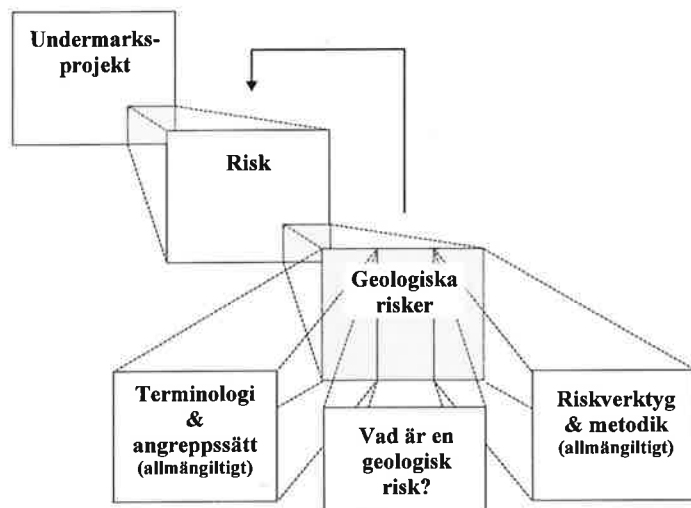




BESLUTS- OCH RISKANALYS SAMT STATISTISKT SYNSÄTT INOM UNDERMARKSBYGGANDET

Robert Sturk

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH
SveBeFo Rapport 23

**BESLUTS- OCH RISKANALYS
SAMT STATISTISKT SYNSÄTT INOM
UNDERMARKSBYGGANDET**

**Integrated Decision and Risk System
for Underground Projects**

Robert Sturk
Avd för Jord- och Bergmekanik, KTH

FÖRORD

Stora undermarksprojekt kännetecknas ofta av att de genomförs med delvis okända förutsättningar. Hela byggprocessen (projektering-byggande-drift) är ett komplext system och omfattar hantering av ett stort antal osäkra faktorer.

Kvalificerad riskbedömning är ett viktigt moment i olika beslutsskeden, där t ex fördelning av risker mellan de olika aktörerna (beställare, projektör och entreprenör) kan vara dåligt klarlagda beroende på att de, utifrån sina intressen, har olika behov av att bedöma risker under ett projekts olika faser. Riskerna har dessutom en koppling till entreprenadformen (ex. generalentreprenad - totalentreprenad). Likaså ställs allt oftare krav på riskanalyser i samband med tillståndsgivning för undermarksarbeten. Det föreligger således ett stort behov av att utveckla metoder för att på ett mer systematiskt och säkrare sätt kunna bedöma olika parter tekniska och ekonomiska risker i större undermarksprojekt.

En stringent risk- och beslutsanalys bör leda till en mer optimerad strategi för design och byggande och samtidigt utgöra basen för den resursplanering och kvalitetssäkring som är förutsättningen för framgångsrika undermarksprojekt. Sammantaget bör också ett mer allmänt nyttjande av risk- och beslutsanalys i branschen leda till lägre anläggnings- och driftkostnader.

Projektet är samfinansierat med Banverket, Elforsk, SBUF, Skanska, SKB och Vägverket som intressenter och genomförs vid avdelningen för Jord- och bergmekanik vid KTH. Projektet är uppdelat i två delar, en geologisk del där inriktningen är att behandla geologiska osäkerheter samt en administrativ och ekonomisk del där syftet är att studera hur ett projekt planeras med hänsyn till olika byggrelaterade risker.

Den här redovisade delstudien har resulterat i en sammanställning över befintliga analysmetoder för besluts- och riskhantering samt en bakgrundsanalys inför de kommande insatserna i projektet. I rapporten har stor vikt lagts vid att systematisera och bringa reda i begrepp och tillvägagångssätt inom ämnesområdet. Vår förhoppning är att denna studie skall vara ett första steg i förverkligandet av rationella och produktionsinriktade risk- och beslutsmodeller för undermarksbyggande, att tillämpas i anläggningsindustrin.

Stockholm i februari 1996

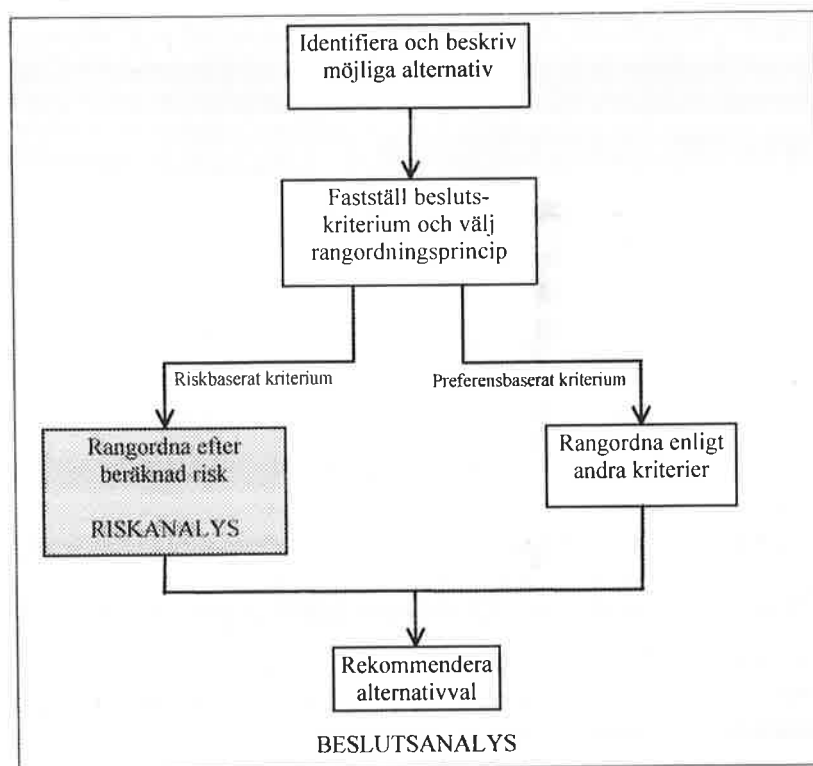
Per Andersson

SAMMANFATTNING

Stora undermarksprojekt innehåller en mängd risker både för byggherre och entreprenör. Det är inte ovanligt att större projekt blir försenade, dyrare eller att andra tekniska lösningar än de projekterade väljs. För att optimera undermarksbyggandet ytterligare och undvika "bakslag" finns det behov för ett undermarksprojekts alla parter att på ett säkert och systematiskt sätt kunna bedöma de tekniska och ekonomiska riskerna i projekten.

För att underlätta beslutsfattandet och hanteringen av osäkerheter och risker kan besluts- och riskanalys tillämpas. Dessa sannolikhetsbaserade analysmetodiker är en hjälp vid beslutsfattandet eftersom man då tvingas strukturera problemen samt klargöra riskerna och därmed själv kan avgöra om man är villig att ta dem eller ej. Föreliggande rapport beskriver hur besluts- och riskanalys kan användas inom ett undermarksprojekt samt redovisar befintliga riskanalysverktyg lämpliga att använda.

Risk omfattar konsekvenserna av en olycka och deras sannolikhet. Beroende på användningsområde behöver risken beskrivas mer eller mindre detaljerat. För föreliggande tillämpningsområde är det tillfyllest att beskriva risken som förväntad konsekvens, ofta detsamma som förväntad kostnad. Riskanalys innebär att tillämpa ett probabilistisk tillvägagångssätt för att belysa och värdera faror/konsekvenser och i detta sammanhang därigenom optimera beslut. Riskanalysen är enligt detta resonemang en del av beslutsprocessen/beslutsanalysen. I rapporten presenteras ett förslag till ett beslutssystem för undermarksprojekt, IDRÜ. Huvuddragen i IDRÜ visas i flödesschemat nedan. Beslutssystemet utgör ett förslag på hur en beslutsmodell tillämplig för undermarksbyggande skulle kunna se ut.



När ett beslutsproblem uppdagas måste beslutsfattaren inledningsvis klargöra och förstå de olika beslutsalternativen som är aktuella. Det första steget i analysen blir således att identifiera och beskriva samtliga möjliga acceptabla beslutsalternativ. Beskrivningen skall göras så att jämförelse mellan alternativen blir möjlig.

Därefter måste beslutskriteriet fastställas. Valet av beslutskriterium sker mot bakgrund av vilken kunskap eller mängd information beslutsfattaren besitter. Så långt som möjligt bör ett riskbaserat beslutskriterium användas. Om detta inte är möjligt kan man övergå till ett preferensbaserat kriterium.

Nästa steg, riskanalysen, är det mest omfattande och kanske det viktigaste steget i beslutsanalysen. En riskanalys kan delas in i följande steg:

- I. Identifiera faror och skadehändelser
- II. Åsätt sannolikheter för dessa faror och skadehändelser
- III. Beskriv möjliga konsekvenser av skadehändelserna med avseende på omfattning och sannolikhet
 - Ta hänsyn till riskbeteende och riskbenägenhet
- IV. Beräkna och beskriv risk

Beslutsmodellen avslutas med att det alternativ som bäst uppfyller beslutskriteriet rekommenderas för val.

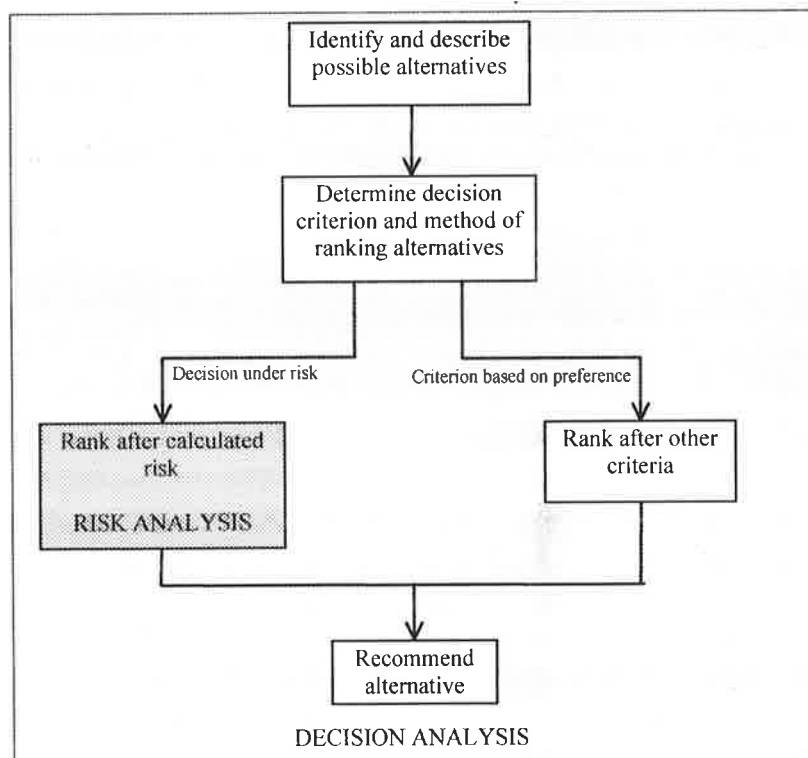
Ett stort antal befintliga riskanalysverktyg kan användas för olika logistiska eller statistiska problem som uppkommer inom ramen för beslutsprocessen. Några av de för undermarksbyggande relevanta verktygen presenteras översiktligt i rapporten. Bland de viktigaste kan räknas; felträd, händelseträd, beslutsträd, MonteCarlo simulering, AHP och kriging. Ett par tillämpningsexempel presenteras för att ytterligare tydliggöra det presenterade beslutssystemet. Vidare skissas de viktigaste områdena för fortsatt forskning och utveckling.

SUMMARY

Engineering science aims at doing things. Hereby you continuously have to make decisions on what to do and usually you cannot predict with absolute certainty what the result of the decision will be. Today, many decisions are made intuitively without analysis of the possible consequences.

As underground construction involves many difficult decisions in different phases of the project you may involuntarily take risks that you really wanted to avoid. On the other hand, over-cautious action may lead to waste of resources in the form of too conservative designs or that a tenderer loses a contract due to his high risk estimates. It is consequently important to balance the risk taking. By applying decision and risk analysis it is possible to improve the determination of uncertainties and risks, which may lead to better decisions.

In this report an integrated system for decision and risk analysis for underground projects is introduced, IDRU. This system involves probabilistic methods and available statistical and risk analysis tools. The main elements in IDRU are shown in the flow chart below.



The first step in the decision process is to clarify exactly which alternatives are possible and acceptable. This phase could be seen as a system analysis, where the different parts of the alternatives and their mutual correlations and interactions are studied. This work involves a lot of engineering skill and engineering experience.

In order to make a decision you need a system to estimate the value of and rank the different decision alternatives, you need decision criteria. The decision criteria are based on the value one allots to different possible outcomes of a certain decision. The second step in the decision analysis is to choose decision criterion. If it is possible to describe the alternatives in terms of probabilities and utility, where the utility may be expressed as a unitary measure (for example money), the decision criterion *expected utility* may be used. Otherwise a criteria based on subjective preferences has to be used.

If an appropriate decision criterion has been selected, the next comprehensive step in the decision analysis commences. This is the evaluation and analysis of alternatives and eventually the ranking of alternatives. If a risk based decision criterion is used this step is the risk analysis. Risk analysis is a systematic identification of hazards and valuation of the risk. The risk analysis can be divided into four steps:

- I. Identification of hazards and accidents
- II. Assessment of probabilities for those hazards/accidents
- III. Description and valuation of consequences
- IV. Calculation of risk

The decision process ends with some sort of basis for decision or recommendation to the decision-maker.

A large amount of risk analysis tools exist today and may be used for different problems encountered during the decision process. Some of the tools relevant for underground construction is presented in this report. Among the most important are; fault tree analysis, event tree analysis, decision tree analysis, MonteCarlo simulation, AHP and kriging.

In the end of the report some illustrative examples are presented in order to clarify the philosophy of IDRU. Finally, the most important areas for further research are presented.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	FÖRORD	2
	SAMMANFATTNING	3
	SUMMARY	5
	INNEHÅLLSFÖRTECKNING	7
1	INLEDNING	10
1.1	Projektbeskrivning och mål	10
1.2	Mål med föreliggande rapport	11
2	DEFINITIONER	12
3	BESLUTS- OCH RISKANALYS FÖR UNDERMARKS- BYGGANDE	14
3.1	Problembeskrivning	14
3.2	Riskanalys	15
3.3	Beslutsteori	15
3.3.1	Klassisk frekventistisk statistik kontra Bayesiansk statistik	16
3.3.2	Begreppet osäkerhet	18
3.3.3	Beslutskriterium	20
3.3.3.1	Beslut under risk, riskbaserat beslutskriterium	20
3.3.3.2	Beslut under osäkerhet samt beslut under ignorans	22
3.4	Beslutssystem presenterade i litteraturen	22
3.4.1	Framework for Hydrogeological Decision Analysis	23
3.4.2	Decision Aids in Tunneling (DAT)	24
3.4.3	Sannolikhetsbaserad modell för bygganalys	25
3.4.4	A Probabilistic Decision Model for Ore Characterization and Mine Planning	27
3.4.5	Project selection considering risk	28
4	BESLUTSPROBLEM, -SITUATIONER OCH RISKER INOM UNDERMARKSBYGGANDET	29
4.1	Kontraktuella risker	29
4.2	Geologiska risker	29
4.2.1	Kända haverier och fördyringar	30
4.2.2	Geologiska faror	31
4.2.2.1	Geologiska byggfaror	32
4.2.3	Skadehändelser/Olyckor	34
4.2.4	Riskobjekt	34
4.2.5	Initierande händelser och utlösande händelser	35
4.2.6	Geologiska risker, några illustrationer	36

4.3	Risikanalys i ett undermarksprojekt - koppling mellan verktyg och problem	37
4.3.1	Identifiering av faror och skadehändelser	38
4.3.2	Åsättande av sannolikheter för identifierade faror och skadehändelser	39
4.3.3	Beskrivning av konsekvenser	40
4.3.4	Att sälla faror och skadehändelser	41
5	RISKANALYSVERKTYG	42
5.1	Inledning	42
5.2	Metoder för att förutse och strukturera faror/skadehändelser samt studera kopplingar mellan olika faror eller händelser	42
5.2.1	Felträdsanalys	43
5.2.2	Rock Engineering Systems (RES)	45
5.3	Metoder för att beskriva konsekvenser och händelseförlopp	46
5.3.1	Händelseträdsanalys	46
5.3.2	Beslutträdsanalys	47
5.4	Metoder för att preferensrangordna olika alternativ	49
5.4.1	Analytic Hierarchy Process	49
5.4.2	Paired Comparisons	51
5.5	Metoder för att beräkna uttryck som innehåller stokastiska variabler	52
5.5.1	Approximativa metoder	52
5.5.2	Successiva metoden	52
5.5.3	Point Estimate Metoden (PEM)	54
5.5.4	β -metoden	54
5.5.5	MonteCarlo simulering	56
5.6	Geostatistiska metoder för att extrapolera från en punkt till en annan	58
5.6.1	Kriging	58
5.7	Övriga statistiska metoder	60
5.7.1	Markovprocesser	60
6	SYNTES OCH SLUTSATSER	62
6.1	Beslutsproblematiken	62
6.2	Integrated Decision and Risk System for Underground Projects, IDRU	63
6.2.1	Identifiering och beskrivning av olika alternativ	65
6.2.2	Beslutskriterier	66
6.2.2.1	Riskbaserat beslutskriterium	66
6.2.2.2	Preferensbaserat beslutskriterium	67
6.2.3	Utvärdering och analys av alternativen - Rangordning av alternativ	67
6.2.3.1	Risikanalys - Rangordning efter beräknad risk	68
6.2.3.2	Rangordning enligt andra beslutskriterier	71

6.2.4	Rekommendation av alternativval	71
6.2.5	Sammanfattning	71
6.3	Tillämpningsexempel, IDRÜ	73
6.3.1	Identifiering av alternativ och möjliga utfall	73
6.3.2	Beslutsriterium och rangordning	73
6.3.3	Risikanalys	75
6.3.3.1	Konsekvenser (kostnader)	75
6.3.3.2	Sannolikheter för olika utfall	75
6.3.3.3	Beräkning av risk och rangordning av alternativ	77
6.3.4	Rekommendation av alternativ	77
7	FORTSATT FORSKNINGSARBETE	80
7.1	Generell förfining av beslutssystemet IDRÜ	80
7.2	Studie av geologiska risker, specifikt med avseende på geologiska anomalier och geometriska gränser	80
7.2.1	Grundproblemet	80
7.2.2	Bergytans variation i olika geologiska miljöer	81
7.2.3	Konsekvenser av liten eller ingen bergtäckning vid tunneldrivning	83
7.2.4	Subjektiva sannolikheter	84
7.2.5	Kontrollfunktionen	85
7.3	Prognosmodeller och bygganalys	85
8	REFERENSER	86

1 INLEDNING

1.1 Projektbeskrivning och mål

Stora undermarksprojekt kännetecknas ofta av att de bedrivs med okända eller dåligt kända förutsättningar. Detta beror framförallt på att jord, berg och vattenförhållanden är komplexa och inhomogena. Arbetenas storlek gör dem ofta svåröverskådliga vilket kan innebära risker vid ett felaktigt handläggande. Det är inte ovanligt att större projekt blir försenade, dyrare eller att andra tekniska lösningar än de projekterade väljs.

Större infrastrukturprojekt såsom tunnlar, broar och järnvägar finansieras mer och mer av privata bolag eller som partnership mellan privata bolag å ena sidan och statliga eller kommunala bolag å den andra sidan. Det är en trend i Sverige och världen mot mer privat finansiering av större infrastrukturprojekt. Förändringen har inneburit ett ökat behov för byggherrar och entreprenörer att kunna bedöma de tekniska och ekonomiska riskerna i projekten.

Vidare innehåller projekten ofta beslutssituationer som styrs av komplexa händelseförlopp och samverkan mellan många tekniska system. Byggandet är inte heller en intern affär mellan de traditionella aktörerna (byggherre, projektör och entreprenör) utan måste integreras med samhället i övrigt samt gällande lagar och normer. Detta innebär dels att beslutsfattandet i sig ofta är svårt och dels att det är svårt att skapa en strukturerad helhetsbild av problemet, vilket är nödvändigt för att ta rätt beslut.

För att underlätta beslutsfattandet och hanteringen av osäkerheter och risker kan besluts- och riskanalys tillämpas. Dessa sannolikhetsbaserade analysmetodiker är en hjälp vid beslutsfattandet eftersom man då tvingas strukturera problemen samt klargöra riskerna och därmed själv kan avgöra om man är villig att ta dem eller ej. Med hjälp av besluts- och riskanalys som omfattar en stringent värdering och analys av till exempel underlagsmaterial, förundersökningsresultat och projektets allmänna förutsättningar kan:

- o Erforderliga kompletteringar i undersökningar och design genomförs, för att på ett säkrare sätt än tidigare göra bättre prognoser.
- o Beslutsfattare, såväl beställare som entreprenörer, erhålla ett beslutsunderlag för säkrare bedömning av projektets tid och kostnad.
- o Ett bättre stöd erhållas vid beslut i byggskedet i samband med "Aktiv design".
- o Ett bättre stöd erhållas vid beslut i samband med underhållsarbeten i äldre tunnlar och berggrum.

Riskanalysen bör även leda till mer optimerad strategi för design och byggnation och utgör samtidigt basen för den kvalitetssäkring och resursplanering som är förutsättningen för framgångsrika undermarksprojekt. Sammantaget bör också ett mer allmänt nyttjande av riskanalys i branschen leda till lägre anläggningskostnader. Riskanalysen kan också utgöra ett underlag vid utarbetande av underhållsstrategier för undermarksanläggningar.

Flera metoder för risk- och beslutsanalys finns idag utvecklade och riskanalyser genomförs i stor omfattning inom flera branscher. Metoderna är emellertid dåligt anpassade för applikation till stora anläggningsarbeten där risker kopplade till de geologiska och hydrologiska förhållandena ofta är de största. Mot den bakgrunden har forskningsprojektet *Teknisk och ekonomisk riskanalys vid stora undermarksprojekt* initierats av avdelningen för jord och bergmekanik vid KTH.

Syftet och målet med projektet är att:

- o Ta fram metoder för att på ett sannolikhetsbaserat sätt behandla geologisk information.
- o Utarbeta metoder för hur stringenta besluts- och riskanalyser anpassade till anläggningsarbeten under mark ska utföras samt skapa underlag för att tillämpa dessa metoder.

För att konkretisera dessa punkter kan man också uttrycka de med hjälp av tre hypotetiska frågor:

- *Hur skall man som byggherre eller entreprenör handskas med geologiska risker?*
- *Vilken indata behövs för att förbättra hanteringen av geologiska risker?*
- *Hur skall ett projekt planeras med hänsyn till olika byggrelaterade risker?*

Målet är att inom ramen för forskningsprojektet försöka besvara dessa frågor.

1.2 Mål med föreliggande rapport

Föreliggande rapport utgör resultatet av en delstudie inom forskningsprojektet. Denna delstudie eller projektdel omfattar dels en beskrivning av befintliga metoder för besluts- och riskanalys och deras tillämpning inom undermarksbyggandet idag, dels förslag till en modell för beslutsanalys för undermarksprojekt. Rapporten fokuserar på besluts- och problemsituationer i huvudsak relaterade till ingenjörsgéologin och behandlar därmed främst geologiska risker.

Målet med delstudien har varit att ge en bild av befintliga analysmetoder framförallt för att forma en grund för vidareutveckling/anpassning av nya. Arbetet har omfattat bland annat litteraturstudier samt diskussion och värdering av olika metoder framförallt genom att använda dem för att behandla olika problemställningar i "skarpa" projekt såsom Ringenprojektet i Stockholm och Äspöprojektet i Oskarshamn.

Vidare har relativt stor vikt lagts på definition av både termer och tillvägagångssätt inom ämnesområdet. Orsaken till detta är dels att tankesättet med probabilistisk besluts- och riskteori är nytt i branschen samt att ingen fullständigt anpassad nomenklatur finns tillgänglig. Ytterligare ett skäl är att det för närvarande råder en viss förvirring inom byggbranschen framförallt vad gäller begreppet riskanalys och dess innebörd. I så hög grad som möjligt följer dock det som presenteras i rapporten internationellt vedertagna riktlinjer och definitioner.

2 DEFINITIONER

Det har känts viktigt att på ett tidigt stadium tydligt definiera de termer som används flitigt då man diskuterar beslutsteori och risker. Flera ord i den vardagliga "riskvokabulären" är lite luddiga och tvetydiga. Eftersom beslutsanalytiker och riskanalytiker själva hävdar sig vara strukturerade, konsekventa och logiskt arbetande är detta möjligen lite förvånande. Det beror nog dels på att risker och optimala beslut kan innebära så mycket och betyda olika saker för olika människor, dels att ämnet spänner över så många discipliner. De definitioner som görs här nedan och som fortsättningsvis används inom föreliggande projekt baseras på definitioner i huvudsak gjorda av ingenjörer för tekniska tillämpningar. Flera viktiga referenser finns i litteraturen, se till exempel, Raiffa (1970), Benjamin & Cornell (1970), Ang & Tang (1984), Räddningsverket (1989) samt Schyllander (1995).

Beslut	Vägval, val av ett alternativ i syfte att uppnå ett visst mål.
Fara	Ett hot om en möjlig olycka. En inbyggd egenskap hos ett riskobjekt. Ofta förknippad med frigörande av energi eller farliga ämnen.
Initierande händelse	Detsamma som utlösande händelse, se nedan.
Konsekvens	Resultatet av en händelse <i>i kvalitativa och/eller kvantitativa termer</i> .
Kriging	Statistisk interpolationsmetod.
Olycka	En plötslig icke önskvärd händelse som innebär skada på personer, egendom eller miljö eller medför störningar i en pågående process.
Osäkerhet	Frånvaro av information.
Probabilistisk	Sannolikhetsbaserad. Med hänsynstagande till stokastiska variabler.
Risk	Risk omfattar konsekvenserna av en olycka och deras sannolikhet. Beroende på användningsområde behöver risken beskrivas mer eller mindre detaljerat. För föreliggande tillämpningsområde är det tillfyllest att beskriva risken som förväntad konsekvens, se vidare Avsnitt 3.3.3.1.
Riskanalys	Riskanalys innebär en systematisk identifiering av faror/skadehändelser och värdering av risken.
Riskobjekt	Ett objekt som innehåller faror som kan förorsaka skadehändelser.
Sannolikhet	En numerisk egenskap hos en händelse som uttrycker troligheten för dess framtida realisering.
Skadehändelse	Synonymt med olycka.

Skadeobjekt	Människor, miljö och egendom som utsätts för verkan av allvarliga skadehändelser.
Subj. sannolikhet	En persons subjektiva grad av tilltro till en realisering av en händelse <i>eller</i> ett sätt att uttrycka en persons uppskattning av hur trolig en viss händelse är med hänsyn till all tillgänglig relevant information.
Stokastiskt	Slumpmässigt. Från grekiskans <i>stochastikos</i> , vilket betyder gissa rätt.
Stringent	Följdriktig, tankestram, klar, skarp, konsekvent.
Säkerhetsanalys	Analogt med riskanalys.
Tillförlitlighet	Förmåga hos ett visst system att fungera.
Utlösande händelse	Den händelse som utlöser ett skadeförlopp.

Framgent i rapporten förklaras många av dessa begrepp mer i detalj vartefter de presenteras. De kommer också att sättas in i ett sammanhang vilket förhoppningsvis underlättar förståelsen och ytterligare klargör definitionerna.

3 BESLUTS- OCH RISKANALYS FÖR UNDERMARKSBYGGGANDE

3.1 Problembeskrivning

Ingenjörskonsten är inriktad på att göra saker, därigenom blir man ständigt tvungen att fatta beslut om vad som skall göras. Vanligen kan man inte med fullständig säkerhet säga vad som blir resultatet av beslutet eftersom det innefattar osäkerheter och risk/chans. Många beslut görs idag intuitivt och utan att de möjliga konsekvenserna är helt analyserade. Eftersom byggprocessen innehåller många beslut i olika skeden är det därför möjligt att man ofrivilligt kommer att ta risker som man egentligen velat undvika. Å andra sidan kan ett alltför försiktigt agerande där man borde tagit risken, leda till att en anbudsgivare inte får en entreprenad eller till resursslöseri genom att man gör överstarka konstruktioner. Det gäller alltså att balansera sitt risktagande och optimera sitt beslut.

För att underlätta beslutsfattandet kan stringent besluts- och riskanalys tillämpas. Dessa analysmetoder är en hjälp vid beslutsfattandet eftersom man då tvingas strukturera sina problem samt klargöra riskerna förknippade med dessa och därmed själv kan avgöra om man är villig att ta dem eller ej. Målet med en stringent besluts- och riskanalys är således att strukturera problemen, klargöra riskerna och rekommendera ett beslut som innebär en minimering av riskerna.

Det framgår snart när man betraktar byggprocessen generellt, och undermarksbyggande specifikt, att riskerna är komplext uppbyggda, det vill säga svåra att tydligt identifiera och kvantifiera, samt att besluten traditionellt fattas baserat på subjektiva bedömningar. Dessa subjektiva bedömningar baseras förvisso ofta på en stor erfarenhet men är ostringenta i det avseendet att ett systematiskt synsätt saknas.

Man kan uttrycka den sammanlagda risken för ett undermarksprojekt som en funktion bestående av ett antal variabler. Dessa variabler bestäms i sin tur ofta av ett antal bivillkor samt är beroende av mängden tillgänglig information, till exempel antalet kärnborrhål i en bergmassa. Det visar sig att denna funktion är för komplex att lösa analytiskt. Istället krävs en numerisk lösning som måste hantera inte bara tekniska parametrar som kan kvantifieras utan även "mjuka" parametrar. Detta innebär att den numeriska lösningen bör bestå av en modell för hur vi löser vårt problem. Denna modell kan i sin tur bestå av:

- o Verktyg för hantering av funktionen (beslutsteori, beslutsträd)
- o Systemanalys, för att se kopplingar mellan olika parametrar och händelser (felträd, händelseträd)
- o Statistisk beskrivning av indata som är behäftade med variation och osäkerhet

Den sista punkten, beskrivning av indata, innehåller problem som kan vara mycket svåra att lösa bland annat därför att alla variabler inte alltid kan uttryckas i monetära termer och för att osäkerheter skall kvantifieras. Vi återkommer till dessa problem senare. Före en mer ingående beskrivning av besluts- och riskanalys för undermarksprojekt specifikt

känns dock en kort presentation av begreppet riskanalys samt en tillbakablick i den sedan länge etablerade klassiska beslutsteorin motiverad.

3.2 Riskanalys

Riskanalys innebär en systematisk identifiering av faror och en värdering av risken. Denna definition är den vedertagna när det gäller tekniska applikationer och används också av Räddningsverket (1989).

När vi i denna rapport framöver talar om risker innebär det också att vi i grunden vill tillämpa ett probabilistisk tillvägagångssätt för att belysa och värdera faror/konsekvenser och i detta sammanhang därigenom optimera beslut. Riskanalysen är enligt detta resonemang en del av beslutsprocessen/beslutsanalysen. En riskanalys kan delas in i följande steg, jfr Rausand (1991):

- I. Identifiera faror och skadehändelser
- II. Åsätt sannolikheter för dessa faror och skadehändelser
- III. Beskriv möjliga konsekvenser av skadehändelserna med avseende på omfattning och sannolikhet
 - Ta hänsyn till riskbeteende och riskbenägenhet
- IV. Beräkna och beskriv risk

I en del litteratur inkluderas punkten riskreduktion i riskanalysen, se exempelvis Hintze (1994) och däri angivna referenser. Författaren har dock sett riskreduktionen ur besluts-perspektivet och behandlar den därmed som ett beslutsalternativ/beslutsproblem. En återkommande fråga (och ett beslutsproblem) i detta sammanhang är "lönar sig en kompletterande grundundersökning?", se Olsson & Stille (1980). Detta är ju ett beslutsproblem; skall en beslutsfattare investera i att skaffa ytterligare information (det vill säga försöka minska osäkerheterna) och därmed reducera risken eller ej.

En mer detaljerad genomgång av termen riskanalys görs längre fram i rapporten, då kommer också de olika delmomenten i riskanalysen att beskrivas och konkretiseras.

3.3 Beslutsteori

Ingenjörrelaterade arbeten är på intet sätt unika i det avseendet att beslut skall tas. Alla människor oavsett yrke eller sysselsättning ställs ideligen inför beslutssituationer, en del lättare men andra mycket svåra. Detta har fört med sig att beslutsteori utvecklats till ett eget akademiskt ämne som dock har nära kontakt med ett stort antal andra vetenskapliga discipliner.

Beslutsteorin har utvecklats under 50 år och har sin grund inom filosofin. Den började på allvar användas inom den tekniska sektorn under 60- och 70-talen, se exempelvis Benjamin & Cornell (1970). Flera olika beslutsmodeller och riktlinjer för beslutsanalyser inom geotekniken har under de senaste åren presenterats i litteraturen,

den kommersiella användningen har dock hittills, enligt vår kännedom, varit begränsad. En grupp på MIT (Massachusetts Institute of Technology) var de första som tog upp kopplingen mellan beslutsanalys och tunnelbyggande, se till exempel Moavenzadeh et al. (1974) och Einstein & Vick (1974). MIT's modell som idag heter DAT (Decision Aids in Tunnelling) kommer att presenteras senare i rapporten.

En beslutsanalys går ut på att skapa ett underlag för att välja det optimala av alla möjliga alternativ det vill säga ta det bästa beslutet. Vilket som är det optimala/bästa beslutet beror dock på vad beslutsfattaren har för kriterium för sitt beslut. Beroende på graden av kunskap/information blir, enligt den klassiska beslutsteorin, olika beslutsriterier tillämpliga. En beslutsfattare som står inför ett beslutsproblem befinner sig inom någon av följande fyra kategorier som återspeglar graden av hans/hennes kunskap/information, Hansson (1991):

Beslut under säkerhet	- Deterministisk information
Beslut under risk	- Fullständig probabilistisk information
Beslut under osäkerhet	- Partiell probabilistisk information
Beslut under ignorans	- Ingen probabilistisk information

För varje av dessa alternativ finns olika beslutsriterier. De flesta beslutsproblem hamnar emellertid i kategorierna beslut under risk eller beslut under osäkerhet, Hansson (1991), varför dessa är mest intressanta att fortsättningsvis studera.

Graden av probabilistisk information är således en viktig faktor inom beslutsteorin. För att komma vidare i diskussionen om hur man skaffar sig probabilistisk information är det nu dags att introducera, beskriva och särskilja de två skolorna inom statistiken, det klassiska *frekventistiska synsättet* och det *Bayesianska synsättet*.

3.3.1 Klassisk frekventistisk statistik kontra Bayesiansk statistik

Det frekventistiska synsättet är uppbyggd kring principen att sannolikheten, $p(A)$, för ett utfall A endast kan bestämmas genom att ett stort antal utfall registreras (prov) varpå den önskade sannolikheten $p(A)$ beräknas som antal utfall A dividerat med samtliga utfall. Sannolikheten definieras som den relativa frekvensen av ett visst utfall då antalet provutfall går mot oändligheten. I den mån en representativ provserie inte finns blir det omöjligt att tala om en relevant sannolikhet. Detta synsätt lämpar sig inte för tekniska applikationer, framförallt undermarksbyggande, där provdata är sällsynta. För undermarksbyggande är det däremot intressant att diskutera det Bayesianska synsättet, Benjamin & Cornell (1970) och Ang & Tang (1984), som framförallt grundar sig på subjektiva sannolikheter.

Bayesianismen bygger på två fundamentala principer:

1. En komplett uppsättning sannolikheter finns alltid. Det vill säga en Bayesian är alltid beredd att uttrycka sin kunskap i sannolikhetstermer.

2. Då ytterligare information blir tillgänglig, till exempel provdata, uppdaterar Bayesianen sina sannolikhetsuppskattningar baserat på hans betingade sannolikheter i enlighet med Bayes' teorem.

Bayes' teorem introducerades av den engelska prästen och matematikern Thomas Bayes (slutet av 1700-t) och uttrycks:

$$P[B_j|A] = \frac{P[A|B_j]P[B_j]}{\sum_{i=1}^n P[A|B_i]P[B_i]} \quad (3.1)$$

där,

$P[B_j|A]$ = å posteriori-sannolikheten för B_j när informationen A tillkommit

$P[A|B_j]$ = sannolikheten för att få informationen A , givet utfallet B_j

$P[B_j]$ = å priori-sannolikheten för B_j

Teoremet kan lite förenklat uttryckas:

$$\text{å posteriori} = \frac{\text{likelihood funktionen} \cdot \text{å priori}}{\text{normaliseringsfaktorn}}$$

Det Bayesianiska synsättet skiljer sig från det klassiska frekventistiska synsättet främst med avseende på att sannolikheter uppskattas subjektivt. De uppskattade sannolikheterna kan vidare ändras (uppdateras) då nya data blir tillgängliga. Dessa viktiga skillnader gör det Bayesianiska synsättet mycket väl lämpat för tekniska applikationer bland annat därför att det blir möjligt att tillgodoräkna sig expertkunskap och erfarenhet vilka ju utgör grundstenar i ingenjörskonsten.

Inom undermarksbyggandet arbetar vi med material som är behäftade med osäkerhet (jord, berg och vatten) och där informationen om materialegenskaper etc alltid är knapp, jämför fåtalsprovning. Det innebär att om vi har möjlighet att tillgodogöra oss subjektiv erfarenhet/kunskap, stödja den med tillgängligt statistiskt underlag samt hantera detta på ett stringent sätt blir det lättare att behandla osäkerheter och ta rätt beslut. Den Bayesianiska statistiken ger oss den möjligheten (till skillnad från den klassiska statistiken). I detta avseende, med det Bayesianiska betraktelsesättet som utgångspunkt, blir det intressant att diskutera tillförlitligheten i expertutsagor och metoder för att på ett stringent sätt åsätta subjektiva sannolikheter. Detta stora och komplicerade område återkommer vi till längre fram i rapporten.

I och med att en Bayesian alltid är beredd att subjektivt uppskatta sannolikheten för en händelse, med andra ord skatta eller kvantifiera osäkerheter, kommer denne att i besluts-situationen alltid att ta beslut under risk (det vill säga med fullständig probabilistisk information). Den i rapporten följande diskussionen om beslutsystem etc baseras följaktligen på beslutsfattande inom denna kategori.

3.3.2 Begreppet osäkerhet

Liksom inom andra vetenskapliga discipliner som handskas med tekniska system och/eller naturen måste man inom geotekniken och bergtekniken kunna hantera de osäkerheter som finns. Detta innebär att beslutsfattandet också måste ske med hänsynstagande till dessa osäkerheter. För att optimera besluten är det således viktigt att förstå och kvantifiera de olika osäkerheterna.

Flera försök att dela in olika osäkerheter i kategorier har gjorts i litteraturen. Språkbruket och definitionerna är dock lite luddiga och svåra att förstå för ”vanliga” ingenjörer. Diskussionen om hur indelningen bör göras tenderar också att bli mycket filosofisk. I denna rapport presenteras därför en relativt rättfram indelning av olika osäkerheter. Denna överensstämmer till sitt innehåll med definitioner gjorda av bland andra Benjamin & Cornell (1970), Ang & Tang (1984), Gilbert & Tang (1995), emellertid har några förenklingar i begreppsnamnen gjorts för att minska sannolikheten för missförstånd i diskussioner mellan ingenjörer och statistiker. Följande osäkerheter kan urskiljas:

1. *Inneboende variation (Inherent variability)*

Den inneboende variationen hos naturen innebär att vi inte exakt kan beskriva den. Man kan inte heller ta bort (eller minska) denna naturliga variation eftersom man då skulle behöva undersöka varje enskild punkt i en massa.

Om man exempelvis visste att bergytan i en granitisk bergmassa var exakt plan, det vill säga utan inneboende variation, skulle man endast utifrån ett begränsat antal prov kunna beskriva den i alla punkter. Eftersom bergytan har en inneboende variation är ju emellertid detta omöjligt. Således behövs verktyg/metoder för att på ett så bra sätt som möjligt beskriva den naturliga variationen.

2. *Modellosäkerhet (Professional uncertainty/Inherent uncertainty)*

Ingenjörskonsten är uppbyggd på användningen av olika modeller (konceptuella, fysikaliska eller matematiska modeller), till exempel för hur grundvattnet transporteras genom en bergmassa. Modellerna är mer eller mindre förenklade redskap för att göra prediktioner om hur naturen kommer att uppträda i framtiden. Det är mycket svårt att skapa en modell som exakt simulerar ett naturligt förlopp, således introduceras modellosäkerhet. Med modellosäkerhet avses modellens oförmåga att göra en exakt prediktion även med tillräckliga och korrekta indata. Denna osäkerhet ligger i modellen och påverkas inte av mängden data.

Vi kan dock ta hänsyn till modellosäkerheten (dvs minska dess inverkan) till exempel genom att införa en modellosäkerhetsfaktor (i princip lika med uppmätt/predikerat beteende). En skattning av denna faktor kan vi få genom att analysera prediktioner och utfall. Modellosäkerhetsfaktorn är i sig en osäker (stokastisk) storhet, men vår osäkerhet om den kan minskas om vi får mer data. Den underliggande modellosäkerheten kan

dock bara minskas med en bättre förståelse och bättre modellering av underliggande fysikaliska principer.

Det är i detta perspektiv viktigt att komma ihåg att en komplex modell inte alltid är bättre än en enkel modell. Ofta kräver en mer komplex modell fler indataparametrar som i sig är svåra att beskriva.

3. Statistisk osäkerhet

Den statistiska osäkerheten uppkommer när vi försöker beskriva en egenskap hos verkligheten i form av någon stokastisk lag, det vill säga en lag som i medeltal beskriver verkligheten korrekt och med minsta möjliga avvikelse. Den statistiska osäkerheten har två komponenter:

o Osäkerhet vid val av statistisk modell

Denna osäkerhet ligger i valet av statistisk modell (skall man till exempel beskriva spricklängder i en bergmassa med en lognormal fördelning eller en negativ exponentiell fördelning). Den kan reduceras genom att man skaffar ytterligare information/data. Detta är den osäkerhet som lite förvillande för ingenjören kallas modellosäkerhet (*model uncertainty*) i litteraturen.

o Osäkerhet vid val av parametrar till statistisk modell

Denna osäkerhet uppkommer då den statistiska modellens parametrar (till exempel medelvärde, standardavvikelse eller varians) skall skattas ur en begränsad mängd data. Följaktligen kan även denna osäkerhet reduceras med mer data. I litteraturen kallas denna osäkerhet för *statistical uncertainty*.

4. Osäkerhet i data och "mjuka data"

Olika typer av mätfel klassas som osäkerhet i data. Ett exempel på systematiskt mätfel är om snickaren vid kapning av regler ovetande råkar använda en avbruten tumstock. Även vissa typer av modellfel (modellosäkerhet, se ovan) kan inrymmas i denna kategori, till exempel skattning av en parameter utifrån mätning av en annan. Schmidt-hammartest används till exempel för att uppskatta bergarters eller betongs hållfasthet. I detta fall mäter man hur en metallstav upphängd i en fjäder efter avfyring återstudsar mot olika typer av material (så kallad rebound) och översätter detta till materialets tryckhållfasthet. Denna översättning är naturligtvis behäftad med osäkerhet.

Metoder att beskriva och hantera osäkerheter finns beskrivna i litteraturen. Den för ingenjörbeslut viktigaste metoden är användandet av Bayesianska fördelningar. Dessa används för att beskriva den totala (sammansatta) variationen hos de stokastiska variablerna, dessutom finns möjligheten att använda sammansatta statistiska modeller, Benjamin & Cornell (1970). Man kan också tänka sig en sammansatt fysikalisk modell där man använder en prediktion som är sammansatt av prediktioner från olika modeller som beskriver samma process. Sammanvägningen av prediktionerna från de olika modellerna kan ske med en faktor som återspeglar (den subjektiva) sannolikheten att just den modellen är bäst i det aktuella fallet.

För att sammanfatta kan vi således konstatera att osäkerheter existerar, även för en Bayesian. Definitionsmässigt, i enlighet med beslutsteorin, är han/hon dock alltid beredd att kvantifiera den. Det innebär att beslutsfattandet sker med fullständig probabilistisk information det vill säga med ett riskbaserat beslutskriterium.

3.3.3 Beslutskriterium

3.3.3.1 Beslut under risk, riskbaserat beslutskriterium

Ett vanligt förekommande beslutskriterium när det gäller beslutsfattande under risk är förväntad nytta $E(u)$, Expected Utility, Raiffa (1970), Benjamin & Cornell (1970) och Hansson (1991). Den förväntade nyttan av ett beslut som omfattar n utfall (som alla beskrivs av en sannolikhet $p_{(x)}$ och en nytta/ konsekvens $u_{(x)}$) tecknas:

$$E(u) = p_1 \cdot u_1 + p_2 \cdot u_2 + \dots + p_n \cdot u_n \quad (3.2)$$

Beslutskriteriet bygger på principen att maximera nyttan, det vill säga beslutsfattaren skall välja det alternativ som ger högst förväntad nytta.

Som diskuterades i Kapitel 2 definierar författaren risk som *förväntad konsekvens* eller tydligare uttryck *förväntad förlust av nytta* vilket baseras på just detta beslutskriterium och det faktum att vi anammar det Bayesianska synsättet. Denna definition av risk är vedertagen inom ingenjörbranschen/teknikvärlden, men det bör emellertid påpekas att andra definitioner förekommer.

Av detta följer också att ordet *risk* i denna strikta mening är missbrukat. I dagligt tal förekommer ordet risk både i betydelsen sannolikhet och i betydelsen konsekvens. Man säger ju exempelvis att "det är stor risk för regn idag", men menar att sannolikheten för regn är stor/större än normalt.

Risk för en enstaka händelse tecknas generellt:

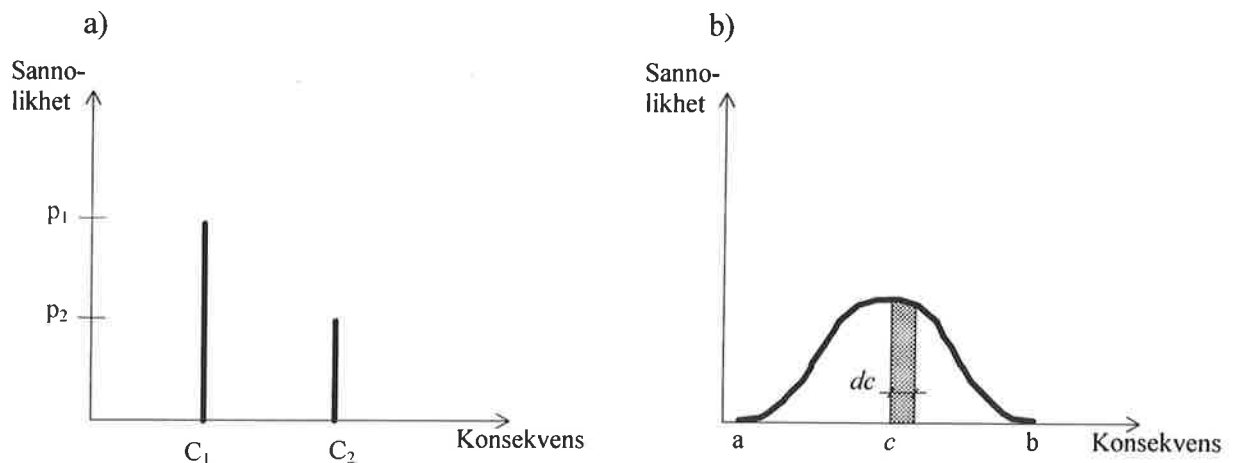
$$RISK = p \cdot C \quad (3.3)$$

där

p = Sannolikhet för en händelse
 C = Konsekvensen av att händelsen inträffar

För två eller flera diskreta utfall som är ömsesidigt uteslutande och uppfyllande utfallsrummet kan risken tecknas som summan av delriskerna, se också Figur 3.1a.

$$RISKEN = p_1 \cdot C_1 + p_2 \cdot C_2 \quad (3.4)$$



Figur 3.1 Schematisk beskrivning av begreppet risk för diskreta och kontinuerliga utfallsrum.

Om man vill beskriva utfallsrummet som en kontinuerlig stokastisk variabel, se Figur 3.1b, följer även här att risken är "summan" av delriskerna enligt:

$$\text{RISKEN} = \int_a^b c \cdot f(c) dc \quad (3.5)$$

där $f(c)dc$ är sannolikheten för ett utfall i intervallet $c - c+dc$. Risk och riskanalys kommer att diskuteras vidare längre fram i rapporten.

En variant på beslutskriteriet förväntad nytta är kriteriet förväntad nytta-varians, se Wirstam (1990). För detta kriterium gäller att välja det alternativ som samtidigt minimerar väntevärdet av kostnaden och variansen av detta:

$$\text{Minimera: } EV + (V(EV) \cdot r) \quad (3.6)$$

där,

EV = väntevärde

V = varians

r = riskaversionsfaktor

Eftersom väntevärdet EV och variansen $V(EV)$ har olika måtetal (om EV anges i kronor anges variansen som kr^2) föreslås här att man väljer det alternativ som ger minimum av väntevärde plus a standardavvikelser:

$$\text{Minimera: } EV + a \cdot \sigma(EV) \quad (3.7)$$

Detta innebär att man i princip jämför kostnaderna vid ungefär samma percentil. Parallellt till detta diskuteras i Avsnitt 6.2.3.1.

3.3.3.2 Beslut under osäkerhet samt beslut under ignorans

Om man inte tillämpar det Bayesianska synsättet kommer man att hamna i situationer då man måste ta beslut under osäkerhet eller ignorans, det vill säga med partiell eller ingen probabilistisk information. En klassisk frekventist hamnar i denna situation om han inte kan stödja sig på en representativ mängd provdata från till exempel ett laboratorieförsök.

En svårighet med samtliga beslutskriterier för beslut under osäkerhet är att man måste ta hänsyn till graden av osäkerhet eller, omvänt, säkerheten i sannolikhetsbedömningarna. Hansson (1991) delar in de metoder som finns för att mäta ofullständigt kända sannolikheter i två grupper; binära metoder ("binary measures", jämför också "interval analysis") och flervärdes metoder ("multivalued measures"). Till flervärdesmetoderna hör till exempel "second order probability" och "fuzzy/rough sets". Metoderna är komplicerade och fortfarande unga och har inte nått full vetenskaplig acceptans.

Det är emellertid möjligt att även dessa metoder får ökad användning inom undermarksbyggande varför det är intressant att följa utvecklingen på detta område. Andersson (1988) och Paek et al. (1993) har till exempel presenterat metoder som bygger på "fuzzy sets" för att genomföra risk- och beslutsanalys för byggindustrin respektive prissätta risker i byggprojekt.

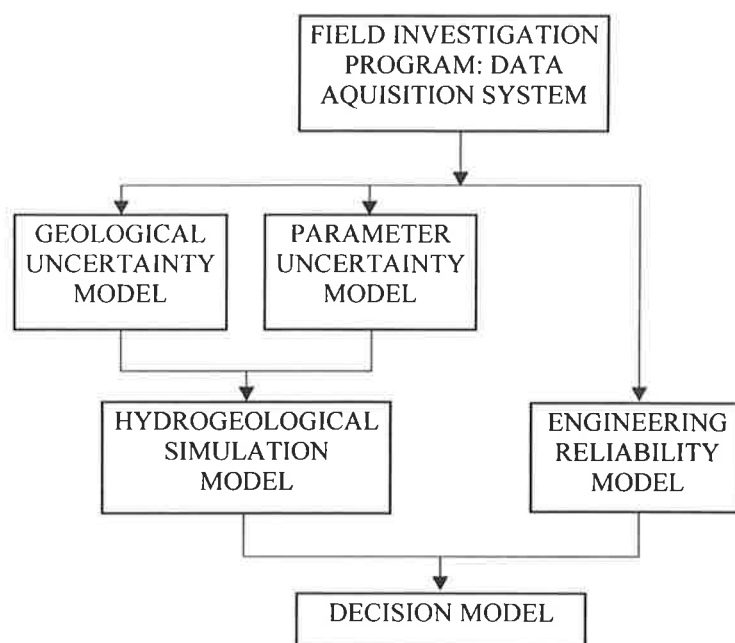
3.4 Beslutssystem presenterade i litteraturen

I detta avsnitt presenteras några beslutssystem som i sin uppbyggnad och innehållsmässigt överensstämmer med författarens uppfattning om hur en modell för undermarksbyggande kan se ut. Ingen av systemen har dock bedömts direkt applicerbar trots att de är generella. Det beror framförallt på att de saknar komponenter som behandlar samtliga frågeställningar som blir aktuella i ett stort anläggningsprojekt. Samtliga presenterade system baseras på beslutsfattande under risk, det vill säga med någon form av nyttofunktion (utility function) i botten. Detta innebär också att det Bayesianska synsättet är tillämbart.

Modellerna presenteras i korthet med syfte att beskriva deras respektive användningsområden och principiella uppbyggnad. Metoderna har inte värderats och den följande beskrivningen gör inte anspråk på att vara heltäckande utan har som mål att ge en vägledande inblick i hur beslutssystem kan vara uppbyggda samt utgöra underlag för den fortsatta diskussionen om beslutsmodeller och beslutssystem. För detaljerade beskrivningar hänvisas till käll-litteraturen.

3.4.1 Framework for Hydrogeological Decision Analysis

En genomarbetad modell (ett system) för beslutanalyser för hydrogeologiska problem har presenterats av Freeze et al. (1990), Massmann et al. (1991), Sperling et al. (1992) och Freeze et al. (1992). Modellen/systemet är framtaget framförallt för att jämföra olika designstrategier för projekt som innehåller hydrogeologiska frågeställningar, till exempel anläggande av deponier för olika avfall i jord och berg. Systemet utgår från byggherrens/ ägarens önskemål och behov. Beslutskriteriet innebär att maximera vinsten alternativt minimera förlusten under livslängden, jämför förväntad nytta. Metodiken utgör en länk mellan det ekonomiska system inom vilket besluten fattas och resultaten av de tekniska analyser som besluten baseras på. Systemet består av sex delmodeller, se Figur 3.2, som alla behandlar olika problem men bygger på en statistisk grundsyn. Inom de olika modellerna presenteras olika befintliga statistiska verktyg för att hantera osäkerheter, till exempel kriging och MonteCarlo simulering (se nedan).



Figur 3.2 Framework for hydrogeological decision analysis, efter Freeze et al. (1990).

Den centrala delen av beslutsmodellen består av en "objective function" som möjliggör jämförelse av olika designalternativ eller byggplatser med avseende på risk, kostnad och intäkter över livslängden. Denna funktion tecknas:

$$\Phi_j = \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+i)^t} [B_j(t) - C_j(t) - R_j(t)] \quad (3.8)$$

där,

$B_j(t)$ = inkomster (benefits) av alternativ j år t
 $C_j(t)$ = kostnader (costs) av alternativ j år t
 $R_j(t)$ = risk för alternativ j år t
 T = tidsspann (normal byggnadslivslängd)
 i = realränta

Detta arbetssätt har tillämpats i några projekt, se bland annat Massmann et al. (1991) och Sperling et al. (1992), och resultaten är positiva. Man har visat dels att beslutsprocessen och osäkerheter tydliggjorts, dels att man kunnat göra kostnadsoptimeringar avseende teknisk design med hänsynstagande till osäkra geologiska och hydrogeologiska förhållanden.

3.4.2 Decision Aids in Tunnelling (DAT)

Som nämnts ovan har beslutssystemet DAT, Einstein et al. (1992) och Einstein (1994), sitt ursprung i Tunnel Cost Model som utvecklades vid MIT under 70-talet. DAT syftar till att hjälpa ingenjören att kvantifiera osäkerheter vid tunnelbyggande, probabilistiskt beräkna projekttid och projektkostnad och därmed underlätta beslutstagande under risk. DAT är utvecklad framförallt för TBM-tunnlar men kan även användas för andra tunnelmetoder. Beslutssystemet består av fem komponenter:

- o Förundersökning (artificiell undersökning)
- o Beskrivning av geologin med en geologisk modell
- o Simulering av tunnelbygget
- o Geologisk uppdatering
- o Projekt- och byggmanagement (rutin för beslutsfattande)

Huvudkomponenterna i DAT är den geologiska modellen, inklusive dess uppdateringsrutin samt simuleringsmodellen.

Den geologiska modellen bygger på Markovprocessen. Tunneln delas in i olika sektioner baserat på olika geologiska parametrar, till exempel litologi, sprickzoner, vatteninflöde etc. För varje parameter uppskattas sedan subjektivt dels medellängden, dels transitionssannolikheten. Exempelvis medellängden för en sektion med granit och sannolikheten att granit ändras till någon annan bergart i en närliggande sektion.

När en geologisk profil tagits fram längs den blivande tunneln sker en simuleringen av tunnelbygget med hjälp av MonteCarlo metoden. Simuleringsmodellen tar hänsyn till olika osäkra parametrar relaterade till TBM-drivningen. Dessa osäkerheter kan uppskattas både subjektivt och objektivt. Efter simuleringen, då både geologiska och byggrelaterade risker behandlats, skapas punktdiagram (scattergrams) över projektkostnad och projekttid som sedan kan ligga till grund för beslut i olika situationer. Det system för beslutsfattande som ingår i DAT baseras på användandet av beslutsträd (se nedan) och beslutskriteriet förväntad nytta.

Med hjälp av Bayesianisk uppdatering kan den geologiska prediktionen uppdateras kontinuerligt när mer data blir tillgängligt, till exempel när en del av tunneln är borrarad. Man kan också med hjälp av subjektiv baserade likelihood funktioner och genom att genomföra artificiella undersökningar bedöma nyttan av information, kanske framförallt tilläggsinformation. Detta är naturligtvis mest värdefullt i tidiga projektskeden.

DAT har tillämpats vid några enstaka verkliga fall, till exempel för Gottard Base Tunnel Project, se Einstein (1992). Några uppgifter om hur detta blivit mottaget av entreprenörer och beställare finns inte presenterat i litteraturen.

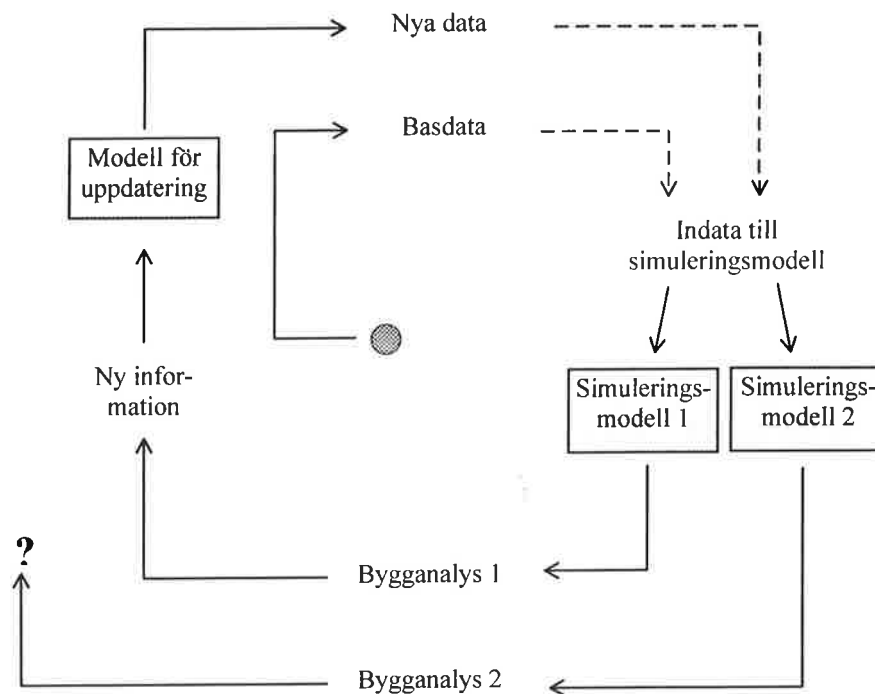
3.4.3 Sannolikhetsbaserad modell för bygganalys

En sannolikhetsbaserad modell för bygganalys som baseras på MonteCarlo simulering har presenterats av Sturk et al. (1994) och Sturk et al. (1996).

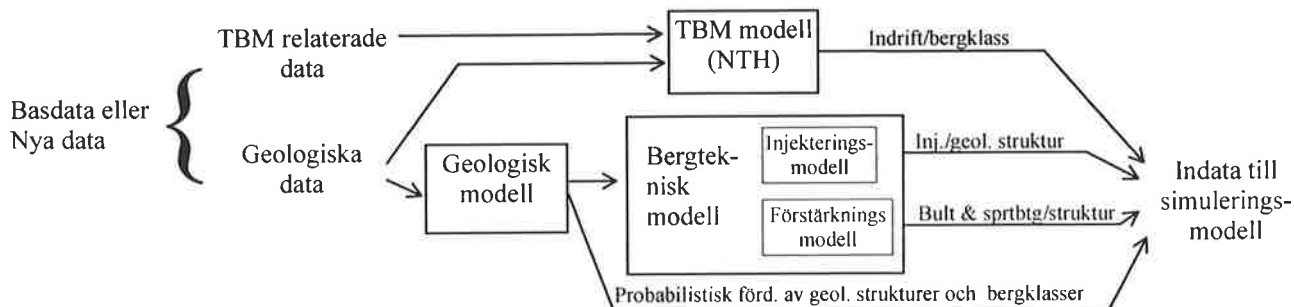
Byggsanalysmodellen är en sannolikhetsbaserad prognosmodell vars resultat kan ligga till grund för beslut i design- och byggskede (den är således inte en renodlad beslutsmodell). Modellen beräknar den förväntade projekttiden samt förväntade mängder av olika byggmaterial, till exempel bergbultar, sprutbetong och injekteringsmedel. Resultaten levereras som sannolikhetsfördelningar ur vilka förväntade värden samt sannolikheter att över- eller underskrida olika gränser kan läsas.

Modellen består av ett antal moduler som alla behandlar stokastiska variabler, det vill säga den tar hänsyn till rådande osäkerheter. Ett av målen med modellen är att uppdatering, enligt Bayes teorem, skall ske då tillkommande information erhålls, därigenom förfinas och förbättras prognosen kontinuerligt.

Modellens principiella uppbyggnad och logistik presenteras i Figur 3.3. Simuleringsmodellen beräknar projekttid och mängder medan uppdateringsmodellen behandlar ny information och uppdaterar stokastiska variabler. För att utföra byggsanalysen krävs olika typer av indata, till exempel information om geologi och projektlogistik. Dessa indata måste bearbetas för att passa simuleringsmodellen, detta görs i en geologisk, en bergteknisk respektive en TBM modell, se Figur 3.4.



Figur 3.3 Flödesschema som visar byggnalysmodellens principiella uppbyggnad. De streckade pilarna refererar till transformeringen av basdata till modell-data, se också Figur 3.4. Uppdatering kan ske en eller flera gånger.



Figur 3.4 Flödesschema som visar koppling mellan modeller för bearbetning av grunddata (basdata eller nya data).

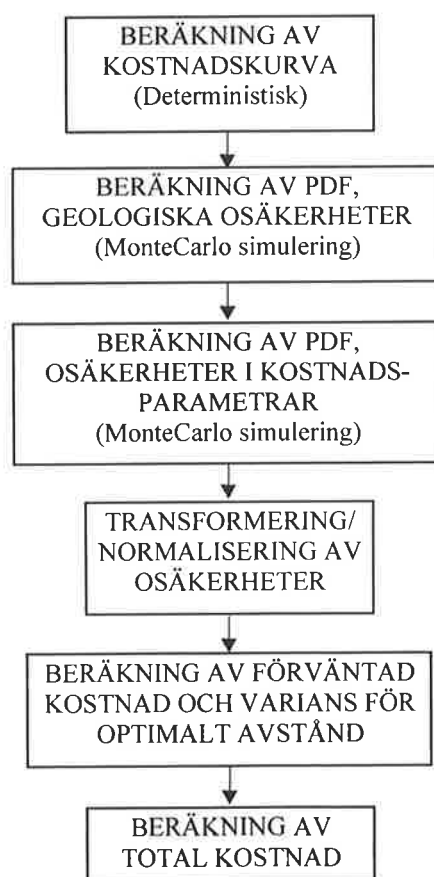
Byggnalysmodellen har tillämpats för att upprätta en byggnalys för en TBM-tunnel på stort djup inom SKB's Äspö-projekt, se Sturk et al. (1996). Slutsatserna från detta projekt visar att modellen är enkel att använda och bör ha potential som alternativ eller komplement till traditionella prognosmodeller. Tillämpningen i Äspö-projektet visade

på svårigheter vid ansättandet av subjektiva sannolikheter och komplexiteten i att uttrycka expertkunnande i statistiska termer.

3.4.4 A Probabilistic Decision Model for Ore Characterization and Mine Planning

Wirstam (1990) presenterar ett beslutssystem för optimal placering av ramper vid igensättningsbrytning i gruvor. Beslutsvariabeln utgörs av kostnaden som beskrivs som en funktion av avståndet mellan rampen och malmen. Beslutsriteriet är förväntat nytta-
varians.

Beslutssystemet omfattar en geologisk del som modellerar malmkroppen och osäkerheter förknippade med denna samt en kostnadsdel som behandlar kostnader förknippade med rampbygge och malmuttag. Genom att kombinera dessa modeller kan optimalt läge av rampen beräknas. MonteCarlo simulering utnyttjas till vissa delberäkningar. Systemet finns tillgängligt som ett datorprogram RAMPSITE™. Beräkningsmodulen i RAMPSITE™ visas i Figur 3.5.



Figur 3.5 Flödesschema som visar beräkningsmodulen i beslutssystemet RAMPSITE™, efter Wirstam (1990).

3.4.5 Project selection considering risk

En beslutsmodell för bedömning av byggprojekt har presenterats av Moselhi & Deb (1993) och baseras även den på nyttoteori. Syftet med modellen är att underlätta för beställare och entreprenörer att välja mellan byggprojekt eller prioritera vissa byggprojekt framför andra med hänsyn till risk. Upphovsmännens intention har varit att skapa en enkel modell som inte kräver omfattande analyser. Arbetet genomförs i sex steg:

- Steg 1: Identifiering av faktorer att beakta (Identification of objectives)
- Steg 2: Beräkning av risk, NPV (Measurement of risk)
- Steg 3: Kvantifiering av subjektiva attribut (Quantification of subjective attributes)
- Steg 4: Bestämning av riskfri ränta (Determination of risk-free interest rate)
- Steg 5: Framtagande av beslutsfattarens nyttofunktioner (Development of the decision maker's utility functions)
- Steg 6: Beräkning av förväntad nytta (Calculation of expected utility)

Eftersom valet mellan olika projekt ofta beror av flera faktorer (till exempel kostnad, antal nya arbetstillfällen, lönsamhet etc) har modellen byggts upp för att kunna beräkna förväntad nytta med hänsyn till samtliga identifierade faktorer. Man åstadkommer detta genom att arbeta med matriser som multipliceras med varandra för att beräkna den totala förväntade nyttan, $E[U]$, för varje individuellt projekt. Den förväntade nyttan definieras som:

$$E[U] = [U] \cdot [V] \cdot [S] \quad (3.9)$$

där,

$[U]$ = en nyttomatrix, "utility matrix", som inkluderar beslutsfattarens nyttofunktion för respektive faktor.

$[V]$ = en matris för de olika faktorerna, "objective matrix", som inkluderar de statistiska parametrarna exempelvis medelvärde och varians för varje faktor.

$[S]$ = en viktningsmatris "scaling matrix", som viktar de olika faktorerna i förhållande till varandra.

Viktningen av olika faktorer bör, enligt upphovsmännens rekommendation, göras med något rankingsystem, till exempel AHP (se Kapitel 5). I enlighet med beslutskriteriet föredras det projekt som ger den största förväntade nyttan. Modellen baseras på det antagande att faktorerna som studeras är oberoende av varandra.

Beslutssystemet är fortfarande ungt och några erfarenheter från praktiska tillämpningar har inte presenterats i litteraturen.

4 **BESLUTSPROBLEM, -SITUATIONER OCH RISKER INOM UNDERMARKSBYGGANDET**

I föregående kapitel har grunderna i besluts- och riskanalys presenterats. För att konkretisera teorierna behövs dock en koppling till verkliga problem. Tidigare har nämnts att det finns riskanalysverktyg som med fördel kan användas för att lösa olika problem som dyker upp i beslutsprocessen. Dessa verktyg kommer att presenteras i Kapitel 5. Före det måste vi emellertid studera de problem och beslutssituationer som är aktuella för stora undermarksprojekt. Målet är ju att på ett bättre sätt handskas med osäkerheter och faror/risker samt mot bakgrund av detta underlätta beslut i olika situationer.

Risk inom undermarksbyggandet är ett mycket vittomfattande begrepp som kan innebära många saker. De olika aktörerna i ett undermarksprojekt, till exempel byggherre, projektör och entreprenör har också olika syn på risker och beaktar olika typer av risker. Det har emellertid visat sig att kontraktuella och geologiska risker spelar en avgörande roll i många fall. Dessa risker berör också ofta, på ett eller annat sätt, samtliga aktörer i ett projekt. En fördjupad diskussion om byggprocessens risker i allmänhet presenteras av Tengborg (1996). I föreliggande rapport belyses kontraktuella risker mycket kort medan geologiska risker ges ett betydligt större utrymme.

4.1 **Kontraktuella risker**

Twister mellan olika parter är tyvärr vanligt förekommande vid undermarksentreprenader både i Sverige och utomlands. Twister uppkommer oftast då kontraktet mellan berörda parter är ofullständigt eller oklart. Bristerna i kontrakt är vanligtvis relaterade till hur avvikelser, till exempel när det gäller geologi, från befintliga handlingar skall behandlas och regleras.

En lustig fotnot i detta sammanhang är att tvister av denna typ kan avspegla det faktum att riskanalyser inte utförts och att därför riskdelningsprinciperna mellan ingående parter ej är klart utsagda i kontrakt. Kontraktuella risker i samband med undermarksprojekt behandlas mer omfattande av Tengborg (1996).

4.2 **Geologiska risker**

De skadehändelser som är förknippade med geologiska risker är ofta mycket komplexa, främst beroende på att jord- och bergmassor i sig är komplexa men också för att materialkännedomen ofta är förhållandevis liten. Denna komplexitet tillsammans med det faktum att det statistiska underlaget (erfarenhet från tidigare händelser) är högst begränsat, leder till svårigheter att åsätta sannolikheter för olika händelser, exempelvis sannolikheten för ett skred eller ett tunnelras. Vidare kan också konsekvenserna (kostnaderna) för dessa händelser vara svåra att bedöma. Det innebär att det kan vara svårt att beräkna geologiska risker.

På grund av komplexiteten i geologiska risker är det inte heller självklart vad som är vad enligt definitionerna som presenterats i Kapitel 2. Det är därför viktigt, vid hanteringen av geologiska risker, att klargöra problemets helhet och på ett riktigt sätt identifiera vad som är fara, skadehändelse/olycka, riskobjekt, initierande händelse samt väsentliga händelser i skadeförloppet innan man inleder riskanalysen.

I detta avsnitt beskrivs de geologiska faror, skadehändelser, riskobjekt och initierande händelser som förekommer i stora undermarksprojekt och som tillsammans innebär risk. En diskussion om på vilket sätt man inkorporerar och behandlar detta i beslutsprocessen/riskanalysen förs sedan i avsnitt 4.3. Inledningsvis görs dock en återblick till en del kända haverier för att få perspektiv på omfattningen av geologiska risker.

4.2.1 Kända haverier och fördyringar

Det är vida känt, inte bara inom branschen, att geologiska risker är stora. Många projekt har tyvärr fått erfara detta. Konsekvensspektrat är också brett, det vill säga mycket kan hända. Allt från kortare driftstopp på grund av mindre ras till att projekten överges. En mycket vanlig konsekvens av geologiska faror är dock att projekt blir dyrare än förväntat på grund av att man ej varit förberedd på problemen. Det är nästan idag snarast undantag än regel att slutkostnaden stannar inom budgetram. Naturligtvis innebär detta good-will förluster för undermarksbranschen och kan leda till att andra lösningar än tunnlar och underjordsanläggningar föredras av politiker och opinion.

I detta avsnitt visas några exempel på projekt som på ett eller annat sätt haft tekniska eller ekonomiska problem till följd av geologiskt betingade haverier. Det bör påpekas att geologiska skadehändelser alltid får större konsekvenser om de inte är förväntade.

Beas-Sutlej Link och Dul Hasti HPP är två projekt i Indien som stött på oväntade problem av mycket stor omfattning, se Malhotra (1985) och Mariotti (1992). Rock burst och flowing ground (se nedan) har orsakat stora förseningar och nödvändiggjort dyra extraordinära insatser. I båda dessa fall har man överaskats av oväntade problem och slutsatsen har varit att förkunskap om förhållandena hade mildrat konsekvenserna. Således kan till exempel olika typ av försonderingar reducera risker.

Bolmentunneln, en lång vattentunnel i södra Sverige, byggdes under senare delen av 1970-talet och början av 1980-talet. Passagen av Hallandsåsens södra randzon, det så kallade Slättsjöområdet, orsakade tekniska problem och tidsfördröjningar. I detta fall orsakade stora inläckage av vatten samt svårigheter med att täta bergmassan problem.

Stora Bält projektet är ett TBM projekt som drabbats av flera stora bakslag, se till exempel Wallis (1993). Problemen började redan innan tunnelarbetena inleddes eftersom leveransen av bormaskinerna försenades, en risk som inte är geologiskt betingad men som inte bör glömmas bort. Vidare råkade man ut för flera tekniska problem med bormaskinerna med långa driftstopp som följd. Kulmen nåddes den 14 oktober 1991 då vad som kallas "the flood" inträffade. Ett allvarligt genombrott av vatten ($4\text{m}^3/\text{s}$) dränkte

helt två tunnelrör och därmed den utrustning som fanns i tunneln. Även detta är ett exempel på när oväntade förhållanden och i detta fall i kombination med orutin/okunskap om geologiska risker, Wallis (1993), orsakar stora skador. Den verkliga kostnaden för dessa problem kanske vi aldrig får reda på, men officiella siffror visar att den ursprungliga budgeten på 3 Miljarder Dkr överskridits med 2 Miljarder Dkr, det vill säga knappt 70%. Projektet var 1993 försenat cirka 2 år.

Tunnlarna genom **Hallandsås** är ett aktuellt exempel på hur geologiska och kontraktuella problem kan orsaka förseningar och fördyringar. I detta fall har man konstaterat att metodvalet (TBM) var fel och att entreprenören missbedömt bergförhållandena, se Strömkvist (1995).

Eurotunnel, ett av de största undermarksprojekt som genomförts, måste betecknas som en stor teknisk framgång, se bland annat Wallis (1994). Ekonomiskt betecknas det däremot mer eller mindre som en katastrof. Stora fördyringar har belastat projektet, se till exempel Vrijling & Redeker (1993). Orsaken till detta kan man bara spekulera i, liksom i möjligheterna att ha undvikit kostnadsöverdrag. Mot bakgrund av den dåliga erfarenhet som finns när det gäller dagens risk- och kostnadshantering för undermarksprojekt är det dock möjligt att en mer stringent hantering av beslut och risker hade mildrat de fördyringar Eurotunnelprojektet drabbats av.

Den lista av projekt som givits ovan omfattar huvudsakligen mycket stora projekt. Det bör dock noteras att frågeställningen är minst lika viktig i mindre projekt. Geologiska faror finns överallt och kan leda till omfattande oönskade konsekvenser även för små projekt. Som nämnts tidigare skall ju användandet av besluts- och riskanalys minimera risker och därmed i slutänden leda till kostnadseffektivisering, någon som är viktigt oavsett projektstorlek.

4.2.2 Geologiska faror

Innan vi går in på geologiska faror i detalj kan det vara bra att repetera en del definitioner, se också Kapitel 2, och introducera ett par nya.

En fara innebär hot om en möjlig skadehändelse/olycka och är en inbyggd egenskap hos ett riskobjekt. Olyckan orsakar skada, det vill säga en oönskad konsekvens. Skadeobjektet är den eller det som råkar ut för skadan. En utlösande händelse initierar ett skadeförlopp.

När det gäller geologiska risker kan jord eller bergmassan sägas utgöra riskobjektet. Tunneln eller byggnaden, eller kanske egentligen tunnelprojektet, är skadeobjekt. Själva byggandet är en möjlig utlösande händelse som initierar ett skadeförlopp. Geologiska faror är hot om skadehändelser/olyckor, förknippade med jord eller bergmassan. Skada är i vårt fall, i vid mening, förlust av resurser.

De geologiska farorna finns således inbyggda i jord- och bergmassan. Det är dock mycket viktigt att poängtera att för undermarksbyggandet utgör de geologiska struk-

turerna eller egenskaperna i sig ingen fara förrän de påverkar de aktiviteter människan utövar, till exempel byggandet av en tunnel. Ett löst block i bergmassan innebär ju ingen fara förrän det befinner sig i tunneltaket.

Definitionen geologiska byggfaror introduceras härmed för de faror som är relaterade till själva byggaktiviteten. Geologiska byggfaror är således mycket viktiga för undermarksbyggandet. Andra rent geologiska faror kan vara till exempel en jordbävning eller en aktiv vulkan. Dessa rent geologiska faror är mindre viktiga för byggandet och behandlas inte närmare i denna rapport.

4.2.2.1 Geologiska byggfaror

En geologisk byggfara är en inbyggd sammansatt egenskap hos riskobjektet. Faran är ofta förknippad med lagrad energi eller farliga ämnen. Följande viktiga geologiska byggfaror kan identifieras. Listan kanske inte är komplett men förhoppningsvis har de för undermarksbyggandet viktigaste farorna kommit med. De klassiska bergmekaniska fenomen som beskrivs nedan definierades av Terzaghi (1946). Önskade skadehändelser (olyckor) som är förknippade med dessa faror beskrivs i Avsnitt 4.2.3.

- o *Vatten*. Vatten i bergmassan definieras som en geologisk byggfara i de fall det finns en stor mängd vatten som kan frigöras och rinna in i tunneln eller om vattenkvaliteten är sådan att vattnet på ett negativt sätt reagerar med tunnelns konstruktionsdelar. Som vi tidigare konstaterat har flera projekt råkat ut för allvarliga skadehändelser/olyckor på grund av vatten. Under en workshop om tunnelbyggande som anordnades av Skanskakoncernen med inbjudna bergexperter och tunnelbyggare från både Europa och USA var man överens om att vatten utgör den största faran för undermarksbyggande, se Nord (1982). Vattnet kan orsaka skada både i sig själv, i kombination med dåligt berg och genom att initiera andra geologiska förlopp till exempel svällning av bergmassan. I dessa fall ingår vattnet som en baskomponent i andra geologiska byggfaror.
- o *Flowing ground*. Flowing ground innebär att berg som uppträder visköst kan strömma in i tunneln. Flowing ground är okonsoliderat berg- eller jordmaterial i kombination med stora vattenflöden. Denna fara är en av de värsta geologiska byggfaror som finns. Flowing ground är ofta kopplat till större förkastnings- och krosszoner i bergmassan. Det finns flera fall beskrivna i litteraturen där hela tunnlar fyllts med visköst material och därmed orsakat både stora materiella och mänskliga skador, se exempelvis Jethwa et al. (1980), Malhotra (1985) och Agib Wassif (1992).
- o *Running ground*. Running ground innebär hot om att okonsoliderat material kommer in i tunneln. Det är en lindrigare form av flowing ground eftersom inget vatten förekommer. Om en tunnel går in i running ground kommer material att strömma in i tunnelfronten och lägga sig i rasvinkeln. Skadeförloppet om running ground realiseras är således avstannande till skillnad från allvarliga fall av flowing ground.
- o *Squeezing ground*. När det omgivande trycket i berget kraftigt överskrider bergmassans hållfasthet kan squeezing ground, instabila förhållanden, uppträda. Deformationerna kan i dessa fall bli stora och pågå under lång tid (krypdeformationer). Hot om squeezing ground förekommer icke sällan vid kraftverksbyggen i Himalaya där

bergtäckningen är stor och bergmassans hållfasthet låg, se till exempel Johansson & Stille (1995) och Dube & Singh (1981). Squeezing ground kan ofta kontrolleras med olika former av förstärkningsåtgärder, dessa åtgärder är emellertid dyra och innebär merkostnader om problemen inträffar utan att man är förberedd på dem.

- o *Spalling rock/Smällberg*. Smällberg kan förekomma främst i spröda bergarter och i tunnlar utsatta för stora bergtryck. Det innebär att bergbitar eller skivor av varierande storlek spjälkas loss i tak eller väggar. Sker losspjälkningen plötsligt förekommer ofta ljud i form av knäppningar eller smällar. De värsta formerna av smällberg, då stora skivor plötsligt spjälkas loss, kan få stora konsekvenser och innebära fara för människoliv. Sker spjälkningen långsamt är konsekvenserna mindre.
- o *Swelling ground*. Byggfaran swelling ground innebär hot om stora deformationer orsakade av svällning. Swelling ground orsakas oftast av svällande lermineral, men även gipsformationer (anhydrit) kan vara svällande. Processen startar när de svällande materialen kommer i kontakt med vatten. Till och med den fuktiga tunnelluften kan innehålla tillräckligt mycket vatten för att initiera svällning. Swelling ground kan förekomma både under tunneldrivning och långt senare i driftskedet. I det senare fallet kan den befintliga förstärkningen tryckas sönder och ras kan initieras. Swelling ground har på detta sätt orsakat ras till exempel i flera skandinaviska vattenkrafttunnlar, se till exempel Heiner & Stille (1990) och Selmer-Olsen & Palmstrøm (1989).
- o *Ravelling ground/Slaking*. Skadehändelsen (=den utlösta byggfaran) ravelling ground innebär en successiv uppluckring av bergmassan. Processen, som kan gå både fort och långsamt, initieras när bergmassan kommer i kontakt med luft och/eller vatten. Likartade problem som vid swelling ground kan uppstå. Ravelling ground leder till att bergmassans stand-up time förkortas.
- o *Lösa block*. Lösa block i bergmassan kan jämföras med en last som hänger i en lyftkran. Detta utgör naturligtvis en fara för personer som befinner sig under lasten. Farans omfattning beror på flera faktorer som till exempel lastens tyngd i förhållande till den mothållande förmågan. Problemet finns i alla typer av bergmassor.
- o *Gas*. Metangas i bergmassan är en fara som definitionsmässigt är något diffusare eftersom den både kan vara en geologisk byggfara och en rent geologisk fara. Författaren kommer dock att betrakta den som en byggfara.
- o *Radon*. Radon utgör på motsvarande sätt en fara i vissa speciella geologier.

Flera av ovanstående geologiska byggfaror är komplexa och i vissa fall även kopplade till vissa geologiska förhållanden. Några viktiga baskomponenter som i olika kombinationer skapar förutsättningar för en geologisk byggfara är:

- o *Höga bergspänningar*. Höga bergspänningar utgör en baskomponent för till exempel spalling och squeezing ground.
- o *Dåligt berg*. Dåligt berg/jord i kombination med vatten innebär till exempel förutsättningar för byggfaran flowing ground.
- o *Vatten*. Som nämnts ovan kan vatten utgöra en baskomponent för faror som swelling ground och ravelling ground.

4.2.3 Skadehändelser/Olyckor

De presenterade geologiska byggfarorna kan ensamma eller tillsammans leda till följande oönskade skadehändelser. Det bör påpekas att skadehändelserna kan ha olika omfattning och därmed innebära varierande konsekvenser. Detta innebär att de är byggobjektrelaterade och bedöms olika från projekt till projekt. Önskade konsekvenser innefattar både ekonomisk förlust samt minskad arbetssäkerhet (jämför riskdefinition).

- o *Stor vatteninströmning.* Problem med stora vatteninströmningar till tunnlar och berggrum kan vara mycket svåra att komma till rätta med. Extrema läckagemängder, med i storleksordningen en eller ett par m³/s, har förekommit i vissa projekt, se bland annat Wallis (1993) och Stattin (1994). Vid sådana flöden krävs extraordinära insatser både vad gäller dränering, pumpning, tätning och förstärkning av tunnlar. Det bör påpekas att betydligt mindre flöden 100-1000 l/min också kan orsaka problem. Problemen accentueras då höga vattentryck, >0,2 MPa, förekommer. I dessa fall kan också stora praktiska problem framförallt med borrhning förekomma. Det finns exempel då borrhstänger eller till och med borrhvagnar kastats tiotals meter bakåt i tunneln och därmed orsakat omfattande skador, se till exempel Garshol (1981).
- o *Tunnelras.* Tunnelras kan orsakas av flera av de ovanstående byggfarorna. Rasen kan naturligtvis ha olika omfattning och medför därmed varierande konsekvenser.
- o *Blocknedfall.* Blocknedfall, som egentligen är ett specialfall av tunnelras, kan naturligtvis förekomma i olika omfattning, från nedfall av mindre stenar till fullständiga blockutfall och kyrkbildningar i tunnel- och berggrumstak. De allvarligaste formerna är skadehändelser som kan få stora konsekvenser.
- o *För liten tunnel.* En skadehändelse som kan orsaka stora problem är att tunnelarean krymper, utan att medföra kollaps, till följd av realisering av byggfarorna squeezing ground och swelling ground.
- o *Olämplig tunnelmiljö.* Olämplig tunnelmiljö är en skadehändelse som kan orsakas av utsläpp av giftiga gaser eller explosioner.
- o *Sättning av marken.* Sättningar kan orsaka skador på exempelvis ovanliggande byggnader

4.2.4 Riskobjekt

Vi har tidigare konstaterat att jord- och bergmassan är riskobjekt som innehåller olika geologiska byggfaror. Dessa faror kan inte realiseras om inte en utlösande händelse sker. Vid undermarksbyggande är tunneluttaget (egentligen jord- eller bergschaktningen) den utlösande händelsen. Det innebär att definitionen av riskobjektet (hela bergmassan) inte är helt relevant eftersom tunneln endast påverkar bergmassan inom ett begränsat område.

Till följd av detta införs en mer specificerad definition av riskobjektet. Riskobjektet med avseende på geologiska risker är således; *jord- och bergmassan inom ett visst influensområde*, eller mer specifikt *det bärande systemet runt tunneln*.

Det bärande systemet runt tunneln utgörs av jord- eller bergmassan. Naturligtvis varierar dess beskaffenhet från att vara kompetent berg, det vill säga ett riskobjekt med mindre faror, till att vara vattenmättad jord, vilket för tunnelbyggande innebär ett riskobjekt med flera faror i en komplex kombination.

Graden av fara för tunnelbyggande beror på den lokala geologin och framförallt geologin i närzonen runt tunneln. Geologiska fenomen så som anomalier i bergmassan är härvid speciellt viktiga att beakta. Anomalier kan utgöra allt från en vattenförande spricka till stora regionala förkastningszoner med dåligt berg.

4.2.5 Initierande händelser och utlösande händelser

Skadehändelser/olyckor inom undermarksbyggande initieras nästan uteslutande av jord- eller bergschaktningen (i vissa områden kan även till exempel jordbävningar initiera skadehändelser). Det finns emellertid saker som medverkar till att utlösa olika skadehändelser. Det kan till exempel vara:

- o *Liten bergtäckning.* Bergtäckningen är självklart kopplad till bergytans variation som är en inbyggd egenskap hos bergmassan. För liten bergtäckning i kombination med bergschakt kan innebära instabilitet i den bärande zonen och leda till allt från mindre ras till hel kollaps av tunneln/bergrummet.
- o *Olämplig/oförsiktig jord- och bergschaktning.* Om till exempel för långa salvor tas ut i en bergmassa med kort stand-up-time kan skadehändelser initieras.
- o *Olämplig/otillräcklig förstärkning.* Kontinuerlig schaktning i kombination med otillräcklig förstärkning av bergmassan närmast tunneln kan givetvis leda till olika skadehändelser.
- o *Vatten.* Vatten kan även i vissa fall definieras som en initierande händelse. Ett exempel är då fuktig tunnelluft orsakar svällning av svällningsbenägna geologiska material (svällera eller anhydrit).

Händelseförloppen före en olycka är således komplexa och det är heller inte säkert att den initierande händelsen och den utlösande händelsen är samma händelse, trots att de definitionsmässigt (se Kapitel 2) är det. Emellan dessa båda kan finnas en tidsrymd som är fylld av olika aktiviteter och händelser som tillsammans leder till att en skadehändelse utlöses. För att kunna undvika skadehändelser är det viktigt att känna till vad som, i kombination med den initierande händelsen, orsakar eller leder till den utlösande händelsen. Flera orsaker kan identifieras:

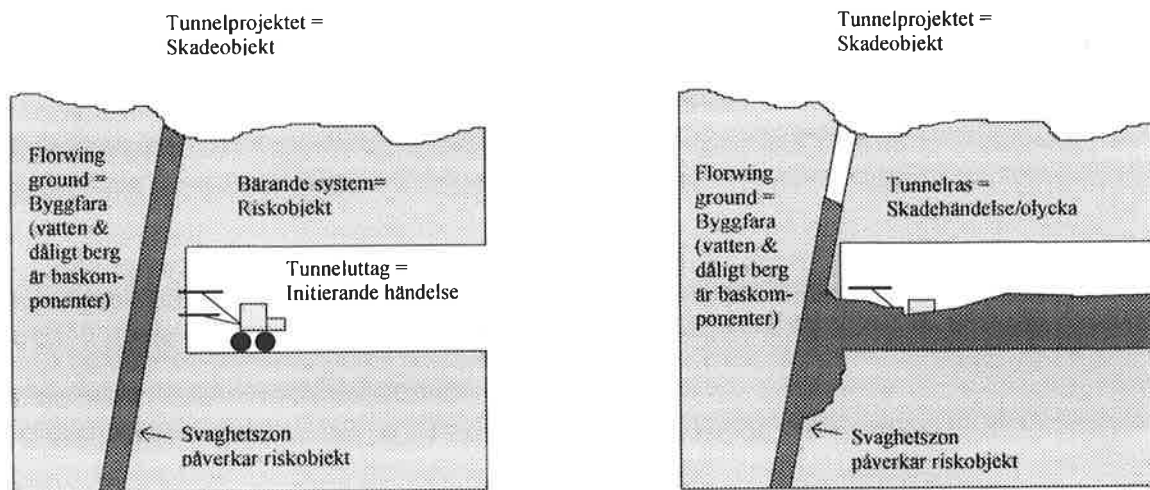
- o *Okunskap.* Okunskap är i denna mening relaterad till vår oförmåga att med fullständig säkerhet prediktera naturliga förlopp. Detta leder till en modellosäkerhet, jfr Avsnitt 3.3.2.
- o *Bristande information.* Bristande information och undermarksbyggande går hand i hand. Naturligtvis kan bristande information orsakas av många faktorer, allt från dålig kommunikation mellan platsledning och tunnelarbetare till statistisk osäkerhet. Som nämnts tidigare kan den statistiska osäkerheten minskas med mer data.

- o *Slarv, förbiseende och okunnighet.* Dessa faktorer är förknippade med det som brukar benämnas den "mänskliga faktorn". När man arbetar med riskanalyser är denna faktor viktig att ta hänsyn till.

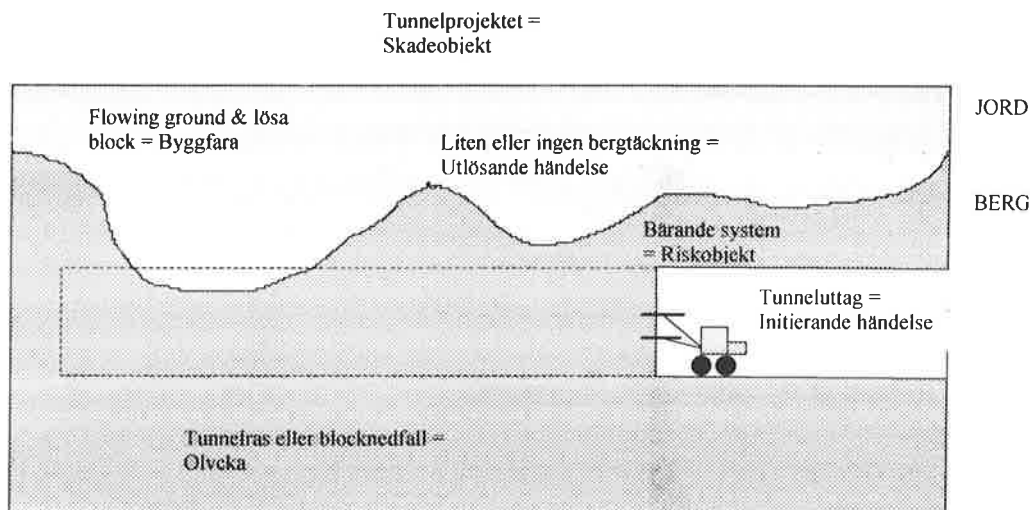
Det är mot bakgrund av ovanstående uppenbart att olika kontrollåtgärder och kvalitets-säkring kan hjälpa till att minska sannolikheten att en utlösande händelse sker. Det är dock bara en del i den stringenta hanteringen av risker som bör ske inom ett undermarksprojekt.

4.2.6 Geologiska risker, några illustrationer

För att illustrera och ytterligare klargöra de olika definitionerna presenteras följande två exempel på geologiska risksituationer. I Figur 4.1 visas ett fall av flowing ground. I Figur 4.2 ett fall där en tunnel skall drivas genom ett område där bergytans variation förorsakar flera problem. Detta är ett exempel där flera faror i kombination kan skapa sammansatta geologiska risker.



Figur 4.1 Tunneldrivning mot en zon med vatten och dåligt berg som resulterar i att byggfaran flowing ground utlöses.



Figur 4.2 Tunneldrivning i område med varierande bergyta och därmed liten eller ingen bergtäckning.

I detta avsnitt har ett försök gjorts att dela in olika, inom undermarksbyggandet och bergmekaniken, kända egenskaper, företeelser och händelser i en strukturerad risknomenklatur. Det skall påpekas att detta är svårt och vissa saker är definitionsmässigt mycket svåra att placera i ett fack. Vissa saker, till exempel vatten (i bergmassan eller tunnelluften), dyker upp som "Svarte Petter" i olika skepnader beroende på situationen. Trots detta är det författarens förhoppning att de definitioner och indelningar som introducerats kan utgöra basen för vidare diskussioner inom ämnet. Som påpekades inledningsvis i detta avsnitt är det viktigt att tydligt klargöra vad man menar med fara, skadehändelse och riskobjekt etc innan man startar sin besluts- och riskanalys.

4.3 Riskanalys i ett undermarksprojekt - koppling mellan verktyg och problem

Vi har nu gått igenom några geologiska byggar/skadehändelser som ofta förekommer i undermarksprojekt, samt vilka konsekvenser de får om de realiserar. Riskanalysen som är en del av beslutsanalysen, se vidare Kapitel 6, går ut på att identifiera och hantera dessa faror och skadehändelser på ett stringent sannolikhetsbaserat sätt. Hur man kan göra detta återstår dock att diskutera. I detta avsnitt görs därför ett försök till att finna en koppling mellan farorna och skadehändelserna (det vill säga problemen) samt de riskanalysverktyg som finns tillgängliga för att behandla problemen. Detta resulterar i en rekommendation om hur en riskanalys för ett undermarksprojekt kan genomföras samt vilka verktyg som är användbara i olika moment. Detta kommer att belysas ytterligare i Kapitel 6 där riskanalysen sätts in i sitt sammanhang inom ramen för beslutsanalysen.

Vi återknyter till den modell för riskanalys som kort introducerats i Kapitel 3. Riskanalysen består av fyra steg; i) identifiering av faror och skadehändelser, ii) åsättande av sannolikheter för faror och skadehändelser, iii) beskrivning av möjliga konsekvenser samt iv) beräkning av risk. En noggrannare beskrivning av momentet beräkning av risk redovisas i Avsnitt 6.2.3.1.

4.3.1 Identifiering av faror och skadehändelser

Det är viktigt att försöka förutse samtliga potentiella faror som kan finnas för ett aktuellt projekt. Det är ofta svårt, och vi vet av erfarenhet att det är det oväntade som alltid ställer till med störst problem. Normalt sett använder vi vår fantasi, expertkunskap och framförallt vår ingenjörsmässighet (ingenjör = från latinska ingenium som betyder talang, snille) för att deterministiskt förutse eventuella faror. Man kan säga att det finns två typer av faror som också kännetecknas av olika sätt att förutse dessa.

Det kan dels föreligga misstankar om projektspecifika byggfaror, till exempel flowing ground. Dessa misstankar kan finnas före en undersökning och kan bekräftas eller förkastas om undersökningen utförs. Den andra typen av faror är mer diffus och dessa brukar man rutinemässigt hantera genom att utföra någon typ av standardundersökning. Vid ett husbygge kan man normalt sett till exempel göra 4 sonderingshål, ett i varje hörn, för att bedöma pållängder. Om inga stora avvikelser från den gängse uppfattningen om hur långa pålarna bör vara i det aktuella fallet föreligger fortsätter man designarbetet och byggandet som planerat. En diffus fara i detta fall är en oväntad svacka i berggrunden, som man inte kunnat förutse med det använda tillvägagångssättet, som kommer att kräva betydligt längre pålar.

Det probabilistiska synsättet kräver emellertid att vi genomför arbetsmomentet med att förutse och identifiera farorna/skadehändelserna mer systematiskt. Genom att använda olika riskanalytiska verktyg kan vi göra detta. Failure Mode Effect Analysis, FMEA och Hazard and Operability Analysis, HAZOP, se exempelvis Rausand (1991), är metoder som används för att identifiera och studera möjliga problem och faror företrädesvis i processsystem, på grund av detta diskuteras dessa metoder ej vidare i denna rapport. En metod som är bättre lämpad för applikationen undermarksbyggande är att inhämta information om möjliga faror från experter, jfr Brain storming (se nedan).

Genom att studera kopplingar mellan olika faror eller skadehändelser kan man förbättra möjligheten att förutse sådana som annars inte varit självklara. Två metoder för att göra detta är felträdsanalys och Rock Engineering System, RES (se nedan). Dessa metoder hjälper också till att få en tydlig bild av helheten vilket ofta är viktigt när man arbetar med komplexa system, som till exempel anläggningsarbeten i berg.

Det kan i detta inledande skede av riskanalysen också tänkas att vissa förutsedda faror eller skadehändelser sällas bort, eftersom de inte är aktuella för projektet i fråga. Sällningen av ointressanta faror är en iterativ process som pågår under hela riskanalysen och med olika urvalskriterier. Sällning av faror diskuteras mer i Avsnitt 4.3.4 nedan.

4.3.2 Åsättande av sannolikheter för identifierade faror och skadehändelser

I steg två i riskanalysen betraktas inte bara en identifierad fara/skadehändelse som möjlig, utan hänsyn måste tas till hur trolig den är. Troligheten kan till exempel mätas i sannolikheterstermer. Således inför vi probabilistiska metoder.

För att kunna bestämma sannolikheter för olika faror och skadehändelser måste vi dock kunna beskriva och förstå dem. Ett viktigt led i detta är att skapa modeller för att beskriva den fysiska verkligheten. Till exempel en modell för hur vatten transporteras i jord eller berg. I detta skede är det viktigt att ta hänsyn till modellosäkerheten, det vill säga ingenjörsvärldens förmåga, eller oförmåga att med olika modeller förutsäga verkligheten/verkliga förlopp.

Som nämnts tidigare kan modellosäkerheten bara minskas med hjälp av bättre modeller och inte med hjälp av mer data. Genom att göra analyser av prediktioner och utfall, det vill säga storheter av typen uppmätt/beräknat kan man tänka sig att kvantifiera modellosäkerheten. Man kan också tänka sig en sammansatt fysikalisk modell där man använder en prediktion som är sammansatt av prediktioner från olika modeller som beskriver samma process. Sammanvägningen av prediktionerna från de olika modellerna kan ske med en faktor som återspeglar (den subjektiva) sannolikheten att just den modellen är bäst i det aktuella fallet.

Om vi har tillförlitliga modeller (där modellosäkerheten är känd) kan vi också stringent, i kvantitativa mått, beskriva de olika farorna, vilket är en förutsättning för att kunna sätta sannolikheter på dem.

Grundstenen i åsättandet av sannolikheter är den Bayesianska filosofin, som bygger på användandet av subjektiva sannolikheter, se Avsnitt 3.3.1. Om man tillämpar det Bayesianska synsättet kan den ingenjörsmässiga deterministiska gissningen ersättas av en erfarenhetsbaserad *a priori* skattning. I husexemplet som presenterats ovan, förslagsvis en skattning av bergytans variation i mellansvensk gnejs. När förundersökningen (jord- och bergsonderingen) utförts kan denna initiella skattning uppdateras, med hjälp av likelihoodfunktionen, och därmed ge en förbättrad bild av den verkliga variationen i bergytan på den aktuella platsen. Detta förfaringsätt skiljer sig kanske inte, vid första anblicken, fundamentalt från det sätt som alltid använts (det deterministiska). Det ger dock den önskade stringensen i hanteringen av data.

Det finns vidare flera verktyg som kan hjälpa oss vid åsättandet av sannolikheter för olika faror/händelser. Exempel på sådana verktyg är kvantitativa felträd och simulering.

Olika geostatistiska metoder används framförallt för att behandla förundersökningsdata. Idag tolkas ofta resultat från förundersökningar helt subjektivt och det blir därmed svårt att värdera informationen. Genom att använda kriging eller Markovprocesser (se Kapitel 5) kan data behandlas probabilistiskt och därmed ökar möjligheterna att på ett stringent sätt värdera informationen och i förlängningen sätta sannolikheter på olika faror. Geostatistiska metoder har flera fördelar framför deterministiska metoder, se bl a Giles (1994). För det första tar de hänsyn till att det finns ett beroende/ en korrelation mellan

datapunkter, för det andra premieras de ”verkliga” datapunkterna, för det tredje kan tillförlitligheten i uppskattningar/prognoser kvantifieras. I och med detta kan olika handlingsalternativ på ett bättre sätt jämföras i beslutsprocessen.

När man arbetar med probabilistiska metoder, som ju är fallet vid åsättandet av sannolikheter för olika faror och skadehändelser, arbetar vi ofta med sannolikhetsfördelningar för olika parametrar. I och med det måste den statistiska osäkerheten beaktas till den del som avser val av statistisk modell. Enklare uttryckt kan man säga att det är viktigt att välja rätt fördelningar och rätt parametrar (till exempel medelvärde och standardavvikelse) för dessa fördelningar. Ett exempel på statistisk osäkerhet är om vi skall använda en negativ exponentiell fördelning eller en lognormal fördelning för sprickavståndet i en bergmassa.

För vissa beslutsalternativ kan riskreducerande åtgärder vara aktuella. Riskreducerande åtgärder går framförallt ut på att försöka minska sannolikheten för en fara eller händelse. Det kan också vara att på ett eller annat sätt mildra konsekvensen. En riskreducerande åtgärd är till exempel att utföra kompletterande undersökningar för att inhämta mer data. Därmed kan den statistiska osäkerheten minskas. Vidare kan man införa olika typer av kontroll. För att kunna kvantifiera nyttan av kontroll är det dock viktigt att tillförlitligheten i kontrollen bestäms. Tillförlitligheten i mänsklig kontroll är ett ämnesområde som för undermarksbyggande är mycket intressant men som tyvärr har behandlats relativt lite, framförallt i det praktiska perspektivet. Inom föreliggande forskningsarbete skall förhoppningsvis detta ämne behandlas mer i detalj, se Kapitel 7.

4.3.3 Beskrivning av konsekvenser

Det tredje steget i riskanalysen omfattar beskrivningen av tänkbara konsekvenser och deras sannolikhet. En viktig del i detta är att förstå och klarlägga olika skadeförlopp. Vad händer till exempel vid ett tunnelras till följd av flowing ground och vad innebär det för tunneln samt för personer och utrustning som befinner sig i den. Det är också viktigt att försöka klarlägga vilka åtgärder som krävs för att återställa efter en olycka, om detta överhuvudtaget är möjligt.

Händelseträdsanalys och ”What if”-analys (se nedan) är etablerade metoder för att strukturera händelseförlopp och skadeförlopp. Dessa metoder kan vara till stor hjälp vid beskrivningen av konsekvenser. Som vid kvalitativ felträdsanalys tvingas man med dessa analysmetoder fundera över olika händelsers samband och kopplingar.

Då man arbetar med ett riskbaserat besluts-kriterium vill man beskriva konsekvenser i monetära termer. Det innebär att alla de händelser som inkluderas i en konsekvens, exempelvis tidsförlängningar, materialåtgång, eventuella personskador och till och med dödsfall måste kvantifieras som en kostnad. För undermarksanläggningar med begränsad livslängd (10-150 år) kan kostnader behandlas enligt LCC-principen, Westin (1989), se vidare Kapitel 6. Det finns naturligtvis svårigheter med att översätta allt till kostnader, framförallt när det gäller mer ”mjuka” delar som värdering av människoskador och dödsfall.

Många faktorer, till exempel en skadehändelses miljöpåverkan eller förlust av good-will till följd av en olycka, kan vara omöjliga eller mycket svåra att uttrycka i monetära termer. I dessa fall måste något annat beslutskriterium användas.

Alternativt kan man med hjälp av rankingsystem, till exempel AHP se Kapitel 5, låta experter jämföra och värdera mjuka faktorer med den ekonomiska faktorn och därmed möjliggöra stringent hantering av samtliga faktorer som påverkar en konsekvens. Detta innebär strikt sett att man för det aktuella beslutsalternativet arbetar med både ett riskbaserat och ett preferensbaserat beslutskriterium.

4.3.4 Att sälla faror och skadehändelser

Faror eller skadehändelser som uppenbart inte är relevanta eller har betydelse för det aktuella projektet bör sällas bort. Kriterierna för denna bortsällning bör upprättas med avseende både på sannolikhet för skadehändelsen och konsekvensen av den. Med andra ord bör extremt lågsannolika skadehändelser eller skadehändelser som innebär marginell konsekvens inte alltid behandlas i riskanalysen.

Sällningen är en iterativ process som kan pågå under hela riskanalysen. En första sällning kan ske redan i steg ett då faror/skadehändelser identifieras, det vill säga innan man åsatt sannolikheter på dem. Denna sällning kan göras därför att vi med normal kunskap kan säga att sannolikheten för en fara är försumbar utan att närmare studera den. Exempelvis sällas faran "allvarlig jordbävning" bort i ett tidigt skede när det gäller undermarksbyggen i Sverige, eftersom sannolikheten för denna fara är extremt låg. I vissa fall är det möjligt att helt eliminera faror. Detta är vanligt i till exempel processindustrin, där man kan byta en process och därigenom helt undvika att använda en viss farlig kemikalie.

I senare skeden kan faror/skadehändelser sällas bort om analysen visat att sannolikheten är extremt låg eller konsekvensen är marginell. Det måste dock bestämt påpekas att mycket lågsannolika händelser som medför stora allvarliga konsekvenser eller omvänt händelser som får små konsekvenser men inträffar ofta kan ibland vara viktiga att behandla i riskanalysen och skall därför inte alltid sällas bort. Denna bedömning måste göras från fall till fall. För att behålla stringensen när man sällar faror och skadehändelser bör man på ett systematiskt sätt värdera dem och inte bara subjektivt ta bort dem man inte tror kommer att påverka. För detta ändamål kan man tänka sig att arbeta med olika expertsystem och rankingsystem till exempel AHP eller Paired Comparisons. Vid en sådan ranking låter man olika experter rangordna olika alternativ med avseende på olika faktorer. De alternativ som rankas lägst, eller i detta fall, de faror som inte bedöms påverka kan sällas bort. Även enklare beslutsträd kan användas för att sälla skadehändelser. I dessa fall måste dock både sannolikheter och konsekvenser vara kända.

5 RISKANALYSVERKTYG

5.1 Inledning

Följande kapitel utgör en sammanställning av de metoder/verktyg som används för besluts- och riskanalys i enlighet med vad som presenterats ovan. Metoderna är på flera sätt mycket olika, vissa är väl etablerade och har använts under många år medan andra är nya och ännu ej fullt utprovade. Några metoder är av övergripande karaktär med målet att lösa eller belysa samtliga problem i en helhet medan andra enbart syftar till att lösa en speciell typ av problem. Ingen av metoderna är idag fullständigt anpassad för användning inom undermarksbyggandet, flera av metoderna är dock utan anpassning användbara för att hjälpa till att underlätta beslutsfattande och klargöra risker vid ett undermarksbygge.

I linje med vad som presenterats i Kapitel 4 delas metoderna in i grupper baserat på vad de används till. Varje metod presenteras kort med avseende på metodbeskrivning, tidigare tillämpningar respektive begränsningar/möjligheter. Sammanställningen gör inget anspråk på att vara fullständig eller heltäckande. De metoder som presenteras är metoder som tidigare använts inom ingenjörskonsten eller enligt författarens mening är användbara för applikation i samband med undermarksbyggande. Beskrivningen av varje metod görs översiktligt, för detaljerade metodbeskrivningar hänvisas till de litteraturreferenser som lämnas.

5.2 Metoder för att förutse och strukturera faror/skadehändelser samt studera kopplingar mellan olika faror eller händelser

Två metoder för att förutse och strukturera faror/skadehändelser samt studera kopplingar mellan olika händelser i ett system presenteras i föreliggande rapport. Metoderna är felträdsanalys och Rock Engineering Systems, RES. Ett felträd är ett logiskt diagram som med en hierarkisk struktur beskriver sambandet mellan flera händelser/faror som kan leda till att ett system eller en systemkomponent falerar. RES är en metod där man gör en tvådimensionell parvis jämförelse av olika parametrar i ett system. Metoden syftar till att studera orsak-verkan samband mellan parametrar och fastställa hur signifikant en parameter är för hela systemet.

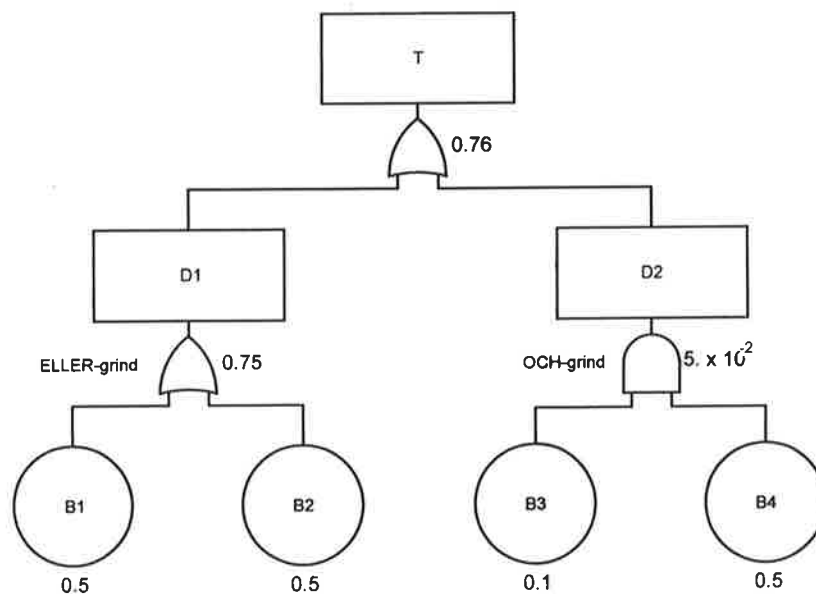
En metodik för att studera hur olika delenheter påverkar varandra och i förlängningen lösa problem, är systemanalys, se till exempel Gustafsson et al. (1982). Systemanalysen är en metodvetenskap för beskrivning, analys och planering av komplexa system. Vid en sådan analys läggs stor vikt på helheten. En grundtanke är att helheten är förmer än summan av sina delar. Hierarkiskt bör systemanalysen vara överordnad felträdsanalys och RES. Systemanalys och helhetstänkande är centrala begrepp inom besluts- och riskanalys.

5.2.1 Felträdsanalys

Beskrivning

Felträdsanalys, se till exempel Ang & Tang (1984) a... änds dels för att strukturera händelser (kvalitativa felträd), och dels för att enklare kunna uppskatta sannolikheten för en komplex händelse (kvantitativa felträd). Felträdsanalyser har använts i stor omfattning i kärnkrafts-, elektronik- och processteknikindustrin.

Ett felträd består av händelser logiskt ordnade i en trädstruktur. En topphändelse delas in i delhändelser i flera steg. Man arbetar således uppifrån och ner, "top down". Metoden illustreras i Figur 5.1 där den komplexa topphändelsen (T) delas upp i delhändelser (D1 och D2) som kan härledas till ett antal bashändelser (B1-B4). Eftersom sannolikheterna för bashändelserna är kända eller enkelt kan uppskattas kan sannolikheten för topphändelsen beräknas genom att sannolikheterna för de underliggande händelserna (D1-B4) passerar olika "grindar". Matematiken i felträdet, det vill säga hur sannolikheten för olika händelser kombineras, baseras på grundläggande sannolikhetslära och Boolsk algebra, se till exempel Blom (1989). Två typer av grindar illustreras i figuren. *OCH*-grinden innebär att både B3 och B4 måste inträffa för att D2 skall inträffa. *ELLER*-grinden innebär till exempel att om minst någon av B1 eller B2 inträffar, inträffar också D1. Varianter på dessa två grindar finns, men för en detaljerad beskrivning hänvisas till käll-litteraturen.



Figur 5.1 Principiell uppbyggnad av ett felträd.

Vid kvantitativ felträdsanalys bör uppdelningen av händelser fortsätta till dess att rena bashändelser identifierats där sannolikheten är känd, till exempel genom statistiskt underlag. Om inte detta är möjligt bör uppdelningen fortgå till dess att en ingenjör är beredd att subjektivt skatta sannolikheten för en outvecklad händelse.

Tidigare tillämpningar

Felträdsanalys utvecklades vid Bell Telephone Laboratories i USA i början av 1960-talet och har sedan dess använts inom flera olika industrigrenar, till exempel för kärnkraftens säkerhetsanalyser. Metoden har stora fördelar när man arbetar med komplicerade omfattande tekniska system. Tillämpningsstudier genomförda av Sveriges Verkstadsindustrier, se Vikman (1993), visar att felträdsanalyser är mycket användbara vid strukturering av problemsituationer för process- och verkstadsindustrin, framförallt i uppstart av nya processer.

Inom undermarksbyggandet tycks användandet av felträdsanalyser hittills varit mycket begränsat, i alla fall mot bakgrund av vad som publicerats om riskanalys i samband med undermarksprojekt. Inom ramen för Ringenprojektet i Stockholm har flera felträdsanalyser genomförts i olika tillämpningar, Olsson & Sturk (1994a och 1994b) samt Johansson et al. (1995). Syftet med dessa analyser har både varit att strukturera och illustrera komplexa förlopp (kvalitativa analyser) samt beräkna sannolikheter för komplexa händelser (kvantitativa analyser).

Begränsningar/Möjligheter

I Sverige är som sagt användandet av felträdsanalyser inom undermarksbyggandet nytt. De analyser som genomförts inom ramen för Ringenprojektet har dock visat att metoden är tillämpbar även då jord- och bergmekaniska problem studeras. Baserat på dessa studier har följande för- och nackdelar identifierats:

- + Ett komplext problem med många händelser som interagerar med varandra kan struktureras så att en helhetsbild erhålls.
- + Trots att exakta sannolikheter (baserade på statistiskt underlag) inte alltid kan åsättas för alla bashändelser kan olika analyserade alternativ jämföras och sannolikheter för topphändelser beräknas. Felträdsanalyser kan således användas för att erhålla indata till besluts- och riskanalyser.
- Ofta åsätts för höga sannolikheter på lågsannolika händelser. Detta måste beaktas vid trädets uppbyggnad eftersom en hög detaljeringsgrad kan leda till en för hög sannolikhet för topphändelsen. Om man gör jämförelser mellan olika träd, bör de ha en jämförbar detaljeringsgrad. Å andra sidan brukar man säga att sannolikheten för topphändelsen underskattas eftersom antalet grenar ofta underskattas.
- Användandet av subjektiva sannolikheter och expertuppskattningar när det gäller geologiska och hydrogeologiska system måste bli mer stringent. Detta är inte ett problem specifikt relaterat till felträdsanalyser men aktualiseras ofta då denna metod används för problem där inget eller begränsat statistiskt underlag finns tillgängligt.
- Modelleringen av trädet kräver insikt både i det specifika problemet och i felträdsanalysmetodik.

5.2.2 Rock Engineering Systems (RES)

Beskrivning

Rock Engineering Systems (RES), Hudson (1992), är en metod med syfte att studera orsak och verkan samband hos de ingående parametrarna i ett system. Metoden har utvecklats för bergmekaniska och bergtekniska problem.

Den viktigaste komponenten i RES är en tvådimensionell interaktionsmatris. De viktigaste variablerna eller parametrarna för det aktuella objektet identifieras och grupperas längs huvuddiagonalen i matrisen, se Figur 5.2. Vanligtvis brukar antalet variabler vara 7-15 stycken.

Variabel A	Interaktion A till B	Interaktion A till C
Interaktion B till A	Variabel B	Interaktion B till C
Interaktion C till A	Interaktion C till B	Variabel C

Figur 5.2 Principiell interaktionsmatris, RES.

När interaktionsmatrisen ställts upp analyseras orsak och verkan för var och en av de möjliga interaktionerna och för att karakterisera styrkan i dessa används olika kodningsmetoder. Kodningen kan göras i olika nivåer, allt från att i det enklaste fallet bestämma om interaktion finns eller ej, via semikvantitativ kodning med hjälp av till exempel en 5-graderad skala (kritisk interaktion - ingen interaktion) till slutna analytiska lösningar för att analysera samband. Det bör påpekas att kodningen huvudsakligen sker baserat på subjektiva bedömningar av experter.

När interaktionen bestämts med hjälp av en skala är det möjligt att fastställa hur signifikant en parameter är för det studerade problemet genom att rader respektive kolumner för varje parameter summeras. En parameters påverkan på alla andra parametrar bestäms via raderna i matrisen, hur en parameter påverkas av andra bestäms via kolumnerna. Det är på detta sätt möjligt att identifiera kritiska parametrar och "pathways" mellan olika mekanismer och därmed i fortsatt analys koncentrera sig på dessa.

Tidigare tillämpningar

I Sverige har RES tillämpats inom SKB's verksamhet, se till exempel Eng et al. (1994) för att studera problem relaterade till deponering av kärnavfall. RES har också tillämpats inom Ringenprojektet, Stephansson & Hudson (1995). Syftet har här dels varit att studera och jämföra metoder för anslutning av Saltsjöns sänktunnel till berg, dels identifiera för dessa arbeten kritiska parametrar.

RES är, till skillnad från de flesta andra häri presenterade riskanalysverktyg, fortfarande en ny metod. Den är således ännu inte fullt förankrad i någon bransch. Inom undermarksbyggandet bedöms dock RES ha en stor potential framförallt för olika analyser och riskbedömningar i tidiga projektskeden.

Begränsningar/Möjligheter

Följande för- och nackdelar kan framhållas:

- + Metoden är bra och översiktlig när det gäller att studera kopplingar mellan ingående variabler i ett berganläggningsprojekt.
- RES är ej ännu färdigutvecklad när det gäller att jämföra olika studerade alternativ och utfallet, det vill säga validering saknas.
- Metoden är endast tvådimensionell.

5.3 Metoder för att beskriva konsekvenser och händelseförlopp

En metod för att beskriva konsekvensspektrum och händelseförlopp är händelseträdsanalys. Ett händelseträd är liksom felträdet ett logiskt diagram som syftar till att beskriva det händelseförlopp som följer på en viss initiell händelse. I motsats till felträdet arbetar man med induktiv logik, ”bottom up”, det vill säga från en specifik händelse till sekvenser av händelser som kan följa på den initiella händelsen.

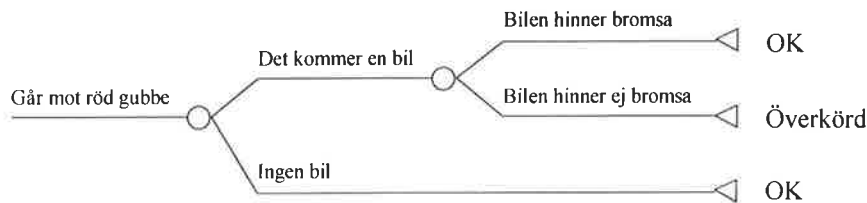
Beslutsträdsanalys är ett komplement till händelseträdsanalys där olika händelsers konsekvensspektra jämförs med varandra.

En annan metod att beskriva konsekvenser och händelseförlopp är ”what-if” analys. Denna analys går i princip ut på att deterministiskt söka svar på frågan; vad händer om A inträffar? En djupare presentation av denna typ av analys görs inte i föreliggande rapport.

5.3.1 Händelseträdsanalys

Beskrivning

Ett händelseträd är ett logiskt diagram som visar möjliga händelser som följer av en inledande kritisk händelse. Ett händelseträd byggs ut från vänster till höger, se Figur 5.3, med grenar av typen ja-nej. Den händelse som vill studeras, till exempel ett fel i en teknisk enhet eller en mänsklig felhandling, betraktas som en initierande händelse som leder till ett visst förlopp till exempel ett skadeförlopp. Händelseträdsanalysen är ett användbart redskap när det gäller att strukturera just skadeförlopp och hur olika händelser och utfall är kopplade till varandra, se vidare Rausand (1991). Händelseträdsanalys kan göras kvalitativ och kvantitativ. Kvantifieringen sker genom att sannolikheter för olika händelser åsätts, på detta sätt kan riskprofiler för specifika händelser ställas upp. Händelseträdet ingår ofta som en del i ett beslutsträd, se också Avsnitt 5.3.2.



Figur 5.3 Principiellt händelseträd för händelsen; fotgängare går mot rött ljus utan att se sig för. Ringar = utfallsnoder, trekantar = slutnoder.

Tidigare tillämpningar

Liksom felträdsanalys har händelseträdsanalys använts i begränsat omfattning inom undermarksbyggandet. Inom beslutssystemet DAT, se ovan, ingår händelseträd som en del av systemet. Eftersom DAT inte fått riktigt genomslag i branschen finns mycket lite erfarenheter av systemet presenterat i litteraturen. Inom ramen för Ringenprojektet har händelseträdsanalys använts för att studera konsekvenser av olika utfall och händelser, se Johansson et al. (1995).

Begränsningar/Möjligheter

Händelseträdsanalysen bedöms ha en stor potential för att beskriva skadeförlopp i samband med undermarksarbeten, till exempel hur flowing ground påverkar tunnelprojektet och vilka förlopp man kan vänta sig efter en viss initierande händelse.

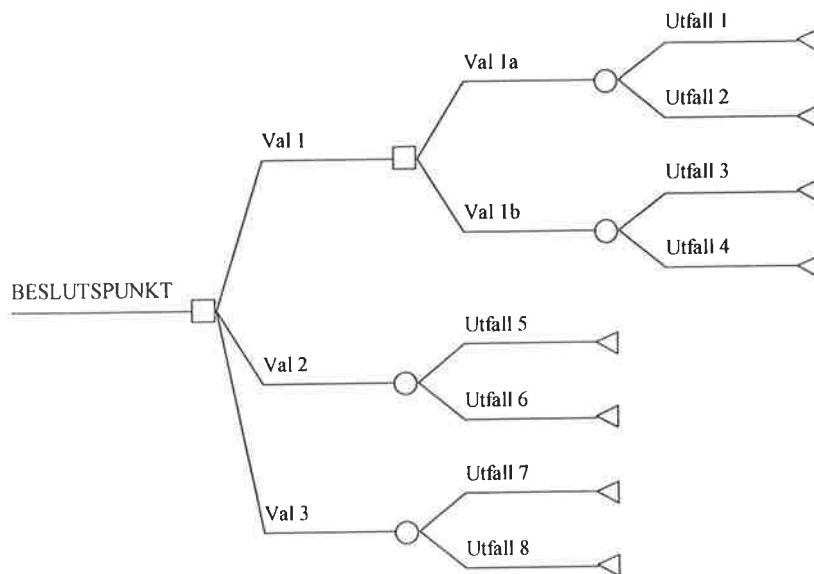
- + Med hjälp av händelseträdsanalys kan händelseförlopp och utfall kvantifieras.
- + Metoden är enkel att förstå och hantera.
- Vid stora komplexa problem innebär trädstrukturen att metoden kan bli oöverskådlig.

5.3.2 Beslutsträdsanalys

Beskrivning

Beslutsanalys med beslutsträd har beskrivits av bland andra Benjamin & Cornell (1970) och Ang & Tang (1984). Vid beslutsanalys med hjälp av beslutsträd struktureras problemet i första hand med hjälp av en trädstruktur på samma sätt som för händelseträdet. Ett beslutsträd innehåller både beslutsnoder (fykanter) och utfallsnoder (ringar). Vid beslutsnoderna finns möjligheten att välja mellan två eller flera alternativ, beslutsfattaren kan följaktligen påverka utfallet. Vid utfallsnoderna grenar trädet i olika händelser som inträffar slumpmässigt, beslutsfattaren kan i detta fall inte påverka utfallet, jämför händelseträd.

För varje gren definieras en nytta eller en kostnad, för utfallen definieras också en sannolikhet. Sannolikheten för händelser vid samma utfallsnod måste ha summan 1. För varje slutnod, det vill säga varje gren i trädet, beräknas sedan en förväntad nytta eller en förväntad totalkostnad. Som beslutsalternativ väljs ofta att det beslut som ger den högsta förväntade nyttan eller den lägsta förväntade totalkostnaden är det bästa beslutet, det vill säga ett riskbaserat beslutsalternativ. I Figur 5.4 visas ett principiellt beslutsträd, se också Kapitel 6.



Figur 5.4 Principiellt beslutsträd. Fyrkanter = beslutsnoder, ringar = utfallsnoder och trekanter = slutnoder.

Tidigare tillämpningar

Beslutsträdanalys är en väl etablerad metod inom många branscher, även inom byggindustrin generellt, se till exempel Benjamin & Cornell (1970) och Jaselskis & Russel (1992). Tillämpningar inom geotekniken och undermarksbyggandet har förekommit men är relativt begränsat framförallt i Sverige. En del arbeten har dock presenterats, se Einstein et al. (1977), Einstein & Baecher (1993), Olsson & Stille (1980) och Freeze et al. (1992).

Inom Ringenprojektet har beslutsanalys baserad på användningen av beslutsträd använts för att rekommendera beslut av "bästa" konstruktiva utformning av tunnlar, se Johansson et al. (1995).

Begränsningar/Möjligheter

Flera fördelar med beslutsträd kan identifieras. Potentialen för metoden inom undermarksbyggandet bedöms som mycket stor. Beslutsträdanalys kan användas för att

behandla beslutsproblem på alla nivåer, från projektövergripande beslut till beslut om detaljer i utförande eller design. Som med alla metoder är det viktigt att poängtera att beslutsträdet endast är ett hjälpmedel för att underlätta beslutsfattandet. Det slutliga beslutet kan inte tas av ett verktyg utan måste tas av en människa, en beslutsfattare.

- + Metoden är med tillgänglig programvara enkel att utföra och resultaten är lätta att förstå.
- + Den grafiska presentationen av beslutsalternativ i en trädstruktur är tydlig och översiktlig.
- + Stabiliteten i resultaten kan kontrolleras med hjälp av sensitivitetsanalyser.
- Vid komplexa beslutsproblem blir träden stora och därför oöverskådliga.

5.4 Metoder för att preferensrangordna olika alternativ

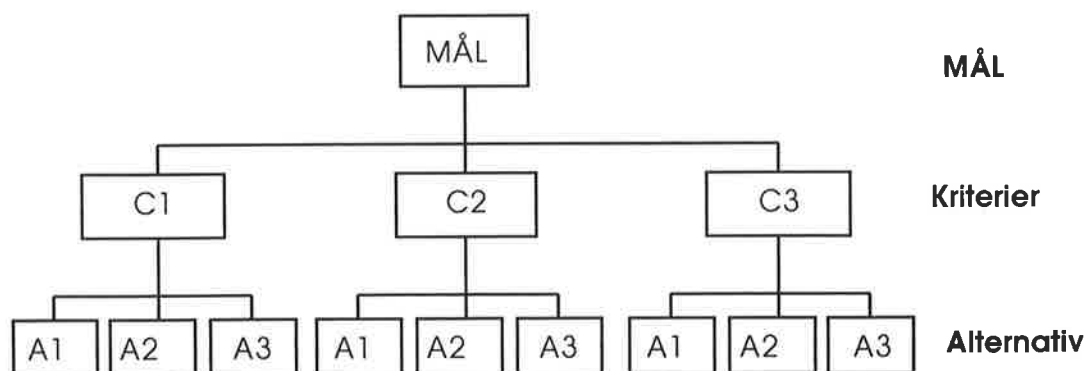
5.4.1 Analytic Hierarchy Process

Beskrivning

En rankingmetod som använts till exempel inom geotekniken är Analytic Hierarchy Process, AHP, se till exempel Olsson & Sandstedt (1992). Metoden går ut på att rangordna olika alternativ på ett sätt som tar hänsyn till beslutsfattarens preferenser genom ett viktningssystem. Ett stort beslutsproblem måste brytas ner i mindre, överskådliga och gripbara delar. I AHP görs därför dels en problemstrukturering, dels en jämförelse parvis och slutligen en utvärdering.

*Problemstrukturer*ing

Principen för struktureringen är att man ställer upp problemet i en hierarkisk struktur. Överst finns det mål man vill uppnå, och under det följer en nivå med de kriterier som ingår i målet och som påverkar valet. Varje kriterium kan sedan vara uppdelat i underkriterier och så vidare. På detta sätt får man en struktur med element på olika nivåer som ser ut som ett upp och nervänt träd. Längst ut på varje gren finns de handlingsalternativ man skall välja mellan för att på bästa sätt nå det uppställda målet, se Figur 5.5.



Figur 5.5 Baselement i en hierarkisk struktur.

Parvis jämförelse

När problemet har strukturerats hierarkiskt enligt ovan kan jämförelsen göras. Principen är att man för varje nivå gör en jämförelse av kriterierna (alternativen) med avseende på hur väsentliga de är för att ett element på nästa högre nivå. Detta underlättar jämförelsen eftersom den avser en begränsad del av hela problemet. Man får alltså en serie av parvisa jämförelser som sedan kan kombineras.

Vid jämförelsen använder man en niogradig skala som kan uttryckas verbalt eller numeriskt. Skalan återges i Tabell 5.1 i ursprunglig form, Saaty (1988).

Tabell 5.1 Numerisk och verbal skala för att jämföra alternativ i en AHP-analys. Ursprunglig form efter Saaty (1988).

NUMERICAL SCALE	VERBAL SCALE
1,0	Equal importance of both elements
3,0	Moderate importance of one element over another
5,0	Strong importance of one element over another
7,0	Very strong importance of one element over another
9,0	Extreme importance of one element over another

Utvärdering

När samtliga parvisa jämförelser är gjorda görs en sammanvägning. Den görs normalt med dator och ger som resultat en viktad rangordning av alternativen.

Tidigare tillämpningar

AHP-ranking har i Sverige använts för geotekniska problem, se till exempel Hintze (1994), Olsson & Sandstedt (1992) och Fredriksson et al. (1994). Metoden bedöms vara mycket användbar i tillämpningen undermarksbyggande. Metoden kan med fördel användas i olika skeden av beslutsanalysen. Inom Ringenprojektet har AHP-ranking använts i kombination med felträdsanalys för val av optimal tunneldrivningsmetod. AHP-rankingen användes som en första sällning av möjliga alternativ, varefter en mer detaljerad felträdsanalys utfördes på de högst rankade alternativen (metoderna), se Fredriksson et al. (1994) och Olsson & Sturk (1994)

I fall då rangordning på preferensbasis skall göras, då inte risken kan uttryckas i monetära termer, är metoden mycket bra. Det är också möjligt att kombinera en rangordning efter beräknad risk med en preferensrangordning med AHP-metoden. I detta fall betraktas kostnaden som en av alla andra parametrar.

Begränsningar/Möjligheter

Följande för- och nackdelar har identifierats vid användning av metoden inom geotekniska och bergrelaterade tillämpningar:

- + AHP-metodens styrka ligger i den hierarkiska problemstrukturering som görs. Härigenom tappas inte de väsentliga faktorerna bort eftersom de kommer högt upp i trädet innan det har hunnit växa ut.
- + Den parvisa jämförelsen, som ju görs på varje nivå och med avseende endast på nästa högre nivå, gör att man inte behöver beakta hela problemet på en gång när man skall kvantifiera sina preferenser.
- + Utvärderingen är lätt eftersom den görs med dator (PC). Om det endast är en enda expert kan den göras interaktivt med datorn.
- Nackdelen är att rankingmetoder är helt subjektiva. Problem kan därför uppstå när det gäller vem som är den egentliga beslutsfattaren. Om kvantifiering av utfall och sannolikheter kan göras är därför beslutsträd att föredra.

5.4.2 Paired Comparisons

Beskrivning

Metoden Paired Comparisons, se till exempel Kirwan (1994), har sitt ursprung inom psykologin. Metoden bygger på det faktum att det är lättare för människor (i detta fall experter) att jämföra olika alternativ med varandra än att göra absoluta uttalanden om de olika alternativen. Till exempel är det lättare att konstatera att en bilolycka är mer sannolik än en tågolycka än att säga att en bilolycka händer x gånger/minut och en tågolycka y gånger/månad.

Paired Comparisons går ut på att preferensrangordna olika alternativ/händelser genom att låta experter jämföra alternativen/händelserna parvis på ett systematiskt sätt. Varje expert jämför alla möjliga kombinationer av händelser och bestämmer för varje fall vilken händelse som är troligast. För n händelser gör experten $n(n-1)/2$ jämförelser.

När man efter detta inledande steg kombinerar resultat från olika experter kan en relativ rangordning av händelserna/alternativen göras. Genom att använda en logaritmisk kalibreringskvation, som kräver att sannolikheten för minst två av händelserna är kända, kan sedan sannolikheten för samtliga händelser bestämmas.

Tidigare tillämpningar

Metoden är etablerad i många branscher och har även använts för undermarksrelaterade problemställningar. I en inledande säkerhetsstudie för inklädda gaslager genomfördes en Paired Comparison för att identifiera och rangordna olika haverifall, Ahlgren & Karlsson (1992).

Metoden bedöms ha stor potential för undermarksbyggande, framförallt då värdering av mjuka parametrar blir nödvändig, jämför AHP. Metodens styrka ligger för applikationen undermarksbyggande i att olika alternativ, händelser eller faror på ett enkelt sätt kan rangordnas. Bestämningen av sannolikheter utifrån kalibrering kan vara bra men behöver inte alltid vara ett mål med analys av denna typ.

Begränsningar/Möjligheter

Följande för- och nackdelar med metoden Paired Comparisons kan identifieras:

- + Metoden möjliggör en sammanvägning av expertkunskap på ett enkelt och snabbt sätt.
- + Med hjälp av kalibrering kan en mängd händelser rangordnas och ges sannolikheter trots att endast sannolikheten för två av händelserna är kända på förhand.
- + Paired Comparisons kan även utan kalibrering användas för att inbördes rangordna olika faror och händelser.
- Metoden förutsätter att faktorer som jämförs är oberoende av varandra. Om rangordningen gäller komplexa parametrar kan det också vara svårt att göra en enkel jämförelse.
- Om antalet jämförelser blir stort kan det vara svårt för experten att hålla en konsistent värderingsgrund genom hela analysen.
- Metoden kräver utfrågning av ett relativt stort antal experter.
- Det är inte alltid enkelt att finna de rätta experterna för komplexa sammansatta problemställningar som kräver en helhetssyn. Experter tenderar att övervärdera faror och problem inom sina egna ämnesområden.

5.5 Metoder för att beräkna uttryck som innehåller stokastiska variabler

Inom geostatistiken kommer man oundvikligen i den situation att man måste lösa uttryck som innehåller stokastiska variabler och där man också vill att svaret skall utgöras av en stokastisk variabel. I vissa fall är analytiska lösningar på detta problem möjliga. Analytiska metoder har dock så stora begränsningar varför det har utvecklats metoder som kan hantera både komplexare uttryck och stokastiska variabler. Några av dessa metoder presenteras nedan.

5.5.1 Approximativa metoder

Med hjälp av Taylor utveckling, se till exempel Ang & Tang (1975) eller Harr (1987) kan man göra approximativa uppskattningar av väntevärde och standardavvikelse för en funktion som innehåller variabler där motsvarande moment är kända. Detta kallas mer populärt för "first-order second moment" metoder. Taylorutvecklingen möjliggör också behandling av tredje och fjärde momenten, så kallade second order metoder, dessa blir dock komplicerade och har begränsad potential framförallt därför att det finns enklare och bättre metoder.

5.5.2 Successiva metoden

Beskrivning

Successiva metoden är i grunden en tillämpad approximativ metod för att beräkna funktioner med stokastiska variabler, Honoré & Lichtenberg (1978) samt Möller & Ögård

(1983). Metoden har utvecklats för kalkylering av kostnader och tider i byggprojekt. Arbetsgången för successiv kalkylering kan beskrivas i 6 steg:

1. Objektet delas in i ca 5-15 oberoende huvudposter.
2. För varje post anges ett troligt värde samt förväntad spridning (ett tal för osäkerheten) för kostnaden eller tiden.
3. Posten med det största osäkerhetstalet identifieras. Denna har störst inflytande på totalens säkerhet.
4. Osäkerheten i den identifierade posten förbättras genom att posten ytterligare delas upp i delposter.
5. Proceduren fortsätter från punkt 2 tills totalens osäkerhet (uttryckt som summan av alla delposters osäkerhetstal) är tillfredsställande eller inte kan minskas ytterligare vid den aktuella tidpunkten.
6. Resultatet av ett korrekt genomförande är en god bild av den totala kostnaden och dess spridning.

Metoden baseras på att ingående variabler beskrivs med den så kallade Erlangfördelningen. Erlangfördelningen, som är ett specialfall av gamma, beskrivs av två parametrar, en formfaktor (k) och en lägesfaktor (μ).

Som indata vid successiv kalkylering anges tre värden; min, max och troligaste värde.

Genom beräkning av enskilda elements prioritetstal bestäms deras relativa inflytande på den totala osäkerheten. De mest osäkra posterna kan sedan delas upp i delposter, alternativt säkrare information införskaffas, så att totalens osäkerhet successivt kan minskas och de olika delposterna få samma relativa inflytande, se sexstegs-programmet ovan.

Tidigare tillämpningar

Successiva metoden är flitigt använd i ursprungslandet Danmark, Honoré & Lichtenberg (1978), men även i andra länder, bland annat Sverige. Exempel på projekt där metoden använts är Stora Bält projektet, gasolterminalen i Karlshamn (bergrum) samt vid utbyggnaden av stora delar av det Svenska naturgasnätet.

Begränsningar/Möjligheter

Följande för- och nackdelar är förknippade med successiva metoden.

- + Det successiva förfaringssättet ger dels en god bild av helheten samtidigt som man på ett strukturerat sätt penetrerar olika delposter och analyserar deras inflytande på helheten.
- + Osäkerhetstal på enskilda poster, såväl som på totalsumman i en kalkyl erhålls.
- + Metoden ger en total överblick över osäkerheterna och därmed riskerna.
- Det är svårt att subjektivt åsätta sannolikheter och värdera osäkerheter. Detta problem återkommer alltid då ingenjörskunnande skall översättas till statistiska termer.
- Metoden utnyttjar i sin nuvarande form endast Erlangfördelningen.

- Metoden förutsätter att totalkostnaden beskrivs som en normalfördelning. För att normalfördelning skall gälla krävs ett stort antal delposter.
- Viss osäkerhet kan orsakas av icke oberoende variabler.

5.5.3 Point Estimate Metoden (PEM)

Beskrivning

Point Estimate Metoden presenterades först av Rosenbleuth (1975), se även Sällfors (1990). Metoden går i korthet ut på att genom att känna 2, 3 eller 4 av momenten medelvärde, varians (standardavvikelse), skevhet och toppighet för en variabel x , kan motsvarande moment för funktionen $y = f(x)$ beräknas.

Den matematiska hanteringen av problemet är enkel så länge funktionen innehåller ett måttligt antal variabler. Om många variabler (antalet variabler = n) ingår blir antalet nödvändiga beräkningar mycket stort. Detta beror på att man beräknar 2^n kombinationer av det så kallade funktionsvärdet. Om en funktion innehåller 10 variabler innebär detta att 2^{10} beräkningar måste utföras, det vill säga 1024 stycken.

Eftersom antalet variabler ofta är stort när det gäller ”tekniska” problem, inser man att PEM i sin ursprungliga form har vissa begränsningar. Harr (1989) har dock visat att man, utan att påtagligt försämra noggrannheten, kan minska antalet beräkningar till $2 \cdot n$ vilket avsevärt förbättrar metodens möjligheter inom ingenjörskonsten.

Begränsningar/Möjligheter

Metoden har kort sammanfattat följande för- och nackdelar:

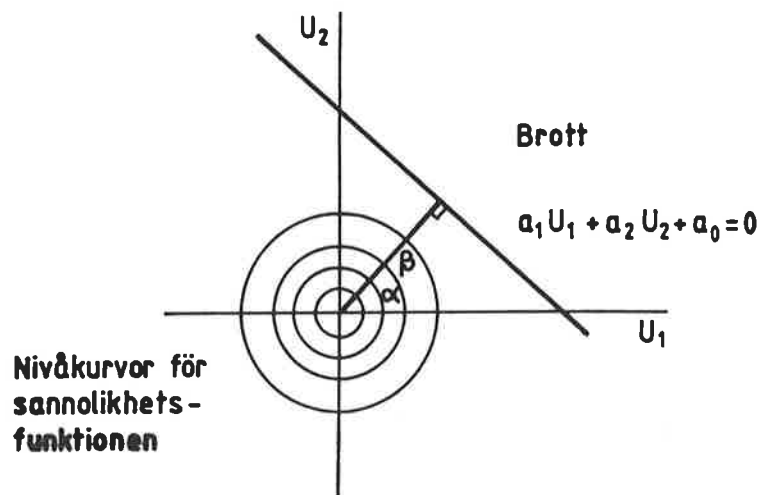
- + PEM är en relativt enkel metod med hög noggrannhet.
- + Metoden är lämpad för analys av många variabler.
- Fördelningsinformationen försvinner vid analysen.

5.5.4 β -metoden

Beskrivning

Om man vill undersöka en konstruktions beräkningsmässiga tillförlitlighet (säkerhet) kan man, istället för att använda sig av en säkerhetsfaktor, undersöka hur troligt det är att konstruktionen skall överksrida en matematiskt formulerad gräns som används som skiljelinje mellan acceptabelt tillstånd och brott. β -metoden går i korthet ut på detta, se vidare Olsson (1986) och däri angivna referenser.

Hur troligt det är att gränsen överskrids anges med ett avståndsmått β , som talar om hur långt det är till ”brottgränsen” från den punkt som anger det troligaste värdet på de osäkra storheterna, se Figur 5.6. β -metoden använder medelvärde och varians, det vill säga andra ordningens moment, för att beskriva ingående parametrars osäkerhet.



Figur 5.6 Principiell grund för β -metoden, efter Olsson (1986). α är riktningscosinen och kallas ofta sensitivitetsfaktorn.

För att man skall kunna använda β -metoden på ett problem krävs:

- o att man kan formulera det matematiska uttryck som anger gränsen till brott,
- o att man kan beskriva graden av osäkerhet i de osäkra storheterna genom att ange dem som stokastiska variabler.

Tidigare tillämpningar

β -metoden är en väl etablerad metod framförallt inom området byggnadsstatik men även inom geotekniken. Metoden har till exempel använts mycket inom offshorebranschen.

Begränsningar/Möjligheter

Följande för- och nackdelar är förknippade med β -metoden. β -metoden:

- + kan hantera många variabler.
- + är snabb och har en hög noggrannhet.
- + är väl utvecklad när det gäller programvara och teorier.
- kräver datorstöd.
- innebär att fördelningsinformationen försvinner.

5.5.5 MonteCarlo simulering

Beskrivning

Simulering är en numerisk metod för att lösa uttryck som innehåller stokastiska variabler. En vanlig metod är den så kallade MonteCarlo metoden, se Benjamin & Cornell (1970). Monte Carlo simulering utvecklades under andra världskriget för att primärt utföra operationsanalyser inom försvarsområdet.

Ett krav för att använda simulering är att man kan teckna ett deterministiskt samband mellan alla ingående variabler. De indatavariabler som är stokastiska kan beskrivas med sina sannolikhetstäthetsfördelningar (eller fördelningsfunktioner). Man kan sedan slumpvis plocka utfall från dessa fördelningar, där utfallen blir en funktion av fördelningsfunktionen för variabeln. Man gör ett stort antal deterministiska beräkningar, där man som indata använder sådana slumpvisa utfall (för varje beräkning görs en ny slumpning). Varje sådan beräkning kan ses som ett stickprov av den sökta stokastiska variabeln.

På detta sätt fås ett stort antal stickprov, som kan återges i form av ett histogram och där man med vanliga statistiska metoder kan bestämma statistiska parametrar som medelvärde och standardavvikelse.

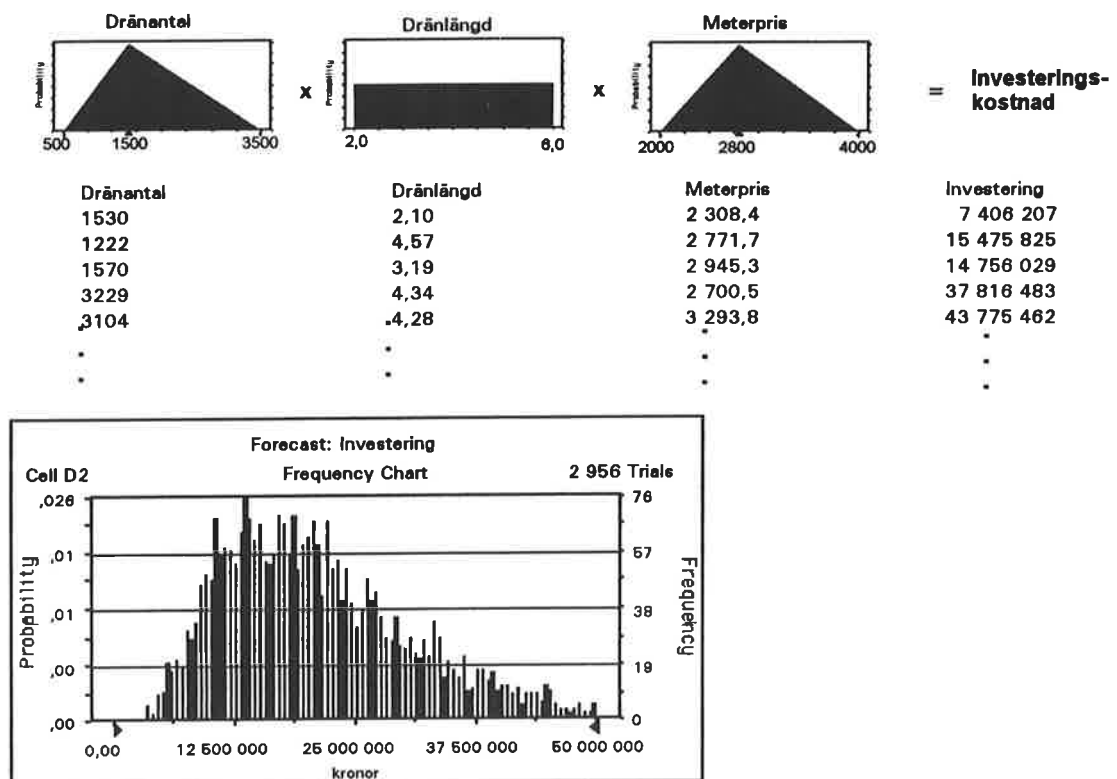
Nedan visas en enkel simulering där investeringskostnaden (byggkostnaden) för insprutade väggdräner för tunnlar beräknas som produkten av dränantalet, dränlängden och kostnaden per meter för dränerna. De antaganden som gjorts om de ingående variablerna visas som deras sannolikhetstäthetsfördelningar.

För de första fem beräkningsomgångarna visas samtliga utfall från de ingående variablerna samt det beräknade resultatet i Figur 5.7. Dessutom visas i histogramform resultatet från en beräkning med cirka 3000 utfall. Utseendet hos histogrammet pekar på att resultatet är log-normal fördelat.

Tidigare tillämpningar

MonteCarlo metoden är en känd och etablerad metod som används för många tillämpningar när det gäller geotekniska och geologiska problem.

Arbete inom ramen för SKB:s verksamhet vid Äspölaboratoriet har visat att metoden med fördel kan användas för att genomföra sannolikhetsbaserade byggbarhetsanalyser och andra typer av prognoser för undermarksbyggande, se exempelvis Sturk et al. (1994).



Figur 5.7 MonteCarlo simulering av kostnad för insprutade dräner i bergtunnlar.

Begränsningar/Möjligheter

Följande värdering av metoden har gjorts mot bakgrund av de erfarenheter som erhållits från hittills utförda projekt:

- + Simulering är ett kraftfullt verktyg för att lösa problem som innehåller funktioner av stokastiska variabler. Metoden är ingenjörsmässig och lätt att använda.
- + Tillgänglig programvara finns som typen tillägg till kalkylprogram, vilket gör att programmeringen är enkel.
- + Fördelningsinformationen försvinner inte på samma sätt som vid till exempel PEM eller β .
- Metoden är dataintensiv, och komplicerade beräkningar kan ta relativt lång tid, också på snabba persondatorer.
- Om man vill ha en precis beskrivning av små sannolikheter, det vill säga i fördelningens svansar, krävs ett mycket stort antal simuleringar (tumregel för en sannolikhet på 10^{-4} krävs 10^5 simuleringar osv).

5.6 Geostatistiska metoder för att extrapolera från en punkt till en annan

5.6.1 Kriging

Beskrivning

Kriging, döpt efter den Sydafrikanske föregångsmannen gruvingenjören D. G. Krige, är en geostatistisk interpolationsmetod för data med rymdkorrelation. Basdata i krigingprocessen utgörs av vad som kallas semi-variogram, se till exempel Matheron (1963), Isaaks & Srivastava (1989) eller Giles (1994). Ett semi-variogram beskriver rymdkorrelationen mellan punkter som en funktion av punkternas inbördes läge:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (5.1)$$

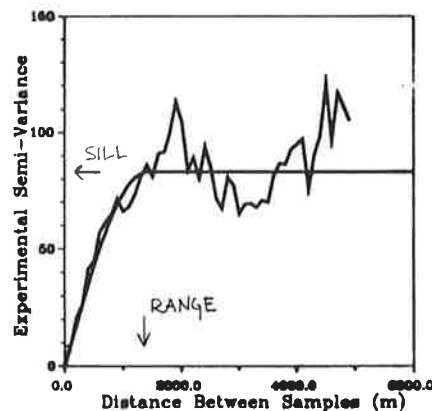
där,

$\gamma(h)$ = semi-variansen

$Z(x)$ = Egenskapen i punkten som funktion av punktens läge

h = avstånd (lag) mellan punkter (ofta vektor)

Det innebär att utgående från en viss datapunkt kan man genom variogrammet uttala sig om sannolikheten att en punkt intill den ursprungliga punkten har liknande egenskaper. Nära den ursprungliga punkten är naturligtvis sannolikheten för lika egenskaper störst (semi-variansen är liten), men ju längre ifrån den ursprungliga punkten man förflyttar sig minskar den (semi-variansen ökar). Ett principellt teoretiskt semi-variogram, sfärisk modell, visas i Figur 5.8. På ett visst avstånd från den ursprungliga punkten ökar inte semi-variansen ytterligare, detta avstånd kallas "range". Semi-variansen i denna punkt kallas "sill".



Figur 5.8 Principiellt variogram, sfärisk modell.

Kriging är en metod att få fram bästa möjliga skattning av den aktuella egenskapen i en punkt (eller över en yta eller volym) genom linjär kombination av observerade data, "Best Linear Unbiased Estimate". Krigingekvationerna använder parametrarna i semi-variogrammet för att utföra interpolationer mellan de observerade datapunkterna.

Kriging fungerar principellt som vanliga interpolationsmetoder som använder någon form av viktning. Emellertid är krigingprocessen mycket mer komplex då man tar hänsyn till alla kända punkter och dessa viktas med avseende på korrelationen till den punkt man vill interpolera till.

En annan stor fördel med kriging är att, om man känner fördelningen hos den observerade egenskapen (ofta antas normalfördelning eller lognormalfördelning), varje punkt som interpoleras fram får ett felvärde, en standardavvikelse. Tillförlitligheten i en interpolerad punkt beror inte bara på hur långt den ligger ifrån de kända punkterna utan också på hur långt de kända punkterna ligger från varandra. Eftersom man får ett mått på hur tillförlitliga de interpolerade punkterna är (med hjälp av standardavvikelsen) kan man bedöma den statistiska osäkerheten över den krigade ytan. I beräkningen av standardavvikelsen ingår endast punkternas läge och data från semi-variogrammet. Detta innebär att man kan bestämma nyttan av att skaffa mer information, eftersom resultatet från ytterligare provpunkter inte behövs för en skattning av osäkerheten.

Flera mer sofistikerade former av kriging har utvecklats för att handskas med olika typer av problem. Exempel på sådana är; Universal kriging, Co-kriging och Indikator kriging, Giles (1994).

Tidigare tillämpningar

Kriging är ett redskap som använts mycket inom både geotekniken och mineralindustrin och måste anses etablerat i ingenjörsmässiga tillämpningar, se till exempel McCracken et al. (1994) och Sperling et al. (1992). Kriging kan användas som alternativ överallt där någon vanlig interpolationsmetod används idag. Flera potentiella tillämpningar finns för undermarksbyggandet. Det kanske mest intressanta är för att beskriva olika geometriska gränser, till exempel bergytans variation som ju påverkar undermarksbyggande i hög grad.

Andersson et al. (1984) presenterar en fallstudie från kvarteret Hästen i Stockholm. I studien demonstreras nyttan av att på förhand kunna bedöma hur bra en med kriging skattad bergyta överensstämmer med den verkliga. För detta fall visas att skattningen av bergytans variation, inom ett område av ca 5000 m², blir drastiskt bättre om man utnyttjar tio sonderingsborrningar i stället för fyra, men också att det är onödigt att göra fler borrningar än tio. Detta innebär således ett svar på den återkommande frågan "lönar sig mer grundundersökningar?".

Inom ramen för Ringenprojektet har kriging utförts just för att bestämma bergytans variation i områden där tunnlarna kommer att ha liten eller ingen bergtäckning, se Johansson et al. (1996). Metoden fungerar utmärkt i denna tillämpning. Mer forskning när det gäller bergytans variation i olika bergarter och geologiska miljöer krävs dock för att kunna konstruera tillförlitliga variogram.

Begränsningar/Möjligheter

Som nämnts är potentialen för användandet av kriging i undermarksbyggandet mycket stor. Följande för och nackdelar kan identifieras:

- + Flera kommersiella dataprogram finns på marknaden. Dessa är billiga och användarvänliga.
- Kriging kräver semi-variogram som indata. Eftersom naturen är komplex betyder det att det ibland kan vara svårt att beskriva den med hjälp av semi-variogram. Databanker med variogram som beskriver förhållanden i jord- och bergmassan finns inte i tillräcklig omfattning. Forskning och datainsamling krävs inom detta område.

5.7 Övriga statistiska metoder

5.7.1 Markovprocesser

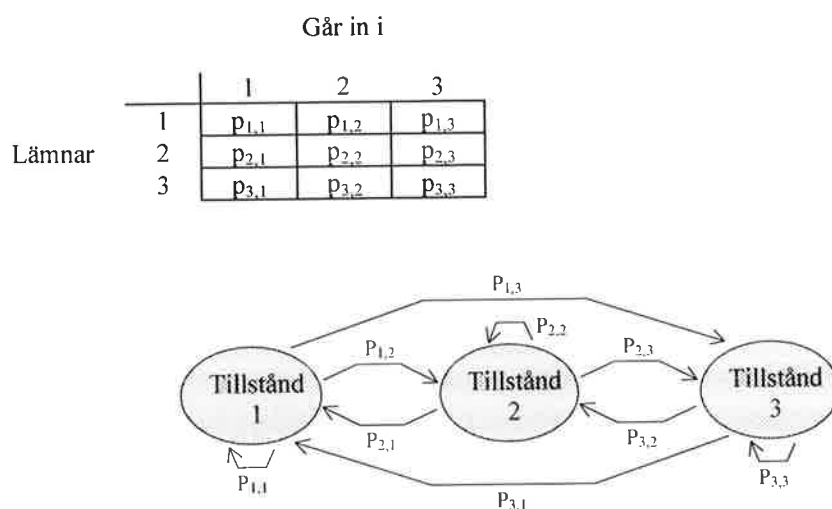
Beskrivning

I ett system ändras ofta tillståndet hos någon parameter som en funktion av tiden eller av plats i rummet. Om sannolikheten att gå från ett nuvarande tillstånd till ett annat är oberoende av hur processen kommit till det nuvarande tillståndet saknar processen minne. En sådan process kallas Markovprocess.

$$P[X(n+1) = x_{n+1} | X(n) = x_n] \quad (5.2)$$

Uttrycket 5.2 visar sannolikheten att nästa värde (tillstånd) av processen $X(n+1)$ blir x_{n+1} givet att det nuvarande värdet (tillståndet) $X(n)$ är x_n . Denna sannolikhet kallas transitionssannolikheten, Benjamin & Cornell (1970).

I ett system med flera tillstånd kan sannolikheten för att egenskapen skall ändras beskrivas med en transitionsmatris, se Figur 5.9. För varje tillstånd hos variabeln beskriver transitionsmatrisen sannolikheten att tillståndet skall ändras till något av de andra (eller stanna kvar).



Figur 5.9 Transitionsmatris för tre tillstånd samt exempel på interaktion.

Med hjälp av Markovprocesser kan följande viktiga frågor besvaras:

- o Givet att en process för tillfället befinner sig i ett visst tillstånd vad är sannolikheten att den n steg från nu hamnar i ett annat tillstånd?
- o Vad är sannolikhetsfördelningen för tid till ett oacceptabelt tillstånd?

Tidigare tillämpningar

Analys med Markovprocesser är en etablerad och flitigt använd metod inom flera tillämpningsområden, även ingenjörsgelogiska. Rosén (1995) presenterar en geostatistisk metod som bygger på Markovkedjor och Bayesiansk statistik för att uppskatta hydrogeologiska egenskaper. Den geologiska modellen i DAT, Einstein (1994), bygger också på Markovprocesser, se även Avsnitt 3.4.2.

Begränsningar/Möjligheter

Markovprocesser är mycket användbara för vissa tillämpningar inom undermarksbyggandet till exempel när det gäller geologi, geohydrologi, underhåll och kontroll. En nackdel med metoden är att den förutsätter en minneslös process.

6 SYNTES OCH SLUTSATSER

6.1 Beslutsproblematiken

I de föregående kapitlen har olika delar och i viss mån detaljer i beslutsprocessen diskuterats. För att återfå en helhetsbild följer här en kort diskussion om grundproblemet, det vill säga beslutsfattandet. Några tydliga beslutsfrågor som återkommer i undermarksprojekt är till exempel:

- o Vilken av två alternativa uttagsmetoder skall vi välja, om sannolikheten för flowing ground är 1%, $p_{(\text{flowing ground})} = 0,01$?
- o Om vi kan acceptera att sannolikheten för flowing ground är $p_{(\text{flowing ground})} = 0,01$ hur mycket behöver vi då undersöka den aktuella bergmassan?

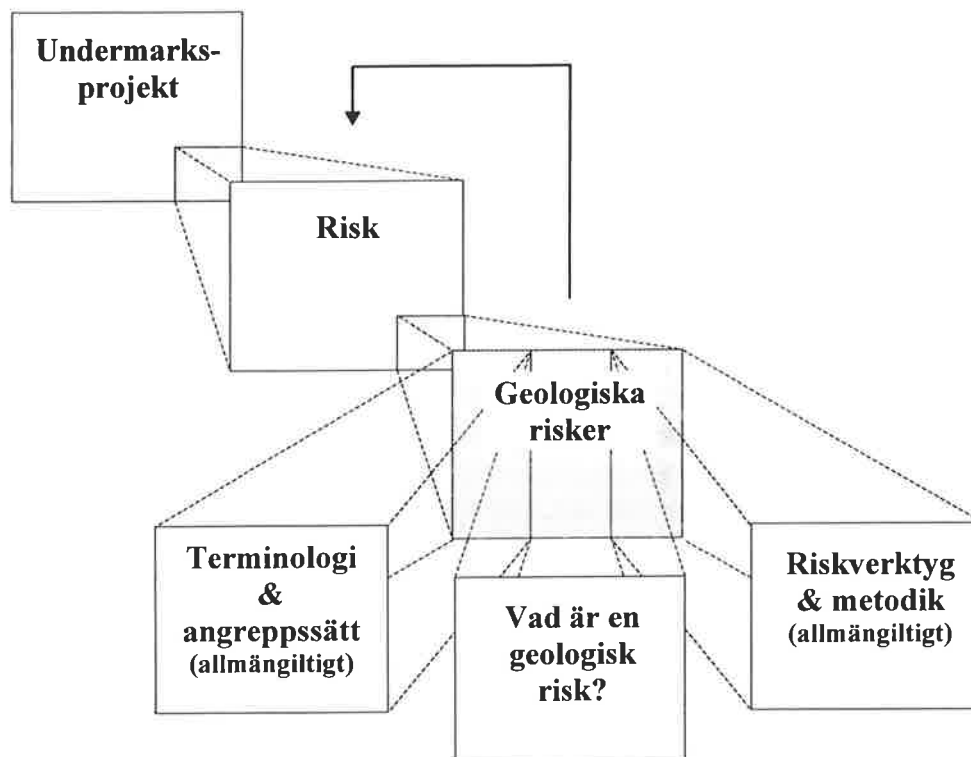
De inledande studier som genomförts inom ramen för forskningsprojektet har kunnat visa att olika beslutsproblem som uppkommer inom ett undermarksprojekt kan hanteras stringent med hjälp av olika beslutssystem och riskanalysverktyg. Som framgått i inledningen av denna rapport är också ett mål med forskningsprojektet att utveckla ett system/modell för besluts- och riskanalys för undermarksprojekt.

Denna uppgift är både omfattande och svår. En sådan modell är också olik andra eftersom den inte består av en matematisk lösning eller ett dataprogram. I början av Kapitel 3 konstaterades att lösningen kan bestå av följande steg:

- o Verktyg för hantering av den sammanlagda risken för ett undermarksprojekt
- o Systemanalys, för att se kopplingar mellan olika parametrar och händelser
- o Statistisk beskrivning av indata som är behäftade med variation och osäkerhet

Det är således en lösning som kombinerar användandet av befintliga verktyg med en del nya riktlinjer för arbetsgång och hantering av olika problem.

Ett undermarksprojekt kanske mer än andra byggprojekt kännetecknas av en komplex sammansättning av beslut och risker. I denna rapport har diskussionen fokuserats på geologiska risker. Med geologiska risker som utgångspunkt har riskterminologi, befintliga verktyg för risk- och beslutsanalys samt filosofin för hur risker kan hanteras presenterats, se Figur 6.1. Det är emellertid ett önkemål att erhålla ett beslutsystem som är transparent i den mening att det kan behandla flera typer av risker och även kombination av risker. I följande kapitel skisseras riktlinjer för ett sådant beslutssystem anpassat till undermarksprojekt.



Figur 6.1 Schematisk illustration av arbetssättet att gå från helheten till detaljen samt tillbaka till helheten. I denna rapport diskuteras geologiska risker. Det beslutssystem och de verktyg som introduceras är emellertid allmängiltiga och kan användas för andra risker.

6.2 Integrated Decision and Risk System for Underground Projects, IDRU

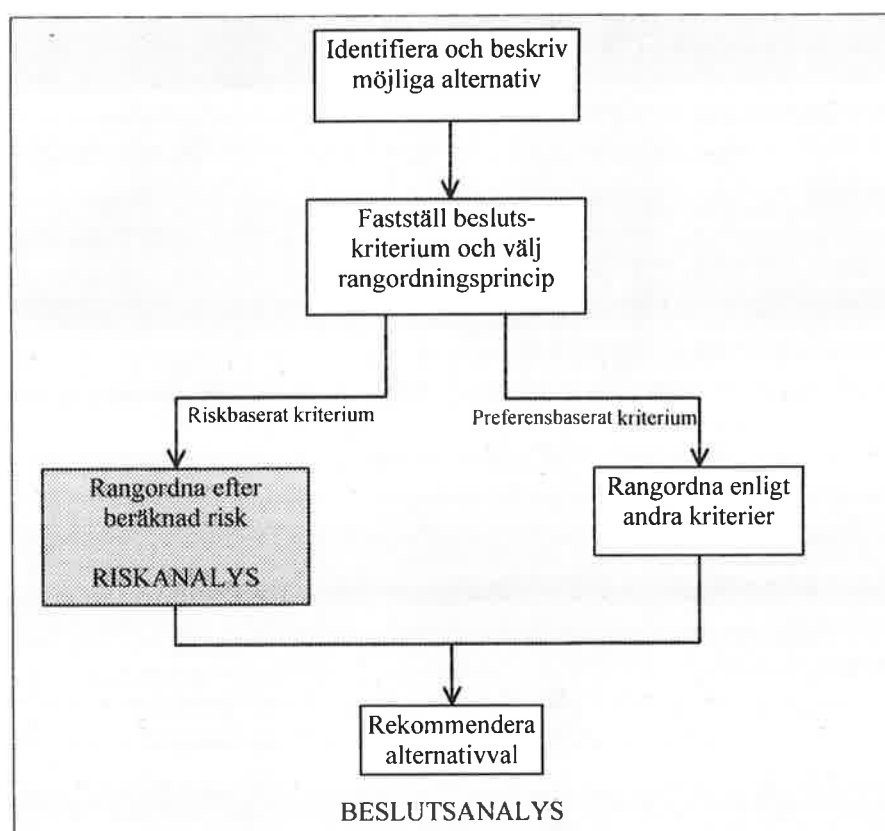
I följande avsnitt presenteras en syntes av det som diskuterats tidigare i rapporten. Syntesen har resulterat i ett förslag till ett beslutssystem för undermarksprojekt, se Sturk et al. (1995). Det bör påpekas att de riktlinjer och ideér som presenteras här i vissa delar fortfarande är i sin linda. Arbetet med utvecklingen fortgår och det som presenteras i föreliggande rapport är inte slutgiltigt. Syftet med denna rapport är heller inte att presentera en färdig modell utan snarare att lämna en lägesrapport.

Huvuddragen i en stringent beslutsanalys visas i flödesschemat, Figur 6.2. Beslutssystemet utgör ett förslag på hur en beslutsmodell tillämplig för undermarksbyggande skulle kunna se ut. Denna modell skiljer sig inte exteriört från de modeller som presenterats i Kapitel 3, däremot är problemhanteringen inom varje box anpassad till problem och faror specifika för undermarksprojekt. Innehållet i boxarna beskrivs principiellt nedan.

När ett beslutsproblem uppdagas måste beslutsfattaren inledningsvis klargöra och förstå de olika beslutsalternativen som är aktuella. Det betyder att det första steget i analysen

blir att identifiera och beskriva samtliga möjliga beslutsalternativ. Beskrivningen skall göras så att jämförelse mellan alternativen blir möjlig. Därefter måste beslutskriteriet fastställas. Som vi diskuterat tidigare sker detta mot bakgrund av vilken kunskap eller mängd information beslutsfattaren besitter. Som Bayesianer försöker vi så långt som möjligt använda ett riskbaserat beslutskriterium. Om detta inte är möjligt kan man övergå till ett preferensbaserat kriterium.

Nästa steg, riskanalysen, är det mest omfattande och kanske det viktigaste steget i beslutsanalysen. Innehållet i riskanalysen beskrivs detaljerat nedan, huvudpunkterna är emellertid att beräkna risken för varje alternativ och utifrån detta utvärdera de olika alternativen. Beslutsmodellen avslutas med att det alternativ som bäst uppfyller beslutskriteriet rekommenderas för val.

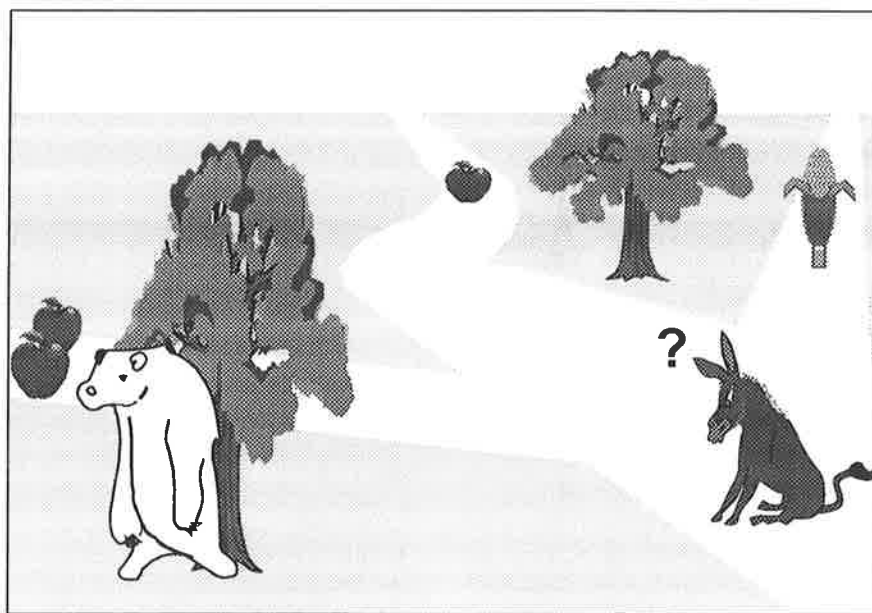


Figur 6.2 Flödesschema som beskriver IDRU.

För att på ett enkelt sätt åskådliggöra ett beslutsproblem som behandlas enligt IDRU presenteras ett exempel med en åsna i en vägkorsning, se Figur 6.3. Den berömda åsnan mellan de två hötapparna har i detta fall ersatts av en åsna som kan välja mellan tre vägar. Väg 1 innebär möjlighet att få två äpplen, men en björn lurar bakom trädet för att eventuellt äta upp åsnan, denna väg är således behäftad med osäkerhet. Väg 2 ger utdelning i form av ett äpple, äpplet har dock legat i solen och kan vara oätligt även för en åsna, även här en viss osäkerhet alltså. Väg 3 ger utdelning i form av majs, denna väg

innebär inte någon osäkerhet. Förutsättningarna är att åsnan föredrar äpplen framför majs och den vill naturligtvis inte bli uppäten av björnen eller äta rutna äpplen.

Genom att tillämpa beslutsteori kan vi hjälpa åsnan att välja den bästa vägen. Vilken som är den bästa vägen beror emellertid på vilket beslutskriterium åsnan använder. Vidare kan ju åsnan vara mer eller mindre riskbenägen (villig att ta risk/chans), detta kommer också att påverka beslutet.



Figur 6.3 Beslutsvånda!

6.2.1 Identifiering och beskrivning av olika alternativ

Då man utför en beslutsanalys är det viktigt att klargöra, både för sig själv och för andra, exakt vilka alternativ som valet står emellan, i den tidiga litteraturen om beslutsanalys kallas denna fas den deterministiska fasen, se Staël von Holstein (1974). Med hänsyn till den valda definitionen av risk (förväntad kostnad) förutsätts att alternativ som är oacceptabla av samhällsskäl, till exempel oacceptabel sannolikhet för skada på människa, redan är bortsållade. I åsneexemplet är alternativen de tre vägarna, för ett tunnelprojekt kan alternativen när det gäller uttagsmetod vara till exempel TBM och Borrning & Sprängning.

Man skall härvid komma ihåg att det ibland finns ett nollalternativ, det vill säga att inte göra några förändringar mot den rådande situationen. Det händer också ofta att det i varje alternativ finns flera beslut som skall fattas vid olika tillfällen.

Vidare kan alternativ som innebär riskreduktion vara aktuella. Riskreduktion kan bland annat göras genom informationsinhämtning (jfr informationsfasen i den klassiska beslutscykeln, Staël von Holstein (1974)), exempelvis genom en kompletterande

geoteknisk undersökning. Alternativ som inkluderar riskreduktion skall behandlas på samma sätt som övriga alternativ.

Man kan se denna inledande fas, att identifiera och beskriva alternativen, som systemmodellering där man analyserar de olika delarna i alternativen och deras inbördes kopplingar och påverkan. Detta arbete innehåller en stor del ingenjörskonst och ingejörskunande. Det bör påpekas att på grund av till exempel specifika förutsättningar, lagar och normer kan vissa alternativ uteslutas redan i denna inledningsfas. Under identifieringsfasen är det viktigt att den som står inför beslutet deklarerar sina preferenser, förutsättningar och speciella krav så tydligt som möjligt så att hänsyn till dessa kan tas i den fortsatta beslutsanalysen. Lämpliga hjälpmedel som kan användas för att beskriva och strukturera olika alternativ är bland annat kvalitativa felträd, händelseträd och besluts-träd, se ovan.

6.2.2 Beslutskriterier

För att man skall kunna fatta ett bästa beslut krävs ett system för att värdera de olika beslutsalternativen, man måste ha beslutskriterier. Dessa baseras på det värdeman tillmäter olika möjliga utfall av besluten. Eftersom man inom undermarksbyggandet arbetar med material som är behäftade med osäkerhet (jord, berg och vatten) och där informationen om materialegenskaper etc ofta är knapp bör vi använda ett subjektivt statistiskt tillvägagångssätt. Detta innebär att vi vill tillgodogöra oss subjektiv erfarenhet och kunskap samt om möjligt stödja den med det statistiska underlag (mätdata) som eventuellt finns tillgängligt. Det kan vi göra genom att tillämpa en Bayesiansk filosofi.

Om man följaktligen kan beskriva beslutsalternativen i formen av sannolikhet och nytta, där nyttan kan beskrivas med ett enhetligt måttetal (monetära termer), kan ett riskbaserat beslutskriterium med fördel användas, det vill säga kriteriet *förväntad nytta*. I detta fall kan alternativen rangordnas efter den beräknade risken.

Om nyttan eller sannolikheterna inte på tillfredsställande sätt kan beskrivas i explicita termer, måste något annat beslutskriterium tillgripas, till exempel ett preferensbaserat kriterium. I detta fall rangordnas de olika alternativen enligt det valda kriteriet, varefter beslutsfattaren rekommenderas att välja det alternativ som rankats högst.

6.2.2.1 Riskbaserat beslutskriterium

Vid användandet av riskbaserat beslutskriterium rangordnas alternativen efter beräknad risk, "välj alternativet med störst förväntad nytta", se Ekvation 3.2.

För att återknyta till vårt exempel om åsnan kan vi anta att åsnan har tillräcklig information för att använda ett riskbaserat beslutskriterium. Vi antar således att åsnan vet att sannolikheten att björnen är hungrig och därmed kommer att äta upp honom är 10% samt att det är 5% sannolikhet att äpplet på Väg 2, vilket inte legat i skuggan, är ruttet och därmed värdelöst. Beslutsanalysen handlar om att finna den väg som bäst uppfyller

kriteriet och därmed innebär det för åsnan bästa beslutet. Åsnans nytta (u) för de möjliga resultaten av det tre olika vägvalen antas vara följande:

Två äpplen <i>är bättre än</i>	20
Ett äpple <i>är bättre än</i>	15
Majs <i>är bättre än</i>	10
Ett ruttet äpple <i>är bättre än</i>	0
Att bli uppäten	- 20

Sannolikheten (p_1) för att björnen äter upp åsnan är som sagt 10%, detta kan endast realiseras om Väg 1 väljs. Äpplet som ligger på Väg 2 är med 5% sannolikhet ruttet eftersom det legat i solen. Den förväntade nyttan för de olika vägarna blir:

Väg 1	$0,90 \cdot 20 + 0,10 \cdot -20 = 16$
Väg 2	$0,95 \cdot 15 + 0,05 \cdot 0 = 14,25$
Väg 3	$1 \cdot 10 = 10$

I detta fall är Väg 1 det optimala valet, trots den fara det innebär. Rekommendationen till åsnan blir således att välja Väg 1, men åsnan är givetvis inte tvingad att följa rådet!

6.2.2.2 Preferensbaserat beslutsriterium

I vissa fall är det svårt eller omöjligt att sätta ett gemensamt måttetal på olika egenskaper hos ett utfall. Det är till exempel svårt att mäta miljökonsekvenser, estetiska egenskaper och skadekostnader med ett gemensamt mått. I detta fall kan man tillgripa metoder där man på något sätt rangordnar alternativen efter olika (subjektiva) preferenser.

Om åsnan i exemplet inte vetat någonting om sannolikheten för att bli uppäten av björnen eller att äpplet var ruttet, alternativt om han inte kunnat uttrycka värdet av sitt liv i samma måttetal som nyttan av att få äta äpplen och majs, hade den varit tvungen att välja ett preferensbaserat beslutsriterium.

Man kan till exempel tänka sig att åsnan är försiktig, tar det säkra före det osäkra, och väljer Väg 3, det enda alternativ som inte är behäftat med osäkerhet.

6.2.3 Utvärdering och analys av alternativen - Rangordning av alternativ

När man är klar över vilket beslutsriterium som gäller för det aktuella beslutsproblemet och den aktuella beslutsfattaren, inleds nästa omfattande delmoment i beslutsprocessen; utvärderingen och analysen av de identifierade alternativen. Detta delmoment ligger till grund för den rangordning av olika alternativ som skall göras.

Om beslutsproblemet faller under kategorin riskbaserat besluts-kriterium skall risken förknippad med samtliga alternativ beräknas, för att rangordning med avseende på risk skall kunna göras, detta innebär riskanalys. Om ett preferensbaserat kriterium används, kan någon annan stringent värderingsmetod användas för att rangordna alternativen, till exempel olika expertsystem.

6.2.3.1 Riskanalys - Rangordning efter beräknad risk

Riskanalysen är en integrerad del av beslutsanalysen. I likhet med många andra begrepp inom ämnet innebär riskanalys olika saker för olika människor. Vår definition av riskanalys har förklarats i Kapitel 3, i detta avsnitt görs en kort repetition. Vidare diskuteras hur risken beräknas samt hur risker utvärderas. En detaljerad genomgång av riskanalysens fyra steg, mot bakgrund av de för undermarksbyggande relevanta riskerna, har ju tidigare gjorts i Kapitel 4.

Vad är riskanalys

Riskanalys innebär en systematisk identifiering av faror/skadehändelser och värdering av risken samt ett probabilistisk tillvägagångssätt för att belysa och värdera faror/konsekvenser och i detta sammanhang därigenom optimera beslut. Riskanalysen är enligt detta resonemang, som nämnts ovan, en del av beslutsprocessen/beslutsanalysen om ett riskbaserat besluts-kriterium används. Riskanalysen delas in i följande steg:

- I. Identifiera faror och skadehändelser
- II. Åsätt sannolikheter för dessa faror och skadehändelser
- III. Beskriv möjliga konsekvenser av skadehändelserna med avseende på omfattning och sannolikhet
 - Ta hänsyn till riskbeteende och riskbenägenhet
- IV. Beräkna och beskriv risk

Riskanalys skall utföras för olika beslutsalternativ och det är noterbart att alternativ som innebär riskreduktion, exempelvis genom kompletterande förundersökningar, förstärkning av jord- eller bergmassan etc bör tas med och behandlas på samma sätt som andra alternativ.

Beräkna risker

Att beräkna risken för en viss händelse är matematiskt mycket enkelt. En sannolikhet (sortlös) multipliceras med en konsekvens som här uttrycks i ekonomiska termer (kr). Produkten är risken, följaktligen uttryckt som en kostnad (kr). Svårigheterna med att beräkna risken är således inte förknippade med den matematiska operationen utan består i att åsätta sannolikheter och kostnader för olika händelser.

Sannolikheter för händelser och utfall kan till exempel baseras på information från:

- o Provnings
- o Statistiskt underlag från verkliga tidigare utfall
- o Expertbedömningar, subjektiva skattningar (för en Bayesian)

- o Beräkningar utgående från stokastiska variabler

Kostnader som är förknippade med ett undermarksprojekt är exempelvis:

- o Projekteringskostnader
- o Byggkostnader
- o Drift och underhållskostnader
- o Icke anläggningstekniska kostnader (till exempel kostnader eller inkomstbortfall till följd av skador och brott)

Projekterings, bygg, drift och underhållskostnader kan uppskattas med hjälp av erfarenhet från tidigare projekt (kostnadsdatabaser) eller offertpriser. I de fall en tidigare direkt tillämpbar kostnadserfarenhet saknas kan kostnaderna uppskattas baserat på kunskaper om materialkostnad, montage etc. De icke anläggningstekniska kostnaderna är naturligtvis betydligt svårare att uppskatta men kan för den sakens skull inte negligeras då de kan ha stor betydelse i det totala sammanhanget.

För anläggningar med livslängd mellan cirka 10 och 150 år kan kostnaderna behandlas enligt teorin om livscykelkostnaden (LCC), se exempelvis Avesta (1989) eller Westin (1989). Normalt fördelas till exempel byggkostnaderna ut under byggtiden medan drift- och underhållskostnader samt kostnader för eventuella brott förekommer under anläggningens hela livslängd. En fullständig analys av livscykelkostnaden för en viss konstruktion tar hänsyn till kostnaderna under en anläggnings förväntade livslängd för material, tillverkning, montage, drift, underhåll, driftstopp, utbyte vid förslitning samt restvärde. Kostnader och intäkter fördelas sig oftast över en lång tidsperiod, varför de olika kostnadsposterna måste värderas om till samma tidsperiod innan de blir jämförbara och kan summeras. För att till exempel idag gardera sig för en kostnad som utfaller en senare tidsperiod behöver man ju endast sätta av ett lägre belopp på ett räntebärande konto. Sambandet mellan de kostnadsfaktorer som tillsammans ger livscykelkostnaden kan uttryckas matematiskt enligt:

$$LCC = AC + IC + \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{(1+r)^i} + \sum_{j=1}^a \frac{(A_j - R_j)}{(1+r)^{i(j)}} \quad (6.1)$$

där,

AC = anskaffningskostnad för materialet eller produkten
 IC = tillverknings- och/eller montagekostnaden
 C_i = operationskostnaderna år i (för kontroll, underhåll, drift och stillestånd)
 A_j = kostnaden för det j :te utbytet av förbrukat system
 R_j = restvärdet hos det utbytta eller förbrukade systemet
 r = realränta = $(n-q)/(1+q)$ där n =kalkylränta och q =inflationen
 a = antalet utbyten under livscykeltiden
 N = livscykeltiden för anläggningen i år

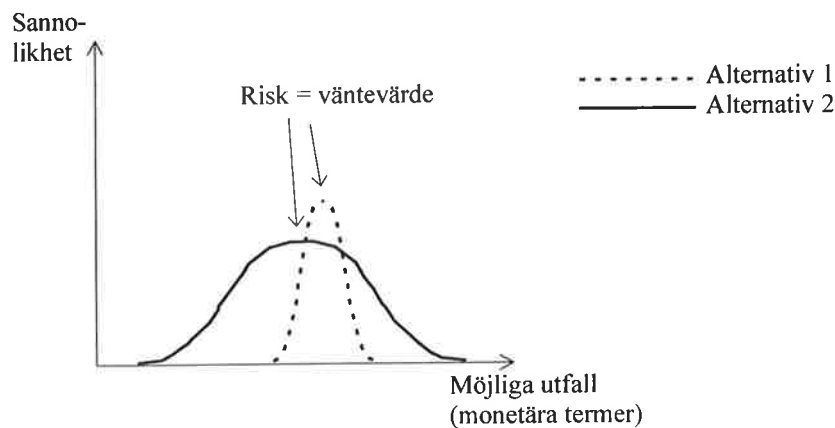
Variation hos möjliga utfall

Man kan ta hänsyn till riskbeteende genom att översätta förlust i kronor till en förlorad nytta, via en icke linjär nyttofunktion (vanligen används en linjär nyttofunktion, det vill säga man arbetar med förväntad förlust i kronor). Att ta fram en icke linjär, för besluts-

fattaren specifik, nyttofunktion kan vara svårt trots att det finns utvecklad metodik och programvara. Ett alternativ kan då vara att i beslutsanalysen arbeta med förväntad förlust i kronor och komplettera detta med ett subjektivt hänsynstagande till spridningen i möjliga utfall. Detta kan innebära att (se även Figur 6.4):

högre förväntad kostnad (risk) och liten spridning i utfall
kan, för en viss beslutsfattare, vara bättre än
 låg förväntad kostnad (risk) och stor spridning i utfall

Detta är viktigt att beakta framförallt när det gäller tekniska system där faror innebär allvarliga eller katastrofala konsekvenser. Stora kraftverksanläggningar, vissa tunnlar och bergumsanläggningar faller definitivt inom denna kategori.



Figur 6.4 Illustration av variationer i utfall. Risken för respektive alternativ är det förväntat värdet. Alternativ 1 innebär högre risk men mindre spridning i möjliga utfall. Motsatt innebär Alternativ 2 lägre risk men större spridning i möjliga utfall.

Utvärdera risker

Risker för samtliga identifierade alternativ beräknas för att utgöra indata till beslutsanalysen. Ofta är ju syftet med beslutsanalysen att minimera risken (minimera förväntad förlust), men hänsyn till variationen i utfall kan också behöva tas i vissa fall. Följaktligen skall de beräknade riskerna utvärderas med avseende på detta och därefter inkorporeras i beslutsprocessen.

Det bör påpekas att även om man inte utför en fullständig beslutsanalys kan en riskanalys, det vill säga ett delmoment av beslutsanalysen, vara behjälplig både byggherre och entreprenör i olika faser av byggprocessen. Med hjälp av en riskanalys kan till exempel faktorer som är viktiga att ta hänsyn till vid design eller byggande identifieras och analyseras. Detta kan i förlängningen leda till en optimering av kvalitetskontroller, kvalitets-säkring och strategier.

6.2.3.2 Rangordning enligt andra beslutskriterier

När man skall välja alternativ utifrån ett preferensbaserat kriterium kan man försöka göra en direkt rangordning baserad på de sammansatta utfallen. I praktiska, ingenjörsmässiga tillämpningar kan det emellertid vara enklare att göra separata jämförelser mellan de olika alternativen med avseende på en egenskap i taget. Problem uppstår med denna metod om ett alternativ inte är bättre i alla avseenden utan bara i något eller några. Då måste man på något sätt rangordna de olika egenskaperna till exempel genom att ge dem viktfactorer. Metoder att göra detta är AHP eller Paired comparison.

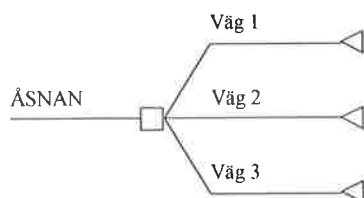
6.2.4 Rekommendation av alternativval

Beslutsprocessen avslutas med att någon form av rekommendation eller underlag för beslut presenteras för beslutsfattaren. Dessa rekommendationer eller beslutsunderlag kan hjälpa beslutsfattaren att ta det optimala beslutet vilket förhoppningsvis kommer honom/ henne tillgodo i form av ökad vinst eller minskad förlust. En stringent beslutsanalys leder också till en förbättrad riskhantering framförallt för undermarksprojekt.

6.2.5 Sammanfattning

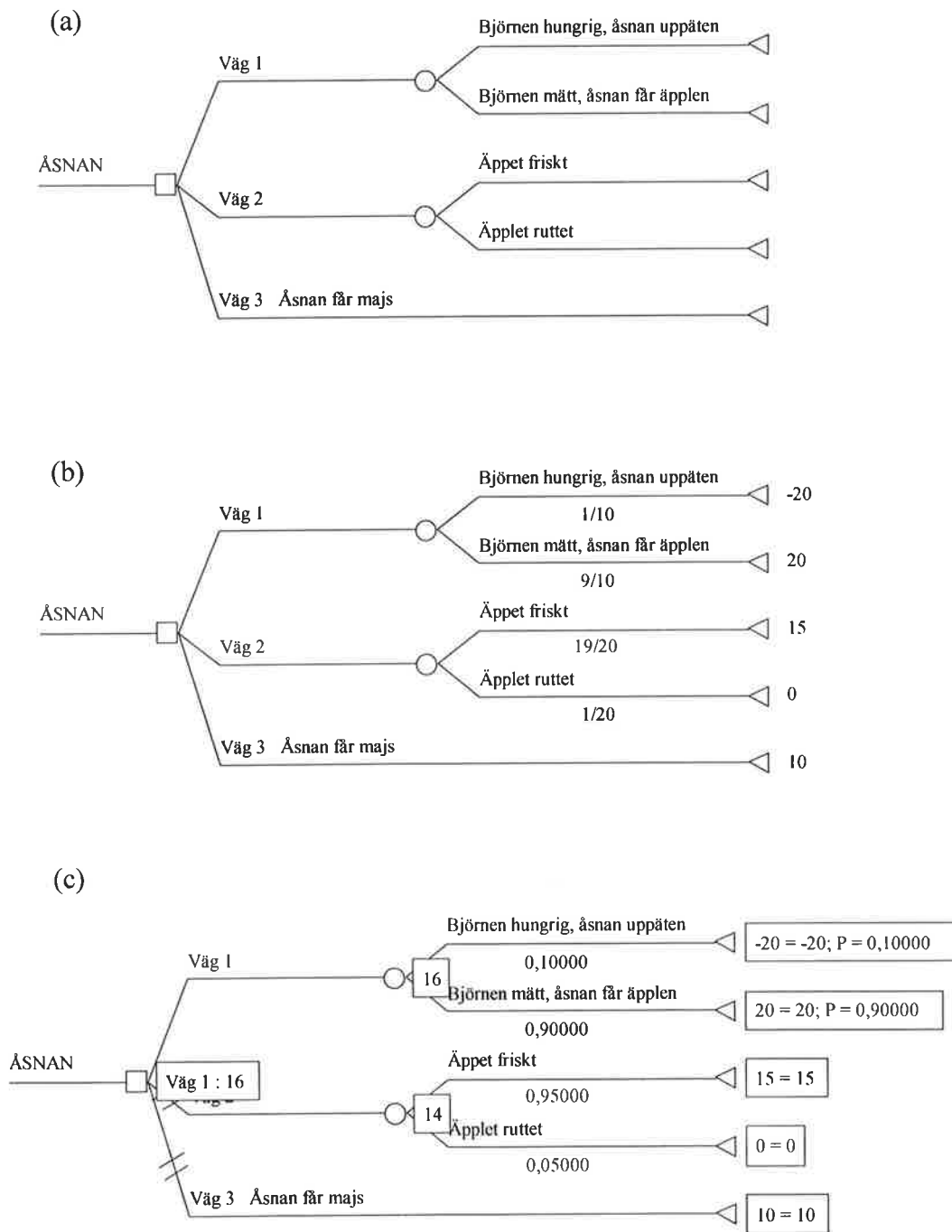
I ovanstående avsnitt har riktlinjerna i ett beslutssystem presenterats. I korthet kan detta illustreras i följande punkter, jämför Figur 6.2:

1. Olika möjliga alternativ identifieras och beskrivs. Dessa alternativ kan struktureras i ett beslutsträd. Åsnan kunde till exempel välja tre vägar (ett alternativ är ju givetvis också att sitta kvar, men detta alternativ anser vi inte relevant).



2. Ett relevant beslutskriterium fastställs. Ofta kan ett riskbaserat beslutskriterium användas i undermarksapplikationer, se Ekv. 3.2.
3. I en riskanalys utvärderas de olika alternativen med avseende på risk. Inledningsvis identifieras faror, åsnans två faror var björnen och solen. Beslutsträdet byggs i detta skede på med händelser som är relevanta för olika alternativ (a). Därefter skall sannolikheten och nyttan för olika faror/oönskade händelser bestämmas (b) och den förväntade nyttan för varje alternativ beräknas (c). Sannolikheten för att björnen var hungrig var 10 % och att äpplet var ruttet 5 %, nyttan varierade mellan -20 och 20. Detta

innebär att den förväntade nyttan är störst vid vägval 1. Olika statistiska och riskanalytiska verktyg kan användas för att identifiera faror/olyckor samt beskriva sannolikheter och konsekvenser. De olika alternativen rangordnas efter beräknad risk.



4. Beslutsfattaren rekommenderas att välja alternativet med störst förväntad nytta. I detta fall alternativ "Väg 1".

6.3 Tillämpningsexempel, IDRU

Ett mycket förenklat och schematiskt exempel på besluts och riskanalys för tunneldrivning med TBM (tunnelbörningsmaskin) redovisas i detta avsnitt. Exemplet har tagits med för att ytterligare konkretisera de tankar som diskuterats generellt i kapitlen ovan.

6.3.1 Identifiering av alternativ och möjliga utfall

Analysen behandlar två beslutssituationer med tre respektive två alternativ. Inledningsvis skall beslutsfattaren, till exempel entreprenören, välja förundersökningsinsats för tunneln, alternativen i dessa fall är att utföra geofysisk förundersökning, kärnbörning eller ingen förundersökning alls. Därefter, med hänsyn till resultatet från förundersökningen, måste han besluta om en öppen eller sköldad TBM skall väljas med hänsyn till risken behäftad med en stor svaghetszon med dåligt berg.

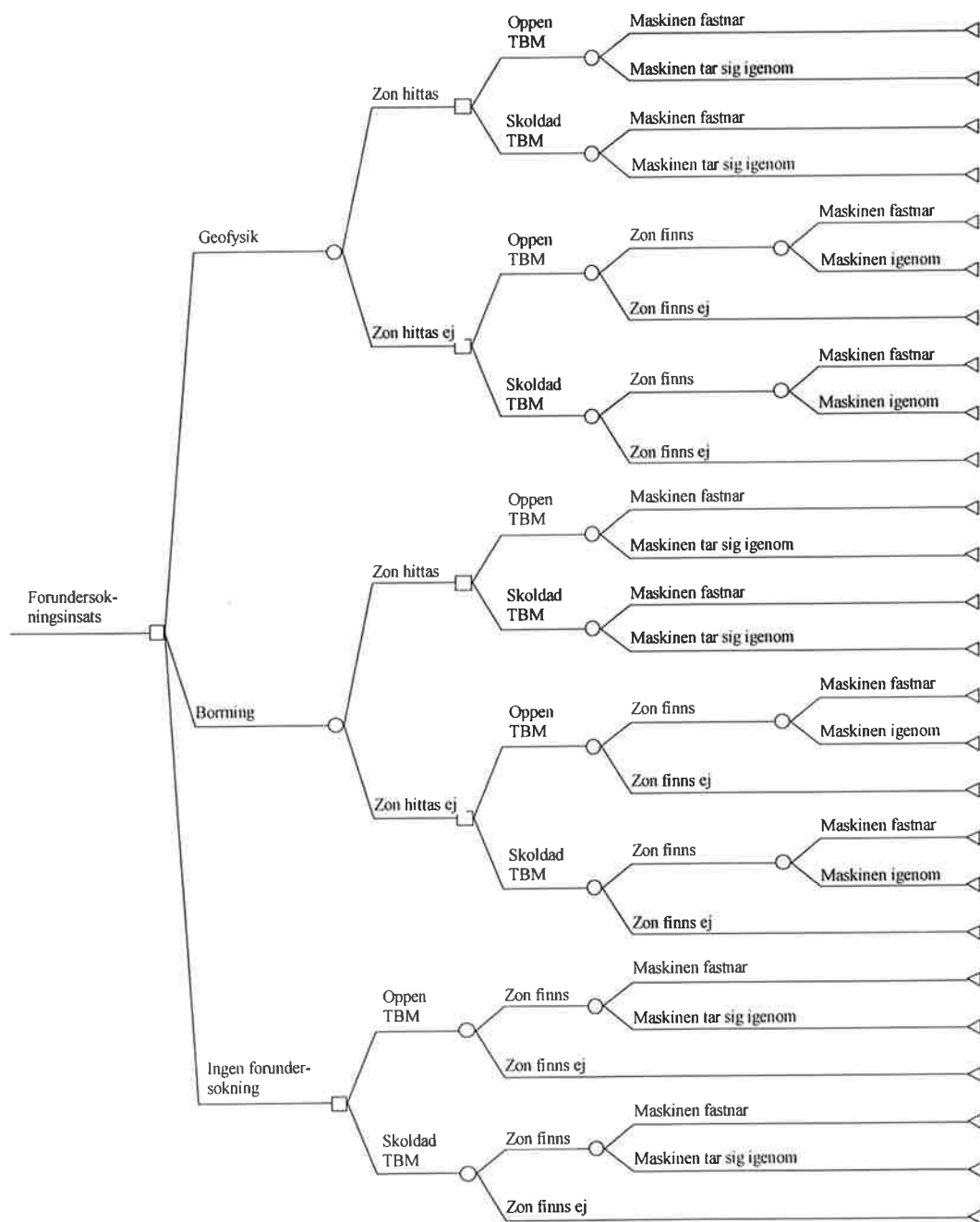
De tänkbara utfallen innebär att en stor svaghetszon hittas med den valda förundersökningsinsatsen eller inte, att zonen finns trots att den inte hittats eller inte samt att maskinen fastnar/ej fastnar i zonen om den finns.

De identifierade alternativen med möjliga utfall kan struktureras och illustreras med hjälp av ett beslutsträd, se Figur 6.5.

6.3.2 Beslutskriterium och rangordning

Eftersom vi tillämpar ett Bayesianskt synsätt, vi är beredda att uppskatta sannolikheter för olika utfall, väljer vi ett riskbaserat beslutskriterium. Det innebär att den förväntade nyttan för samtliga alternativ skall beräknas. Den förväntade nyttan uttrycks i detta fall som kostnader. Beslutskriteriet blir att välja det alternativ som innebär lägst förväntad kostnad. Alternativen kommer således att rangordnas med avseende på risk, eftersom risk definieras som förväntad konsekvens (i detta fall; investeringskostnader + $P_{(\text{utfall})} \cdot \text{Kostnad}_{(\text{utfall})}$)

För att kunna utföra beslutsanalysen måste således kostnader för investeringar och utfall samt sannolikheter för utfall bestämmas. Detta görs i riskanalysen.



Figur 6.5 Beslutsträd för TBM-exemplet. Beslutsnoder är fyrkantiga och utfallsnoder är runda.

6.3.3 Riskanalys

Riskanalysen är det moment som mest kan variera i omfattning. Både detaljerade och översiktliga analyser förekommer. Grundmomenten i riskanalysen är att identifiera faror och konsekvenser samt kvantifiera dessa i sannolikhets- och nyttotermer (kostnader).

Olika hjälpmedel har presenterats ovan. I detta exempel används händelseträdsanalys och felträdsanalys.

6.3.3.1 Konsekvenser (kostnader)

Grundförutsättningen för föreliggande exempel är att en öppen TBM är billigare att köpa men tekniskt sett har större svårigheter att klara av dåliga bergförhållanden, det vill säga sannolikheten att fastna i en stor svaghetszon är stor. Konsekvensen av att TBM:en fastnar i dåligt berg är stor, det är med andra ord mycket dyrt.

Förundersökningsmetoderna, i detta fall valet mellan geofysik, kärnborrning eller ingen undersökning alls, skiljer sig också från varandra både vad gäller kostnader samt möjligheterna att finna den intressanta svaghetszonen. Slutligen har det antagits att det är billigare att fastna i en zon som är känd på förhand, det vill säga en zon som lokaliserats under den geologiska förundersökningen.

De kostnader som använts i beslutsanalysen redovisas i Tabell 6.1. De redovisade kostnaderna är i detta fall endast mycket grova uppskattningar för att exemplifiera beslutsanalysmetoden. Samtliga kostnader har åsatts subjektivt.

Tabell 6.1 Kostnader använda i beslutsanalysen.

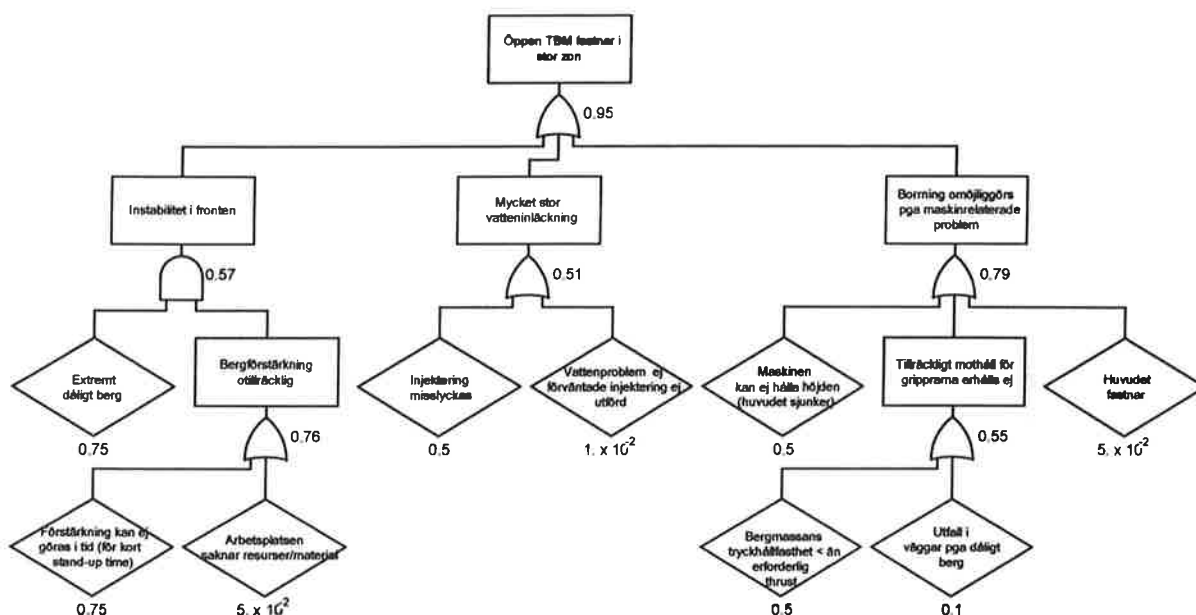
	Investeringskostnad (SEK)	Utfallskostnad (SEK)
Geofysisk förundersökning	500 000	
Kärnborrning	1 000 000	
Öppen TBM	30 000 000	
Sköldad TBM	45 000 000	
Maskinen fastnar i okänd zon		30 000 000
Maskinen fastnar i känd zon		5 000 000

6.3.3.2 Sannolikheter för olika utfall

Generellt kan sägas att åsättandet av sannolikheter för händelser i geologiska system är mycket svårt, detta har också diskuterats i detalj i föregående kapitel. Detta beror framförallt på att materialkännedomen är förhållandevis liten och även att det statistiska underlaget är begränsat.

För att strukturera och på ett bättre sätt förstå händelsen att en öppen TBM fastnar i en stor zon med dåligt berg har en felträdsanalys genomförts. En sådan händelse får, som nämnts tidigare, allvarliga konsekvenser för anläggningsarbetet varför det bedöms viktigt att behandla den stringent.

Felträdet redovisas i Figur 6.6. Analysen visar att problemet är komplext och utfallet beror av många faktorer. Sannolikheten att fastna i en stor zon med en öppen TBM har beräknats till 95%. Sannolikheterna för utvecklade händelser har åsatts subjektivt.



Figur 6.6 Felträd för händelsen "TBM fastnar i stor zon".

De sannolikheter som använts för beslutsanalysen presenteras i Tabell 6.2. Sannolikheterna har åsatts subjektivt (utan stringent hantering).

Tabell 6.2 Sannolikheter för utfall använda i beslutsanalysen

Utfall	Sannolikhet
Zon hittas med geofysik	50%
Zon hittas med kärnboring	90%
Zon finns (trots att den inte hittats)	50%
Öppen TBM fastnar	95%
Sköldad TBM fastnar	0,1%

6.3.3.3 Beräkning av risk och rangordning av alternativ

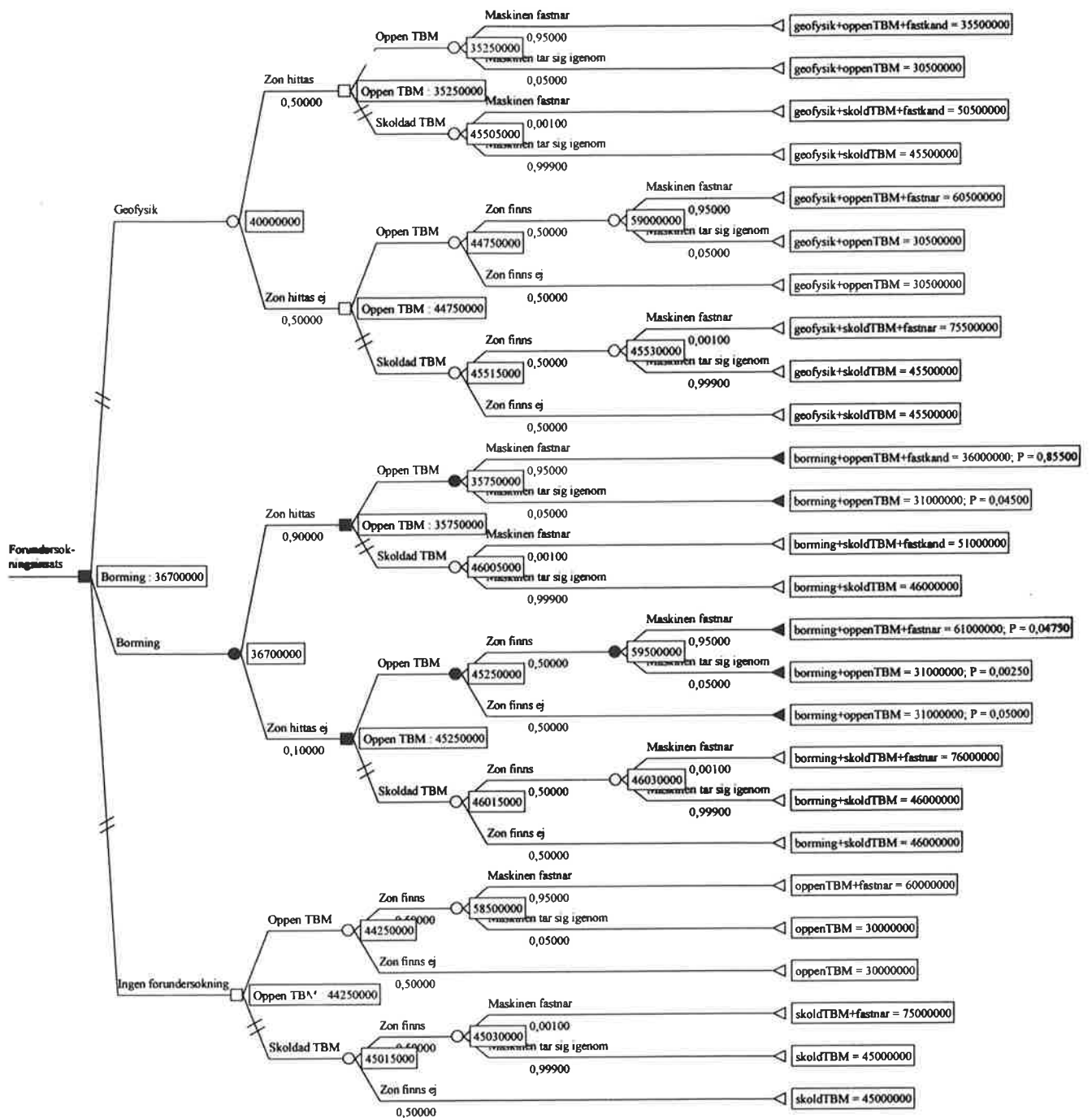
I Figur 6.7 visas beslutsträdet efter det att den förväntade kostnaden för samtliga alternativ beräknats. Hänsyn har tagits del till investeringskostnader, dels till sannolikheten och kostnaden för de olika utfallen.

I det aktuella fallet visar analysen att förundersökning med kärnborrning ger den lägsta förväntade kostnaden. Oavsett om någon stor svaghetszon hittas under förundersökningen eller ej skall man välja en billigare öppen tunnelborrningsmaskin.

6.3.4 Rekommendation av alternativ

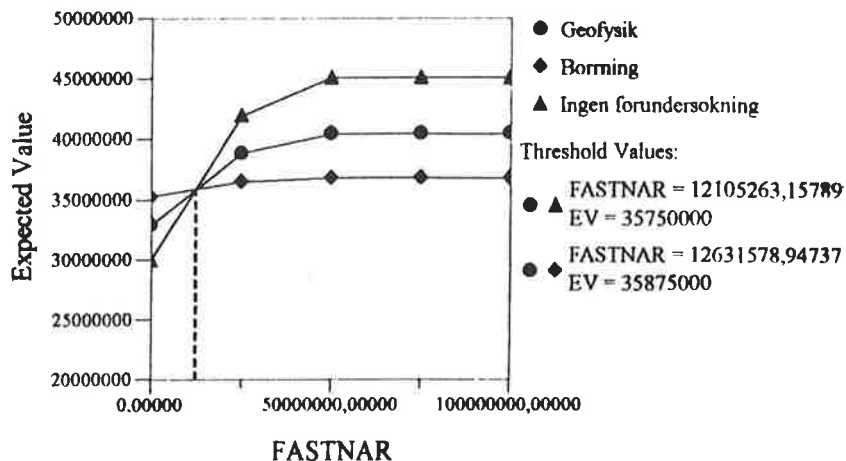
Som nämnts ovan visar analysen att förundersökning med kärnborrning ger den lägsta förväntade kostnaden. Oavsett om någon stor svaghetszon hittas under förundersökningen eller ej skall man välja en billigare öppen tunnelborrningsmaskin. Beslutanalytikern bör naturligtvis i detta fall rekommendera dessa alternativ till beslutsfattaren.

För att utvärdera stabiliteten i resultaten och ytterligare hjälpa beslutsfattaren i valet av alternativ kan olika typer av sensitivitetsanalyser genomföras.



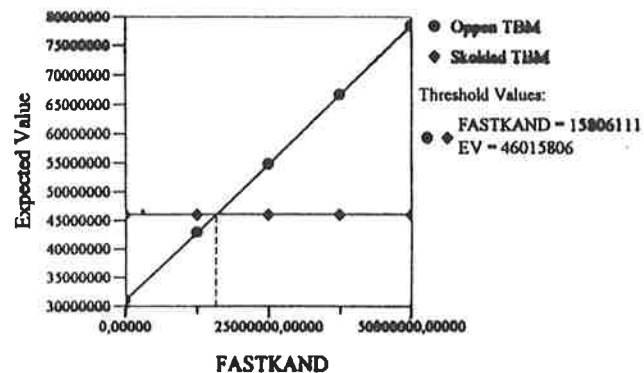
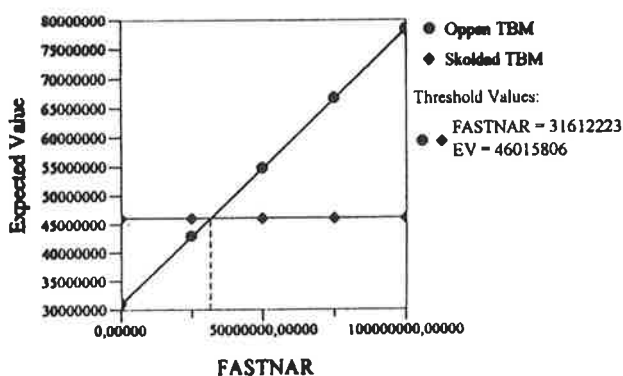
Figur 6.7 Beslutsträdet med beräknade förväntade kostnader. Det alternativ som ger den lägsta förväntade kostnaden har markerats med fyllda noder.

I Figur 6.8 visas sensitivitetsanalyser för utfallet "fastnar i okänd zon". I detta fall redovisas hur beslutet av förundersökningsinsats påverkas av variation i kostnad för denna händelse. Av figuren framgår att om kostnaden för att fastna i en okänd zon understiger 12,1 MSEK bör alternativet "Ingen förundersökning" väljas.



Figur 6.8 Sensitivitetsanalys av hur valet av förundersökning påverkas av kostnaden för utfallet "fastnar i okänd zon".

På motsvarande sätt har sensitivitetsanalyser för valet av öppen respektive sköldad TBM gjorts, se Figur 6.9. I det fallet att zonen är känd bör en sköldad TBM användas om kostnaden att köra fast i den överstiger 15,8 MSEK. Om zonen inte är känd skall en sköldad TBM väljas om kostnaden att köra fast överstiger 31,6 MSEK.



Figur 6.9 Sensitivitetsanalys av hur valet av TBM påverkas av kostnaden för utfallen "fastnar i okänd zon" (a) respektive "fastnar i känd zon" (b).

7 FORTSATT FORSKNINGSARBETE

En del nya tankar och aspekter på den grundläggande problemställningen (osäkerheter och risk i samband med undermarksarbete) har introducerats i denna rapport. Forskningsprojektets fortsättning bör mot bakgrund av dessa att följa tre spår vilka innebär:

1. En förfining av beslutssystemet IDRÜ.
2. Studie av geologiska risker, specifikt med avseende på geologiska anomalier och geometriska gränser.
3. Utveckling av sannolikhetsbaserade prognosmodeller och byggbarhetsanalyser.

Av dessa skall det andra (frågan om geologiska risker) betraktas som ett huvudspår. I de följande avsnitten presenteras och motiveras respektive uppslag.

7.1 Generell förfining av beslutssystemet IDRÜ

Utarbetandet av nya modeller är alltid en dynamisk process som kan pågå under lång tid. Det är först vid tillämpning av en modell som dess svagheter avslöjas. I det fortsatta arbetet inom forskningsprojektet är följaktligen ett mål att på olika sätt tillämpa de ideér som introducerats här. Förhoppningsvis leder detta till en kontinuerlig förbättring av beslutssystemet.

Som också nämnts ovan är modellen utvecklad baserad på hanteringen av geologiska risker, det är dock ett önskemål att modellen är transparent och tillämpbar inom undermarksbyggande generellt. Detta bör också provas ut och förbättringar när det gäller modellen generalitet kommer troligtvis att behövas.

7.2 Studie av geologiska risker, specifikt med avseende på geologiska anomalier och geometriska gränser

7.2.1 Grundproblemet

Geologiska anomalier och olika geometriska gränser är viktiga inom ingenjörsgéologin och bergmekaniken. Det har därför bedömts intressant och viktigt att studera detta "ämnesområde" i detalj inom ramen för forskningsprojektet.

En frågeställning som ansluter till ovanstående är bergytans läge och variation. Eftersom bergytan kan beskrivas som en geometrisk gräns kan den sägas representera gränsproblematiken inom bergmekaniken, med allt vad det innebär, i allmänhet. Bergytans läge, eller mer korrekt uttryckt den friska bergytans läge, spelar ofta en stor roll för undermarksbyggande. I en vittrad miljö avgör den till exempel vilken nivå som är den optimala för en undermarksanläggning vad gäller stabilitet och ekonomi. Den är också viktig när det gäller lokalisering av tunnelpåslag och därmed längder av förskärningar och längder av eventuella betongtunnlar. Liten bergtäckning är också ett problem som naturligtvis är kopplat till bergytans läge och variation. Vidare är bergytans variation

geologiskt sett kopplad till förekomst av svaghetszoner, framförallt i områden som påverkats glacialt.

Eftersom bergytans läge och variation ofta är otillräckligt känd ställs beställare och entreprenörer ofta inför beslutsproblem när det gäller denna detalj. Om man utgår från beslutsproblematiken kan följande frågor komma upp:

- o Vilket är det optimala tunnelläget i höjd med avseende på bergytans variation?
- o Vilken är den optimala tunneldrivningsmetoden med avseende på bergytans variation?
- o Vilken är den optimala förundersökningsinsatsen med avseende på bergytans variation?

Givetvis ingår det i beslutsproblemet att ta hänsyn till de osäkerheter som finns och att minimera risken. Vi antar att beslutskriteriet är förväntad nytta (i undermarksapplikationen ofta lika med förväntad kostnad). Ett mål med att studera detta specifika bergbyggnadsrelaterade problem är således att hjälpa beslutsfattare som står inför ovanstående beslutsproblem att fatta ett riktigt beslut och därmed tjäna mer/förlora mindre pengar.

Det visar sig, vid närmare eftertanke, att frågeställningen bergytans variation inkluderar många av de olika delmoment och aspekter som beskrivits tidigare i rapporten varför det ur vetenskaplig synvinkel är ett bra problem att studera. För att kunna hjälpa beslutsfattaren med problemet bergytans variation behöver vi:

- o Statistiskt kunna beskriva bergytans variation i olika geologiska miljöer.
- o Veta vilka konsekvenser liten bergtäckning eller fel läge på bergytan har för undermarksbyggandet (ekonomi), detta gäller även slutsatser om bergmassans kvalitet utifrån variationer hos bergytan.
- o Veta om och hur vi med olika undersökningsmetoder kan bestämma bergytans läge.

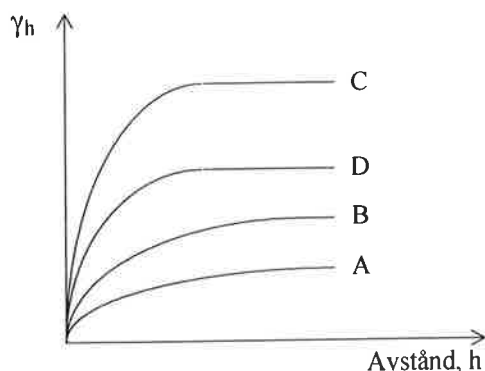
Målen med den fortsatta forskningen bör vara att med hjälp av statistisk information om bergytans variation samt konsekvenser för tunnelbyggandet vid liten bergtäckning svara på de specifika frågor som listats ovan och därmed också belysa frågor kring gränsproblematiken i allmänhet.

7.2.2 Bergytans variation i olika geologiska miljöer

Bergytans variation är ofta dåligt känd. För att kunna göra en stringent analys av problem och risker kopplade till bergytans variation måste vi kunna beskriva den statistiskt. En metod att göra det är kriging, se ovan. I fallet liten bergtäckning är blockkriging troligen mest tillämpligt.

Man kan förvänta sig att variansen i bergytans läge, det vill säga skillnaden från en punkt till en annan, varierar i olika geologiska miljöer. En skiktad sedimentär bergart (A) bör till exempel ha en lägre varians än en magmatisk bergart (B). Andra geologiska

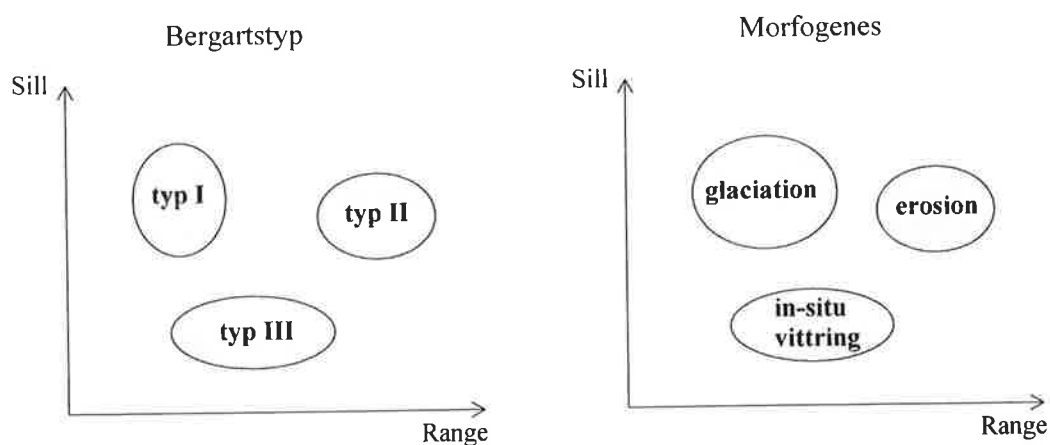
faktorer som styr bergytans variation är till exempel om bergytan påverkats av inlandsis (C) eller inte (D). Bergytans variation som funktion av olika punktavstånd kan beskrivas med hjälp av semi-variogram, se Figur 7.1, jfr också Figur 5.8.



Figur 7.1 Schematiskt semi-variogram visande hypotetiska bergarter med olika varians vad gäller bergytans variation från en punkt till en annan.

Genom att studera olika geologier kan man möjligen framställa ett antal olika typvariogram som är representativa för olika bergarter eller geologiska miljöer. Exempelvis ett semi-variogram som gäller för granit som utsatts för inlandsis, eller ett som gäller för granitområden som inte har någon stor svaghetszon inom 200 m etc.

Om det är möjligt att framställa typvariogram kan olika geologiska grupper, till exempel bergartstyper och/eller grupper med olika morfogenes, definieras med avseende på varians och avstånd (i semi-variogrammet sill och range), se Figur 7.2.



Figur 7.2 Tänkbar presentation av geologiska grupper inom vilka olika typvariogram gäller.

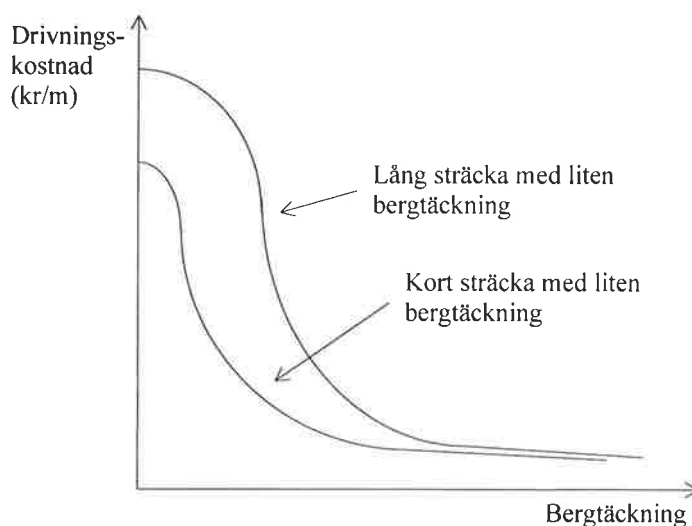
Det skulle vara möjligt att, med hjälp av ett diagram av den typ som visas i Figur 7.2, för ett specifikt projekt i en viss geologisk miljö till exempel bestämma optimal borrtäthet för att uppnå en önskad sannolikhetsgräns för en fara. Låt oss exempelvis spekulera i att vi godtar att sannolikheten för att bergtäckningen är så låg som 0,5 m längs en 5 m sträcka är 1 %. Under det antagandet bör man med hjälp av ett "riktigt" typdiagram och blockkriging kunna bestämma att borrtätheten för att uppnå tillräcklig information i detta specifika fall bör vara 25 m. Därigenom har vi underlättat för ett optimalt beslut när det gäller förundersökningsinsats.

Ett mål med forskningen när det gäller bergytans variation är att studera densamma i olika geologiska miljöer och därefter framställa diagram av den typ som visas i Figur 7.1 respektive Figur 7.2. För att kunna göra detta krävs givetvis mycket data om bergytans verkliga variation (erhålls genom avvägningar) samt bland annat en effektiv särskiljningsparameter för olika geologityper, mao vilka geologier liknar varandra när det gäller bergytans variation.

7.2.3 Konsekvenser av liten eller ingen bergtäckning vid tunneldriving

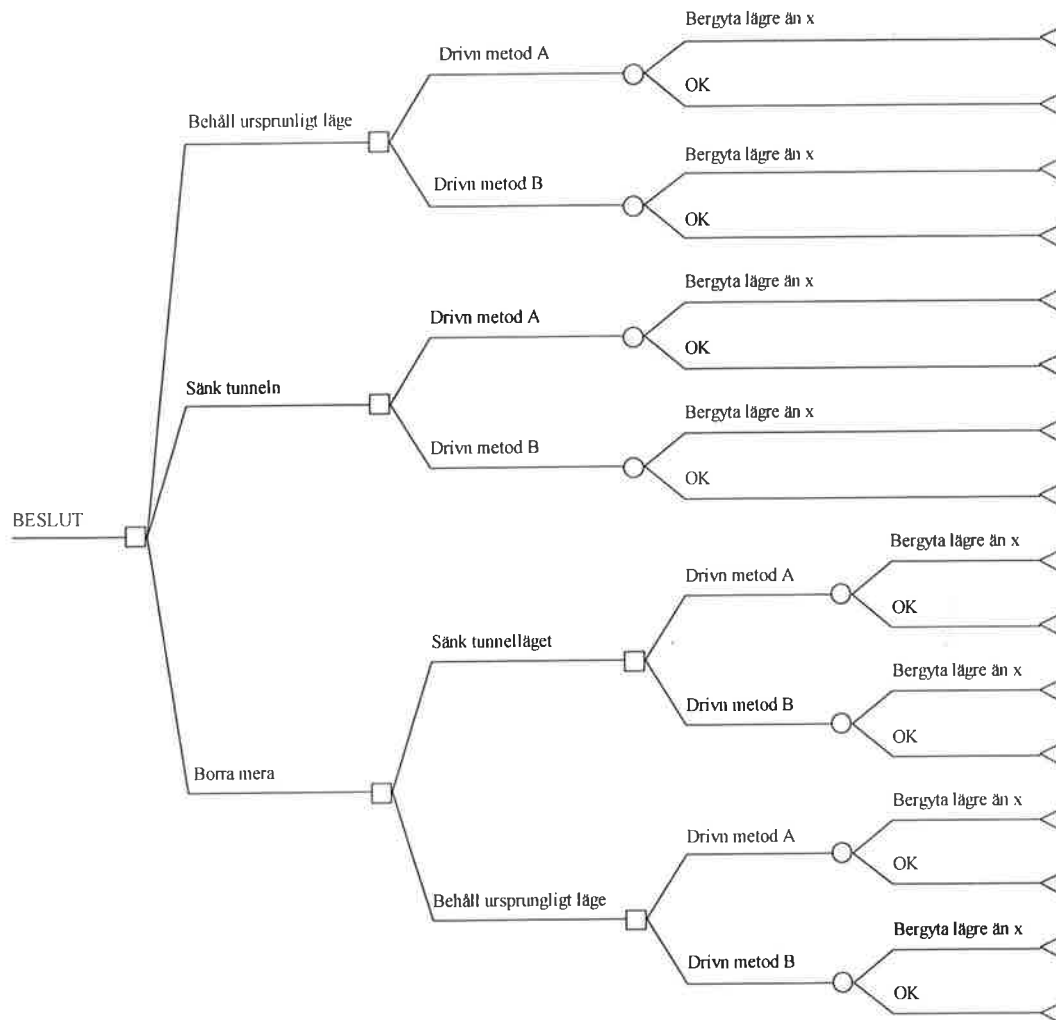
För att kunna uttala oss om att sannolikhetsgränsen för en viss bergtäckning måste kostnaderna förknippade med skadehändelser orsakade av ingen eller lite bergtäckning tas fram. Detta görs lämpligen med hjälp av studier av olika verkliga fall.

Kostnaden per meter tunnel i förhållande till bergtäckningen kan förväntas variera enligt Figur 7.3.



Figur 7.3 Kostnad som funktion av bergtäckning. Figuren visar två fall dels, om sträckan med liten bergtäckning är lång, vilket medför större kostnad, dels om sträckan är kort.

För att återknyta till beslutsproblemet kan man med hjälp av information om ovanstående exempelvis ställa upp ett beslutsträd, se Figur 7.4.



Figur 7.4 Beslutsträd för val av åtgärder vid tunneldrivning med liten bergtäckning, schematisk illustration.

7.2.4 Subjektiva sannolikheter

Ett frågeställning som vi som Bayesianer ofta ställs inför är hur vi skall få ingenjören att uttrycka sannolikheter på ett stringent sätt? Eller med andra ord, fånga ingenjörens erfarenhet i form av statistisk information på ett optimalt sätt. Denna frågeställning är inte bara aktuell för det specifika problemet bergytans variation, utan är viktig för alla beslutsmodeller, se till exempel Beyth-Marom (1982) och Lange & Lichtenberg (1986).

Eftersom detta är ett centralt problem när det gäller besluts- och riskanalys måste det ges utrymme i den fortsatta forskningen.

Målet är att inventera och testa de metoder som idag finns tillgängliga och som presenterats i litteraturen. Vidare bör det utredas om det är möjligt ta fram en fördelningstyp som bättre än de etablerade svarar mot de krav som ställs i applikationen undermarksbyggande. Ett problem man ofta ställs inför är att det inte finns några data att kalibrera mot. Det är vetenskapligt vedertaget att sprickavstånden är exponentiellt fördelade, men hur är antalet installerade bergbultar i bra berg fördelade. Triangelfördelningen är en fördelningstyp som i grunden är mycket användbar, en del detaljproblem med denna föreligger dock, framförallt när det gäller extrema utfall. Detta problem diskuteras mer ingående av Sturk et al. (1996).

En annan fråga som rymts inom området subjektiva sannolikheter är frågan om hur man sammanväger olika experter (experternas kunskap). Detta är viktigt när det gäller detaljproblemet bergytans variation i det avseende att ordet experter kan ersättas av ordet variogram (egentligen en modell), det vill säga hur väger vi på ett optimalt sätt ihop olika möjliga modeller/variogram för ett specifikt område.

7.2.5 Kontrollfunktionen

Ett annat intressant område, som också är viktigt för helheten, är hur olika kontrollmetoder påverkar de osäkerheter vi initieellt arbetar med. En vanlig åtgärd inom undermarksbyggande är att man, i ett fall där man förutser ett problem, implementerar någon form av kontroll. Exempelvis kan man tänka sig att man som beställare är osäker på hur bergförstärkningen utförs i ett område med liten bergtäckning, en fråga som ju kan vara avgörande för tunnelns stabilitet. För att minska denna osäkerhet låter man en kontrollant inspektera entreprenörens förstärkningsarbete.

Riskanalytikern måste i detta fall ställa sig en mycket central fråga; ”hur mycket sänks sannolikheten för brott genom att beställarens kontrollant inspekterar entreprenörens förstärkningsarbete”? Denna fråga är viktig när det gäller ”mänsklig kontroll” men även när det gäller andra kontrollmetoder. En annan mycket svår och odefinierbar fråga är hur man hanterar ”en persons känsla av att något inte är bra”?

7.3 Prognosmodeller och bygganalys

Utarbetande av sannolikhetsbaserade prognoser och riskbaserad dimensionering är någonting som är på väg att slå igenom inom teknikbranschen generellt. I och med att en prognos som tar hänsyn till de ingående variabelernas osäkerheter introduceras, erhåller vi inte bara bättre prognoser (författarens uppfattning) utan också möjlighet att värdera prognosens giltighet. Detta område är stort och rymmer många av de detaljfrågor som beskrivits i rapporten. Det är dock ett önskemål att studera detta område/spår parallellt med de andra. Bland annat för att de på ett sätt går hand i hand.

8 REFERENSER

- Agib Wassif, A., 1992: "Interconnecting Tunnel for the America Pumping Station of the Greater Cairo Wastewater Project". Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 7, No. 2, pp. 145-148.
- Ahlgren, F., Karlsson, P-O., 1992: "Inledande riskanalys av inklädda bergrumslager för naturgas". Sydkraft Konsult AB, Sydgas AB. Intern rapport.
- Andersson, L., 1988: "The theory of possibility and fuzzy sets - New ideas for risk analysis and decision making". Document D8:1988, Swedish Council for Building Research, Stockholm.
- Ang, A. H-S., Tang, W. H., 1975: "Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume I - Basic Principles". John Wiley & Sons, New York.
- Ang, A. H-S., Tang, W. H., 1984: "Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume II - Decision, Risk and Reliability". John Wiley & Sons, New York.
- Avesta, 1989: "Livslängdskostnaden, LCC - Ett nytänkande vid materialval". Avesta Engineering & Economy.
- Bayes, T., 1763: "An essay towards solving a problem in the doctrine of chance". Philosophical Transactions of the Royal Society, 53, pp. 370-418.
- Benjamin, R. J., Cornell A. C., 1970: "Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers". McGraw-Hill, New York.
- Beyth-Marom, R., 1982: "How Probable is Probable? - A Numerical Translation of Verbal Probability Expressions". Journal of Forecasting, Vol 1, No. 3, pp. 257-269.
- Blom, G., 1989: "Sannolikhets teori och statistik teori med tillämpningar". 4:e upplagan, Studentlitteratur, Lund.
- Dube, A. K., Singh, B., 1981: "Overcoming squeezing pressures in India's Giri-Bata Tunnel". Tunnels & Tunnelling, April 1981.
- Einstein, H. H., 1994: "Determination of Rock Engineering Properties - Objective and Subjective Assessment of Uncertainty". Keynote Lecture, 4th South American Congress on Rock Mechanics, Santiago, Chile.
- Einstein, H. H., Dudt, J. P., Halabe, V. B., Descoeurdes, F., 1992: "Decision Aids in Tunneling - Principle and Practical Application". Monograph, Swiss Federal Office of Transportation.

- Einstein, H.H., Baecher G. B., 1983: "Probabilistic and Statistical Methods in Engineering Geology - Specific Methods and Examples, Part 1: Exploration". Rock Mechanics and Rock Engineering 16, pp. 39-72.
- Einstein, H. H., Markow, M. T., Chew, K., 1977: "Assessing the Value of Exploration for Underground Gas Storage Caverns". Proc. Rockstore, Stockholm.
- Einstein, H. H., Vick, S. G., 1974: "Geologic Model for a Tunnel Cost Model". Proc. 2nd North American Rapid Excavation and Tunneling Conference, pp. 1701-1720.
- Eng, T., Hudson, J. A., Stephansson, O., Skagius, K., Wiborgh, M., 1994: "Scenario development methodologies". SKB Technical Report 94-28, SKB AB, Stockholm.
- Freeze, R. A., Massmann, J., Smith, L., Sperling, T., James, B., 1990: "Hydrogeological Decision Analysis: 1. A Framework". Ground Water, Vol. 28, No. 5, pp. 738-766.
- Freeze, R. A., James, B., Massmann, J., Smith, L., Sperling, T., 1992: "Hydrogeological Decision Analysis: 1. A Framework". Ground Water, Vol. 30, No. 4, pp. 574-588.
- Fredriksson, A., Hässler, L., Johansson, J., Olsson, L., Olsson, T., 1994: "Passage av park väster om Bellevueberget med lindar från 1700-talet". Vägverket rapport RAP 0013, R/YT, Stockholm.
- Garshol, K., 1981: "Vannlekkasjer ved ekstreme trykk". Bergmekanikk, Oslo, 1981, pp. 24.1-24.7.
- Gilbert, R. B., Tang, W. H., 1995: "Model uncertainty in geotechnical reliability and decision analyses". Proc. Applications of Statistics and Probability, ICASP 7, Vol. 1, Lemaire, Favre & Mébarki (Eds.), Balkema, Rotterdam.
- Giles, D., 1994: "Geostatistical interpolation techniques for geotechnical data modelling and ground condition risk and reliability assessment". Proc. of Risk and reliability in ground engineering, Skipp (ed.), Thomas Telford, London.
- Gustafsson, L., Lanshammar, H., Sandblad, B., 1982: "System och modell - En introduktion till systemanalysen". Studentlitteratur, Lund.
- Hansson, S. O., 1991: "An overview of Decision Theory". National Board for Spent Nuclear Fuel, SKN Report 41, Stockholm.
- Harr, M. E., 1987: "Reliability-Based Design i Civil Engineering". McGraw-Hill.
- Harr, M. E., 1989: "Probabilistic Estimates for Multivariate Analyses". Appl. Math. Modelling, Vol. 13, May 1989, pp. 313-318.
- Heiner, A., Stille, H., 1990: "Ras i kraftverkstunnel, Norränge". BeFo 245:1/90, Swedish Rock Engineering Research Foundation, Stockholm.

- Hintze, S., 1994: "Risk Analysis in Foundation Engineering with Application to Piling in Loose Friction Soils in Urban Situations". Ph. D. Thesis, Div. Soil and Rock Mech., Royal Inst. of Technology, Stockholm.
- Honoré, J., Lichtenberg, S., 1978: "Erfaringer med Successiv Kalkulation - Resumé af en brugeranalyse". Byggeindustrien 10, pp. 451-457, Danmark.
- Hudson, J. A., 1992: "Rock Engineering Systems: Theory and Practice". Ellis Horwood Ltd., Chichester, p. 185.
- Isaaks, E. H., Srivastava, R. M., 1989: "An Introduction to Applied Geostatistics". Oxford University Press.
- Jaselskis, E. J., Russel, J. S., 1992: "Risk Analysis Approach to Selection of Contractor Evaluation Method". Journal of Construction Engineering and Management Vol. 118, No. 4, pp. 814-821, ASCE.
- Jethwa, J. L., Singh, B., Bhawani Singh, Mithal, R. S., 1980: "Influence of Geology on Tunnelling Conditions and Deformational Behaviour of Supports in Faulted Zones - A Case History of the Chhibro-Khodri Tunnel in India". Engineering Geology, 16, pp. 291-319.
- Johansson, H., Stille, B., 1995: "Squeezing Ground - Erfarenheter från utloppstunneln i Uri HPP". Examensarbete, KTH, Avd. för jord- och bergmekanik, Stockholm.
- Johansson, J., Olsson, L., Sturk, R., Tengborg, P., 1995: "Konstruktiv utformning av Ringentunnlarna med hänsyn till drift och underhåll - Användning av beslutsteori". Vägverket, R/YT, Intern rapport, Stockholm.
- Johansson, H., Olsson, L., Sturk, R., 1996: "Besluts- och riskanalys för Kvarnholmsvägen". Vägverket rapport, R/YT, Stockholm. (To be published).
- Kirwan, B., 1994: "A Guide to Practical Human Reliability Assessment". Taylor & Francis.
- Lange, N., Lichtenberg, S., 1986: "Sikker vurdering af usikre forhold". Byggeindustrien 37 (1986) nr 8, s 20-22.
- Malhotra, R. K., 1985: "Tunnel deviations in Northern India". Tunnels & Tunnelling, May, 1985, pp. 20-22.
- Mariotti, G., 1992: "402 headrace tunnel water inrush at PM 1195". Geoconseil Sa, France. (Internal report).
- Massmann, J., Freeze, R. A., Smith, L., Sperling, T., James, B., 1991: "Hydrogeological Decision Analysis: 2. Applications to Ground Water Contamination". Ground Water, Vol. 29, No. 4, pp. 536-548.

- Matheron, G., 1963: "Principles of Geostatistics". Economic Geology, Vol. 58, pp. 1246-1266.
- McCracken, A., Costellos, D., Armitage, M., 1994: "The use of Geostatistical Modelling and Reliability Methods in Geotechnical Design". Proc. of Risk assessment in the extractive industries, University of Exeter, Exeter.
- Moavenzadeh, F., Markow, M. J., Wyatt, R. D., Minott, C. H., 1974: "Tunnel Cost Model". Proc. 2nd North American Rapid Excavation and Tunneling Conference, pp. 1721-1739.
- Moselhi, O., Deb, B., 1993: "Project selection considering risk". Construction Management and Economics 11, No. 1, pp. 45-52.
- Möller, L., Ögård, L., 1983: "Successiva Metoden". Kompendium.
- Nord, G. (ed.), 1982: "Workshop 1 - 16-17/3 1982, Gothenburg". Skånska Cementgjuteriet, Danderyd. Intern rapport.
- Olsson, L., 1986: "Tillämpning av β -metoden inom Geotekniken - Illustrerad med sponthberäkning". Dr. Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Soil and Rock Mechanics, Stockholm.
- Olsson, L., Sandstedt, H., 1992: "Projects on Alternative Systems Study PASS: Comparisons of technology of KBS-3-MLH, VLH and VDH concepts by using an expert group". SKB Technical Report 92-42, Stockholm.
- Olsson, L., Stille, H., 1980: "Lönar sig en kompletternade grundundersökning? - Beslutsteori tillämpad på ett sponthningsobjekt". BFR-rapport R174:1980, Bygghforskningsrådet, Stockholm.
- Olsson, L., Sturk, R., 1994a: "Norra Länken, Jordtunnel under Bellevue-parken - Riskanalys 1 Felträd". Vägverket rapport RAP 0037, R/YT, Stockholm.
- Olsson, L., Sturk, R., 1994b: "Norra Länken - Norrtullspåfarten, Preliminär Riskanalys". Vägverket rapport RAP 0032, R/YT, Stockholm.
- Paek, J. H., Lee, Y. W., Ock, J. H., 1993: "Pricing Construction Risk: Fuzzy Set Application". Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 119, No. 4, pp. 743-756, ASCE.
- Raiffa, H., 1970: "Decision Analysis - Introductory Lectures on Choices under Uncertainty". Addison-Wesley Publishing Company, Reading.
- Rausand, M., 1991: "Risikoaalyse - Veiledning til NS 5814". SINTEF, Tapir, Trondheim.

- Rosén, L., 1995: "Estimation of Hydrogeological Properties in Vulnerability and Risk Assessment". Dr. Thesis, Dept. of Geology, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Rosenbleuth, E., 1975: "Point Estimates for Probability Moments". Proc. Nat. Acad. Sci. USA, Vol. 72, No. 10, pp. 3812-3814.
- Räddningsverket, 1989: "Att skydda och rädda liv, egendom och miljö - Handbok i kommunal riskanalys inom räddningstjänsten". Rosenberg (ed.), Räddningsverket, Karlstad.
- Saaty, T. L., 1988: "Multicriteria Decision Making - The Analytic Hierarchy Process (rev. ed.)". EWS Publications. Pittsburgh.
- Schyllander, J., 1995: "Begreppsapparaten". Riskcentrum, Nyhetsbrev 1/95, Riskcentrum, Karlstad.
- Selmer-Olsen, R., Palmstrøm, A., 1989: "Tunnel collapses in swelling clay zones". Tunnels & Tunnelling, November 1989.
- Sperling, T., Freeze, R. A., Massmann, J., Smith, L., James, B., 1992: "Hydrogeological Decision Analysis: 3. Application to Design of a Ground Water Control System at an Open Pit Mine". Ground Water, Vol. 30, No. 3, pp. 376-389.
- Staël von Holstein, C-A. S., 1974: "A Tutorial in Decision Analysis". Readings in Decision Analysis, Howard, Matheson & Miller (eds.), Stanford Research Institute, Menlo Park.
- Stattin, J., 1994: "Svåra vattenförhållanden i vägtunnel på Island". Bergsprängningskom-mitén, Diskussionsmöte BK-94, Bergdahl (ed.), Bergsprängningskommitén, Stockholm.
- Stephansson, O., Hudson, J. A., 1995: "The Factors Involved at Immersed Tunnel-Rock Tunnel Connecting Locations for the Stockholm Ring Road - Using Rock Engineering Systems (RES)". Bergmekanikdag 1995, Andersson (ed.), SveBeFo, Stockholm.
- Strömkvist, S., 1995: "Köper sig fria från tunneln". Sydsvenskan, Onsdagen den 17 maj 1995.
- Sturk, R., Olsson, L., Stille, H., Tengborg, P., 1994: "Construction Feasibility Analysis, TBM-tunnel Äspö Hard Rock Laboratory". SKB Progress Report 25-94-25, Stockholm.
- Sturk, R., Johansson, J., Olsson, L., Tengborg, P., Stille, H., 1995: "Risk- och beslutsanalys för stora undermarksprojekt med tillämpning på Ringentunnlarna". Bergmekanikdag 1995 - Föredrag, Andersson (ed.), SveBeFo, Stockholm.

- Sturk, R., Tengborg, P., Olsson, L., Stille, H., 1996: "Construction Feasibility Analysis, TBM-tunnel Äspö Hard Rock Laboratory, Phase II". SKB Progress Report, Stockholm. (To be published).
- Sällfors, G., 1990: "Punktskattningsmetoden - En statistisk metod användbar på geotekniska problem". CTH, Geohydrologiska Forskningsgruppen, Meddelande nr 89, Göteborg.
- Tengborg, P., 1996: "Risker i samband med planering, produktion, drift och underhåll av undermarksanläggningar". Forskningsrapport, Avd. för jord- och bergmekanik, KTH, Stockholm. (To be published).
- Terzaghi, K., 1946: "Introduction to tunnel geology ". Rock tunnelling with steel supports, Proctor & White, pp. 5-153.
- Vikman, S., 1993: "Riskanalys av produktionssystem" Faktarapport, Kvalitet Nr. V050008, Sveriges Verkstadsindustrier, Stockholm.
- Vrijling, J. K., Redeker, F. R., 1993: "The risks involved in major infrastructural projects". Options for Tunnelling 1993, Burger (ed.), Elsevier, Oxford.
- Wallis, S., 1993: "Storebaelt Review". World Tunnelling, April 1993.
- Wallis, S., 1994: "Tunnelling the Channel". World Tunnelling, Special Souvenir Supplement - No Longer an Island - Europe at the end of the Tunnel, April 1994.
- Westin, T., 1989: "Kostnads kalkylering med LCC-modell - Tillämpning för byggprocessens olika skeden". Byggforskningsrådet BFR, Rapport R27:1989, Stockholm.
- Wirstam, H., 1990: "A Probabilistic Decision Model for Ore Characterization and Mine Planning (Ramp Location)". Lic. Thesis, Luleå University of Technology, Division of Mining and Rock Excavation, 1990:04 L.