

SANNOLIKHETSBASERADE PROGNOSER AV INSTABILA BLOCK I UNDERMARKSOBJEKT

Peter Starzec



STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

**SANNOLIKHETSBASERADE PROGNOSE
AV INSTABILA BLOCK
I UNDERMARKSOBJEKT**

**Probabilistic predications
of unstable rock blocks
in underground excavations**

Peter Starzec

SveBeFo Rapport 57

Stockholm 2002
ISSN 1104-1773
ISRN SVEBEFO-R--57--SE

FÖRORD

Byggande i berg ställer stora krav på undersökningsmetoder och tolkning av insamlade data. Baserat på sådana data kan man ta fram en bild av bergmassan, ”en konceptuell geologisk modell”, som grund för att bedöma stabilitetsförhållanden, bergförstärkning, vattenläckage eller driftskostnader.

I föreliggande rapport redovisas en sammanfattning av det doktorsarbete som Peter Starzec genomfört på Chalmers vid avdelningen för Geologi, och som särskilt fokuserat på sprickor och andra diskontinuiteter i berget. Syftet har varit att ta fram en metodik för att implementera en tredimensionell stokastisk spricknätsmodell, *DFN, Discrete Fracture Network*, i sannolikhetsbaserade blockprognoser. Indata har använts från utbygganden av CLAB, anläggningen för mellanlagring av använt kärnbränsle i Oskarshamn. Två modeller har genererats, den ena baserad på sprickkartering i borrhål, den andra på karteringsdata från golvet i det utsprängda berggrummet. Statistisk behandling av insamlade data har resulterat i bedömda fördelningar över blockstorlek i anläggningens tak och väggar, uppgifter som sedan kan användas för att bedöma möjlig instabilitet som följd av lösa block och därmed ett underlag för bedömning av förstärkningsbehov. De två modellerna jämförs och orsaker till skillnader i utfall diskuteras. Lämpliga strategier för denna typ av bedömningar och en stringent behandling av osäkerheter i indata presenteras.

Projektet är ett led i arbetet med att utveckla effektiva metoder för beskrivning och modellering av uppspruckna bergmassor som underlag för layout, orientering och förstärkning av berganläggningar. I praktisk användning ska dessa metoder ses som möjliga komplement till andra sätt att analysera och bedöma stabilitetsförhållanden, exempelvis med FEM-baserade beräkningar eller rent analytiska betraktelser.

Arbetet har genomförts under vetenskaplig handledning av Johan Andersson och som referensgrupp har verkat representanter för SveBeFos intressenter under ordförandeskap av Gunnar Nord.

Stockholm i juni 2002

Tomas Franzén

SAMMANFATTNING

En metodik för att göra bergprognoser som är lämpliga i samband med undermarksbyggande i kristallin berggrund presenteras. Metodiken behandlar främst kopplingen mellan ambitionsnivån på förundersökningsprogrammet och precisionen hos gjorda prognoser. På detta sätt förväntas användbarheten hos riskanalyser/beslutsanalyser kunna öka eftersom analysernas ingångsinformation blir bättre underbyggd.

Projektets huvudaktivitet är att ta fram en metodik för att göra bergprognoser i samband med ett tunnelbygge. Problemet är komplext och delas därför in i ett antal problemområden. Generellt är dessa (i) konceptualisering av spricknätverksgeometri vid undersökningsplatsen, (ii) metoder för att skatta en rimlig fördelning av bergegenskaper och strukturer i en bergmassa, (iii) analys/tolkning av mätdata för olika prognosmodeller, (iv) tolkning av en sannolikhetsbaserade prognos med avseende på förstärkningsbehov, (v) skattning av osäkerheter vid prognoser för olika insatser av förundersökningar.

Projektet fokuseras på hur man i olika skeden av en förundersökning och ett pågående anläggningsbygge kan göra prognoser av sprickor och sprickgeometri med hjälp av sk. stokastiska diskreta spricknätverksmodeller och hur dessa sprickprognoser i sin tur kan användas för att uppskatta mängden och storleksfördelningen för löst sittande block (kinematiska kilar). Tekniken tillämpas för att förutsäga möjliga lösa block i bergrummet för CLAB 2 beläget i anslutning till Oskarshamn kärnkraftverk.

Inledning

Ingengörsgeologisk riskanalys, och beslutsfattande med utgångspunkt från sådan analys, bygger på prediktioner av ingenjörs- och hydrogeologiska förhållanden i berg. Behov av sådana prediktioner finns vid bergbyggnadsarbeten. Trots att metoder för prediktioner har utvecklats snabbt det senaste årtiondet, saknas en god beskrivning av hur prediktioner bör göras och vad de kan användas till. En tillförlitligt prognos bör först ge ett underlag till ett beslut om platsens lämplighet för uppbyggnad av en viss undermarks konstruktion och i fall platsen är godtagen för det tänkta ändamålet skall prognosen "varna" för de mest sannolika geologiska faror som kan påträffas under byggets gång. Detta arbete behandlar prognoser av sk. strukturella stabilitetsproblem dvs. blockutfall och utglidning efter existerande sprickplan.

Det finns ett antal allmänt vedertagna metoder för stabilitetsbedömning av undermarksöppningar där man först identifierar kinematisk möjliga block för att senare uppskatta deras stabilitetsstatus och i sin tur framta en lämpligt förstärkningsstrategi. De mest kända är Warburtons vektormetod (1981) och Goodman och Shis blockteori (1985). En begränsande faktor för de flesta idag använda metoder är att en prognos av blockmängd, geometrisk form och storlek sker med en ofullständig kunskap om spricknätverksgeometri. Att göra en prognos baserad på en fullständig kännedom om spricknätverksgeometrin är knappast tekniskt möjligt och inte ekonomiskt försvarbart ty det är inte möjligt att framta en deterministisk sprickmodell där varje sprickas geometri är känd. En lösning kan därför vara ett stokastisk sprickfält där sprickors geometriska egenskaper representeras med statistiska fördelningar som i sin tur reflekterar den naturliga variationen av sprickegenskaper.

Prognosticeringsprinciper

Prognosticeringsmetodik för ett undermarksprojekt borde kunna delas in i följande separata men sammanhängande steg: (i) platsundersökning, (ii) framtagning av en konceptuell strukturgeologisk modell och skattning av modellvariabler; (iii) uppskattning av sannolikhetsfördelningen av antalet ostabila block och deras storlek samt stabilitetsförhållanden; (iv) tolkning av prediktions resultat och kvantifiering av osäkerheter. Om syftet med undersökningen är att ta fram en användbar bergmodell för att prediktera bergblock i tunnlar och bergrum, behöver beskrivningen lägga vikt på storlek av sprickor, deras orientering, rumslig mönster, intensitet och om sprickor ligger som isolerade strukturer i bergmassan eller bildar ett nätverk.

I en stokastisk sprickmodell betraktas geometriska egenskaper som sannolikhetsfördelningar och sprickors rumsliga mönster representeras med en matematisk/statistisk process. Sprickornas geometri approximeras med de statistiska fördelningar som återspeglar observerade data med högst statistisk signifikans.

Spricknätverk för CLAB

Prognosticeringsmetodiken illustreras med ett praktiskt exempel från CLAB 2. CLAB 2 är 115 m lång, 21 m bred och 27 m hög anläggning. Huvudsakligen presenteras två olika prognoser för bergblocksstabilitet. Metodiken för båda prognoserna är densamma; skillnader ligger i att de prognoser bygger på två olika konceptualiseringar av spricknätverksgeometrin.

För den första konceptualiseringen användes sprickdata från kärnkartering (Moberg, 1995a, Moberg, 1995b) och BIPS mätningar (Gustafsson och Strähle, 1997) i tolv borrhål, mellan 50 och 90 m djupa som var både vertikala och lutade. De mest kompletta sprickdata fanns tillgängliga från BIPS mätningar i två borrhålen därför beslöts att utnyttja dessa hål för fortsatt modellering. Mätningar i dessa hål gav sprickorienteringar, sprickvidd, genetisk sort och mineralfyllning. Vidare gjordes ett val av den sort av sprickor som ansågs vara av störst betydelse för bergmekaniska frågeställningar (blockstabilitet). I och med att det inte fanns några data från en bergmekanisk analys av sprickegenskaper tillämpades ett storlekskriterium som baserades på sprickvidden enligt vilket bara de sprickor med en vidd större än 4 mm antogs vara betydelsefulla för efterföljande blockprognoser. Majoriteten av de enligt kriteriet valda sprickorna visade sig vara aplitådror till en viss grad tektoniserade, samt sprickor fyllda med klorit.

Den andra konceptualisering av spricknätverksgeometrin byggde på information tillgänglig från sprickartering i golvet inne i bergrummet. Vid detta skede och med underlag från den samlade geologiska expertisen på plats gjordes en annan bedömning om vilken typ av diskontinuiteter som har största benägenhet att utgöra glidytor för bergblock i anläggningens tak och väggar. Man konstaterade då att sprickor fyllda med klorit (övervägande majoritet) och kalcit var av intresse för vidare blockstabilitetsberäkningar.

Spricknätverket representerades numeriskt i en stokastisk modell. De stokastiska spricknätverken skapades med datakoderna FracMan (Dershowitz m.fl., 1998). Genereringsprincipen består i att en prognos av nätverksgeometri och sprickegenskaper inom en bergvolym görs med utgång från de statistiska fördelningar som är representativa för

observationsdata eller (i fall viss typ av data saknas) från kvalificerad gissning dvs. generisk kunskap, expert bedömning eller tidigare erfarenhet.

Skattning av modellvariabler

För det studerade tillämpningsexemplet vid CLAB 2 genererades olika stokastiska sprickmodeller utifrån de två olika konceptualiseringar av spricknätverksgeometri: Modell 1 (sprickkartering i borrhål) och Modell 2 baseras (data på bergrumsgolvet).

Sprickornas rumsliga mönster kan antingen vara slumpartat eller ha en ordnad struktur där det finns tydliga kluster med förhöjd sprickintensitet. För Modell 1 undersöktes spricklagesvariationen med spektraldensitet och variogramanalys (Barton och La Pointe, 1995; Isaaks och Srivastava, 1989). Varken spektralanalys eller variogramanalys visade några tecken på en annan rumslig fördelning än en rent slumpmässig. Sprickpositioner i modellen representerades därför med en 3D Poissonfördelning. Även om ingen analys av rumslig variation gjordes för Modell 2 och ingående skattningar av modellens komponenter baserades på en annan typ av diskontinuiteter än för Modell 1 antogs det även för Modell 2 att alla diskontinuiteter oberoende av deras typ är slumpartat fördelade i rumden.

För sprickorna i Modell 1 hittades inga tydliga orienteringskluster och det stokastiska nätverket genererades med en s.k. bootstrapsfördelning (Efron, 1982) dvs. sprickor genererade i modellen hade exakt samma orienteringar som de observerade sprickorna. För Modell 2 hittades däremot två distinkta orienterings grupper/kluster och varje grupp approximerades med bästa anpassning till statistiska fördelningar med hjälp av den sk. ISIS algoritmen (Dershowitz m.fl., 1998). Den fördelning som hade bästa passning till de två grupperna var Fisherfördelningen (Mardia, 1972) som motsvarar en normalfördelning för sfäriska data.

Skattning av sprickstorlek för Model 1 och Model 2 gjordes efter olika antaganden och procedurer. För Modell 1 fanns praktiskt taget inga direkta data för storleksbedömning. Därför användes ett kriterium som bygger på ett mer generiskt samband mellan sprickans apertur och längd. Sambandet fanns tillgängligt som en empirisk relation från studier genomförda av Vermilye och Scholz (1995) och gällde för ådror fyllda med finkornig granit i granodioritisk berggrund vid Florence Lake regionen i Kalifornien. Med hänsyn till litologiska likheter mellan Florence Lake och CLAB platser antogs att samma empiriska samband skulle gälla också för CLAB platsen. Radien på sprickor i Modell 1 skattades direkt genom att konvertera apertur data till spricklängd med hjälp av kvoten mellan apertur och spricklängd presenterad av Vermilye och Scholz.

För Modell 2 där sprickspårlängd-data fanns karterade i CLAB 2 golvet användes en mer avancerat tillvägagångssätt för att skatta sprickradie. Först antogs en hypotetisk statistisk fördelning och dess parametrar för sprickradie och en stokastisk modell genererades. I modellen läggs sedan en karteringsyta motsvarande orientering och storlek på CLAB 2 golvytan och en syntetisk provtagning av sprickskärningar från ytan görs. I nästa steg jämförs statistiken mellan verkliga spårlängdsdata och de syntetiskt karterade. Beroende på avvikelser mellan statistiken för verkliga och syntetiska data görs en justering av primära antaganden om radiefördelning och en ny modell genereras. Processen fortsätter tills minsta skillnad mellan observerade och syntetiska data hittas.

Sprickintensiteten i modellerna uttrycks som kvoten mellan den totala arean på alla sprickytor inne i modellen och volymen inom vilken spricknätverks genererats. Kvoten kallas ofta

volymetrisk sprickintensitet. I FracMan förkortas den som P_{32} . Eftersom den inte är möjligt att mäta direkt, estimerades sprickintensitet numeriskt i modellen genom att utnyttja sambandet mellan P_{32} och den mätbara endimensionella sprickintensiteten (antalet sprickor per meter borrhål kallad P_{10}).

Prediktioner av blockmängd och blockstorlek

Prognoser av mängd, storlek och stabilitet av kinematiska block i CLAB 2 gjordes med en numerisk kod RockBlock (Dershowitz m.fl., 1995). I beräkningen av stabilitetsförhållanden togs ingen hänsyn till förekomst av vatten i sprickorna inte heller behandlades horisontella spänningar i berg.

Både för Modell 1 och Modell 2 gavs den bästa anpassning till blockvolym av en Paretofördelning. Eftersom det kan vara svårt att tolka stabilitetsförhållanden direkt från statistiska fördelningar presenteras prognosen även i form av beskrivande statistik av predikterade data. (Tabell S1).

Utvärdering av probabilistiska prognoser

Utvärdering av probabilistiska prognoser är en komplex process. De prognoser som sammanfattas i Tabell S1 är stokastiska prognoser vilket innebär att prediktioner gäller för hela bergrummet men blockpositioner är omöjliga att fastslå. Den typen av prognoser kan därför ha lika stor betydelse för valet av ett optimalt läge för undermarksobjektet (riktning) samt dimensioner och formen innan bygget påbörjas som för val av förstärkningsstrategi när bergrummet väl har sprängts ut.

Det är inte alltid helt klart vilka parametrar av den beskrivande statistiken som skall användas för att ta fram en lämplig förstärkningsstrategi. Just för blockprognoser, är aritmetiska medelvärdet starkt beroende av de få men höga värdena i fördelningens svans och är betydligt större än medianvärdet. I sådana fall är medianvärdet rent statistisk mer representativ för hela populationen än medelvärdet men rent praktiskt säger medianvärde inte mycket mer än att populationens tyngdpunkt/mittpunkt ligger just där. Om man däremot kommit fram till att prediktera det största blocket längs tunnel kan förstärkning göras med hänsyn till detta och även om sådan förstärkning inte behöver vara lika omfattande på alla ställen kan den garantera att hela bergrummets stabilitet är säkrad. T.ex. om man skulle lägga upp förstärkningen efter övre gränsen för 95% konfidens intervall för största blocket i Modell 1 dvs. 184 m^3 då vore sannolikheten att det sker ngt större block fall väldigt liten. Å andra sidan skulle en sådan förstärkning innebära stora kostnader och tidsåtgång.

Tabell S1. Sammanfattning av blockprognoser för Modell 1 och Modell 2.

Summary of block predictions for Model 1 and Model 2.

Block prognos	Modell 1	Modell 2
Block volym		
Median (m ³)	1.3	0.8
95% konfidensintervall (m ³)	1.1-1.5	0.7-0.9
Block volym		
Medelvärde (m ³)	4.8	1.5
95% konfidensintervall (m ³)	3.2-6.5	1.2-1.9
Std.fel. (m ³)	5.3	0.85
Största block		
Median (m ³)	77	8
95% konfidens intervall (m ³)	51-154	6-17
Aritmetisk medelvärde (m ³)	113	12
95% konfidensintervall (m ³)	43-184	5-19
Std.avvikelse. (m ³)	99	10.2
Antalet block (medelvärde)	59	38
95% konfidensintervall	53-64	33-43
Std. avvikelse	8	7
Total blockvolym		
Medelvärde (m ³)	470	59
95% konfidensintervall (m ³)	316-625	48-70
Std.avvikelse (m ³)	215	15

Alla i Tabell 2 predikterade parametrar baseras på data från 10 Monte Carlo simuleringar där varje simulering betraktas som ett separat dataset.

Blockprognoserna gjorda för Modell 1 och Modell 2 visade på relativt sett stora skillnader. Största skälet till de i Tabellen S1 presenterade avvikelser mellan modellerna var att de byggdes enligt två olika konceptualiseringar av spricknätverks geometri. Konsekvensen av att det i det ena fallet genererades en stokastisk modell med underlag från endimensionell borrhållsprickkartering (Modell 1) och i det andra fallet med data från tvådimensionell kartering (Modell 2) hade en stark påverkan inte bara på själva modeller men även den predikterade blockvolymen. Samtidigt som i det närmaste är omöjligt att kvantitativt jämföra de två prognosers noggrannhet kan deras precision uttryckas i mer kvantitativa termer. Ett sätt att bedöma prognosens precision är att skatta dess variationskoefficient vilken är kvoten mellan populationens standard avvikelse och dess medelvärde. Här framgår det tydligt att för de flesta predikterade parametrar är variationskoefficienten för Modell 2 lägre än för Modell 1. Ett annat sätt att undersöka prognosernas precision är att genomföra ett formel Fisher-test vilket också kallas F-test eller varianstest. Resultatet från F-testet visade att variansen inom data för Modell 1 var signifikant större än variansen för Modell 2. Detta tyder på att man har lyckats åstadkomma högre precision med prognoser baserade på Modell 2 än Modell 1. Man kan dra slutsatsen att den mest troliga orsaken till högre precision för Modell 2 var ingångsvariablerna till den stokastiska modellen dvs. spricknätverksgeometri egenskaper skattades med högre precision och uppvisade mindre spridning.

Nyckelord: sannolikhetsbaserade prognoser, instabila bergblock, stokastiskt spricknätverk

SUMMARY

This report presents a methodology for making predictions of geological hazards during excavation process in crystalline rocks. The method focuses on interrelation between the ambition level of the field investigations and the precision of the resulted predictions. By studying this interrelationship the reliability of the input information for the prediction analysis can be improved and consequently, the interest in the implementing this kind of predictions for commercial applications is expected to grow.

In this work, the predictions are constrained to applications typical for tunnel excavations. Due to its complexity the topic is split into following steps: (i) conceptualization of the fracture network at the site, (ii) estimation of the networks properties, (iii) building of a stochastic fracture model, (iv) interpretation of probabilistic predictions of geological hazards in relation to the rock support requirements, (v) quantification of predictions' uncertainty.

The study illustrates how the observed fracture geometry can be described with discrete stochastic fracture network and in turn how this network can be used for making predictions of cinematically feasible rock blocks. In order to demonstrate the practical aspects of the prediction process we apply the methodology to predict statistics for unstable blocks in CLAB 2 underground facility. CLAB 2 is intended to serve as an interim storage facility for spent nuclear fuel, it is 115 m long, 21 m wide and 27 m high, and is sited in crystalline basement at 30 m depth. The facility is located in Oskarshamn on the south east coast of Sweden.

The quantitative comparison between the blocks predictions for CLAB 2 based on two different fracture network conceptualizations of the fracture field at the site is made. The first network/conceptualization is generated from the best estimates of fracture geometry obtained from the borehole investigations while the estimates for the second network/conceptualization are evaluated from the fracture mapping in the floor of the chamber. Due to differences in both type of fracture data and the amount of the fractures available from: (i) one-dimensional, and (ii) two-dimensional fracture sampling, the generated stochastic fracture models demonstrated different properties. Consequently, the block predictions made for each conceptualization derived dissimilar results.

It was concluded that the predictions based on the model relying on two-dimensional fracture mapping in the chamber's floor are more reliable since both fracture orientations and fracture size could be estimated more accurately than for the model built upon the fracture borehole mapping. The F variance-test on the cumulative block volume data showed lower variance and by this higher precision of the predictions for the network built from the mapping in the floor of CLAB 2.

Keywords: probabilistic predictions, unstable rock blocks, stochastic fracture network

Innehållsförteckning

1	INTRODUKTION	1
1.1	MOTIV TILL ARBETET	1
1.2	KUNSKAPSLÄGE INOM OMRÅDET	1
2	MÅL OCH SYFTE	3
2.1	MÅL	3
2.2	FÖRVÄNTAT RESULTAT	3
3	PROGNOSTICIERINGSPRINCIPER	3
4	KONCEPTUALISERING AV SPRICKNÄTVERKSGEOMETRI.....	6
4.1	BAKGRUND	6
4.2	SPRICKDATA	6
4.2.1	<i>Första konceptualisering</i>	6
4.2.2	<i>Andra konceptualisering</i>	8
5	STOKASTISK REPRESENTATION AV SPRICKNÄTVERKSGEOMETRI.....	8
5.1	MODELLERINGSPRINCIPER	8
5.2	SKATTNING AV INGÅNGSVARIABLER TILL MODELLER	10
5.2.1	<i>Terzhagikorrektion</i>	11
5.2.2	<i>Rumsligt mönster</i>	11
5.2.3	<i>Sprickorientering</i>	12
5.2.4	<i>Sprickstorlek</i>	13
5.2.5	<i>Sprickintensitet</i>	14
5.2.6	<i>Stokastisk modell för CLAB</i>	15
6	PREDIKTIONER AV BLOCKMÄNGD OCH BLOCKSTORLEK ...	16
7	DISKUSSION.....	18
7.1	TOLKNING AV SANNOLIKHETSBASERAD PROGNOSE	18
7.2	OLIKA KONCEPTUALISERINGAR AV CLAB SPRICKNÄTVERK	20
7.3	PROGNOSOSÄKERHET OCH FELKÄLLOR	22
8	FORTSÄTTA STUDIER	22
9	ERKÄNNANDEN	23
10	REFERENSER.....	23

1 INTRODUKTION

1.1 Motiv till arbetet

Ingengörsgeologisk riskanalys, och beslutsfattande med utgångspunkt från sådan analys, bygger på prediktioner av ingenjörs- och hydrogeologiska förhållanden i berg. Behov av sådana prediktioner finns bl.a. vid rena hydrogeologiska problem och vid bergbyggnadsarbeten. Idag finns det både en övertro och en undertro på sådana prediktioner varför förbättrad kommunikation om prognosers verkliga värde borde öka nyttan med prognoser. Samtidigt borde det vara möjligt att öka precisionen hos gjorda prediktioner och mer effektivt utnyttja faktiskt insamlad information.

Trots att metoder för prediktioner har utvecklats snabbt de senaste årtiondet, saknas en god beskrivning av hur prediktioner bör göras och vad de kan användas till. Många prediktioner kan därför vara, eller uppfattas som mindre bra. Detta kan leda till att faktisk kunskap inte utnyttjas optimalt för beslut (undertro) eller att beslut fattas på felaktig grund (dåliga prediktioner eller dåligt förmedlad kunskap om prediktionens värde).

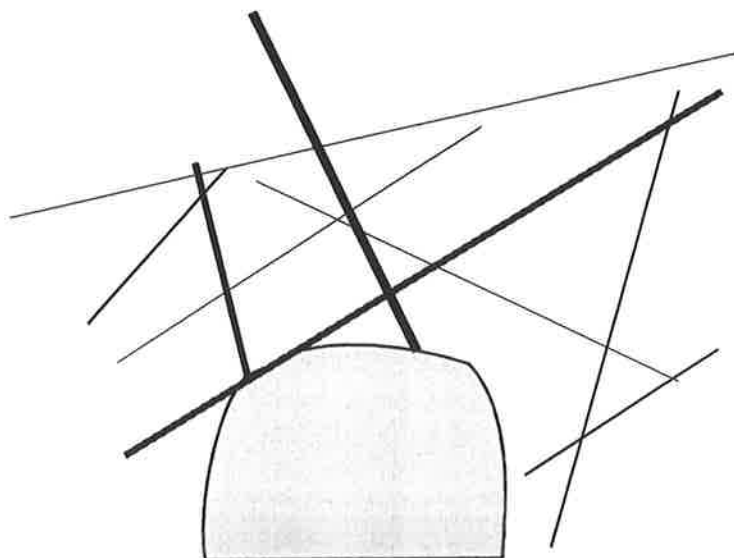
En tillförlitligt prognos bör först ge ett underlag till ett beslut om platsens lämplighet för uppbyggnad av en viss undermarkskonstruktion och sedan, i fall platsen är godtagen för det tänkta ändamålet, skall prognosen "varna" för de mest sannolika geologiska faror som kan påträffas under byggets gång. Den skall också bidra till att utforma anläggning och styra bergbyggnadsarbetena (förstärkningsplanering). Vid bergrumsarbeten består de geologiska farorna främst av olika stabilitetsproblem och risk för vatteninläckage. Dels kan sprickornas hållfasthet överskridas så att enskilda block ramlar ut från bergytan. Dels kan bergets hållfasthet överskridas och förorsaka nedfall. Detta arbete behandlar prognoser av de först nämnda stabilitetsproblem dvs. blockutfall och utglidning efter existerande sprickplan. Både blockutfall och utglidning antas vara orsakade enbart av gravitationskrafter, dvs., varken bergspänningar eller hydrauliskt tryckt behandlas här.

1.2 Kunskapsläge inom området

För att ett berglock skall falla ner från tunneltaket eller glida ut ur tunnelsväggar måste det vara kinematiskt möjligt vilket betyder att blocket har en sådan geometri att under förutsättning att inga andra krafter verkar på blocket (ingen friktion längs sprickplan, inget vattentryck, inga bergspänningar mm) eller att andra block låses kan det blocket fritt falla ned eller glida in i tunneln. Sådana block betecknas som kinematiska block (alt. kinematiskt möjliga block).

Det finns ett antal allmänt vedertagna metoder för stabilitetsbedömning av undermarksöppningar där man först identifierar kinematiska möjliga block för att senare uppskatta deras stabilitetsstatus och sedan tar fram en lämplig förstärkningsstrategi. De mest kända är Warburtons vektormetod (1981) och Goodman och Shis blockteori (1985). Dessa metoder har förbättrats och andra har tillkommit, t.ex. SATRIN (Priest och Samaniego, 1988), UNWEDGE (Hoek m.fl., 1991; Li, 1991), DRKBA (Stone, 1994), MSB (Jakubowski, 1995), KBTUNNEL (PanTechnica, 2000).

En begränsande faktor för de flesta idag använda metoderna är att de bygger på ofullständig kunskap om spricknätverksgeometri vilket i sin tur ger osäkra prognoser med avseende på blockmängd, geometrisk form och antalet block. Vanligtvis görs prediktioner med underlag enbart ifrån sprickkartering inne i tunnels tak och väggar medan de diskontinuiteter som inte skär öppningens perimeter men ändå ligger nära tunneln tas inte med i beräkningen (se Fig.1).



Figur.1 En principskiss över olika blockprognoser: en prognos som bygger på karterbara sprickor (tjocka linjer), en annan prognos som tar hänsyn till både karterade sprickor och sprickor som inte är i kontakt med tunnel (både tjocka och tunna linjer).
An illustration of different block predictions: a prediction based on visible (mapped inside the excavation) fractures (thick lines), another prediction accounting for both visible and no visible fractures (thick and thin lines).

Att göra en prognos baserad på en fullständig kännedom om spricknätverksgeometrin är knappast tekniskt möjligt och inte ekonomiskt försvarbart eftersom det inte är möjligt att ta fram en deterministisk sprickmodell där varje sprickas geometri är känd. En lösning kan därför vara ett stokastiskt sprickfält där sprickors geometriska egenskaper representeras med statistiska fördelningar som i sin tur återspeglar den naturliga variationen av sprickegenskaper som observerats i fält. Fördelen med stokastiskt spricknätverk är att i och med att modellen baseras på den observerade naturliga variationen kan osäkerheter i efterföljande blockprognos också kvantifieras.

De första stokastiska sprickmodellerna dateras tillbaka till 50-talet (Irmay, 1955; Childs, 1957), men den mest dynamiska utvecklingen skedde under sent 70-tal (Baecher m.fl., 1977, Hudson och Priest, 1979). Det stokastiska sprickmodellkonceptet har använts bl.a. för att modellera grundvattenströmning i sprickigt berg (Schwartz m.fl., 1980, Hudson och La Pointe, 1980), i bergmekaniken (Warburton 1981) och i studier om bergs lämplighet för kärnavfallsdeponering (Geier m.fl., 1992). Det finns dock relativt sett ett fåtal rapporterade arbeten som ger en komplett beskrivning av en metodik för blockprognos baserad på en tredimensionell stokastisk sprickmodell (Jakubowski och Tajdus, 1995; Dershowitz och Carvahlo, 1996).

2 MÅL OCH SYFTE

2.1 Mål

Målet för projektet är att:

- beskriva hur prediktioner av spricknätverks geometriska egenskaper bör göras och utnyttjas optimalt för att göra prognoser av storleksfördelning för bergblock och deras stabilitet vid undermarksbygge.

Projektet syftar därvid till att:

- visa hur bergblockprognoser kan förbättras och osäkerheterna kvantifieras genom att bättre använda tillgänglig information;
- visa hur prediktioner påverkas av olika konceptualiseringar av (sätt att simulera) samma frågeställning utgående från olika typer av tillgängliga observationsdata.

Projektet fokuseras på hur man i olika skeden av förundersökning och pågående anläggningsbygge kan göra prognoser av sprickor och sprickgeometri med hjälp av stokastiska spricknätverksmodeller och hur dessa sprickprognoser i sin tur kan användas för att uppskatta mängden och storleken av löst sittande block (kinematiska kilar). Tekniken förväntas även kunna tillämpas vid andra ingenjörproblem, som vatteninläckning och prognos av injekteringsbehov.

I denna presentation läggs mer vikt på metodbeskrivning än på tillämpningar även om den framtagna prognosmetodiken exemplifieras med ett praktiskt fall (utbyggnaden av CLAB 2 vid Oskarshamns kärnkraftverk).

2.2 Förväntat resultat

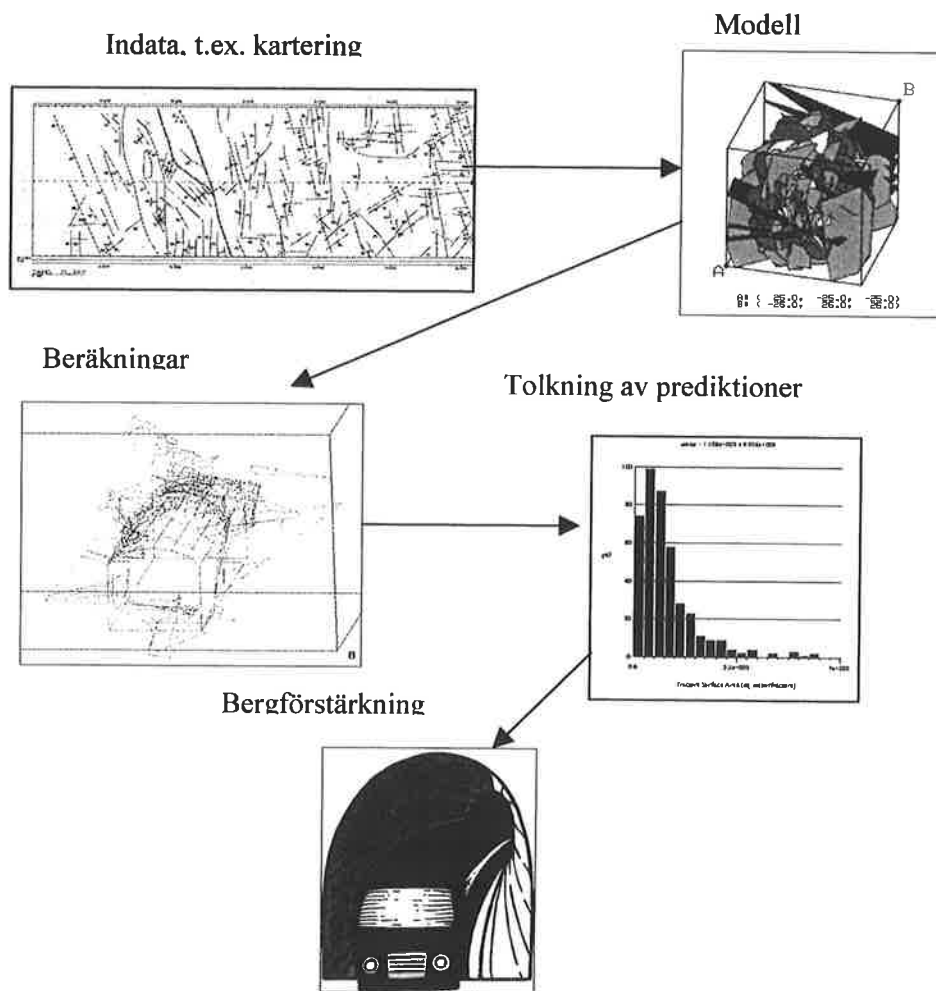
En utvecklad metodik för att göra bergprognoser av sprickor och sprickgeometri som är lämpliga i samband med undermarksbyggande i kristallin berggrund presenteras här. Metodiken behandlar vad som bör ingå i ett förundersökningsprogram och hur data bör tolkas. Speciellt uppmärksammas frågan om hur prognoserna ska förmedlas till och tillgodogöras av de olika aktörer som är inblandade i ett undermarksbygge. Tyngdpunkten kommer dock att ligga på hur prognoser bör göras, medan andra delar av metodiken behandlas mer översiktligt.

Presenterad metodik förväntas leda till att mer optimala prognoser av sprickor och blockstabilitet ska kunna göras i samband med undermarksbyggande. Detta borde totalt leda till färre överraskningar i samband med undermarksbyggen och även leda till totalt sett lägre kostnader för sådana anläggningar. Ur ett mer vetenskapligt perspektiv ger presenterad metodik även ett underlag för hur ingenjörsgelogiska förhållanden kan beskrivas och hur de ska skattas.

3 PROGNOSTICIERINGSPRINCIPER

Prognosticeringsmetodik för ett undermarksprojekt kan delas in i följande separata men sammanhängande steg (se Figur 2):

1. Platsundersökning: markgeofysik, seismik, georadar, kartering av sprickor (hällkartering och kärnkartering) och borrhålsgeofysik);
2. Framtagning av en konceptuell strukturgeologisk modell (avser typer av strukturer som behandlas samt antaganden om geologiska förhållanden) och matematisk/statistisk representation av denna samt skattning av modellvariabler.
3. Uppskattning av sannolikhetsfördelningen av antalet kinematiska block och deras storleksfördelning samt stabilitetsstatus;
4. Tolkning av prediktionsresultat och kvantifiering av osäkerheter;
5. Design och optimering av bergförstärkningsstrategi.



Figur 2. Ett flödesschema över en förenklad blockprognossekvens för ett "typiskt" undermarksprojekt i svensk kristallin berggrund.
A flowchart of a simplified prediction sequence for rigid blocks considering a "typical" excavation project I Swedish crystalline bedrock.

Det finns två viktiga aspekter att beaktas i den i Figur 2 skissade prognosmetodiken:

1. Om den matematiska konceptualiseringen (eller simuleringen) av de geologiska förhållandena på plats (steg 2 i prognossekvensen) skall representeras med ett stokastiskt spricknätverk blir den slutliga prognosen av bergblock en sannolikhetsbaserad funktion, dvs. mest sannolika utfall med kvantifierbar osäkerhet;
2. Osäkerheten i den slutliga bergförstärkningsprognosen (steg 4 i prognossekvensen) kommer att bli en komplex produkt av olika typer av osäkerheter och mätfel från steg 1-3. Också övergångar mellan stegen ger upphov till osäkerheter.

Vikten av de två aspekterna för prognosens tillförlitlighet utvecklas i nedanstående text.

En konceptuell beskrivning av bergkroppen med hänsynstagande till bergmassans strukturella inhomogenitet (svaghetszoner, sprickor och även litologiska heterogeniteter) ställer stora krav både på undersökningsmetodik och på tolkningen av observerade data. På grund av den naturliga variationen samt tekniska/ekonomiska begränsningar vid undersökningsarbetet bör de egenskaper som beskriver spricknätverksgeometrin betraktas som stokastiska variabler med angiven varians mer än som ”fasta” värden. För att prediktera bergblock i tunnlar och bergrum, behöver beskrivningen lägga vikt på sprickgeometri, rumsliga fördelning och intensitet.

Ett sätt att representera spricknätverk inom en bergvolym är att bygga en tredimensionell sprickmodell med underlag från sprickkartering av berghällar, i bergrum eller/och i borrhål. Eftersom det av praktiska skäl inte är möjligt att bestämma geometri, storlek och form på alla sprickor inom en modellerad bergvolym kan bara en förhållandevis liten mängd sprickor mätas. Större strukturer/sprickor kan beskrivas deterministiskt där man kan ange både uppmät sprickgeometri och sprickors absoluta positioner inne i modellen (t.ex. Tirén m.fl., 1996). Mindre sprickor representeras på ett stokastiskt sätt.

I en stokastisk sprickmodell betraktas geometriska egenskaper som sannolikhetsfördelningar och sprickors rumsliga mönster representeras med en matematisk/statistisk process. Sprickornas geometri approximeras med statistiska fördelningar. När alla nätverksgeometriska egenskaper har approximerats med en sannolikhetsfunktion genomförs en ”Monte Carlo” simulering där det slumpmässigt dras ett värde från alla sannolikhetsfördelningar för varje genererad spricka i modellen. En mer ingående beskrivning av stokastisk sprickgenerering finns i kapitel 5 nedan.

För att modellen skall ge en så realistisk bild över sprickgeometri som möjligt krävs ett stort antal multipla realiseringar (Monte Carlo simuleringar) av ett och samma spricknätverk. Till slut görs en blockprognos separat för en och varje modell (realisering) och resultatet blir ett slags sammanvägt medelvärde av alla gjorda prognoser. Detta gör att själva prognosen kommer att bestå av ett antal möjliga utfall där vissa utfall är mer troliga än de andra. Prognosen blir alltså en empirisk sannolikhetsfördelning av t.ex. antalet kinematiska block eller deras volym eller vikt.

Den empiriska fördelningen kan sedan approximeras med en teoretisk fördelning och dess parametrar (medelvärde, median, percentiler osv.) kan tas fram.

4 KONCEPTUALISERING AV SPRICKNÄTVERKSGEOMETRI

För att underlätta förståelsen av hela prognosticeringssekvensens illustreras varje prediktionssteg med ett praktiskt exempel från CLAB 2. CLAB 2 är 115 m lång, 21 m bred och 27 m hög anläggning avsett för mellanlagring av använt kärnbränsle. CLAB-anläggning, består av CLAB 1 och CLAB 2 som är identiska och ligger vid sidan av varandra på ca. 30 meters djup i nära anslutning till Oskarshamns kärnkraftverk.

4.1 Bakgrund

I detta kapitel presenteras huvudsakligen två olika prognoser av blockantal och blockstorlek för CLAB 2. Metodiken för de båda prognoserna är densamma; skillnader ligger i att prognoserna bygger på två olika konceptualiseringar av spricknätverksgeometri vid CLAB. Den ena bygger på sprickdata från kärnkartering och geofysisk kartering i borrhål medan den andra vilar på information tillgänglig från sprickarteringen av golvet i CLAB 2. Konsekvensen av olika konceptualiseringar och deras inverkan på blockprognoser diskuteras i avsnitt 7.2.

4.2 Sprickdata

4.2.1 Första konceptualisering

För den första konceptualiseringen av spricknätverket vid CLAB användes sprickdata från kärnkartering (Moberg, 1995a, Moberg, 1995b) och BIPS mätningar (Gustafsson och Stråhle, 1997) i tolv borrhål, mellan 50 och 90 m djupa som var både vertikala och lutande. Figur 3 visar borrhålsplacering i relation till bergrummen CLAB 1 och CLAB 2 och större svaghetszoner identifierade med refraktionsseismik och borrhningar.

Det första steget i konceptualiseringen är att undersöka om spricknätverksgeometrin uppvisar en rumslig variation eller inte. Om det t.ex. finns signifikanta skillnader i sprickintensitet mellan borrhålen kan det vara ett tecken på att området är indelat i olika strukturella bergenheter som skulle behöva behandlas separat. Av samma anledning behöver variationen i vertikal riktning undersökas eftersom det inte sällan förekommer att sprickigheten är djupberoende.

Utöver sprickintensitet kan andra spricknätverksegenskaper uppvisa rumslig variation, t.ex. sprickorienteringar eller sprickstorlek. Situationen kompliceras ytterligare om en egenskap uppvisar en stark variation och en annan inte gör det. Då kan det finnas otillräckligt underlag för att bedöma om spricknätverksegenskaper inom ett område är homogena eller inte. Ett sätt att testa skillnader mellan sprickors egenskaper uppmätta på olika punkter inom ett undersökningsområde är att använda sig av en statistisk hypotesprövning (Davis, 1986). Detta är en formell statistisk procedur där man jämför två eller flera datapopulationer med varandra utifrån beräknade testparametrar. Genom att referera till en eller flera parametrar hos de testade fördelningarna bedömer man om skillnader mellan dem är statistisk signifikanta eller inte med hänsyn till ett förutbestämt konfidensintervall.

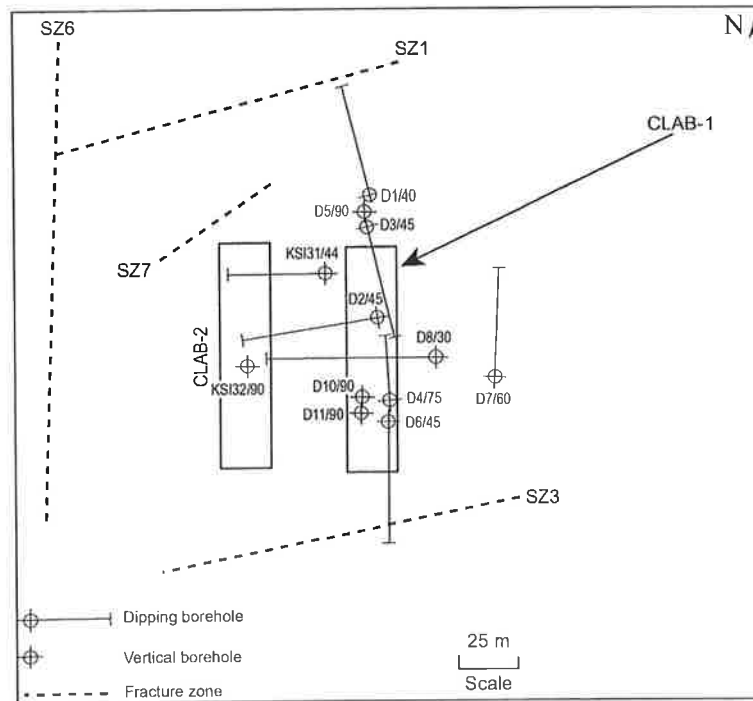
I denna studie genomfördes medianvärdestest (kallad Mann-Whitney och Kruskal-Wallis) samt Kolgomorov-Smirnov test (ett test där man jämför formen på fördelningar). I båda testerna användes sprickintensitet per 1 m borrhålsintervall som testparameter. Skälet till att sprickintensiteten valdes som en testparameter och inte någon annan egenskap (som sprickorientering, t.ex.) var att sprickintensiteten var den enda egenskap som mättes i varje borrhål, medan t.ex. orienteringsdata bara fanns tillgängliga från BIPS mätningar i två av totalt tolv hål. I Mann-Whitney och Kruskal-Wallis testerna grupperades borrhålen med likartade orienteringar (dvs. med liknande azimut och lutning) och inom varje sådan grupp togs antalet registrerade/karterade sprickor per 1 meter hål som en variabel. I nästa steg räknades fram hur mycket medianvärden avviker från varandra och om avvikelsen är tillräcklig stor för att tillskrivas någon fysisk/geologisk process eller om avvikelsen är ett resultat av en slumpmässig variation. I Kolgomorov-Smirnov-testen undersöktes skillnaden mellan kumulativa histogram för sprickintensiteter mellan hålen inom varje grupp. En mer detaljerad beskrivning av utförandet av testen presenteras i Starzec och Andersson (2002).

De ovan beskrivna testerna genomfördes för att undersöka variationen i sprickintensitet i horisontelplanet. För att undersöka variation i vertikalled genomfördes en kompletterande undersökning där variation i medelvärde på sprickintensitet analyserades längs borrhålen enligt den sk. flytande medelvärdeproceduren. Medelvärdet på sprickintensitet beräknades separat inom tre olika långa intervall: 1, 3 och 5 m och plottades som en funktion av djupet. Inga tydliga tecken på något samband mellan sprickintensitet och djup kunde konstateras.

Eftersom de statistiska testen inte gav tydlig indikation på att det fanns signifikanta skillnader i sprickintensitet varken mellan borrhålen eller med djupet drogs slutsatsen att området i fråga kan antas som homogent med hänsyn till sprickintensitet.

Eftersom de mest kompletta sprickdata fanns tillgängliga från BIPS mätningar i de två borrhålen KSI31 och KSI32 (Figur 3) beslöts att utnyttja BIPS mätningar för fortsatt modellering. Mätningar gav sprickorienteringar, sprickvidd, genetisk sort och sprickfyllning. Information från kärnkartering i resterande hål ansågs vara otillräcklig för att användas för att karakterisera spricknätverksgeometrin även om den utnyttjades för att genomföra statistiska test för sprickintensitet.

Vidare gjordes ytterligare ett val av den sort av sprickor som ansågs vara av störst betydelse för bergmekaniska frågeställningar (blockstabilitet). I och med att det inte fanns några data från en bergmekanisk analys av sprickegenskaper som t.ex. råhet, skjuvhålfasthet, styvhet) tillämpades ett storlekskriterium som baserades på sprickvidden enligt vilket bara sprickor med en apertur större än 4 mm antogs vara betydelsefulla för efterföljande blockprognoser. Majoriteten av de enligt kriteriet valda sprickorna visade sig vara aplitådror till en viss grad tektoniserade, samt sprickor fyllda med klorit. Till detta kommer att alla öppna sprickor, oberoende av aperturen klassades som betydelsefulla för vidare studier.



Figur 3. CLAB anläggningar med identifierade större svaghetszoner och lokalisering av undersöknings borrhål.

Simplified view over the CLAB site.

4.2.2 Andra konceptualisering

Den andra konceptualiseringen av spricknätverksgeometri vid CLAB byggde på information tillgänglig från sprickkartering av golvet i bergrummet. Vid detta skede och med underlag från tvådimensionell sprickkartering och den samlade geologiska expertisen på plats gjordes en annan bedömning om vilken typ av diskontinuiteter som har största benägenhet att utgöra glidytor för bergblock i anläggningens tak och väggar. Man hade då konstaterat att öppna sprickor och de som var fyllda med klorit (övervägande majoritet) och kalcit var av intresse för vidare blockstabilitetsberäkningar.

För modellering antogs att variation i spricknätverksgeometri ryms inom den slumpmässiga variationsmekanismen och att det inte finns några strukturella kontraster inom den karterade golvytans storlek.

5 STOKASTISK REPRESENTATION AV SPRICKNÄTVERKSGEOMETRI

5.1 Modelleringsprinciper

I detta arbete begränsas bergprognoser till strukturella stabilitetsproblem dvs. de som förorsakas av instabila bergblock. Därför fick sprickgeometrier och nätverksegenskaper prioritet i fråga om den geologiskt konceptuella beskrivningen av området. Spricknätverket representeras numeriskt i en stokastisk modell. Utifrån modellen har sedan möjliga bergblock beräknats. Nedan följer en kort beskrivning av

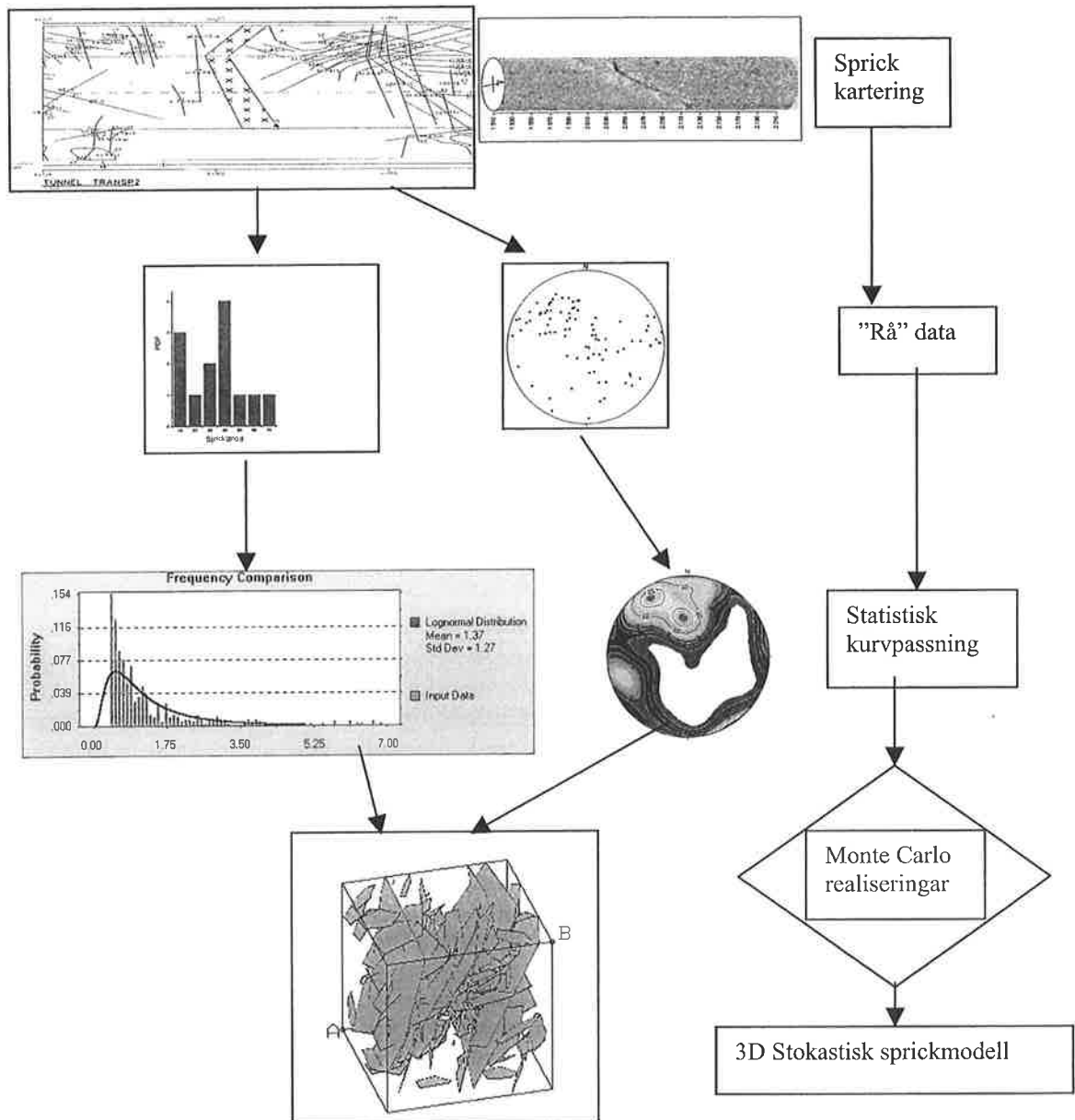
principerna för stokastiskt spricknätverk samt en förklaring till hur de stokastiska modellerna genererades.

De stokastiska spricknätverk skapades med datakoden FracMan (Dershowitz m.fl., 1998). FracMan-verktyget erbjuder en möjlighet att skapa tredimensionella modeller av diskontinuiteter utifrån tillgängliga data (en- eller tvådimensionell sprickkartering) och skatta modellosäkerheten. Genereringsprincipen består i att en prognos beskrivande nätverksgeometri och sprickegenskaper inom en bergvolym av intresse görs utgående från de statistiska fördelningar som är representativa för observationsdata eller (i fall viss typ av data saknas) från kvalificerade gissningar t.ex.. generisk kunskap, expertbedömning eller tidigare erfarenhet.

I FracMan kan enskilda sprickegenskaper som sprickgruppsegenskaper simuleras. Vanligtvis innehåller en modell sprickorienteringar, sprickstorlek, sprickgeometri (cirkulär, rektangulär, ellips, veckat plan mm.), sprickintensitet, rumsligt mönster (sprickor kan vara slumpartat fördelade i rymden eller förekomma som tydliga kluster), och sprickavslut (sprickan slutar mot en annan spricka eller slutar blint i bergmassan).

I ett första skede skattas de statistiska fördelningar som passar bäst till de observationsdata som finns. Sprickor delas in i orienteringsgrupper/kluster, om sådana kluster framgår från stereoplot och till varje kluster anpassas en teoretisk statistisk fördelning. Separat för varje identifierat orienteringskluster skattas sprickintensitet uttryckt antingen som antalet sprickor per meter borrhåna eller den totala sprickspårlängden per area av den yta där kartering gjordes (i t.ex. bergrumsgolvet). Ett rumsligt mönster av sprickors läge undersöks genom att studera deras inbördes lägesrelationer med hjälp av variogramanalys, spektrala metoder eller fraktaler (Barton och La Pointe, 1995). Efter att ha anpassat teoretiska fördelningar till alla sprickegenskaper provtar FracMan algoritmen ett värde från varje fördelning och genererar en spricka. Processen upprepas tills ett förutbestämt antal sprickor (eller en viss volumetrisk sprickintensitet) genereras.

En förenklad genereringssekvens presenteras i Figur 4. En verifiering av modellen sker via sk. syntetisk provtagning. Syntetiska borrhål och karteringsytor stoppas in i modellen som motsvarar orientering och storlek av verkliga hål och ytor. Därefter jämför man statistiken för de syntetiskt karterade sprickegenskaperna (t.ex. avståndet mellan sprickor längs hålen eller sprickspårlängd från karteringsytan) med statistiken från observationsdata. Om den syntetiska statistiken avviker från den observerade modifieras modellen tills bästa passning har hittats.



Figur 4. Ett koncept av en stokastisk spricknätverkssimulering.
Stochastic discrete fracture network concept.

5.2 Skattning av ingångsvariabler till modeller

Enligt den stokastiska modelleringsprincipen som visas i Figur 4 måste varje spricknätverksegenskap representeras med en sannolikhetsfunktion som återspeglar den naturliga variationen i observerade data. Egenskaperna (sprickstorlek, orientering, osv.) antas vara oberoende av varandra vilket innebär att deras fördelningar skattas separat var för sig.

För det studerade tillämpningsexemplet vid CLAB2 genererades olika stokastiska sprickmodeller utifrån två olika konceptualiseringar av spricknätverksgeometri: Modell 1 baseras på sprickkartering i borrhål och Modell 2 baseras på data från bergrumsgolvet .

I följande avsnitt ges en beskrivning över hur de olika spricknätverkskomponenterna skattades från observationsdata för att senare användas vid generering av stokastiska modeller.

5.2.1 Terzhagikorrektion

Sprickor som skär borrhålen eller karteringsytor under låga vinklar har lägre sannolikhet att påträffas och är därmed mindre representerade i den insamlade datamängden. För att kompensera för denna skevhet i provtagningen görs en s.k. Terzhagikorrektion (Terzhagi, 1965). Den innebär att sprickintensiteten justeras med hänsyn till vinkeln mellan sprickorna och borrhålet/karteringsytan. Eftersom kompenseringskoefficienten är omvänt proportionell mot sinusfunktionen av den nämnda vinkeln antar oproportionerligt höga värden för sprickor som är nära pararella med samplingslinjer/ytor. För att inte överkompensera för sådana sprickor införs vanligen en övre gräns som kompensationskoefficienten ej får överskrida.

5.2.2 Rumsligt mönster

Det rumsliga mönstret av sprickor kan antingen vara slumpartat fördelat eller uppvisa en mer ordnad struktur där det finns tydliga kluster med förhöjd sprickintensitet. Om det inte kan påvisas att det råder en ordnad struktur i fråga om inbördes sprickrelationer kan sprickpositioner representeras med en relativt enkel 3D Poisson process. Om det däremot finns tecken på att sprickornas läge följer ett tydligt mönster, dvs. avståndet mellan sprickorna inte har någon slumpmässig natur måste en sk. icke-stationär stokastisk modell upprättas. Sådana mönster är typiska för områden där det finns större förkastningszoner och sprickintensitet är en funktion av avståndet från zonens centrum. Rumslig variation kan undersökas med spektrala metoder, variogramanalys, fraktal matematik eller trendanalys.

För Modell 1 undersöktes spricklägesvariationen med spektraldensitet och power variogramanalys. Beskrivning av de två metoderna faller utanför ramen för denna rapport, för vidare information se Barton och La Pointe (1995) och Båth (1974). För att beräkna den spektrala sprickdensiteten beskrivs densitet i olika intervall som summan av ett antal harmoniska funktioner. Varje funktion har sin egen våglängd och amplitud. Amplituden motsvarar en varians och genom att plotta variansen som en funktion av våglängden kan man studera vilka komponenter (långa eller korta vågor) som mest bidrar till den totala variansen. Är den totala variansen oberoende av våglängden betyder det att sprickor är slumpartat fördelade längs hålen och inga sprickkluster förekommer. Är däremot kurvan lutande är detta ett tecken på att det finns separata kluster med förhöjd sprickintensitet.

Principen för variogramanalys liknar den för spektrala metoder. Man undersöker varianser i sprickintensitet längs borrhålen som en funktion av separationsintervall (se Isaaks och Srivastava, 1989 för mer detaljerad information).

Varken spektralanalys eller variogramanalys visade tecken på annat än ren slumpmässig variation. Sprickmodeller kan därför representeras med en s.k. 3D Poissonfördelning.

Även om ingen analys av rumslig variation gjordes för Modell 2 och allt ingående skattningar av modellens komponenter baserades på en annan typ av diskontinuiteter än för Modell 1, antogs det även för Modell 2 att alla diskontinuiteter oberoende av deras typ, är slumpartat fördelade i rymden. Med andra ord antogs i likhet med första konceptualiseringen, att sprickor i Modell 2 följer en 3D Poissonfördelning.

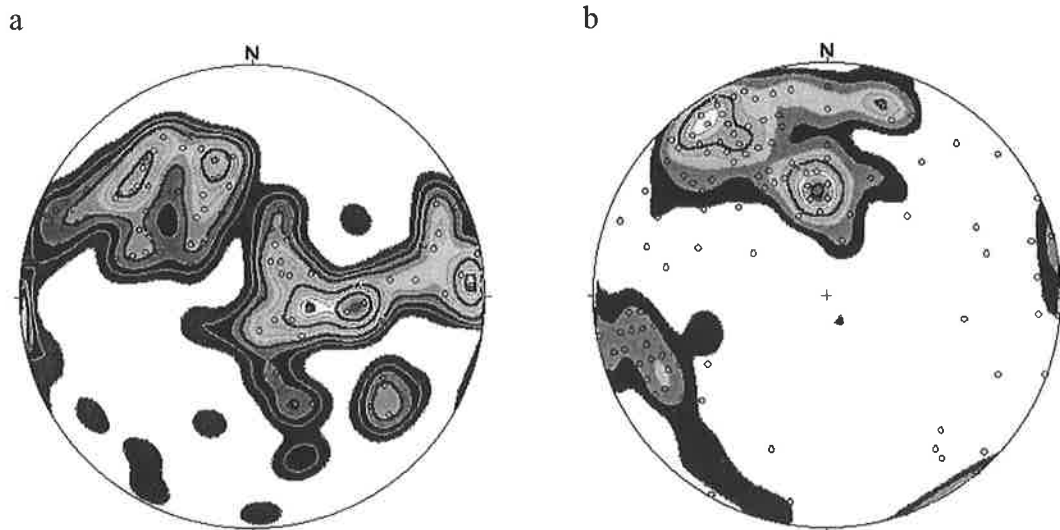
5.2.3 Sprickorientering

Sprickbildning och deras orientering är relaterad till både bergbildningsprocesser och den tektoniska utvecklingen. Genom att noggrant studera bergspänningsförhållanden på en tidsskala kan vissa slutsatser dras om den resulterande sprickhuvudorienteringen. En sådan tolkning kan dock vara mycket komplicerad särskilt i de fall när området i fråga har genomgått flera deformationsprocesser av liknande magnitud. Konsekvensen kan bli att sprickorienteringsgrupp/kluster relaterade till olika tektoniska händelser överlappar varandra och deras identifiering är en svår uppgift även för en erfaren strukturgeolog. Ett sätt att identifiera orienteringskluster och minimera en subjektiv bedömning är att använda statistiska klusteridentifierings procedurer (Mardia, 1972; Kohlbeck och Scheidegger, 1985). Statistisk klusteridentifiering fungerar bäst när det går att urskilja distinkta kluster direkt från stereoplot och när antalet uppmätta sprickor är relativt stort. I de fall där mängden av observationsdata är begränsad och det inte syns några tydliga kluster i stereoplot kan en sk. icke-parametrisk bootstrapfördelning tillämpas (Efron, 1982).

För sprickorna i Modell 1 hittades inga tydliga orienteringskluster och det stokastiska nätverket genererades med en bootstrapfördelning dvs. sprickor genererade i modellen hade exakt samma orienteringar som de observerade sprickorna. Däremot antog man att orienteringen hade en viss spridning (varians); detta för att modellen skall ta hänsyn till den naturliga variationen.

För Modell 2 hittades däremot två distinkta orienteringsgrupper/kluster och varje grupp approximerades med bästa anpassning till statistiska fördelningar med hjälp av den s.k. ISIS algoritmen (Dershowitz m.fl., 1998). ISIS metodiken är en statistisk klusteranalys som tilldelar sprickor till förutbestämda kluster (vilka bedöms antingen visuellt eller med egenvektoranalys) och sedan räknas den statistiska funktionen fram som beskriver klustrets sfäriska egenskaper, dvs. orientering av huvudvektor och spridningskoefficient runt huvudorienteringen. Den fördelning som hade bästa passning till de två grupperna var Fisherfördelningen (Mardia, 1972) som motsvarar en normalfördelning för sfäriska data. I Tabell 2 presenteras orienteringen av statistiskt funna huvudvektorer för varje kluster. En huvudvektor är en summa av alla vektorer inom varje kluster där varje vektor i ett kluster representerar orientering av en spricka.

Figur 5 illustrerar stereoplot-karta över sprickpolar från borrhålen och ytkarteringen.



Figur 5. Stereoplot över sprickpolar och i: a) borrhålen KSI31 (N102W/44) och KSI32 (vertikalt hål), N=112 b) golvytan i CLAB 2 bergrum, N=564.

Lower hemisphere equal area projection of fracture poles: a) fractures mapped in boreholes KSI 31 (N102W/44) and KSI32 (vertical hole), N=112, b) fractures mapped in CLAB2 floor, N=564.

5.2.4 Sprickstorlek

En noggrann mätning av sprickstorlek är i det närmaste omöjlig utan att dela upp studerad bergvolym. Den mest kompletta information som kan relateras till sprickstorlek är sprickspårlängdsdata från tvådimensionell kartering. Detta innebär att sprickstorlek i bästa fall kan approximeras med en kvantifierbar skattningsosäkerhet. Skattningsproceduren skall också rymma ett antagande om sprickans geometriska form som i de flesta fall antas vara cirkulär eller elliptisk.

Det finns i princip två typer av förfaranden för att bestämma sprickstorlek: analytisk och numerisk. Den analytiska proceduren presenterades först av Warburton (1980) som utgår från ett matematiskt samband mellan sannolikhetsfördelning för sprickspårlängd och sprickradie under ett antagande att sprickor är cirkulära. Det andra sättet att skatta sprickstorlek bygger på en numerisk simulering och beskrivs i detalj av La Pointe m.fl. (1993). Först byggs ett stokastiskt sprickfält med en antagen fördelning för sprickstorlek samt sprickform. I nästa steg läggs karteringsytor in (t.ex. berghällar eller tunnel) som motsvarar dimensioner och orientering av de verkliga karteringsytorna i modellen, och statistiken på de syntetiska sprickspårlängderna jämförs med den statistiken på observerade data. Avvikelse mellan den observerade och syntetiska fördelningen för sprickspårlängd mäts med Kolmogorov-Smirnov

statistiken och om denna avvikelse är stor så ändras den ursprungliga sprickradiefördelningen och en ny stokastisk modell genereras. Hela proceduren upprepas tills en god passning mellan observerade och syntetiska kurvor erhållits.

Skattning av sprickstorlek för Modell 1 och Modell 2 gjordes efter olika antaganden och procedurer. För Modell 1 fanns praktiskt taget inga direkta data för storleksbedömning; de flesta sprickor var ju mycket större än borrhålsdiameter. Därför användes ett kriterium som bygger på ett generiskt samband mellan sprickors apertur och längd. Sambandet finns tillgängligt som en empirisk relation från studier genomförda av Vermilye och Scholz (1995) och gällde för ådror fyllda med finkornig granit i granodioritisk berggrund vid Florence Lake regionen i Kalifornien. Med hänsyn till litologiska likheter mellan Florence Lake och CLAB antogs att samma empiriska samband skulle gälla också för berggrunden vid CLAB. Ingen hänsyn togs dock till likheter/olikheter i fråga av tektonisk utveckling inom de bägge områdena. Radien på sprickor i Modell 1 skattades direkt genom att konvertera aperturdata till spricklängd med hjälp av kvoten mellan apertur och spricklängd presenterad av Vermilye och Scholz. Kvoten uppmättes till $1.9 \cdot 10^{-3}$. Efter att ha skattat radie för alla sprickor visade det sig att radiedata bäst kan approximeras med en lognormal fördelning med medelradie på 12 m och standardavvikelse på 26.5 m (se Tabell 1).

För Modell 2 där sprickspårlängddata fanns karterade i CLAB 2 golvet användes ett mer avancerat tillvägagångssätt för att skatta sprickradie. En iterativ metodik implementerad i FracMan kod gjorde det möjligt att både automatisera radieuppskattning och leverera mer realistiska värden än för Modell 1. Först antogs en hypotetisk statistisk fördelning och dess parametrar för sprickradie och en stokastisk modell genererades. I modellen läggs sedan en karteringsyta motsvarande orientering och storlek på CLAB 2 golvyta och en syntetisk provtagning av sprickskärningar från ytan görs. I nästa steg jämförs statistiken mellan verkliga spårlängdsdata och de syntetiskt karterade. Beroende på avvikelser mellan statistiken för verkliga och syntetiska data görs en grov eller fin justering av primära antaganden om radiefördelning och en ny modell genereras. Processen fortsätter tills minsta skillnad mellan observerade och syntetiska data hittas. Efter att ha hittat bästa statistiska passning till radie inom varje kluster visade sig sprickradie inom varje orienteringsgrupp vara lognormalfördelad, som för Modell 1, däremot var medelradien betydligt mindre och likaså variansen (Tabell 1).

5.2.5 Sprickintensitet

Sprickintensiteten i modellerna uttrycks som kvoten mellan den totala arean på alla sprickytor inne i modellen och den totala modellvolymen. Kvoten kallas ofta volymetrisk sprickintensitet. I FracMan förkortas den som P_{32} . Eftersom sådana data inte är möjligt att mäta direkt, estimerades sprickintensitet numeriskt i modellen genom att utnyttja sambandet mellan P_{32} och den mätbara endimensionella sprickintensiteten kallad P_{10} . Sambandet presenterades först av Dershowitz och Herda (1992):

$$\frac{P_{10V}}{P_{10S}} = \frac{P_{32V}}{P_{32S}} \quad (1)$$

där P_{10V} är den verkliga (observationsdata) endimensionella sprickintensitet, P_{10S} är den syntetiskt funna intensiteten i modellen, P_{32V} är den sanna tredimensionella sprickintensitet (den intensiteten vill man skatta) och P_{32S} är tredimensionell i modellen (simulerad).

I praktiken genererar man först en modell med en antagen tredimensionell sprickintensitet P_{32S} för att därefter syntetiskt provta sprickor i modellen med syntetiska hål av samma läge, orientering och diameter som de verkliga hålen. Denna syntetiska provtagningen resulterar i P_{10S} . Till sist räknas den "sanna" tredimensionella intensiteten P_{32V} ut direkt ur ekvation (1). Hela proceduren upprepas ett antal gånger, dvs. man genomför ett antal Monte Carlo realiseringar för en och samma modell, för att till slut få ut ett medelvärde.

5.2.6 Stokastisk modell för CLAB

Efter att ha skattat alla ingångsvariabler genererades två stokastiska modeller för olika konceptualiseringar av spricknätverksgeometri vid CLAB. Tabell 1 presenterar huvudkomponenter av bägge modellerna.

Tabell 1. Stokastiska komponenter av två olika konceptualiseringar av spricknätverksgeometri vid CLAB anläggningen. Modell 1 baseras på borrhålsdata medan Modell 2 baseras på sprickdata från golvyta.

Stochastic components of two different conceptualisations of fracture network at CLAB site. Model 1 is based on borehole fracture mapping whereas Model 2 is based on floor fracture mapping.

Modell komponenter	Modell 1	Modell 2
Typ av diskontinuiteter	Alla öppna sprickor och fyllda sprickor (finkornig granit, kalcit, klorit) med aperturen överstigande 4 mm N=112	Öppna sprickor och sprickor fyllda med klorit och kalcit N=564
Rumsligt mönster	Sprickor följer en Poissonfördelning (slumpartad fördelning)	Sprickor följer en Poissonfördelning (slumpartad fördelning)
Sprickorientering	Icke-parametrisk bootstrapp (inga kluster)	Två orienteringskluster: Kluster 1: 156° (stupningsriktning), 60° (stupning), Fisher fördelning Kluster 2: 67° (stupningsriktning), 75° (stupning), Fisher fördelning
Sprickgeometri	Tiosidig polygon (cirkulär)	Tiosidig polygon (ellips: lång axel/kort axel=2:1)
Sprickstorlek	Sprickradie logN fördelad; $\bar{R}=12\text{m}$, $\sigma_R=26.5\text{m}$	Kluster 1: radie logN fördelad, $\bar{R}=4.8\text{m}$, $\sigma_R=1.7\text{m}$ Kluster 2: radie logN fördelad, $\bar{R}=4.5\text{m}$, $\sigma_R=1.4\text{m}$
3D sprickintensitet	$1.1\text{m}^2/\text{m}^3$	$1.55\text{m}^2/\text{m}^3$
Modell storlek	$120*60*60\text{m}^3$	$130*60*60\text{m}^3$

6 PREDIKTIONER AV BLOCKMÄNGD OCH BLOCKSTORLEK

Prognoser av mängd, storlek och stabilitet av kinematiska block inne i CLAB 2 gjordes med en numerisk kod RockBlock (Dershowitz m.fl., 1995).

I korta drag ser RockBlocks beräkningsschema ut på följande sätt:

1. Alla sprickskärningar inne i modellen räknas fram.,
2. Karta över sprickärningslinjer med bergrumsytor (tak och väggar) tas fram;
3. Bergblock som har kontakt med bergrummet identifieras;
4. Blockvolym och vikt beräknas;
5. Stabilitetsstatus bedöms och i fall block är instabila kvantifieras en säkerhetsfaktor. Här tillämpas Warburtons vektormetod (Warburton, 1981).

I beräkningen av stabilitetsförhållanden togs ingen hänsyn till förekomst av vatten i sprickorna inte heller behandlades horisontella spänningar i berg. Säkerhetsfaktorn SF räknades ut genom att tillämpa Barton-Bandis gränsjämviktskriterium (Barton och Bandis, 1990) enligt vilket:

$$SF = \frac{\sigma \tan \phi}{S} \quad (2)$$

där σ är normal spänning, ϕ är friktionvinkel och S är kraften som står för blockets fall eller rörelse.

Blockets stabilitetsstatus kan vara ett av fyra tillstånd:

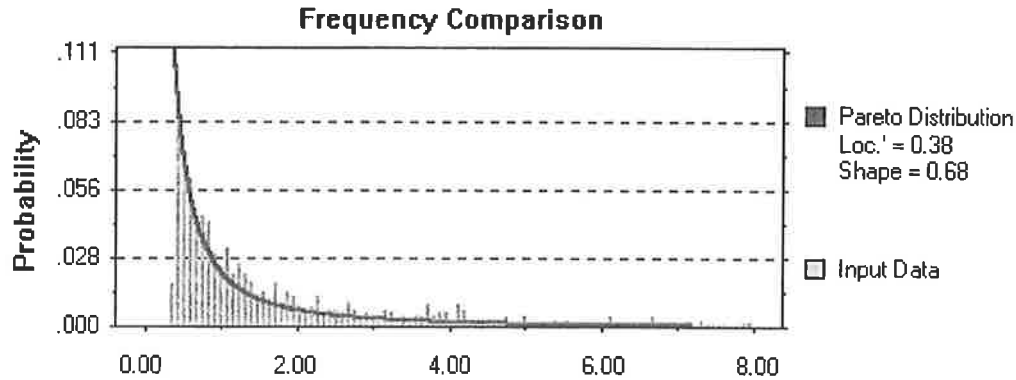
- Blocket är ovillkorligt stabilt;
- Fritt fall;
- Blocket glider på två ytor; eller
- Blocket glider på en yta.

För att jämföra prediktionsresultat från de två olika konceptualiseringarna av spricknätverk (Modell 1 och Modell 2) gjordes tio Monte Carlo realiseringar för varje modell och alla instabila block för vilka SF var lägre än 1.0 antogs vara av betydelse för bedömning av konstruktionens stabilitet.

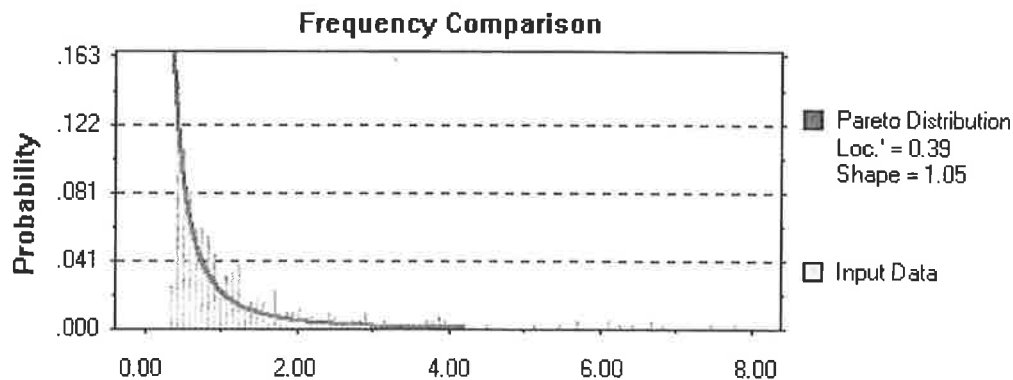
Det visade sig att en övervägande majoritet av predikterade block var små, med några kilos vikt. Dessa block har praktiskt taget ingen inverkan på bergrums storskaliga stabilitet. Trots att de små blocken var av sekundär betydelse hade de en stor effekt på den statistiska fördelningen av predikterat antal block och den predikterade blockvolymen. De små blocken bidrog till att fördelningen av blockvolymen blev starkt skev, dvs. med lång svans åt höger vilket gör att fördelningens parametrar (medelvärde, medianvärde mm.) mer är en funktion av små oviktiga block medan tunnelns stabilitet beror på förekomst och stabilitet av större block. Vi bestämde

därför subjektivt att hänsyn skulle tas enbart till de block som är tyngre än 1000 kg (vilket motsvarar ca. 0.4 m³ i volym).

Figur 6 och 7 visar den predikterade volymen av instabila block för CLAB 2 för respektive Modell 1 och Modell 2.



Figur 6. Prognos av ostabila block för CLAB 2 baserad på Modell 1 (sprickdata från endimensionell kartering). Horisontell axel avser blockvolym i m³.
Prediction of block volume in m³ for CLAB 2 based on Model 2.



Figur 7. Prognos av ostabila block för CLAB 2 baserad på Modell 2 (sprickdata från golvkartering). Horisontell axel avser blockvolym i m³.
Prediction of block volume in m³ for CLAB 2 based on Model 2.

Höjden på staplarna avspeglar sannolikheten för att det finnes ett instabilt block med den volym som avläses på x-axeln. Kurvan representerar den statistiska fördelning som passar bäst till de predikterade data. Både för Modell 1 och Modell 2 gavs den bästa anpassning av en Pareto sannolikhetsfunktion och dess parametrar anges till höger om diagrammet i bägge figurerna. Pareto-sannolikhets funktion $f(x)$ beskrivs med två parametrar vilka kallas form (shape) och läge (location) L :

$$f(x) = \frac{\beta \cdot L^\beta}{x^{(\beta+1)}} \quad (3)$$

där x är blockvolym i vårt fall. L är helt enkelt den minsta predikterade blockvolymen och är en parameter som beskriver formen (kurvaturen) på fördelningen.

Eftersom det kan vara svårt att tolka stabilitetsförhållanden och därefter förstärkningsbehov direkt från statistiska fördelningar i Figurerna 6 och 7 bör prognosen presenteras i en mer ”tolkningsbar” form, vilket emellertid inte alltid är lätt att åstadkomma. Prognosen måste vara meningsfull i den mening att den ger ett beslutsunderlag till t.ex. förstärkningsplanering i rent fysiskt kvantifierbara termer. Bara det faktum att prognosen är statistiskt relevant innebär automatiskt inte att prediktions resultat är praktiskt tillämpbart.

Tabell 2 sammanfattar resultaten av blockprognos i form av olika statistiska mått.

Tabell 2. Sammanfattning av blockprognoser för Modell 1 och Modell 2.

Summary of block predictions for Model 1 and Model 2.

Block prognos	Modell 1	Modell 2
Block volym		
median (m ³)	1.3	0.8
95% konfidensintervall (m ³)	1.1-1.5	0.7-0.9
Block volym		
Aritmetisk Medelvärde (m ³)	4.8	1.5
95% konfidensintervall (m ³)	3.2-6.5	1.2-1.9
Std.fel. (m ³)	5.3	0.85
90-percentil		
Aritmetisk medelvärde (m ³)	9.3	3
95% konfidensintervall (m ³)	5.9-12.7	2.3-3.7
Std.avvikelse (m ³)	4.8	1
Största block		
Median (m ³)	77	8
95% konfidens intervall (m ³)	51-154	6-17
Aritmetisk medelvärde (m ³)	113	12
95% konfidensintervall (m ³)	43-184	5-19
Std.avvikelse. (m ³)	99	10.2
Antalet block (aritmetisk medelvärde)	59	38
95% konfidensintervall	53-64	33-43
Std. avvikelse	8	7
Total blockvolym		
Aritmetisk medelvärde (m ³)	470	59
95% konfidensintervall (m ³)	316-625	48-70
Std.avvikelse (m ³)	215	15

Alla i Tabell 2 predikterade parametrar: medelvärde för blockvolym, medianvärde för blockvolym, medelvärde på 90-percentil för blockvolym osv. baseras på data från 10 Monte Carlo simuleringar där varje simulering betraktas som ett separat dataset. Ett medianvärde på 90-percentilen räknas t.ex. fram genom att först hitta ett värde på 90-percentilen av blockvolymen för var och en av de 10 Monte Carlo simuleringarna och därefter räknas medianen för de tio värdena.

7 DISKUSSION

7.1 Tolkning av sannolikhetsbaserad prognos

Utvärdering av probabilistiska prognoser för tunnelstabilitet är en komplex process. De prognoser som sammanfattas i Figurer 6 och 7 och i Tabell 2 är stokastiska

prognoser vilket innebär att prediktionerna gäller för en viss tunnelsträcka (fast i vårt fall för hela bergrummet) men blockpositioner i själva bergrummet är omöjliga att fastslå. Detta därför att var och en av de 10 stokastiska realiseringar av spricknätverk vid CLAB är ett lika troligt utfall från Monte Carlo processen inom en modellerad bergvolym (se Tabell 1 för modell storlek). Den typen av prognoser kan därför ha lika stor betydelse för valet av ett optimalt läge för undermarksobjektet (riktning) samt dimensioner och formen innan bygget påbörjas som för val av förstärkningsstrategi för en anläggning under byggnad eller ett redan färdigbyggt objekt.

För att prognoser ska göra mest nytta måste resultatet presenteras på sådant sätt att det lätt kan tillämpas även av dem som inte deltog i själva prediktionsprocessen och besitter begränsade kunskaper om ett stokastiskt spricknätverkskoncept. Att bara ange en frekvensfunktion för blockstorleken är knappast tillräckligt eftersom den praktiska tolkningen av en sådan inte är uppenbar.

Det finns två viktiga frågor som en modellerare bör ställa till sig själv:

1. Vilka av de i Tabell 2 predikterade parametrarna har man störst nytta av i den efterföljande förstärkningsprocessen ?
2. Vilken prognos är mest tillförlitlig: den för Modell 1 eller den för Modell 2?

Dessvärre finns det inget entydigt svar på första frågan och svaret på andra frågan kan bli svårt att verifiera. Tabellen levererar dock en prognos med en kvantifierad osäkerhet (konfidensintervall och standardavvikelse) och ger ett brett underlag till att fatta ett lämpligt beslut om vilka åtgärder som skall sättas i verket.

Om förstärkningsstrategin skall utgå ifrån det största möjliga block som kan falla ner eller glida in i bergrummet (vilket kan tyckas vara ett rimligt kriterium för att garantera den storskaliga tunnelstabiliteten) kan det konstateras att enligt prognosen med Modell 1 finns det en liten sannolikhet att man stöter på ett block som är större än 154 m^3 . Denna volym ryms nämligen inom 95% konfidensintervall för största block som kan förekomma. Motsvarande volym för Modell 2 är 17 m^3 .

Som ett alternativ till sannolikhetsfunktioner för predikterad blockvolym kan metodiken även användas för att ta fram parametrar för beskrivande statistik (Tabell 2) utan att presentera prognosen med en sannolikhetsfunktion. Här anges varje parameter med 95% konfidensintervall. Konfidensintervallen kan variera beroende av vilken grad av osäkerhet prognosen har.

Det är inte alltid helt klart vilka parametrar från den beskrivande statistiken som skall användas för att ta fram en lämplig förstärkningsstrategi. Just för blockprognoser, där histogrammet för predikterade blockvolym visar en tydlig icke-symetrisk form, är aritmetiska medelvärdet starkt beroende av de få men höga värdena i histogrammets svans och är också betydligt större än medianvärdet (se Tabell 2 där medelvärdet för blockvolym och Modell 1 är lika med 4.8 m^3 medan medianvärde är 1.3 m^3). I sådana fall är medianvärdet rent statistisk mer representativt för hela populationen än medelvärdet men rent praktiskt säger medianvärde inte mycket mer än att populationens tyngdpunkt/mittpunkt ligger just där. Om man däremot kommit fram

till att prediktera det största blocket längs en tunnel kan förstärkning göras med hänsyn till detta och även om sådan förstärkning inte behöver vara lika omfattande på alla ställen kan den garantera att hela bergrummets stabilitet är säkrad. T.ex. om man skulle designa förstärkningen efter övre gränsen för 95% konfidens intervall för största blocket i Modell 1 dvs. 184m^3 då vore sannolikheten att det sker något större blockutfall väldigt liten. Å andra sidan skulle en sådan förstärkning innebära stora kostnader och tidsåtgång och med tanke på den tillgängliga budgeten troligen vara svår att genomföra.

Att istället för största blockvolym använda 90-percentile av blockvolym resulterar i lägre förstärkningskostnader, men däremot blir förstärkningen inte lika "säker". Enligt 90-percentilen för Modell 1 skulle "bara" 10% av alla block vara större än 12.7m^3 . Om man då nonchalerar de 10% skulle förstärkningskostnader och arbetstid vara mycket lägre men då finns det alltid en risk att 10% kvarvarande blockvolym skulle kunna orsaka skador som vida överstiger den besparing som skulle kunna erhållas med en klenare förstärkning. Därför bör nyttan av en mer osäker prognos alltid vägas mot möjliga negativa konsekvenser för tunnelstabiliteten.

Den totala blockvolymen som predikterades som en instabil massa (Tabell 2 sista rad) tycks ha mindre betydelse vid förstärkningsplanering eftersom den inte säger mycket om hur stora block det kan bli fråga om utan bara ger ett mått på den mängd bergmaterial som kan rasa eller glida in i tunnelöppningen. Parametern kan dock vara till nytta när ett bygge planeras och det finns en möjlighet att anpassa anläggningens placering och form så att förstärkningskostnader kan optimeras redan i tidigt skede.

7.2 Olika konceptualiseringar av CLAB spricknätverk

Blockprognoserna gjorda för Modell 1 och Modell 2 visade på relativt sett stora skillnader. Största skälet till de i Tabell 2 presenterade avvikelserna mellan modellerna var att de baserades på två olika underlag vid generering av spricknätverksgeometrin. Konsekvensen av att det i det ena fallet genererades en stokastisk modell med underlag från endimensionell borrhållsprickkartering (Modell 1) och i det andra fallet med data från tvådimensionell kartering (Modell 2) hade en stark påverkan inte bara på själva modellerna utan även på den predikterade blockvolymen.

Det kan finnas en viss skepsis mot att man jämför prognoser som i själva verket baseras på två olika sätt att samla information på och att det skulle vara pedagogiskt värdefullt om man hade byggt bägge modellerna med hänsyn till exakt samma genetiska typ av diskontinuiteter. Ett sådant resonemang är delvis befogat men å andra sidan har man i detta projekt strävat efter att den presenterade prognosticeringsmetodiken skulle vara så realistiskt som möjligt. För att en stokastiskt bergprognos skall vara verklighetsbaserad gäller det inte bara att prognosticeringsverktyg korrekt återskapar de vid platsen rådande geologiska förhållanden utan också att valet av den konceptuella geologiska modellen syftar till att ge det bästa underlaget för vidare prognoser. Valet gjordes utifrån den vid tillfället tillgängliga informationen och kunskapen om platsen.

Vid det tillfälle när den första konceptuella modellen för spricknätverksgeometri togs fram fanns det ingen tillgång till tvådimensionella data från sprickkartering i bergrumsgolvet. Detta resulterade i att kunskapen om vissa sprickegenskaper blev

markant begränsade. Beslutet om vilka diskontinuiteter som skulle tas in i modellen och vilka som inte skulle tas in fattades med hänsyn till diskontinuitetens benägenhet att fungera som svaghetsplan. Det fanns inga data om sprickornas bergmekaniska egenskaper vilka eventuellt kunde ha gett underlag för ett annat beslutsriterium.

Vid andra konceptualiseringen hade vi tillgång till betydligt mer information om spricknätverksgeometrin och genom att stödja oss på den samlade geologiska expertisen vid platsundersökningen konstaterades det att öppna sprickor och de som var fyllda med klorit och kalcit var de ur bergmekanisk perspektiv mest lämpliga för vidare prognoser. Här fick man dessutom mer kunskap om sprickors storlek eftersom det fanns sprickspårlängdsdata.

Det är inte lätt att med all säkerhet direkt avgöra vilka prognoser; de gjorda för Modell 1 eller de för Modell 2 som är mest tillförlitliga. Även om det inte finns några direkta mått för att bedöma de två prognosernas trovärdighet kan man dock med hjälp av indirekta observationer och en systematisk tankeföljd dra mer eller mindre fasta slutsatser om prognosernas precision och noggrannhet.

Ett intuitivt resonemang är att eftersom det fanns ett mer komplett dataset för generering av Modell 2, dvs. det fanns totalt sett betydligt fler sprickor karterade i CLAB 2 golvet än i borrhålen samt att man hade ett avsevärt bättre underlag för sprickstorleksbedömning, talar till fördel för Modell 2 som ett noggrannare replikat av en spricknätverksgeometri vid CLAB. Fler sprickor från golvkarteringen resulterade också i mer tillförlitlig indelning i orienteringskluster, eftersom extrapolering vid framställande av densitetskartor på stereoplottar (Figur 5) var behäftade med mindre osäkerheter.

Samtidigt som det är i det närmaste omöjligt att kvantitativt jämföra de två prognosernas noggrannhet kan deras precision uttryckas i mer kvantitativa termer. Ett sätt att bedöma prognosens precision är att skatta dess variationskoefficient vilken är kvoten mellan populationens standardavvikelse och dess medelvärde. I vårt fall använder vi oss av parametrarna i Tabell 2 även om de bara bygger på 10 Monte Carlo realiseringar och inte är populationens parametrar utan sk. "sample population" parametrar. Här framgår det tydligt att för de flesta predikterade parametrar är variationskoefficienten för Modell 2 lägre än för Modell 1. T.ex. är variationskoefficienten för blockvolym lika med 1.1 för Modell 1 och 0.6 för Modell 2; för största blocket är koefficienten 0.88 för Modell 1 och 0.85 för Modell 2 och för den totala blockvolymen är relationen 0.46 respektive 0.25.

Ett annat sätt att undersöka prognosernas precision är att genomföra en formell Fisher-test vilket också kallas F-test eller varianstest. Det testet går ut på att man mäter kvoten mellan varianser från två dataset (Modell 1 och Modell 2 i detta fall) och jämför den med en kritisk F-statistik (Davis, 1986; Swan och Sandilands, 1995) för det antal frihetsgrader man har och för den antagna signifikansnivån. För att genomföra ett F-test valdes två parametrar i Tabell 2 för vilka variationskoefficienten var lägst för bägge modellerna: 90-percentilen och totala blockvolymen. Eftersom det underliggande antagandet för F-test är att testade data skall vara normalfördelade genomfördes det först en normalitetstest med Kolmogorov-Smirnov statistik. Bara data från de 10 Monte Carlo realiseringarna för den totala blockvolymen visade sig följa en normalfördelning och följaktligen användes dessa data för att testa variansen mellan bägge prognoserna. Resultatet från F-testet visade att variansen för den totala

blockvolymdata för Modell 1 var signifikant större än variansen för Modell 2. Detta tyder på att man har lyckats åstadkomma högre precision med prognoser baserade på Modell 2 än Modell 1. Man kan dra slutsatsen att den mest troliga orsaken till högre precision för Modell 2 var ingångsvariablerna till den stokastiska modellen dvs. spricknätverksgeometriegenskaper skattades med högre precision och uppvisade mindre spridning.

7.3 Prognososäkerhet och felkällor

Varje steg i prognoskedjan (se Figur 2) är behäftat med olika sorter av osäkerheter som i sin tur inverkar i olika grad på de slutliga blockprognoserna. De flesta osäkerheter kan i stora drag sammanfattas som:

- **Mätosäkerheter:** delas in i mänskliga fel och instrumentets fel och har i de flesta fall en systematisk natur dvs. är konstanta och relativt lätta att korrigera för. Det kan dock förekomma situationer när felet varierar från fall till fall och är nästan omöjligt att kvantifiera på ett korrekt sätt, t.ex. när man skall bestämma stupning på en spricka på en häll och där sprickans yta inte förväntas vara plan och dess stupning varierar med djupet;
- **Konceptuell osäkerhet:** beror på valet av den geologiska/strukturella modellen som förväntas återspegla spricknätverksgeometrin. Här kan modeller som bygger på olika typer av diskontinuiteter uppvisa en märkbar skillnad, något som också visades i denna studie där två olika konceptualiseringar av sprickfältet vid CLAB jämfördes. Det är viktigt att konceptualisering av geologiska förhållanden görs med hänsyn till ändamålet med efterföljande prognoser. I denna studie låg fokus på blockinstabilitet där bara gravitation och friktion samverkar. Hade däremot andra mekanismer varit aktuella såsom bergspänningar och vattentryck i sprickor måste den konceptuella modellen ta hänsyn till de nya faktorerna;
- **Modellosäkerhet:** innefattar osäkerheten i skattning av alla ingående modellvariabler (sprickstorlek, orientering, sprickintensitet, etc.). Denna typ av osäkerhet kan i vanliga fall bli ganska stor beroende på mängden av data och främst deras naturliga variation. Åt andra sidan kan osäkerheterna i de flesta fall kvantifieras och uttryckas med ett mått på variansen kring ett centralt värde, som t.ex. koncentrationskoefficient för orientering inom en kluster eller standardavvikelse för sprickradie.
- **Prognososäkerhet:** beror på att prognosen bygger på ett antal multipla realiseringar av spricknätverksgeometri och presenteras därför som en sannolikhetsfördelning där dess centrala värde kan anges med ett konfidensintervall. Prognososäkerheten är i själva verket en produkt av alla typer av osäkerheter och mätfel.

8 FORTSATT STUDIER

Det finns två huvudspår som enligt författaren kan betraktas som en rimlig ansats i fortsatt arbete med stokastiska blockprognoser.

Det ena spåret är implementering av en mer komplett kunskap om bergbildningsprocesser och den tektoniska utvecklingen av området för att minska osäkerheten vid framtagandet av den konceptuella geologiska modellen. Eftersom sprickmönster och i synnerhet deras orienteringar och rumsliga variation är starkt relaterade till bergspänningsorientering under den tektoniska utvecklingen kan denna typ av information eventuellt bidra till mer noggranna skattningar av modellens ingångsvariabler.

Den andra aspekten är införandet av bergspänningar i själva blockprognoserna. Detta skulle innebära mer realistiska förhållanden kring tunnelöppningen eftersom vissa block predikterade som ostabila i denna studie kan visa sig vara stabiliserade med den horisontella spänningen och sannolikheten för blockutfall eller utglidning är mycket liten.

9 ERKÄNNANDEN

Denna studie ingick som ett delprojekt i doktorandutbildning på geologiska institutionen vid Chalmers tekniska högskola under 1999-2001. Adj.prof. Johan Andersson var handledare för projektet. Arbetet finansierades av Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning och följdes av SveBeFo:s referensgrupp under ledning av Gunnar Nord.

10 REFERENSER

Barton C and La Pointe P (1995) *Fractals in the Earth Sciences*. Plenum Press. New York.

Barton N., Bandis SC. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In Barton N., Stephansson O. (eds). *Proc. of the Int. Symposium on rock Joints*, Loen Norway: 1990:603-610. Rotterdam: Balkema .

Båth M (1974) *Spectral analysis in Geophysics*. Elsevier. Amsterdam.

Baecher, G.B., Lanney, N.A. and Eistein, H.H., 1977. Statistical description of rock properties and sampling. In Wang, F.D. and Clark, G.B. (eds.) *Energy resources and excavation technology*. Colorado School of Mines. Golden, Colorado. 5C1.1-5C1.8.
Childs, E.C. 1957. The anisotropic hydraulic conductivity of soil. *J. of Soil Science*. 8(1), 42-47.

Davis JC (1986) *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Willey & Sons. New York.

Dershowitz W and Carvalho J (1996) Key-block tunnel stability analysis using realistic fracture patterns. In Aubertin M, Hassani F and Mitri HS (eds.) *Proceedings of the 2nd North American rock mechanics symposium; NARMS '96, a regional conference of ISRM; Rock mechanics tools and techniques*. 2: 1747-1751.

Dershowitz W, Carvahlo J and Foxford T (1995) *FracMan/RockBlock. Discrete Fracture Rock Block Stability Analysis. User documentation, version 1.0*. Golder Assoc. Inc. Seattle.

Dershowitz W, Lee G, Geier JE, Foxford T, La Pointe P and Thomas A (1998) *FracMan*. Interactive Discrete Feature Data analysis, Geometric Modeling and Exploration Simulation. User documentation, version 2.6. Golder Assoc., Inc. Seattle, Washington.

Dershowitz W and Herda H (1992) Interpretation of fracture spacing and intensity. In Tillerson JR. and Wawersik WR. (Eds.) *Rock mechanics; Proceedings of the 33rd U.S. symposium* **33**: 757-766.

Efron B (1982) *The Jackknife, the bootstrap, and other resampling plans*. SIAM monograph No. 38. Society of industrial and Applied Mathematics. Penn. Philadelphia.

Geier JE, Axelsson CL, Hässler L and Benabderrahmane A (1992) Discrete fracture modeling of the Finsjön rock mass. Phase 2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. TR 92-07. Stockholm.

Goodman RE and Shi G (1985) *Block Theory and Its Application to Rock Engineering*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.

Gustafsson Ch and Stråhle A (1997) Borehole TV images from KSI 31 and KSI 32. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. PM PPM 97-3450-12. Stockholm.

Hoek E., Carvalho J., Li B. *Unwedge users manual*. Rocscience Inc.: Toronto, 1991.

Hudson, J.A. and La Pointe, P., 1980. Printed circuits for studying rock mass permeability. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **17**, 5, 297-301.

Hudson, J.A. and Priest, S., 1979. Discontinuities and rock mass geometry. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **16**, 6, 339-362.

Irmay, S. 1955: Flow of liquids through cracked media. *Bulletin of Water Resources Council*, 5A(1), 84. Israel.

Isaaks EH and Srivastava RM (1989) *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.

Jakubowski J. *Prediction of the load of tunnel support in the rock mass of blocky structure by statistical methods*. Ph.D. dissertation. University of Mining and Metallurgy: Kraków, Poland, 1995.

Jakubowski J., Tajdus A. The 3D Monte-Carlo simulation of rigid blocks around a tunnel. In Rossmann HP. (ed.) *Proceedings of the Second International Conference on the Mechanics of Jointed and Faulted Rock*. Rotterdam: Balkema 1995;2:551-556.

Kohlbeck, Scheidegger, The power of parametric orientation statistics in the earth sciences. *Mitt. Österr. Geol. Ges.* vol 78, 1985. P251-265.

- Li B. *The stability of wedges formed by three intersecting discontinuities in the rock surrounding underground excavations*. Ph.D. dissertation. University of Toronto, 1991.
- La Pointe, P., Wallman, P., Dershowitz, W. (1993). Stochastic estimation of fracture size through simulated sampling. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* 30(7), 1611-1617.
- Mardia KV. *Statistics of Directional Data*. London: Academic Press Ltd., 1972.
- Moberg M (1995a) Utbyggnad av lagringskapacitet Clab-Simpevarp. Berggrundundersökning 1978. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. PM 95-3450-06, Stockholm,
- Moberg M (1995b) Utbyggnad av lagringskapacitet Clab-Simpevarp. Berggrundundersökning 1979. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. PM 95-3450-07, Stockholm.
- PanTechnica Corporation, *PT Workshop, KBTunnel Module, Version 2.0 Users Manual*. Eden Prairie, Minnesota. 2000.
- Priest SD., Samaniego JA. The statistical analysis of rigid block stability in jointed rock masses. *Proceedings of the 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*. 1988:398-403. The Institutions of Engineers Australia, Sydney.
- Schwartz, F.W., Smith, L. and Crowe, A.S. 1983. A stochastic analysis of macroscopic dispersion in fractured media. *Water Resources Research*, 19(5), 1253-1265.
- Starzec P., Andersson J. (2002). Probabilistic predictions regarding key blocks using stochastic discrete fracture networks - example from a rock cavern in south east Sweden. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (in press).
- Stone CA. *A matrix approach to probabilistic keyblock analysis*. Ph.D. dissertation. Michigan Technological University, 1994.
- Swan ARH and Sandilands M (1995) *Introduction to Geological Data Analysis*. Blackwell Science Ltd. London, 446p.
- Tirén S., Beckholmen M., Voss C., Askling P (1996) SITE-94: Development of a geological and a structural model of Äspö. Southeastern Sweden. SKI Report 96:16, Stockholm.
- Terzhagi RD (1965) Sources of errors in joint surveys. *Geotechnique*, 15: 287-304.
- Vermilye JM. and Scholz ChH (1995) Relation between vein length and aperture. *Journal of Structural Geology* 17, 3: 423-434.
- Warburton PM. A stereological interpretation of joint trace data. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* 1980;17:181-190.

Warburton PM (1981) Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free faces. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **18**: 415-427.