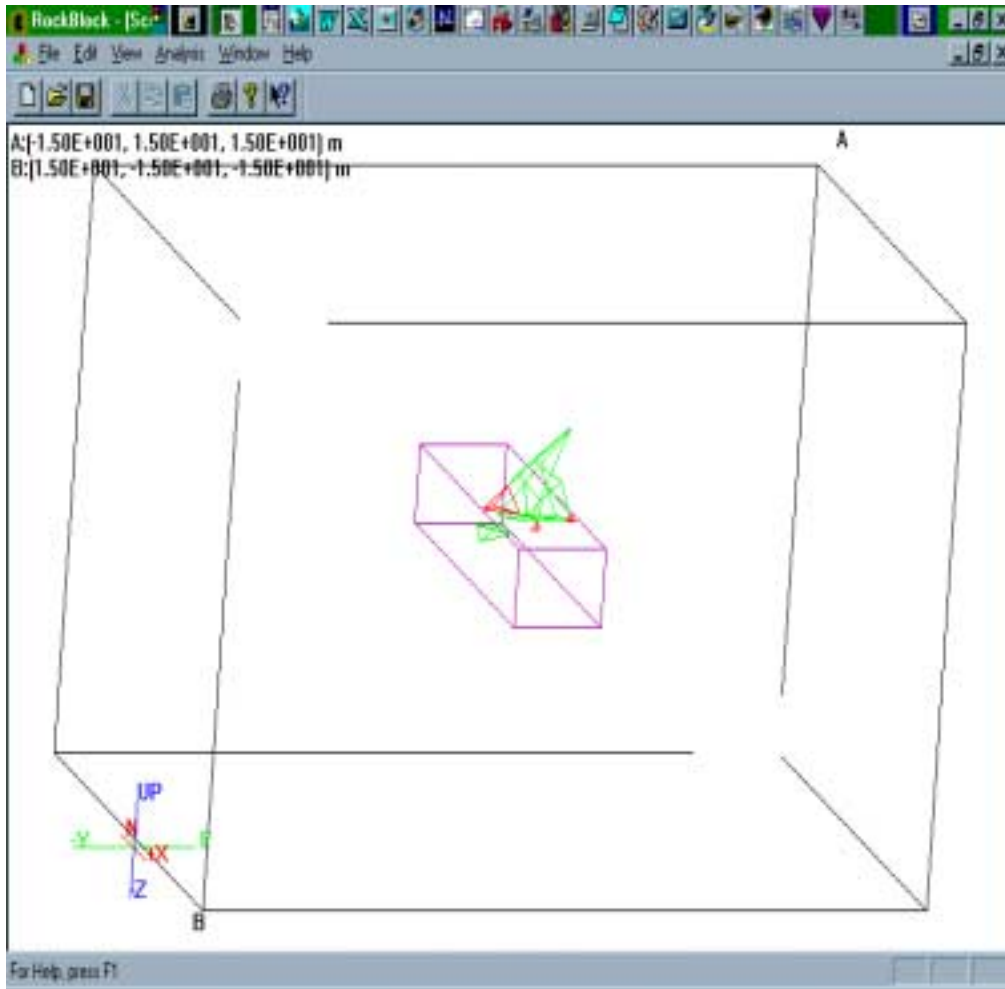
D. **KBS3-V**: E-W tunnelsegment med ett vertikalt hål

Analys av 30 stycken spricknätverk med *RockBlok* ger för alt. A, 2 fall där skärningen mellan tunnelsegment och spricknätverk skapar block som faller fritt från tunnelsegmentets tak/väggar. Skärningen mellan de två kapselhålen i alt. A och genererade spricknätverk skapar inte i något fall block som faller fritt. Motsvarande siffror för alt. B är 1 fall med blockutfall i tunnelsegmentet och 1 fall med blockutfall i de två kapselhålen. För alt. C och D erhålls vardera 1 fall med blockutfall i resp. tunnelsegment och inga fall med blockutfall i det vertikala kapselhålet. Sammanfattningsvis påvisar analysen inte några signifikanta skillnader i resultat för de fyra alternativen.

Figur 5-1 och 5-2 visar perspektivbilder av hur analysen med *RockBlok* går till.



Figur 5-1 Perspektivbild av tunnelsegment med kapselhål (KBS3-H) omgivet av sprickplan.



Figur 5-2 Perspektivbild av ett tunnelsegment med bergblock som är stabila (grönt) och bergblock som faller ut (rött).

6 Slutsatser

Denna rapport visar på möjligheterna att med spricknätverksmodeller simulera och undersöka olika deponeringsalternativ med hänsyn till bergstrukturernas geometriska och hydrauliska egenskaper. Den använda spricknätverksmodellen bygger på statistik från sammanlagt 470 karterade sprickskärningar i TBM-delen av Äspötunneln. Enligt den kartering varifrån data till denna rapport är härrör är ingen av dessa sprickskärningar klassad som tillhörande en deformationszon. Rapporten undersöker två olika deponeringsalternativ i 20 m blockskala:

I. Ett horisontellt tunnelsegment med två horisontella kapselhål (KBS3-H)

II. Ett horisontellt tunnelsegment med ett vertikalt kapselhål (KBS3-V)

Simulering av de två alternativen med spricknätverksgeneratoren *FracMan* ger högst värde på P_{21} erhålls för tunnelsegment/horisontella kapselhål med bäring 45-60° och lägst för tunnelsegment/horisontella kapselhål med bäring 105-135°. Skillnaden mellan en bred och låg tunnel (alt. I) resp. en smal och hög (alt. II) är marginell med ett något lägre P_{21} -värde för alt. II. Vidare erhålls ett något högre P_{21} -värde vid horisontell deponering än vid vertikal förutsatt att tunnelsegmentets bäring är 105-135°. Om däremot tunnelsegmentets bäring väljs till 45-60° erhålls ett något lägre P_{21} -värde vid horisontell deponering än vid vertikal. Sammantaget (tunnel + kapselhål) tar skillnaderna ut varandra eftersom tunnelsegment och kapselhål i resp. fall alltid är orienterade vinkelrätt mot varandra.

M.a.o. verkar det inte föreligga några större skillnader mellan alt. I och alt. II m.a.p. intensitetsmättet P_{21} för olika orienteringar om man betraktar tunnelsegment och kapselhål som en helhet.

I rapporten undersöks vidare fyra alternativ i 20 m blockskala med blockutfallsprogrammet *RockBlok*, flödesvägsprogrammet *PAWorks* och flödeslösaren *MAFIC*. De fyra alternativen som studerats är:

A. KBS3-H: N-S tunnelsegment med två horisontella hål orienterade i E-W

B. KBS3-H: E-W tunnelsegment med två horisontella hål orienterade i N-S

C. KBS3-V: N-S tunnelsegment med ett vertikalt hål

D. KBS3-V: E-W tunnelsegment med ett vertikalt hål

Analys av 30 stycken spricknätverk med *RockBlok* ger för alt. A, 2 fall där skärningen mellan tunnelsegment och spricknätverk skapar block som faller fritt från tunnel-segmentets tak/väggar. Skärningen mellan de två kapselhålen i alt. A och genererade spricknätverk skapar inte i något fall block som faller fritt. Motsvarande siffror för alt. B är 1 fall med blockutfall i tunnelsegmentet och 1 fall med blockutfall i de två kapselhålen. För alt. C och D erhålls vardera 1 fall med blockutfall i resp. tunnelsegment och inga fall med blockutfall i det vertikala kapselhålet.

Sammanfattningsvis påvisar analysen inte några signifikanta skillnader i blockutfall för de fyra studerade alternativen.

Analys av antalet flödesvägar med *PAWorks* i tre ortogonala riktningar för 30 stycken spricknätverk utan tunnelsegment och kapselhål, ger följande resultat: I 8 fall föreligger konnektivitet mellan blockens ovan-/undersidor, i 2 fall föreligger konnektivitet mellan blockens nord-/sydsidor och 1 fall föreligger konnektivitet mellan blockens öst-/och västsidor. Antalet flödesvägar i de fall som är konnekterade varierar mellan 1-20 med en median på 3.

En motsvarande analys med *MAFIC* av flödet genom 100 stycken spricknätverk utan tunnelsegment och kapselhål, ger 22 fall med flöde mellan blockens ovan-/undersidor, 10 fall med flöde mellan blockens nord-/sydsidor och 9 fall med flöde mellan blockens öst-/och västsidor. En jämförelse av de konduktiva spricknätverkens hydrauliska konduktivitet K ger tämligen likartade kumulativa fördelningar för strömning i Ö->V riktning och i N->S riktning. För strömning i O->U riktning erhålls en brantare kumulativ fördelning, vilket kan tolkas som en lägre heterogenitet i denna strömningsriktning än för strömning i horisontalplanet.

Om man antar att mantelytorna hos tunnelsegment och kapselhål är permeabla (jmf störd zon) samtidigt som volymen innanför dessa är impermeabel, ger en förnyad analys med *PAWorks* följande resultat: För alt. A och B ökar antalet fall av konnektivitet mellan blockens ovan-/undersidor med 1, dvs. från 8 fall till 9. För alt. C ökar antalet fall av konnektivitet med 2, dvs. från 1 fall till 3 och för alt. D ökar antalet fall av konnektivitet med 4, dvs. från 2 fall till 6.

En motsvarande analys med *MAFIC* av flödet genom 100 stycken spricknätverk, med tunnelsegment och kapselhål, ger följande resultat: För alt. A och B ökar antalet fall med flöde mellan blockens ovan-/undersidor med 11, dvs. från 22 till 33. För alt. C ökar antalet fall med flöde med 20, dvs. från 9 fall till 29 och för alt. D ökar antalet fall med flöde med 8, dvs. från 10 fall till 18. En analys av den hydrauliska konduktiviteten i 20 m blockskala för alt. A och B ger ingen signifikant skillnad mellan dessa två alternativ.

Sammanfattningsvis leder analyserna med *PAWorks* och *MAFIC* till följande tolkning:

- För de valda flödesriktningarna är de studerade spricknätverken mest konnekterade i vertikal led och minst i horisontell.
- Om man antar att mantelytorna hos tunnelsegment och kapselhål är permeabla samtidigt som volymen innanför dessa är impermeabel pekar denna studie på att tunnlar och kapselhål ger en viss ökning av blockkonduktiviteten för samtliga alternativ.

7 Referenser

Follin, S. and Hermanson J., (1996). A discrete fracture network model for the Äspö TBM tunnel rock mass. SKB AR D-97-001, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

La Pointe, P., Wallmann P. and Follin, S., (1995). Estimation of effective block conductivities based on discrete network analyses using data from the Äspö site, SKB TR 95-15, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm

Pusch R (1996), Personlig kommunikation 12 september, 1996, Clay Technology, Lund.

BILAGA 2

Projekt JADE Geovetenskapliga studier

Hydrogeologiska analyser - statistisk analys av hydrauliska testdata från Äspölaboratoriet

*Ingvar Rhén
Torbjörn Forsmark*

VBB VIAK AB

November 1996

13080086

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas egna och behöver nödvändigtvis inte sammanfalla med SKB:s.

Nyckelord: Djupförvar, deponeringsmetoder, transmissivitet, anisotropi.

Sammanfattning

Syftet med den hydrogeologiska analysen är att ge underlag för en relativ bedömning av lämpligheten av de tre deponeringsalternativen

- KBS-3 V, Vertikal deponering
- KBS-3 H, Horisontell deponering
- MLH, Medel Långa Hål

En utgångspunkt för studien har varit att data från Äspölaboratoriet skall ligga till grund för arbetet. Följande data har nyttjats:

- Subhorisontella sondhål för tunnelsektion 1400 - 3600 m.
- Data från injektionstester, med 3 meters manschettintervall för djupintervallet 200-500 m under havsytan, i de subvertikala kärnborrhålen KAS02 samt KAS05-08. Data är således hämtade söder om Äspö skjuvzon (EW-1).

Data har analyserats med avseende på variationen i transmissivitet för olika borrhålsriktningar. Eftersom testerna utförts i olika testskalor och dessutom att testlängderna inte motsvarar de längder som är aktuella för de tre deponeringsalternativen har transmissiviteterna skalats utifrån de empiriska relationer som erhållits från data framtagna under förundersökning och konstruktion av Äspölaboratoriet.

Transmissivitet

Beräkningarna visar att transmissiviteten (T) varierar i olika riktningar. Om sprickor är approximativt till storlek och riktning likformigt fördelade i rymden är det störst sannolikhet att sprickor vinkelrätt ett borrhål verkligen skär borrhålet. Med detta synsätt antas att transmissiviteterna för kärnborrhålen i huvudsak representeras av subhorisontella vattenförande sprickor och transmissiviteterna för sondhålen i huvudsak representeras av subvertikala vattenförande sprickor. Analysen giltighet begränsas emellertid inte av detta därför att de utvärderade statistiska egenskaperna primärt gäller borrhålsriktning och kan nyttjas för kvalitativa analyser som avser skillnader i hydrauliska egenskaper mellan borrhål med subvertikal riktning i jämförelse mot subhorisontella borrhål eller för tester av numeriska modeller, t ex DFN (Discrete Fracture Network) modeller.

Sondhål

Sondhålen är mer eller mindre horisontella och riktningen som anges nedan för T är den riktningen i horisontalplanet för ett plan vinkelrätt mot borrhålet (eller mer korrekt borrhålets projektion på horisontalplanet). Används det aritmetiska medelvärdet av $\text{Log}_{10}(T) (= A)$ som ett karakteristiskt värde för borrhål inom ett visst riktningintervall erhålls följande resultat av max och min värden transmissiviteten ($T_g=10^A$) baserat på sondhålen i spiraldelen av Äspölaboratoriets tunnel :

Horisontell riktning för plan vinkelrätt borrhål (°, Äspö koordinatsystem)	Längdskala för (m)	T_g (m^2/s)
120-140	9	$3 \cdot 10^{-7}$
20-80	9	$1 \cdot 10^{-9}$

Ökas längdskalan för T_g från 3 m till 30 m ökar T_g ca 2.5 gånger och standard avvikelsen $\log_{10}T$ minskar till ca 0,8 av 3 m värdet. Som framgår av tabellen ovan erhålls högst transmissivitet i riktning 120-140° i Äspö's koordinatsystem. Av *Figur 4-1* till *4-4* framgår emellertid att en förhöjd transmissivitet också erhålls i riktning 0-20°.

Kärnborrhål

Motsvarande resultat för kärnborrhålen, där dessa antas kunna approximeras med vertikala borrhål, gav följande resultat:

Riktning för plan vinkelrätt borrhål (°, Äspö koordinatsystem)	Längdskala för (m)	T_g (m^2/s)
Horisontell	9	$2 \cdot 10^{-8}$

Tunneldokumentation

Till viss del styrks bilden ovan av de injekteringar som gjorts i Äspö tunneln. Det förefaller som om tunnel ben i riktningen VNV till NV är mindre injekterade jämfört med andra tunnelben. Injekterade sprickor domineras också av subvertikala sprickor i riktningen VNV till NV /*Hermansson, 1995*/. Interferenstester indikerar att det finns ett antal konduktiva strukturer, kallade NNW strukturer, som skär tunnel spiralen i ca N35°V/ *Rhén et al, in prep*/. Dessa tolkas vara spricksvärmar som sammansätts av N_S strukturer och VNV till NV strukturer och som bildar konduktiva stråk i ca N35°V.

Avstånd mellan strukturer

Aritmetiskt medelavstånd (D_a) mellan hydrauliska strukturer med en transmissivitet (T) större än ett givet värde på transmissiviteten (T_j) beräknades både för sondhålen och kärnborrhålen. Förutsättningarna skiljer sig något åt. Analysen av sondhålsdata baseras på inflöden till sondhålet under borring som dokumenterades till position och kvantitet. Inflödesmängd användes för att fördela utvärderat T för hela borrhålet på inflödena till borrhålet. Inflödes positionerna projicerades sedan på centrumlinjen för tunneln. För kärnborrhålen nyttjades T för varje 3 m sektion.

Sondhål, T_j (m^2/s)	Aritmetiskt medelvstånd (D_a) (m)
$T > 10^{-5}$	70
$T > 10^{-7}$	35
($T > 10^{-9}$)	20)

Kärnborrhål, T_j (m^2/s)	Aritmetiskt medelvstånd (D_a) (m)
$T > 10^{-5}$	45
$T > 10^{-7}$	14
$T > 10^{-9}$	8

Sannolikt är avstånden baserat på sondhålsdata överskattade för åtminstone $T_j < 10^{-8} m^2/s$ på grund av metodiken att uppskatta inflödenas antal, position och kvantitet. Mindre inflöden kan ej urskiljas om man tidigare påträffat större inflöden.

Avstånden mellan hydrauliska strukturer med $T > T_j$ är lognormal fördelad. Detta innebär att det finns områden där avstånden tenderar att vara mindre eller mycket mindre än det aritmetiska medelvärdet för ett visst T_j , strukturerna har "klumpat ihop sig". Utanför dessa områden är då givetvis medelvstånden större än det aritmetiska medelvärdet.

Generella slutsatser

Bara sett ur deponeringshålsperspektiv borde dessa läggas horisontell i WNW-NW riktning om inflödet skall minimeras till hålet. Storleken på de skalade transmissiviteterna får betraktas som osäker men bedöms inte påverka slutsatsen att de hydrauliska egenskaperna varierar relativt mycket i olika riktningar.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
1 Bakgrund	9
2 Omfattning	11
3 Analys av data	13
3.1 Data från subhorisontella sondhål.....	13
3.1.1 Skalning av testdata.....	13
3.1.2 Statistisk bearbetning av skalad testdatamängd.....	13
3.1.3 Avstånd mellan vattenförande strukturer.....	16
3.2 Data från subvertikala kärnborrhål.....	16
3.2.1 Skalning av testdata.....	17
3.2.2 Statistik på skalad testdatamängd.....	18
3.2.3 Avstånd mellan vattenförande strukturer.....	18
4 Resultat	19
4.1 Subhorisontella sondhål, transmissivitet.....	19
4.2 Subhorisontella sondhål, avstånd mellan strukturer.....	28
4.3 Subvertikala borrhål, transmissivitet.....	34
4.4 Subvertikala borrhål, avstånd mellan strukturer.....	36
5 Slutsatser	39
5.1 Transmissivitet.....	39
5.2 Avstånd mellan strukturer.....	40
5.3 Generella slutsatser.....	42
Referenser	43

1 Bakgrund

Program Jämförelser av Deponerings metoder har som främsta mål att:

- Sammanfatta nuvarande kunskapsnivå för olika deponerings alternativ,
- jämföra dessa deponerings metoder,
- utgöra underlag för att upprätta en Layout E av ett eventuellt ytterligare alternativ,
- utgöra underlag för en eventuell fullskalig demonstration av deponering samt
- att identifiera kunskapsluckor.

Programmet omfattar tre delar: Uppdatering MLH (Medel Långa Hål), Geovetenskapliga studier och Maskinutveckling. De Geovetenskapliga studierna är in sin tur uppdelade på Bergmekanik, Strukturgeologi samt Hydrogeologi. Syftet med den hydrogeologiska analysen är att ge underlag för en relativ bedömning av lämpligheten av de tre deponeringsalternativen:

- KBS-3 V, Vertikal deponering
- KBS-3 H, Horisontell deponering
- MLH, Medel Långa Hål

Ursprungs- och referensalternativ är KBS-3 V, som tidigare utförligt analyserats men ej med hänsyn till kapslarnas riktning. En utgångspunkt för studien har varit att data från Äspölaboratoriet skall ligga till grund för arbetet. De hydrogeologiska analyserna delas in i fyra delar:

- Statistisk analys av hydrauliska testdata från Äspölaboratoriet
- Simulering av inläckage till deponeringshål
- Analys av tillgänglighet för deponeringsområden
- Samlad utvärdering av de hydrogeologiska analyserna.

Denna rapport omfattar den statistiska analysen av hydrauliska testdata från Äspölaboratoriet. Syftet är att undersöka om de hydrauliska egenskaperna är anisotropa eller kan betraktas som isotropa.

2 Omfattning

Data har analyserats med avseende på sannolik transmissivitet i horisontella sondhål med olika riktningar och i vertikala eller subvertikala kärnborrhål.

Följande data har nyttjats:

- Sondhålsdata för tunnelsektion 1400 - 3600 m.
- Data från injektionstester, med 3 meters manschettintervall för djupintervallet 200-500 m under havsytan, i kärnborrhålen KAS02 samt KAS05-08. Data är således hämtade söder om Äspö skjuvzon (EW-1).

3 Analys av data

3.1 Data från subhorisontella sondhål

Vid byggnationen av Äspölaboratoriet utfördes kontinuerligt tryckuppbyggnadstester i 20 m långa sondhål. Syftet var att karakterisera såväl eventuella sprickzoner som bergmassan mellan zonerna. Borrhålen borrades med anslagningspunkt ca 4 m bakom stoff riktade i horisontal led ca 20° från tunnelns centrumlinje och i vertikal led ungefär parallellt med tunnelns centrumlinje, det vill säga ca 15° från horisontal planet. Manschett placerades ca 5 m in i borrhålet. De hydrauliska testerna utfördes på så sätt framför tunnelstuffen, dvs i relativt ostört berg. Det är data från dessa tester som nyttjas i den vidare analysen, för tunnelsträckningen 1400-3600 meter. Flödesperioden var ca 30 minuter och tryckuppbyggnaden ca 30 minuter. Testerna utvärderades med transienta utvärderingsmetoder med antagande om radiellt flöde /Cooper and Jacob, 1946/. *Figur 3-1* visar hur sondhålen fördelar sig längs tunneln.

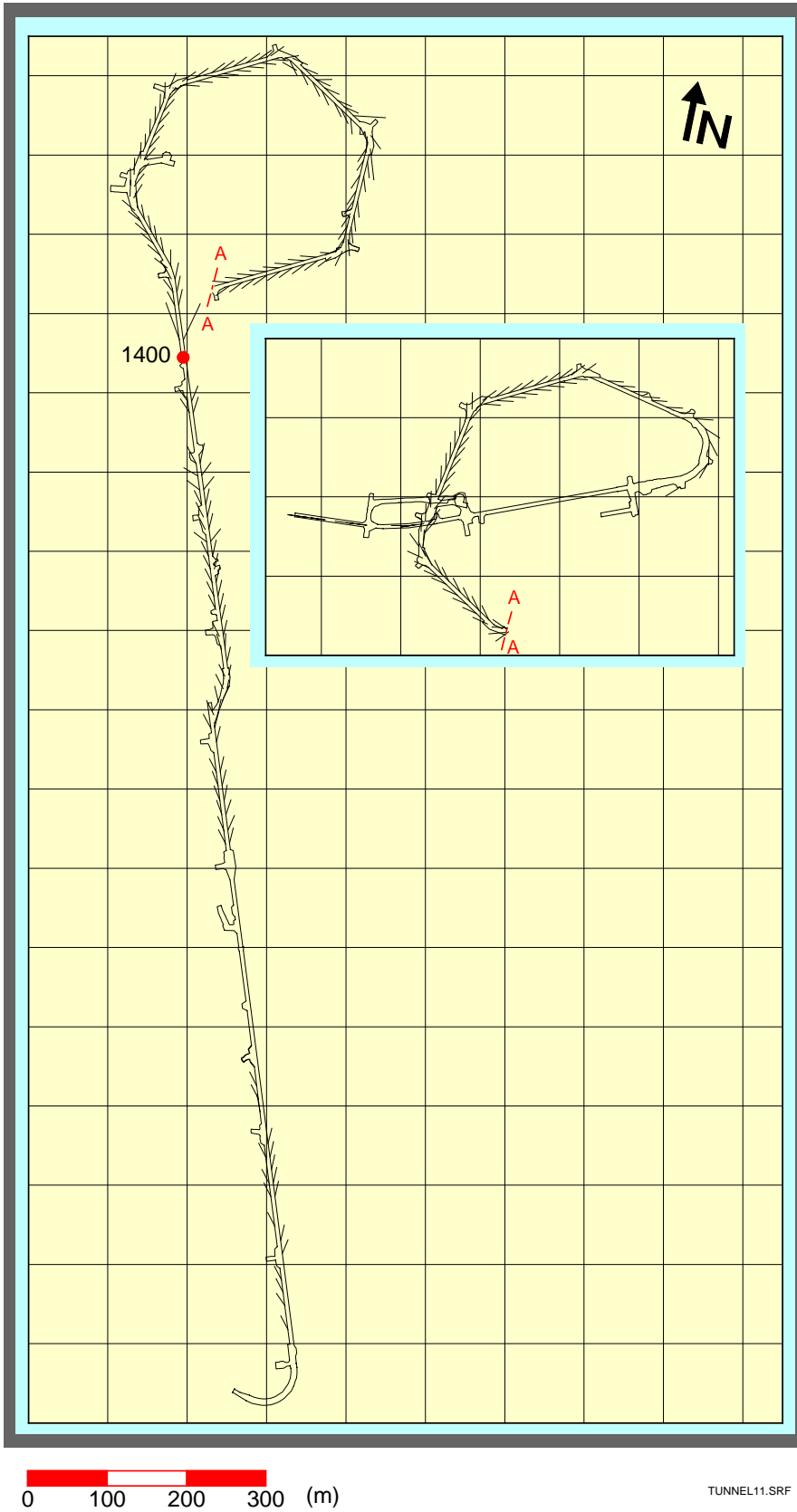
3.1.1 Skalning av testdata

Undersökningarna vid Äspölaboratoriet har visat att utvärderade transmissiviteter för sektioner i ett borrhål är beroende av längden av den testade sektionen och för den tidsperiod av testperioden då utvärderingen görs /Wikberg et al, 1991/. Vid förundersökningarna före och under konstruktionen av Äspölaboratoriet användes normalt sett samma varaktighet på varje test med en viss längd på den testade borrhålssektionen varför sektionslängden kan nyttjas för att skapa en empirisk relation mellan längd på testad borrhålssektion och transmissivitet. I *Tabell 3-1* redovisas den skaltransformation som nyttjats och i *Rhén et al/in prep/* görs en mer detaljerad redovisning av skaltransformationen.

Sondhålen grupperades i olika sektorer i horisontal planet med hänsyn till sondhålens riktning. Statistik beräknades sedan för varje sektor (Geometriskt medel av transmissiviteten = $T_g = 10^A$, A = aritmetiskt medel av $\log_{10} T$, samt standard avvikelser av $\log_{10} T = s(\log_{10} T)$). Därefter skalades T_g till 9, 24 och 30 m skala med faktorerna 0.67, 1,44 respektive 1.72 och därefter multiplicerades det geometriska medelvärdet med ökningen av testlängden (9m skala: 9/15, 24 m skala: 24/15 etc). Den sista multipliceringen är nödvändig på grund av att skalfaktorerna är gjorda för hydraulisk konduktivitet och inte transmissivitet. $s(\log_{10} T)$ skalade till 9, 24 och 30 m skala med faktorerna 1.14, 0,87 respektive 0.81 enligt *Tabell 3-1*.

3.1.2 Statistisk bearbetning av skalad testdatamängd

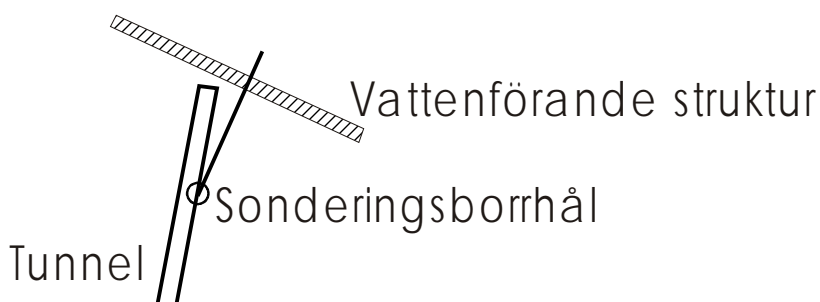
Transmissiviteterna är approximativt lognormal fördelade. Transmissiviteterna (T) logaritmerades därför och därefter beräknades det aritmetiska medel värdet och standardavvikelsen för $\text{Log}_{10}(T)$ för borrhål med horisontell riktning inom en given sektor för att skatta datamängdens statistiska egenskaper.



Figur 3-1 Sondhål i Äspölaboratoriets tunnel. Data från och med tunnelsektion 1400 m (markerat i figur) har nyttjats i analysen.

Tabell 3-1 Det linjära förhållandet mellan Y och Log_{10} (skala). /Rhén et al , in prep/.

Y	=	$\text{Log}_{10}(K_a / K_{bh})$, $\text{Log}_{10}(K_g / K_{bh})$ eller $s(\text{Log}_{10}(K))$		
K	=	hydraulisk konduktivitet		
K_a	=	aritmetiskt medel		
K_g	=	geometriskt medel		
K_{bh}	=	effektiv värde på hydraulisk konduktivitet för hela borrhålet med borrhålslängd ≈ 500 m		
Y	=	$a+b \cdot \text{Log}_{10}(\text{skala})$		
ρ	=	korrelation koefficient		
Y		a	b	ρ
$\text{Log}_{10}(K_a / K_{bh})$		1,184	-0,50	-0,70
$\text{Log}_{10}(K_g / K_{bh})$		-2,107	0,782	0,80
$s(\text{Log}_{10}(K))$		2,089	-0,758	-0,92



Figur 3-2 Sondhål i tunnel.

Om sprickor är approximativt till storlek och riktning likformigt fördelade i rummet är det störst sannolikhet att sprickor vinkelrätt ett borrhål verkligen skär borrhålet. För att bättre illustrera trolig riktning för den utvärderade transmissiviteten adderades därför 90° till borrhåls riktningen innan data delades upp i sektorer. Ett horisontellt sondhål med borrhålsriktningen $N30^\circ E$ ger således, enligt detta antagande, ett transmissivitetsvärde för riktningen $N(30^\circ + 90^\circ)E$, se *Figur 3-2*. Med detta synsätt antas att transmissiviteter för sondborrhålen i huvudsak representeras av subvertikala vattenförande sprickor. Analysens giltighet begränsas emellertid inte av detta därför att de utvärderade statistiska egenskaperna primärt gäller borrhålsriktning som kan nyttjas för kvalitativa analyser av skillnader i egenskaper för olika subhorisontella riktningar av borrhål eller för tester av numeriska modeller, t ex DFN (Discrete Fracture Network) modeller.

Inledningsvis utfördes analysen för 4 olika intervall, 15° , 20° , 30° samt 45° graders upplösning av testdata. Alternativet med 20° sektorer bedömdes ge hög detaljeringsgrad och ändå tillräckligt många borrhål per sektor. Den fortsatta analysen baseras på 20° -alternativet. I *Kapitel 4.1* presenteras resultatet i form av tabeller och diagram.

3.1.3 Avstånd mellan vattenförande strukturer

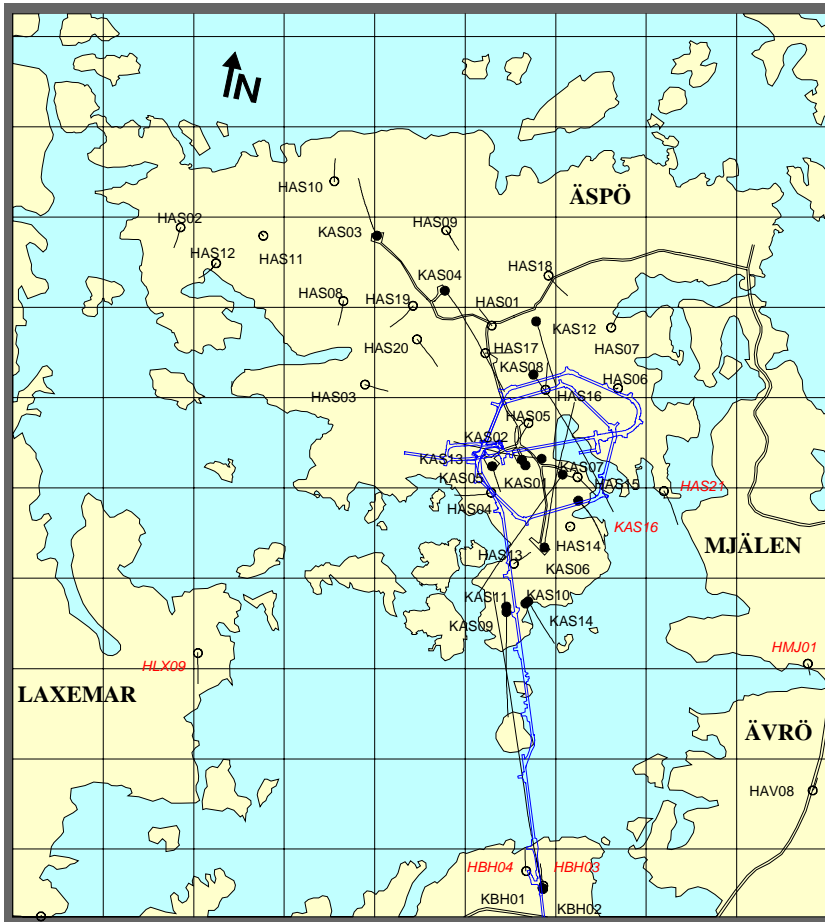
Avståndet mellan vattenförande strukturer har analyserats utifrån två olika utgångspunkter (T = transmissivitet):

- Avståndet mellan strukturer med $T > T_j$, där T_j är givet som en jämn tiopotens.
- Avståndet mellan strukturer med $T_i > T > T_j$, där T_i och T_j är givna som jämna tiopotenser.

Analysen omfattar beräkning av aritmetiskt medel och median avstånd för varje givet intervall av transmissiviteter. Dessutom redovisas fördelningskurvan för varje givet intervall av transmissiviteter. Höger och vänster tunnelvägg (betraktat från tunnel mynning ner in i tunnel) redovisas var för sig. Betraktas höger och vänster vägg som oberoende datamängd skulle analysen kunna göras på hel datamängden. Detta har inte gjorts för det bedömdes vara av intresse att studera variabiliteten för två datamängder som kanske kunde förväntas uppvisa mycket lika karakteristik på grund av att datamängderna är tagna tämligen nära varandra (ca 10-15 m) längs mer eller mindre samma sträcka. Resultatet presenteras i *Kapitel 4.2* i form av tabeller och figurer.

3.2 Data från subvertikala kärnborrhål

Före påbörjandet av byggnationen av Äspölaboratoriet utfördes i ett antal vertikala eller subvertikala kärnborrhål med syftet att karakterisera såväl större sprickzoner som bergmassan mellan zonerna. I ett flertal av kärnborrhålen utfördes injektionstester med 3 m intervall längs borrhålet. Avstånd mellan manschetterna var 3 m. Injektionsperioden och tryckupbyggnadsperiod var ca 10 minuter vardera. Testerna utvärderades med transienta utvärderings metoder med antagande om radiellt flöde /*Cooper and Jacob, 1946*/. De data, från dessa tester, som använts i denna analys är från borrhålen KAS02 samt KAS05-08 på nivåerna från -200 till -500 meter under havsytan. *Figur 3-3* visar hur kärnborrhålens läge på Äspö.



Figur 3-3 Borrhål borrade från markytan. Kärnborrhål visas med fylld ring och hammarborrhål med öfylld ring.

3.2.1 Skalning av testdata

Det finns två möjligheter att beräkna uppskalade transmissiviteter i och med att testsektionerna ligger direkt efter varandra. Som första alternativ summerades transmissiviteterna för 3 m sektionerna för 9, 15, 24 eller 30 m sektioner längs borrhålen. Dessa transmissiviteter för en viss testskala, 9, 15, 24 eller 30 m, reducerades något enligt skaltransformationen för aritmetiskt medel i *Tabell 3-1*. Transmissiviteterna beräknade för 9, 15, 24 och 30 m sektionerna multiplicerades med ca 0.6, 0.45, 0.35 respektive 0.3 enligt denna skaltransformation och därefter beräknades datamängdernas statistiska egenskaper (Geometriskt medel av transmissiviteten = $T_g = 10^A$, A = aritmetiskt medel av $\log_{10} T$, samt standard avvikelser av $\log_{10} T = s(\log_{10} T)$). Som andra alternativ skalades T_g för 3 m testskala upp till 9, 15, 24 och 30 m enligt skaltransformationen för geometriskt medel med ca 2.4, 3.5, 5.1 respektive 6.1 och därefter multiplicerades det geometriska medelvärdet med ökningen av testlängden (9m skala: $9/3 = 3$, 15 m skala: $15/3 = 5$ etc). Den sista multipliceringen är nödvändig på grund av att skalfaktorerna är gjorda för hydraulisk konduktivitet och inte transmissivitet. Standardavvikelsen $s(\log_{10} T)$ för 3 m testskala skalades för test skalor 9, 15, 24 och 30 m skalades med ca 0.8, 0.7, 0.6, respektive 0.56.

3.2.2 Statistik på skalad testdatamängd

Transmissiviteterna är approximativt lognormalfördelade. Transmissiviteterna (T) logaritmerades därför och därefter beräknades det aritmetiska medel värdet och standard avvikelsen för $\text{Log}_{10}(T)$. Resultatet presenteras i *Kapitel 4.3* i form av tabeller och diagram.

Om sprickor är, approximativt till storlek och riktning, likformigt fördelade i rymden är det störst sannolikhet att sprickor vinkelrätt ett borrhål verkligen skär borrhålet. Med detta synsätt antas att transmissiviteterna för kärnborrhålen i huvudsak representeras av subhorisontella vattenförande sprickor. Analysens giltighet begränsas emellertid inte av detta därför att de utvärderade statistiska egenskaperna primärt gäller borrhålsriktning och kan nyttjas för kvalitativa analyser som avser skillnader i hydrauliska egenskaper mellan borrhål med subvertikal riktning i jämförelse mot subhorisontella borrhål eller för tester av numeriska modeller, t ex DFN (Discrete Fracture Network) modeller.

3.2.3 Avstånd mellan vattenförande strukturer

Avståndet mellan vattenförande strukturer har analyserats utifrån två olika utgångspunkter (T = transmissivitet):

- Avståndet mellan strukturer med $T > T_j$, där T_j är givet som en jämn tiopotens.
- Avståndet mellan strukturer med $T_i > T > T_j$, där T_i och T_j är givna som jämna tiopotenser.

Analysen omfattar beräkning av aritmetiskt medel och median avstånd för varje givet intervall av transmissiviteter. Dessutom redovisas fördelningskurvan för varje givet intervall av transmissiviteter. Resultatet presenteras i *Kapitel 4.2* i form av tabeller och figurer.

4 Resultat

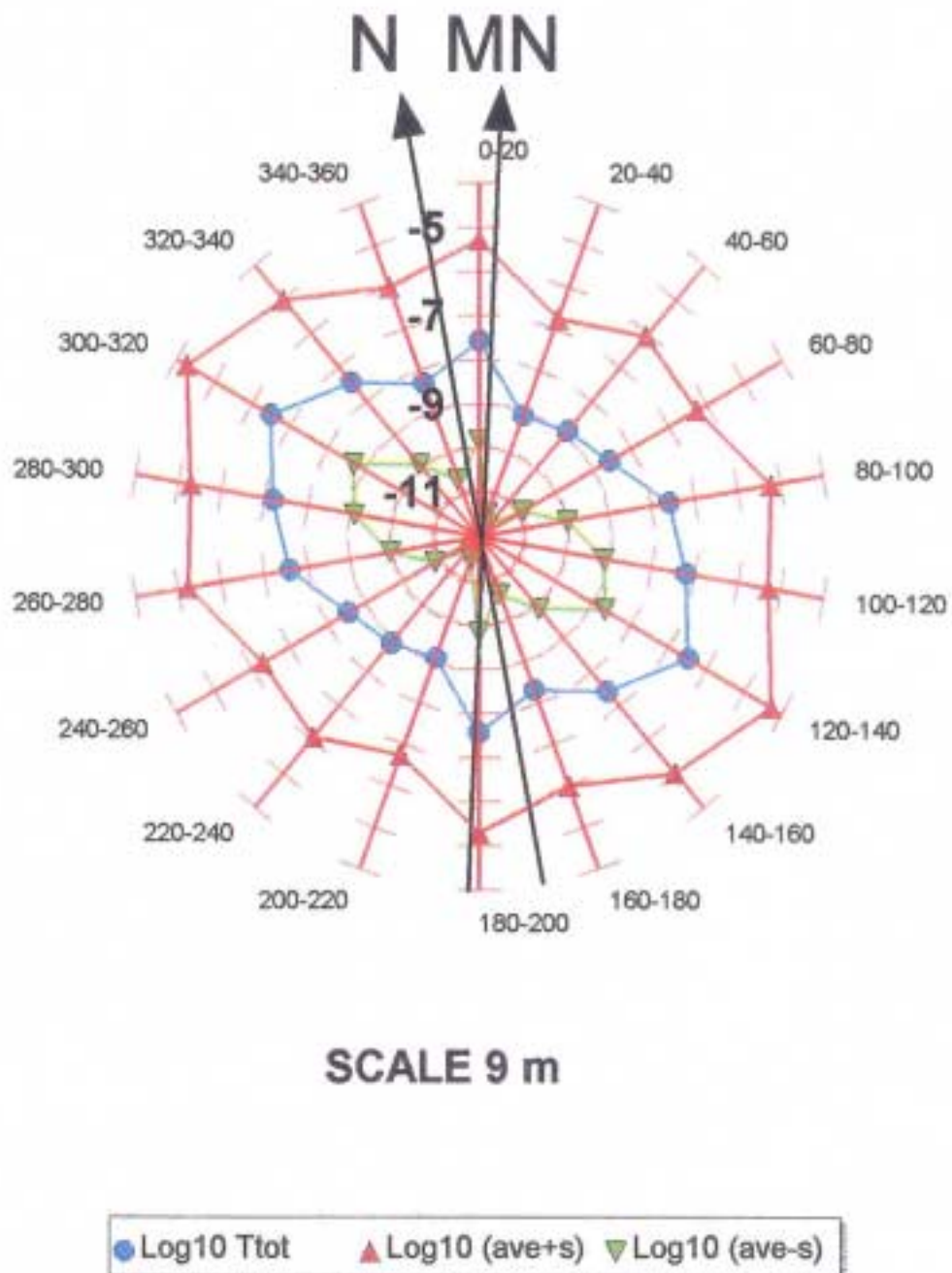
4.1 Subhorisontella sondhål, transmissivitet

I *Tabell 4-1--4.4* presenteras medelvärde, standardavvikelse, antal data, övre och undre kvartil för respektive 20°-sektor, i olika testskalor. I *Figur 4-1--4.4* visas resultatet grafiskt. I *Figur 4-5 och 4-6* visas sannolikhetsdiagram för $\text{Log}_{10}T$ i 15-metersskala för de olika 20°-sektorerna.

Tabell 4-1 Statistikresultat, skala 9 m. Sector = Riktningar angivna i Äspös koordinat system. Log Ave T_{tot} = aritmetiskt medel av $\text{log}_{10} T_{\text{tot}}$. Ave T_{tot} = medeltransmissivitet [m^2/s]. $s(\text{log}_{10}T_{\text{tot}})$ = standard avvikelse för $\text{log}_{10} T_{\text{tot}}$. n = antal tillgängliga värden i varje sektor. $\text{Log}_{10}(\text{Ave}+s)$ resp $\text{Log}_{10}(\text{Ave}-s) = \text{Log Ave } T_{\text{tot}} +$ respektive $- s(\text{log}_{10}T_{\text{tot}})$ [m^2/s].

Sector	Centre of s sector	Log Ave Ttot	Ave Ttot	s(Log10 T)	n
0-20	10	-7.56	2.8E-008	2.27	50
20-40	30	-9.08	8.2E-010	2.34	18
40-60	50	-8.86	1.4E-009	2.78	9
60-80	70	-8.55	2.8E-009	2.29	17
80-100	90	-7.58	2.6E-008	2.36	37
100-120	110	-7.19	6.4E-008	1.91	7
120-140	130	-6.48	3.3E-007	2.21	27
140-160	150	-7.44	3.7E-008	2.43	29
160-180	170	-8.31	4.9E-009	2.31	6
180-200	190	-7.56	2.8E-008	2.27	50
200-220	210	-9.08	8.2E-010	2.34	18
220-240	230	-8.86	1.4E-009	2.78	9
240-260	250	-8.55	2.8E-009	2.29	17
260-280	270	-7.58	2.6E-008	2.36	37
280-300	290	-7.19	6.4E-008	1.91	7
300-320	310	-6.48	3.3E-007	2.21	27
320-340	330	-7.44	3.7E-008	2.43	29
340-360	350	-8.31	4.9E-009	2.31	6
Sector	Centre of s sector	Log10 (ave+s)	(ave+s)	Log10 (ave-s)	(ave-s)
0-20	10	-5.29	5.1E-006	-9.83	1.5E-010
20-40	30	-6.74	1.8E-007	-11.43	3.7E-012
40-60	50	-6.08	8.2E-007	-11.64	2.3E-012
60-80	70	-6.26	5.4E-007	-10.84	1.4E-011
80-100	90	-5.23	5.9E-006	-9.94	1.1E-010
100-120	110	-5.28	5.3E-006	-9.10	7.9E-010
120-140	130	-4.27	5.4E-005	-8.69	2.0E-009
140-160	150	-5.01	9.7E-006	-9.86	1.4E-010
160-180	170	-6.00	1.0E-006	-10.62	2.4E-011
180-200	190	-5.29	5.1E-006	-9.83	1.5E-010
200-220	210	-6.74	1.8E-007	-11.43	3.7E-012
220-240	230	-6.08	8.2E-007	-11.64	2.3E-012
240-260	250	-6.26	5.4E-007	-10.84	1.4E-011
260-280	270	-5.23	5.9E-006	-9.94	1.1E-010
280-300	290	-5.28	5.3E-006	-9.10	7.9E-010
300-320	310	-4.27	5.4E-005	-8.69	2.0E-009
320-340	330	-5.01	9.7E-006	-9.86	1.4E-010
340-360	350	-6.00	1.0E-006	-10.62	2.4E-011

Average for Log10 Ttot - 20 ° sectors

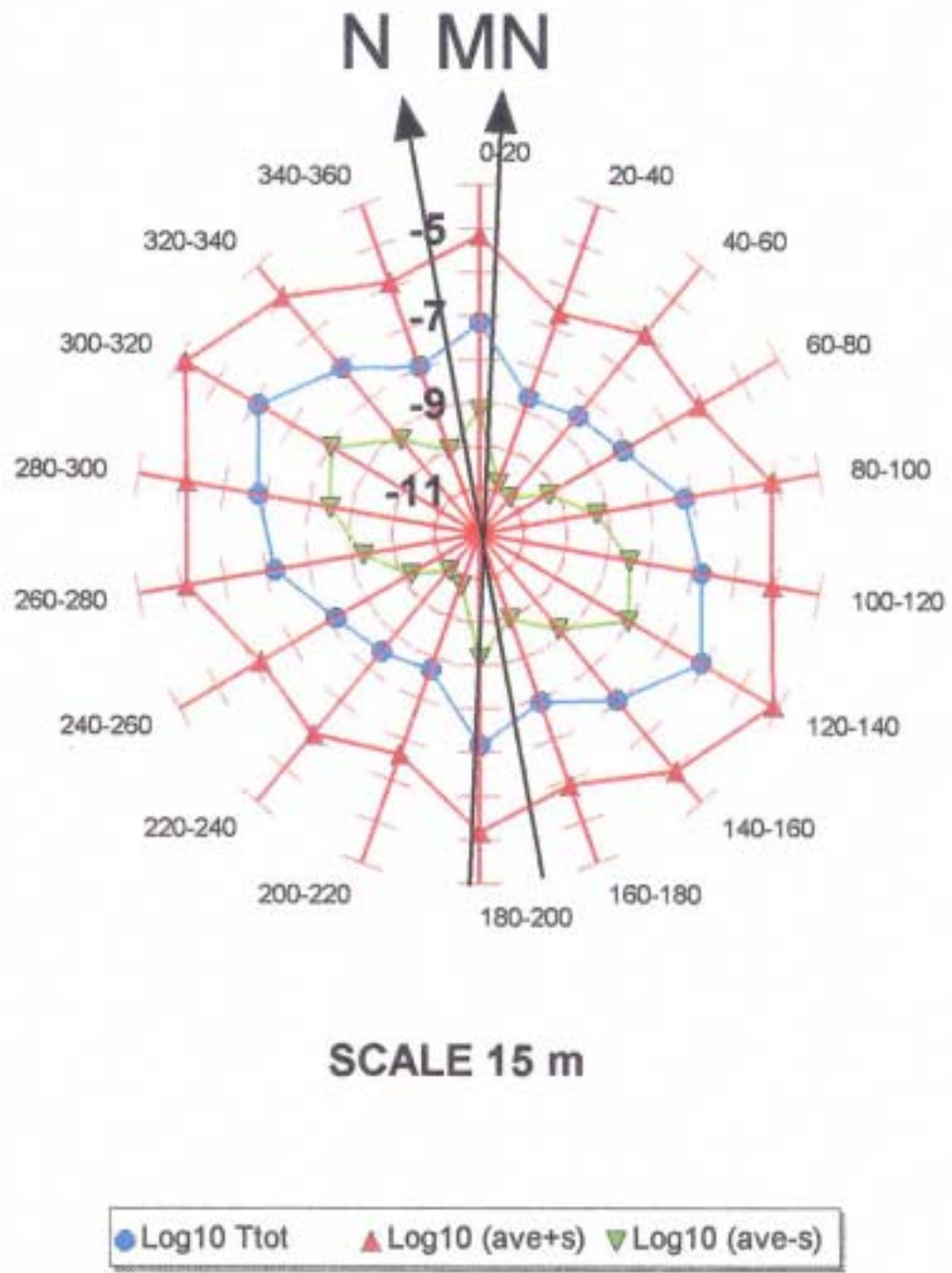


Figur 4-1 Statistikresultat för $\log_{10}T_{tot}$. Skala 9 meter. T_{tot} = transmissivitet [m^2/s].
 N = Norr i Äspös koordinat system. MN = Magnetisk norr.

Tabell 4-2 Statistikresultat. Skala 15 meter. Sector = Riktningar angivna i Äspös koordinat system. Log Ave T_{tot} = aritmetiskt medel av $\log_{10} T_{tot}$. Ave T_{tot} = medeltransmissivitet [m^2/s]. $s(\log_{10} T_{tot})$ = standard avvikelse för $\log_{10} T_{tot}$. n = antal tillgängliga värden i varje sektor. Log10(Ave+s) respektive $\text{Log10(Ave-s)} = \text{Log Ave } T_{tot} + \text{respektive } - s(\log_{10} T_{tot}) T[m^2/s]$.

Sector	Centre of sector	Log Ave T tot	Ave T tot	s(Log10 T)	n
0-20	10	-7.16	6.9E-008	1.99	50
20-40	30	-8.69	2.0E-009	2.06	18
40-60	50	-8.47	3.4E-009	2.43	9
60-80	70	-8.16	6.9E-009	2.01	17
80-100	90	-7.19	6.5E-008	2.07	37
100-120	110	-6.80	1.6E-007	1.68	7
120-140	130	-6.08	8.2E-007	1.94	27
140-160	150	-7.04	9.1E-008	2.13	29
160-180	170	-7.91	1.2E-008	2.03	6
180-200	190	-7.16	6.9E-008	1.99	50
200-220	210	-8.69	2.0E-009	2.06	18
220-240	230	-8.47	3.4E-009	2.43	9
240-260	250	-8.16	6.9E-009	2.01	17
260-280	270	-7.19	6.5E-008	2.07	37
280-300	290	-6.80	1.6E-007	1.68	7
300-320	310	-6.08	8.2E-007	1.94	27
320-340	330	-7.04	9.1E-008	2.13	29
340-360	350	-7.91	1.2E-008	2.03	6
Sector	Centre of sector	Log10 (ave+s)	(ave+s)	Log10 (ave-s)	(ave-s)
0-20	10	-5.17	6.7E-006	-9.15	7.0E-010
20-40	30	-6.63	2.3E-007	-10.74	1.8E-011
40-60	50	-6.03	9.3E-007	-10.90	1.3E-011
60-80	70	-6.15	7.1E-007	-10.17	6.8E-011
80-100	90	-5.12	7.5E-006	-9.26	5.6E-010
100-120	110	-5.12	7.6E-006	-8.47	3.4E-009
120-140	130	-4.15	7.1E-005	-8.02	9.5E-009
140-160	150	-4.92	1.2E-005	-9.17	6.8E-010
160-180	170	-5.89	1.3E-006	-9.94	1.2E-010
180-200	190	-5.17	6.7E-006	-9.15	7.0E-010
200-220	210	-6.63	2.3E-007	-10.74	1.8E-011
220-240	230	-6.03	9.3E-007	-10.90	1.3E-011
240-260	250	-6.15	7.1E-007	-10.17	6.8E-011
260-280	270	-5.12	7.5E-006	-9.26	5.6E-010
280-300	290	-5.12	7.6E-006	-8.47	3.4E-009
300-320	310	-4.15	7.1E-005	-8.02	9.5E-009
320-340	330	-4.92	1.2E-005	-9.17	6.8E-010
340-360	350	-5.89	1.3E-006	-9.94	1.2E-010

Average for Log10 Ttot - 20 ° sectors

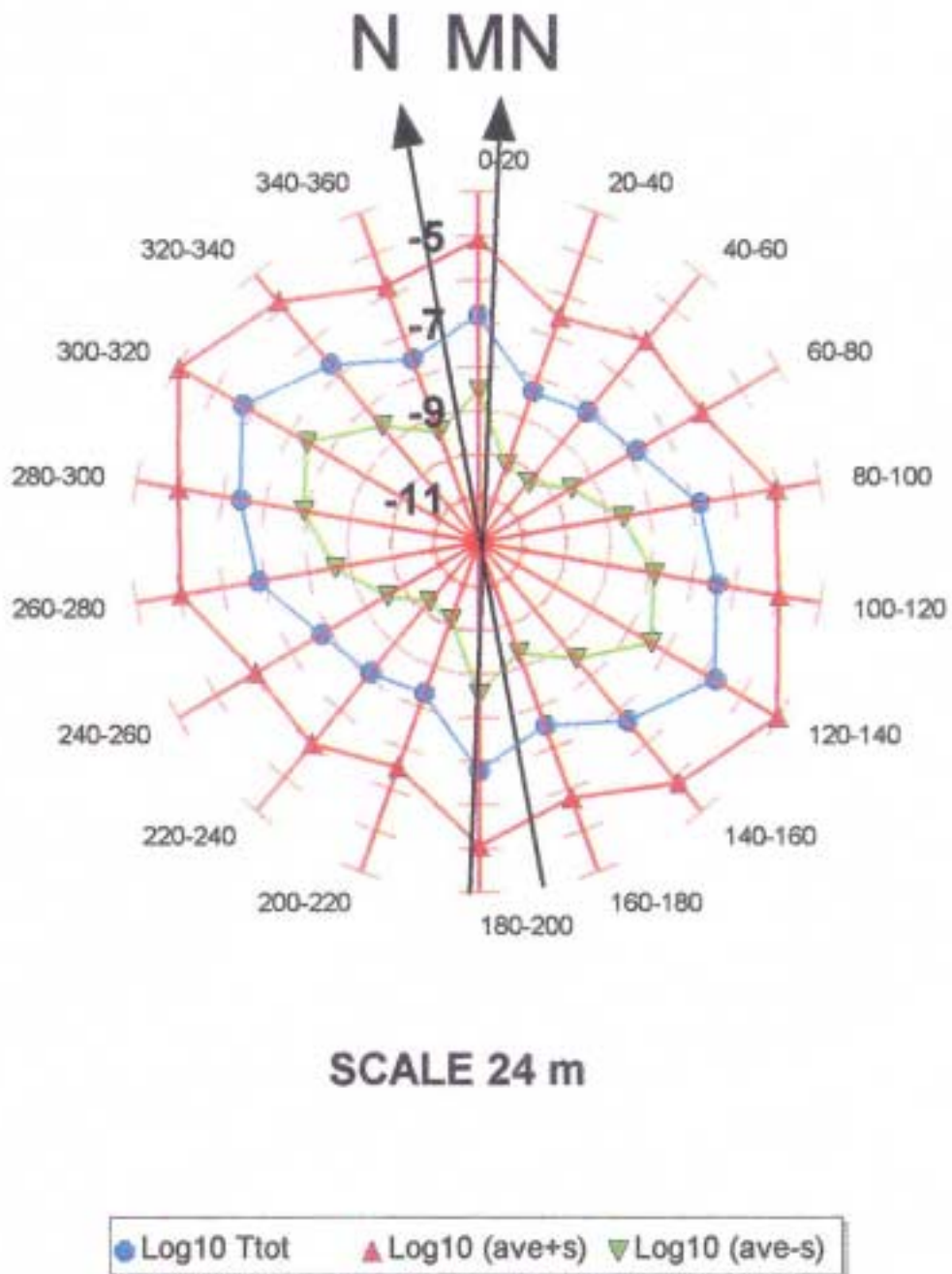


Figur 4.2 Statistikresultat för $\log_{10} T_{tot}$. Skala 15 meter. T_{tot} = transmissivitet [m^2/s]. N = Norr i Äspös koordinat system. MN = Magnetisk norr.

Tabell 4-3 Statistikresultat. Skala 24 meter. Sector = Riktningar angivna i Äspös koordinat system. Log Ave T_{tot} = aritmetiskt medel av $\log_{10} T_{tot}$. Ave T_{tot} = medeltransmissivitet [m^2/s]. $s(\log_{10} T_{tot})$ = standard avvikelse för $\log_{10} T_{tot}$. n = antal tillgängliga värden i varje sektor. $\text{Log10}(Ave+s)$ respektive $\text{Log10}(Ave-s) = \text{Log Ave } T_{tot} + \text{respektive } - s(\log_{10} T_{tot}) T[m^2/s]$.

Sector	Centre of sector	Log Ave T tot	Ave T tot	s(Log10 T)	n
0-20	10	-6.80	1.6E-007	1.73	50
20-40	30	-8.33	4.7E-009	1.79	18
40-60	50	-8.10	7.9E-009	2.12	9
60-80	70	-7.80	1.6E-008	1.75	17
80-100	90	-6.83	1.5E-007	1.80	37
100-120	110	-6.43	3.7E-007	1.46	7
120-140	130	-5.72	1.9E-006	1.69	27
140-160	150	-6.68	2.1E-007	1.85	29
160-180	170	-7.55	2.8E-008	1.76	6
180-200	190	-6.80	1.6E-007	1.73	50
200-220	210	-8.33	4.7E-009	1.79	18
220-240	230	-8.10	7.9E-009	2.12	9
240-260	250	-7.80	1.6E-008	1.75	17
260-280	270	-6.83	1.5E-007	1.80	37
280-300	290	-6.43	3.7E-007	1.46	7
300-320	310	-5.72	1.9E-006	1.69	27
320-340	330	-6.68	2.1E-007	1.85	29
340-360	350	-7.55	2.8E-008	1.76	6
Sector	Centre of sector	Log10 (ave+s)	(ave+s)	Log10 (ave-s)	(ave-s)
0-20	10	-5.07	8.5E-006	-8.53	2.9E-009
20-40	30	-6.54	2.9E-007	-10.12	7.6E-011
40-60	50	-5.98	1.0E-006	-10.22	6.0E-011
60-80	70	-6.05	9.0E-007	-9.54	2.9E-010
80-100	90	-5.03	9.4E-006	-8.63	2.4E-009
100-120	110	-4.97	1.1E-005	-7.89	1.3E-008
120-140	130	-4.03	9.3E-005	-7.41	3.9E-008
140-160	150	-4.83	1.5E-005	-8.53	2.9E-009
160-180	170	-5.78	1.6E-006	-9.31	4.9E-010
180-200	190	-5.07	8.5E-006	-8.53	2.9E-009
200-220	210	-6.54	2.9E-007	-10.12	7.6E-011
220-240	230	-5.98	1.0E-006	-10.22	6.0E-011
240-260	250	-6.05	9.0E-007	-9.54	2.9E-010
260-280	270	-5.03	9.4E-006	-8.63	2.4E-009
280-300	290	-4.97	1.1E-005	-7.89	1.3E-008
300-320	310	-4.03	9.3E-005	-7.41	3.9E-008
320-340	330	-4.83	1.5E-005	-8.53	2.9E-009
340-360	350	-5.78	1.6E-006	-9.31	4.9E-010

Average for Log10 Ttot - 20 ° sectors

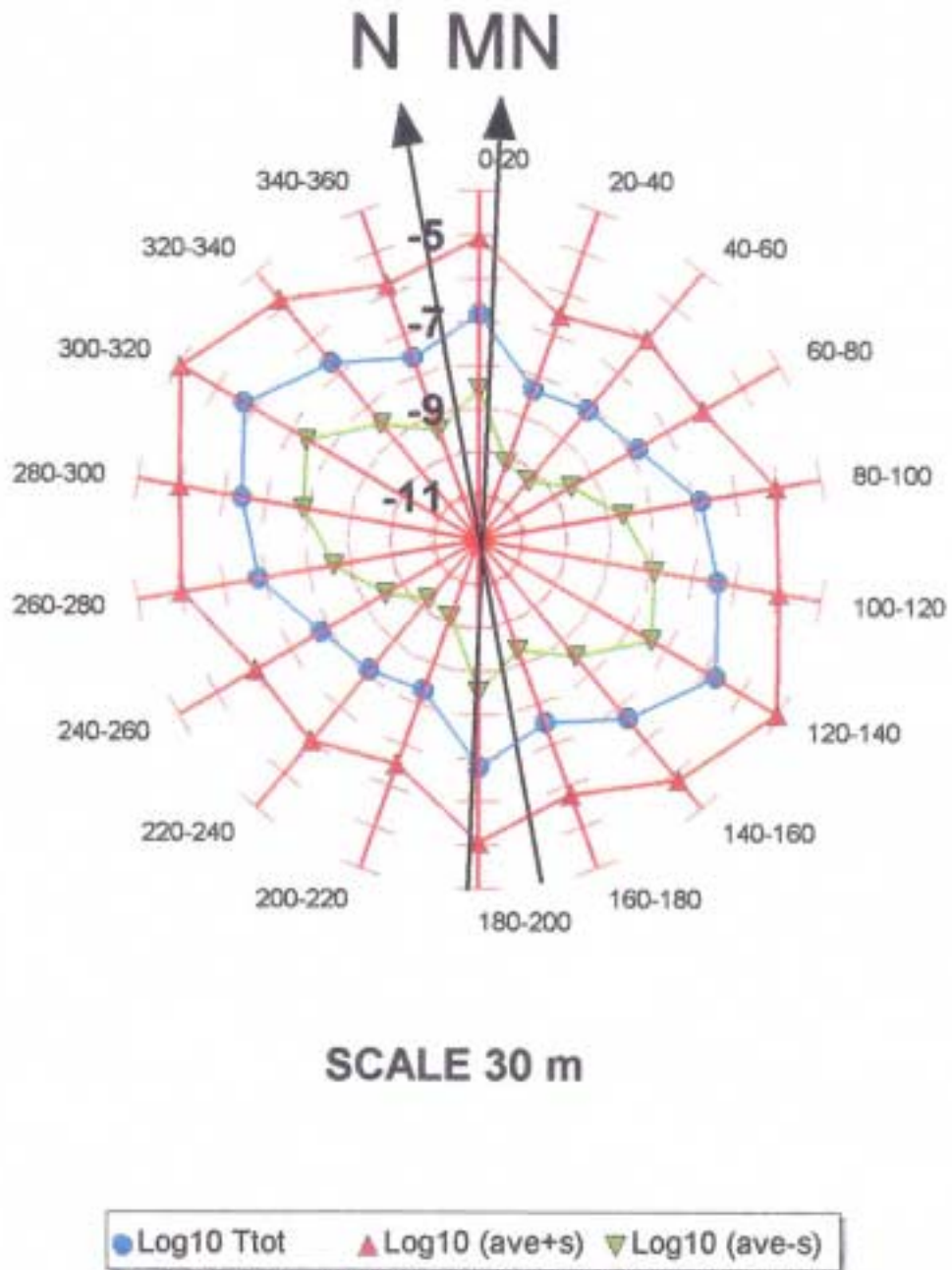


Figur 4-3 Statistikresultat för $\log_{10}T_{tot}$. Skala 24 meter. T_{tot} = transmissivitet [m^2/s].
 N = Norr i Äspös koordinat system. MN = Magnetisk norr

Tabell 4-4 Statistikresultat. Skala 30 meter. Sector = Riktningar angivna i Äspös koordinat system. Log Ave T_{tot} = aritmetiskt medel av $\log_{10} T_{tot}$. Ave T_{tot} = medeltransmissivitet [m^2/s]. $s(\log_{10} T_{tot})$ = standard avvikelse för $\log_{10} T_{tot}$. n = antal tillgängliga värden i varje sektor. $\text{Log10}(Ave+s)$ respektive $\text{Log10}(Ave-s) = \text{Log Ave } T_{tot} + \text{respektive } - s(\log_{10} T_{tot}) T[m^2/s]$.

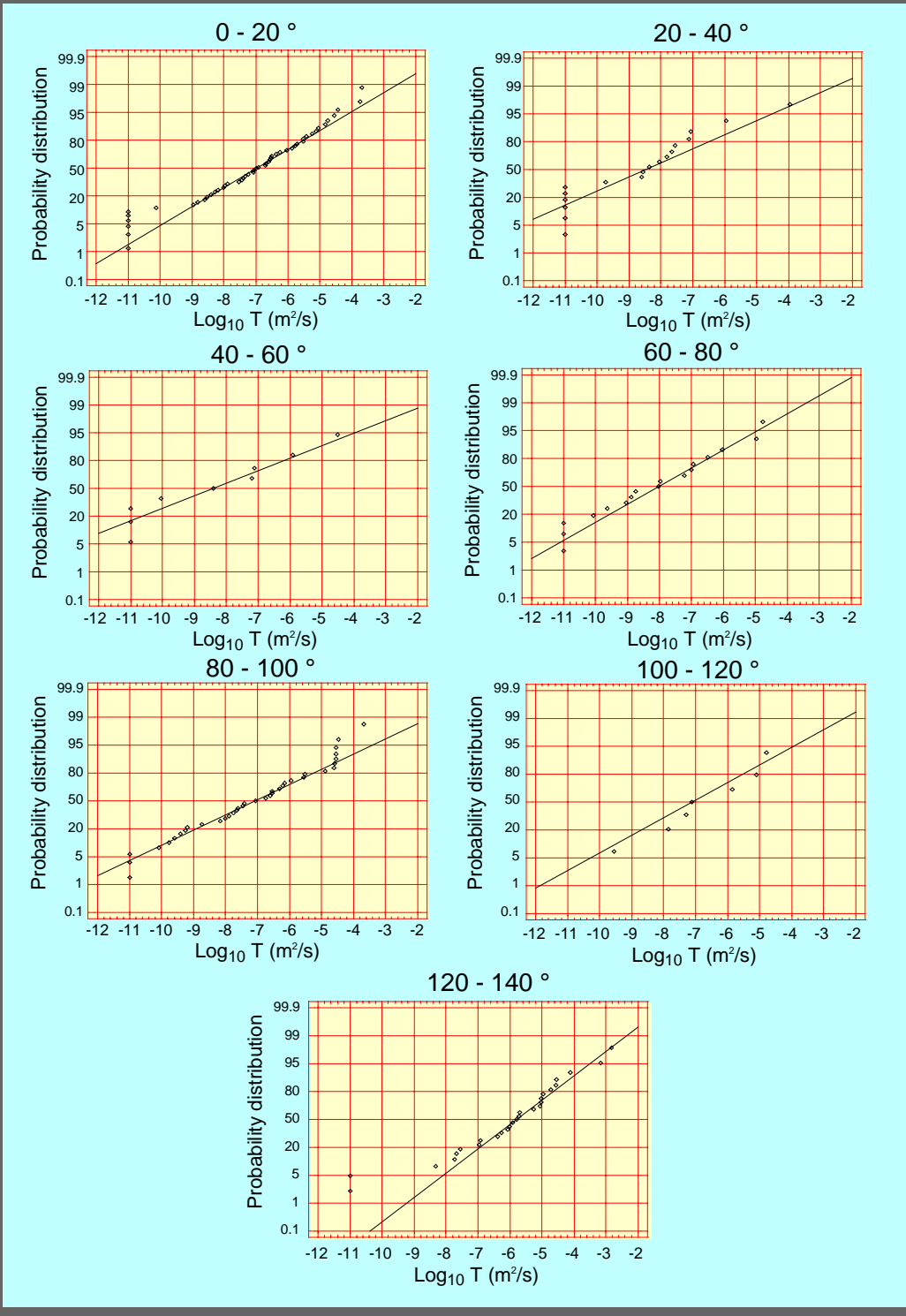
Sector	Centre of sector	Log Ave T tot	Ave T tot	s(Log10 T)	n
0-20	10	-6.63	2.4E-007	1.61	50
20-40	30	-8.15	7.0E-009	1.66	18
40-60	50	-7.93	1.2E-008	1.97	9
60-80	70	-7.62	2.4E-008	1.63	17
80-100	90	-6.65	2.2E-007	1.67	37
100-120	110	-6.26	5.5E-007	1.36	7
120-140	130	-5.55	2.8E-006	1.57	27
140-160	150	-6.51	3.1E-007	1.72	29
160-180	170	-7.37	4.2E-008	1.64	6
180-200	190	-6.63	2.4E-007	1.61	50
200-220	210	-8.15	7.0E-009	1.66	18
220-240	230	-7.93	1.2E-008	1.97	9
240-260	250	-7.62	2.4E-008	1.63	17
260-280	270	-6.65	2.2E-007	1.67	37
280-300	290	-6.26	5.5E-007	1.36	7
300-320	310	-5.55	2.8E-006	1.57	27
320-340	330	-6.51	3.1E-007	1.72	29
340-360	350	-7.37	4.2E-008	1.64	6
Sector	Centre of sector	Log10 (ave+s)	(ave+s)	Log10 (ave-s)	(ave-s)
0-20	10	-5.02	9.6E-006	-8.24	5.8E-009
20-40	30	-6.49	3.2E-007	-9.82	1.5E-010
40-60	50	-5.96	1.1E-006	-9.90	1.3E-010
60-80	70	-6.00	1.0E-006	-9.25	5.7E-010
80-100	90	-4.98	1.0E-005	-8.33	4.7E-009
100-120	110	-4.90	1.3E-005	-7.62	2.4E-008
120-140	130	-3.98	1.1E-004	-7.12	7.7E-008
140-160	150	-4.78	1.6E-005	-8.23	5.9E-009
160-180	170	-5.73	1.8E-006	-9.01	9.7E-010
180-200	190	-5.02	9.6E-006	-8.24	5.8E-009
200-220	210	-6.49	3.2E-007	-9.82	1.5E-010
220-240	230	-5.96	1.1E-006	-9.90	1.3E-010
240-260	250	-6.00	1.0E-006	-9.25	5.7E-010
260-280	270	-4.98	1.0E-005	-8.33	4.7E-009
280-300	290	-4.90	1.3E-005	-7.62	2.4E-008
300-320	310	-3.98	1.1E-004	-7.12	7.7E-008
320-340	330	-4.78	1.6E-005	-8.23	5.9E-009
340-360	350	-5.73	1.8E-006	-9.01	9.7E-010

Average for Log10 Ttot - 20 ° sectors



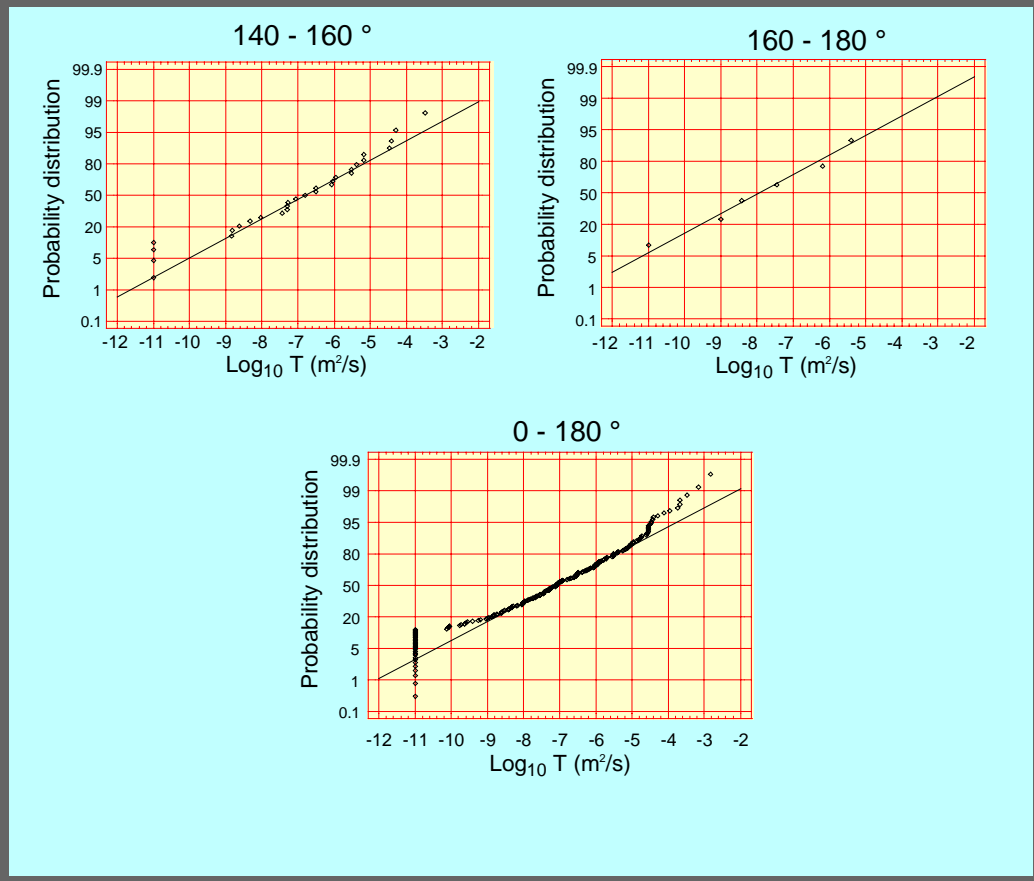
Figur 4-4 Statistikresultat för $\log_{10}T_{tot}$. Skala 30 meter. T_{tot} = transmissivitet [m^2/s].
 N = Norr i Äspös koordinat system. MN = Magnetisk norr.

Äspö Hard Rock Laboratory
 Probability distribution of $\text{Log}_{10}T$ for pressure build-up tests
 of probeholes (1400 - 3600 m). Divided in 20 degrees sectors.



Figur 4-5 Fördelningsplott. Skala 15 m.

Äspö Hard Rock Laboratory
Probability distribution of $\text{Log}_{10}T$ for pressure build-up tests
of probeholes (1400 - 3600 m). Divided in 20 degrees sectors.



Figur 4-6 Fördelningsplott. Skala 15 m

4.2 Subhorisontella sondhål, avstånd mellan strukturer

I *Tabell 4-5* redovisas aritmetiska medel och median avstånd mellan konduktiva strukturer i Äspötunneln.

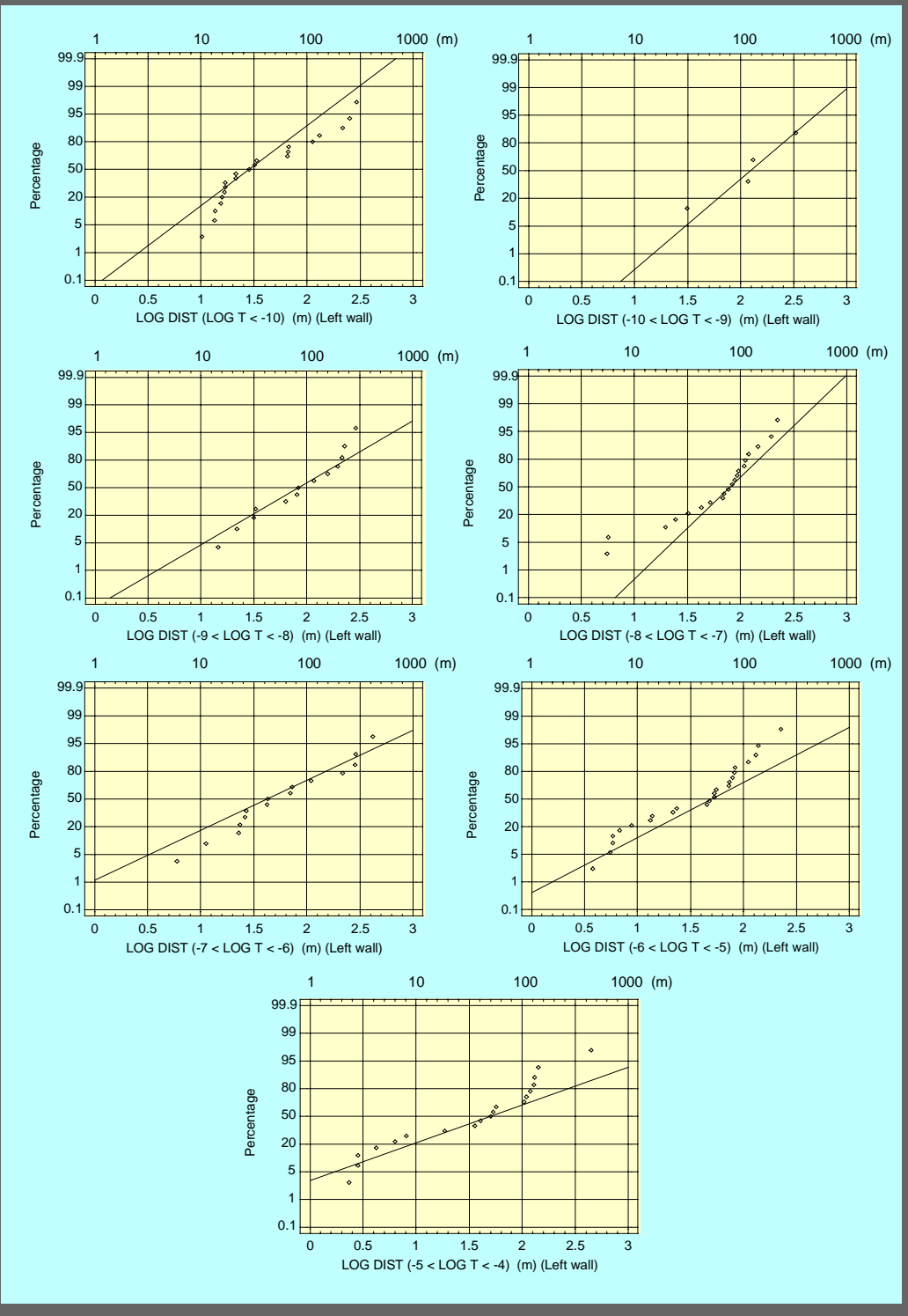
I *Figur 4-7* till *4-10* visas avstånden i fördelningsdiagram.

Tabell 4-5 Aritmetiska medel och median avstånd mellan strukturer med transmissivitet (T) inom ett intervall för T eller större än ett givet värde på T baserat på sondhålsdata från Äspölaboratoriets tunnel.

Distance between structures when $T > T_j$			Distance between structures when $T_i > T > T_j$			
Left tunnelwall			Left tunnelwall			
T_j (m ² /s)	Arithmetic mean distance (m)	Median distance (m)	T_i (m ² /s)	T_j (m ² /s)	Arithmetic mean distance (m)	Median distance (m)
1E-011	18.93	13.65	1E-010	1E-011	69.65	28.29
1E-010	19.86	14.14	1E-009	1E-010	152.57	123.83
1E-009	20.88	13.65	1E-008	1E-009	118.53	83.47
1E-008	24.41	13.24	1E-007	1E-008	83.14	80.26
1E-007	32.51	14.39	1E-006	1E-007	110.74	42.64
1E-006	36.62	19.19	1E-005	1E-006	56.68	50.21
1E-005	73.25	40.52	1E-004	1E-005	77.00	50.71
1E-004	No data	No data	1E-003	1E-004	No data	No data
Right tunnelwall			Right tunnelwall			
T_j (m ² /s)	Arithmetic mean distance (m)	Median distance (m)	T_j (m ² /s)	T_i (m ² /s)	Arithmetic mean distance (m)	Median distance (m)
1E-011	20.05	13.09	1E-010	1E-011	100.05	87.98
1E-010	20.25	13.14	1E-009	1E-010	136.99	50.12
1E-009	22.01	11.73	1E-008	1E-009	119.15	86.79
1E-008	24.70	11.49	1E-007	1E-008	54.81	35.82
1E-007	36.16	12.65	1E-006	1E-007	65.37	37.00
1E-006	55.22	10.20	1E-005	1E-006	98.68	32.18
1E-005	77.73	24.08	1E-004	1E-005	155.47	83.72
1E-004	33.84	4.71	1E-003	1E-004	40.60	4.72

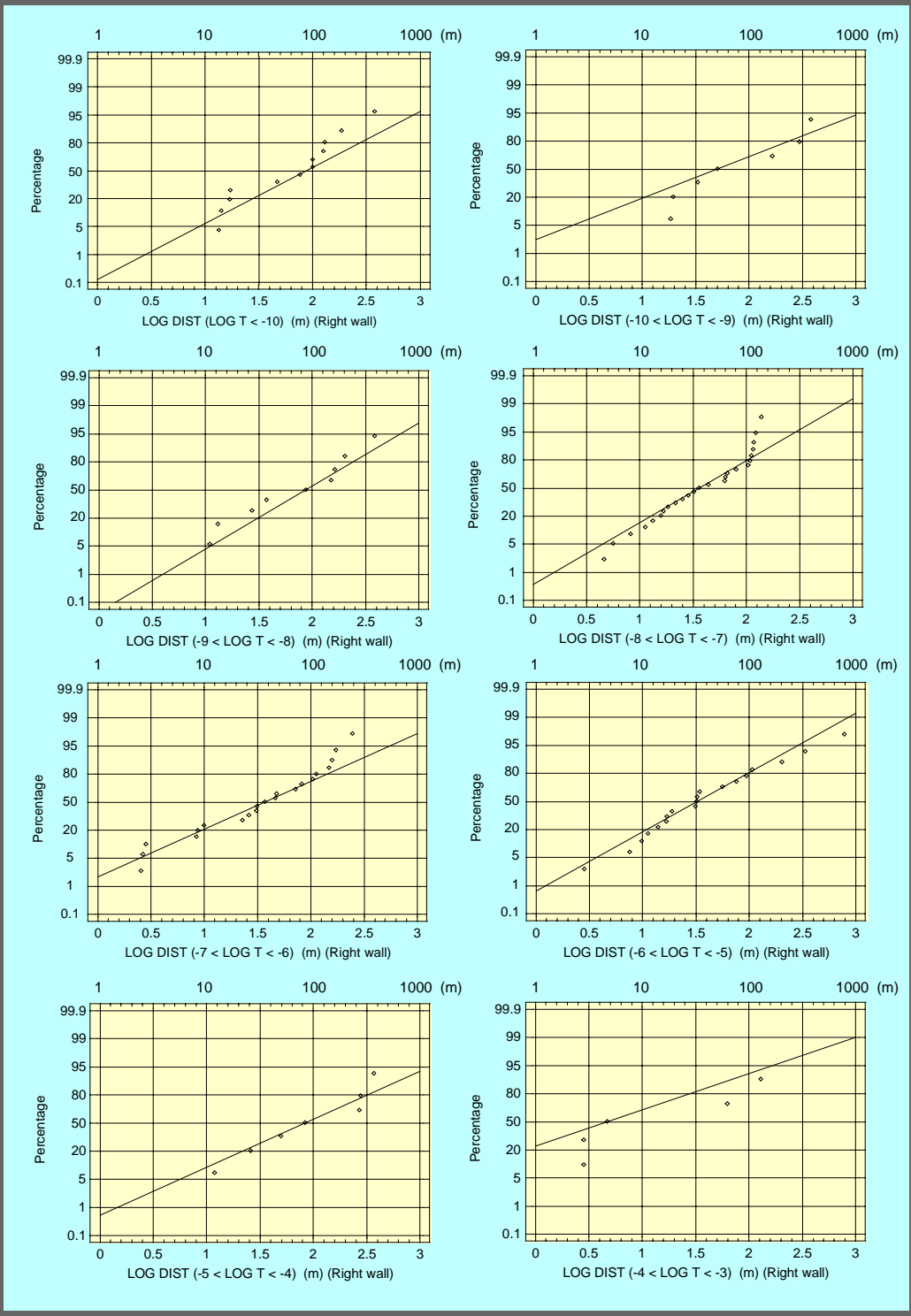
Y:\13080086\Kalkyl\SONDDIST.WK4

ÄSPÖ HARD ROCK LABORATORY
Logarithmic distances between structures in the
Äspö tunnel - left wall. Chainage 1400 - 3600 m.



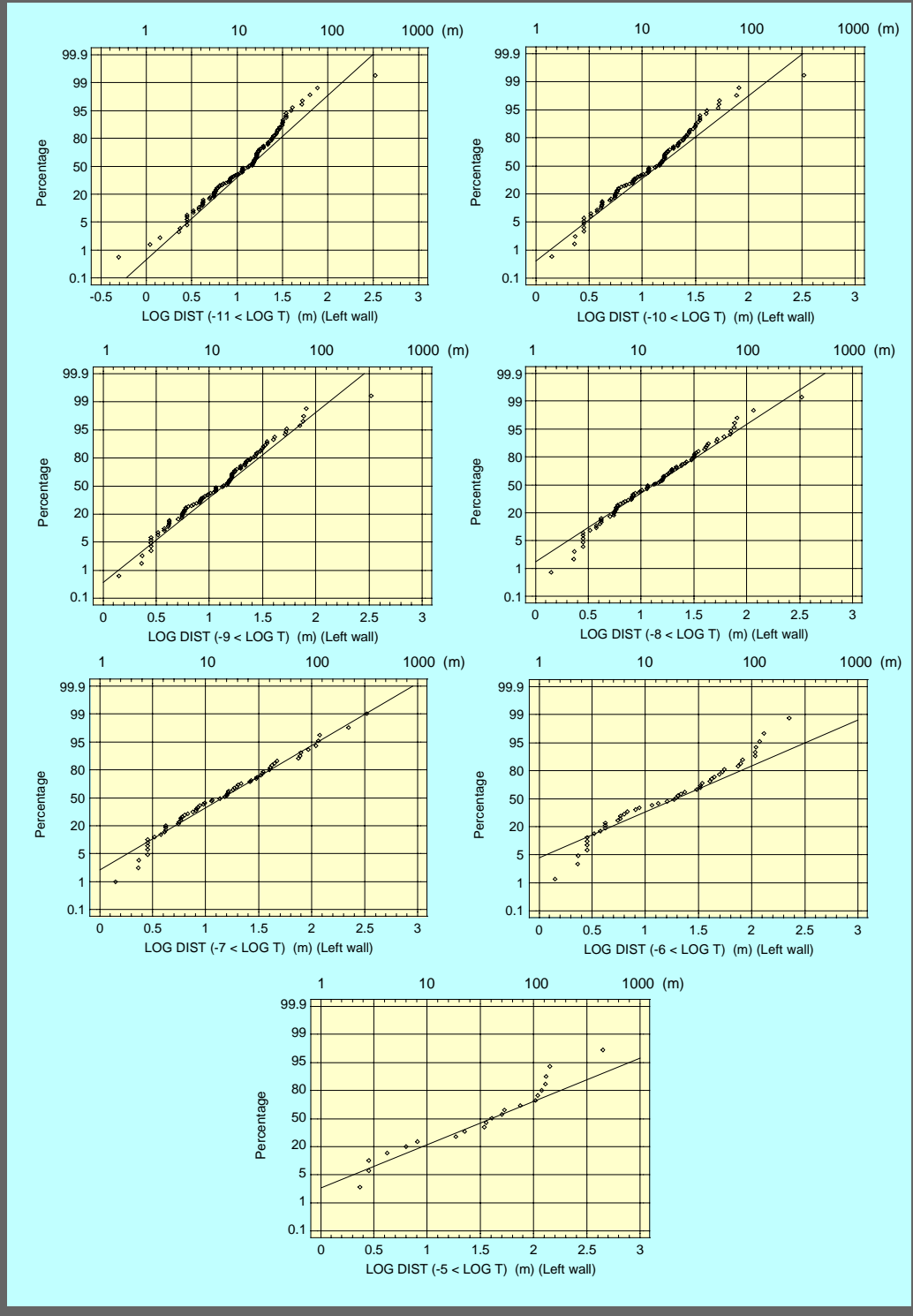
Figur 4-7 *Fördelningsdiagram för $\text{Log}_{10}(\text{avstånd i meter})$ på x-axel för avstånd mellan konduktiva strukturer med en transmissivitet (T) inom ett givet intervall för T . $\text{LOG } T = \log_{10}T$. T givet i m^2/s . Vänster vägg.*

ÄSPÖ HARD ROCK LABORATORY
Logarithmic distances between structures in the
Äspö tunnel - right wall. Chainage 1400 - 3600 m.



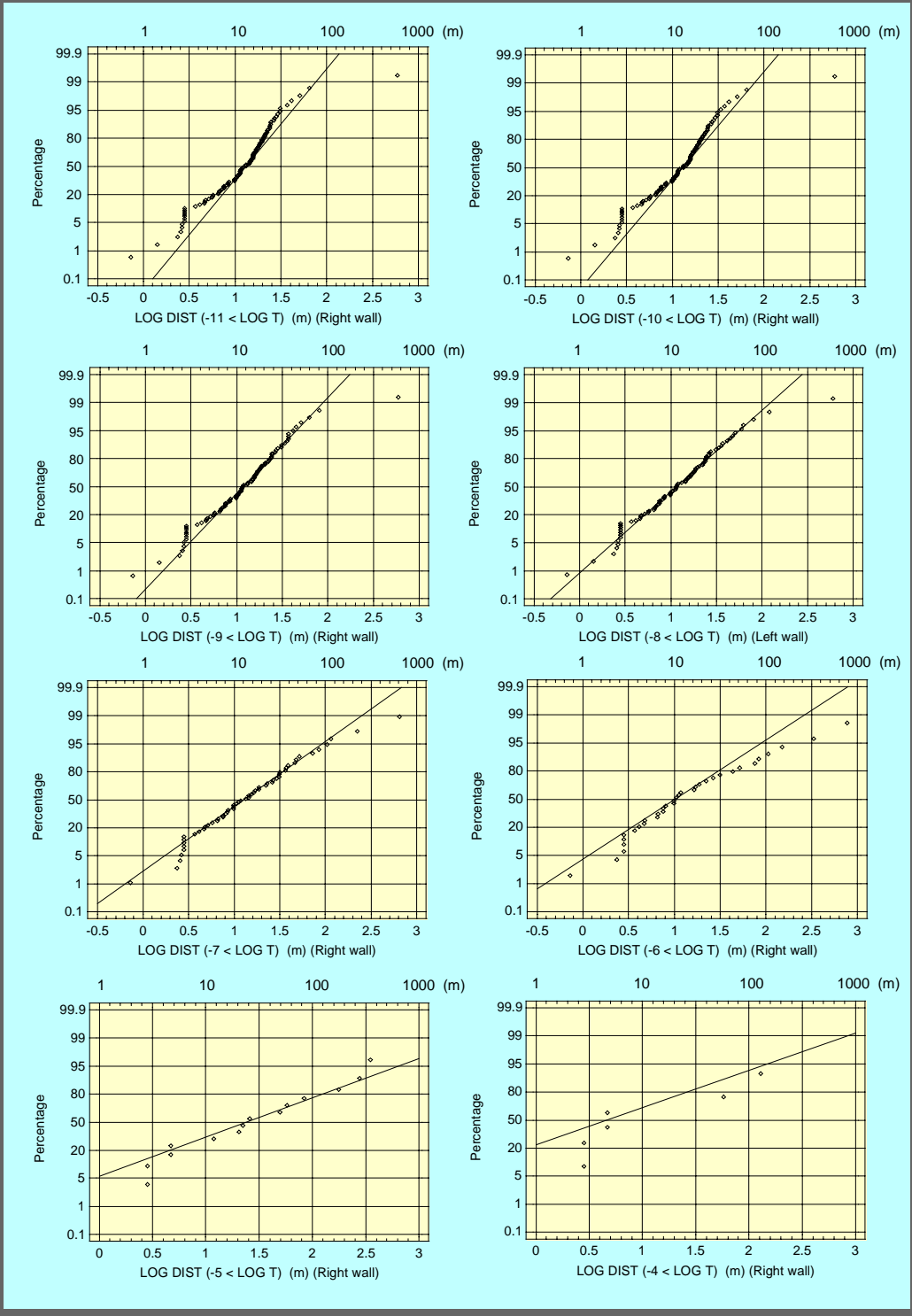
Figur 4-8 *Fördelningsdiagram för Log_{10} (avstånd i meter) på x-axel för avstånd mellan konduktiva strukturer med en transmissivitet (T) inom ett givet intervall för T. $\text{LOG T} = \log_{10}T$. T givet i m^2/s . Höger vägg.*

ÄSPÖ HARD ROCK LABORATORY
Logarithmic distances between structures in the
Äspö tunnel - left wall. Chainage 1400 - 3600 m.



Figur 4-9 *Fördelningsdiagram för Log_{10} (avstånd i meter) på x-axel för avstånd mellan konduktiva strukturer med en transmissivitet (T) större än ett givet värde på T . $\text{LOG } T = \log_{10}T$. T givet i m^2/s . Vänster vägg.*

ÄSPÖ HARD ROCK LABORATORY
Logarithmic distances between structures in the
Äspö tunnel - right wall. Chainage 1400 - 3600 m.



Figur 4-10 *Fördelningsdiagram för $\text{Log}_{10}(\text{avstånd i meter})$ på x-axel för avstånd mellan konduktiva strukturer med en transmissivitet (T) större än ett givet värde på T . $\text{LOG } T = \log_{10}T$. T givet i m^2/s . Höger vägg.*

4.3 Subvertikala borrhål, transmissivitet

I Tabell 4-6 visas statistik för $\text{Log}_{10}T$ i olika testskalor.

I Figur 4-11 nedan visas fördelningsdiagram för $\text{Log}_{10}T$ i olika testskalor.

Tabell 4-6 Statistik på transmissivitet (T) för skalorna 3, 9, 15, 24 och 30 m baserat på injektionstester med 3 m manschett avstånd i borrhålen Kas02, 05-08, djupintervall -200 till -500 m. n = antal tillgängliga värden för varje skala. Mean = 10^A där A = aritmetiskt medel av $\text{log}_{10} T$. Median = medianvärde för fördelningen av T. $s(\text{log}_{10}T_{\text{tot}})$ = standard avvikelse för $\text{log}_{10} T$. Up.quart respektive Low quart = övre och undre kvartiler för fördelningen av T.

Övre tabell : skalning enligt alternativ 1

Nedre tabell : skalning enligt alternativ 2

S t a t i s t i c s f o r L o g 1 0 T (m ² / s) i n d i f f e r e n t s c a l e s						
Scale (m)	n	Mean	Median	s (Log10 T)	Up. quart.	Low. quart.
3	548	2.0E -009	4.1E -010	1.90	5.0E -008	6.8E -011
9	181	2.0E -008	9.2E -009	1.91	1.2E -006	4.3E -010
15	108	5.3E -008	1.0E -007	1.86	2.4E -006	8.7E -010
24	66	1.6E -007	5.9E -007	1.77	4.3E -006	2.0E -009
30	53	1.8E -007	5.4E -007	1.80	4.5E -006	2.0E -009

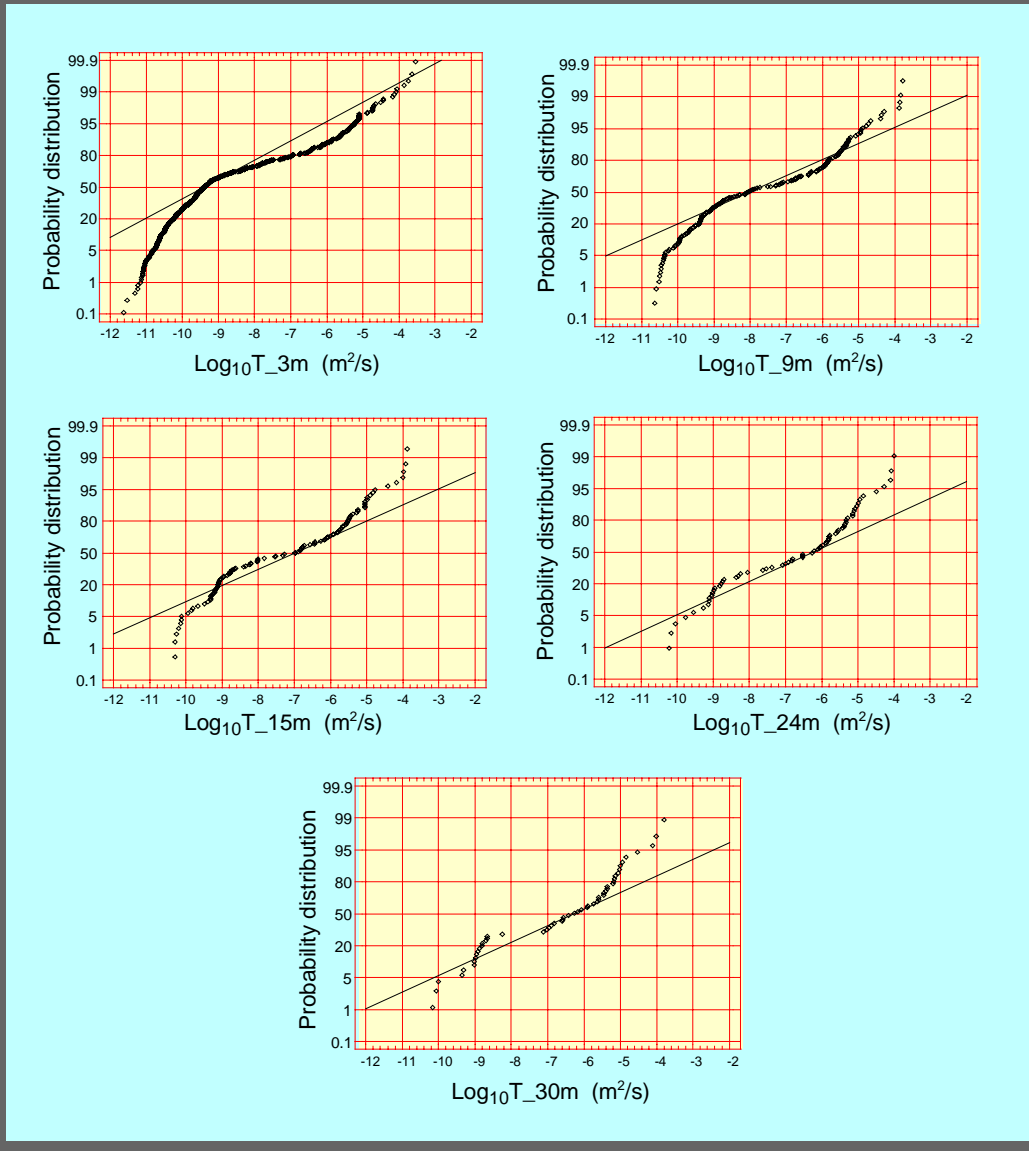
Y:\13080086\KALKYL\3M_TABLE.WK4

S t a t i s t i c s f o r L o g 1 0 T (m ² / s) i n d i f f e r e n t s c a l e s (s c a l e d f r o m 3 m s t a t i s t i c s)

Scale (m)	Mean	s (Log10 T)
3	2.0E -009	1.90
9	1.4E -008	1.50
15	3.5E -008	1.31
24	8.2E -008	1.14
30	1.2E -007	1.06

O:\1311\PD00\13080086\KALKYL\3M_TABLE.WK4

ÄSPÖ HARD ROCK LABORATORY
Probability distribution of $\text{Log}_{10}T$ for injection tests
in KAS02, 05-08, level 200 - 500 meters below sea level.
Scaling to 9, 15, 24 and 30 meters.



3M_FIG.SRF 09/27/0108:23:52

Figur 4-11 Fördelningsdiagram, $\text{Log}_{10}T$.

4.4 Subvertikala borrhål, avstånd mellan strukturer

I *Tabell 4-7* visas avstånden mellan strukturer i KAS02, 05-08.

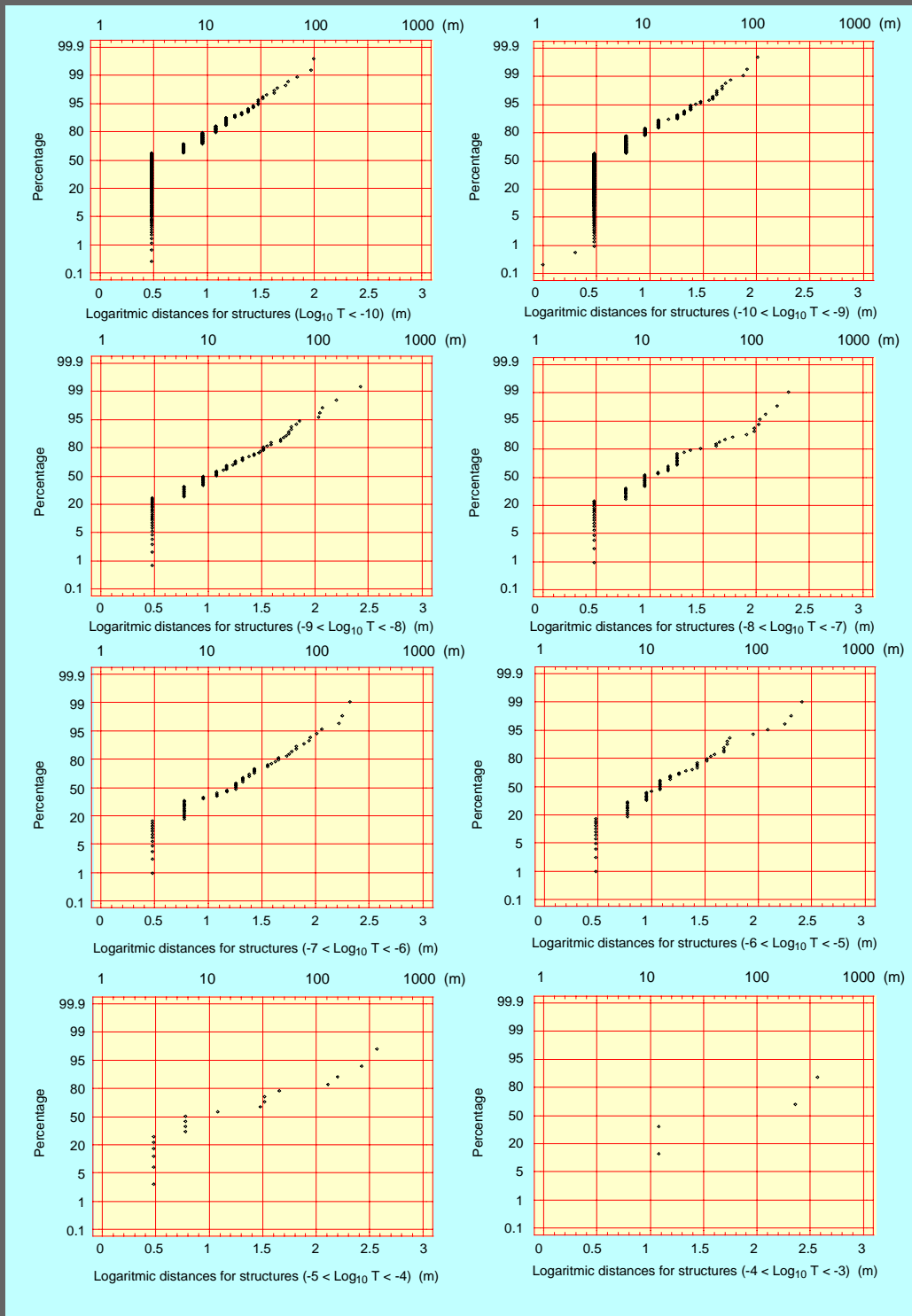
I *Figur 4-12 och 4-13* visas aritmetiska medel och median avstånden mellan konduktiva strukturer i de vertikala borrhålen KAS02, KAS05-08.

Tabell 4-7 Aritmetiska medel och median avstånd mellan strukturer med transmissivitetet (T) inom ett intervall för T eller större än ett givet värde på T baserat på vertikala borrhålen KAS02, 05-08 på Äspö.

Distance between structures when $T > T_j$			Distance between structures when $T_i > T > T_j$			
KAS02, 05 - 08			KAS02, 05 - 08			
T_j	Arithmetic mean distance	Median distance	T_i	T_j	Arithmetic mean distance	Median distance
(m ² /s)	(m)	(m)	(m ² /s)	(m ² /s)	(m)	(m)
1E-011	3.27	3.00	1E-010	1E-011	9.04	3.00
1E-010	4.11	3.00	1E-009	1E-010	8.35	3.00
1E-009	7.57	3.00	1E-008	1E-009	25.22	10.50
1E-008	9.82	3.00	1E-007	1E-008	26.39	9.00
1E-007	13.79	3.00	1E-006	1E-007	32.17	18.00
1E-006	20.88	9.00	1E-005	1E-006	28.89	12.00
1E-005	44.88	6.00	1E-004	1E-005	59.05	6.00
1E-004	156.00	120.00	1E-003	1E-004	156.00	120.00

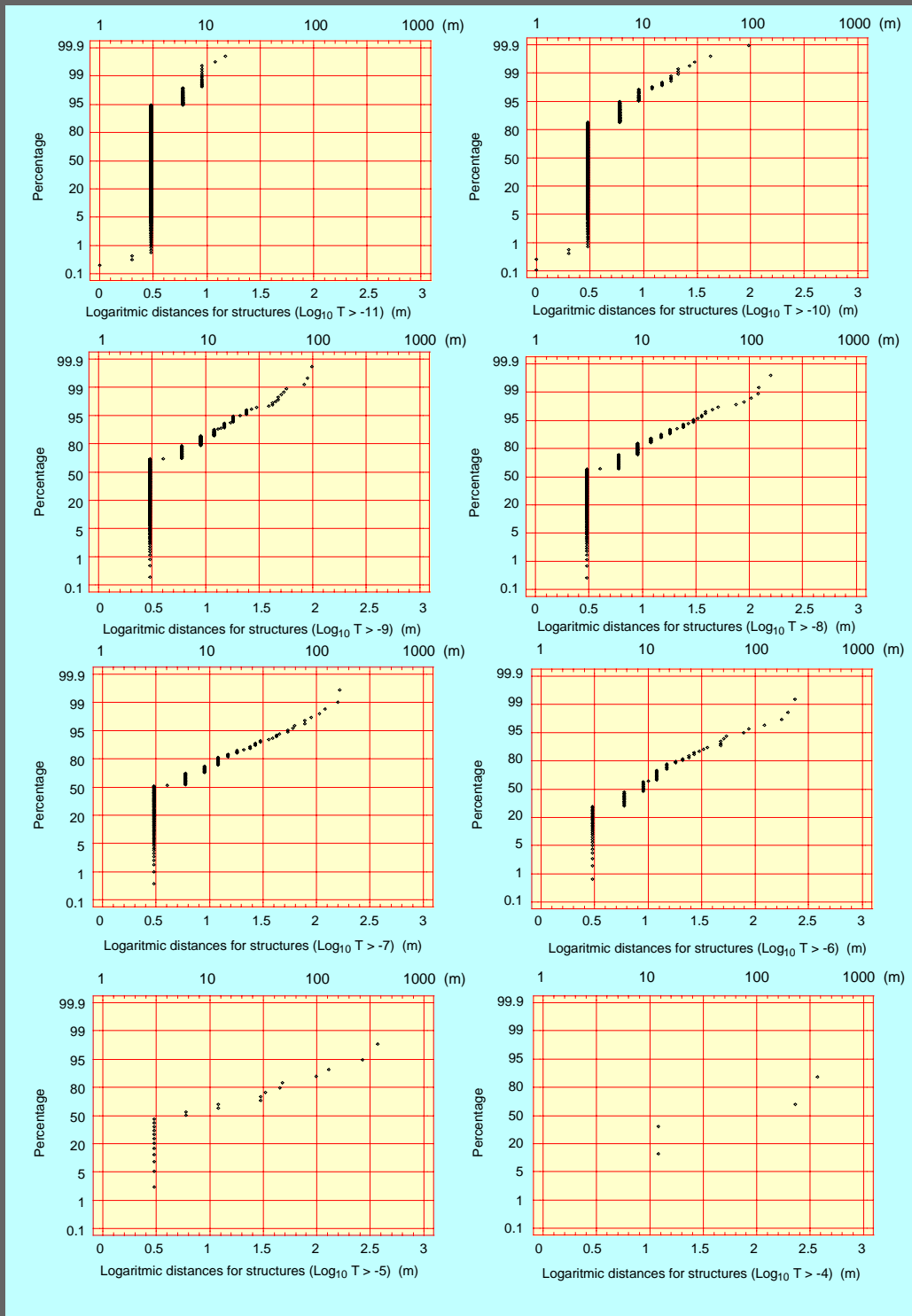
Y:\13080086\Kalkyl\KAS_DIST.WK4

ÄSPÖ HARD ROCK LABORATORY
Normal probability plot for distance between structures.
Scale 3 m. KAS02 and KAS05 - 08.



Figur 4-12 *Fördelningsdiagram för Log_{10} (avstånd i meter) på x-axel för avstånd mellan konduktiva strukturer med en transmissivitet (T) inom ett givet intervall för T . $\text{LOG } T = \log_{10}T$. T givet i m^2/s . Kärnbrorrhål KAS02, KAS0508. Testskala 3 m.*

ÄSPÖ HARD ROCK LABORATORY
Normal probability plot for distance between structures.
Scale 3 m. KAS02 and KAS05 - 08.



Figur 4-13 *Fördelningsdiagram för Log_{10} (avstånd i meter) på x-axel för avstånd mellan konduktiva strukturer med en transmissivitet (T) större än ett givet värde på T . $\text{LOG } T = \log_{10} T$. T givet i m^2/s . Kärnbrorrhål KAS02, KAS0508. Testskala 3 m.*

5 Slutsatser

5.1 Transmissivitet

Beräkningarna visar att transmissiviteten (T) varierar i olika riktningar. Om sprickor är approximativt till storlek och riktning likformigt fördelade i rummet är det störst sannolikhet att sprickor vinkelrätt ett borrhål verkligen skär borrhålet. Med detta synsätt antas att transmissiviteterna för kärnborrhålen i huvudsak representeras av subhorisontella vattenförande sprickor och transmissiviteterna för sondhålen i huvudsak representeras av subvertikala vattenförande sprickor. Analysen giltighet begränsas emellertid inte av detta därför att de utvärderade statistiska egenskaperna primärt gäller borrhålsriktning och kan nyttjas för kvalitativa analyser som avser skillnader i hydrauliska egenskaper mellan borrhål med subvertikal riktning i jämförelse mot subhorisontella borrhål eller för tester av numeriska modeller, t ex DFN (Discrete Fracture Network) modeller.

Sondhål

Sondhålen är mer eller mindre horisontella och riktningen som anges nedan för T är den riktningen i horisontalplanet för ett plan vinkelrätt mot borrhålet (eller mer korrekt borrhålets projektion på horisontalplanet). Används det aritmetiska medelvärdet av $\log_{10}(T)$ ($= A$) som ett karakteristiskt värde för borrhål inom ett visst riktningintervall erhålls följande resultat av max och min värden transmissiviteten ($T_g=10^A$) baserat på sondhålen i spiraldelen av Äspölaboratoriets tunnel :

Horisontell riktning för plan vinkelrätt borrhål (°, Äspö koordinatsystem)	Längdskala för (m)	T_g (m^2/s)
120-140	9	$4 \cdot 10^{-7}$
20-80	9	$1 \cdot 10^{-9}$

Ökas längdskalan för T_g från 3 m till 30 m ökar T_g ca 2.5 gånger och standard avvikelsen $\log_{10}T$ minskar till ca 0,8 av 3 m värdet. Som framgår av tabellen ovan erhålls högst transmissivitet i riktning 120-140° i Äspö's koordinatsystem. Av *Figur 4-1* till 4-4 framgår emellertid att en förhöjd transmissivitet också erhålls i riktning 0-20°.

Kärnborrhål

Motsvarande resultat för kärnborrhålen, där dessa antas kunna approximeras med vertikala borrhål, gav följande resultat:

Riktning för plan vinkelrätt borrhål (°, Äspö koordinatsystem)	Längdskala för (m)	T_g (m^2/s)
Horisontell	9	$2 \cdot 10^{-8}$

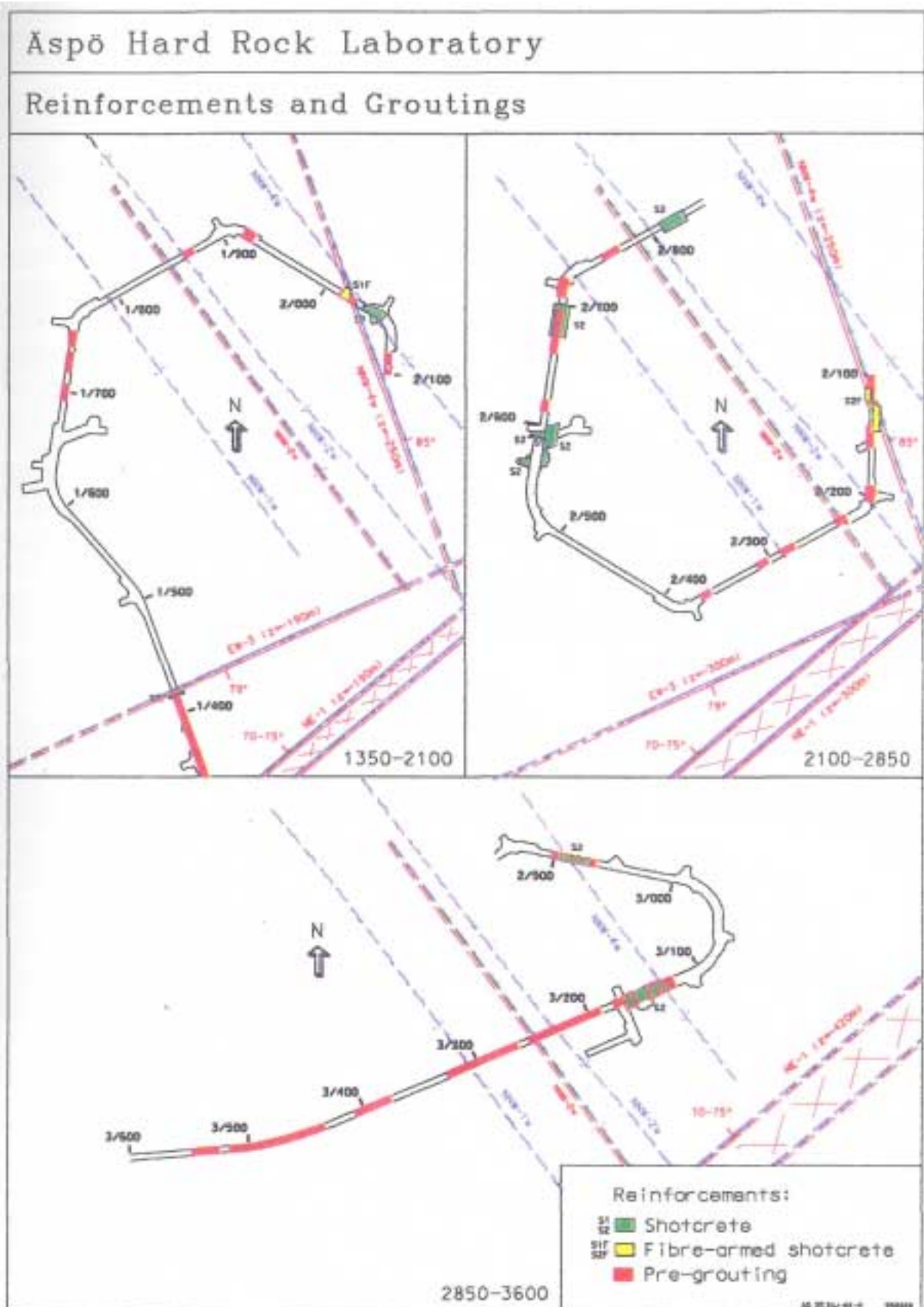
Det två sätten att skala transmissiviteterna ger tämligen lika värden på T_g men standardavvikelseerna är olika. Troligen är standardavvikelseerna enligt alternativ 2 mer realistiska.

Tunneldokumentation

Till viss del styrks bilden ovan av de injekteringar som gjorts i Äspö tunneln. Som framgår av *Figur 5-1* förefaller som om tunnelben i riktningen VNV till NV är mindre injekterade jämfört med andra tunnelben. Injekterade sprickor domineras också av subvertikala sprickor i riktningen VNV till NV /*Hermansson, 1995*/. Interferenstester indikerar att det finns ett antal konduktiva strukturer, kallade NNW strukturer, som skär tunnelspiralen i ca $N35^\circ V$ /*Rhén et al, in prep*/. Dessa tolkas vara spricksvärmar som sammansätts av N-S strukturer och VNV till NV strukturer och som bildar konduktiva stråk i ca $N35^\circ V$.

5.2 Avstånd mellan strukturer

Aritmetiskt medelavstånd (D_a) mellan hydrauliska strukturer med en transmissivitet (T) större än ett givet värde på transmissiviteten (T_j) beräknades både för sondhålen och kärnborrhålen. Förutsättningarna skiljer sig något åt. Analysen av sondhålsdata baseras på inflöden till sondhålet under borring som dokumenterades till position och kvantitet. Inflödesmängd användes för att fördela utvärderat T för hela borrhålet på inflödena till borrhålet. Inflödes positionerna projicerades sedan på centrumlinjen för tunneln. För kärnborrhålen nyttjades T för varje 3 m sektion.



Figur 5-1 Förstärkningar utförda i Äspötunneln.

Sondhål, T_j (m^2/s)	Aritmetiskt medelavstånd (D_a) (m)
$T > 10^{-5}$	70
$T > 10^{-7}$	35
$(T > 10^{-9})$	20)
Kärnborrhål, T_j (m^2/s)	Aritmetiskt medelavstånd (D_a) (m)
$T > 10^{-5}$	45
$T > 10^{-7}$	14
$T > 10^{-9}$	8

Sannolikt är avstånden baserat på sondhålsdata överskattade för åtminstone $T_j < 10^{-8} m^2/s$ på grund av metodiken att uppskatta inflödenas antal, position och kvantitet. Mindre inflöden kan ej urskiljas om man tidigare påträffat större inflöden.

Avstånden mellan hydrauliska strukturer med $T > T_j$ är lognormal fördelad. Detta innebär att det finns områden där avstånden tenderar att vara mindre eller mycket mindre än det aritmetiska medelvärdet för ett visst T_j , strukturerna har "klumpat ihop sig". Utanför dessa områden är då givetvis medelavstånden större än det aritmetiska medelvärdet.

5.3 Generella slutsatser

Bara sett ur deponeringshålsperspektiv borde dessa läggas horisontellt i WNW-NW riktning om inflödet skall minimeras till hålet. Storleken på de skalade transmissiviteterna får betraktas som osäker men bedöms inte påverka slutsatsen att de hydrauliska egenskaperna varierar relativt mycket i olika riktningar.

Referenser

Cooper H H and Jacob C E, 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. Am. Geophys. Union Trans. Vol. 27, pp 526-534.

Hermanson J, 1995. Structural geology of water-bearing fractures. PR 25-95-23.

Rhén I (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, Äspö HRL - Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986-1995. SKB TR 97-06.

Wikberg P (ed), Gustafson G, Rhén I, Stanfors R, 1991. Äspö Hard Rock Laboratory. Evaluation and conceptual modelling based on the pre-investigations. SKB TR 91-22.

BILAGA 3

Projekt JADE Geovetenskapliga studier

Hydrogeologiska analyser - förändring av antal möjliga deponeringspositioner med hänsyn till anisotropi hos hydraulisk konduktivitet

Lars Rosén
Gunnar Gustafson

Geologiska institutionen
Chalmers tekniska högskola

September 1996

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas egna och behöver nödvändigtvis inte sammanfalla med SKB's.

Nyckelord: Djupförvar, deponeringsmetoder, anisotropi, hydraulisk konduktivitet

Sammanfattning

Föreliggande analys har gjorts inom de hydrogeologiska studierna i JADE och omfattar en analys av betydelsen av den hydrauliska konduktivitetens anisotropi för horisontell respektive vertikal deponering. På grund av anisotropin hos den hydrauliska konduktiviteten kommer det värde på konduktiviteten som kan accepteras med avseende på deponeringstekniken att variera med deponeringshålens orientering.

Jämförelsen av lämpligheten mellan horisontell och vertikal deponering har gjorts med hjälp av en geostatistisk analys med Bayesian Markov Geostatistisk Modell (BayMar). Den statistiska analys som gjorts av VBB Viak AB (Rhén och Forsmark, 1996) har härvid använts som ett underlag. Arbetet består av två delar:

1. *Beräkning av en isotrop hydraulisk konduktivitet.* Utifrån information om anisotropin hos den hydrauliska konduktiviteten har en isotrop, ekvivalent konduktivitet beräknats för varje gjord konduktivitetstest.
2. *Generering av sannolikhetskartor med hänsyn till kritiska gränser.* De isotropa ekvivalenterna har använts för att generera kartor över sannolikheten att en kritisk ekvivalent kravgräns inte kan uppfyllas. Denna kommer på grund av anisotropin att variera med deponeringshålens orientering.

För att beskriva antalet möjliga deponeringspositioner i olika deponeringsriktningar används ett s.k. hydrauliskt positioneringsindex (HPI), vilket definieras som sannolikheten att en deponeringsposition är acceptabel givet gällande kravgränser för hydrauliska egenskaper.

Utifrån de genomförda beräkningarna har jämförelse mellan deponering i följande riktningar gjorts:

- Vertikal deponering
- Horisontell deponering i maximal anisotropiriktning
- Horisontell deponering i minimal anisotropiriktning
- Horisontell deponering i TBM-tunnelns orientering

Jämförelserna har gjorts för nivån -420 meter inom Äspölaboratoriet, vilket är den nivå där TBM-tunneln är belägen. Den genomförda analysen indikerar, för ett hypotetiskt slutförvar placerat i Äspö, tydliga skillnader mellan olika riktningar hos deponeringshålen med hänsyn till anisotropin hos hydraulisk konduktivitet. Deponering i den maximala anisotropiriktningen, dvs c:a N50°W i Äspös koordinatsystem, skulle enligt beräkningarna kunna ge dubbelt så många acceptabla kapselpositioner som deponering i den minimala anisotropiriktningen, N40°E. Detta eftersom deponering i den minimala anisotropiriktningen innebär ökad sannolikhet att penetrera vattenförande zoner. Beräkningar av HPI har beräknats för hypotetiska kravgränser varierande mellan 10^{-9} - 10^{-7} m/s. Enligt beräkningarna varierar HPI mellan 0.3-0.6 och 0.6-0.9 för maximal respektive minimal anisotropiriktning. Vertikal deponering intar en mellanställning med HPI-värden mellan 0.5-0.8.

I jämförelsen mellan vertikal och horisontell deponering visar analysen att horisontell deponering kan ge avsevärda förbättringar, men att detta kräver en noggrann studie av anisotropin hos den hydrauliska konduktiviteten.

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	3
1 Inledning.....	7
2 Behandling av anisotropi	9
3 Resultat.....	13
4 Slutsatser	29
5 Referenser	31
Appendix A: Matematisk teori för behandling av anisotropi	33
Appendix B: Beskrivning av BayMar.....	37

1 Inledning

Målsättningen med de hydrogeologiska analyserna är att ge ett underlag för en relativ bedömning av lämpligheten för följande tre deponeringsalternativ:

- KBS-3 V, Vertikal deponering
- KBS-3 H, Horisontell deponering
- MLH, Horisontell deponering i Medel Långa Hål

KBS-3 utgör referensalternativ, vilket tidigare studerats ingående. En utgångspunkt för de hydrogeologiska analyserna har varit att de skall göras på data från Äspölaboratoriet.

Inom de hydrogeologiska analyserna i projektet omfattar denna rapport en studie av betydelsen av den hydrauliska konduktivitetens anisotropi för horisontell respektive vertikal deponering. Någon jämförelse mellan KBS-3 H och MLH har inte gjorts inom ramen för denna rapport eftersom utformningen av MLH ännu inte är färdigställd.

Jämförelsen av lämpligheten mellan horisontell och vertikal deponering har gjorts med hjälp av en geostatistisk analys. På grund av anisotropin hos den hydrauliska konduktiviteten kommer det värde på konduktiviteten som kan accepteras med avseende på deponeringstekniken att variera beroende på deponeringshålens orientering. I den föreliggande studien har en analys av befintliga konduktivitetsdata och den statistiska analys som gjorts av VBB Viak AB (Rhén och Forsmark, 1996) använts som ett underlag för att beräkna antalet möjliga deponeringspositioner i olika deponeringsriktningar.

Utifrån de genomförda beräkningarna har jämförelse mellan deponering i följande riktningar gjorts:

- Vertikal deponering
- Horisontell deponering i maximal anisotropiriktning
- Horisontell deponering i minimal anisotropiriktning
- Horisontell deponering i TBM-tunnelns orientering

2 Behandling av anisotropi

Vid en test i ett anisotropt, tvådimensionellt medium representerar de transmissiviteter som bestäms av testen, T_T , geometriska mediet av huvudriktningarna x och y, så att (Bear, 1972), så att:

$$T_T = \sqrt{T_x T_y} \quad (2.1)$$

I ett tredimensionellt medium och för ett smalt borrhål är borrhålsradien, r_w , mycket mindre än borrhålslängden, L . För ett borrhål i en huvudriktning, z, gäller således:

$$T_{xy} \approx \sqrt{T_x T_y} = L \sqrt{K_x K_y} \quad (2.2)$$

eftersom

$$T_x \approx LK_x \quad \text{och} \quad T_y \approx LK_y \quad (2.3)$$

Enligt Bear (1979) kan flöde i ett anisotropt medium beskrivas med en ekvivalent konduktivitet, K_e , och skaltransformationen i anisotropins huvudriktningar x, y och z. K_e kan beräknas som:

$$K_e = \sqrt[3]{K_x K_y K_z} \quad (2.4)$$

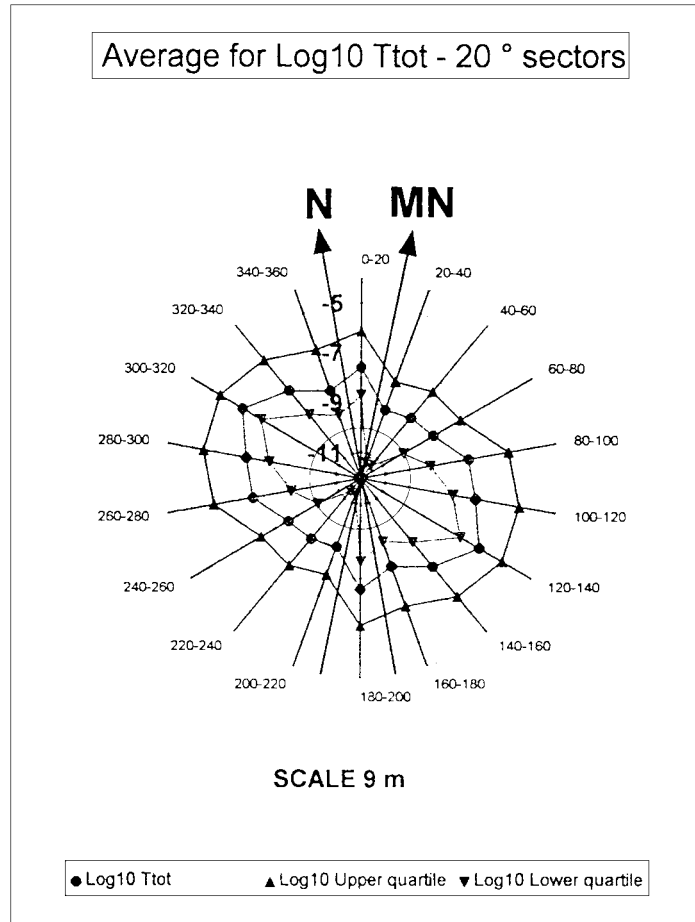
Dessutom gäller att:

$$\frac{1}{L} \sqrt[3]{(T_{xy} T_{yz} T_{zy})} = \frac{1}{L} (L \sqrt{K_x K_y} L \sqrt{K_y K_z} L \sqrt{K_z K_x})^{1/3} = \sqrt[3]{K_x K_y K_z} = K_e \quad (2.5)$$

Således kan den ekvivalenta konduktiviteten bestämmas om transmissiviteten i de tre huvudriktningarna är kända. I Appendix A beskrivs närmare den matematiska bakgrunden för transformationen av transmissivitetsdata från tester till en ekvivalent, isotrop hydraulisk konduktivitet. I det föreliggande arbetet har använts transmissivitetsdata från packertest skalade till 9-metersskala (Rhén och Forsmark, 1996). Data för huvudriktningarna redovisas i Tabell 2.1 och en grafisk representation av anisotropin i 9-metersskala redovisas i Figur 2.1.

Tabell 2.1 Värderna på transmissivitet för huvudriktningarna med hänsyn till anisotropin (från Rhén och Forsmark, 1996).

Borrhålsriktning	Medelvärde log T [m/s]	T [m/s]
x 40°	-6.44	$T_{yz}=3.63 \cdot 10^{-7}$
y -50°	-8.9	$T_{xz}=1.25 \cdot 10^{-9}$
z Vertikal	-8.04	$T_{xy}=9.12 \cdot 10^{-9}$



Figur 2.1 Grafisk beskrivning av anisotropin för hydraulisk konduktivitet i 9-metersskala i Äspölaboratoriet (Rhén och Forsmark, 1996)

Enligt ekvation (A.20) i Appendix A ger dessa värden en ekvivalent konduktivitet, $K_e = 1.78 \cdot 10^{-9}$ m/s.

De anisotropiberoende faktorerna b_x , b_y och b_z (se ekvationen A.22) kan beräknas enligt följande:

$$b_x = L^2 \frac{K_e^2}{T_{yz}^2} = 0.00194$$

$$b_y = L^2 \frac{K_e^2}{T_{xz}^2} = 164.2$$

$$b_z = L^2 \frac{K_e^2}{T_{xy}^2} = 3.09$$

Vid beräkning av kritiska inflöden har en hypotetisk kritisk konduktiviteten K'_{cr} varierats mellan 10^{-9} - 10^{-7} m/s. Gränsen 10^{-9} m/s har tidigare diskuterats av Rosén och

Gustafson (1995). Kravgränsen varierades inom vad som bedömdes vara realistiska värden dels eftersom någon slutgiltig kravgräns ännu inte definierats, dels eftersom det är av intresse att se hur möjligheterna för deponering varierar med hänsyn till hur kravgränsen sätts. Utifrån ekvation (A.19) och (A.20) i Appendix A kan det kritiska K_{ecr} som skulle ge samma inläckage som K'_{cr} beräknas för en godtycklig riktning (α, β) enligt:

$$K_{ecr} = K'_{cr} \frac{1}{f} \left[1 + \frac{\ln f}{\ln(L / r_w)} \right] \quad (2.6)$$

I Tabell 2.2 redovisas de värden på K_{ecr} som användes för de fyra analyserade riktningarna.

Tabell 2.2 Värden på transformationsfaktorer och K_{ecr} för de fyra jämförda riktningarna och tre olika hypotetiska kravgränser.

Borrhåls- riktning	f	K_{ecr} för $K'_{cr} = 10^{-9}$ m/s	K_{ecr} för $K'_{cr} = 10^{-8}$ m/s	K_{ecr} för $K'_{cr} = 10^{-7}$ m/s
Vertikalt	0.57	$1.6 \cdot 10^{-9}$	$1.6 \cdot 10^{-8}$	$1.6 \cdot 10^{-7}$
Maximal anisotropiriktning	0.078	$7.2 \cdot 10^{-9}$	$7.2 \cdot 10^{-8}$	$7.2 \cdot 10^{-7}$
Minimal anisotropiriktning	22.7	$3.3 \cdot 10^{-11}$	$3.3 \cdot 10^{-10}$	$3.3 \cdot 10^{-9}$
TBM-tunnelns riktning	14.6	$1.0 \cdot 10^{-10}$	$1.0 \cdot 10^{-9}$	$1.0 \cdot 10^{-8}$

Med hänsyn till dessa värden på K_{ecr} genererades på förvarsdjup kartor beskrivande sannolikheter att respektive kravgräns uppfylls. Som förvarsdjup valdes 420 meter under havsnivån, vilket är den nivå där TBM-tunneln placerats i Äspölaboratoriet.

3 Resultat

Med hänsyn till de beräknade kritiska nivåerna på den hydrauliska konduktiviteten som redovisades i Tabell 2.2 framställdes sannolikhetskartor på försvarsdjup vid Äspö med hjälp av BayMar. Metodiken beskrivs mera utförligt i Appendix B.

Beräkningarna baserades på följande data:

- Sondhålsdata för tunnelsektion 1400-3600 meter.
- Data från injektionstester, med tre meters manschettintervall för djupintervallet 200-500 meter under havsytan, i kärnborrhålen KAS02 samt KAS05-08.

Beräkningarna gjordes för nivån -420 meter, vilket är TBM-tunnelns nivå, och inom följande område i Äspös koordinatsystem:

Min x: 1700 Max x: 2400

Min y: 6900 Max y: 7600

Beräkningarna gjordes med en cellstorlek av 10x10x10 meter, vilket gav en modell med 72x72 celler i horisontalplanet och 50 celler i djupled. Vid BayMar-analysen konstaterades att konduktiviteten har korta influenslängder för de valda kritiska gränserna, i storleksordningen 30 - 50 meter. Detta innebär att det är endast inom dessa avstånd från borrhålen som konduktivitetstesterna givit någon information till sannolikhetskartorna. BayMar-modellen kräver att en skattning av den förväntade fördelningen i en helt godtyckligt vald punkt anges som ingångsvärde, eller *a priori* skattning, av alla okända celler i modellen. Vanligen ansätts den stationära, eller procentuella, fördelningen för den aktuella parametern.

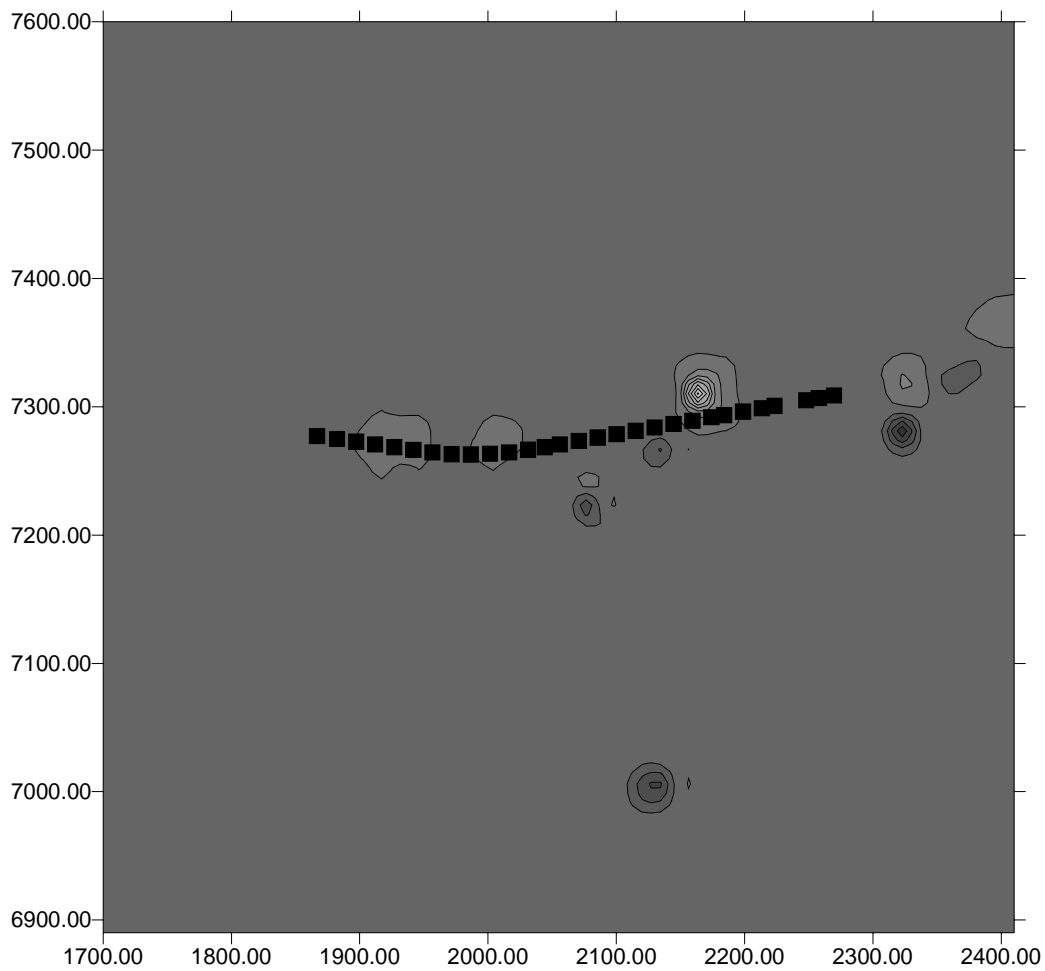
I föreliggande fall baserades *a priori* skattningarna på konduktivitetmätningar genomförda på nivåer mellan 350 och 500 meters djup. På grund av de korta influenslängderna förändrades således inte *a priori*-skattningen vid uppdateringen för en stor del av det beräknade området. Som *a priori*-skattning i modellen valdes den stationära fördelningen för respektive fall, se Tabell 3.1.

Tabell 3.1 *A priori*-skattningar i BayMar-modellen.

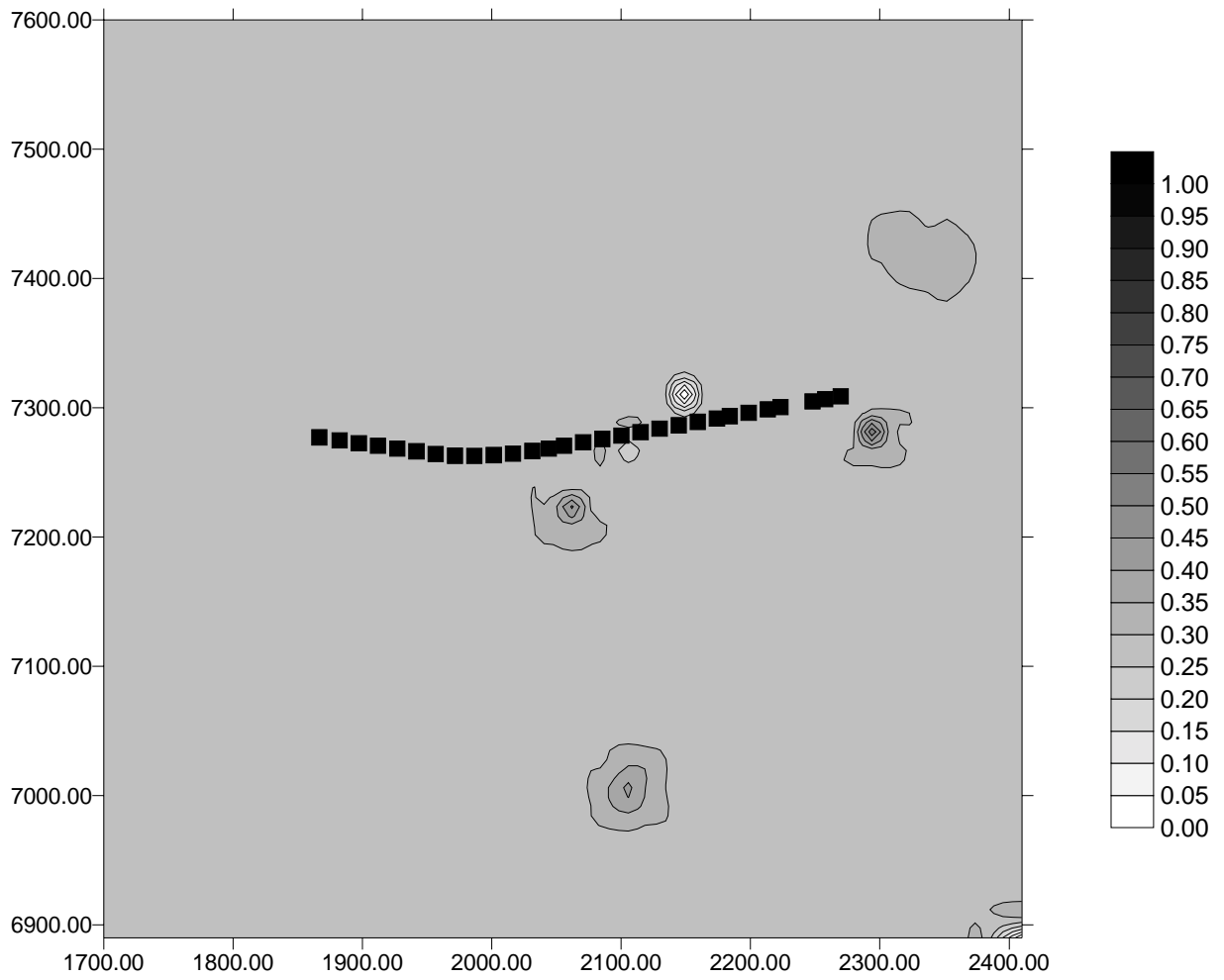
	HPI [vertikal]	HPI [max anisotropi]	HPI [min anisotropi]	HPI [TBM]
$K'_{cr} = 10^{-9}$ m/s	0.53	0.60	0.30	0.32
$K'_{cr} = 10^{-8}$ m/s	0.63	0.74	0.45	0.47
$K'_{cr} = 10^{-7}$ m/s	0.81	0.90	0.57	0.59

Resultaten presenteras som kartor visande ett hydrauliskt positioneringsindex, HPI. Positioneringsindex har tidigare definierats av Rosén och Gustafson (1995) som sannolikheten att en kapselposition är acceptabel givet gällande kravgränser för inverkan parametrar. HPI definieras således analogt med definitionen av Rosén och Gustafson (1995), men specifikt med hänsyn till kravgränser för hydraulisk konduktivitet. Resultatkartorna redovisas på följande sidor.

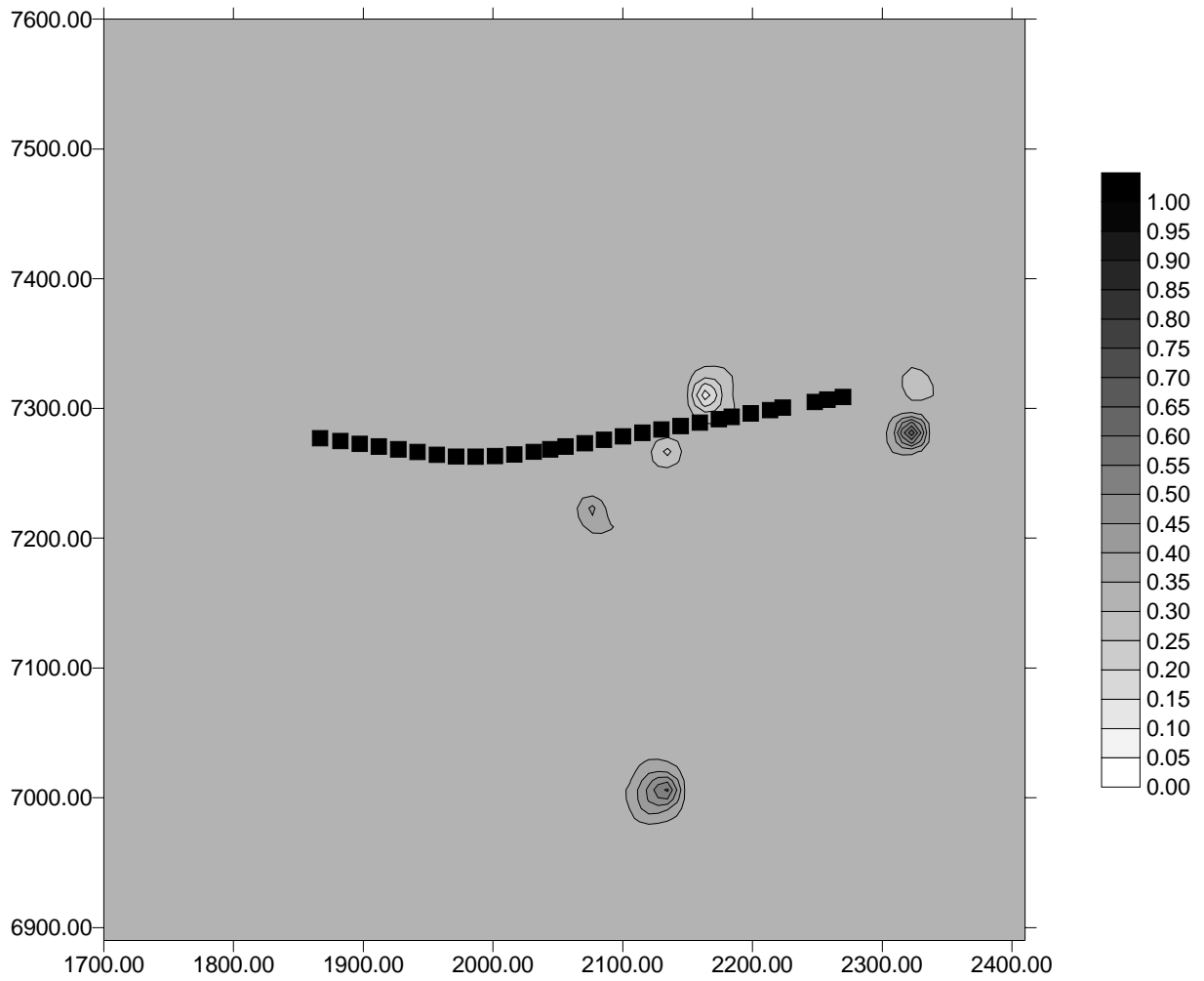
HPI horisontell deponering i maximal anisotropiriktning, $K_{cr} = 10E-9$ m/s
(TBM-tunneln markerad med streckad linje)



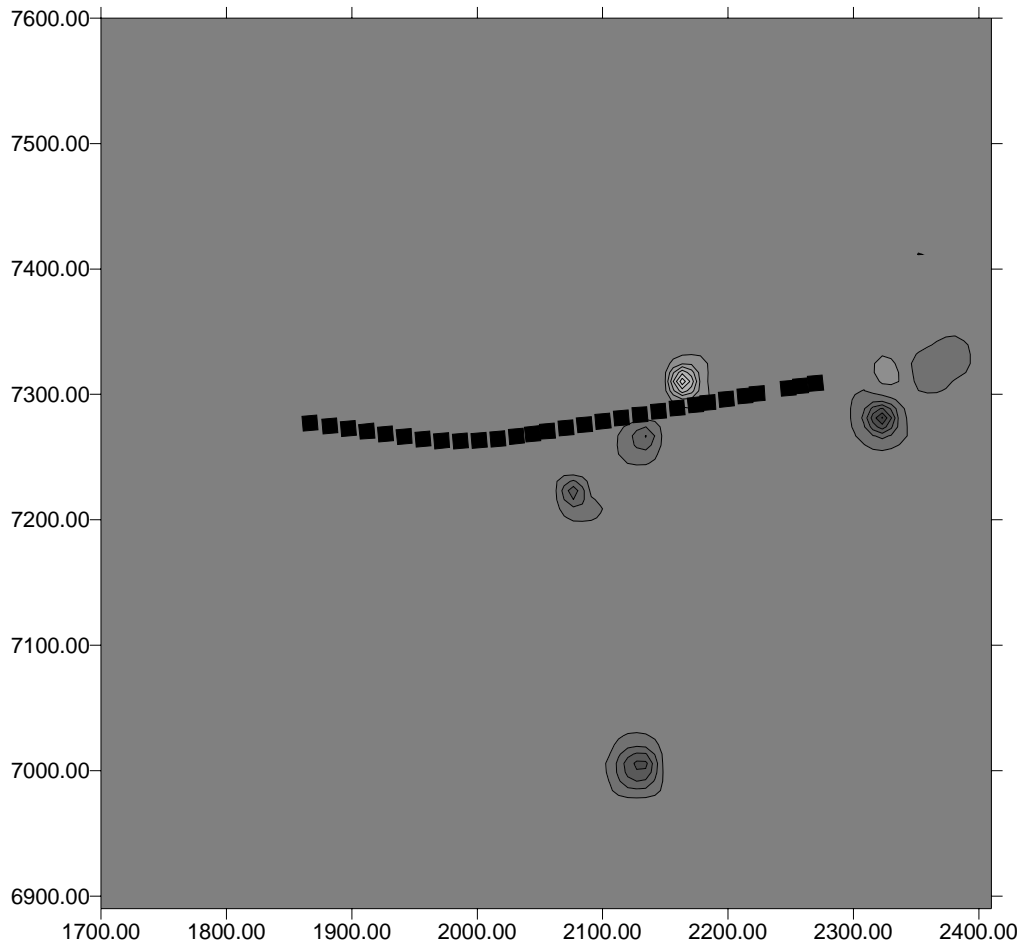
HPI horisontell deponering i minimal anisotropiriktning, $K_{cr} = 10E-9$ m/s
(TBM-tunneln markerad med streckad linje)



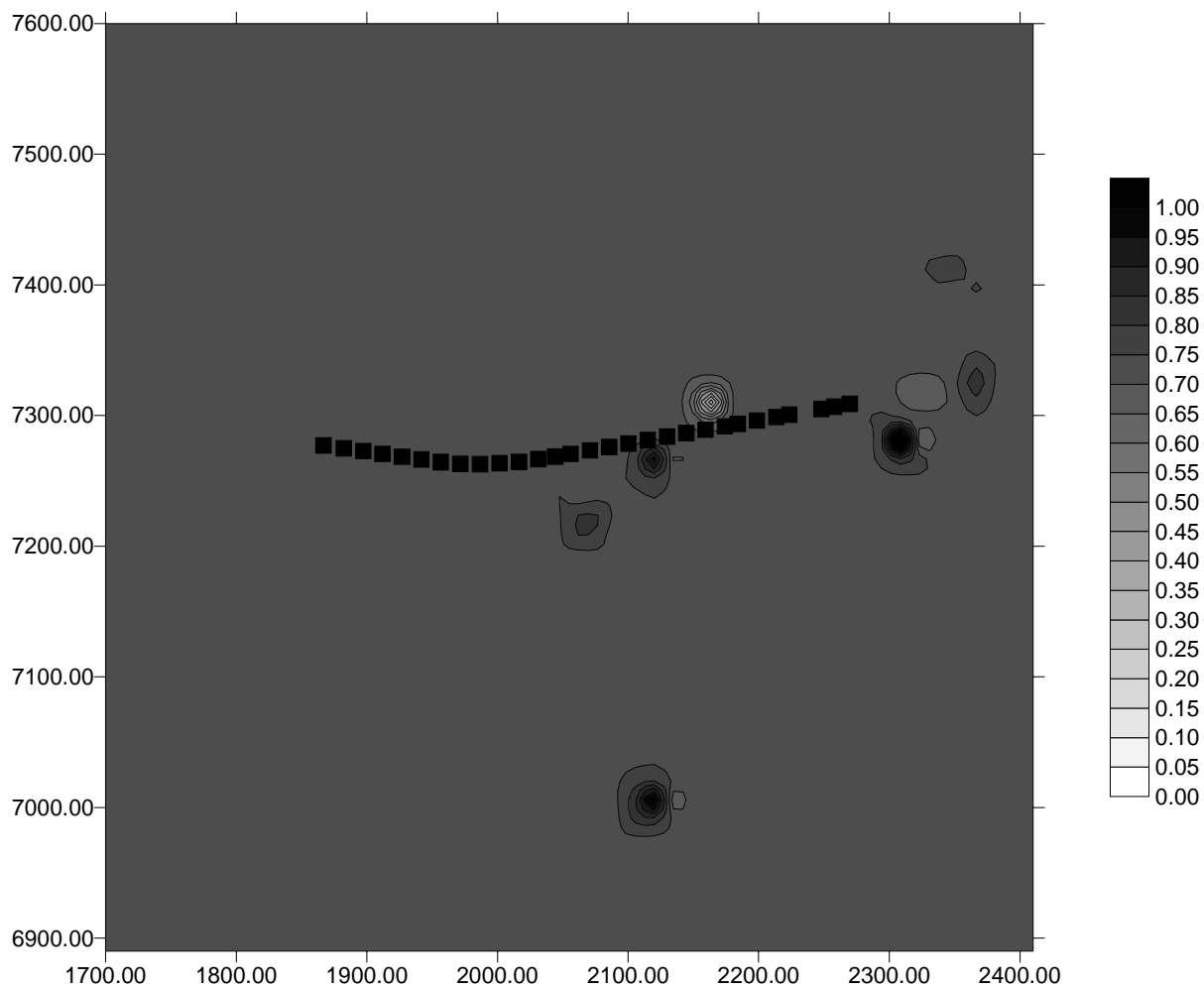
HPI horisontell deponering i tbm-tunnelns riktning, $K_{cr} = 10E-9$ m/s
(TBM-tunneln markerad med streckad linje)



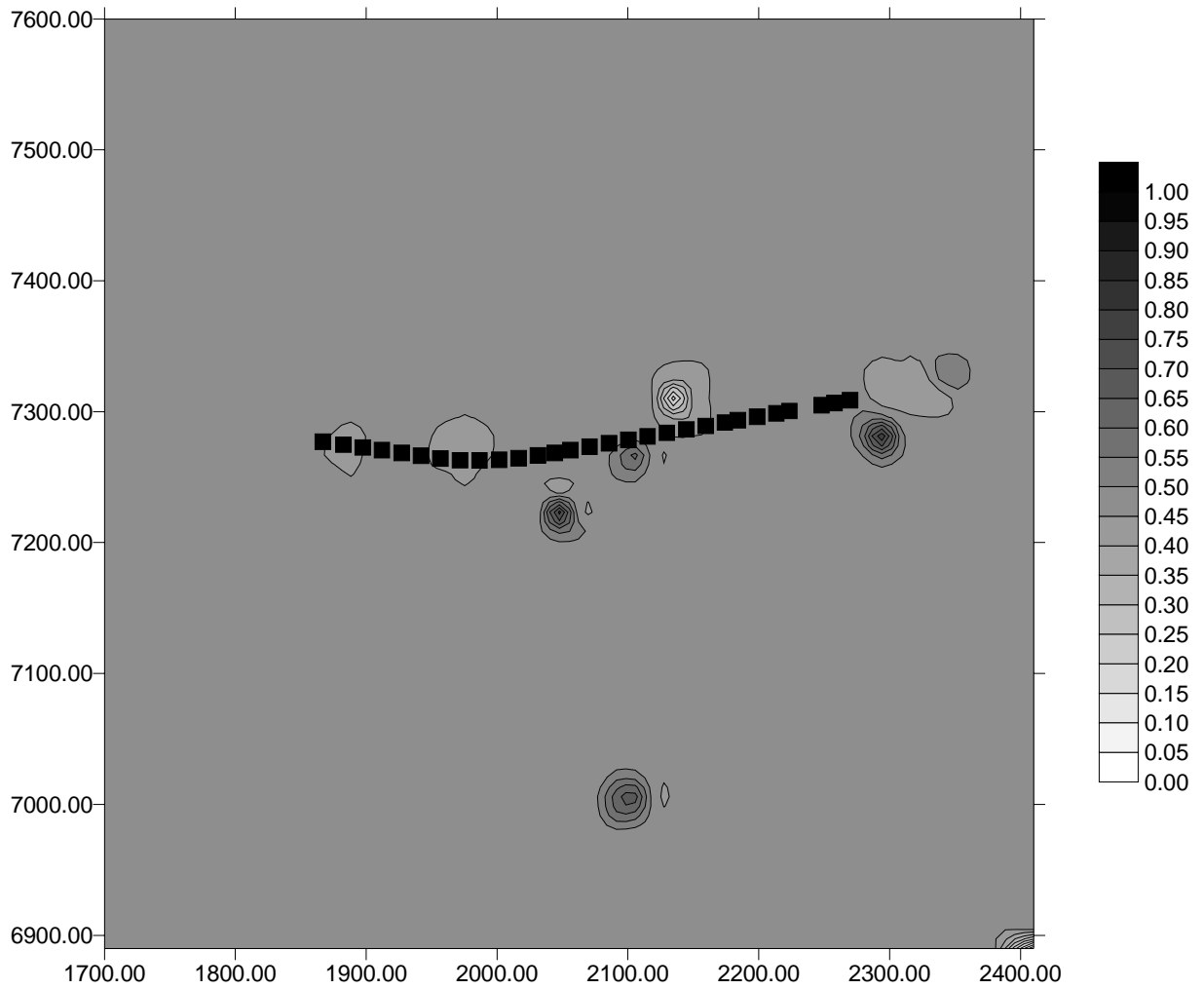
HPI vertikal deponering, $K_{cr} = 10E-9$ m/s
(TBM-tunneln markerad med streckad linje)



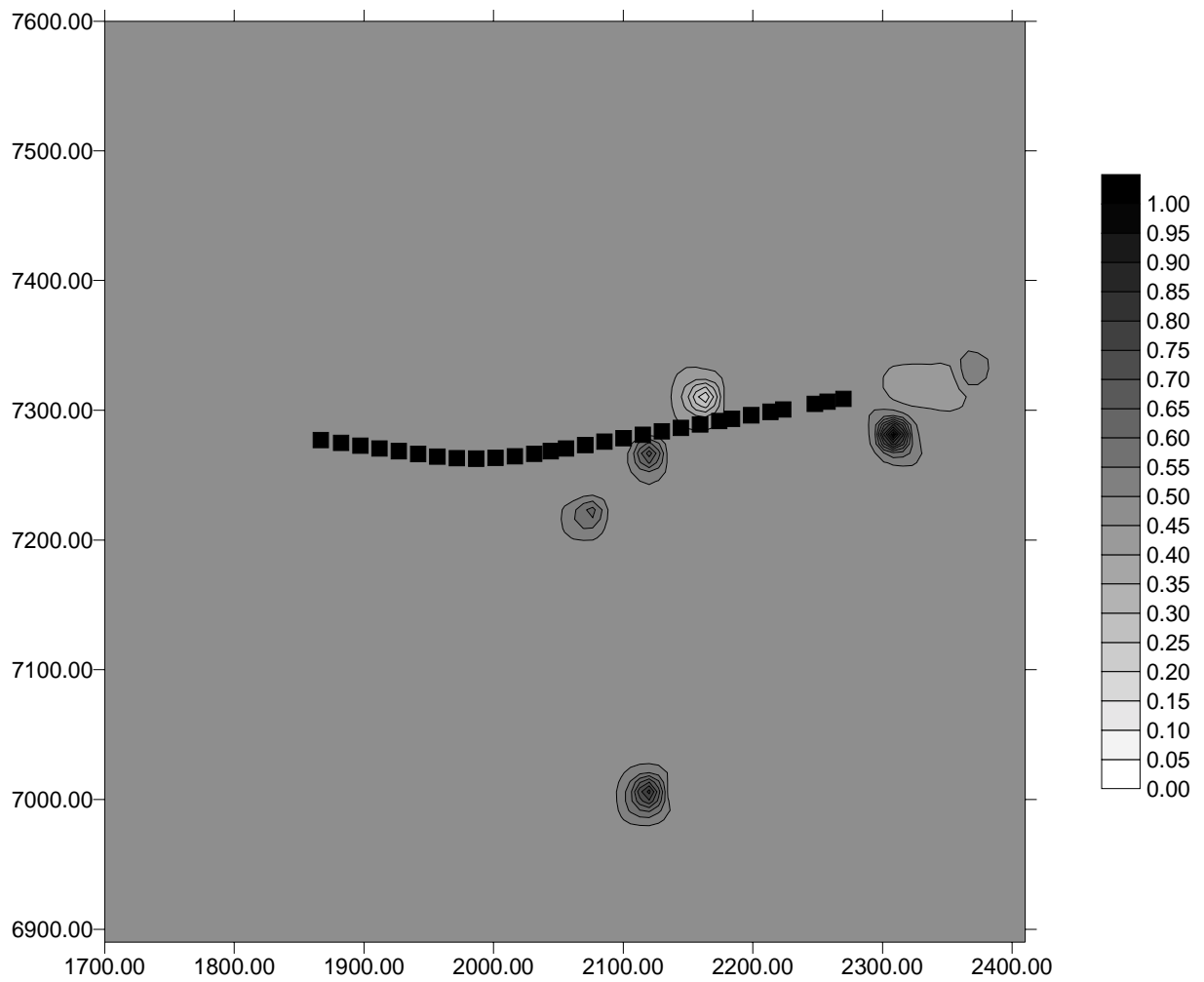
HPI horisontell deponering i maximal anisotropiriktning, $K_{cr} = 10E-8$ m/s
(TBM-tunneln markerad med streckad linje)



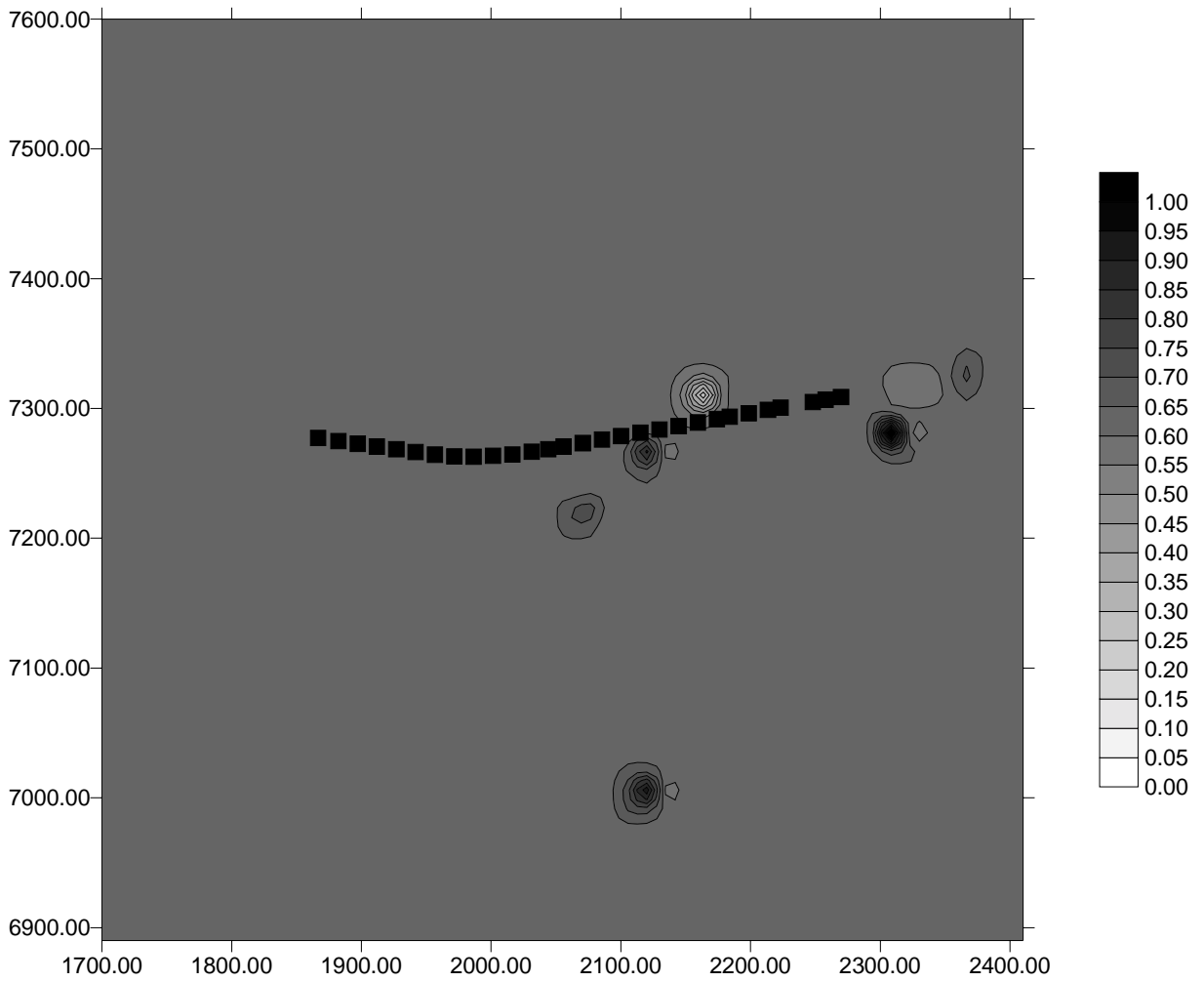
HPI horisontell deponering i minimal anisotropiriktning, $K_{cr} = 10E-8$ m/s
(TBM-tunneln markerad med streckad linje)



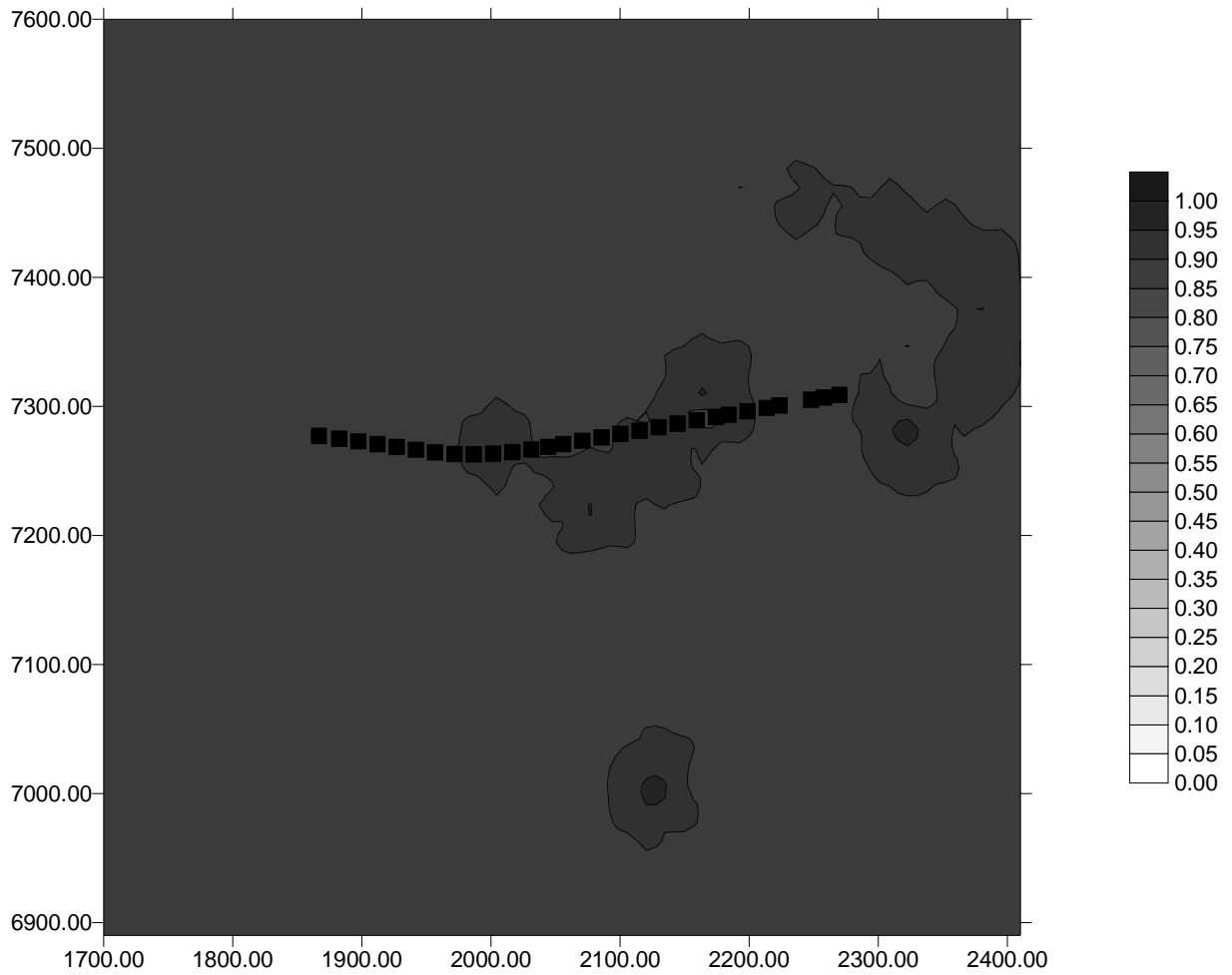
HPI horisontell deponering i tbm-tunnelns riktning, $K_{cr} = 10E-8$ m/s
(TBM-tunneln markerad med streckad linje)



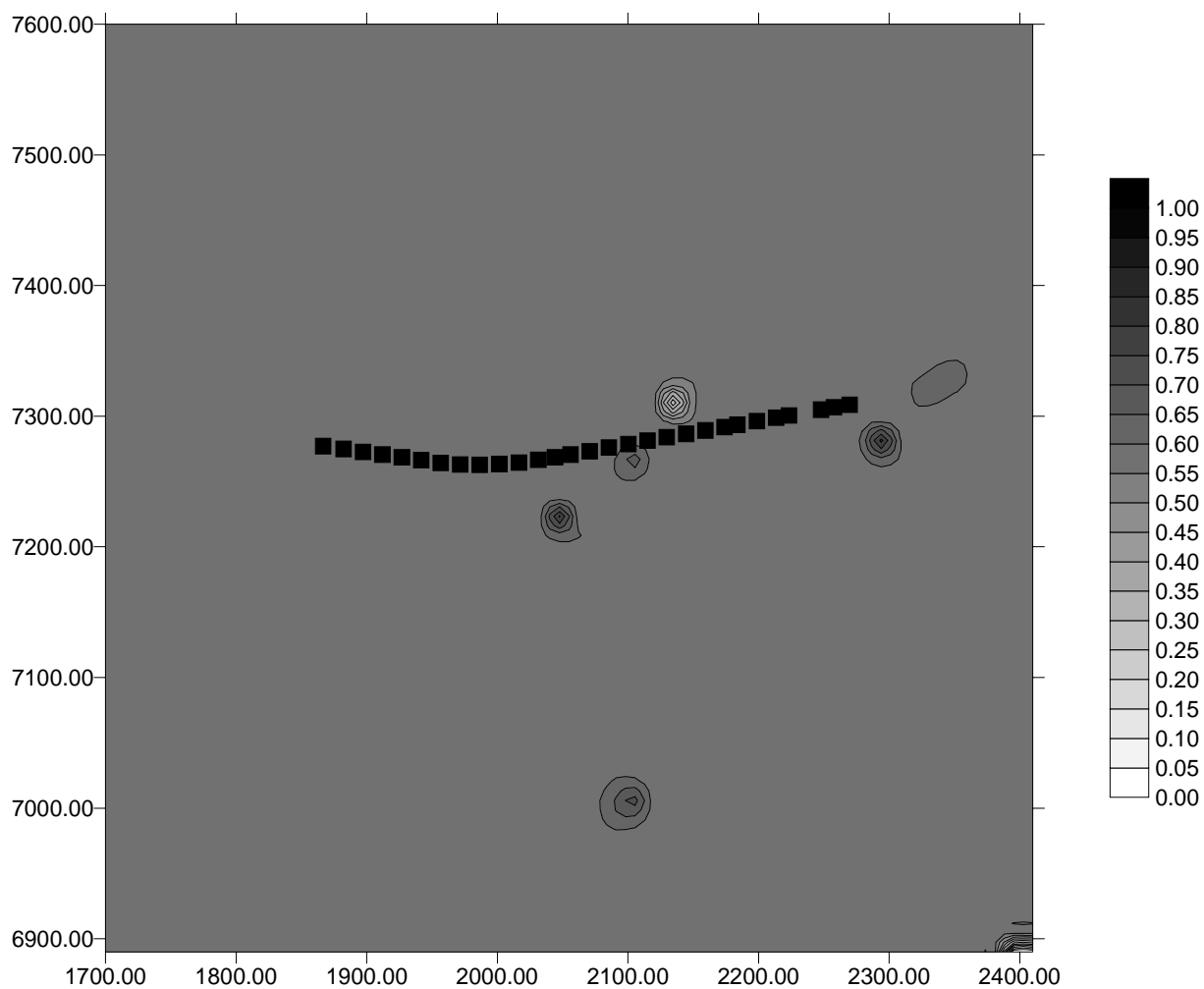
HPI vertikal deponering, $K_{cr} = 10E-8$ m/s
(TBM-tunneln markerad med streckad linje)



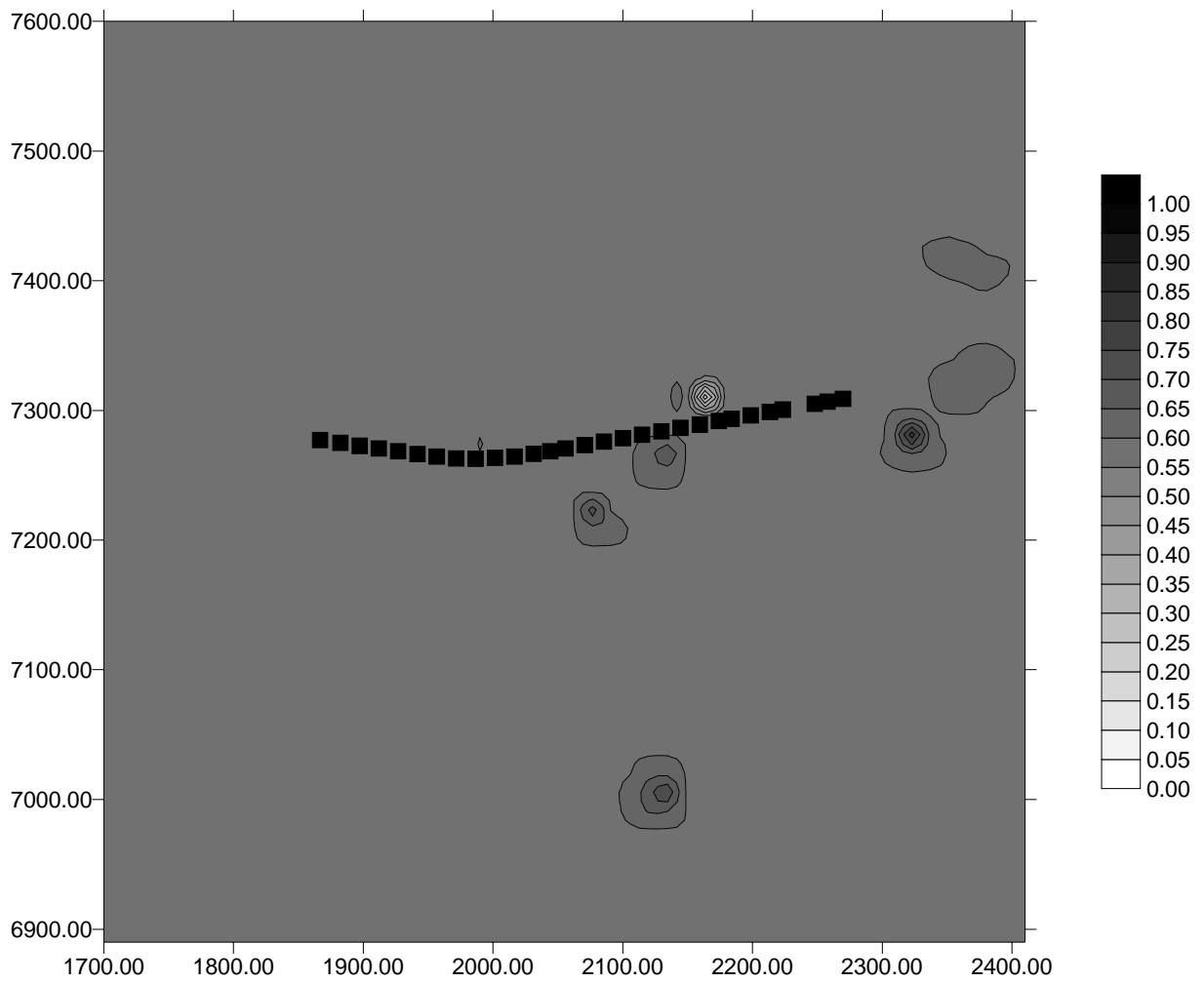
HPI horisontell deponering i maximal anisotropiriktning, $K_{cr} = 10E-7$ m/s
(TBM-tunneln markerad med streckad linje)



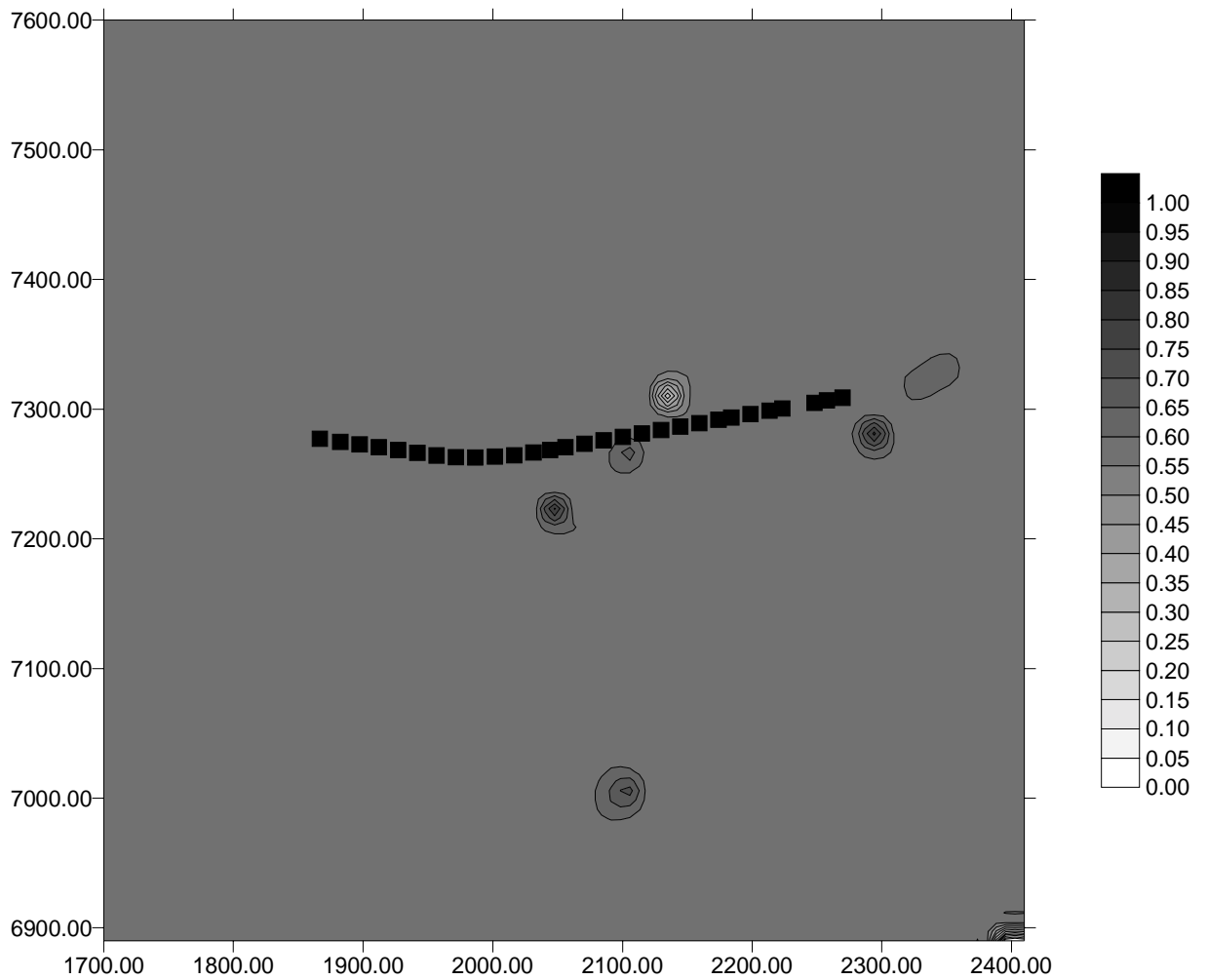
HPI horisontell deponering i minimal anisotropiriktning, $K_{cr} = 10E-7$ m/s
(TBM-tunneln markerad med streckad linje)



HPI horisontell deponering i tbn- tunnelns riktning, $K_{cr} = 10E-7$ m/s
(TBM-tunneln markerad med streckad linje)



HPI vertikal deponering, $K_{cr} = 10E-7$ m/s
(TBM-tunneln markerad med streckad linje)

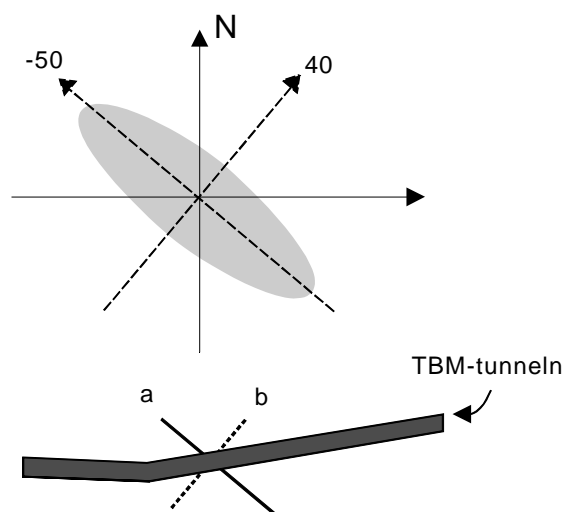


I Tabell 3.2 redovisas ett globalt HPI för respektive riktning över hela ytan. Det globala HPI-värdet är medelvärdet för alla cellerna i kartan och beskriver således hur stor andel av alla celler som bedöms kunna användas för deponering med hänsyn till gällande kravgränser. Dessa värden är nära nog exakt desamma som *a priori*-skattningen. Orsaken till detta är de korta influenslängderna, vilket medför mycket små förändringar av HPI-värdet mellan *a priori*- och de uppdaterade *posteriori*-skattningarna.

Tabell 3.2 Beräknade globala HPI-värden för hela kartområdet.

	HPI [vertikal]	HPI [max anis.]	HPI [min anis.]	HPI [TBM]
$K'_{cr} = 10^{-9}$ m/s	0.53	0.61	0.30	0.32
$K'_{cr} = 10^{-8}$ m/s	0.62	0.74	0.45	0.47
$K'_{cr} = 10^{-7}$ m/s	0.81	0.90	0.57	0.59

Förutom att beräkna globala positioneringsindex för respektive riktning och kravgräns gjordes dessutom beräkningar specifikt för den befintliga TBM-tunneln. Härvid beräknades HPI för vertikal deponering samt deponering i maximal och minimal anisotropiriktning längs TBM-tunneln. Beräkningarna gjordes för 40 stycken 10x10x10 meters celler längs TBM-tunneln. I Figur 3.1 visas en schematisk skiss över TBM-tunnelns läge och de hypotetiska borrhålsriktningarna i horisontalld i förhållande till anisotropin och borrhålsriktningarna.

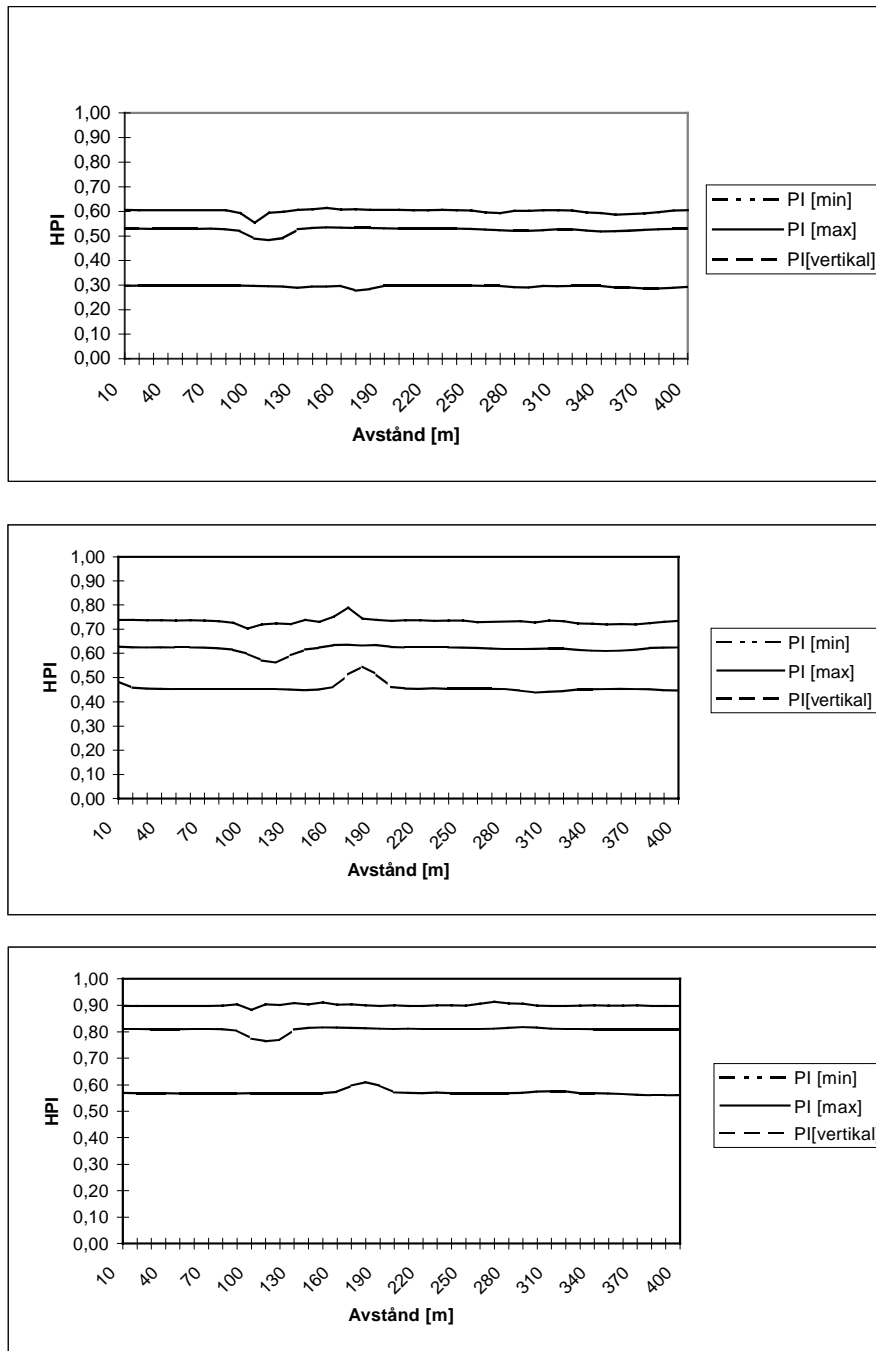


Figur 3.1 Den hydrauliska konduktivitetens huvudsakliga anisotropiriktningar (-50° och 40°) samt TBM-tunnelns orientering och de hypotetiska horisontella borrhålsriktningarna i maximal (a) och minimal (b) anisotropiriktning. Samtliga objekt inlagda i förhållande till Äspös lokala koordinatsystem.

Globala HPI värden för TBM-tunneln redovisas i Tabell 3.3. I Figur 3.2 redovisas resultaten i sektion längs tunneln. Skillnaderna mellan *a priori* skattningarna och de uppdaterade HPI värdena för de olika riktningarna är små även för TBM-tunneln. *A priori*-skattningarna, baserade på den statistiska analysen och hanteringen av anisotropin, bestämmer således även här till största delen *posteriori*-skattningarna.

Tabell 3.3 HPI-värden för TBM-tunneln med olika riktning på deponeringshålen.

	HPI [vertikal]	HPI [max anisotropi]	HPI [min anisotropi]
$K'_{cr} = 10^{-9}$ m/s	0.52	0.60	0.29
$K'_{cr} = 10^{-8}$ m/s	0.62	0.73	0.46
$K'_{cr} = 10^{-7}$ m/s	0.81	0.90	0.57



Figur 3.2 HPI-värden längs TBM-tunneln för olika riktning på deponeringshålen och för $K'_{cr} = 10^{-9}$ m/s (övre), $K'_{cr} = 10^{-8}$ m/s (mellan) samt $K'_{cr} = 10^{-7}$ m/s (nedre). Längdmätning från öster mot väster.

4 Slutsatser

Den genomförda analysen indikerar tydliga skillnader mellan deponeringshål i olika riktningar med hänsyn till anisotropin hos hydraulisk konduktivitet för ett hypotetiskt slutförvar placerat i Äspölaboratoriet. Deponering i den maximala anisotropiriktningen, dvs c:a N50°W i Äspös koordinatsystem, skulle enligt beräkningarna kunna ge upp till dubbelt så många acceptabla kapselpositioner som deponering i den minimala anisotropiriktningen, N40°E.

Beräkningarna av HPI med hänsyn till de hypotetiska kravgränserna indikerar att HPI varierar mellan 0.3-0.6 och 0.6-0.9 för maximal respektive minimal anisotropiriktning. Vertikal deponering intar en mellanställning med HPI-värden mellan 0.5-0.8. Deponering i TBM-tunnelns riktning medför marginellt bättre förutsättningar än för den minimala anisotropiriktningen.

HPI-beräkningarna för vertikal deponering med hänsyn till $K'_{cr} = 10^{-9}$ m/s ger resultat nära de som presenteras av Rosén och Gustafson (1995). Som underlag för dessa beräkningar användes inte sondhålen, utan ytborrhål (KAS02-08) samt andra borrhål i nedfartstunneln. Det globala HPI-värdet för TBM-tunneln i dessa beräkningar var 0.44, också detta med hänsyn till en kravgräns för hydraulisk konduktivitet på 10^{-9} m/s. Dessa beräkningar gjordes utan korrektion för anisotropi. Enligt mätningar i KA3191F längs TBM-tunneln befanns det verkliga globala HPI-värdet vara c:a 0.10. Resultaten i den föreliggande analysen tyder på en minskning av PI för TBM-tunneln när hänsyn tas till anisotropin. Minskningen är endast till 0.29, men visar ändå att en bättre prognos har erhållits genom att ta hänsyn till anisotropin i systemet.

Det skall betonas att BayMar indikerar mycket korta korrelationslängder i systemet och att det därför behövs riklig tillgång på data för att säkert säga om en position kan accepteras eller ej. Detta avspeglas i de beräknade HPI-värdena som tenderar att vara väsentligen skilda från 0 och 1, särskilt vid den lägre kravgränsen ($K'_{cr} = 10^{-9}$ m/s). De korta korrelationslängderna medför att resultaten i den gjorda analysen till största delen beror på *a priori*-skattningarna, baserade på den statistiska analysen och hanteringen av anisotropin.

Analysen visar att en kravgräns för hydraulisk konduktivitet av 10^{-9} m/s skulle innebära att förutsättningarna för deponering med hänsyn till hydrauliska förhållanden är dåliga. För ett hypotetiskt slutförvar i Äspö skulle således avsevärt högre kravgränser sannolikt behöva accepteras.

I jämförelsen mellan vertikal och horisontell deponering visar analysen att horisontell deponering kan ge avsevärda förbättringar, men att detta kräver en noggrann analys av anisotropin hos den hydrauliska konduktiviteten.

5 Referenser

Bear, J., 1972: Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier. New York.

Bear, J., 1979: Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill. New York

Rhén, I. och Forsmark, T., 1996: Hydrogeologiska analyser - Statistisk analys av hydrauliska testdata från Äspölaboratoriet. SKB Projekt Djupförvar. Jämförelse av deponeringsmetoder (JADE) - Geovetenskapliga studier. Bilaga 2 i SKB R-01-32 (denna rapport).

Rosén, L., 1995: Estimations of hydrogeological properties in vulnerability and risk assessments. Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Publ A 79.

Rosén, L. och Gustafson, G., 1995: Suitable Nearfield Design. Stage 2. Provisional Positioning Index (PPI) Predictions with respect to Lithology, Hydraulic Conductivity and Rock Designation Index along the TBM-tunnel. SKB PR 25-95-19.

Appendix A: Matematisk teori för behandling av anisotropi

Vid en test i ett anisotropt, tvådimensionellt medium representerar de transmissiviteter som bestäms av testen, T_T , geometriska mediet av huvudriktningarna x och y , så att (Bear, 1972):

$$T_T = \sqrt{T_x T_y} \quad (\text{A.1})$$

I ett tredimensionellt medium och för ett smalt borrhål är borrhålsradien, r_w , mycket mindre än borrhåls längden, L . För ett borrhål i en huvudriktning, z , gäller således:

$$T_{xy} \approx \sqrt{T_x T_y} = L \sqrt{K_x K_y} \quad (\text{A.2})$$

eftersom

$$T_x \approx LK_x \quad \text{och} \quad T_y \approx LK_y \quad (\text{A.3})$$

Enligt Bear (1979) kan flöde i ett anisotropt medium beskrivas med en ekvivalent konduktivitet, K_e , och skaltransformationen i anisotropins huvudriktningar x , y och z . K_e kan beräknas som:

$$K_e = \sqrt[3]{K_x K_y K_z} \quad (\text{A.4})$$

Dessutom gäller att:

$$\frac{1}{L} \sqrt[3]{(T_{xy} T_{yz} T_{zy})} = \frac{1}{L} (L \sqrt{K_x K_y} L \sqrt{K_y K_z} L \sqrt{K_z K_x})^{1/3} = \sqrt[3]{K_x K_y K_z} = K_e \quad (\text{A.5})$$

Således kan den ekvivalenta konduktiviteten bestämmas om transmissiviteten i de tre huvudriktningarna är kända.

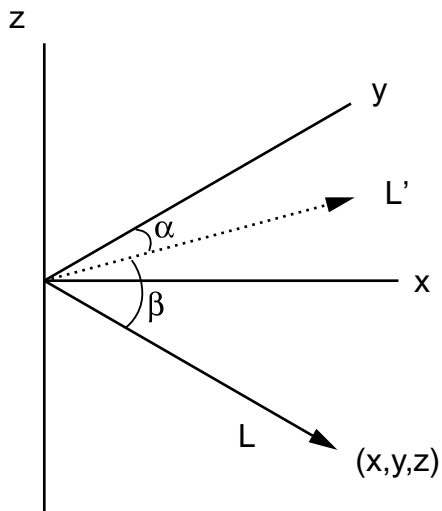
Vid överföringen av det anisotropa systemet till dess isotropa ekvivalent gäller att (Bear, 1972):

$$x_e = x \left(\frac{K_y K_z}{K_x^2} \right)^{1/6} = a_x x = x \sqrt{K_e / K_x} \quad (\text{A.6a})$$

$$y_e = y \left(\frac{K_x K_z}{K_y^2} \right)^{1/6} = a_y y = y \sqrt{K_e / K_y} \quad (\text{A.6b})$$

$$z_e = z \left(\frac{K_x K_y}{K_z^2} \right)^{1/6} = a_z z = z \sqrt{K_e / K_z} \quad (\text{A.6c})$$

Detta kan tillämpas även på en packertest över längden L med borrhålsriktningarna α och β (se Figur A.1).



Figur A.1 Packertest med längden L och med riktningsarna α och β .

Härvid gäller att:

$$L' = L \cos \beta \quad (\text{A.7a})$$

$$z = -L \sin \beta \quad (\text{A.7b})$$

$$x = L' \sin \alpha = L \cos \beta \sin \alpha \quad (\text{A.7d})$$

$$y = L' \cos \alpha = L \cos \beta \cos \alpha \quad (\text{A.7d})$$

Således är:

$$x = L \cos \beta \sin \alpha \quad (\text{A.8a})$$

$$y = L \cos \beta \cos \alpha \quad (\text{A.8b})$$

$$z = -L \sin \beta \quad (\text{A.8c})$$

I det ekvivalenta systemet erhålles:

$$x_e = a_x L \cos \beta \sin \alpha \quad (\text{A.9a})$$

$$y_e = a_y L \cos \beta \cos \alpha \quad (\text{A.9b})$$

$$z_e = a_z L \sin \beta \quad (\text{A.9c})$$

Detta medför att:

$$L_e = L\sqrt{a_x^2 \cos^2 \beta \sin^2 \alpha + a_y^2 \cos^2 \beta \cos^2 \alpha + a_z \cos^2 \beta} \quad (\text{A.10})$$

och

$$L_e = L\sqrt{\frac{K_e}{K_x} \cos^2 \beta \sin^2 \alpha + \frac{K_e}{K_y} \cos^2 \beta \cos^2 \alpha + \frac{K_e}{K_z} \sin^2 \beta} \quad (\text{A.11})$$

Från data kan ofta anisotropin härledas så att:

$$b_x = \frac{K_x}{K_e} \quad b_y = \frac{K_y}{K_e} \quad b_z = \frac{K_z}{K_e} \quad (\text{A.12})$$

Då gäller att:

$$L_e = L\sqrt{\frac{\cos^2 \beta \sin^2 \alpha}{b_x} + \frac{\cos^2 \beta \cos^2 \alpha}{bb_y} + \frac{\sin^2 \beta}{b_z}} \quad (\text{A.13})$$

K kan beräknas som:

$$K = \frac{Q}{2\pi\Delta hL} \ln \frac{L}{r_w} \quad (\text{A.14})$$

där Δh är avsänkningen vid ett uttag Q.

I föreliggande fall kan L ersättas med L_e men r_w är något svårare eftersom tvärsnittet i det ekvivalenta systemet är elliptiskt. Emellertid är inte r_w särskilt känsligt eftersom termen är logaritmerad. Därför antas att $r_{we} \approx r_w$. Därefter kan den ekvivalenta konduktiviteten beräknas som:

$$K_e = \frac{Q}{2\pi\Delta hL_e} \ln\left(\frac{L_e}{r_w}\right) \quad (\text{A.15})$$

och

$$L_e = L\sqrt{\frac{\cos^2 \beta \sin^2 \alpha}{b_x} + \frac{\cos^2 \beta \cos^2 \alpha}{b_y} + \frac{\sin^2 \beta}{b_z}} = Lf \quad (\text{A.16})$$

Om en bestämning av konduktiviteten gjorts utan hänsyn till anisotropin gäller att:

$$K' = \frac{Q}{2\pi\Delta hL} \ln\left(\frac{L}{r_w}\right) \quad (\text{A.17})$$

Därmed kan den ekvivalenta konduktiviteten beräknas enligt:

$$K_e = \frac{Q}{2\pi\Delta h L f} \ln\left(\frac{L f}{r_w}\right) = \frac{K'}{f} \frac{\ln\left(\frac{L f}{r_w}\right)}{\ln\left(\frac{L}{r_w}\right)} \quad (\text{A.18})$$

eller:

$$K_e = \frac{K'}{f} \left(1 + \frac{\ln f}{\ln\left(\frac{L}{r_w}\right)}\right) = \frac{T'}{L f} \left(1 + \frac{\ln f}{\ln\left(\frac{L}{r_w}\right)}\right) \quad (\text{A.19})$$

Från data återstår att beräkna b_x , b_y och b_z . Utgående från ekvationerna (A.3) och (A.4) gäller:

$$K_e = \frac{1}{L} \sqrt[3]{(T_{xy} T_{yz} T_{zx})} = \sqrt[3]{K_x K_y K_z} \quad (\text{A.20})$$

och

$$T_{xy} = L \sqrt{K_x K_y} \quad T_{yz} = L \sqrt{K_y K_z} \quad T_{zx} = L \sqrt{K_x K_z} \quad (\text{A.21})$$

Detta medför:

$$b_x = \frac{K_x}{K_e} = \frac{K_x}{\sqrt[3]{K_x K_y K_z}} = \frac{K_e^2}{K_y K_z} = \frac{L^2 K_e^2}{T_{yz}^2} \quad (\text{A.22a})$$

$$b_y = \frac{K_y}{K_e} = \frac{L^2 K_e^2}{T_{xz}^2} \quad (\text{A.22b})$$

$$b_z = \frac{K_z}{K_e} = \frac{L^2 K_e^2}{T_{xy}^2} \quad (\text{A.22c})$$

Appendix B: Beskrivning av BayMar

För att generera sannolikhetskartor på förvarsdjup med hänsyn till de ansatta anisotropiberoende kravgränserna för hydraulisk konduktivitet har Bayesian Markov Geostatistisk Modell (BayMar) använts. BayMar har tidigare beskrivits av Rosén och Gustafson (1995) och Rosén (1995). Nedan ges en kort redogörelse för metodiken. Metoden är baserad på:

1. Bayesiansk statistik
2. Markov-kedje analys

Med Markov-kedjor beskrivs lägesberoendet mellan olika klasser, exempelvis jord- eller bergartsklasser, i ett plan eller en volym. I Figur B.1 visas en area med diskreta celler i vilka observationer av klasserna a, b och c gjorts. En cell kan exempelvis vara en pixel i en rasterbild från GIS.

a	a	a					
	a	a	a	b			
		b	b	b	b		
c		c	c	b	b	b	
	c	a	c	c	b	b	
		a	a				b
			a			a	a
							a

Figur B.1 En area med observationer av klasserna a, b och c.

Utifrån befintliga data kan Markov-kedje analys göras så att sannolikheterna för övergångar mellan de olika klasserna beräknas och hanteras i en transgressionsmatris enligt följande:

$$\overline{M}_I = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

där p är sannolikheten att en övergång sker från en klass till en annan, t ex från a till b. För isotropa förhållanden gäller matrisen i alla riktningar i plan och volym medan den är riktningensberoende vid anisotropi.

Matrisen M_I beskriver första ordningens Markov-samband, dvs de statistiska sambanden mellan klasserna för intilliggande celler. För att beskriva högre ordningars samband kan matrisen upphöjas med hänsyn till antal cellsteg enligt följande:

$$\overline{M}_d = \overline{M}_1^d \quad (\text{B.2})$$

där d är antalet cellsteg. Om exempelvis sambandet mellan klasser på avståndet 2 cellsteg skall beskrivas kvadreras således M_1 .

Utifrån diagonaltermerna kan de olika klasserna typiska form, orientering och storlek åskådliggöras som en influenslängd för kroppar enligt följande samband:

$$\lambda_i = \frac{\log C}{\log p_{ii}} \quad (\text{B.3})$$

där C är en konfidensnivå och p_{ii} är diagonaltermen i M_1 . Influensen kan beskrivas med polärplottning med hänsyn till olika konfidenser. Exempelvis beskriver en plottning vid konfidensen $C=0.50$ mediankroppen av klassen i . Varje punkt i området representeras av en sannolikhetsvektor :

$$\overline{P} = \begin{bmatrix} p_a \\ p_b \\ p_c \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

med sannolikheterna p för varje klass. I en känd punkt benämns sannolikhetsvektorn $\overline{P}(B)$, vilken har en känd fördelning av klasser. Sannolikhetsvektorn summerar alltid till 1.

För okända punkter beräknas först en uppdateringsvektor, $\overline{P}(B/A)$ genom följande samband:

$$\overline{P}(B/A) = \overline{M}_1^{(r/\Delta)} \overline{P}(B) \quad (\text{B.5})$$

där r är avståndet mellan den kända punkten A och den okända punkten B och Δ är cellstorleken. Denna matrisoperation görs för okända punkter från varje känd punkt inom en viss influenslängd. Denna influenslängd (som inte skall förväxlas med influensen för kroppar, se ovan) bestäms av hur långt Markov-kedjorna uppvisar statistiska samband. Influenslängden kan bedömas genom plottning av $\overline{P}(B/A)$ mot antalet cellsteg, d . Influensen avtar asymptotiskt mot klassens procentuella fördelning och influenslängden är därmed det avstånd vid vilken den procentuella fördelningen nås.

Med ett Bayesianskt angreppssätt baseras utgångsantagandet om sannolikhetsfördelningar i okända punkter, den s k apriori-uppskattningen, $p[A]$, på mätdata och professional judgement, eller enbart professional judgement. När nya data blir tillgängliga uppdateras apriori-skattningen med hänsyn till de upprättade Markov-kedjorna till en ny, s k posterioriskattning, $p[A/B]$, enligt Bayes' teorem:

$$p_i(A/B) = \frac{p_i(A)p_i(B/A)}{\sum_{i=1}^n p_i(A)p_i(B/A)} \quad (\text{B.6})$$

där $i=1\dots n$ är diskreta klasser, t ex bergarter och $p[B/A]$ är den nya informationen som blivit tillgänglig. Rosén och Gustafson (1995) tillämpade Bayesiansk uppdatering för uppskattning av RQD-värden, litologi och hydraulisk konduktivitet vid Äspö berglaboratorium i Simpevarp.

För den okända punkten beräknas en därefter en posteriorivektor, $\bar{P}(A/B)$, med Bayes' teorem med informationen från varje känd punkt inom influenslängden. Om exempelvis fem punkter är kända runt den okända punkten x , sker en uppdatering av sannolikhetsvektorn $\bar{P}(A)$ för var och en av de kända punkterna, dvs fem uppdateringar. Angreppssättet är helt icke-parametriskt eftersom den inte kräver att några hänsyn tas till parametrar som beskriver datas fördelning.

Som ett mått på spridningen i bedömningen kan ett värde på s.k. *Bayesian convincement* beräknas för varje cell i området enligt:

$$\beta = \sum_{i=1}^n P_i^2 \quad (\text{B.7})$$

Bayesian convincement kan variera mellan $1/n$, vilket är detsamma som en helt uniform fördelning där alla klasser är lika sannolika, till 1, dvs endast en klass förekommer säkert i en specifik cell. Parametern kan användas som en vägledning för var nya observationer bör göras för att få mera tillförlitliga bedömningar.

Vid den Bayesianska uppdateringen måste apriori-informationen i sannolikhetsvektorn viktas mot informationen i uppdateringsvektorn med hänsyn till avståndet från den okända punkten. Viktfunktionen är av följande typ:

$$w(r) = \frac{e^{-1-(r/\Delta)^N}}{r/\Delta} \quad (\text{B.8})$$

där r är avståndet mellan den kända punkten A och den okända punkten B , D är cellstorleken och N är en exponent som beror av vilken vikt som används på ett avstånd lika med influenslängden.

BILAGA 4

Projekt JADE Geovetenskapliga studier

**Jämförelse av bergmekaniska funktionssätt hos
KBS3-V, KBS3-H och MLH**

Roland Pusch
Clay Technology

Lund augusti 1996

Innehållsförteckning

1	Introduktion	5
1.1	Allmänt.....	5
1.2	Bergets diskontinuiteter.....	5
1.3	Bergets hållfasthet	6
1.4	Bergspänningar.....	8
2	Stabilitet	9
2.1	Allmänt.....	9
2.2	Blockutfall	9
2.2.1	Allmänt	9
2.2.2	Bergets struktur	9
2.2.3	Kritiska konstellationer av diskontinuiteter för blockutfall	11
2.2.4	Karakteristiska skillnader mellan de tre koncepten	14
2.3	Överbelastning.....	17
2.3.1	Homogent berg	17
2.4	Inverkan av diskontinuiteter.....	28
2.4.1	Allmänt	28
2.4.2	Förskjutning utmed diskontinuiteter som skär genom deponeringshål och tunnlar	29
2.4.3	Spänningskoncentrationer med överbelastning orsakade av diskontinuiteter som skär tunnlar nära deponeringshål	33
2.4.4	Spänningsändringar, relaxation resp spänningsökning, orsakade av diskontinuiteter som skär deponeringshål vinkelrätt, nära tunnlar	38
2.4.5	Inverkan på diskontinuiteter av tunnelsprängning	41
2.4.6	Slutsats	41
3	Bergmekanisk inverkan på vattenomsättning i närfältet	43
3.1	Betydelsefulla fall	43
3.1.1	Allmänt	43
3.1.2	Ändring av effektiva bergtrycket	43
3.1.3	Skjuvning av vattenförande diskontinuiteter	47
3.1.4	Överbelastning ledande till sprickpropagering och till sprickzoner	48
4	Diskussion och slutsatser	57
4.1	Stabilitet.....	57
4.2	Vattenomsättning	58
4.3	Slutsatser.....	59
5	Referenser	61

1 Introduktion

1.1 Allmänt

Jämförelsen mellan koncepten KBS3-V, KBS3-H och MHL när det gäller det bergmekaniska funktionssättet har baserats på dagens kunskapsnivå med viss utökning i form av numeriska beräkningar. Syftet har varit att dels söka finna typiska skillnader i stabilitetsförhållandena för deponeringshålerna med avseende på risk för överbelastning och utfall av block, samt att bedöma om koncepten innebär tydlig skillnad i bergmekaniskt betingad ändring av närfältbergets hydrauliska konduktivitet.

Bergets strukturella uppbyggnad, primärspänningarna och bergmaterialets ("matrisens") hållfasthet är avgörande parametrar för jämförelserna. Betydelsen av strukturen är både principiell och specifik. Sålunda är förekomsten av typiska svagheter med viss orientering och visst läge av olika betydelse för de tre koncepten; det gäller t ex risken för propagering av latent sprickor som skär genom eller ligger nära deponeringshålerna. Vidare är förekomsten av specifika kritiska konstellationer av svagheter olika för de tre koncepten och har alltså olika stor betydelse för dem. För den principiella inverkan av betydelsefulla svagheter antas ingen generell bergstruktur, här beaktas endast vissa typer av stabilitetsavgörande diskontinuiteter. För att kunna jämföra inverkan av specifika kritiska konstellationer av svagheter måste däremot en generell bergstruktur antas. För detta ändamål nyttjas en generaliserad strukturmodell härledd från sprickdata från Äspörampen och TBM-tunnelns innersta del. Betydelsen av variationer i strukturell uppbyggnad belyses genom att stämma av modellen mot den generiska FRACMAN-modellen såsom den redovisas i SKB Progress Report HRL-96-08. Den sistnämnda reproducerar konkret sprickstatistiken från karteringar i Äspö, men kan övervärdera frekvensen av vissa sprickset och den ger svårigheter vid tolkning av interaktionen mellan strukturelement och hål eller tunnlar.

1.2 Bergets diskontinuiteter

Bristningar och förskjutningar i berget sker som följd av att de mekaniska spänningarna överskrider ett kritiskt värde. Bristning initieras och utgår alltid från lokala svagheter på ett sätt som bestäms av deras art och orientering och som i hög grad är skalberoende. Från praktisk synpunkt är det önskvärt att referera till olika slag av diskontinuiteter för vilket olika system utarbetats. I detta arbete används kategoriseringen i Tabell 1.2-1.

Tabell 1.2-1 Schema för kategorisering av diskontinuiteter i berg.

Ordning	Funktion och typiska mått	Motsvarande SKB-typ
1:a	Mycket stora hydrauliskt och mekaniskt aktiva* zoner (typiska mått: längd $>10^4$ m, inbördes avstånd $>10^3$ m)	D1
2:a	Stora hydrauliskt och mekaniskt aktiva zoner* (typiska mått: längd 10^3 - 10^4 m, inbördes avstånd 10^2 - 10^3 m)	D2
3:e	Hydrauliskt och mekaniskt aktiva*, mindre zoner (typiska mått: längd 10^2 - 10^3 m, inbördes avstånd 10 - 10^2 m)	D3
4:e	Hydrauliskt och mekaniskt aktiva* enskilda diskontinuiteter (typiska mått: längd meter till tiotals meter)	D3/D4
5:e	Potentiellt hydrauliskt och mekaniskt aktiva* enskilda diskontinuiteter (typiska mått: längd decimeter till meter)	-
6:e	Potentiellt mekaniskt aktiva* mindre diskontinuiteter (typiska mått: längd centimeter till decimeter). Mikroskop eller lupp nödvändiga för karakterisering.	-
7:e	Mikroskopiska och submikroskopiska svagheter.	-

* Hållfastheten betingad av friktion men inte kohesion ger förskjutning vid ändrad skjuvspänning

De svagheter som har betydelse vid den jämförelse av de tre koncepten som görs i denna rapport är diskontinuiteter av 3:e, 4:e och 5:e ordningarna. En viktig skillnad mellan koncepten är att branta diskontinuiteter av 3:e ordningen endast gäller MLH och deponeringstunnlar för KBS3-H,V. 4:e ordningens diskontinuiteter (SKB:s D3/D4 klass) gäller däremot samtliga. 3:e, 4:e och 5:e ordningens diskontinuiteter har ofta likartad orientering i rummet. Frekvensen av 6:e och 7:e ordningarnas diskontinuiteter har vanligen godtycklig orientering i granit och påverkar berghållfasthetens volymberoende. Den strukturella uppbyggnaden hos bergmassan antas vara densamma i de tre fallen.

1.3 Bergets hållfasthet

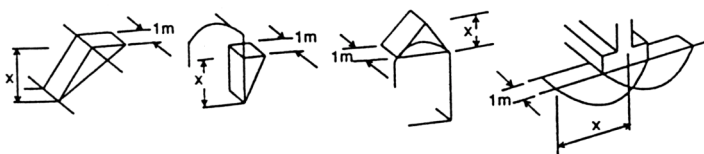
En ungefärlig bild av risken för bristningar och förskjutningar i berget kan man få genom att använda typvärdena i Tabell 1.2-2 och 1.2-3, som förutsätter att diskontinuiteter och berg betraktas som Mohr-Coulombmaterial. En fundamental skillnad mellan diskontinuiteter av 4:e och lägre ordning och de av högre ordning är att de förstnämnda, sedda som diskreta strukturelement, saknar kohesion och därmed draghållfasthet.

Tabell 1.2-2 Friktionsvinkeln hos diskontinuiteter [1].

Diskontinuiteter	Inre friktionsvinkel
1:a	<20
2:a	20-25
3:e	20-30
4:e	20-35 (exceptionellt 10-15)
5:e	35-50
6:e	45-60

Tabell 1.2-3 Ungefärliga skalberoende hållfasthetsparametrar hos berg med diskontinuiteter. (Relaterat till 2D-fall med mått per meter längd)

Bergvolym m ³	Kohesion MPa	Max friktions- vinkel, (°)	Diskontinuiteter
<0,001	10-50	45-60	7:e
0,001-0,1	1-10	40-50	6:e, 7:e
0,1-10	1-5	35-45	5:e, 6:e, 7:e
10-100	0,1-1	25-35	4:e, 5:e, 6:e, 7:e
100-10000	0,01-0,1	20-30	3:e, 4:e, 5:e, 6:e, 7:e
>10000	<0,1	<20	Alla



För den minsta volymkategorin, som ungefär svarar mot borrhärdor med en diameter och längd av högst ca 70 mm, motsvarar tabelldata ett värde på enaxliga tryckhållfastheten av 50-370 MPa. Rapporterade värden för kristallint berg i Äspö, svarande mot ca 50 mm kärndiameter, är 147-259 MPa [2]. Om hållfastheten antas vara normalfördelad med medianvärdet 200 MPa och kvartilvärdena 150 och 250 MPa, blir variationen enligt Tabell 1.2-4.

Tabell 1.2-4 Median- och kvartilvärden på enaxliga tryckhållfastheten beräknade med antagande av normalfördelning.

Statistisk parameter	Hållfasthet, MPa
Undre kvartil	175
Median	200
Övre kvartil	225

1.4 Bergspänningar

Bergspänningar i svenskt urberg har vanligen ett tydligt djupberoende. På 500 m djup är största primärspänningen vanligen av storleksordningen 20-30 MPa, medan den minsta och mellersta ofta är 10-15 MPa. En sammanställning av bergspänningsdata för Äspö visar att på 400 m djup i området där Äspölaboratoriet är beläget är största primärspänningen flackt orienterad i riktning NW/SE och av storleksordningen 30 MPa. Den minsta spänningen, som är vertikal, överstiger inte 10 MPa medan den mellersta i medeltal är ca 15 MPa [3]. För bergmekaniska beräkningar kan man därför, som i denna rapport, använda spänningarna:

$$\sigma_1 = 30 \text{ MPa (NW/SE, } 0^\circ)$$

$$\sigma_2 = 15 \text{ MPa (NE/SW, } 0^\circ)$$

$$\sigma_3 = 10 \text{ MPa, } 90^\circ$$

2 Stabilitet

2.1 Allmänt

Problem med stabiliteten hos deponeringshålerna för koncepten KBS3-V och KBS3-H och för MLH-hålerna kan uppkomma i såväl kort som långt tidsperspektiv i följande fall:

1. Blockutfall vid kritisk konstellation av sprickor som skär varandra nära hålen.
2. Överbelastning genom att tryckhållfastheten överskrids (spalling, krossning).
 - a) homogent berg
 - b) berg med diskontinuiteter.

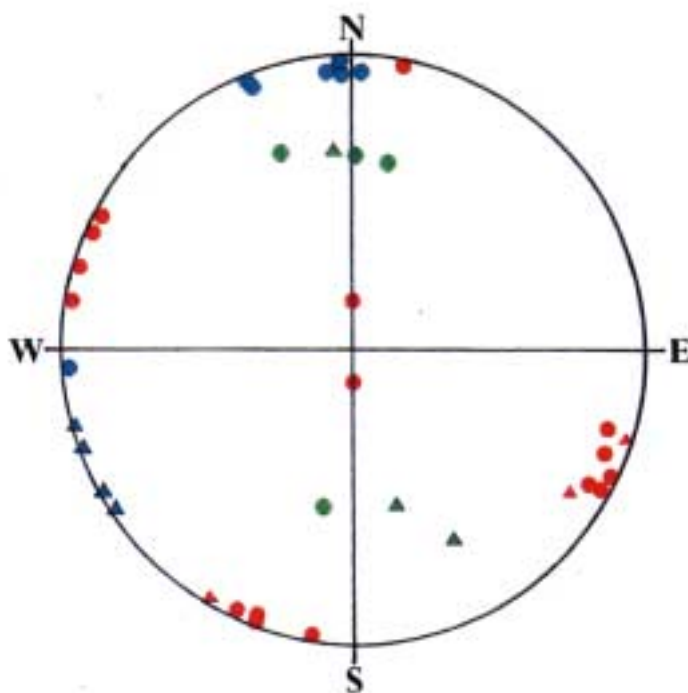
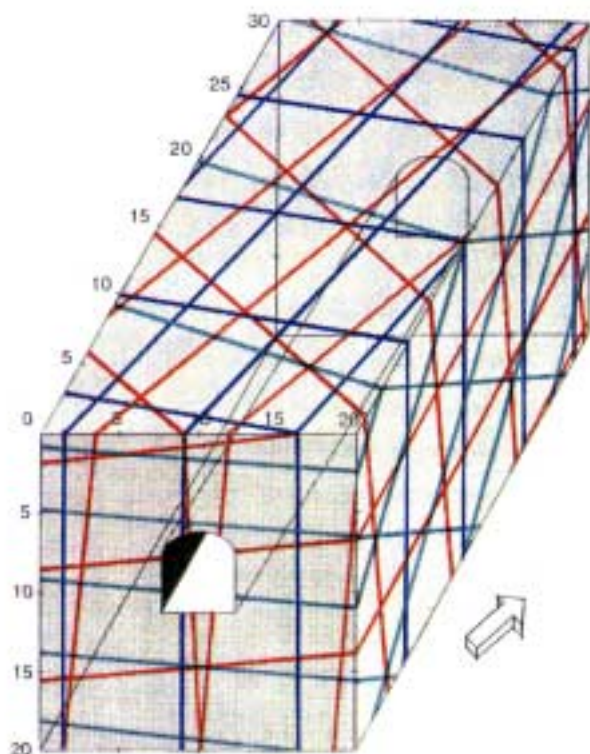
2.2 Blockutfall

2.2.1 Allmänt

Avlossning av block som frigörs från deponeringshålens väggar utan att blocken faller ut leder till öppnande av brantstående och flacka sprickor varigenom vattenomsättningen ökar i hålens närmaste omgivning. Om de sistnämnda sprickorna är glidytor som stupar mer än som motsvarar friktionsvinkeln kan blocken glida ut. För att bestämma om det finns avgörande skillnader mellan koncepten när det gäller frekvensen av instabila block kan man tillämpa en generaliserad strukturmodell baserad på sprickdata. För att få en noggrannare bild av sannolikheten för hållägen som ger instabila block krävs en statistisk analys som tar hänsyn både till hur hållägena kan varieras och hur bergstrukturen varierar. En sådan analys har inte genomförts här.

2.2.2 Bergets struktur

Figur 2-1 visar en generaliserad strukturmodell grundat på resultatet av kartering av vattenförande sprickor med minst 5 m längd på tre avsnitt i Äspölaboratoriets ramp. Sprickorna svarar mot 4:e ordningens diskontinuiteter och SKB:s D4-klass. Deras längd överskrider 5 m och medelavståndet mellan dem, som illustreras av Tabell 2.2-1, varierar mellan 4 och 10 meter.



Figur 2-1 *Frekvens och orientering hos 4:e ordningens diskontinuiteter i Äspö. Överst: parallellperspektiv av generaliserat system gällande på tre 30 m-sträckor i Äspörampen [3]. Medelavståndet är satt till 7 m medan det i verkligheten varierar mellan 4 och 10 m. Underst: Stereogram med verkliga poler för de tre seten (runda symboler) och motsvarande för inmätta diskontinuiteter av 4:e ordningen i TBM-tunneln, sektion 3/550-3/600 (trianglar).*

Tabell 2.2-1 Medelavstånd mellan 4:e ordningens diskontinuiteter på tre avsnitt i Äspölaboratoriets ramp [3].

Set	Sektion 0/445-0/475 m	Sektion 0/485-0/515 m	Sektion 0/660-0/690 m	Sektion 1/100-1/130 m	Sektion 1/430-1/460 m
Rött	9 och däröver	8-9	6 och däröver	5-10	4 och däröver
Blått	10	(zon)	(zon)	10	7
Grönt	5 och däröver	10	-	-	-

Utgår man från medelvärdena på strykning och stupning hos de tre diskontinuitets-systemen finner man följande karakteristiska grupperingar för 1 kilometers ramplängd:

System	Strykning/stupning	Anordning
Rött	N75W/80N N10E/80W N25E/10W	Ortogonalt system
Blått	N100W/90 N/90	Ortogonalt system med underrepresenterade flacka diskontinuiteter
Grönt	N100W/40N N90W/40S	Snedställt ortogonalt system med underrepresenterade brantstående N/S-orienterade diskontinuiteter.

De tre systemen kan approximeras till två nästan ortogonala grupperingar genom att samordna de röda och blå seten:

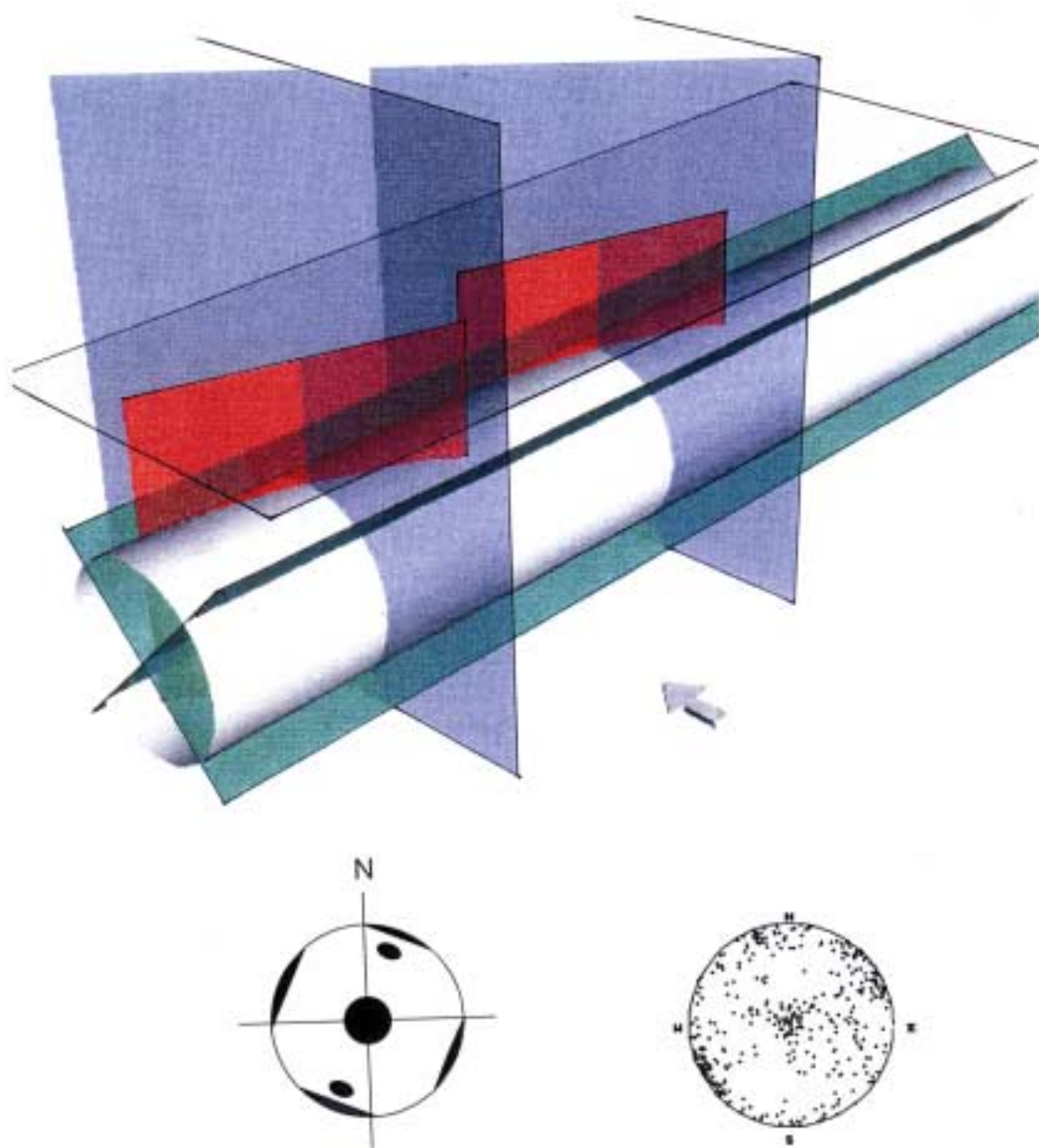
System	Strykning/stupning	Medelavstånd
I	N85W/85N	3,5 m
	N 5E/85W	7 m
	N25E/10W	7 m
II	N95W/45N	7 m
	N95W/45S	7 m

Som framgår av stereogrammen i Figur 2-1 karakteriseras TBM-tunnelns innersta 30 m långa del (Sektion 3/570-3/600) i princip av en liknande struktur. För en jämförelse av koncepten kan det vara tillfyllt att använda den generaliserade strukturmodellen i Figur 2-2. Den innebär att 4:e ordningens diskontinuiteter med brant stupning respektive stupning 45N och 45S och orienterade i huvudsak WNW/ESE och NNE/SSW dominerar. Flacka svagheter av detta slag förekommer mindre frekvent. Figur 2-2 visar stereogram som illustrerar den generaliserade modellen med System I och II respektive systemet med det fullständiga spricknätverket [4].

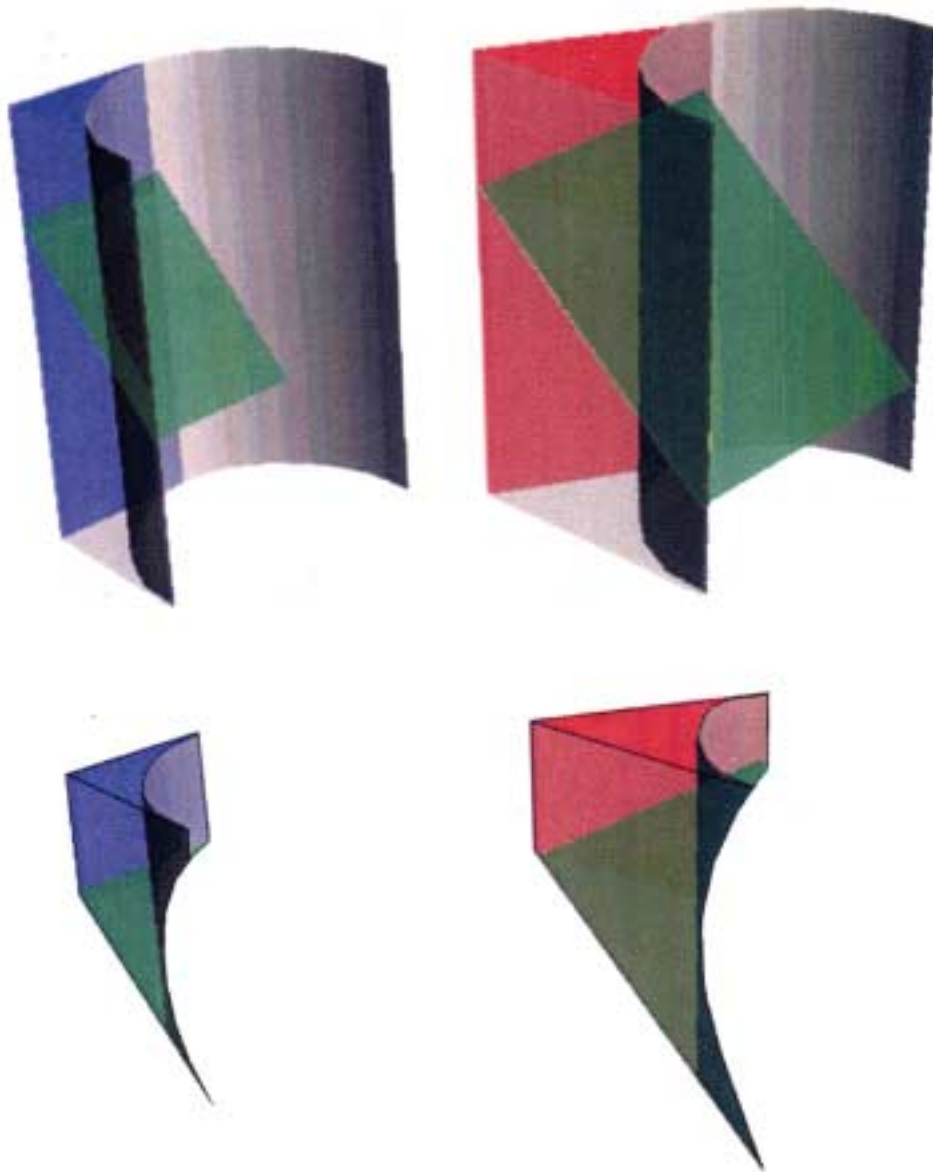
2.2.3 Kritiska konstellationer av diskontinuiteter för blockutfall

Utfall av större block från väggar och tak bestäms i första hand av hur sprickor utan kohesion, dvs diskontinuiteter av 4:e och lägre ordningar, samverkar nära fria ytor med villkoret att en av diskontinuiteterna måste stupa mer än som motsvarar

friktionsvinkeln. För de vertikala hålen i konceptet KBS3-V är den viktigaste typen av kritiska konstellationen den som visas i Figur 2-3. Glidning kan ske utmed någon av diskontinuiteterna tillhörande System II, som i medeltal stupar ca 45° , medan friktionsvinkeln hos denna typ av svagheter kan vara $10\text{-}35^\circ$ (Tabell 1.2-2).



Figur 2-2 Äspöberget. Överst: Generaliserad strukturmodell med vattenförande diskontinuiteter i TBM-tunnel. (Sektion 3/570-3/600). Underst: Stereogram (vänster: generaliserad modell, höger: Schmidtnät med 470 sprickpoler i TBM-tunneln enligt [4]).



Figur 2-3 Kritiska konstellationer hos sprickor i deponeringshål av typ KBS3-V för uppkomst av blockutfall. Övre rad: Skärning av branta plan med huvudsaklig orientering WNW/ESE och NNE/SSW samt plan med strykning nära E/W och 45° stupning. Undre rad: Form på avlossade kilar.

Blockutfall kan också ske om diskontinuiteter av typen läkta sprickor med kohesion brister som följd av höga spänningar och ger upphov till samma typ av kritiska konstellationer som illustreras i Figur 2-3. Sprängning av tunnlar kan leda till aktivering och propagering av sådana svagheter och den kan påverka frekvensen av blockutfall från väggarna i KBS3-H hål till flera meters avstånd från tunnelväggen.

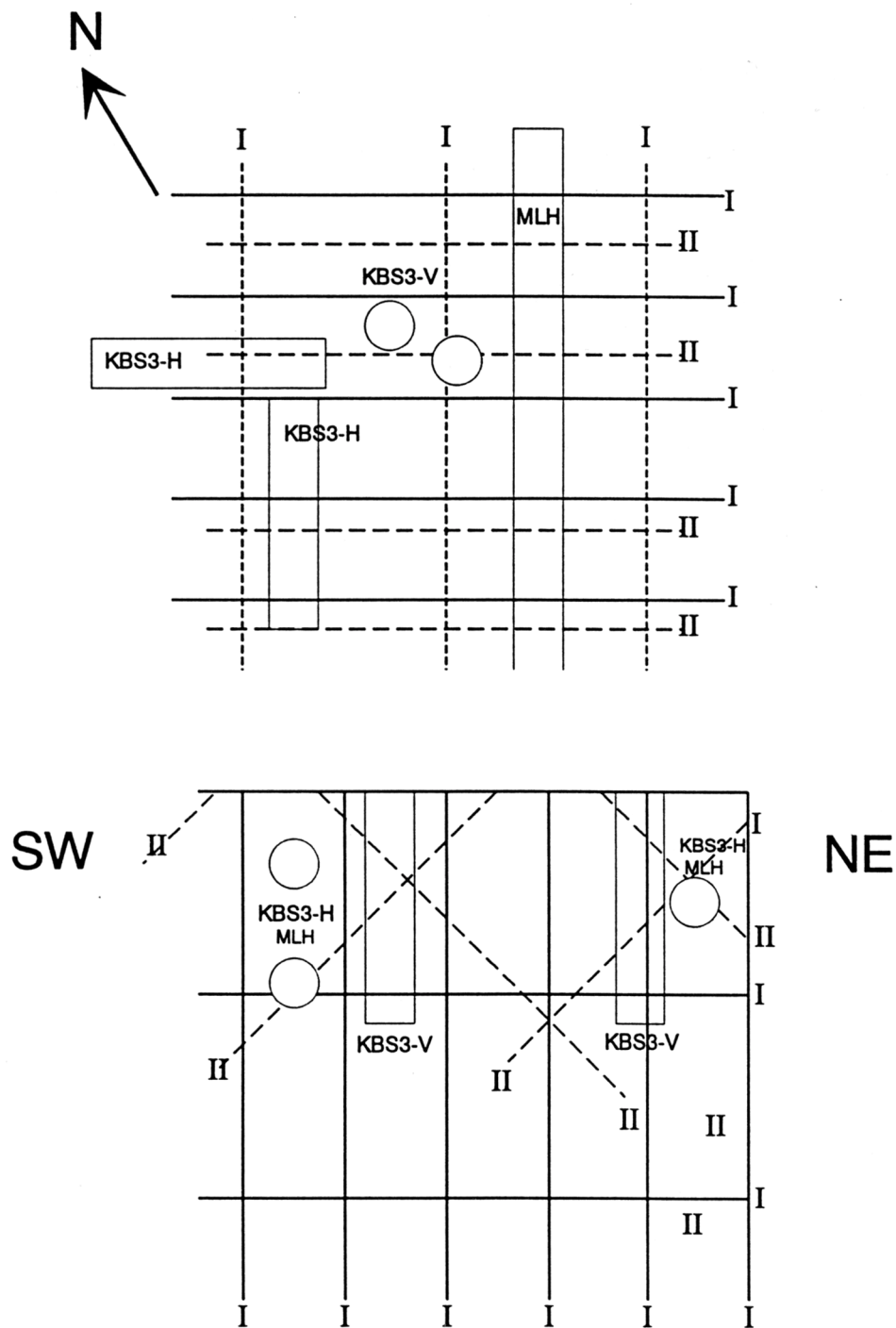
2.2.4 Karakteristiska skillnader mellan de tre koncepten

Geometriska förhållanden

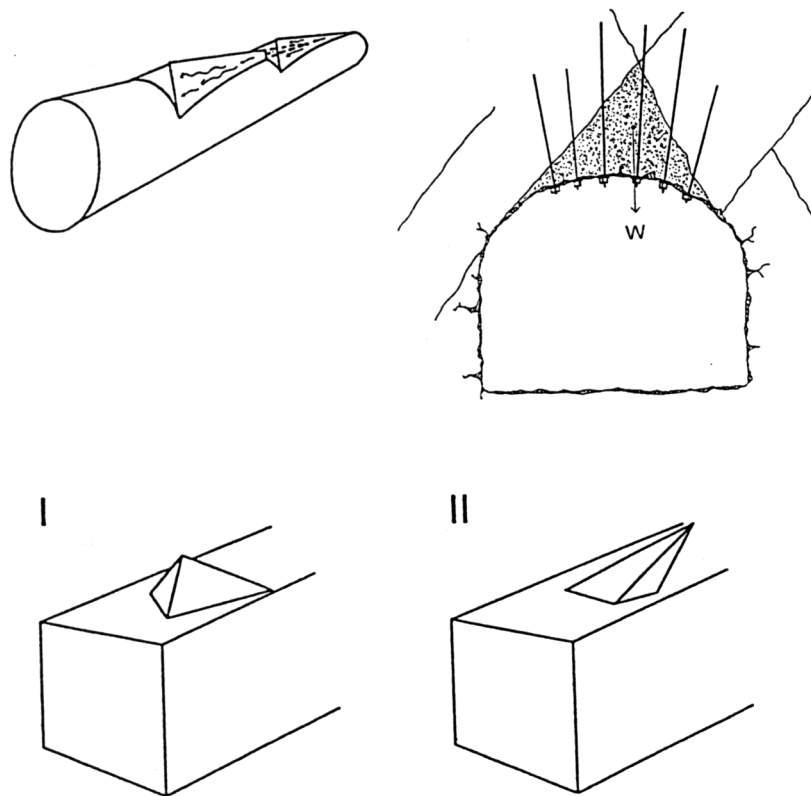
Figur 2-4 visar en strukturmodell baserad på de generaliserade grupperna benämnda System I och II i Kapitel 2.2.2. System I representeras av diskontinuiteter i ortogonal gruppering med strykning WNW/ESE och NNE/SSW och med inbördes avståndet 3,5 m för WNW/ESE-orienterade diskontinuiteter och 7 m för övriga.

System II representeras av två set med strykning WNW/ESE och 45° stupning mot S och N.

När det gäller System I är sannolikheten för att horisontella deponeringshål (KBS3-H och MLH) skall skäras av tillhörande diskontinuiteter högre än för vertikala (KBS3-V). Vad avser System II kommer frekvensen av skärningar mellan de horisontella hålen enligt KBS3-H och MLH och diskontinuiteter tillhörande System II att bli lägre än för KBS3-V och därmed bör risken för blockutfall kunna vara lägre för de horisontella varianterna. Det råder emellertid en väsentlig skillnad mellan koncepten när det gäller de praktiska konsekvenserna av blockutfall. Sålunda finner man att medan utfall från väggarna i hål enligt KBS3-V bara kan avse små block, uppskattningsvis mindre än 0,5 m³, kan utfall av långa kilar från taket i hål enligt MLH och KBS3-H äga rum om sådana hål orienteras parallellt med strykningen hos System II-diskontinuiteter (Figur 2-5). Sannolikheten för att hålen får sådana lägen att långa kilar kan falla ut kan dock bedömas vara låg med hänsyn till att diskontinuiteterna i verkligheten vindlar. Det bör tilläggas att stabiliteten hos bultförankrade kilar enligt exemplet i Figur 2-5 knappast överstiger något hundratal år och att avlossning efter bultkorrosion leder till öppnande av diskontinuiteterna som avgränsar kilarna. Det måste också påpekas att de praktiska konsekvenserna av blockutfall från tak i byggskedet och för preparering av deponeringshålen till avsedda dimensioner är svårare än utfall från väggarna. KBS3-H och MLH är därför något underlägsna KBS3-V.



Figur 2-4 Förenklad strukturmodell för grov uppskattning av frekvensen av skärningar av deponeringshål och kohesionslösa diskontinuiteter, samt av risken för blockutfall. Överst: Plan med heldragna och långstreckade linjer markerande vertikala diskontinuiteter med c/c 3,5 och 7 m tillhörande System I. Kortstreckade linjer markerar skärningar i horisontalplanet av diskontinuiteter c/c 7 m med 45° stupning tillhörande System II. Underst: Vertikal sektion i NE-SW-riktning.



Figur 2-5 Avlossning av kilar från taket i KBS3-H och MLH [1]. Överst t v: långa kilar, Överst t h: Bultstabilisering av kilar i tak KBS3-H och V. Underst: Nyckelblocktyper av två huvudtyper varav stabiliteten hos fall II bestäms av friktionen hos det plan utmed vilket blocket kan glida.

Inflytande av bergspänningar

Risken för att "latenta" svagheter av 5:e och högre ordningar kan aktiveras och ge upphov till kritiska konstellationer bestäms av bergspänningarna och bergstrukturen. Som framgår av utredningen som redovisas i efterföljande kapitel kan risken för aktivering av sådana svagheter göras mindre för KBS3-H och MLH än för KBS3-V om gynnsam orientering av tunnlar och hål inte kan väljas.

Slutsats

Frekvensen av blockutfall bör vara lägre för KBS3-H och MLH än för KBS3-V, medan volymen hos instabila block kan vara större för de två sistnämnda koncepten. Med hänsyn till att en mycket förenklad strukturmodell använts och att det i verkligheten är tal om en variation i orientering och uthållighet hos stabilitetsavgörande svagheter är skillnaden mellan koncepten de facto inte signifikant.

Giltigheten hos slutsatserna från användningen av den generaliserade strukturmodellen kan belysas och värderas genom jämförelse med FRACMAN-modellen [4]. Det förutsätter att endast hydrauliskt aktiva diskontinuiteter med minst 5 m längd medtas, vilka svarar mot endast ca 10% av samtliga diskontinuiteter. Sådant urval har inte gjorts och komplexiteten, som illustreras av stereogrammet i Figur 2-2, maskerar därför regelbundenheten hos bergstrukturen. Ett ytterligare skäl för detta, som för övrigt är en brist hos alla strukturredovisningar i stereogramform som omfattar stora bergvolymmer, är att man inte kan bedöma avståndet mellan svagheter och inte får underlag för att identifiera storskalig vindling när ett stort antal diskontinuiteter förekommer. Från stereogrammen för TBM-tunneln kan man dock urskilja två av komponenterna i System I och en antydan av en av komponenterna i System II.

Eftersom variationen i orientering och inbördes avstånd hos diskontinuiteterna av 4:e ordningen inte kan skönjas i vanliga poldiagram och i det FRACMAN-producerade strukturmönstret så kompliceras konceptjämförelsen genom att kritiskt belägna och orienterade svagheter inte kan urskiljas. Det kan man däremot göra med den förenklade modellen i Figur 2-4, som därför används för konceptjämförelsen.

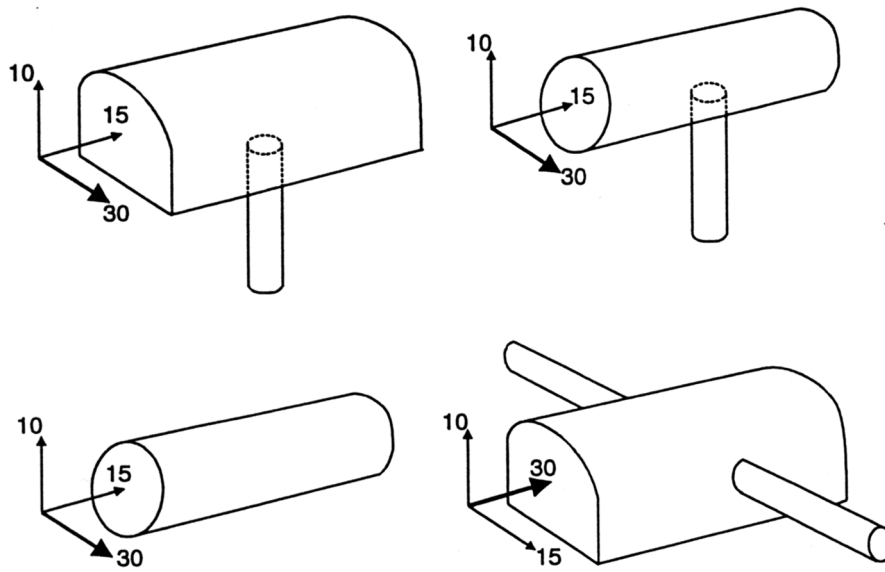
2.3 Överbelastning

2.3.1 Homogent berg

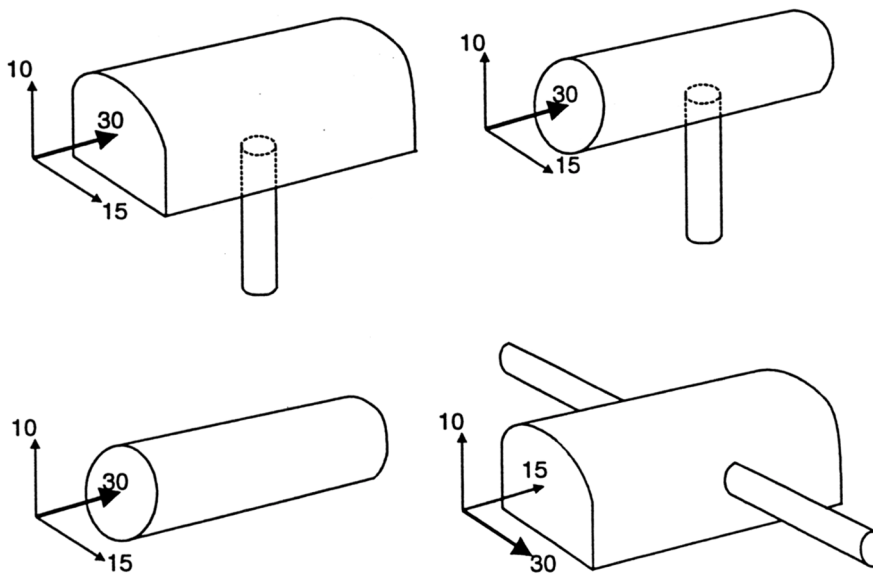
För det teoretiska fallet med berg utan betydelsefulla diskontinuiteter, dvs med endast 6:e och 7:e ordningarnas diskontinuiteter, bestäms risken för bristning hos berget av tangentialspänningens storlek vid hålväggen och vid tunnelgolvet. Figur 2-6 visar läge och orientering av hålen i de tre koncepten för de mest och minst ansträngda tillstånden. Spänningarna i de mest ansträngda delarna har beräknats i 3D med användande av diskreta elementkoden 3DEC och, som jämförelse, med boundary element-koden BEASY. De förstnämnda beräkningarna har gjorts av H Hökmark, Clay Technology AB, de senare av Computational Mechanics Centre, Southampton, England. Vissa komplicerade beräkningar har gjorts i 2D med användning av BEASY och FEM-koden PLASTFEM (R Pusch).

Beräkningarna utfördes med antagande av homogent berg med $E=4 \times 10^4 - 10^6$ MPa, $\nu=0,2-0,3$ och $\rho=2700$ kg/m³.

MEST ANSTRÄNGDA FALL



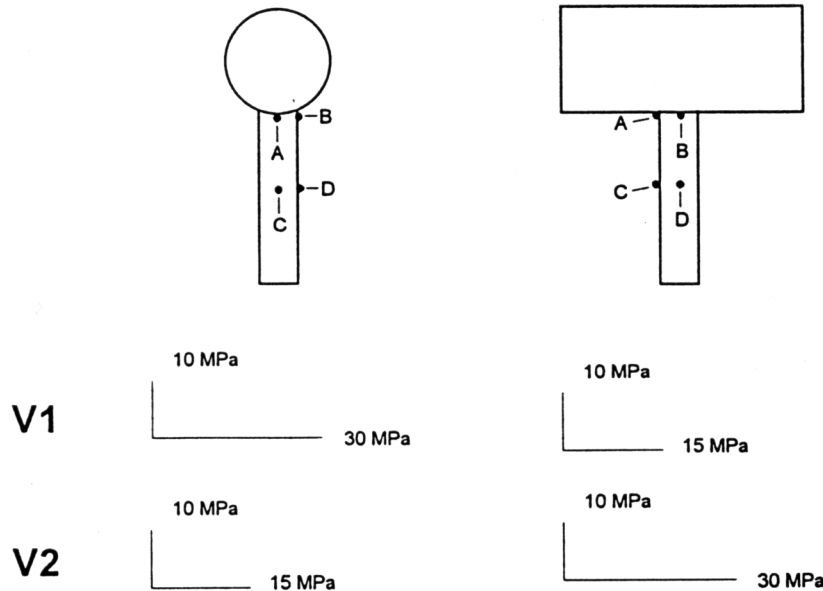
MINST ANSTRÄNGDA FALL



Figur 2-6 Sammanställning av mest och minst ansträngda fallen (Siffror anger primärspänningar i MPa). Övre vänstra: KBS3-V (sprängd tunnel ansträngd i tak och golv). Övre högra: KBS3-V (TBM tunnel ansträngd i tak och golv). Nedre vänstra: MLH ansträngd i tak och golv. Nedre högra: KBS3-H (sprängd tunnel måttligt ansträngd).
I figurens undre del visas det för deponeringshålen och tunnarna minst ansträngda fallet med undantag för KBS3-H, där tunnarna är mera ansträngda än i övre figuren.

KBS3-V

Beräkningar har utförts för fallet borrarad tunnel med 5 m diameter och deponeringshål med 1,6-1.7 m diameter och 8 m längd. Sammanfattningsvis gav beräkningarna till resultat spänningarna i Figur 2-7.



Tangentialspänningar i MPa

Fall		A	B	C	D
V1	3DEC	165	20	80	18
	BEASY	184	25	85	20
V2	3DEC	53	63	22	72

Figur 2-7 Spänningar i karakteristiska punkter i KBS 3-V (3DEC). Överst: beräkningsantagande, V1=mest ansträngt fall, V2=minst ansträngt fall. Underst: Beräknade spänningar.

Man finner att för det mest ansträngda fallet, dvs med tunnarna orienterade NE/SW, dvs vinkelrätt mot största primärspänningens riktning, blir tangentialspänningen 165-185 MPa vid de borrarade tunnarnas golv. Eftersom tryckhållfastheten hos små bergelement är av denna storleksordning är risken för bristning av spalling-typ mycket stor. Med hållfasthetsfördelningen enligt Tabell 1.2-4 kan sålunda bristning uppkomma vid ca 25% av samtliga hål. I själva verket kommer fenomenet att bli vanligt eftersom skalberoendet hos bergets hållfasthet innebär att större volymer har fler svagheter utmed vilka bristning kan ske. För en volym av $0,1 \text{ m}^3$ är skalberoendet enligt Tabell 1.2-3 sålunda att tryckhållfastheten kan vara 10-50 MPa, vilket kan innebära instabila förhållanden i form av aktivering av latent sprickor i matrisen till någon meters avstånd från hålets överkant. Beräkningarna visar, som också Figur 2-8 antyder, att tangentialspänningen minskar till ca 75% av sitt högsta värde på 1 m avstånd från golvet och till

ca 50% på 2 m avstånd, vilket innebär att bristning och fragmentering kan uppkomma ned till 0,5-1,5 m djup från golvet och att aktivering och propagering av latent svagheter kan inträffa till minst 2 m djup.

För det minst ansträngda fallet, dvs med tunnlar orienterade NW/SE, dvs parallellt med största primärspänningens riktning, blir tangentialspänningen högst ca 60-70 MPa utmed större delen av deponeringshålen, vilket inte leder till bristningar.

För en tunnelorientering mellan de två extremfallen kan man uppskatta största tangentialspänningen i punkter belägna som A och B i Figur 2-7 genom att beräkna primärspänningarnas komponenter i tunnelns axiella och radiella led. Det ger till resultat att tangentialspänningen vid deponeringshålens överkant kan nå upp till ca 75% av det högsta värdet i Figur 2-7 vid en tunnelorientering som avviker upp till 30° från största primärspänningens riktning. Det innebär att risken för bristning av spallingtyp är mycket stor inom hela detta vinkelområde.

Spänningsberäkningarna avseende KBS3-V har inte omfattat fallet med sprängd tunnel. Som efterföljande redovisning av sprängningsinverkan på KBS3-H visar, innebär tunnelsprängning väsentligt lägre tangentialspänning i deponeringsålen ned till ca 1 m från tunnelgolvet medan tangentialspänningen blir något högre än i det tunnelborrade fallet på detta djup. Den kommer därför sannolikt att vara kritiskt hög för det mest ansträngda tillståndet (V1).

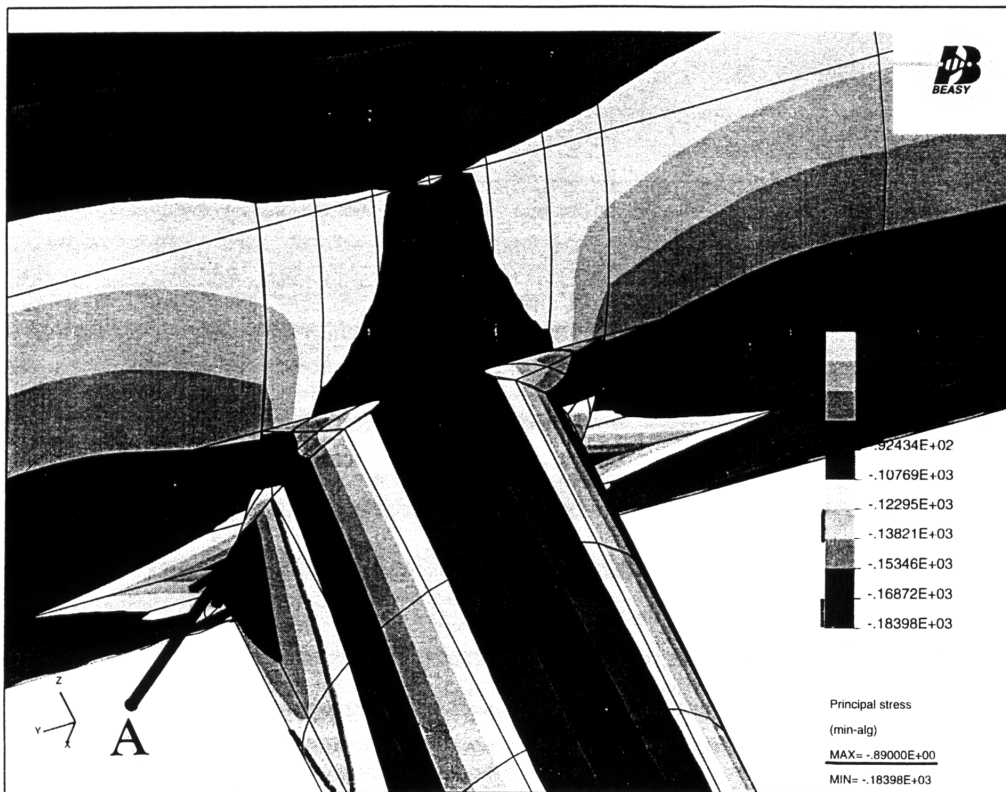
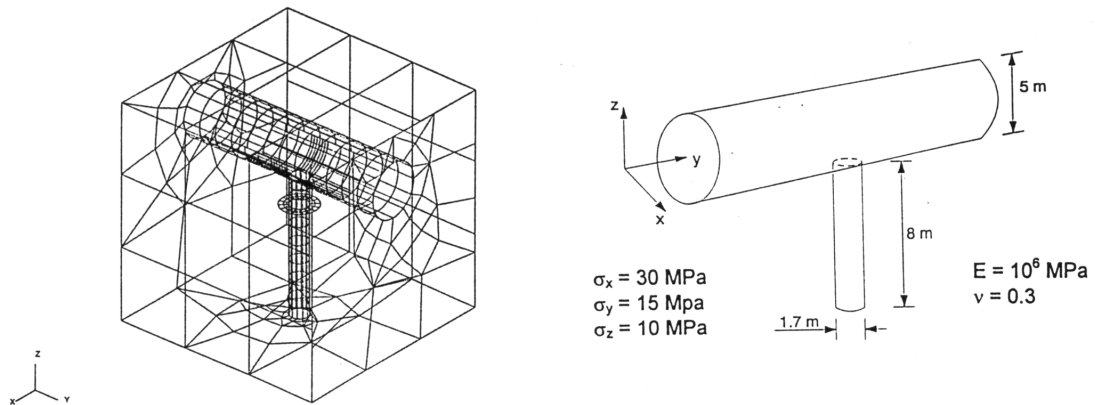
KBS3-H

För KBS3-H har två versioner undersökts:

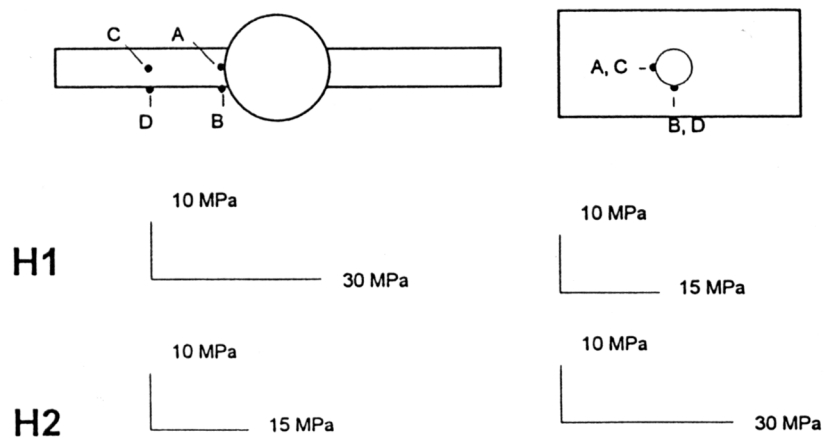
1) Borrad tunnel (3DEC och BEASY) och 2) Sprängd tunnel (BEASY).

För fallet borrad tunnel med 5 m diameter och motstående 8 m långa deponeringshål med diametern 1,6 m erhöles för mest och minst ansträngda fallen spänningarna i Figur 2-9.

Man finner att de i Figur 2-9 sammanställda spänningarna enligt de båda numeriska beräkningsmetoderna är likartade utom i punkt A för fall H1, dvs minst ansträngda fallet (Tunneln orienterad NE/SW). För denna punkt ger boundary element-lösningen spänningsfördelningen enligt Figur 2-10, som visar att tangentialspänningen har sitt lägsta värde i punkten A men att den ökar till ca 10 MPa redan på någon decimeters avstånd från tunnelväggen och därmed närmar sig 3DEC-värdet.



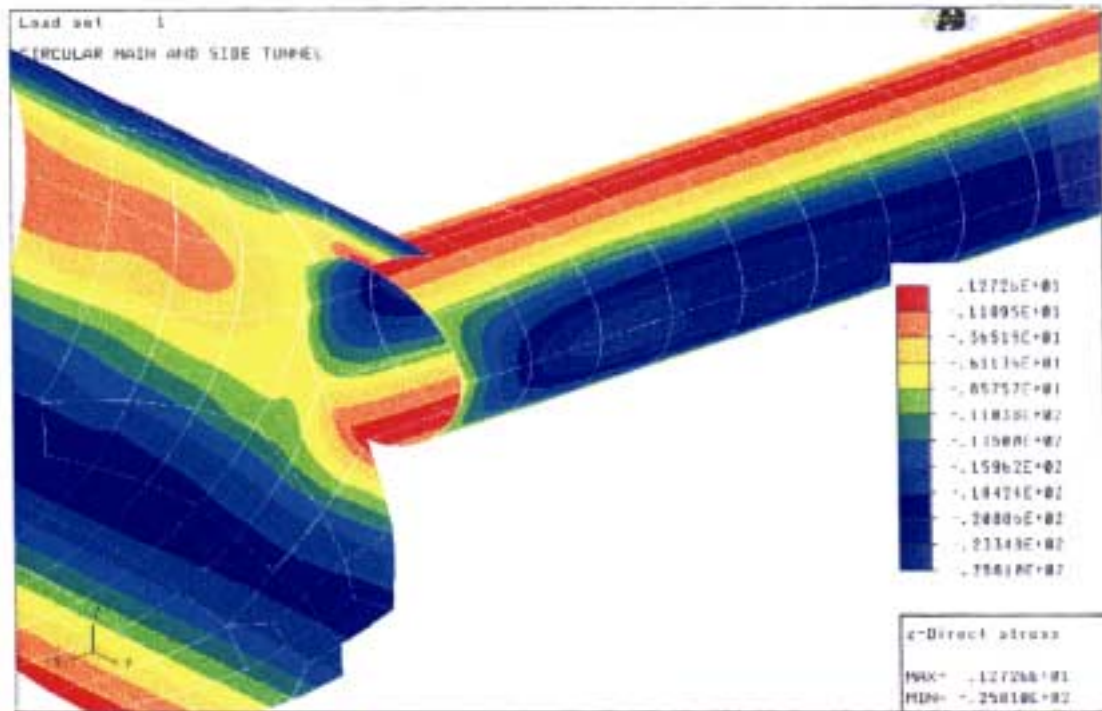
Figur 2-8 Resultat av BEASY-analys. Överst: Elementnät och beräkningsförutsättningar. Underst: Tangentialspänningens fördelning vid mest ansträngda tillstånd (BEASY).



Tangentialspänningar i MPa

Fall		A	B	C	D
H1	3DEC	13	21	23	29
	BEASY	6	26	25	26
H2	3DEC	19	64	1	75

Figur 2-9 Spänningar i karakteristiska punkter i KBS 3-H. Överst: Beräkningsfall, H1=minst ansträngt fall (Tunnel orienterad NE/SW), H2=mest ansträngt fall /Tunnel orienterad NW/SE). Underst: Beräknade spänningar.



Figur 2-10 Tangentialspänning i z-riktning i punkten A, fall H1 (BEASY).

Man finner av Figurerna 2-7 och 2-9 att spänningssituationen är väsentligt gynnsammare för konceptet KBS3-H än för KBS3-V i mest ansträngda fall. Det mest ansträngda fallet för KBS3-H (Tunneln orienterad NW/SE och hålen i NE/SW) ger spänningar av samma storlek som det minst ansträngda fallet för KBS3-V, vilket innebär att man från belastningssynpunkt kan orientera ett förvar av typ KBS3-H godtyckligt utan att ge upphov till kritiska spänningar.

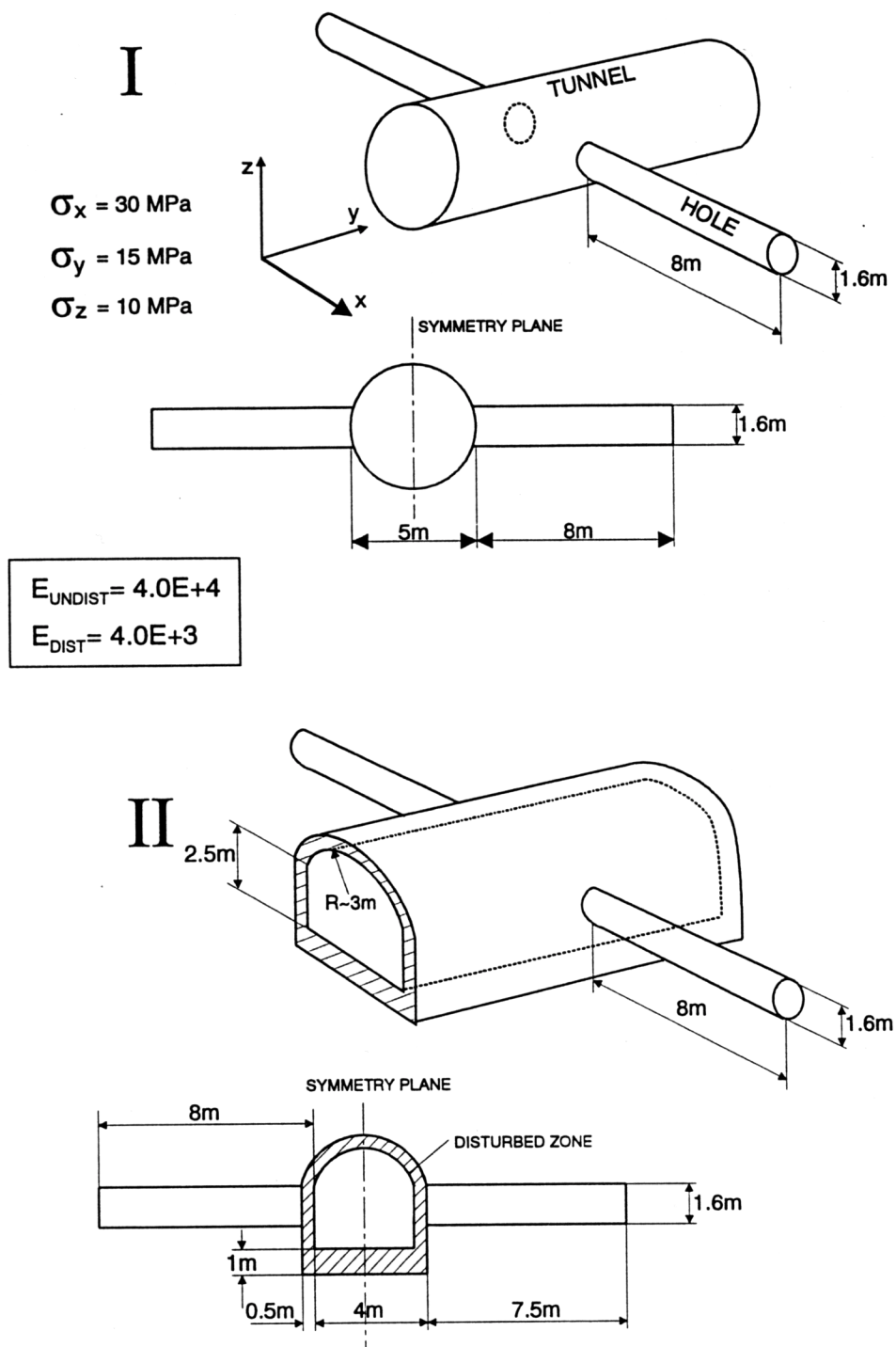
För fallet sprängd tunnel gjordes beräkningen med hjälp av BEASY med antagandet att den sprängstörda zonen sträcker sig in i berget 0,5 m i väggar och tak och 1 m i golvet: Effekten av sprängningen antogs vara att E-modulen hos det ostörda berget 4×10^4 MPa reducerades till 4×10^3 MPa i störzonen (Figur 2-11). Resultatet av beräkningarna som sammanfattas i Tabell 2.3-1 innebär fördelning av tangentialspänningen enligt Figur 2-12 i två sektioner (yy i en horisontell sektion genom punkterna A och C i Figur 2-9, och zz i en vertikal sektion genom punkterna B och D i samma figur). Fallet är det minst ansträngda fallet (H1) med tunnlarna orienterade NE/SW.

Tabell 2.3-1 Spänningar i MPa i karakteristiska punkter enligt Figur 2-9. (H1, dvs minst ansträngda fallet med tunnlarna orienterade NE/SW).

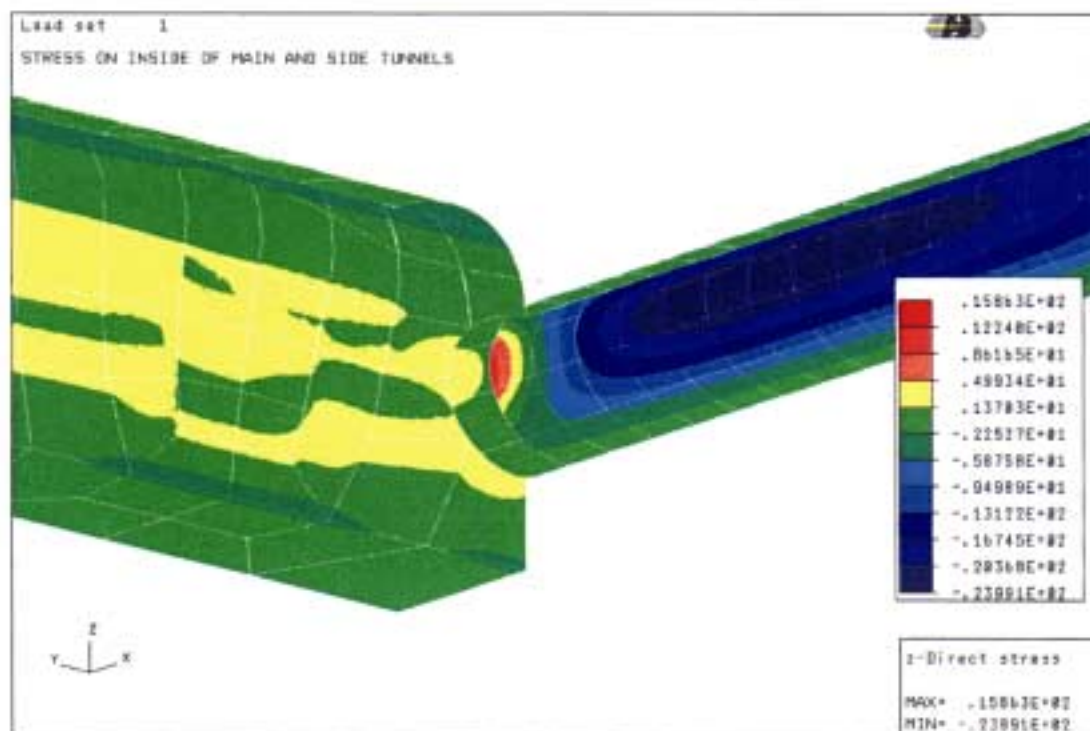
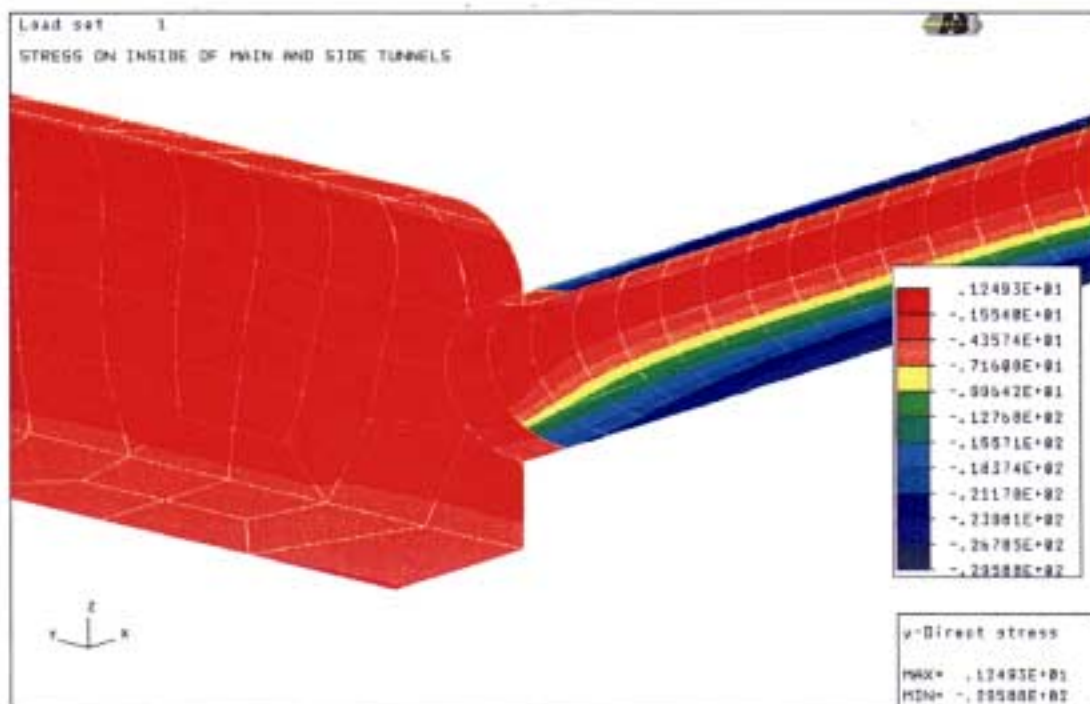
Fall	A	A*	B	B*	C	D
H1 Borrard tunnel	6	11	26	26	25	26
H1 Sprängd tunnel	~	-15	3	27	25	29

* Avser punkt motsvarande A i gränssyta mellan störd zon och ostört berg.

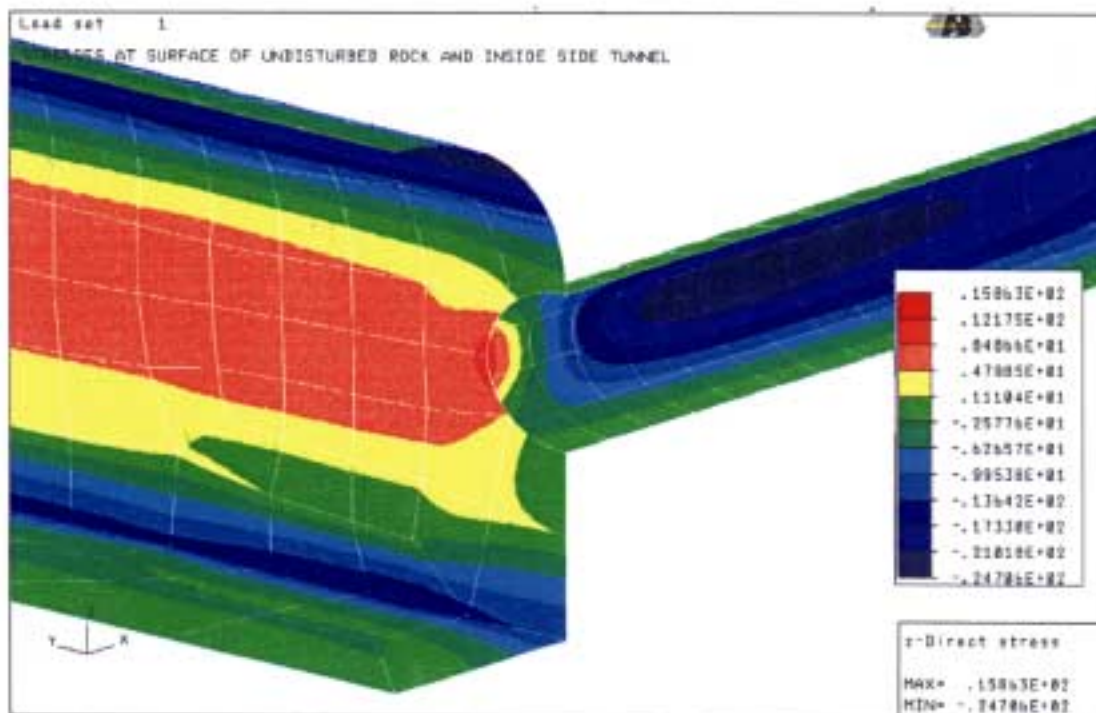
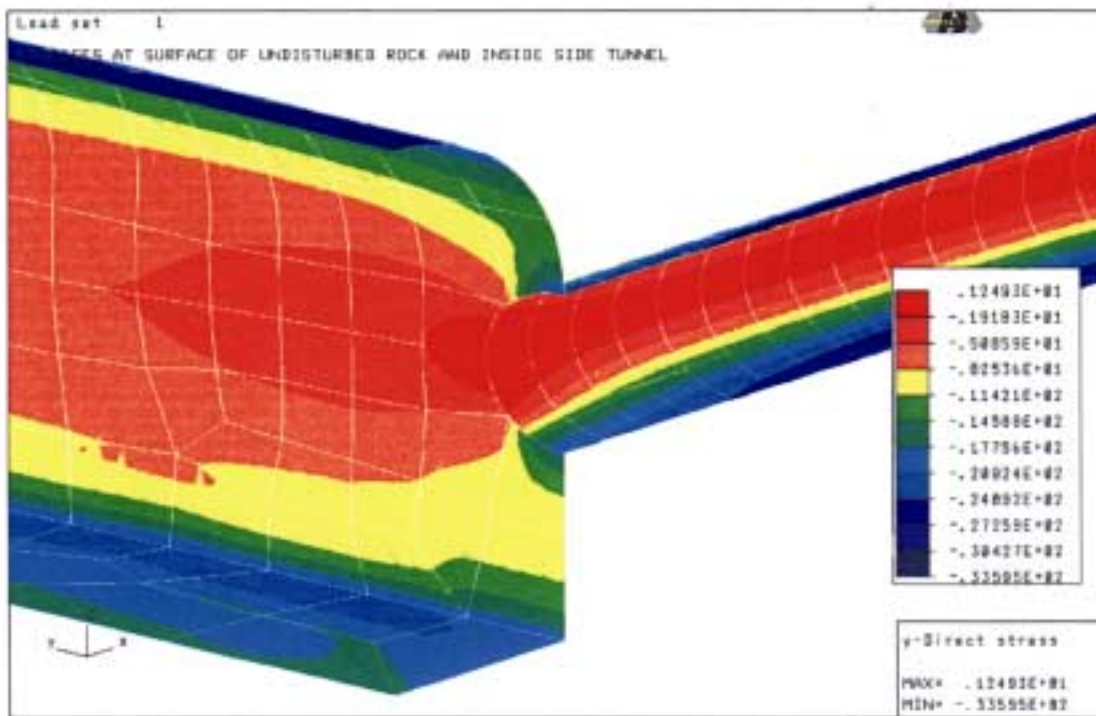
Av beräkningarna framgår att det sker en betydande avlastning i störzonen (jfr skillnaden i tangentialspänning i punkt A respektive B i Tabell 2.3-1). Den är samhörig med en viss, praktiskt betydelselös tryckspänningsökning längre ut i de horisontella deponeringshålen (punkterna B*, C och D i Tabell 2.3-1). Man bör observera att en betydande dragspänning (-15 MPa) uppkommer i ett horisontellt snitt genom deponeringshålets vägg vid gränssytan mellan störd zon och ostört berg (Figur 2-13). Betydelsen härav diskuteras i Kapitel 3, som avser bergmekaniska effekter på närfältets vattenomsättning.



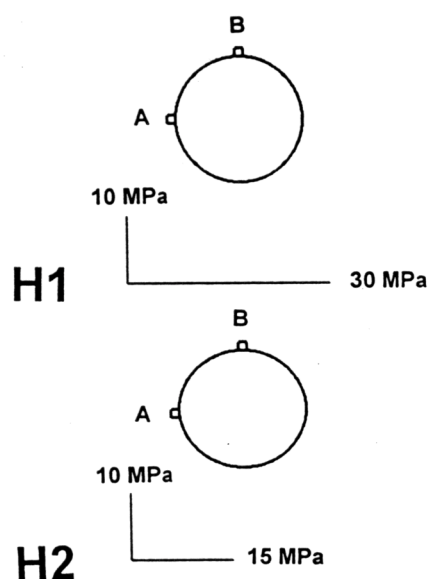
Figur 2-11 Antagna beräkningsförutsättningar för BEASY-beräkningarna av KBS3-H med avseende på geometri, primärspänningar och E-moduler. Poisson's tal = 0,3 för ostört berg och $\nu=0,2$ för störzonen. Överst: Borrard version. Underst: Sprängd tunnel. (Minst ansträngt fall, dvs tunnlarna orienterade NE/SW.)



Figur 2-12 Spänningar i KBS3-H, sprängda fallet, minst ansträngt tillstånd (H1) med tunnlar orienterade NE/SW (BEASY). Tunnelperiferin svarar mot fria ytan. Överst: Horisontalspänningen (yy) vid tunnel- och hålperiferi. Underst: Vertikalspänningen (zz) vid tunnel- och hålperiferi.



Figur 2-13 Spänningar i KBS3-H, sprängda fallet, minst ansträngt tillstånd (H1) med tunnlar orienterade NE/SW (BEASY). Tunnelperifering svarar mot yttre begränsningsytan hos störzonen. Överst: Horisontalspänningen (yy) vid hålperiferin och gränsytan mellan störzon och ostört berg runt tunneln. Underst: Vertikalspänningen (zz) vid hålperiferin och gränsytan mellan störzon och ostört berg runt tunneln.



Tangentialspänningen i MPa

Fall	A	B
H1	0	40
H2	5	25

Figur 2-14 Spänningar i karakteristiska punkter i MLH. Överst: H1=mest ansträngt fall med tunnlarna orienterade NE/SW, H2=minst ansträngt fall med tunnlarna orienterade NW/SE. Underst: beräknade spänningar.

MLH

MLH representerar det från beräkningssynpunkt enklaste fallet. Tillämpning av analytiska lösningar ger för orientering av MLH vinkelrätt mot respektive parallellt med största huvudspänningen (primärspänningen) i berget tangentialspänningarna i Figur 2-14.

Man finner att det mest ansträngda fallet ger ett högsta värde på tangentialspänningen 40 MPa i tak och golv medan denna spänning är 0 i väggarna (punkt A). Tak- och golvspänningarna är mindre än 30% av lägsta mätta enaxliga tryckhållfastheten, vilket innebär att bristningar och stabilitetsproblem inte uppkommer i samband med borrningen. Däremot innebär den låga tangentialspänningen i väggarna att effektivtrycket i naturliga, flacka, hydrauliskt aktiva diskontinuiteter som kan anstå på halva vägghöjden minskar från 10 till 0 MPa, vilket kan ge ökad genomsläpplighet längs MLH. För det minst ansträngda tillståndet är den högsta tangentialspänningen mindre än 20% av lägsta mätta enaxliga tryckhållfastheten.

Slutsats

Sannolikheten för överbelastning med bristningar och problem med stabiliteten hos berget närmast deponeringshålens väggar är olika stor för de tre koncepten. Tabell 2.3-2 beskriver skillnaden.

Tabell 2.3-2 Högsta tangentialspänning i deponeringshålen i de tre koncepten.

Koncept	Max tangentialspänning, MPa			
	Mest ansträngt fall	Tunnelorientering	Minst ansträngt fall	Tunnelorientering
KBS3-V, borrarad tunnel	184	NE/SW	72	NW/SE
KBS3-V, sprängd tunnel	190*	NE/SW	75	NW/SE
KBS3-H, borrarad tunnel	75	NW/SE	26	NE/SW
KBS3-H, sprängd tunnel	80*	NW/SE	29	NE/SW
MLH	40	NE/SW	25	NW/SE

*) Uppskattad

Om man önskar frihet att orientera tunnlar och hål oberoende av rådande primärspänningar i berget kan högsta tangentialspänningen bli kritiskt hög i fallet KBS3-V. För övriga koncept spelar inte orienteringen någon avgörande roll och MLH uppvisar speciellt gynnsamma egenskaper. Kan man välja en orientering motsvarande "minst ansträngt fall" ger samtliga koncept god eller - för KBS3-V - acceptabel säkerhet mot överbelastning av berget, men med hänsyn till att KBS3-H och MLH innebär betydligt mindre ansträngning av berget vid mest gynnsam orientering och dessutom inte ger upphov till kritiska spänningstillstånd oberoende av orienteringen av tunnlar och hål, är dessa koncept överlägsna KBS3-V.

2.4 Inverkan av diskontinuiteter

2.4.1 Allmänt

Man kan särskilja fyra huvudfall av bergmekanisk betydelse av diskontinuiteter då de skär genom deponeringshål och tunnlar. De kan ge upphov till:

1. Utfall av block p g a kritisk orientering och belägenhet hos diskontinuiteter. Problemet behandlades i Kapitel 2.2.
2. Förskjutning utmed diskontinuiteter som skär genom deponeringshål och tunnlar.
3. Uppkomst av spänningskoncentrationer med överbelastning som följd där diskontinuiteter är belägna nära deponeringshål.
4. Sprängningsbetingat öppnande av diskontinuiteter som är parallella med tunnlar.

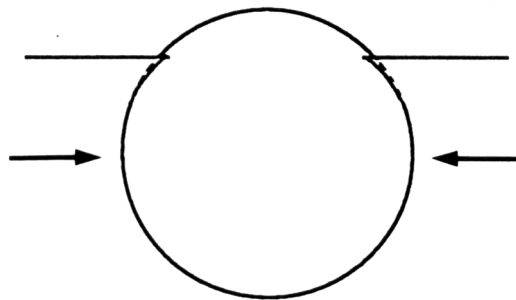
I detta kapitel beskrivs inledningsvis villkoren för, processerna vid, samt konsekvensen av förskjutningar utmed betydelsefulla diskontinuiteter. Sprängningspåverkan berörs för att belysa skillnader mellan borrhade och sprängda tunnlar av typen KBS3. Betydelsen av de olika effekterna för de tre förvarskoncepten jämförs avslutningsvis.

För beräkningarna har boundary elementkoden BEASY använts (2D och 3D). Hänvisning görs också till tidigare beräkningar i 2D med hjälp av diskreta elementkoden UDEC.

2.4.2 Förskjutning utmed diskontinuiteter som skär genom deponeringshål och tunnlar

Problemställning

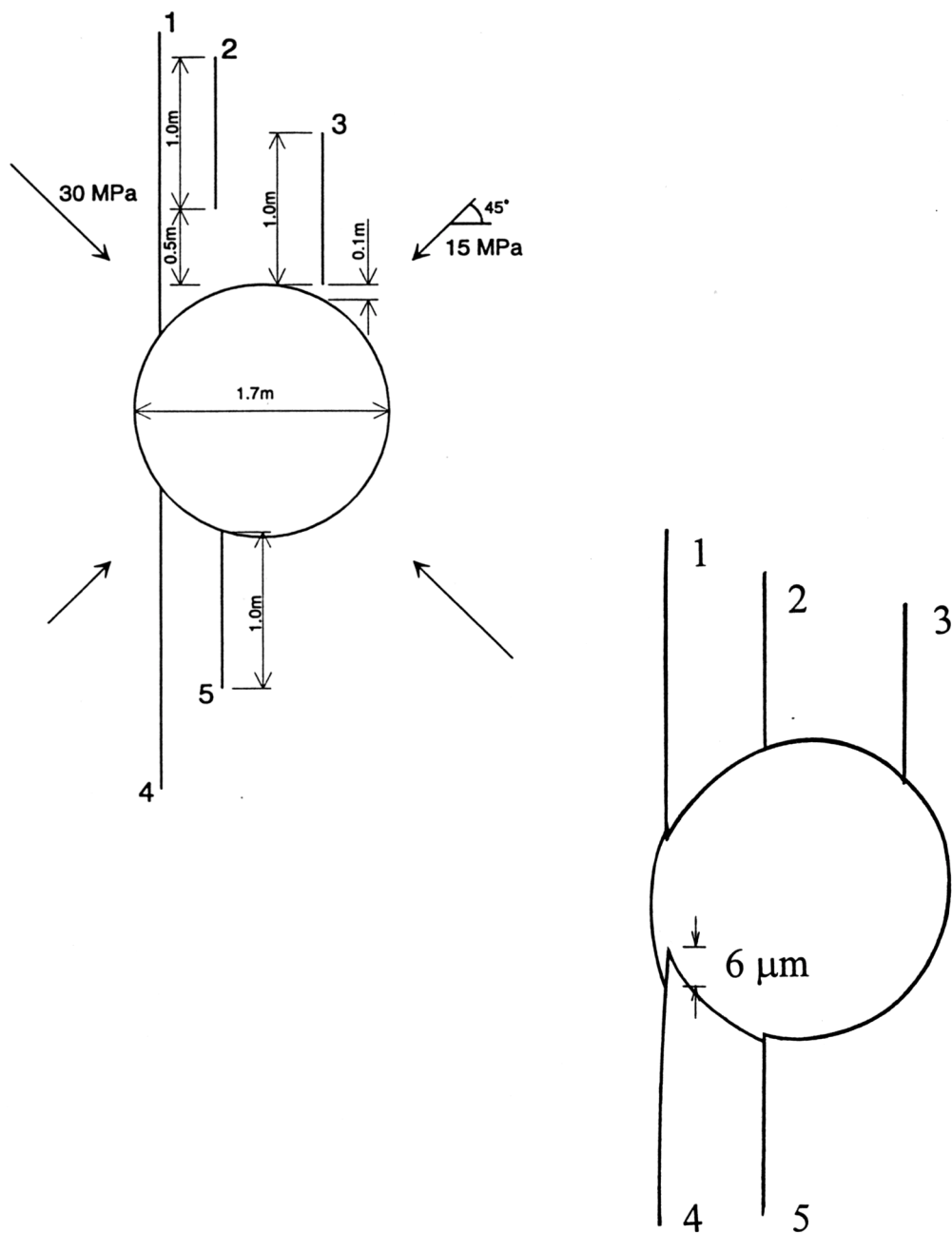
Förskjutning utmed diskontinuiteter som skär hål och tunnlar kan leda till så stora deformationer att instabila förhållanden kan komma att råda (Figur 2-15).



Figur 2-15 Deformationsmönster ("tongor") vid förskjutning utmed diskontinuitet som skär eller tangerar hål/tunnel (Storleken på förskjutningen överdriven).

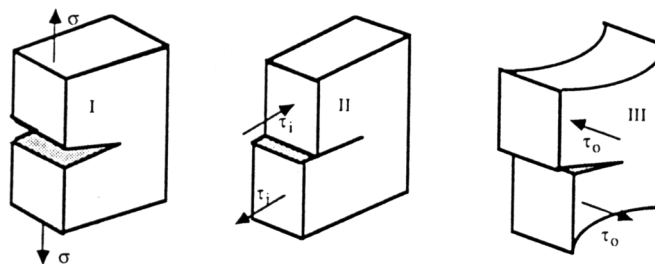
Lösning

Problemet har undersökts genom beräkning i 2D med hjälp av BEASY enligt Figur 2-16. För bergmatrisen antogs $E=10^5$ MPa och $\nu=0,3$ och för diskontinuiteterna antogs försumbart skjuvmotstånd och ingen förändring av vidd, innebärande att spänningsförhållandena vid sprickändarna avgör förskjutningarnas storlek och risk för propagering.



Figur 2-16 BEASY-beräkning av förskjutning utmed diskontinuiteter som skär genom deponeringshål med diametern 1,7 m. Överst: beräkningsfall. Underst: förskjutnings-mönster och största förskjutning ledande till kanalbildning. (Storleken på förskjutningarna överdriven.)

De diskontinuiteter som har stor längd i eget plan och skär öppningen nära väggarna undergår de största förskjutningarna och har den högsta potentialen för propagering, vilket illustreras av det enligt brottmekaniken beräknade spänningskoncentrationstalet för fallet I i Figur 2-17.



Figur 2-17 Basic modes of crack loading. Left: Mode I ($\tau=0, \sigma \neq 0$). Center: Mode II ($\tau \neq 0, \sigma=0$). Right: Mode III ($\tau \neq 0, \sigma=0$), [5].

Spänningskoncentrationsfaktorn K (K_I för fall I) har beräknats för en jämförelse av tillståndet hos de fem svagheterna som antas ha samma egenskaper [5]. Dess storlek avgör potentialen för bristning, förskjutning och propagering av svagheten ifråga. Förhållandet K_I/K_0 , dvs det s k normaliserade värdet på K_I , är högst för Diskontinuitet 2 och 3 (Tabell 2.4-1) som alltså är mest ansträngda och som kan propagera och nå hålet. Förskjutningen utmed dessa svagheter är liten men propageringen innebär att från början isolerade diskontinuiteter av 5:e ordningen kan bli hydrauliskt aktiva komponenter i närfältet. De största förskjutningarna erhöles för Diskontinuiteterna 1 och 4 (samma svaghet) beroende på deras stora längd. Det antyder att det huvudsakligen är 4:e ordningens diskontinuiteter som kommer att undergå förskjutning.

Tabell 2.4-1 Spänningskoncentrationsfaktorn K_I i primär och normaliserad form.

Diskontinuitet	Ordning	Längd, m	K_I	K_I/K_0
1	4	2,0	27	0,321
2	5	1,0	28	0,666
3	5	1,0	31	0,738
4	4	2,0	26	0,309
5	5	1,0	16	0,269

Förskjutningarna ger upphov till tungor enligt Figur 2-15 och 2-16 som skapar långsgående kanaler. För det aktuella fallet beräknades de få ett djup av ca $6 \mu\text{m}$ och en vidd av några få μm . Det har konsekvenser när det gäller transport av vatten, korroderanter och radionuklider enligt diskussionen i Kapitel 3.

Relevans för de tre koncepten

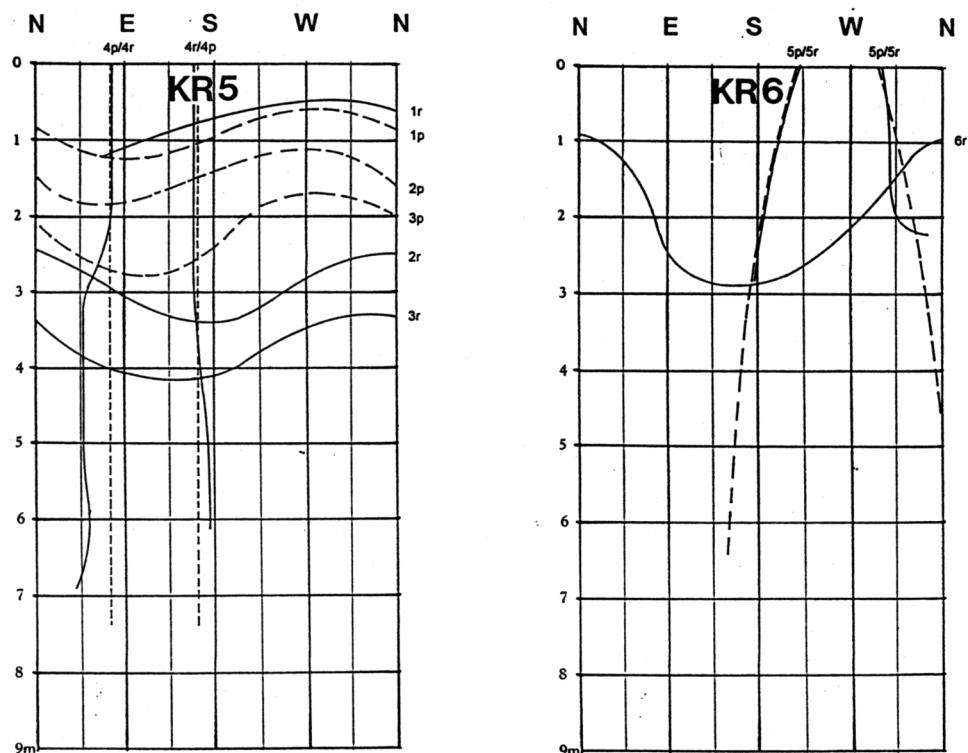
Fenomenet med förskjutning utmed diskontinuiteter som skär hål och tunnlar kan förekomma i samtliga koncept. Om man tar den förenklade strukturmodellen i Figur 2.4 som grund kan man uppskatta frekvensen av skärningar mellan deponeringshål och 4:e ordningens diskontinuiteter enligt Tabell 2.4-2. I tabellen anges sannolikheten för skärning mellan hål och någon därmed parallell diskontinuitet som kvottal inom parentes. Sannolikhetstalen är definierade som förhållandet mellan bergytan mellan diskontinuiteter parallella med hålen och hålens tvärsnittsytta.

Tabell 2.4-2 Frekvens av 4:e ordningens diskontinuiteter som skär deponeringshål (jfr Figur 2-4). Uppskattad sannolikhet för skärning mellan hål och parallell diskontinuitet inom parentes.

Koncept	Hål-orientering	Parallella med hål (Branta och flacka)	Vinkelräta mot hål	Sneda genom hål med risk för blockfall
KBS3-V		0-2 (1/10)	1-2	1-2
KBS3-H (E/W)	(NE/SW)	0-3 (1/5)	2-3	0-2
KBS3-H (N/S)	(NW/SE)	0-2 (1/10)	1-2	0
MLH (E/W)	(NE/SW)	0-3 (1/5)	0,3/m hål	0
MLH (N/S)	(NW/SE)	0-2 (1/10)	0,2/m hål	0-2

Värdena i Tabell 2.4-2 kan endast ses som ungefärliga mått på frekvensen av skärningar mellan hål och betydelsefulla diskontinuiteter. De högsta värdena kan tas som konservativa och innebär att de flesta deponeringshålen i koncepten KBS3V och H genomskärs av 5-6 betydelsefulla diskontinuiteter. I genomsnitt erhålls ett värde av 2-4 skärningar och det är intressant att se att detta överensstämmer väl med observationerna i två av de tre 8 m djupa hålen med 1,5 m diameter i TVO:s anläggning i Olkiluoto (Figur 2-19). Man kan förmoda att fallet med längsgående (axiella), skärande diskontinuiteter är vanligt i samtliga koncept vilket kan göra förskjutningar av den typ som visas i Figur 2-15 betydelsefulla. KBS3-H har största förutsättningen för sådan påverkan.

Den starkt förenklade strukturmodellen innebär att KBS3-H hål och MLH orienterade NE/SW innebär färre snett skärande diskontinuiteter och något flera skärande svagheter som är parallella med hålen. Skillnaden är emellertid, med hänsyn till verkliga avvikelser från den antagna strukturella regelbundenheten, varken signifikant eller säkerställd.

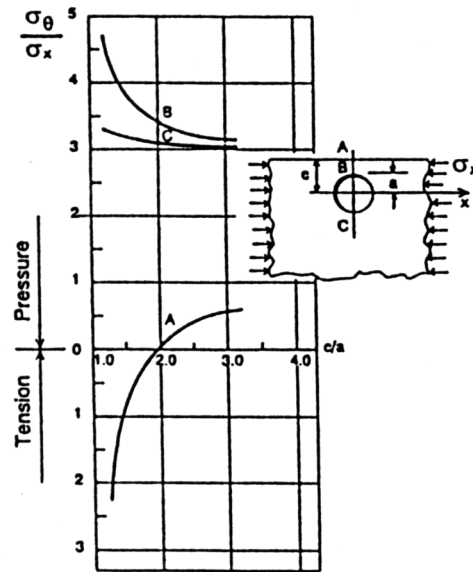


Figur 2-18 Inmätta, vattenförande diskontinuiteter (sprickor) i TVO-hålen KR5 och KR6 i Olkiluoto (tonalit). Heldragna linjer markerar verkliga sprickor (1r, 2r, osv) medan predikterade sprickor är ritade som streckade linjer. Predikteringen grundades på en allmän, förenklad bergstruktur och kärnborrade pilothål i storhålens centrum.

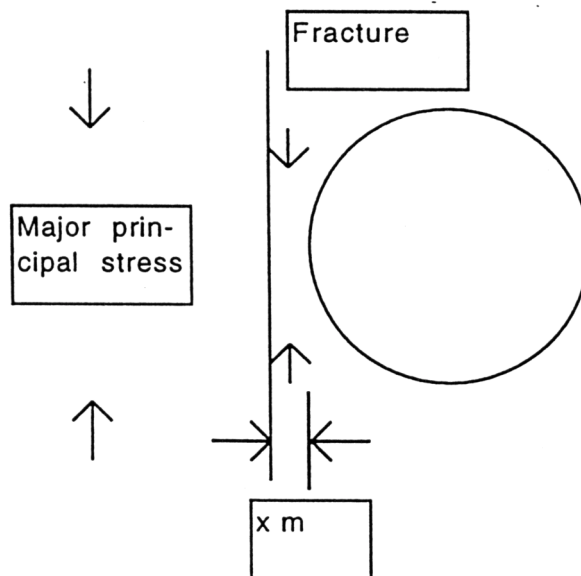
2.4.3 Spänningskoncentrationer med överbelastning orsakade av diskontinuiteter som skär tunnlar nära deponeringshål

Problemställning

Man kan visa med analytiska metoder att dragspänningar och höga tryckspänningar uppkommer vid periferin hos hål som tas upp nära fria ytor i starkt belastat berg (Figur 2-19) och ett liknande fenomen kan förväntas för fallet i Figur 2-20, dvs då diskontinuiteter med låg skjuvhållfasthet är belägna nära deponeringshål. För fallet i Figur 2-19 uppkommer, för håldiametern 1,6 m och $\sigma_x=60$ MPa, som kan svara mot tangentialspänningen i ett tunnelgolv, dragspänningen 180 MPa i punkt A och tryckspänningen 360 MPa i punkt B om tjockleken hos bergtungan är 10 cm. Motsvarande värden är ca 30 MPa respektive 220 MPa då tungan är 30 cm tjock. Det rör sig alltså om kritiskt höga spänningar. I slutförvaret är det inte tal om fria ytor nära deponeringshålen och spänningarna förväntas därför bli lägre.



Figur 2-19 Förhållande mellan tangentialspänning σ_θ och primärspänning σ_x vid hål nära en fri rand i ett enaxligt spänningsfält [1].



Figur 2-20 Belastning av bergtunga mellan deponeringshål och diskontinuitet med lågt skjuvmotstånd.

Lösning

Fallet har undersökts med 2D BEASY för x-värden mellan 1 cm och 30 cm och resultatet sammanfattas i Tabell 2.4-3. Figur 2-21 visar numreringen av boundary-elementen. Typiska resultatredovisningar ges i Figur 2-22. Beräkningsförutsättningarna var att en primärspänning ("major principal stress" i Figur 2-20) av 25 MPa råder, samt att skjuvstyvheten K_S hos diskontinuiteten är 5000 MPa/m, dvs ett värde som kan svara mot en kloritfylld spricka med stor längd. E sattes till 10^4 MPa och Poissons tal till 0,3.

De praktiskt mest betydelsefulla spänningarna uppkommer i element 20, som svarar mot punkt B i Figur 2-19 och i element 42, som svarar mot punkt A.

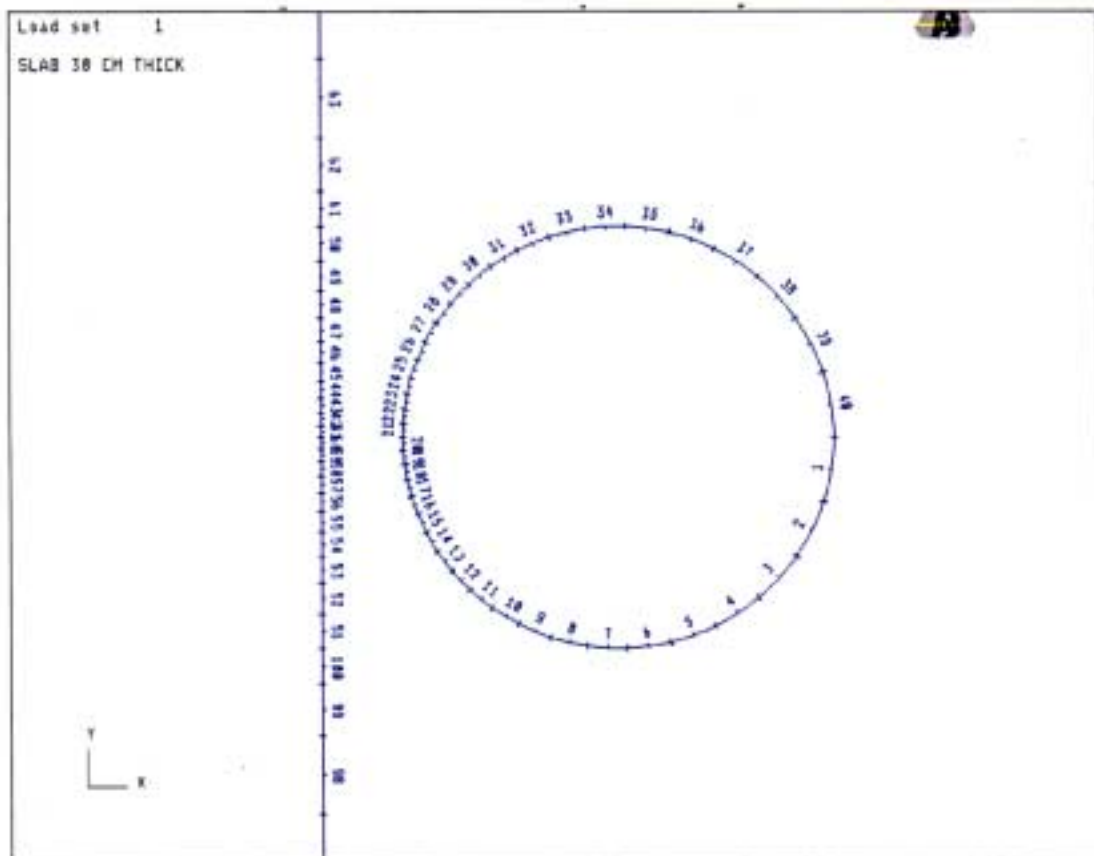
Tabell 2.4-3 Tangentialspänningen i MPa där tungan mellan hål och diskontinuitet är tunnast. ("Major principal stress" i Figur 2-20).

Tungans tjocklek, cm	Vid hålperiferin	Vid diskontinuiteten
1	170	170
5	105	95
10	80	75
20	70	60
30	65	50

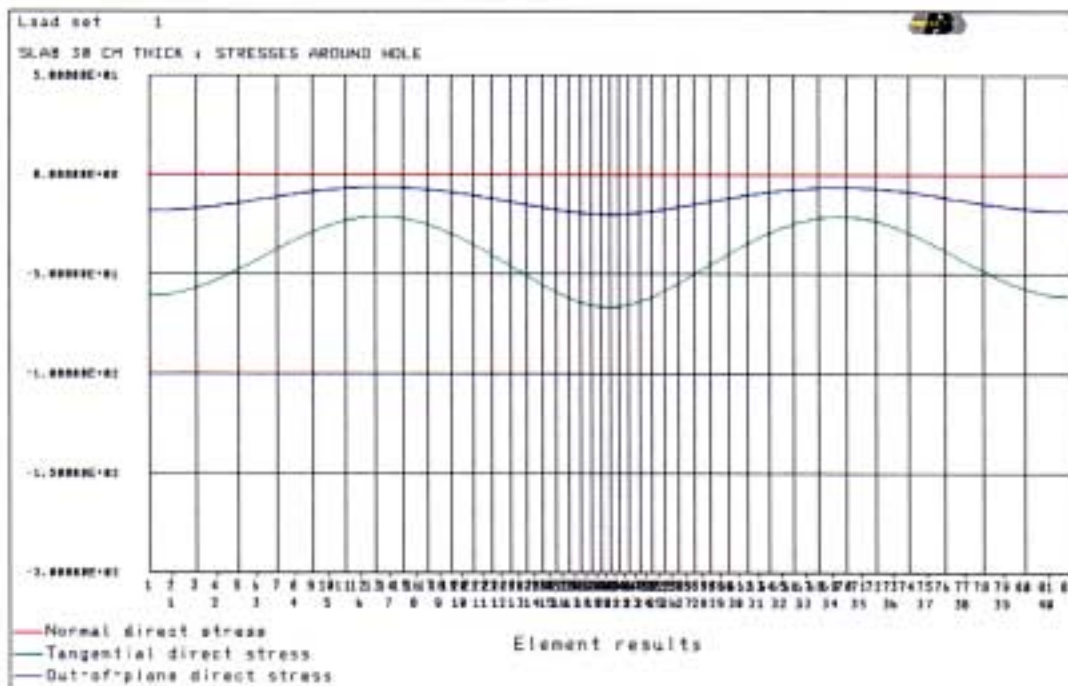
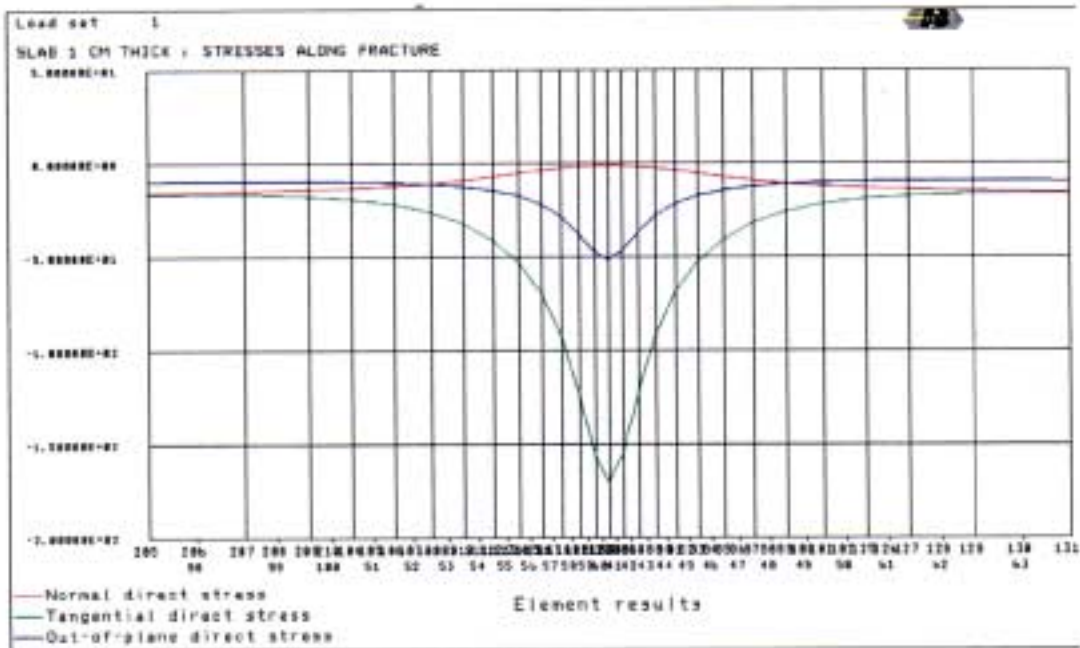
Man finner att primärspänningen 25 MPa ger spänningar i bergtungan som är i närheten av tryckhållfastheten vid några få centimeters avstånd mellan hålperiferi och diskontinuitet medan större avstånd inte ger bristning i bergmatrisen. Hållfasthetens volymsberoende innebär emellertid att aktivering, propagering och förskjutning av 5:e och högre ordningars diskontinuiteter kan inträffa då avståndet från hålperiferin till den aktuella 4:e ordningens diskontinuitet är upp till 30 cm vid primärspänningen 30-35 MPa. I sådana fall finns det alltså risk för bristning och uppkomst av en långsgående krosszon utmed hålets längd.

Relevans för de tre koncepten

Fenomenet med överbelastning och uppkomst av en sprickzon mellan ett deponeringshål och en med hålet parallell ("axiell") diskontinuitet av 4:e ordningen förutsätter att primärspänningen är hög och att avståndet mellan diskontinuitet och hålperiferi är litet. Överbelastning av bergtungan kan äga rum om primärspänningen överskrider ca 25 MPa, vilket innebär att fenomenet kan uppträda i KBS3-V och KBS3-H och MLH vid mest ansträngt fall men inte i KBS3-H och MLH vid minst ansträngt fall. Om frekvensen av sådana diskontinuiteter antas vara som anges i Tabell 2.4-2 kan KBS3-V och KBS3-H och MLH med hålen orienterade NW/SE ge någon kompensation för denna brist. Sammantaget kan KBS3-H med tunnlarna orienterade NE/SW och MLH med orientering NW/SE ses som minst utsatta för risken med uppkomst av överbelastning och axiella sprickzoner.



Figur 2-21 Numrering av boundary-elementen för vilka spänningarna redovisas i Figur 2-22.



Figur 2-22 Tangentialspänningen runt deponeringshål i enaxligt spänningsfält med 25 MPa tryck. Överst: 1 cm tjocklek hos bergtungan. Underst: 30 cm tjocklek hos bergtungan.

2.4.4 Spänningsändringar, relaxation resp spänningsökning, orsakade av diskontinuiteter som skär deponeringshål vinkelrätt, nära tunnlar

Problemställning

Av samma skäl som sprängning av tunnlar i KBS3-koncepten ger en störszon med lägre spänningar kan man förvänta sig att en flack 3:e eller 4:e ordningens diskontinuitet som löper på ringa djup under tunnelgolvet i KBS3-V påverkar spänningarna utmed hålets övre del. För att undersöka fenomenet användes 3D BEASY vid beräkning av spänningar och deformationer i de två fallen i Figur 2-23. Det ena innebär att diskontinuiteten är av 3:e eller 4:e ordningen och har stor utsträckning i sitt eget plan (överst i figuren). Det andra svarar mot en lokal svaghet av 5:e ordningen.

Lösning

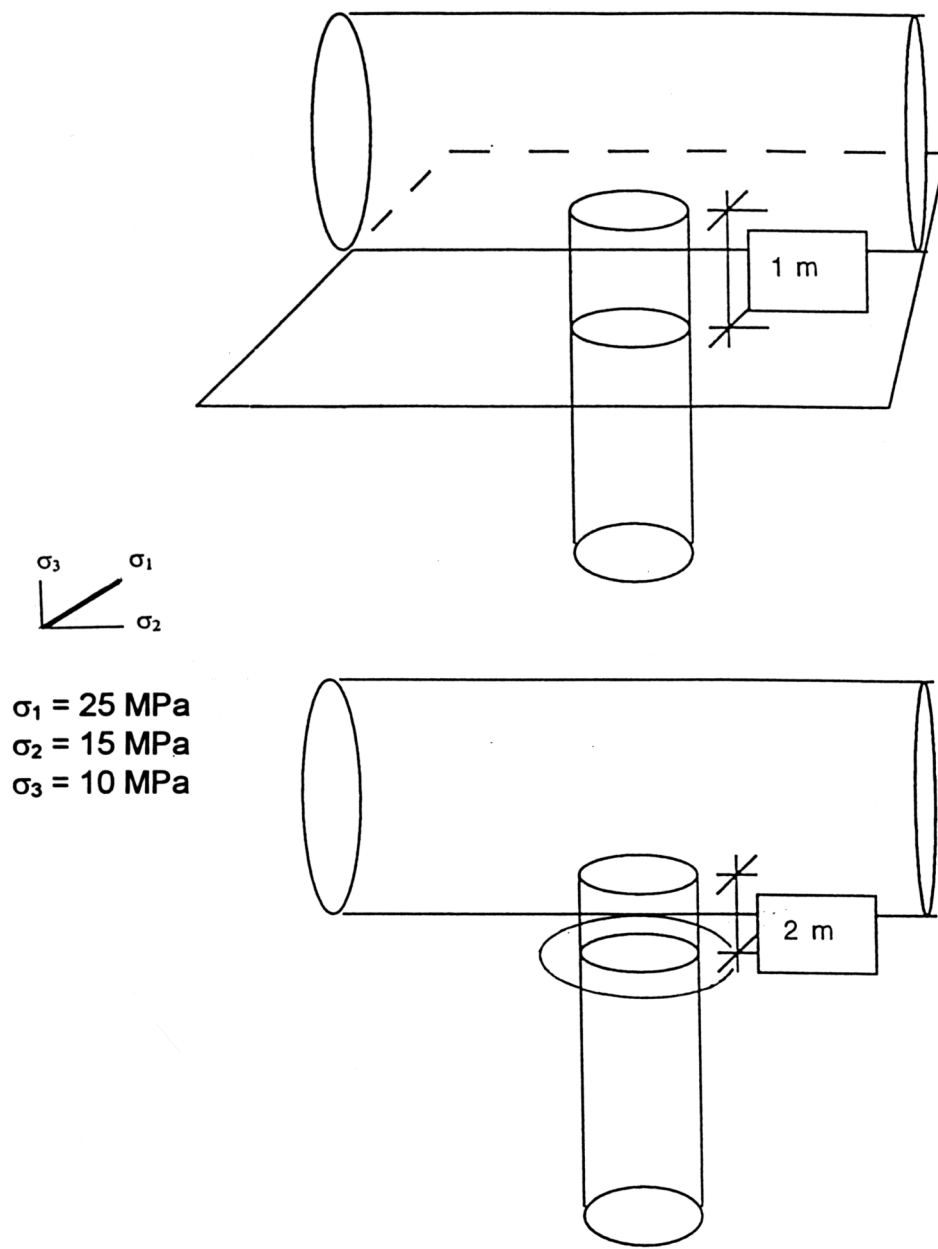
Beräkningsförutsättningarna, som illustreras av Figur 2-23 vad beträffar geometri och lastställning, innebar $E=10^4$ och Poissons tal 0,3.

För fallet med den utbredda diskontinuiteten på 1 m avstånd från den borrarade tunnelns periferi visar beräkningarna att tangentialspänningen är högre i den delen av hålet som är närmast tunneln på andra sidan om diskontinuiteten (Figur 2-24). Spänningen når upp till 148 MPa strax över den skärande diskontinuiteten i KBS3-V men sjunker till ca 90 MPa omedelbart härunder. Närmast golvet tenderar vertikalspänningen att bli dragspänning enligt Figur 2-24 (undre diagrammet), vilket kan ge förutsättningar för "discing".

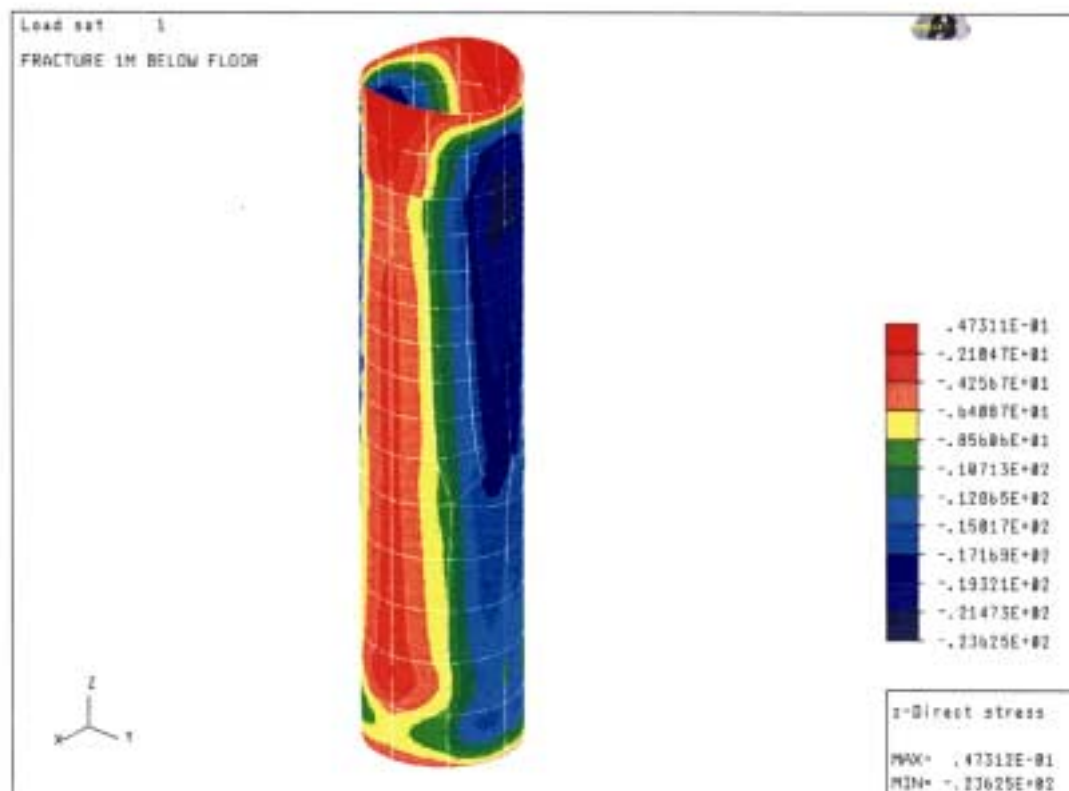
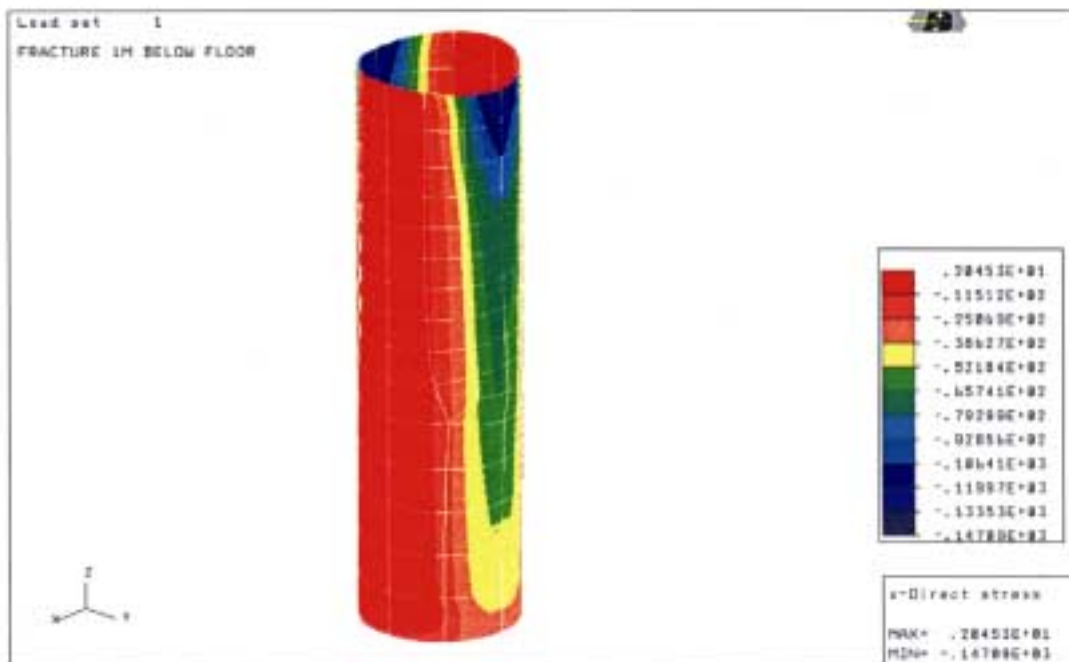
För fallet med en lokal, flack spricka som når ut ca 1 m från hålperiferin på 2 m avstånd från tunneln finner man inte någon påverkan på tangentialspänningen, som blir 141 MPa som högst, eller på vertikalspänningen.

Relevans för de tre koncepten

Inverkan på spänningar och stabilitet hos deponeringshål av diskontinuiteter nära tunneln gäller endast KBS3-koncepten. Förekomsten av sådana diskontinuiteter ger upphov till förhöjda spänningar närmast tunneln och till risk för spalling och discing om de ligger mindre än 1 m under golvet i KBS3-V. Eftersom spänningsnivån är väsentligt lägre för KBS3-H spelar brantstående diskontinuiteter nära tunnelväggarna betydligt mindre roll i detta koncept. Det innebär att KBS3-H i minst ansträngt fall, dvs med tunnlar orienterade NE/SW (hålen orienterade NW/SE), trots den högre frekvensen av sådana diskontinuiteter ger gynnsammare förhållanden än KBS3-V.



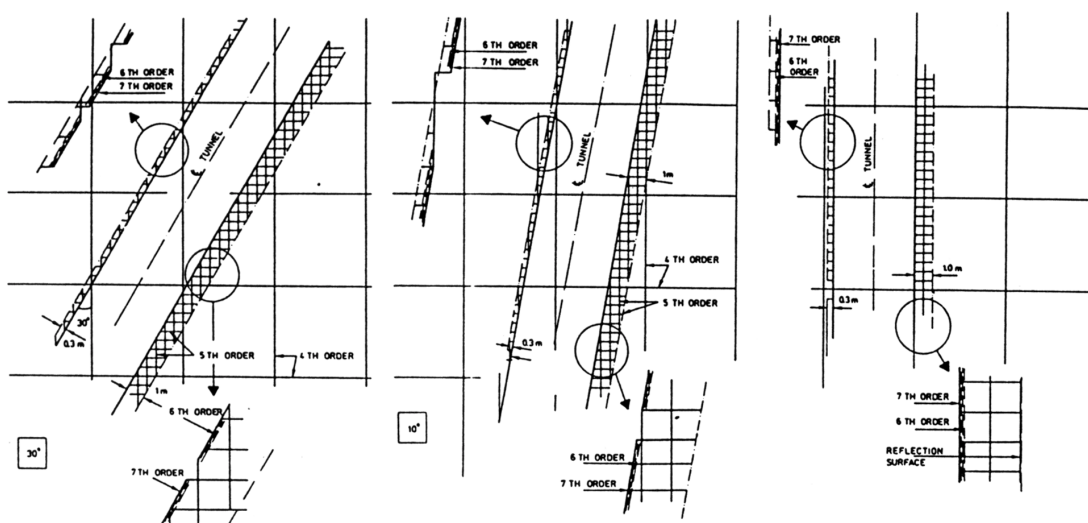
Figur 2-23 Flacka diskontinuiteter som skär deponeringshål nära tunnelgolvet i KBS3-V.



Figur 2-24 Spänningar i KBS3-V (mest ansträngt tillstånd H2 med tunnlarne orienterade NE/SW) vid flack 4:e ordningens diskontinuitet 1 m under tunnelgolvet. Överst: högsta tangentialspänningen (xx) i KBS3-V. Underst: vertikalspänningen (zz) vid hålperiferin i KBS3-V (dragspänning i översta delen).

2.4.5 Inverkan på diskontinuiteter av tunnelsprängning

Erfarenheten från bergarbeten visar att sprängning av tunnlar och schakt som är orienterade parallellt med ett system av diskontinuiteter åstadkommer uppsplätning, vidgning och propagering av dessa genom vågreflektion [1, 6, 7]. Det innebär att störzonen kan bli mer instabil och mer konduktiv om tunnlarna orienteras parallellt med dominerande svagheter, dvs NW/NE och NE/SW (Figur 2-25). Redan en vridning av 15-20° kan dock uppskattas vara tillräcklig för att påtagligt reducera effekten av spränginducerad uppsplätning. Vid parallell orientering är tortuositeten obetydlig men den ökar avsevärt vid vridning.



Figur 2-25 Schematisk bild av betydelsen av vridning för påverkan på närfältet av en sprängd tunnel i ortogonalt strukturmönster [8]. Uppsplätningen blir mindre ju större avvikelse som råder från parallell orientering.

2.4.6 Slutsats

Inverkan av diskontinuiteter på spänningssituationen och stabiliteten hos deponeringshålén är ringa utom då de är parallella med och skär hålen eller är belägna mycket nära dem.

I första fallet kan kanaler skapas utmed hålens längd, i det senare fallet kan sprickrika zoner utmed hålens längd åstadkommas.

Risken för kanalbildning är störst för KBS3-V och mindre för KBS3-H och MLH, om de sistnämnda orienteras på lämpligt sätt, dvs med KBS3-H-tunnlarna orienterade NE/SW (hålén orienterade NW/SE) och MLH orienterade NW/SE. Sprickrika zoner utbildas med större sannolikhet för KBS3-V än för KBS3-H och MLH på det sistnämnda villkoret. Betydelsen av diskontinuiteter som skär deponeringshål vinkelrätt och nära tunneln är större för KBS3-V än för KBS3-H. MLH berörs inte alls.

3 Bergmekanisk inverkan på vattenomsättning i närfältet

3.1 Betydelsefulla fall

3.1.1 Allmänt

Vattenomsättningen i närfältberget, dvs i deponeringshålens och tunnarnas närmaste omgivning, bestäms från bergmekanisk synpunkt av stabiliteten och deformationerna hos berget. Tabell 3-1 är en sammanställning av bergmekaniska effekter på vattenomsättningen. Till detta kommer inverkan av hydrotermala processer som i huvudsak har en läkande och tätande inverkan på vattenförande diskontinuiteter.

Tabell 3-1 Bergmekanisk inverkan på vattenomsättningen i närfältet. Siffrorna avser processer.

Process	Ökning av konduktiviteten		Minskning av konduktiviteten	
	Betydande	Obetydlig	Betydande	Obetydlig
Minskning av effektiva bergtrycket	2	1	-	-
Ökning av effektiva bergtrycket	-	-	-	1
Skjuvning av vattenförande diskontinuiteter	-	3	4	1
Överbelastning ledande till sprickpropagering eller sprickzoner	1	5	-	-
Överbelastning ledande till aktivering av latent diskontinuiteter	1	6	-	-

1=normalt. 2=om öppnande sker över större del. 3=om dilatans sker. 4=om nedmalning av sprickfyllnad sker. 5=om endast ett fåtal fina fissurer bildas. 6= om endast ett fåtal kanaler öppnas och ringa propagering sker.

Processerna och deras inverkan på konduktiviteten diskuteras i detta kapital med särskild hänsyn till betydelsen för de tre koncepten.

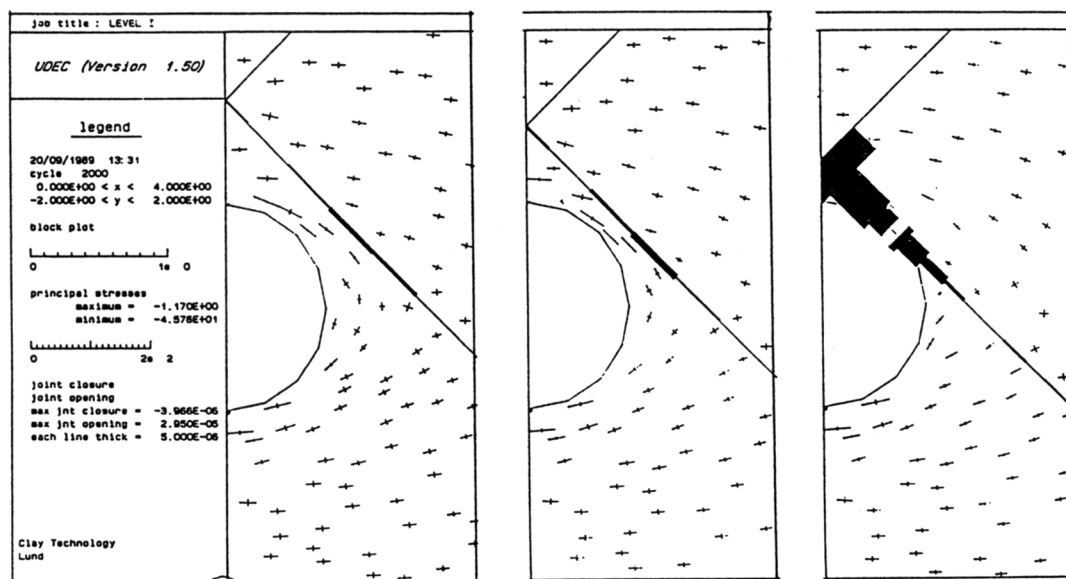
3.1.2 Ändring av effektiva bergtrycket

Spänningsfältets betydelse för konduktivitet och flöde i berg är inte känd i sin helhet. En vanlig föreställning är att konduktiviteten är störst i största huvudspänningens riktning men deviatorspänningarna har sannolikt avgörande betydelse. I detta avsnitt läggs effektivtrycket mot och skjuvspänningarna i de hydrauliskt aktiva strukturelementen (4:e ordningens diskontinuiteter) till grund för konceptjämförelsen.

Sprickviddsändringar som följd av spänningsändringar vid borrning av hål

Primärspänningssituationen och bergstrukturen bestämmer effektivtrycket mot vattenförande diskontinuiteter, vilket påverkar konduktiviteten. Tryckändringar har vanligtvis ringa eller måttlig inverkan på konduktiviteten då vattenomsättningen sker i ett fåtal kanaler, men avlastning i kombination med förskjutning av block kan leda till öppnande över en större del av en spricka och därmed till starkt ökad genomsläpplighet. Förutsättningen härför är att förhållandena är av den typ som illustreras av Figur 2-4, dvs att något system av diskontinuiteter är mer eller mindre parallellt med deponeringshålet eller tunneln. Ett praktiskt exempel visas i Figur 3-1, som demonstrerar att det endast är då parallella hål och diskontinuiteter har litet inbördes avstånd, dvs 10-30% av håldiametern, som vidgningen kan leda till en praktiskt betydelsefull ökning av konduktiviteten. Beräkningen, som utfördes med hjälp av UDEC (2D), avsåg att belysa rörelserna hos en lång kil och den illustrerar också fenomenet med överbelastning av en tunn bergtunga som utbildas mellan diskontinuiteten och hålperiferin. Vid beräkningen antogs primärspänningen σ_x (horisontell i bilden) = 20 MPa och σ_y (vertikal i bilden) = 10 MPa. Tungan utsätts för ett nästan enaxligt spänningstillstånd med största tryckspänningen = 46 MPa i den mittersta sektionen i figuren i analogi med resonemanget i Kapitel 2.4.2. Den lokala kompression av diskontinuiteten som man beräkningsmässigt får fram, ca 4 μm , har helt försumbar inverkan på dess vattenföringskapacitet.

Ett mera generellt exempel på betydelsen av bergets struktur för bedömning av spänningsinducerade förändringar av den hydrauliska konduktiviteten ges av fallet i Figur 3-2. Det avser en antagen struktur för berget i Stripa gruva för vilket en 3DEC-beräkning gjordes med syfte att uppskatta effekten av uttagning av en tunnel med olika orientering i berg med vanlig struktur [8]. Förutsättningarna för beräkningen framgår av texten till Figur 3-2. Resultatet illustreras i samma figur och innebär att den antagna medelkonduktiviteten ca 10^{-9} m/s ökar till 10^{-8} à 10^{-7} m/s beroende på hur stor vinkeln är mellan tunnelaxelns och diskontinuiteternas strykriktning.

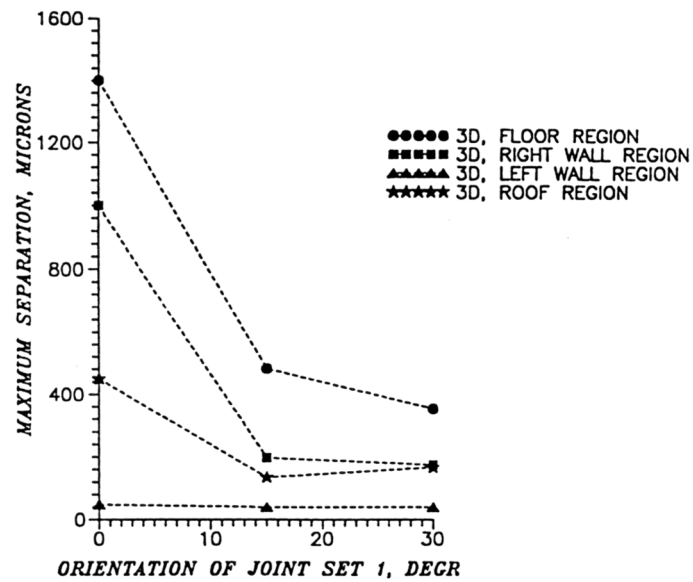
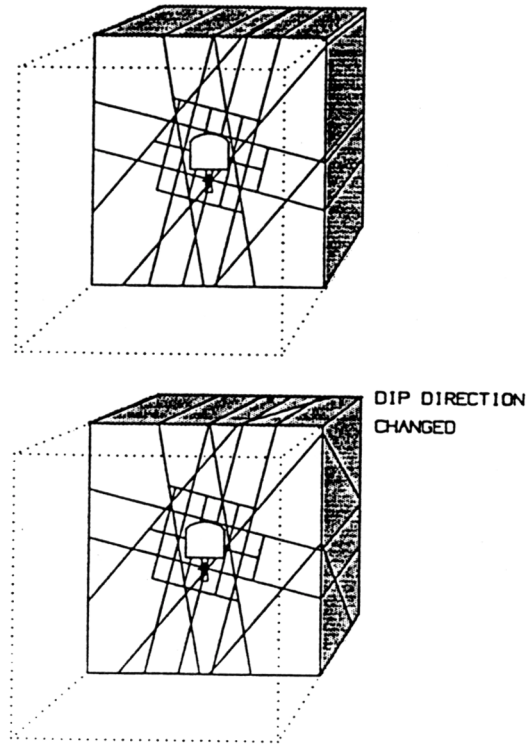


Figur 3-1 Sprickvidgning vid kil. De svarta partierna representerar vidgningen, som är $2\ \mu\text{m}$ för det största avståndet (0,35 m), $27\ \mu\text{m}$ för mellanfallet, och $400\ \mu\text{m}$ då diskontinuitet och hålperiferi praktiskt taget tangerar varandra.

Vid primärspänningstillstånd av den aktuella typen, dvs en vertikalspänning av 10 MPa och en största horisontalspänning av 30 MPa är tangentialspänningen noll på halva höjden hos horisontella hål och tunnlar som är orienterade i mellersta huvudspänningens (15 MPa) riktning. Det innebär att flacka 4:e ordningens diskontinuiteter med detta läge blir helt avlastade då normaltrycket minskar från ursprungligen 10 till 0 MPa. Det leder till ökad konduktivitet som dock, åtminstone delvis, motverkas av att skjuvspänningar löser ut förskjutningar med nedmalning av sprickmineral och självtätning som följd.

Relevans för de tre koncepten

Använder man sig av den förenklade bergstrukturen i Figur 2-4 och den uppskattade sannolikheten för uppkomst av kilar finner man att KBS3-V är det minst gynnsamma konceptet och KBS3-H det mest gynnsamma. Verklighetens mera komplexa strukturmönster minskar i praktiken skillnaderna mellan koncepten. Ett förhållande som kan vara mindre lämpligt är att MLH med sin stora längd gör skärning med ett antal sprickzoner av 3:e ordningen sannolik och därmed är isoleringsförmågan hos berget sämre än för övriga koncept. Det inbördes avståndet mellan sådana zoner, som innebär effektiv hydraulisk samverkan mellan vidgade diskontinuiteter parallella med MLH och de konduktiva zonerna, är normalt 30-100 m, vilket innebär 2-7 skärningar per MLH.



Figur 3-2 3DEC-beräkning av sprickviddsändringar ($\sigma_x = 20 \text{ MPa}$, $\sigma_y = 10 \text{ MPa}$, $\sigma_z = 6 \text{ MPa}$). Överst: bergstruktur. Underst: ändring i sprickvidd som funktion av vridningarna. Hästskoformen bedöms ge något större inverkan på närfältberget än tunnel med cirkulärt tvärsnitt.

Betydelsen av det minskade effektiva vertikalktrycket i flacka diskontinuiteter som skär horisontella hål i KBS3-H och MLH orienterade i mellersta huvudspänningens (primärspänningens) riktning, dvs enligt mest ansträngda fallet, kan inte försummas. I praktiken är det därför önskvärt att orientera sådana hål i största huvudspänningens (primärspänningens) riktning, dvs enligt minst ansträngda fallet (KBS3-tunnlarna orienterade NE/SW, och hålen orienterade NW/SE; MLH orienterade NW/SE), vilket innebär att friheten att välja orientering som finns från överbelastningssynpunkt blir beskuren.

För fallet KBS3-H med sprängd tunnel uppkommer en särskild komplikation. Den orsakas av att det råder dragspänningar av storleken 15 MPa i vertikalled i berget utanför störzonen på halva tunnelhöjden intill någon halvmeters avstånd från störzonen yttre gräns (Figur 2-13). Här kommer förekommande flacka 4:e ordningens diskontinuiteter att öppnas och 5:e ordningens svagheter kan undergå dragbrott och också öppnas, ledande till uppkomst av en serie öppnade sprickor.

Eftersom vertikalspänningen i tunnelväggen i störzonen är nära noll vid fria ytan är nästan hela väggen i störzonen utsatt för vertikala dragspänningar och fungerar, tillsammans med det längsgående spricksystemet som kan uppkomma omedelbart utanför störzonen i väggen, som en effektiv vattenledare. För att minimera denna effekt kan tunnlar orienteras vinkelrätt mot den riktning som antagits vid beräkningen, som innebar tunnelorientering i mellersta huvudspänningens (primärspänningens) riktning. Det motsvarar visserligen det mest ansträngda fallet med avseende på höga tryckspänningar vid deponeringshålens periferi men dessa är inte kritiskt höga.

Slutsatsen är att om tunnlar för KBS3-H utföres genom sprängning så har orienteringen större betydelse än vid borrhning.

3.1.3 Skjuvning av vattenförande diskontinuiteter

Processer

4:e ordningens diskontinuiteter i jungfruligt berg, dvs hydrauliskt och mekaniskt aktiva svagheter, kan antas ha undergått återkommande förskjutningar i samband med tektoniska rörelser. Hydrotermala lösningar har i många fall genomströmmat sådana svagheter och mekanisk/kemiska processer har också bidragit till utfällning av "sprickmineral" med klorit som ett vanligen dominerande silikatmineral. Återkommande förskjutningar utmed sådana svagheter har åstadkommit nedmalning och gjort fyllningarna klastiska. Det innebär att skjuvning som följd av spänningsändringar orsakade av upptagning av hål och tunnlar ger ytterligare mekanisk degradering av fyllningarna vilket, om inte skjuvningen är samhörig med vidgning av diskontinuiteten, snarare leder till minskad än till ökad vattengenomsläpplighet. Om effektiva normaltrycket är av storleksordningen några MPa är det därför antagligt att skjuvning inte är samhörig med någon betydelsefull ökning av bergets medelkonduktivitet, medan skjuvning utan normaltryck kan ge dilatans och ökning av genomsläppligheten.

Relevans för de tre koncepten

Vid jämförelse mellan koncepten finner man att den större sannolikheten för skärning av deponeringshål av vattenförande diskontinuiteter för konceptets KBS3-H och MLH, särskilt med hålen orienterade NE/SW, än för KBS3-V gör detta koncept mest gynnsamt.

3.1.4 Överbelastning ledande till sprickpropagering och till sprickzoner

Allmänt

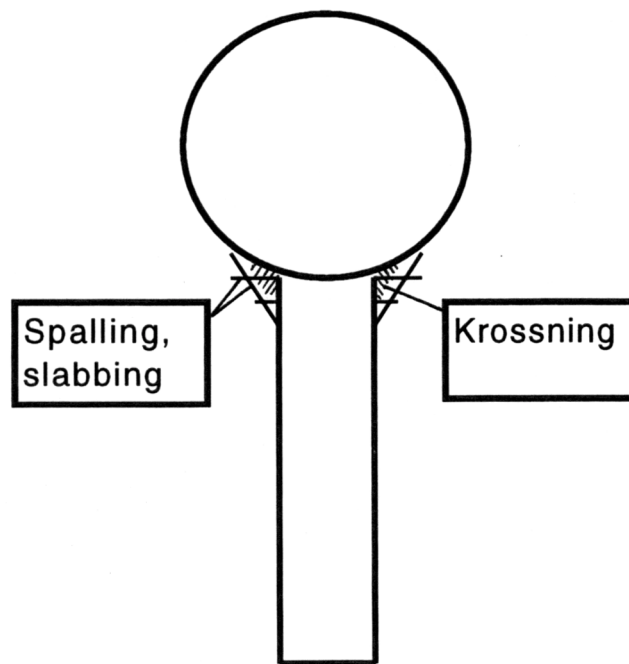
Överbelastning leder till bristning av bergmatrisen eller förskjutning utmed naturliga svagheter då spänningarna överskrider hållfastheten. Bristningar som har betydelse från vattenföringssynpunkt är de som leder till öppnande av sprickor, speciellt nära fria ytor, främst vid tunnel- och hålväggar. Överskridande av tryckhållfastheten vid deponeringshålens öppna ände är det tillstånd som är mest betydelsefullt och det är risken härför som från stabilitetssynpunkt tydligast skiljer koncepten åt.

En fråga av betydelse, speciellt när det gäller samverkan mellan bentoniten i deponeringshålen och omgivande berg, är inverkan av tidsbetingade deformationer. Stora deformationer kan leda till kritiska spänningstillstånd och sekundärt brott. Tidsbetingade förskjutningar utmed diskontinuiteter som skär deponeringshål kan leda till ett långsamt öppnande av längsgående kanaler (Kapitel 2.4.2).

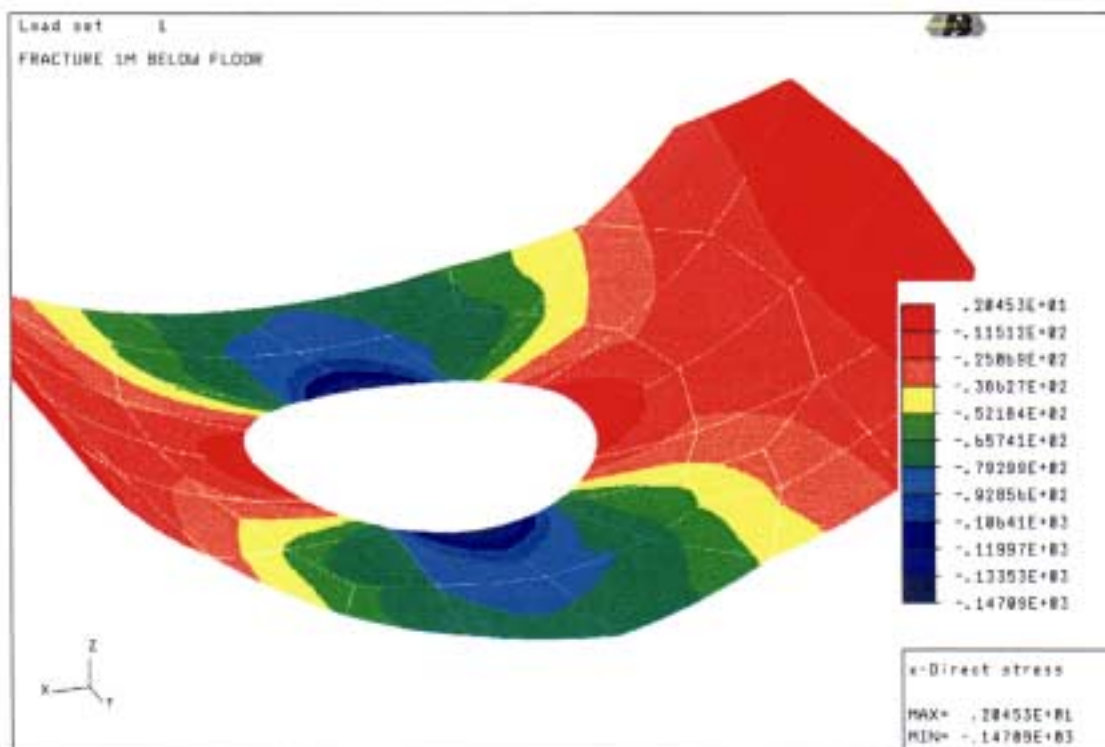
En viktig fråga är då svällningstryck från den högkompakterade bentoniten i deponeringshålen påverkar spänningstillståndet i det omgivande berget så att bristning av bergmatrisen eller öppnande av befintliga diskontinuiteter kan äga rum. Även denna fråga har betydelse vid jämförelse av koncepten.

Höga tryckspänningar

Vid fria änden på deponeringshålen i KBS3-V och H kan överbelastning ge riklig finsprickighet och bristning. Figur 3-3 illustrerar troliga brottyper som alla förväntas leda till kraftig ökning av den hydrauliska konduktiviteten. Brottzonens storlek i tunnelriktningen har avgörande betydelse för vattenomsättningen i tunnelns längdled. Den illustreras för KBS3-V med borrhållning av 3D (BEASY) beräkningen (Kapitel 2.3.1) för det konservativa men vanliga fallet med en diskontinuitet som löper parallellt med tunneln och är belägen på 1 m avstånd från tunnelperiferin (Figur 3-4). Man finner att tryckspänningar i intervallet 120-147 MPa råder till ett par dm från deponeringshålets periferi i tunnelgolvet och att de har storleken 80-120 MPa till ungefär 1 m avstånd från hålkanten. Med hänsyn till hållfasthetens volymsberoende kan man anta att tunnelgolvet får från hydraulisk synpunkt betydelsefull sprickbildning till större avstånd från hålen och att det kan utbildas ett kontinuerligt spricksystem i tunnelgolvet utmed tunnelns hela längd.



Figur 3-3 Tre typer av bristning hos bergmatrisen vid deponeringshåll.



Figur 3-4 Tryckspänningar (xx) i golvet på en TBM-borrad tunnel. Spänningar vinkelrätt mot tunnelriktningen (BEASY).

För fallet KBS3-H med borrade tunnlar orienterade NE/SW, dvs i mellersta huvudspänningens (primärspänningens) riktning (minst ansträngt fall) uppkommer samma problem vid övergången mellan deponeringshål och tunnlar som vid KBS3-V och koncepten är från den synpunkten likvärdiga. Om tunnlar sprängs flyttas de högsta spänningarna till det ostörda sidoberget omedelbart utanför störzonen och ger upphov till mindre omfattning; dock uppkommer den tidigare nämnda flacka sprickzonen som förbinder samtliga hål. Det gynnsammaste fallet är då tunnlar orienteras i största huvudspänningens (primärspänningens) riktning eller inom ett vinkelområde $\pm 45^\circ$ från denna.

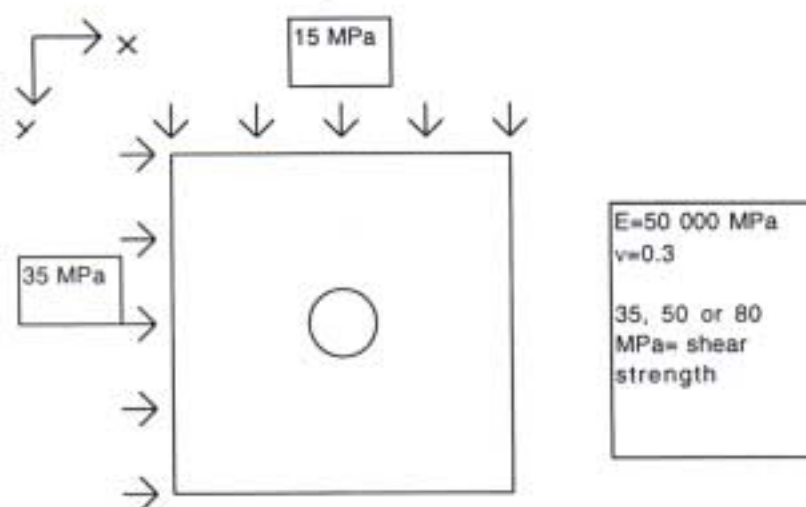
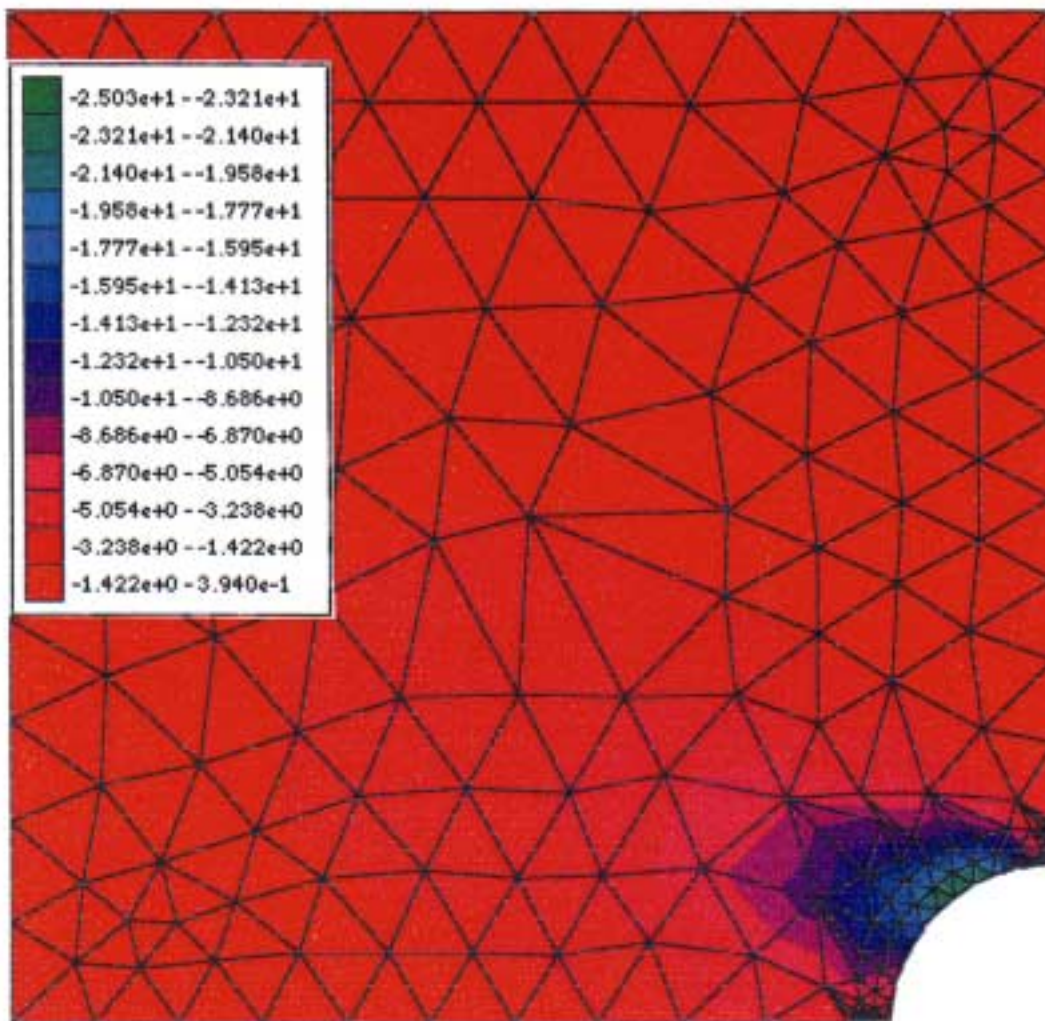
MLH ger inte upphov till överbelastning i någon del av tvärsnittet oberoende av orienteringen. Det framgår av FEM-beräkning (2D PLASTFEM) av fallet i Figur 3-5, som avsåg vertikala primärspänningen 15 MPa och horisontella spänningar 35 MPa (ca 600 m djup). Vid en antagen skjuvhållfasthet av 80 MPa (S_{xy}), som svarar mot ett värde på den enaxliga tryckhållfastheten av minst ca 160 MPa, uppkommer inte någon plasticering; den högsta skjuvspänningen blir ca 25 MPa. Beräkningen avsåg en diameter av 1,6 m men gäller i princip också för MLH med 1,75 m diameter.

Tidberoende

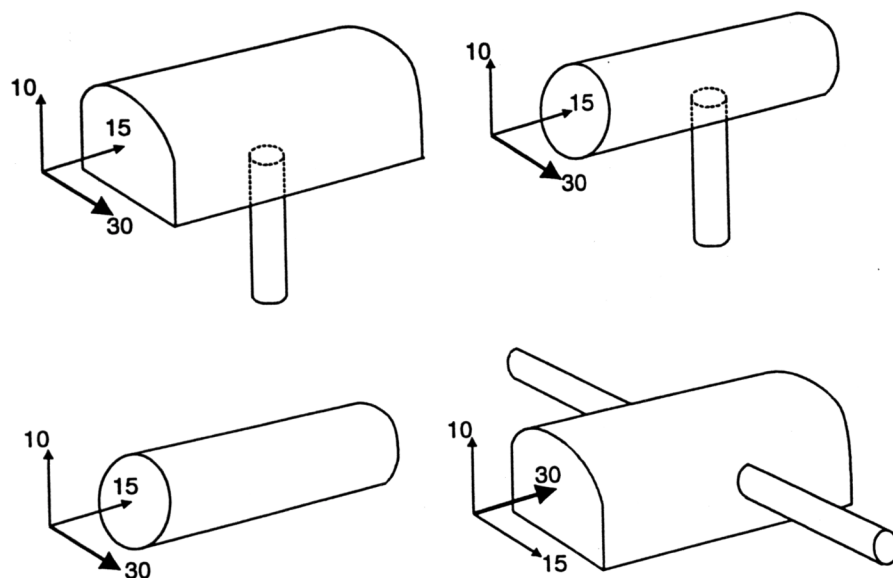
I ett långt tidsperspektiv kan spänningstillståndet i berget runt deponeringshål och tunnlar ge upphov till tidsberoende deformationer, som dels kan innebära minskning av hålrummets diameter, dels orsaka förskjutningar utmed svaghetsplan som kan skapa brantstående kanaler (Kapitel 2.4.2). Minskning av diametern innebär att bentoniten konsoliderar och får högre densitet och att kanistrarna utsätts för högre tryck.

En jämförelse mellan koncepten kan göras på samma sätt som när det gäller stabiliteten, dvs genom att bedöma inverkan på närfältberget vid de lägen i ett givet spänningsfält som ger störst ansträngning (Figur 3-6). Liksom vid stabilitetsjämförelsen gäller att deponeringshålen i KBS3-V oberoende av tunnelorienteringen får hög tangentialspänning medan hålen i övriga koncept kan bli lägre vid vissa tunnelorienteringar.

I praktiken orsakas förskjutningen av berget in mot tunnlar och hål väsentligen av skjuvrörelser utmed diskontinuiteter av olika slag. Gör man förenklingen att anta berget vara ett homogent medium vore skjuvmodulen därför en relevant deformationsparameter. I denna rapport görs förenklingen att de tidsberoende deformationerna betraktas som volymkrypning med E-modulen och Poisson's tal som deformationsparametrar. Det mycket konservativa antagandet görs att något inre tryck i hålen inte finns, dvs att svällningstrycket hos bentoniten är försumbart lågt.



Figur 3-5 Skjuvspänningsfördelning i berget runt hål med 1,6 m diameter (PLASTFEM). Vid den antagna skjuvhållfastheten 80 MPa inträffar inte plasticering.



Figur 3-6 Mest ansträngda fall (jfr Figur 2-6).

Såväl teoretiska överläggningar som praktisk erfarenhet visar att tidsbetingade deformationer av typen primär krypning sker med en hastighet som är omvänt proportionell mot tiden vid sådana spänningstillstånd som vanligen råder i närfältberget förutsatt att de totala deformationerna är små [1]. Det innebär att logtid-kryp lagen kan användas för att beräkna tidsbetingade deformationer och att t ex kompressionen ϵ av ett element får formen:

$$\epsilon = B \ln(t + t_0) + A \quad (1)$$

där A och B är materialkonstanter som beror av spänning och temperatur och t_0 en parameter som bestäms av material och spänningshistoria. B är proportionell mot bergets viskositet, som för den bergsvolym som påverkas av deponeringshål, dvs några tiotal kubikmeter, kan antas vara 10^{17} - 10^{19} Pas [1].

För talvärden på B som ungefärligen svarar mot fältobservationer av tunnelkonvergens, dvs E-4 till E-5, finner man att den ackumulerade, tidsbundna deformationen kan bli av samma storleksordning som den momentana redan efter något sekel men prediktionen är osäker.

En konservativ uppskattning av storleken på de tidsbetingade deformationerna, speciellt minskningen av håldiametern, kan göras på flera sätt, varav det enklaste är att beräkna radiella deformationen mot hålet med antagande av en med tiden minskad E-modul. För rimliga värden på bergets viskositet och en E-modul för momentana deformationer av 5E4 MPa kan man anta förändringar av E-modulen att bli av formen:

$$E = 10^4 (5 - \log t) \quad (2)$$

t = Tiden i år efter hålbörning (villkor: $1 < t < 10^4$)

Uttrycket innebär att den "initiella" ($t=1$) deformationen svarar mot $E=5E4$ MPa, medan deformationen efter 10, 100, 1000 och 10 000 år svarar mot ekvivalenta E-modulen 4E4 MPa, 3E4 MPa, 2E4 MPa, respektive 1E4 MPa. Efter 1000 år blir periferiförskjutningen alltså 2,5 ggr större än efter 1 år och efter 10 000 år 5 ggr större. Skillnaden illustreras grafiskt av Figur 3-7, varav framgår att den initiella minskningen av diametern hos ett deponeringshål med 1,6 m diameter i ett 2D spänningsfält med 35 och 15 MPa primärspänningar blir ca 3 mm. Med den ovan antagna tidsbetingade ändringen i E-modul blir hålets diameter 4,5 mm mindre efter 100 år än 1 år efter hålbörningen och ytterligare 7,6 mm mindre efter 10 000 år. Från 1 år efter hålbörningen minskar alltså diametern enligt denna modell med ca 12 mm på 10 000 år, vilket innebär att det radiella utrymmet mellan berg och (stel) kapsel minskar från 400 mm till 394 mm, dvs med ca 1,5%. Det ger en ökning av den ursprungliga densiteten i vattenmättat tillstånd från 2000 kg/m³ till ca 2010 kg/m³ och en ökning av trycket mot kapseln med ca 1-2 MPa. Vid beräkningarna har inte något svälltryck mot hålperiferin medräknats eftersom valet av buffert inte är definitivt.

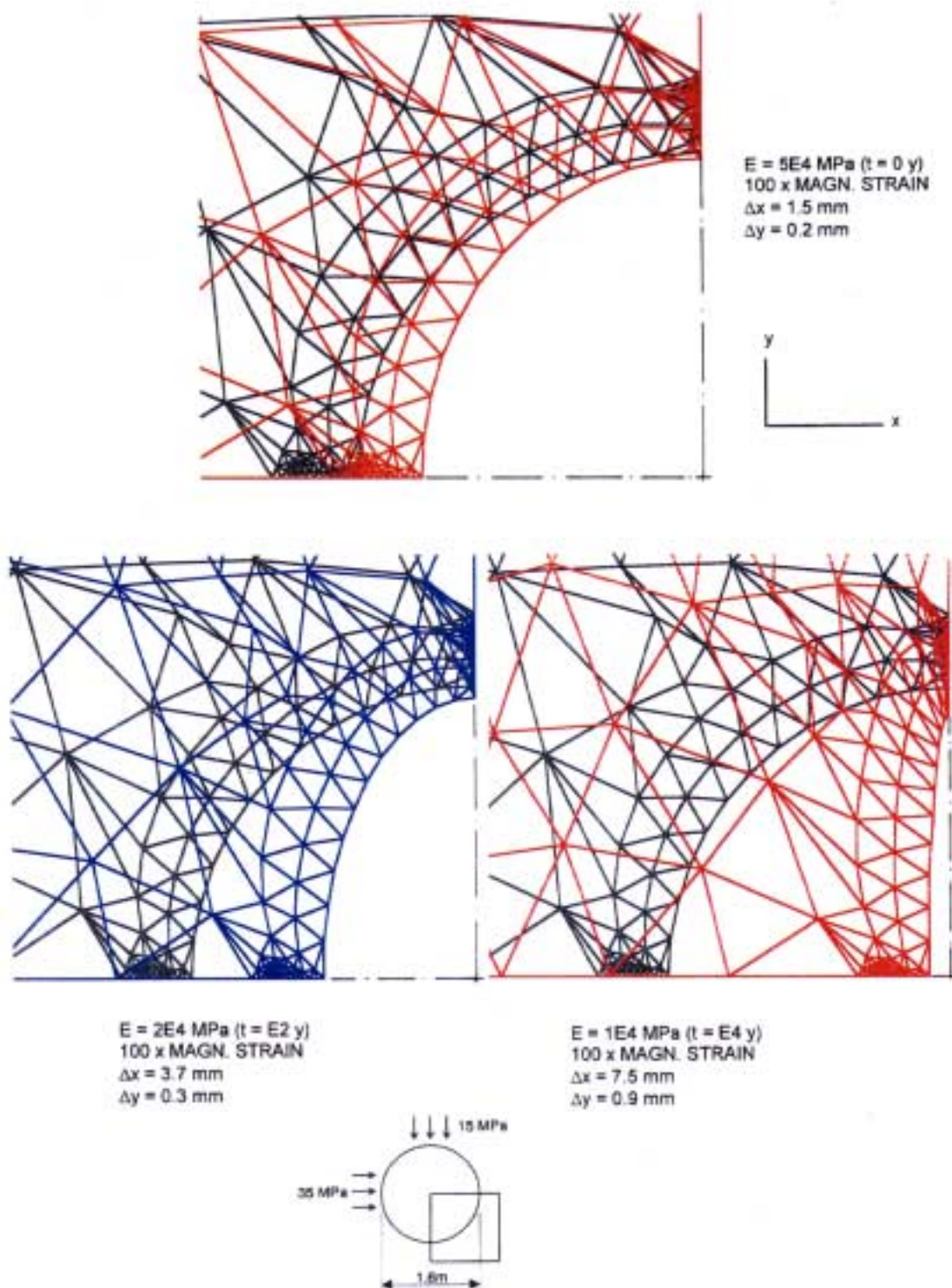
Tidsbetingade förskjutningar utmed svagheter som skär hålen axiellt, ledande till uppkomst av kanaler i bergytan, kan äga rum i en utsträckning som bestäms av bergstrukturen. I det enkla fallet med ortogonalt system av diskontinuiteter är sannolikheten för kanalbildning lika stor i samtliga koncept. Från kapselbelastnings-synpunkt finns det inte skäl att undvika någon speciell tunnel- eller hålriktning och koncepten är därför i detta avseende likvärdiga.

Inverkan av bentonitens svällningstryck

Ett högt svällningstryck skulle kunna åstadkomma bristningar i form av öppnande av diskontinuiteter och dragbrott med åtföljande utbildning av öppna dragsprickor. Man kan visa på analytisk väg [#8 är detta 9?????] att det inre trycket inte får överstiga ett värde som är en bestämd funktion av skillnaden mellan primärspänningarna i 2D för att undvika uppkomst av dragspänningar vid periferin hos hålrum med cirkulärt tvärsnitt (Ekvation 3).

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_y - \sigma_x - p \quad (3)$$

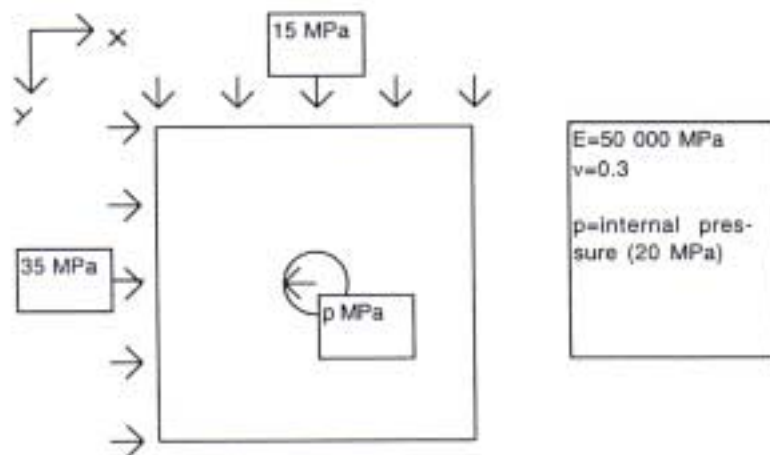
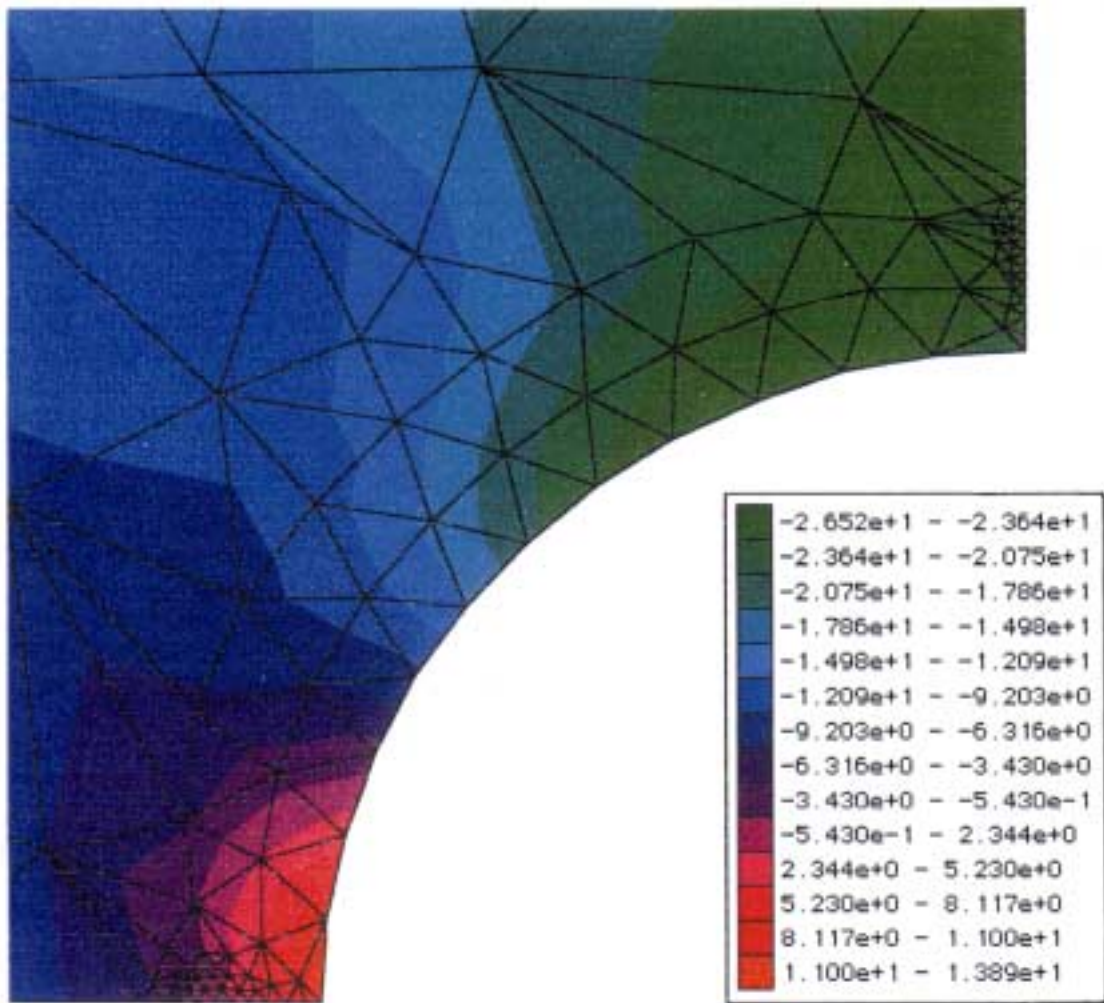
där σ_x = största primärspänningen
 σ_y = minsta primärspänningen
 p = inre tryck



Figur 3-7 Förskjutningsmönster i berget runt deponeringshål vid olika E -modul för simulering av effekter av logtid-krypning enligt FEM-beräkning (PLASTFEM) med $\nu = 0,3$ (svarta nätet är original). Överst: momentan elastisk deformation vid hållborring ($t=0$). Undre vänstra: deformation efter 100 år. Undre högra: deformation efter 10 000 år. Elementnätverkets deformation starkt överdrivna för tydlighets skull.

Ekv. (3) anger att då svällningstrycket överskrider skillnaden mellan den minsta primärspänningen multiplicerad med 3 och den största primärspänningen, uppkommer dragspänningar i en sektion parallellt med största spänningen. För KBS3-V, med en minsta primärspänning av 15 MPa, och en största av 30 MPa, uppkommer alltså inte några dragspänningar i berget om inte svällningstrycket överskrider 15 MPa. För KBS3-H och MLH kan den minsta primärspänningen vara 10 MPa och den största 30 MPa, svarande mot mest ansträngt tillstånd (Figur 2-6), vilket innebär att dragspänningar uppkommer så snart ett svälltryck börjar utbildas. Det leder till öppnande av diskontinuiteter av 4:e ordningen som är orienterade i största primärspänningens riktning och skär hålets centrumlinje. Sannolikheten för att sådana svagheter förekommer i deponeringshål är låg medan det är troligt att latent svagheter av 5:e ordningen finns i sådana lägen. Dragspänningar som överskrider 5-10 MPa kan åstadkomma dragbrott och öppnande av dem, vilket leder till starkt ökad vattenomsättning axiellt utmed hålet. Avståndet från hålperiferin till vilket dragspänning råder är mycket litet. Som framgår av Figur 3-8, som avser ett fall med primärspänningarna 35 och 15 MPa och 20 MPa svällningstryck rör det sig om ca 0,15 m. Flödeskapaciteten hos öppnade sprickor kan därför inte bli betydande.

Svällningstryckets betydelse är minst för KBS3-V eftersom det kan få uppgå till 15 MPa utan att berget utsätts för dragspänningar. För KBS3-H och MLH kommer dragspänningar att utbildas redan vid mycket låga svällningstryck om hålen orienteras enligt mest ansträngt fall, dvs NE/SW (tunnlar i KBS3-H orienterade NW/SE). Man tvingas alltså att orientera hålen i NW/SE-riktning (tunnlar i KBS3-H orienterade NE/SW), eller i varje fall inom $\pm 30^\circ$ från denna riktning.



Figur 3-8 Nettospänning i y-led i närfältet omkring deponeringshål med 1,6 m diameter och bentonit som ger 20 MPa svällningstryck (PLASTFEM). Tryckspänningar negativa.

4 Diskussion och slutsatser

4.1 Stabilitet

Stabiliteten hos deponeringshål och tunnlar i byggskedet rör risken för blockutfall och överbelastning. En sammanställning av bedömningarna i Kapitel 2 kan få formen i Tabell 4-1, som visar att KBS3 är mest fördelaktigt när det gäller blockutfall medan MLH är minst fördelaktigt om inte viss orientering beaktas. I praktiken är problemen med kyrkor i MLH och KBS3-H sannolikt mycket små.

Betydelsen av överbelastning med spalling som följd är mycket stor för KBS3-V om tunnlar orienteras utan hänsyn till bergspänningarna. Eftersom det primära spänningsfältet kan vrida avsevärt, även om så inte är fallet i Stripa och Äspö, och ett rationellt byggande förutsätter ett regelbundet mönster för tunnelplacering måste man förutsätta att betydelsen och frekvensen av stabilitetsproblem genom överbelastning är betydande även om man eftersträvar minst ansträngt tillstånd genom lämplig orientering av tunnlar. Sprängning av tunnlar minskar problemen vid tunnelgolvet men den ökade spänningsnivån på någon till några få meters djup kan skapa okontrollerad uppsprickning som ger upphov till en längsgående konduktiv zon under golvet. KBS3-H med borrarad tunnel ger vid ogynnsam orientering (tunnlar orienterade NW/SE) upphov till samma stabilitetsproblem som KBS3-V medan bergspänningarna inte ger upphov till betydelsefulla problem för MLH oberoende av orienteringen.

Sprickrörelser, öppnande och tillväxt, kan ses som lika frekventa och betydelsefulla för KBS3-V, KBS3-H och MLH om inte orienteringen kan beaktas. Ett förhållande av särskild vikt är att närfältberget i KBS3-H med sprängd tunnel påverkas mera negativt än om tunneln borrar. Vid orientering enligt mest ansträngt fall (tunnlar orienterade NW/SE) uppkommer sålunda en zon på halva tunnelhöjden utmed gränsytan mellan störda zonen och det utanföriggande ostörda berget med en eller flera öppnade sprickor. Den har ringa konsekvenser för stabiliteten men väl för vattenomsättningen. I ett avseende är KBS3-H, oberoende av om tunnlar borrar eller sprängs, och även MLH, mindre gynnsamma än KBS3-V och det är i det fall då hålen orienteras enligt mest ansträngt fall. Då kan svällningstrycket från bentoniten orsaka öppnande av flacka diskontinuiteter på halva hålhöjden. Inte heller detta har konsekvenser för stabiliteten men kan spela roll för vattenomsättningen.

Tabell 4-1 Stabiliteten i byggfasen och fram till 10 000 år hos deponeringshål i berg med förenklad struktur samt inverkan på hydraulisk konduktivitet och vattenomsättning. xxx "stor betydelse och hög frekvens", xx "måttlig betydelse och frekvens", x "ringa betydelse och frekvens". Markeringarna avser mest ansträngt fall; de inom parentes avser gynnsam tunnelorientering, dvs minst ansträngt fall.

Koncept	Blockutfall	Överbelastning (spalling, krossning)	Sprickrörelse (öppnande, tillväxt)	Påverkan på vattenomsättning
KBS3-V Borråd t.	x (x)	xxx (x)	xx (x)	x (Ingen)
KBS3-V Sprängd t.	xx (xx, störzon)	xx (x)	xx (x)	xxx (xxx, störzon)
KBS3-H Borråd t.	x (x)	xxx (x)	xx (Ingen)	x (Ingen)
KBS3-H Sprängd t.	x (x, störzon)	xx (Ingen)	xxx (Ingen)	xxx (xxx, störzon)
MLH	x (x)	x (Ingen)	x (Ingen)	x (xxx, skärning med 3:e ordn.)

4.2 Vattenomsättning

Bergmekanisk påverkan på konduktiviteten och vattenomsättningen hör samman med stabilitetsproblemen men dessutom uppkommer en påverkan vid avlastning till mycket lågt normaltryck mot vattenförande diskontinuiteter. En sammanställning av bedömningarna i Kapitel 3 ges i Tabell 4-1.

Den stora skillnaden mellan koncepten ligger i tunnelutförandet och betydelsen av orienteringen av tunnlar och hål. Vid sprängning skapas förutsättningar för en mycket konduktiv zon, särskilt i golvet för KBS3-V och i väggarna för KBS3-H, där den förstärks av en längsgående sprickzon i berget utanför störzonen om inte gynnsam orientering kan ske av tunnlar och hål med hänsyn till bergspänningar och bergstruktur. Tunnelborrning ger betydligt mindre påverkan, speciellt om orienteringen av tunnlar och hål kan göras gynnsam. Aktivering av latent, mindre diskontinuiteter i närfältet kan uppkomma i lika stor omfattning i samtliga koncept; den styrande faktorn är storleken på och förhållandet mellan primärspänningarna. Orienteringen av hålen så att minst ansträngt tillstånd uppnås minimerar denna effekt och också den tidsbetingade påverkan på diskontinuiteternas vattenomsättning.

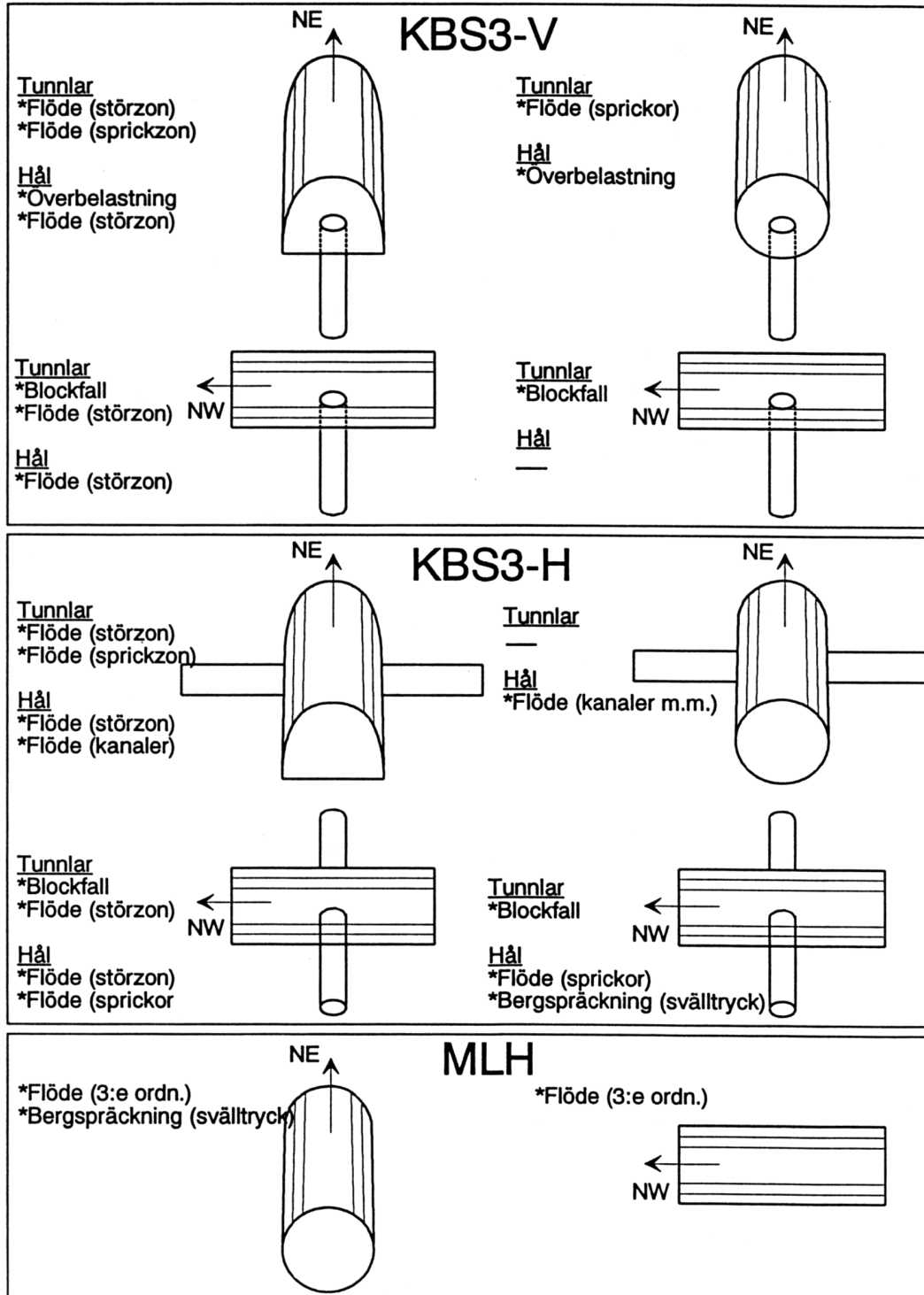
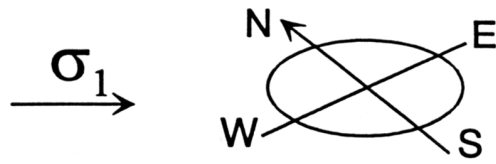
Öppnande av vattenförande diskontinuiteter pga svällningstrycket från bentoniten i hålen kan i praktiken inte ske i KBS3-V men kan få betydelse för KBS3-H och MLH om inte gynnsam orientering kan ske. Mellan MLH å ena sidan och deponeringshålen i övriga koncept å andra sidan råder den principiella skillnaden att hydraulisk samverkan med en serie brantstående sprickzoner inte kan undvikas för MLH.

4.3 Slutsatser

En rättvis jämförelse av funktionssättet hos de tre koncepten förutsätter att långtidsfunktionen med särskild inverkan av hydrotermala och tektoniska effekter och inverkan på diffusiv jontransport vägs in. Det har bara ytligt berörts här pga avsaknad av erforderligt underlag. Utredningen har huvudsakligen avsett inverkan av deponeringshålens orientering i olika spänningsfält och bergstrukturtyper på närfältbergets stabilitet och vattenomsättning. Den leder till slutsatsen att skillnaderna i funktionssätt hos de tre koncepten är relativt små. För KBS3-H spelar tunneldrivningssättet, orienteringen av hålen och bentonitens svälltryck en betydande roll från stabilitets- och konduktivitetssynpunkt, medan betydelsen av dessa faktorer är mindre för KBS3-V. För MLH är den sammantagna betydelsen av orientering och svälltryck ungefär densamma som för KBS3-H men eftersom inga överbelastningseffekter uppstår har MLH fördelar som dock måste bedömas med hänsyn till att hålen sannolikt skär en serie branta sprickzoner.

Betydelsen av bergspänningarna är stor och det är uppenbart att om variationerna i spänningsfältets orientering är måttliga, dvs mindre än $\pm 30^\circ$ från medelorienteringen, så kan man välja en sådan orientering av tunnlar och hål att problem med stabilitet och vattenomsättning i närfältet inte uppstår för något av koncepten. Erfarenheterna från Stripa och Äspö visar att bergspänningsfältets orientering kan vara relativt konstant inom kvadratkilometerstora ytor men det kan inte uteslutas att den kan variera så mycket att man inte kan erhålla gynnsammaste orientering av ett betydande antal tunnlar och hål. I så fall kan KBS3-V ha fördelar framför övriga koncept. Om tunneldrivning sker med sprängning har KBS3-V fördelar i förhållande till KBS3-H.

Figur 4-1 ger en sammanfattande bild av inverkan av orienteringen hos tunnlar och hål på stabilitet och vattenomsättning grundad på antagande av den förenklade strukturmodellen i Figur 2-4 och den förutsatta regionala bergspänningssituationen. Figuren fungerar som en grafisk representation av betydelsen av "bergets anisotropi".



Figur 4-1 Viktigaste inverkan av orienteringen av tunnlar och hål på stabilitet och vattenomsättning i närfältberget.

5 Referenser

1. **Pusch R, 1995.** Rock Mechanics on a Geological Base. Developments in Geotechnical Engineering, 77. Elsevier Publ. Co.
2. **Stille H, Olsson P, 1989.** SKB Hard Rock Laboratory; First Evaluation of Rock Mechanics. SKB Progress Report 25-89-07, SKB, Stockholm.
3. **Leijon B, 1995.** Summary of rock stress data from Äspö. SKB Progress Report 25-95-15, Äspölaboratoriet.
4. **Hermansson J, 1996.** Visualization of the fracture network in rock blocks along the ÄSPÖ HRL tunnel using a DFN model approach. SKB Äspö-laboratoriet. Progress Report HRL-96-08.
5. **Whittaker BN, Singh RN, Sun G, 1992.** Rock Fracture Mechanics, Developments in Geotechnical Engineering, 71. Elsevier Publ. Co.
6. **Broch E, Nielsen B, 1982.** Comparison of calculated, measured and observed stresses at the Ortfjell open pit (Norway). Norwegian Hard Rock Tunneling. Norwegian Soil and Rock Engineering Association.
7. **Pusch R, Stanfors R, 1993.** Disturbance of rock around blasted tunnels. Proc. 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, -FRAGBLAST-4, Vienna, Austria 5-8 July, 1993, Balkema, Rotterdam/Brookfield.
8. **Pusch R, 1994.** Waste Disposal in Rock, Developments in Geotechnical Engineering, 76. Elsevier Publ. Co.

BILAGA 5

Projekt JADE Geovetenskapliga studier

Strukturgeologins betydelse för val av deponeringsmetod

Raymond Munier
Scandiaconsult Sverige AB

Februari 1999

Abstract

The present paper constitute one of several reports on issues handled within project JADE, Geoscientific studies.

In this report the geological impact on different deposition methods is studied. The prerequisites used here are based on previous investigations at the Äspö Hard Rock Laboratory.

The result of the investigation shows that structural geology generally have an impact on the different methods. The difference between the deposition methods with regard to the fracture array is however considered to be of no practical importance. Further, it is here considered possible to recommend MLH only if the deposition tunnels are oriented in NW. This to minimize the intersection between tunnels and bodies of fine grained granite which is considered to be a discriminating rock type with regards to canister positions.

Sammanfattning

Föreliggande utredning utgör en av flera delrapporter som redovisats inom ramen för Projekt JADE, Geovetenskapliga studier.

I denna utredning redogörs för hur strukturgeologiska parametrar kan påverka valet av deponeringsmetod. Förutsättningarna för utredningen baseras på undersökningar utförda i Äspölaboratoriet.

Resultatet av utredningen visar att sprickmatrisen påverkar de olika deponeringsmetoderna olika. Skillnaden mellan metoderna bedöms emellertid sakna praktisk betydelse. Vidare bedöms att MLH endast rekommenderas om deponeringstunnlarna kan orienteras i NV. Detta för att minimera skärningsvinkeln mellan deponeringstunnlarna och kropparna av finkornig granit som bedöms vara kapselhålsdiskriminerande. Även med en NV riktning på deponeringstunnlarna kan bortfallet av kapselpositioner bli stort för MLH då tunnlarna löper parallellt med de vattenförande strukturerna.

Innehållsförteckning

Abstract	3
Sammanfattning.....	5
1 Inledning.....	9
2 Bergarter.....	11
3 Sprickmatrisen.....	13
4 Resultat.....	19
5 Referenser	21

1 Inledning

Föreliggande utredning är baserad på nuvarande geokunskap om bergmassan inom Äspöområdet. I görligaste mån har Äspötypiskt berg från ca 350-450 m djup och data från den TBM borrade delen av Äspölaboratoriet använts. Utredningarna baseras på befintliga karteringar vilka är redovisade i geodatabasen SICADA (f.d. GEOTAB). Den generella beskrivningen redovisad nedan baseras på PR 25-94-19 /Stanfors et al., 1994/ och PR 25-95-21 /Munier, 1995/ vilka har förenklats för tydlighet. FRACMAN analyser (Golder Associates) har använts för att beräkna sprickintensiteter för olika riktningar i bergmassan.

För att analysera skillnader mellan KBS-3 V, KBS-3 H och MLH med avseende på strukturgeologi utfördes nedanstående geometriska sannolikhetsanalyser.

Generisk sprickmodell, FRACMAN, baserat på Äspö TBM-tunnel:

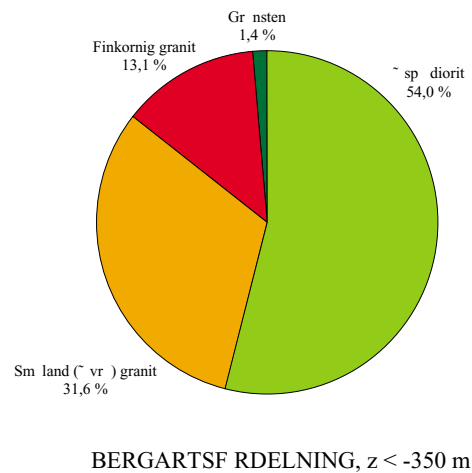
- Jämförelse av antalet skärande sprickor för vertikala och horisontella deponeringshål
- Jämförelse av antalet korsningspunkter mellan sprickor för vertikala och horisontella deponeringshål

Beräkning av sannolikheten för bortfall av kapselpositioner för KBS-3 V, KBS-3 H och MLH:

- Analys av interaktionen sprickmatris och deponeringshål med hjälp av ickeparametrisk geostatistik, Bayesian-Markov Geostatistisk Modell (BayMar)
- Analys av interaktionen sprickmatris och deponeringshål med hjälp av generisk sprickmodell. Hypotesen är att antalet skärande sprickor och korsningspunkter mellan sprickor blir ett relativt mått på hur många kapselpositioner som måste förkastas.

2 Bergarter

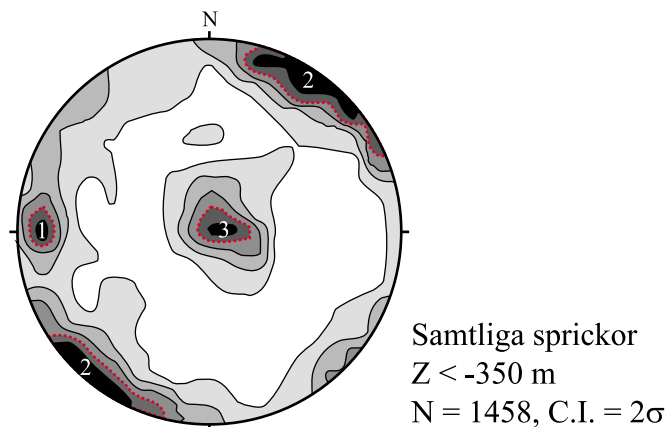
De inom den studerade bergmassan dominerande bergarterna är Äspö diorit och Småland (Ävrö) granit vilka båda utgör facies av Småland-Värmland granitoiderna. Dessa utgör 54,0 resp. 31,6 % av den karterade tunnelytan (Fig. 2-1). Övriga bergarter är finkornig granit (13,1%) och grönsten (1,4%).



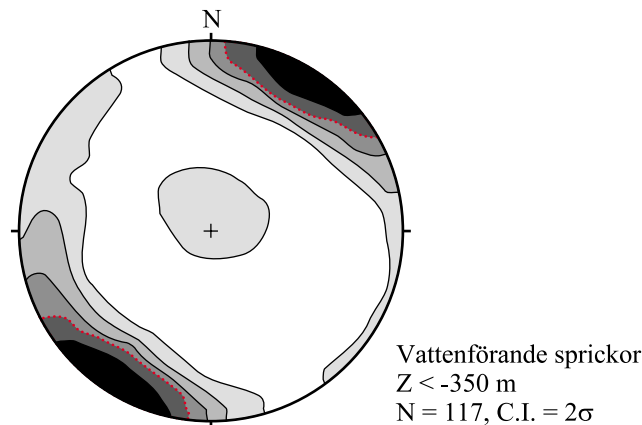
Figur 2-1 Figuren illustrerar den relativa fördelningen av karterade bergarter inom tunnelsträckan 2265-2875 m vilket motsvarar ett djupintervall av 350 till ca. 450 m.

3 Sprickmatrisen

Sprickmatrisen i den studerade bergmassan består av tre sprickgrupper. Två av dessa är branta, stryker NS respektive VNV-NV, den tredje gruppen är subhorisontell (figur 3-1). En uppdelning av matrisen i undergrupper baserade på sprickornas egenskaper visar att bergmassan kan vara anisotrop med avseende på enskilda egenskaper. Vattenförande sprickor, till exempel, uppvisar ett homogent kluster av branta sprickor med VNV-NV strykning (figur 3-2) vilket indikerar att bergmassan kan ha en relativt kraftigt utvecklad hydraulisk anisotropi längs plan med denna riktning. Ur denna aspekt kan horisontell deponering i VNV-NV eller vertikal deponering vara att föredra då sannolikheten för skärning med en sådana strukturer är minst. Data endast från TBM tunneln är dock till sin omfattning otillräcklig för att en uppdelning av datamängden enligt ovan skall ge statistisk signifikans. I stället har data från längdmätning 2650 m, vilket motsvarar djup större än 350 m, använts för klassificeringen.



Figur 3-1 Figuren visar poler till samtliga sprickplan karterade inom 2650-3600m. Tre sprickgrupper dominerar; två är branta och stryker NS (1) resp. VNV-NV (2), den tredje gruppen är subhorisontell (3). Ca 45% av de karterade sprickorna är slumpmässigt fördelade över stereogrammet, övriga tillhör antingen sprickgrupperna 1, 2 eller 3 i vilka sprickorna är fördelade enligt följande: #1 = 26%, #2= 42% och #3 = 32%.



Figur 3-2 Figuren visar poler till vattenförande sprickor karterade efter längdmätning 2650. En sprickgrupp dominerar; vattenförande sprickor är branta och stryker VNV-NV.

Sprickmatrisen varierar med bergart med avseende på sprickgruppers riktningar. Denna variation, som emellertid endast kan påvisas med restriktiva statistiska metoder, anses vara irrelevant för detta projekt. Av större betydelse är variationen i sprickdensitet eller sprickintensitet mellan bergarterna. Detta mått uttrycks vanligen som sprickor per meter, spricklängd per m^2 , sprickcentroider per m^3 , sprickarea per m^3 och liknande mått.

Sprickintensiteten varierar med statistisk signifikans mellan olika bergarter vilket framgår av tabellerna 3-1 och 3-2. För denna studie har intensiteten mellan sprickzonerna särskilt beräknats eftersom sprickzoner av funktionsklass D1 och D2 (se /Almén et al., 1996/ för definition) per definition ej tillåts skära deponeringshål oavsett metod (Särskilda omständigheter råder dock för MLH; se kapitel Projekt JADE-Geovetenskapliga studier för diskussion). Dessutom har ingen hänsyn tagits till den eventuella förekomsten av kinematiska indikatorer i sprickzonerna utan samtliga bergvolym med sprickintensiteter överstigande 5 sprickor per meter har beaktats som sprickzoner.

Sprickintensiteten är med detta betraktelsesätt betydligt högre i finkornig granit och grönsten än i andra bergarter medan den är lägre i Äspö diorit (Tabell 3-1). Detta innebär att den bergart som karterats som finkornig granit, och eventuellt även grönsten, i stora delar av den studerade bergmassan kan betraktas som kapselhålsdiskriminerande. Då tjockleken av de skivformade kropparna av finkornig granit generellt överstiger både bredden och längden av kapselhålet bedöms kapselbortfallet vara lika för samtliga KBS-3 metoder. Förekomsten av finkornig granit påverkar därmed i stor utsträckning utnyttjandegraden av ett tentativt förvar i Äspö. Förekomsten av grönsten, vilken uppträder osystematiskt som oregelbundna kroppar och skivor i bergmassan, är emellertid subordinär varför ingen hänsyn har tagits till denna bergart.

För jämförelsen av deponeringsmetoderna, MLH undantaget, är dock endast sprickintensiteten i bergmassan mellan sprickzoner av betydelse. Ur tabell 3-2 kan utläsas att inom bergmassan mellan sprickzonerna, dvs i den bergvolym som finns tillgänglig för deponering enligt KBS-3, har Äspö diorit något högre sprickintensitet än andra

bergarter medan finkornig granit har betydligt lägre densitet. Mellan sprickzonerna uppträder finkornig granit främst som oregelbundna gångar och sliror med mäktigheter generellt understigande ca 2 m. Dessa gångar bedöms ej vara kapselhålsdiskriminerande. Skillnaden i sprickintensitet mellan grönsten, Äspö diorit och Ävrö granit är marginell mellan sprickzonerna.

Tabell 3-1 Tabellen visar den relativa skillnaden, mellan olika bergarter, i förekomst av sprickzoner längs tunnelsträckan 100-2875. Förekomsten av sprickzoner i finkornig granit är c.a. 5 ggr högre än i Äspö diorit, och c.a. 3 ggr högre än i Småland (Ävrö) granit.

Bergart	% area	% zon	Rel. densitet
Finkornig granit	13,25	35,76	2,70
Ävrö granit	35,25	34,18	0,97
Äspö diorit	46,96	23,10	0,49
Grönsten	4,54	6,96	1,53
Summa	100,00	100,00	

Tabell 3-2 Tabellen visar den relativa skillnaden i sprickintensitet, uttryckt som sprickor per m², för sprickor karterade längs tunnelsträckan 100-2875. Den relativa intensiteten anger om bergarten är mer (>1) eller mindre (<1) uppspräckt än övriga studerade bergarter.

Bergart	% area	% spr.	Rel. densitet
Finkornig granit	13,25	7,22	0,54
Ävrö granite	35,25	35,47	1,01
Äspö diorite	46,96	53,23	1,13
Grönsten	4,54	4,08	0,90
Summa	100,00	100,00	

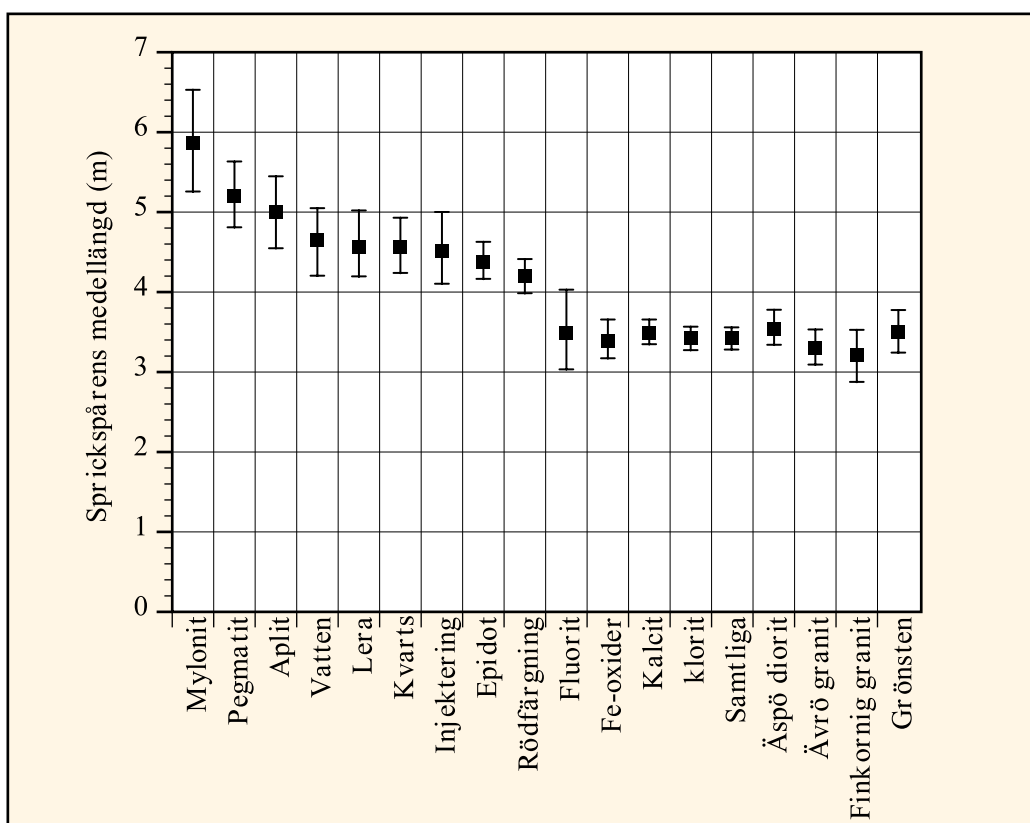
Förekomsten av finkornig granit kan på Äspö predikteras med stor noggrannhet med kärnbörning och därför undvikas för (tentativ) deponering oavsett vilken variant av KBS-3 som väljs. För MLH bedöms finkornig granit ej kunna undvikas helt oavsett riktning på tunnarna på grund av dessas längd (250 m). Bergmassans branta mot ONO strykande plastiska anisotropi, d.v.s. den planparallella struktur synlig som foliation, bergartskontakter mm. är tydlig på samtliga studieskalor. Det bedöms troligt, tills något annat kan påvisas, att kroppar av finkornig granit är subparallella till den plastiska anisotropin. För att minimera arean av finkornig granit i MLH tunnlar, och därmed nödvändiga förstärknings- och tätningsåtgärder, bör dessa, enligt ovanstående resonemang, orienteras vinkelrätt mot den plastiska anisotropin dvs mot NV; denna riktning är dessutom gynnsam från bergmekanisk synpunkt. En Nordvästlig riktning på MLH tunnarna kan emellertid vara ogynnsam från tätnings- och förstärknings synpunkt då tunnarna kommer att skära hydrauliska konduktorer med spetsig vinkel (se nedan).

Sprickintensitetens variation med riktning har beräknats med koden FracMan /Follin et al., 1996/ och uppskattats med en starkt generaliserad bergstruktur /Pusch, 1996/ för

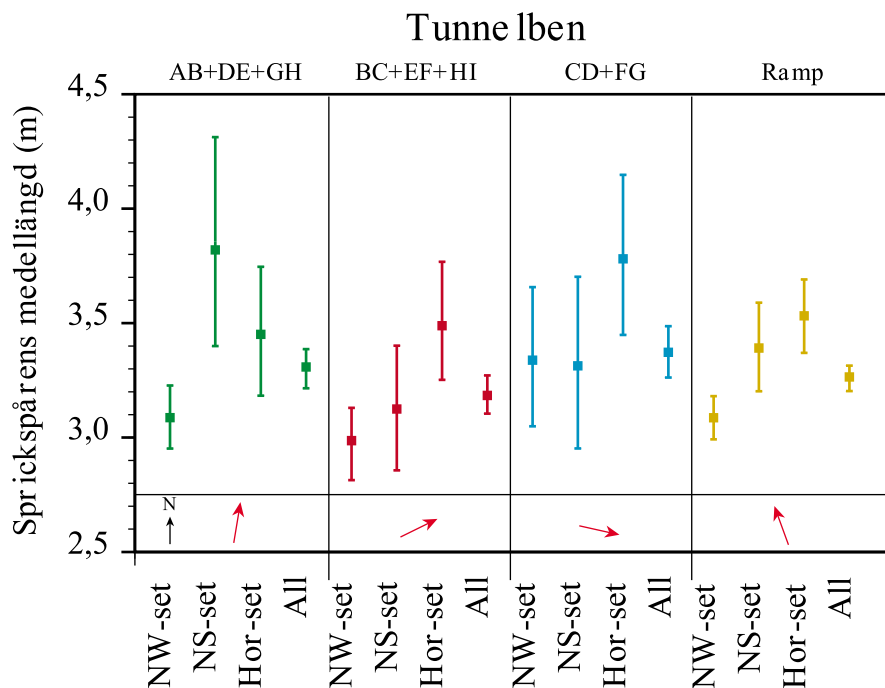
olika KBS-3 koncept; endast marginella skillnader i sprickintensitet mellan olika riktningar och olika deponeringskoncept kunde påvisas.

Vattenförande sprickor (eller mer korrekt karterade sprickspår) är längre än övriga sprickor (figur 3-3). Inom den för detta uppdrag studerade bergmassan ($z < -350$ m) utgör dessa ca 10% av de karterade sprickorna. Av de vattenförande sprickorna bedöms endast en liten del, maximalt 20%, vara så beskaffade att de enligt SKB:s nomenklatur kan klassificeras som D3 och därmed vara kapselhåldiskriminerande. Detta innebär att andelen kapselhåldiskriminerande vattenförande sprickor bedöms utgöra ca 2% av det totala antalet. För att optimera förvarslayouten ur denna aspekt bör kapselhålen orienteras vertikalt eller i NV.

Detta resonemang gäller, emellertid, inte i allmänhet för övriga, icke vattenförande, sprickor med samma nordvästliga strykning. Om hela sprickmatrisen beaktas har den nordsydligt strykande gruppen högst sprickmedellängder (figur 3-4). Det måste emellertid understrykas att spricklängderna inte är korrigerade för tunnarnas riktning. Trots detta visar figur 3-4 att tunnarnas orientering inte nämnvärt påverkar de uppmätta spricklängdernas inbördes relation.



Figur 3-3 Diagrammet visar den karterade sprickmedellängden för karterade sprickspår av olika typer i Äspö HRL. Datamängden omfattar hela tunnelsystemet inklusive nischer och TBM (från PR 25-95-21 /Munier, 1995/). Vattenförande- och injekterade sprickor är signifikant längre än övriga sprickor. Ingen signifikant spricklängdsförändring med avseende på bergart kan påvisas.

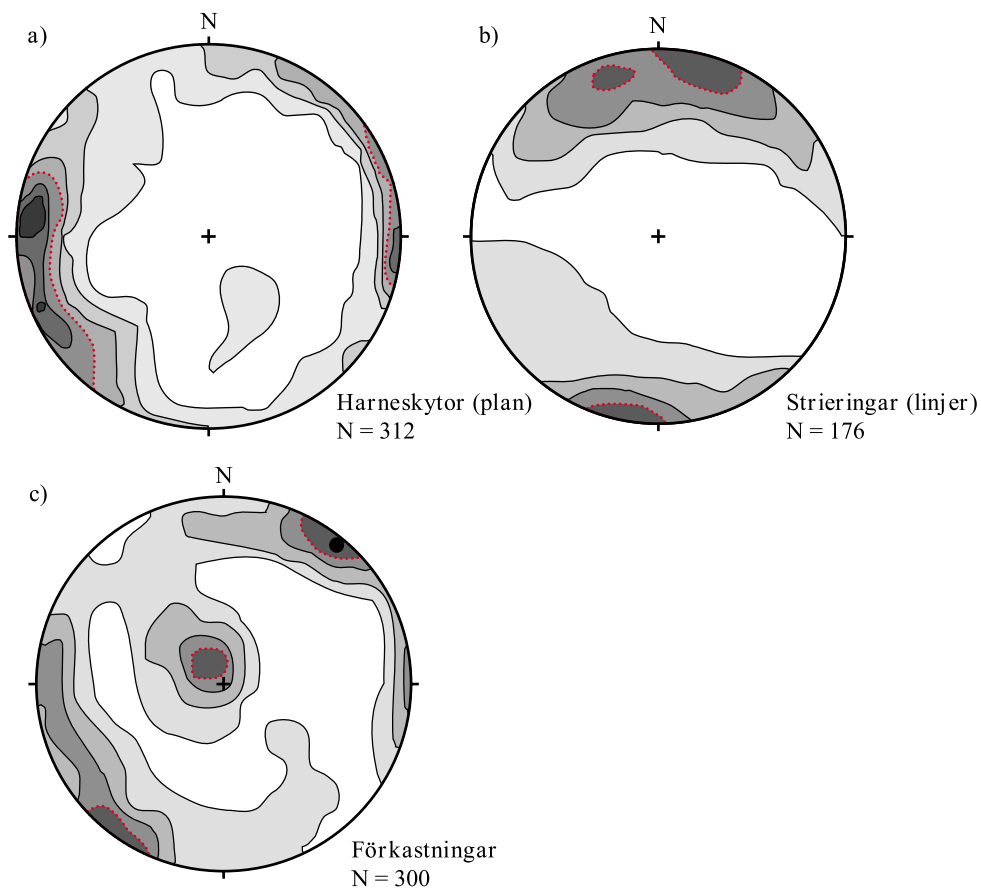


Figur 3-4 Sprickmedellängder för sprickgrupper med olika riktningar. Datamängden är uppdelad i parallella tunnelben och ramp. Tunnelnarnas riktningar är indikerade med pilar. Överlappande konfidensintervall (95%), till exempel "all", innebär att ingen skillnad i längd kan påvisas.

Ur ett strukturgeologiskt långtidsperspektiv föreslås de sprickor som uppvisar tektonisk deformation, såsom sk. "shear striae", "shear grooves" etc, utgöra den viktigaste undergruppen i sprickmatrisen på grund av dessas potential till reaktivering och propagering. Dessa benämns i föreliggande studie "förkastningar". Med förkastning (sensu strictu) avses i denna studie ej sprickzoner utan enskilda sprickor, med vidder om mindre än ca. 10 cm, vilka kan uppträda isolerade eller i grupp. Beroende på densiteten och geometrin av enskilda förkastningar, och betraktelseskalen i förekommande fall, benämns sådana grupper svärmar eller zoner. Nedanstående resonemang avser endast isolerade förkastningar, dvs enskilda sprickor. Detta eftersom grupper eller förtätning av förkastningar definitionsmässigt klassificeras D1 eller D2 och därmed ej beaktas vid jämförelsen av deponeringsmetoder då sådana ej tillåts skära deponeringspositionerna.

Förkastningar enligt ovanstående definition har karterats längs hela tunneln (figur 3-5). Förkastningsmatrisen består av tre branta sprickgrupper vilka stryker NS, NV och VNV, en fjärde grupp är subhorisontell. Deformationen är företrädesvis horisontell, s.k. "strike-slip", och främst lokaliserad, eller intensifierad, till de två grupper som innehåller förkastningslera. Förkastningsleran är, tillsammans med ytterligare kinematisk information som ej närmre berörs i denna rapport, indicier för multipla rörelser, d.v.s. reaktivering. Av samtliga karterade sprickor i Äspö HRL (ca 12 000 st) uppvisar ca 5% av sprickmatrisen indicier för kinematik. Av dessa bedöms ca 20-30% vara så beskaffade att de enligt SKB:s nomenklatur /Almén et al., 1996/ kan klassificeras som D3 vilket innebär att dessa utgör totalt ca 1-2% av hela sprickmatrisen. Notera att många av förkastningarna är vattenförande och därmed även ingår i klassen vattenförande sprickor. Av tidsskäl har ej ytterligare indelning i underkategorier utförts. Även om det anses troligt att smärre förkastningar kan ha förbisetts vid karteringen på

grund av svårigheten att påvisa deformation bedöms likväl densiteten av sådana sprickor på dessa grunder vara tillräckligt låg, inom den studerade bergmassan, för att dessa ej behöver beaktas vid jämförelsen av de olika deponeringskoncepten. Den relativa skillnaden i bortfallet av användbara kapselpositioner bedöms, ur denna aspekt, vara liten och därför ej motivera en optimering av deponeringskonceptet härför. Skall emellertid denna aspekt beaktas är sannolikheten för skärning med sådana strukturer störst för vertikal deponering och deponering i nordostlig riktning medan den är lägre för horisontell deponering i NV riktning.



Figur 3-5 Kinematiska indikatorer karterade längs hela tunneln. a) Sprickplan med en eller endast ett fåtal deformationer, b) strieringar på sprickplanen representerade i a) c) sprickplan med förkastningsmaterial såsom förkastningslera, microbreccia mm. Sådana sprickplan bedöms ha utsatts för multipla deformationer (reaktivering).

4 Resultat

De strukturgeologiska aspekterna som diskuterats i föregående avsnitt sammanfattas punktvis för tydlighet.

1. Andelen kapselhålsdiskriminerande sprickor med kinematiska indicier (förkastningar) bedöms utgöra ca 1-2% av sprickmatrisen, d.v.s. av det totala antalet sprickor. Skall dessa beaktas vid jämförelsen av deponeringsmetoder är sannolikheten för skärning med sådana strukturer störst för vertikal deponering (KBS-3 V) och horisontell deponering i nordostlig riktning (KBS-3 H och MLH) medan den är lägre för horisontell deponering i NV riktning (KBS-3 H och MLH).
2. Andelen vattenförande, kapselhålsdiskriminerande sprickor bedöms utgöra ca 2% av sprickmatrisen. Denna grupp omfattar även vattenförande förkastningar (gäller enskilda diskontinuiteter; sprickzonerna ingår ej i analysen). För att optimera förvarslayouten ur denna aspekt bör kapselhålen orienteras vertikalt eller, vid horisontell deponering, mot NV.
3. Densiteten av kapselhålsdiskriminerande sprickor, enligt punkterna 1 och 2 ovan, bedöms vara tillräckligt låg (< 5 % av den totala densiteten), inom den studerade bergmassan, för att dessa ej behöver beaktas vid jämförelsen av bortfallet av kapselpositioner för de olika deponeringsmetoderna.
4. Analyser med FracMan /Follin et al., 1996/ visar att ingen signifikant skillnad i sprickintensitet kan påvisas i kapselhålen vid jämförelse av de olika deponeringsmetoderna (KBS-3).
5. Analyser med PAWorks och MAFIC /Follin et al., 1996/ visar att för de valda flödesriktningarna är spricknätverken mer konnekterade, det vill säga antalet potentiella flödeskanaler är större, i vertikal- än i horisontell led. Vidare visar analyserna att konnektionen är större för horisontell deponering i nordvästlig- än i nordostlig riktning.
6. Den bergart som på Äspö benämns finkornig granit bedöms generellt vara kapselhålsdiskriminerande som bergart på grund av dess höga sprickintensitet. MLH tunnlar, vilka på grund av sin längd i förhållande till de andra studerade kapselhålskonfigurationerna ej helt kan undvika denna bergart, bör riktas mot NV för att minimera skärningsytan av densamma i tunnarna. Denna riktning är dessutom gynnsam ur bergmekanisk synvinkel. Nackdelen med en sådan riktning på MLH är dock att tunnarna löper parallellt med de vattenförande strukturerna och den hydrauliska anisotropin vilket, om långa sprickor är vanliga, kan försvåra tätning.

5 Referenser

Almén, K., Stanfors, R. och Svemar, C., 1996. Nomenklatur och klassificering av geologiska strukturer vid platsundersökningar för SKB:s djupförvar, SKB PR D-96-029, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Follin, S., Wallman, P., La Pointe, P. och Dershowitz, B., 1996. Projekt JADE, Simulering av blockegenskaper med hänsyn till bergstrukturernas geometriska och hydrauliska egenskaper, bilaga 1 i SKB R-01-32 (denna rapport). Svensk Kärnbränslehantering AB.

Munier, R., 1995. Studies of geological structures at Äspö-comprehensive summary of results, SKB PR 25-95-21. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Pusch, R., 1996. Projekt JADE, Jämförelse av bergmekaniska funktionssätt hos KBS-3 V, KBS-3 H och MLH, bilaga 4 i SKB R-01-32 (denna rapport). Svensk Kärnbränslehantering AB.

Stanfors, R., et al., 1994. Geological-structural and rock mechanical evaluation of data from tunnel section 2265-2874 m., SKB PR 25-94-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.