

# FÖRORD

SveBeFos projekt 825 ”Metodval vid tunneldrivning” har genomförts av Therese Isaksson inom ramen för SveBeFos forskningsprogram RP 1997-99 och FP 2000 och redovisats i doktorsavhandlingen ”Model for estimation of time and cost based on risk evaluation applied on tunnel projects” sommaren 2002. Vetenskapliga handledare har varit Håkan Stille och Lars Olsson. Projektet har också redovisats i konferens- och tidskriftsartiklar, senast i en artikel insänd till Rock Mechanics and Rock Engineering. Föreliggande rapport baseras på denna artikel och utgör samtidigt projektets slutrapport.

Projektet har följts av en referensgrupp, där särskilt medverkan från gruppens ordförande Per Hogård, Skanska, och de tidigare medarbetarna vid SveBeFo, Per Andersson, numera Vägverket, och Ann Emmelin, numera SKB, bör nämnas. Vi noterar också tacksamt den kompletterande finansiering som erhållits från Skanska, SBUF och Banverket.

Stockholm i juni 2003

Tomas Franzén

## SAMMANFATTNING

I planerings- och upphandlingsfasen för tunnelprojekt måste ett flertal beslut beträffande anbudspris och projektbudget fattas. Litteraturstudier visar, att tidplaner och kostnadsramar för tunnelprojekt ofta överskrids. I denna studie har det fastslagits, att det finns olika riskfaktorer med olika påverkan på kostnader och tider i tunnelprojekt. Slutsatsen har därför dragits, att det är viktigt att göra en tydlig skillnad mellan normal tid och kostnad för ett projekt och oönskade händelser, som orsakar exceptionell tid och kostnad. Befintliga metoder för beslutshjälp, som hanterar variationer i variabler skiljer inte på normal tid eller kostnad och oönskade händelser i beräkningarna.

Beräkning av byggtid och kostnad för ett projekt görs ofta deterministiskt. Det finns dock ett behov av att hantera variationer i tids- och kostnadsvariablerna i beräkningarna. Om variablerna är stokastiska uttrycks den totala tiden eller kostnaden för en drivningsmetod som en fördelningskurva, och beslutsunderlag om vilken metod som skall användas innefattar en jämförelse mellan deras respektive tids- och kostnadsfördelning. Baserat på dessa underlag måste budget och anbudspris bestämmas av byggherren respektive entreprenören. För att kunna motsvara de krav som ställs på basen för beslutsfattande om anbudspris och budget, har en ny beräkningsmodell utvecklats.

Beräkningsmodellen, som beskrivs i denna rapport, har också applicerats på fallstudier. Appliceringen på fallstudien visar, att resultatet som erhålles från beräkningarna med modellen är realistiska, då den beräknade totala byggtiden och kostnaden i stora drag överensstämmer med verklig byggtid och kostnad. Den separata beräkningen av normal och exceptionell tid och kostnad bidrar till tydligheten hos resultatet. Tillämpningen av den föreslagna beräkningsmodellen visar också, att den tunneldrivningsmetod, som är mest lämpad för det aktuella geologiska och hydrogeologiska förhållandena, kan väljas med hjälp av modellen.

Nyckelord: Risk, beräkning, kostnad, tid, Monte Carlo simulering, tunnel.

## SUMMARY

In the planning and procurement phases of tunnel projects, numerous decisions have to be made in relation to the tender price and project budget. Literature studies show that time schedules and costs for tunnelling projects are often exceeded. In this study it has been stated that there are various risk factors with different impacts on cost and time in tunnelling projects. It has therefore been concluded that it is important to make a clear distinction between *normal cost and time* for a project and the *undesirable events* that cause *exceptional* cost and time. Existing decision-aid estimation models, which handle variations in variables do not consider normal time or cost and undesirable events separately in the estimations.

Estimations of project time and cost are normally made in a deterministic manner. There is however, a need to be able to handle variation in cost and time variables in the estimation. If the variables are stochastic, the total cost of a tunnelling method is expressed as a distribution curve, and the decision about which tunnelling method to use involves comparing their respective time- and cost distributions. Based on these decisions, the budget and tender price have to be determined by the client and contractor respectively. In order to respond to the demands placed on the basis for decision-making about tender price and budget, a new model for estimation has been developed.

The estimation model described in this report has also been applied to case studies. The application on the case study shows that the results obtained from the estimation model are realistic, as the estimated total construction time and cost roughly correspond to the actual construction time and cost. The separate estimation of normal and exceptional time and cost contribute to the clearness of the result. Application of the proposed estimation model also shows that the tunnelling method most suitable for the actual geological and hydrogeological conditions can be selected using the model.

*Key words:* Risk, Estimation, Cost, Time, Monte Carlo simulation, Tunnel.

# NOMENKLATUR

## Romerska bokstäver

$C_e$	Exceptional cost
$C_{ek}$	Exceptional cost for the undesirable event “k”
$C_i$	Cost of a zone
$C_{ik}$	Consequence of undesirable event “k”
$C_n$	Normal cost
$C_{Ni}$	Normal cost in zone i
$C_{tot}$	Total cost
$d_l$	Distance between mean crossings
$E(y)$	Expectation of production effort
$g(x(l))$	Production effort
i	Event type
j	Cost type
k	Event number
L	Tunnel length
$m_i$	Mean value
$m_Q$	Mean value of the production effort
$m_z$	Mean value of the cost variable
p	Probability for undesirable event
T	Working time
t	Time
$x(l)$	Geotechnical characteristic
y	Production effort
z	Cost variable

## Grekiska bokstäver

$\Gamma_g$	Reduction factor
$\delta_l$	Scale of fluctuation
$\sigma_i$	Standard deviation (production effort)
$\sigma_Q$	Standard deviation of the production effort
$\sigma_y$	Standard deviation at a point
$\sigma_z$	Standard deviation of the cost variable

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>FÖRORD</b> .....	<b>I</b>
<b>SAMMANFATTNING</b> .....	<b>II</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>III</b>
<b>NOMENKLATUR</b> .....	<b>IV</b>
<b>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</b> .....	<b>V</b>
<b>1 INLEDNING</b> .....	<b>1</b>
<b>2 KRAV PÅ BERÄKNINGSMODELL FÖR TUNNELPROJEKT</b> .....	<b>2</b>
2.1 INLEDNING.....	2
2.2 RISKER I TUNNELPROJEKT.....	4
2.2.1 <i>Inledning</i> .....	4
2.2.2 <i>Egenskaper hos tunnelprojekt</i> .....	4
2.2.3 <i>Risikfaktorer i tunneldrivningsprocessen</i> .....	5
2.3 BESLUTFATTANDE .....	7
<b>3 BERÄKNING AV TID OCH KOSTNADER</b> .....	<b>10</b>
3.1 INLEDNING.....	10
3.2 TEORETISK BERÄKNINGSMODELL .....	11
3.2.1 <i>Ingående parametrar</i> .....	11
3.2.2 <i>Normal tid och kostnad</i> .....	11
3.2.3 <i>Exceptionell tid och kostnad</i> .....	15
3.2.4 <i>Slutliga kommentarer om den teoretiska modellen</i> .....	16
3.3 PRAKTISK MODELLERING.....	16
3.3.1 <i>Inledning till praktisk modellering</i> .....	16
3.3.2 <i>Modellering av normal variation hos kostnader och tider</i> .....	17
3.3.3 <i>Modellering av oönskade händelser</i> .....	18
3.3.4 <i>Simulering</i> .....	20
<b>4 FALLSTUDIE: GRAUHOLZTUNNELN</b> .....	<b>21</b>
4.1 INLEDNING.....	21
4.2 BESKRIVNING AV PROJEKTET.....	21
4.2.1 <i>Inledning</i> .....	21
4.2.2 <i>Geologi och hydrogeologi</i> .....	21
4.2.3 <i>Tunneldrivningsmetoder och motsvarande robusthetshöjande åtgärder</i> .....	22
4.3 RESULTAT AV BERÄKNINGARNA .....	24
4.4 FAKTORERS INVERKAN PÅ RESULTATET .....	26
<b>5 SLUTSATSER</b> .....	<b>32</b>
<b>6 REFERENSER</b> .....	<b>34</b>

# 1 INLEDNING

Utbyggnad av infrastrukturen i form av väg och järnvägsnät planeras och utförs i Sverige och Europa. På grund av funktionella, estetiska och miljömässiga skäl planeras en stor del av dessa utbyggnader som tunnlar. Vid planering och upphandling av tunnelprojekt måste en mängd beslut fattas, speciellt i samband med fastläggande av anbudspris och budget.

En ordentlig grund för beslutsfattande är därför viktigt att ha. Beräkning av total byggtid och total byggkostnad är grunden för många beslut. Litteraturstudier visar, att tider och kostnader ofta överskrids. En orsak till detta är, att trycket från olika intressenter, inklusive politiker, ofta kan leda till att man väljer en oriktig grund för beslut. För att reducera tids- och kostnadsöverskridanden ställs det andra krav på beslutsunderlag än de som används i nuvarande praxis.

Syftet med denna rapport är att redovisa en modell för beräkning av byggtid och kostnad som kan förbättra kvaliteten på basen för beslut om anbudspris och budget för tunnelprojekt. För en mer omfattande beskrivning av den föreslagna modellen, se (Isaksson 2002). Beräkningsmodellen kvantifierar risker för olika tunneldrivningsmetoder. För att välja bästa tunneldrivningsmetod beaktas olika grader av robusthetshöjande åtgärder hos drivningsmetoden avseende risker och erforderliga produktionsansträngningar (production effort). Resultatet kan därför användas för olika beslut. Eftersom varje undermarksprojekt har ett speciellt ändamål, krav, läge och omgivande miljö, måste man utföra en riskanalys, för de aktuella förhållanden i varje projekt.

Rapporten behandlar problemet med beräkning av tid och kostnad och presenterar en modell för analys och kvantifiering av risker som bas för beslutsfattande för tunnelprojekt. Att enbart beräkna baskostnaderna ger inte en tillräckligt adekvat grund för denna typ av beslut. Däremot kan en modell, som tar hänsyn till inverkan av olika geologiska faktorer vid beräkningen av risker och produktionsansträngning göra det. Modellen har samma syfte som Decision Aids in Tunnelling (DAT), ett simuleringsprogram utvecklat vid Massachusetts Institute of Technology (MIT) (Einstein & Vick, 1974; Einstein et al., 1991; Salazar, 1983), men tar hänsyn till risker separat i beräkningen.

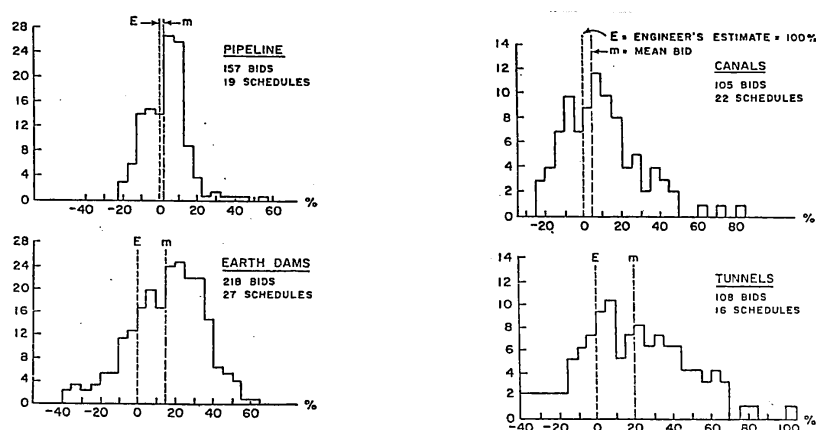
## 2 KRAV PÅ BERÄKNINGSMODELL FÖR TUNNELPROJEKT

### 2.1 Inledning

Kunskaper om kostnader och tider för byggprojekt utgör normalt bas för viktiga beslut. För att erhålla information om kostnader och tid för ett projekt måste särskilda beräkningar göras. Ändamålet med detta avsnitt är att visa på vilka krav som ställs på en modell för beräkning av kostnad och tid för tunnelprojekt, som tar hänsyn till risker.

Som alla byggprojekt påverkas även tunnelprojekt av störningar. Tunneldrivningsprocessen kan ses som en cyklisk process, där huvudaktiviteterna utförs i serier (Salazar 1985). Störningar har ofta större inverkan på kostnad och tid i projekt av seriell typ, såsom tunnelprojekt, än i andra typer av projekt. Störningar orsakas ofta av faktorer såsom geologiska, tekniska (utrustning och maskiner) och ekonomiska. Dessa faktorer är ofta korrelerade och kan leda till en ökning av verkliga tider och kostnader jämfört med de förväntade.

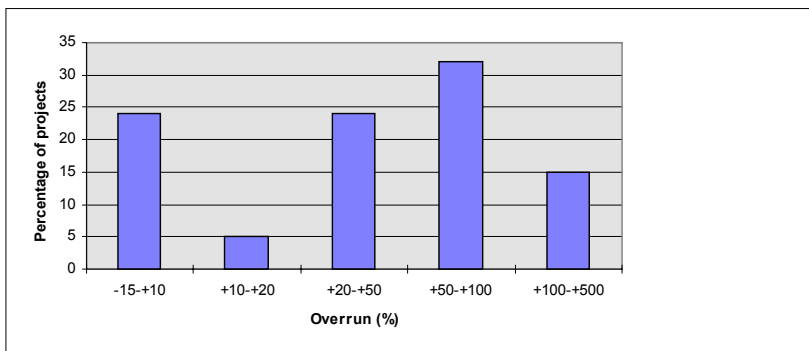
Figur 1 visar inverkan av den högre grad av osäkerhet som finns i tunnelprojekt jämfört med andra typer av konstruktioner. Figuren visar, att ovanmarksprojekt med en relativt enkel produktionsprocess, såsom pipeline projekt, har en mindre spridning hos anbudspriserna än mer komplexa undermarksprojekt. Variationen mellan anbudens medelvärde och ursprungligen beräknade kostnader är också större för tunnelprojekt.



Figur 1. Anbudsdata för fyra typer av tunga konstruktionsprojekt (Bureau of reclamation projects 1965-70). Histogrammen visar antalet anbud mot procentuella skillnaden av konsultens beräkningar (Moavenzadeh & Markow, 1976).

Figure. 1. Tender data for four types of heavy-construction projects (Bureau of Reclamation Projects, 1965-70). Histograms showing the number of tenders vs. percentage difference from the engineer's estimate (Moavenzadeh & Markow, 1976).

Kunskap om förekomsten och storleken på tids- och kostnadsöverskridanden i tunnelprojekt kan erhållas genom att studera olika infrastrukturprojekt (inkl. tunnlar), vilket har gjorts t.ex. av Kastbjerg (1994), Andreossi (1998), Nylén (1999) and HSE (1996). En studie av 180 projekt på olika platser i världen på 1960 talet, gjord av Merewitz visar, att kostnadsöverskridanden på omkring 50 % var relativt vanliga (se Kastbjerg, 1994). Studien visade, att kostnadsöverskridandena tenderade att öka för tunnlar för höghastighetståg vid användandet av den senaste tekniken, jämfört med pågående byggnads- och renoveringsprojekt. Större projekt hade också högre kostnadsöverskridanden än mindre projekt. Den vanliga orsaken till dessa överskridanden var inflation och oförutsedda ändringar, som uppstått efter igångsättning av projektet. I en studie av 41 infrastrukturprojekt (inkluderande tunnlar och broar) utförd av Kastbjerg 1994 visade det sig, att större delen av projekten hade kostnadsöverskridanden på över 50 %. I 32 % av projekten låg kostnadsöverskridandena mellan 50 och 100 % (se figur 2). Kastbjerg fann också, att vissa byggprojekt i utvecklingsländerna hade kostnadsöverskridanden på upp till 500 %.



Figur 2 Kostnadsöverskridanden i 41 infrastrukturprojekt enligt Kastbjerg (1994).

Figure 2 Construction cost overruns in 41 infrastructure projects, after Kastbjerg (1994).

Av ovanstående studier kan man konstatera, att byggkostnaderna ofta underskattas och att kostnaderna ökar under projektets gång. Ju tidigare en beräkning är gjord desto större är den potentiella kostnadsökningen.

Data som insamlats från olika ställen i världen presenterade av HSE (1996) visar, att ras i tunnlar speciellt vid tunnlar som byggts i jord i bebyggda områden kan leda till betydande konsekvenser för dem som arbetar i tunneln, allmänheten, infrastrukturen och omgivningarna.

Kostnaden för undermålig kvalitet (kvalitetsfel) i större anläggningsprojekt i Sverige har studerats av Nylén (1999). Kostnaden för kvalitetsfel hos de studerade projekten uppgick till mellan 8-12 % av den totala byggkostnaden.

Av de ovannämnda studierna framgår, att stora kostnads- och tidsökningar jämfört med de förväntade värdena ofta inträffar. Detta visar på möjliga brister hos dagens beräkningsmetoder.

Beräkning av budget och anbudspris i byggprojekt görs idag deterministiskt. Principen för en deterministisk beräkning av byggtider och kostnader har diskuterats i litteraturen



(Quellmelz, 1987; Platz, 1991). Det finns många olika kostnadstyper, som skall beaktas vid beräkningarna. Dessa kostnadstyper kan vara baskostnader och overhead kostnader (Drees & Bahner, 1992; Bunner et al., 1981).

Ovanstående artiklar visar, att en mängd av information och data är nödvändig för att utföra beräkningen. Det är viktigt, att de data som används i beräkningarna är relevanta. Information och data som erfordras baseras ofta på antaganden och subjektiva bedömningar (Danielson, 1975).

I en deterministisk beräkning används endast ett värde för indata oavsett att många antaganden har gjorts, vilket innebär, att resultatet från beräkningarna inte tar hänsyn till variationer och osäkerheter i data. Detta kan vara en anledning till att det är så vanligt att tider och kostnader underskattas i tunnelprojekt. Det borde därför vara möjligt att åtminstone delvis eliminera överskridanden. Att förbättra kvaliteten hos de beräkningar, som används för anbudsgivning och budgetering, är därför en målsättning (RRV, 1994)

Ett steg mot att förbättra kvaliteten på dessa beräkningar kan vara att använda ett system, som beaktar risker på ett stringent sätt.

## **2.2 Risker i tunnelprojekt**

### **2.2.1 Inledning**

Tunnelprojekt är ofta stora både vad gäller erforderliga mängder och kapital. Dessa projekt är styrda och bundna av lagar, regler och miljökrav. Det finns alltid en osäkerhet beträffande grundförhållandena på och omkring byggplatsen. Ett stort antal människor och intressenter är involverade i processen, tex arkitekter, geologer, tunnelspecialister, konsulter, bygglidare och miljörepresentanter (Reilly et al, 1998). Subjektiva intressen, politiskt tryck eller manipulering påverkar ofta kritiska beslut, vilket direkt kan påverka tider och kostnader för tunnelprojektet (Kastbjerg, 1994). Resultatet av ovanstående är, att tunnelprojekt är utsatta för risker.

I detta avsnitt diskuteras egenskaperna hos tunnelprojekt, riskfaktorer som kan påverka dessa projekt samt effekten av använd kontraktsform på olika parter ansvar för kostnadsökningar, som kan uppstå under projektets gång.

### **2.2.2 Egenskaper hos tunnelprojekt**

Tunnelprojekt karakteriseras av ett antal olika faktorer. En faktor är det sätt på vilket byggprocessen utförs. Enligt Salazar (1985), Müller (1978) och andra kan tunnelbyggprocessen beskrivas som ett seriesystem, där huvudaktiviteterna ligger i serier längs den kritiska linjen. Vid stillestånd i en aktivitet, t.ex. beroende på haveri i en maskinkomponent, såsom huvudlagret i en TBM, kan detta ofta resultera i att hela drivningsprocessen stoppas (Kovari et al, 1991; Maidl, 1988).

Den totalt tänkta tiden från byggets planering till dess slut bestäms ofta inte av drivningsmetoden, de geologiska förhållandena eller projektspecifika faktorer utan av en

tidsram, som bestämts av byggherren eller finansiärer (Andreossi, 1998). Eftersom byggtiden ofta måste pressas för att passa in i tidsramarna, finns det ingen bufferttid för att komma till rätta med störningar.

Arbetsprocessen påverkas också av möjligheten att arbeta parallellt, med andra ord olika delar av konstruktionen samtidigt. Husbyggen är ett exempel på byggnadstyp där det är möjligt att arbeta med olika byggnadsdelar samtidigt. I tunnelprocessen däremot är det ofta inte möjligt att ändra aktuellt arbetsställe, eftersom varje salva måste utföras efter varandra. Det kan dock vara möjligt att reducera byggtiden för tunnlar, nämligen genom att öka antalet tunnelfronter.

En annan egenskap som karakteriserar tunnelprojekt är det stora kapital som erfordras för bygget. En orsak till detta är den ökande graden av mekanisering i drivningsprocessen, som kräver investeringar i kostsamma maskiner och utrustning. Den ökande efterfrågan på korta byggtider och det ökande antalet långa tunnlar bidrar till en ökad grad av mekanisering (Kovari et al, 1991). Maskinerna och utrustningen kräver kunnig personal för att hantera dessa korrekt och en väl fungerande organisation med snabbt informationsflöde (Tengborg et al., 1998).

### 2.2.3 Riskfaktorer i tunneldrivningsprocessen

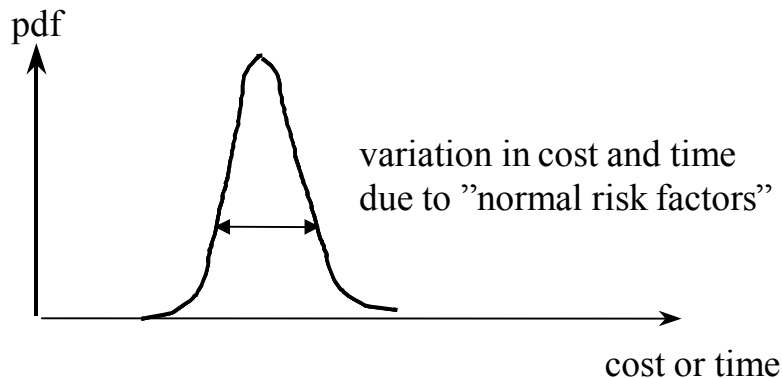
När man planerar ett tunnelprojekt är det många arbetssteg, som kräver antaganden och beräkningar. Till exempel måste geologiska undersökningar göras som aldrig kan vara heltäckande och tunneln designas utifrån tolkade data. Jord och bergklasser och förstärkningsåtgärder för tunneln måste tas fram. Mängden av byggmaterial och uttagsmassor måste beräknas. Maskiner och utrustning måste väljas för arbetet.

Avvikelser mellan antagna och verkliga förhållanden beträffande jord och bergkvaliten eller mängder förekommer ofta. Dessa kan orsaka ökning eller minskning i kostnader och tid jämfört med de planerade. Olika riskfaktorer kan påverka antagandena och beräkningarna på olika sätt. Riskfaktorerna kan delas upp i olika kategorier, de som rör t.ex. byggnad, kapacitet, kontrakt, finansiering, ekonomi, politik och sociala samt psykologiska (Charoenngam & Yeh, 1999; Chapman et al, 1981)

Termer, som beskriver olika riskfaktorer, har använts på ett något förvirrande sätt i litteraturen . (Chapman et al., 1981; Charoenngam & Yeh, 1999). Termen "variation orsakad av normala riskfaktorer" eller "normala risker" definieras enligt Chapman et al. (1981) som risker, som är möjliga att beakta och ta hänsyn till i en riskanalys. Termer såsom "abnorma risker", "osannolika händelser" och "abnorma variationer orsakade av normala riskfaktorer" har använts i litteraturen som en beskrivning av risker med mycket liten eller praktiskt tagen ingen sannolikhet att de inträffar och är följaktligen inte beaktade. Chapman et al. (1981) beskriver dessa risker, som om de ligger utanför det studerade området. Konsekvenserna av sådana risker kan emellertid orsaka stora förseningar hos projektet.

Erfarenheter från tunnelprojekt på olika håll i världen visar, att den större delen av kostnads- och tidsöverskridanden kan inträffa på grund av faktorer, som inte beaktats i beräkningarna (Kovari et al., 1991; HSE, 1996; John et al., 1987). Dessa faktorer inträffar med en sannolikhet, som är högre än försumbar och är förknippad med konsekvenser.

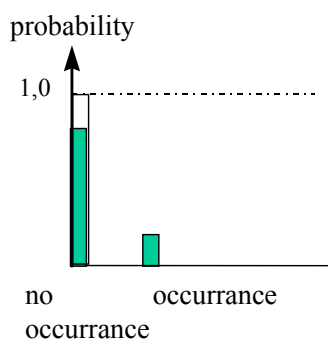
Baserat på ovanstående kommer följande definitioner att användas i denna studie. Variationer kan orsakas av avvikelser i tid och kostnader beroende på normala riskfaktorer. *Normala riskfaktorer* kan definieras som ”faktorer som orsakar avvikelser inom det normala tids- och kostnadsspannet”. Variation orsakad av normala riskfaktorer kan beskrivas som en kontinuerlig fördelning (se figur 3) och kan relateras till byggandet, t.ex. mängder av byggmaterial eller kapacitetsrelaterade faktorer som t.ex. framdrift hos drivningsmetoden. Inverkan på kostnader eller tider av normala riskfaktorer har beaktats i management och beslutshjälpssystem för byggprojekt. (Salazar, 1985; Nelson et al., 1994; Moavenzadeh & Markow, 1976; Lichtenberg, 1990).



*Figur 3 Variation i kostnad och tid beroende på "normala riskfaktorer"*

*Figure 3 Variation in cost and time due to "normal risk factors".*

I denna studie används termen ”oönskad händelse” och detta kan definieras som ”en händelse som orsakar större och oplanerade ändringar i drivningsprocessen”. Dessa oönskade händelser kan beaktas i beräkningen, men det finns lite statistiskt dataunderlag att tillgå avseende deras sannolikhet och konsekvens. De orsakar ökning av kostnader och tid och kan beaktas som enstaka, ej kontinuerliga händelser. Figur 4 illustrerar förekomsten av oönskade händelser.



*Figur 4 Principen för förekomsten av oönskade händelser.*

*Figure 4 Principle for the occurrence of an undesirable event.*

Oönskade händelser kan inträffa på grund av exempelvis inkompetens, ignorans eller brister i kvalitetssäkringssystemet.

En sammanfattning av faktorer, som orsakar variationer i kostnader och tid, visas i tabell 1.

**Tabell 1 Beskrivning av faktorer som orsakar förändringar i kostnader och tid använda i denna studie.**

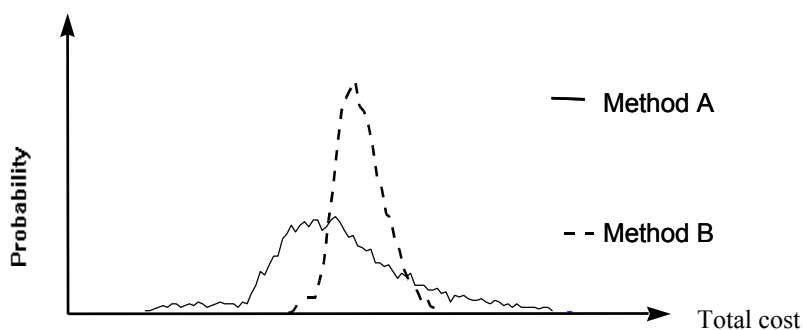
**Table 1 Descriptions of factors causing changes in costs and time used in this study.**

Typ av faktor	Definition	Sannolikhet för inträffande	Beskrivning av sannolikheten	Konsekvens	Exempel
Normal riskfaktor.	Faktor som orsakar avvikelser i det normala spannet.	Säker.	Inträffar med säkerhet såsom fysiska förhållanden eller processer som inte kan beskrivas och specificeras med total säkerhet	Variation orsakad av normala riskfaktorer i kostnad och tid.	Byggmaterialpriser, arbetskostnader och framdrift.
Oönskad händelse.	Händelser som orsakar stora oplanerade ändringar i drivningsprocessen.	Ej försumbar.	Inträffar troligen eller mindre troligt. Möjligheten är osäker men kan inte helt bortses ifrån baserat på fysiska och andra orsaker.	Exceptionell kostnad och tid.	Tunnelras. Fel på huvudmaskin komponenter, översvämning.

Beslut måste sedan baseras på resultatet av beräkningar av tider och kostnader beträffande t.ex. tunneldrivningsmetod, budget och anbudspris. Hur dessa beslut kan fattas plus faktorer som påverkar dessa beslut diskuteras i nästa avsnitt.

### 2.3 Beslutsfattande

Som diskuterats i föregående avsnitt är det viktigt att ta hänsyn till olika typer av riskfaktorer vid beräkningen av tid och kostnad för tunnelprojekt. Tiden och kostnaden för de olika riskerna kan beskrivas som fördelningar. Således kan den totala tiden och kostnaden för ett projekt, som tar hänsyn till olika risker beskrivas som en fördelningskurva. Många faktorer påverkar utseendet av fördelningskurvan. Olika tunneldrivningsmetoder ger fördelningskurvor beroende på metodspecifika faktorer som erforderliga förstärkningsåtgärder, maskiner och utrustning. Vilken tunneldrivningsmetod och vilka riskfaktorer som man tar hänsyn till, påverkar fördelningen av den totala kostnaden för en tunneldrivningsmetod. Ansvaret hos respektive part (byggherre och entreprenör) för ökning av kostnader och tider, som kan tänkas inträffa beroende på olika riskfaktorer, beror på kontraktsform och projektskede. Figur 5 visar möjliga fördelningar av den totala kostnaden för tunneldrivningsmetod A och B.



Figur 5 Exempel på kostnadsfördelning för två olika tunneldrivningsmetoder

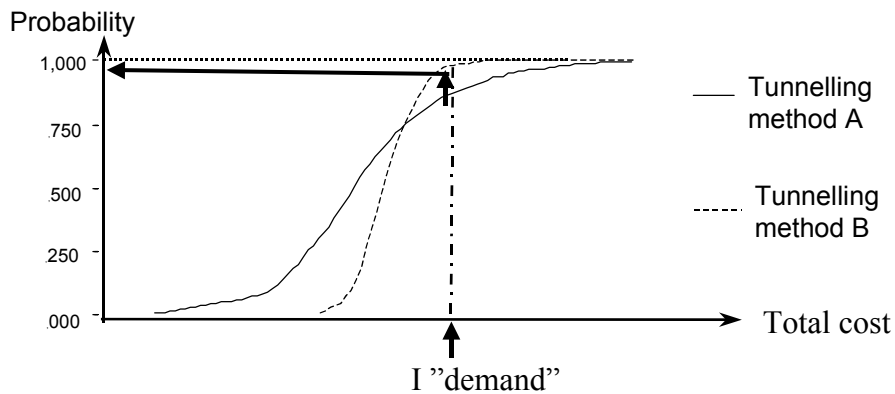
Figure 5 Example of cost distribution for two different tunnelling methods.

Naturligtvis finns det många beslut som måste fattas vid planering av tunnelprojekt. Två av de stora besluten för alla projekt är att bestämma:

- Tunneldrivningsmetod
- Budget och anbudspris

Att välja tunneldrivningsmetod erfordrar beslutsanalysmetoder och kriterier, som beaktar fördelningar. Olika beslutskriterier kan användas för att välja mellan tunneldrivningsmetoder. Beslut om budget eller anbudspris baseras på fördelningskurvan hos den valda drivningsmetoden.

Det är vanligt i dag för beslutsfattare att fastställa budget eller anbudspris genom att använda deterministisk metod. Faktorer som reducerar eller ökar den beräknade totala kostnaden bestäms subjektivt. Genom att använda ett sådant tillvägagångssätt är möjliga öknings i kostnader och tider inte beaktade på ett stringent sätt. Ibland används kvalitativ och mera sällan kvantitativ riskanalys. Eftersom kostnads- och tidsöverskridanden ofta inträffar, kan detta vara ett tecken på att detta förfarande är otillräckligt. Det finns emellertid några tillgängliga metoder som stöd för beslut om tunneldrivningsmetod och anbuds- eller budgetspris. Den minsta förväntade totala kostnaden ( $\min E(C)$ ) är ett exempel på användning av Bayes' beslutskriterium, vilket kan användas för beslut mellan fördelningskurvor (Benjamin & Cornell, 1970). Användandet av endast det förväntade värdet som beslutskriterium leder ofta till felaktiga slutsatser och missförstånd vid beslutsfattande (Haimes, 1985). Beslutet om vilken tunneldrivningsmetod som skall användas kanske därför inte nödvändigtvis behöver vara att hitta den med den lägsta förväntade kostnaden. Istället kan också variationen eller sannolikheten för att överskrida ett visst värde skall beaktas. I vissa fall, när en metod (A) har ett lägre medelvärde men större variation än en annan metod med ett högre medelvärde men en mindre variation (B), kan det vara att föredra att välja metoden med den mindre variationen (se figur 6). Figuren visar, att sannolikheten att överskrida den totala kostnaden "I" är lägre för tunneldrivningsmetod (B) än för metod (A).



Figur 6 Illustration av kumulativ fördelning av total kostnad för tunneldrivningsmetod A och B.

Figure 6 Illustration of the cumulative distribution of total cost for tunnelling methods A and B.

Eftersom det finns olika parter involverade i tunnelprojekt, är psykologiska faktorer viktiga att beakta vid beslutsfattande. Beslutsanalysmetoder, som tar hänsyn till hur en individuell beslutsfattare ser på ett beslut under osäkerhet, har diskuterats i litteraturen av t.ex. Bell et al (1988).

Ansvar för ökning i kostnader och tider, som kan tänkas inträffa, är en viktig faktor för byggherren och entreprenören vid beräkning av totala kostnader för ett projekt. Kontraktmetoden som använts innefattar typen av organisation, betalning och belöningsystem och påverkar ansvaret för alla inblandade parter. Om riskerna inte är korrekt fördelade, kan detta resultera i extraräkningar och stämningar under och efter byggtiden (Reilly et al., 1999; Isaksson et al 1999a,b).

I nästa avsnitt redovisas en detaljerad struktur för en beräkningsmodell för tunnelprojekt, som beaktar de krav som diskuterats här.

## 3 BERÄKNING AV TID OCH KOSTNADER

### 3.1 Inledning

Detta avsnitt innehåller både den teoretiska bakgrunden för en beräkningsmodell och några praktiska tillämpningar. Principerna för beräkningen av tid och kostnad diskuteras liksom hur indata, som erfordras för modellen, skall erhållas. Som vid all annan modellering är det viktigt att inse, att denna modell endast är en beskrivning av verkligheten med syfte att utgöra ett effektivt verktyg som hjälp vid beslutsfattande.

Det finns för närvarande ett antal verktyg för beslutshjälp, som används för beräkning av byggkostnader och tid och som tar hänsyn till osäkerheten. Decision Aids in Tunnelling och Successiva metoden är verktyg, som har använts vid tunnelprojekt i Europa.

Decision Aids in Tunnelling (DAT) utvecklades på 1970-talet. Det har tillämpats på projekt i Schweiz, Italien och Frankrike, t.ex. Gotthardstunneln och Lötschbergstunneln (Einstein et al., 1987, 1991, 1996; Salazar, 1983). Resultaten från Monte Carlo simuleringar med programmet ger ett punktdiagram, som visar varje simulerad tid och kostnad som en separat punkt. DAT-metoden beaktar variation hos indata, beroende på *tekniska variabler* som t.ex. kapaciteten för olika arbetsmoment, som erfordras (t.ex. borrning eller utlastning), *sannolikhetsbaserade variabler* såsom oväntade misstag, *frekvent förekommande variabler*, såsom stilleståndstid för oplanerat underhåll och kostnadsvariabler. Inverkan av oönskade händelser såsom de definieras i denna studie – oönskade händelser som orsakar större oplanerade ändringar i metoden – beaktas uppenbarligen inte i DAT-beräkningar.

Successiva metoden är ett annat management verktyg, som kan användas för att beräkna kostnader och tider under osäkerhet i byggprojekt. Den utvecklades i Danmark på 1970-talet och den har använts på tunnelprojekt i Danmark, Norge och Sverige, t.ex. Citytunneln i Malmö (Lichtenberg, 1990; Nilsen et al., 1999; Wallis, 1993). I successiva metoden behandlas subjektiva bedömningar med statistiska regler. Taylor-approximation används vid beräkning av okorrelerade stokastiska variabler. Successiva metoden utvecklades för att användas på byggnader. Taylor-approximation kan hantera variation hos en variabel – t.ex. enhetspriser – relativt enkelt. Variablerna antas vara okorrelerade. I tunnelprojekt däremot måste variation i flera variabler kunna hanteras, som t.ex. mängder och enhetspriser.

Begränsningarna med denna metod är likartade med dem som DAT-metoden har, där påverkan av oönskade händelser, som de definieras i denna studie, inte beaktas i beräkningarna. Faktorer, som påverkar hela projektet, s.k. ”generella förhållanden” behandlas som separata poster. Exempel på generella förhållanden är löner, problem med myndigheter, väder och kvalitet. För att erhålla de verkliga extremvärdena i beräkningen av dessa poster anges den nedre och övre gränsen för den 1:a respektive 99:e percentilen. Vidare beaktas inte tunnelspecifika faktorer, såsom sannolikheten för olika geologiska

förhållanden och deras påverkan på framdriften i denna modell. Dessa problem måste behandlas separat och resultatet indirekt integreras i modellen.

## 3.2 Teoretisk beräkningsmodell

### 3.2.1 Ingående parametrar

Såsom i alla geotekniskt baserade problem måste många av parametrarna uttryckas som stokastiska variabler. Totala tiden eller kostnaden kan därför uttryckas som en funktion av flera variabler, både deterministiska ( $a_i$ ) och stokastiska ( $b_i$ ):

$$C = f(\dots, a_i, \dots, b_i, \dots) \quad 1$$

Vissa av variablerna i funktionen är korrelerade, vilket måste beaktas i beräkningen av totala tider och kostnader.

Som diskuterats i avsnitt 2 finns det en *normal* tid och kostnad och en *exceptionell* tid och kostnad. Den totala tiden eller kostnaden ( $C$ ) för ett projekt kan i princip uttryckas som summan av den normala tiden eller kostnaden ( $C_n$ ) och den exceptionella tiden eller kostnaden ( $C_e$ ):

$$C = C_n + C_e \quad 2$$

Som diskuterats i avsnitt 2 är definitionen av oönskade händelser och normal tid subjektiv, vilket tydligt framgår av definitionen av en oönskad händelse, såsom ”en faktor som orsakar stora oplanerade ändringar i tunneldrivningsprocessen”.

Termen *framdrift* används i denna studie för att uttrycka kapaciteten för en drivningsmetod som ”längden av en driven tunnel per tidsenhet” (till exempel m/dag). I beräkningsmodellen är emellertid inversen av framdriften – ”tidsförbrukningen för att driva en enhet tunnel med en viss drivningsmetod” (till exempel h/m) – använd för att förenkla den matematiska behandlingen. Termen som används för denna invers i denna studie är *produktionsansträngning (production effort)*, dvs insats för producerad enhet. Andra exempel på produktionsansträngning är mängder, som måste utföras per tunnelenhet, till exempel mängd sprutbetong.

Beräkning av normala tider och kostnader liksom exceptionella tider och kostnader diskuteras i detta avsnitt.

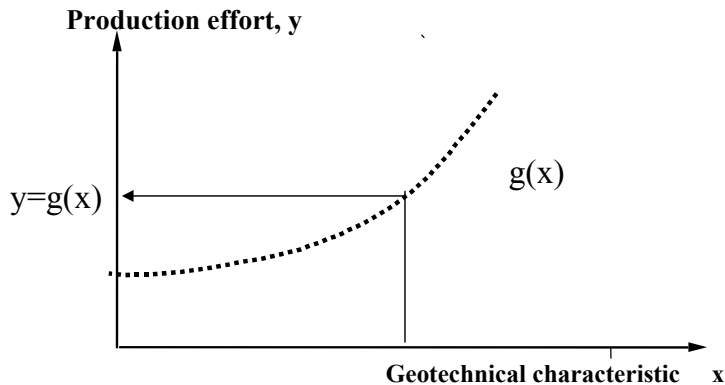
### 3.2.2 Normal tid och kostnad

Tiden och kostnaden för att bygga en tunnel, om inga oönskade händelser inträffar, kallas för normal tid och kostnad i denna modell. Normal tid och kostnad kan uttryckas som en funktion av produktionsansträngningar hos metoden, dvs. arbetet som erfordras för att utföra eller hantera en tunnelenhet. Vid normal tid och kostnad betraktas en tunnelenhet som en ”enhetslängd”.



För tidsberäkning är produktionsansträngningarna uttryckta i arbetstimmar per enhetslängd för de aktiviteter, som ligger på den kritiska linjen. För beräkning av kostnader måste hänsyn tas till olika typer av produktionsansträngningar, till exempel de mängder, som måste utföras per tunnelenhet liksom arbetstimmar per längdenhet.

En tunneldrivningsmetods produktionsansträngningar beror på de geotekniska egenskaperna. Eftersom kunskapen om dessa är begränsad, beroende på det begränsade antalet prover (Salazar, 1985), uttrycks dessa bäst som stokastiska variabler. Figur 7 visar ett exempel på sambandet mellan en enstaka geoteknisk egenskap och produktionsansträngningen.



Figur 7 Exempel på samband mellan produktionsansträngning ( $y$ ) och en geoteknisk egenskap ( $x$ ).

Figure 7 Example of the correlation between production effort ( $y$ ) and a geotechnical characteristic ( $x$ ).

De geotekniska egenskaperna tenderar att variera från en punkt till en annan. Den metodspecifika produktionsansträngningen i varje punkt i tunneln beror på den geotekniska egenskapen uttryckt med  $x(l)$  med en given fördelning  $f_x(x)$ . Sambandet mellan egenskapen och produktionsansträngningen kan uttryckas som en stokastisk funktion  $g(x(l))$ . Vid beräkning av normal tid och kostnad är det nödvändigt att ta hänsyn till produktionsansträngningen ( $Q$ ) för den studerade tunnellängden. Det är viktigt att konstatera, att produktionsansträngningen för den studerade tunnellängden kan betraktas som en stokastisk variabel. En beräkning av produktionsansträngningarna i ett visst längdintervall kan göras. Det har antagits, att egenskaperna i varje punkt i den studerade tunnellängden är likformigt fördelade men inte nödvändigtvis okorrelerade. Detta resulterar i en likformigt fördelad produktionsansträngning i varje punkt i den studerade tunnellängden (men inte med samma fördelning som den geotekniska egenskapen).

Termen ”fullt korrelerade” innebär i denna studie, att de geologiska förhållandena är mer homogena och att det är en stark korrelation mellan punkterna längs hela tunneln. Detta kanske resulterar i en stor standardavvikelse. Termen ”delvis korrelerade” innebär, att längden med homogena förhållanden är begränsad (endast på en del av tunnellängden), vilket kan resultera i en mindre standardavvikelse.

Väntevärdet  $E(y)$  och standardavvikelsen  $\sigma_y$  av produktionsansträngningar  $y=g(x)$ , kan i princip beräknas med följande ekvationer (enligt Benjamin & Cornell, 1970):

$$E(y) = E[g(x)] \approx g(E(x)) \quad 3$$

och

$$\sigma_y = \left[ \frac{dg(x)}{dx} \Big|_{E(x)} \right] \sigma_x \quad 4$$

och sannolikhetsfördelningen, såsom:

$$f(y)_y = \left| \frac{dx}{dy} \right| f_x(x) \quad 5$$

Produktionsansträngningarna från zon  $L$ , kan beräknas med:

$$Q = \int_L g(x(l)) \delta l \quad 6$$

Medelproduktionsansträngningarna blir då:

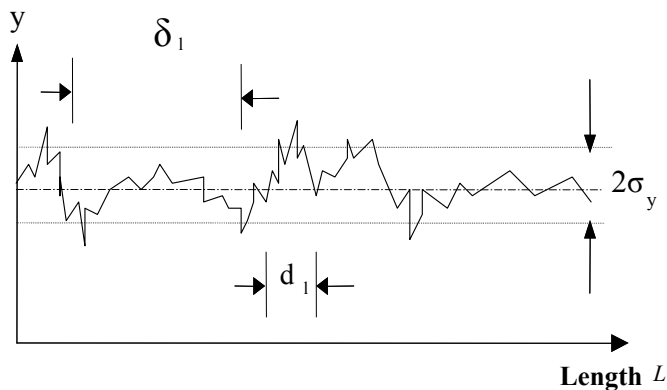
$$E(Q) = L * E(y) \approx L * g[E(x)] \quad 7$$

och standardavvikelsen av produktionsansträngningarna uttrycks (om helt korrelerade) enligt följande:

$$\sigma_Q = L * \sigma_y = L * \left[ \frac{dg(x)}{dx} \Big|_{E(x)} \right] \sigma_x \quad 8$$

där  $L$  är zonlängden.

Då längden över vilken produktionsansträngningarna summeras ( $L$ ) ökar, tenderar standardavvikelsen för den totala produktionsansträngningen att reduceras i medelvärdesbildningsprocessen. Metoder som används för att beräkna den reducerade standardavvikelsen har beskrivits i litteraturen av t.ex.. Vanmarcke (1977) och Olsson (1986). Figur 8 visar produktionsansträngningen ( $y$ ), standardavvikelsen vid en punkt ( $\sigma_y$ ), och "fluktuationsavståndet" ( $\delta_l$ ), vilket innebär avståndet inom vilket den geotekniska egenskapen uppvisar relativt stark autokorrelation från en punkt till en annan för tunnällängden ( $L$ ).



Figur 8 Illustration av produktionsansträngningen ( $y$ ), standardavvikelsen i en punkt ( $\sigma_y$ ), "fluktuationsavståndet" ( $\delta_l$ ), och avståndet mellan "medelvärdeskorsandet" ( $d_l$ ) för tunnallengden ( $L$ ), enligt Vanmarcke (1977).

Figure 8 Illustration of the production effort ( $y$ ), the standard deviation at a point ( $\sigma_y$ ), the "scale of fluctuation" ( $\delta_l$ ), and distance between "mean crossings" ( $d_l$ ) for the tunnel length ( $L$ ), after Vanmarcke (1977).

Den reducerade standardavvikelsen ( $\sigma_Q$ ) kan uttryckas som en produkt av reduktionsfaktorn  $\Gamma(L)$  och standardavvikelsen i varje punkt ( $\sigma_y$ ):

$$\sigma_Q = \Gamma(L) * L * \sigma_y \quad 9$$

Reduktionsfaktorn beror på zonlängden och "fluktuationsavståndet". Om zonlängden ( $L$ ) är mindre än "fluktuationsavståndet" ( $\delta_l$ ), reduceras inte standardavvikelsen (se ekvation 10). Om zonlängden överskrider "fluktuationsavståndet", kan reduktionsfaktorn beräknas som kvoten mellan "fluktuationsavståndet" och zonlängden (se ekvation 11).

$$\Gamma^2(L) = 1 \text{ för } L \leq \delta_l \quad 10$$

$$\Gamma^2(L) = \frac{\delta_l}{L} \text{ för } L \geq \delta_l \quad 11$$

Bestämning av "fluktuationsavståndet" har beskrivits av Vanmarcke (1977). Ett sätt att uppskatta "fluktuationsavståndet" är att använda avståndet mellan "medelvärdeskorsandet" ( $d_l$ ) enligt följande ekvation:

$$\delta_l = \sqrt{\frac{2}{\pi}} d_l \quad 12$$

Standardavvikelsen för produktionsansträngningen för en zon över zonlängden  $L$  kan därför reduceras till följande, då  $\delta_l$  är mindre än  $L$ :

$$\sigma_Q = \sqrt{L} * \sqrt{\delta_l} * \sigma_y \quad 13$$

Där förhållandena  $\delta_l$  är mycket homogena ( $\delta_l \approx L$ ) kan standardsavvikelsen vara stor och osäkerheten i beräkningarna också större (se ekvation 8).

$$\sigma_Q = L * \sigma_y \quad 8$$

Produktionsansträngningen ( $Q$ ) över en viss tunnällängd ( $L$ ) kan således betraktas som en summa av ett stort antal slumpmässiga variabler (likformigt fördelade). Den totala produktionsansträngningen har därför en Gaussfördelning och den centrala gränsvärdessatsen kan användas:

$$Q = N(m_Q, \sigma_Q) \quad 14$$

Normal tid eller kostnad kan beräknas enligt följande:

$$C_n = \int z * g(x(l)) dl \quad 15$$

där  $z$  är tiden eller kostnadsvariabel relaterat till produktionsansträngningen.

I det generella fallet kan  $z$  vara en stokastisk variabel och bero på produktionsansträngningen  $g(x(l))$ . För beräkning av normal tid är kostnadsvariabeln (tidsberoende kostnad)  $z$ , en konstant och lika med 1. Om kostnadsvariabeln  $z$  kan betraktas som oberoende av produktionsansträngningarna  $g(x(l))$ , dvs. när produktionskostnaden är proportionell mot produktionsansträngningen, vilket det är för många tunnelprojekt, och detta fall kommer att analyseras vidare här, kan normaltiden eller kostnaden uttryckas som:

$$C_n = Q * z \quad 16$$

där  $z$  kan beaktas som både en konstant eller en stokastisk variabel.

Den statistiska parametern normal tid eller kostnad om kostnadsvariabeln  $z$  är oberoende av  $g(x(l))$ , (Benjamin & Cornell, 1970) kan beräknas enligt:

$$E(C_N) = m_Q m_z \quad 17$$

$$\sigma_{C_N} = \sqrt{m_Q^2 \sigma_z^2 + m_z^2 \sigma_Q^2 + \sigma_Q^2 * \sigma_z^2} \quad 18$$

där  $m_z$  är medelvärdet av kostnadsvariabeln och  $\sigma_z$  är kostnadsvariabelns standardavvikelse.

### 3.2.3 Exceptionell tid och kostnad

Som diskuterades i avsnitt 2 påverkas olika tunneldrivningsmetoder av olika oönskade händelser. Definitionen av en oönskad händelse (se avsnitt 2) är "en faktor som orsakar en betydande oplanerade ändringar i tunneldrivningsprocessen". Dessa oönskade händelser kan inträffa t.ex. på grund av ogynnsamma geologiska förhållanden eller haveri hos

maskin eller komponenter. I modellen är exceptionella tider eller kostnader, som orsakats av oönskade händelser en funktion av sannolikheten och konsekvensen av den oönskade händelsen.

Sannolikheten att en oönskad händelse inträffar kan beskrivas med Booleska variabler (Toft-Christensen & Baker, 1982). I denna tillämpning kan de slumpmässiga variablerna vara i två tillstånd: (1) ”att den oönskade händelsen  $k$  inträffar”, eller (2) att ”den oönskade händelsen  $k$  inte inträffar”. Den oönskade händelsen inträffar med sannolikheten  $p$  och inträffar inte med sannolikheten  $(1-p)$ , som framgår av ekvation 19:

$$S_{ik} = \begin{cases} 1_{\text{event } k \text{ occurs with probability } p} \\ 0_{\text{event } k \text{ does not occur with probability } (1-p)} \end{cases} \quad 19$$

Om en oönskad händelse inträffar, resulterar detta i exceptionell tid och kostnad. Tiden eller kostnadskonsekvensen kan därmed uttryckas som:

$$C_{e_k} = S_{ik} * C_{ik} \quad 20$$

Därför kan den totala exceptionella tiden eller kostnaden uttryckas som summan av alla oönskade händelser enligt uttrycket:

$$C_e = \sum_{k=1}^n C_{e_k} \quad 21$$

### 3.2.4 Slutliga kommentarer om den teoretiska modellen

Den totala tiden eller kostnaden för en viss tunneldrivningsmetod och en given tunnellängd ( $L$ ) kan uttryckas som summan av normal tid eller kostnad och exceptionell tid eller kostnad enligt ekvation 22.

$$C_{tot} = C_N + C_e = \int z * g(x(l)) dl + \sum C_{e_k} \quad 22$$

Väntevärdet för den totala tiden eller kostnaden kan uttryckas som:

$$E(C_{tot}) = L * g[E(x)] * E(z) + \sum P_k C_k \quad 23$$

Den praktiska användningen av den teoretiska modellen behandlas i nästa avsnitt.

## 3.3 Praktisk modellering

### 3.3.1 Inledning till praktisk modellering

Det har konstaterats att det är viktigt för byggherren och entreprenören att ha ett bra underlag för beslut om budget, anbudspris eller val av tunneldrivningsmetod. Båda parter behöver kunna utnyttja fördelningen av total tid och kostnad som bas för beslutsfattande.

För att kunna motsvara kraven som ställs på beslutsunderlag för anbudspris och budget kan beräkningar göras enligt den teoretiska modell, som har beskrivits ovan.

En separat beräkning av normal och exceptionell tider och kostnader görs i modellen. Exceptionell tid och kostnad beräknas för varje identifierad oönskad händelse. Detta ökar möjligheterna för de olika parterna (byggherre och entreprenör) att använda resultaten vid olika kontrakts- och organisationstyper.

Normala och exceptionella kostnader, som kan förväntas i ett visst projekt, beräknas för olika tunneldrivningsmetoder och olika geologiska och hydrogeologiska förhållanden. Olika grad av robusthet hos de olika drivningsmetoderna kan beaktas i beräkningen.

### 3.3.2 Modellering av normal variation hos kostnader och tider

Modellering av normal variation i kostnader och tider är beskrivna i detalj i Isaksson (2002), men kommer kortfattat beskrivas i detta avsnitt.

Åtskilliga indata erfordras för att beräkna tid och kostnad för ett tunnelprojekt med denna modell. Kunskap om geotekniska egenskaper erfordras, eftersom de påverkar användningsområdet och erforderliga produktionsansträngningar hos den föreslagna tunneldrivningsmetoden. Indata erfordras för att beskriva produktionsansträngningarna vid givna geotekniska egenskaper liksom kännedom om exceptionella tider och kostnader.

Kapaciteten hos olika tunneldrivningsmetoder har rapporterats i litteraturen men få av dessa kan bidra med ingångsdata för beräkningsmodellen. Det mesta av befintlig indata är inte allmänt tillgängligt, endast för tunnelentreprenörer med koppling till respektive projekt. Kännedom om den största delen av data finns således hos enskilda personer.

Produktionsansträngningen för en viss tunneldrivningsmetod påverkas av de geologiska förhållandena längs tunneln. Ett sätt att förenkla hanteringen i beräkningen av tider och kostnader är att dela upp tunnellängden i s.k. *geotekniska zoner*, med andra ord dela upp tunneln på ett diskret sätt. En geoteknisk zon kan definieras som ”en tunnelsträcka, som modelleras som om den hade likartade geotekniska förhållanden och i vilken det avses att använda samma tunneldrivningsmetod”. Givetvis är de geotekniska egenskaperna i en zon baserade på de geologiska förhållandena i zonen. En diskret hantering i geotekniska zoner används här, eftersom kunskapen om de geotekniska förhållandena är begränsad. Zonlängden måste relateras till de praktiska kraven på en effektiv tunneldrivning.

En viktig faktor vid beräkning av normal kostnad är produktionsansträngningen, som uttrycker tiden det tar att driva en meter tunnel dvs. normal tid. För att beräkna normal tid måste tunnelprocessen studeras. Som diskuterats i kapitel 2 kan drivningsprocessen beskrivas som en cyklisk process, bestående av en serie av olika enhetsoperationer, som ligger på den kritiska linjen. Tidsrelaterade produktionsansträngningar  $Q_{\text{time}}$  kan direkt beräknas tex med ekvation 16 och standardavvikelsen beroende på graden av korrelation mellan de geotekniska egenskaperna.

Indata för att beräkna normal tid kan i princip erhållas från uppföljningsdata från tidigare utförda projekt med liknande geotekniska egenskaper. Om inga sådana data är tillgängliga, måste subjektiva bedömningar göras. Den normala kostnaden är kostnaden för byggande

av tunnel vid normala förhållanden och innehålla kostnader för t.ex. byggmaterial, löner och maskiner. I denna studie delas de normala kostnaderna in i tre olika typer.

De tidsberoende kostnaderna kan uttryckas som en funktion av flera variabler, dvs kostnader för maskiner, utrustning och personal. I detta fall är produktionsansträngningen  $g(x(l))$  den funktion, som beskriver den tid det tar för att driva en meter av tunnel. Produktionsansträngningen (dvs. normal tid), som beror av de geotekniska egenskaperna, beräknas enligt tidigare diskussion. De mängdberoende kostnaderna är en funktion av flera variabler, såsom materialpriser och personalkostnader och beror av de geotekniska egenskaperna. Produktionsansträngningen  $g(x(l))$  är i detta fall mängden per meter tunnel och kostnadsvariabeln motsvarar materialkostnaden per enhet.

Den fasta kostnaden är en funktion av flera variabler, såsom byggetablering och avveckling och är inte relaterad till de geotekniska egenskaperna. Produktionsansträngningen  $g(x(l))$  är i detta fall oberoende av tunnellängden och kostnadsvariabeln motsvarar de fasta kostnaderna för bygget.

Systemet att dela de normala kostnaderna i olika kostnadstyper reducerar eller eliminerar problemet med att ha en kostnadsvariabel, som beror på produktionsansträngningarna. Kostnadsvariabeln  $z$  i modellen beaktas som en oberoende konstant eller stokastisk variabel. Dessa variabler kan erhållas genom subjektiv bedömning (expertbedömningar) eller erfarenhet från andra projekt.

Ett generellt problem i bergmekanik och ingenjörsvetenskap är möjligheten att hitta ett samband mellan produktionsansträngning och geotekniska egenskaper. Enligt författaren finns det inga väldefinierade samband för  $g(x)$  i bergmekanik för närvarande. Nuvarande praktisk modellering måste därför baseras på ett annat sätt. Basen är istället mer subjektiv och relaterad till en erfarenhetsbedömning.

Uppdelningen av produktionsansträngningarna i produktionsklasser kan göras för att underlätta hanteringen av komponenterna som är beroende av varandra för att finna sambandet mellan metodens geotekniska egenskaper och produktionsansträngning, trots begränsade kunskaper om fördelningen av egenskaperna och upprättande av samband mellan önskade händelser och produktionsansträngning.

Enligt författarens erfarenhet är det möjligt för en expert eller en grupp experter att etablera och bestämma vad som är god, medel eller dålig produktionsansträngning för en given metod, organisation och motsvarande värden av den geotekniska egenskapen.

En viktig del i arbetet att definiera produktionsklasser är att bestämma området för den geotekniska egenskapen eller gruppen av geotekniska egenskaper, som motsvarar en viss produktionsklass.

### 3.3.3 Modellering av önskade händelser

Den exceptionella tiden och kostnaden kan beräknas genom att använda kunskap om sannolikheter och konsekvenser av önskade händelser. Olika önskade händelser har olika sannolikheter och konsekvenser. Vissa önskade händelser beror på produktiviteten hos metoden, andra är oberoende av denna. Önskade händelser kan ha en låg sannolikhet för att det inträffar och en stor konsekvens, t.ex. när den aktuella geotekniska egenskapen

skiljer sig väsentligt från det normala användningsområdet för metoden så att metoden måste ändras. Andra oönskade händelser kan ha en hög sannolikhet och en liten konsekvens, t.ex. ett mindre ras.

En uppdelning i olika händelsetyper har gjorts för att (a) erhålla en distinkt uppdelning mellan orsaker, sannolikheter och konsekvenser, och (b) att erhålla ett förhållande mellan oönskade händelser och produktionsansträngningar.

Risikanalysen skall inte enbart inkludera händelsetyper, som är välkända, utan utgöra en detaljerad analys av alla möjliga händelser. I praktiken verkar det som det är en tendens att övervärdera vikten av de risker, som kan beräknas med välkända metoder.

Som beskrivits i avsnitt 2 finns det olika typer av oönskade händelser. Ett förslag att klassificera typerna ses i tabell 2. Oönskade händelser, som inte tillhör någon av de fyra första typerna av oönskade händelser, tillhör kategorin ”diverse”. Givetvis är andra klassificeringssystem möjliga, men detta har använts i denna beräkningsmodell. Vilken händelse som skall beaktas i beräkningarna beror på parten (entreprenör eller byggherre), kontrakt typ och ansvar.

**Tabell 2 Klassificering av typer av oönskade händelser**

**Table 2 Classification of types of undesirable events.**

Typ av oönskad händelse	Definition	Exempel
Produktionsberoende geologisk händelse.	Överskridande gränsen för en geoteknisk egenskap där metoden går bra, dvs. produktionsklass II	Spricker, tryckhållfasthet, vattentryck/konduktivitet
Slumpmässigt förekommande geologisk händelse.	Lokal signifikant avvikelser av de geologiska förhållandena	Vattenbärande zoner, krosszoner.
Slumpmässigt förekommande mekanisk händelse.	Komponentfel hos maskin eller utrustning som används.	Trasigt huvudlager
Slumpmässigt förekommande gross errors.	Konsekvenser på grund av bristande kompetens.	Felaktig design, otillräcklig organisation, kvalitetskontroll eller erfarenhet, otillräcklig kunskap om drivningsmetodens arbetsområde
Diverse		

Beräkning av sannolikheten av konsekvensen för varje oönskad händelsetyp kan göras med hjälp av risikanalys (Rausand, 1991), och innefattar:

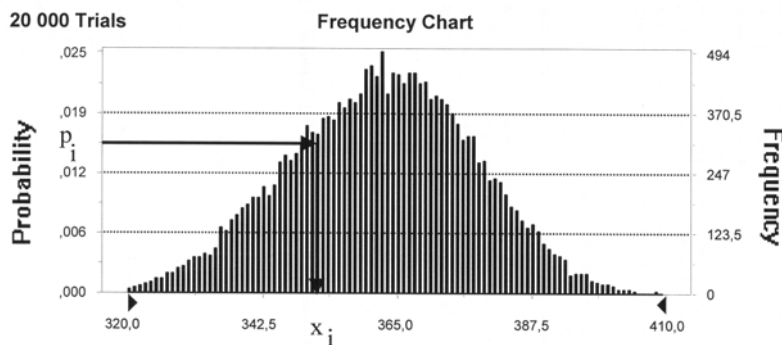
- Beskrivning av systemet
- Riskidentifiering
- Beräkning av sannolikheter
- Beräkning av konsekvenser
- Riskreducering



Identifiering av riskerna innefattar studier av olika tunnelprojekt och deras önskade händelser. Vid riskidentifieringen studeras erfarenheter från likartade kombinationer av geologiska förhållanden och tunneldrivningsmetod, men eftersom antalet projekt är begränsat, måste även andra kombinationer studeras. Riskidentifiering i tunnelprojekt har studerats i avsnitt 2. Det statistiska underlag, som erhålls från riskidentifieringen, kan användas som bas för beräkningen av sannolikheter och konsekvenser.

### 3.3.4 Simulering

Genom att använda ovanstående teori kan byggtiden och kostnaden för ett tunnelprojekt beräknas. När beräkningarna blir för komplicerade att lösa kan en metod som kallas Monte Carlo-simulering användas. Monte Carlo simulering har diskuterats i litteraturen av t.ex. Harr (1987), Ang and Tang (1984). Monte Carlo simulering kan hantera många osäkra, korrelerade variabler i ekvationer, som innehåller summor av produkter. Ett slumpmässigt värde av fördelningen av varje variabel tas och värdet av funktionen kalkyleras. Varje beräkning av funktionen ger ett resultat. Ett ökat antal simuleringar förbättrar noggrannheten av fördelningen. Resultatet kan presenteras som en frekvens eller kumulativ fördelning. Medelvärde standardavvikelse och andra statistiska parametrar erhålls vid simuleringen. Figur 9 visar ett exempel av resultatet från en simulering. Figuren visar, att sannolikheten för värdet  $x_i$  är  $p_i$ .



Figur 9 Resultat av Monte Carlo simulering, där resultatet  $x_i$  fås med sannolikheten  $p_i$ .

Figure 9 Result of Monte Carlo simulation, where the result  $x_i$  occurs with the probability  $p_i$ .

För att erhålla information om de mindre sannolikheterna vid slutet av fördelningssvansar är det nödvändigt att göra ett större antal simuleringar. Antalet simuleringar nödvändiga för en viss grad av noggrannhet i variansen kan beräknas med användande av samplingsteori eller genom 'trial and error'.

Beräkningsmodellen som utvecklats, har använts på fallstudier. Resultatet av en sådan tillämpning diskuteras i följande avsnitt.

## 4 FALLSTUDIE: GRAUHOLZTUNNELN

### 4.1 Inledning

I detta avsnitt används modellen för beräkning av tid och kostnad för tunnelprojekt (som beskrivits i avsnitt 3) på Grauholztunneln i Bern, Schweiz.

Syftet med detta avsnitt är att visa, att resultatet som erhålls från beräkningsmodellen är realistiskt. Den totala byggtiden och kostnaden som erhålls från beräkningarna jämförs med de verkliga byggtiderna och kostnaderna från fallstudien. Ytterligare ett syfte är att visa att det är möjligt att följa beräkningsstegen, som beskrivs i avsnitt 3 och som gör den föreslagna beräkningsmodellen tydligare. Som diskuterats i avsnitt 2 påverkar olika faktorer, såsom graden av korrelation, kontraktsform och organisation, maskintyp och dess robusthet, beslut såväl som resultat. Påverkan av dessa faktorer diskuteras även i detta avsnitt.

### 4.2 Beskrivning av projektet

#### 4.2.1 Inledning

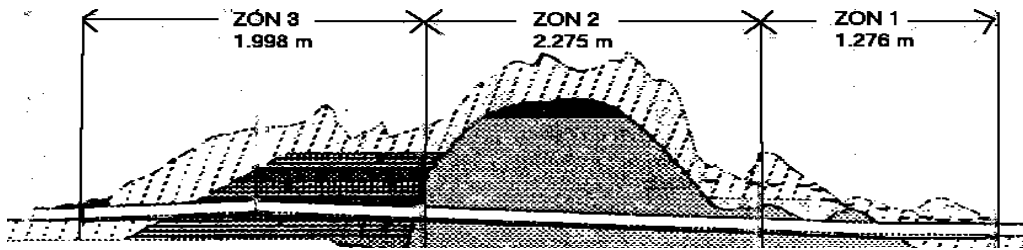
Grauholztunneln har valts som fallstudie för att visa användbarheten av beräkningsmodellen på ett verkligt projekt, där olika typer av tunneldrivningsmaskiner kan övervägas.

Grauholztunneln byggdes mellan åren 1990 och 1993. Den är 5500 m lång och går igenom morän och sandsten. Tunneln utgör en del av Mattstetten-Rothrist-länken och är belägen nära Bern i Schweiz. Tunneln byggdes för att möjliggöra tågtrafik förbi knutpunkten Zollikofen och har kapacitet för att ingå i den schweiziska järnvägens planerade utvidgning, benämnd ”Bahn 2000”.

#### 4.2.2 Geologi och hydrogeologi

Geologin runt Grauholztunnel består av material från istiden, innehållande avlagringar av glaciärsand och grus täckta med några meter av morän. Sandstenen var av en speciell typ, som i alpmråden brukar kallas molasse. Sydöst om tunnelaxeln ligger en brant norvästflank av övre tertiär molasse. De geologiska förhållandena i området är mycket komplicerade. Den schweiziska järnvägen (SBB) försökte att minimera den del av tunneln, som måste gå genom morän och vatten, varför huvuddelen av tunneln lades i sandstensområdet. Tunneln delades upp i geotekniska zoner, bestående av relativt homogena geologiska förhållanden. Uppdelningen i geotekniska zoner har baserats på

beskrivningen av de geologiska förhållandena vid Grauholztunneln. Grauholztunneln kunde uppdelas i tre geotekniska huvudzoner (se figur 10).



Figur 10 Geologisk längdsektion av Grauholztunneln, enl. Harsch (1990).

Figure 10 Geological section through the length of the Grauholz Tunnel, after Harsch (1990).

Den första delen av jordsträckan kallad Öst (zon 1) består av hård och kompakt jordsediment. Övertäckningen var tre meter och tunnelbotten hade låg konduktivitet. Några större mängder av metangas förväntades inte i denna jordsträcka. De geologiska och hydrogeologiska faktorer, som gjorde drivningen i denna zon komplicerad, var förekomsten av stenblock, avsaknaden av finjord och högt vattentryck kombinerat med begränsade möjligheter för avvattning. Den del av tunneln som låg i sandsten (zon 2) bestod av mjukt marl och sandsten (molasse) och övertäckningen var nästan 120 m. Den jordsträcka, som benämns väst (zon 3) bestod av hårda lager av siltig-grusig morän, innehållande lera och sand. Stenar och block påträffades också längs hela sträckan, som låg över grundvattenytan.

Baserat på geologiska undersökningar och subjektiva bedömningar har det antagits, att zon 2 är mera homogen och zon 1 och 3 mera heterogen. Det har antagits, att avståndet inom vilket de geotekniska egenskaperna har en relativt stark korrelation från en punkt till nästa är 100 m i zon 1 och 3 och 400 m i zon 2.

#### 4.2.3 Tunneldrivningsmetoder och motsvarande robusthetshöjande åtgärder

SBB planerade att tunnel skulle drivas från båda ändar med öppen sköld och med förstärkning och avvattningsåtgärder. Temporära förstärkningsåtgärder med jetgrouting i tunnelfronten planerades i områden mellan jord och sandsten. Eftersom entreprenörerna inte tyckte SBB's föreslagna tunneldrivningsmetod var optimal vid de givna förutsättningarna, föreslogs alternativa metoder. Följande tre maskintyper övervägdes (Ruhner, 1994):

- *Kombisköld* med möjlighet att bygga om från slurry till torr drivning
- *EPB-sköld* där jordblandningen i fronten stöttar jorden och vattentrycket i fronten och en snäckmatare transporterar det utschaktade materialet
- *Öppen sköld* utan möjlighet att stötta jord- och vattentryck i fronten. Denna sköld kan inte användas under grundvattenytan, om jorden har en hög konduktivitet.

Olika robusthetshöjande åtgärder kan användas vid olika typer av sköldmaskin. Vid tunneldrivning med kombisköld kan en hög andel finjord orsaka problem med separeringen. Separering kan utföras med centrifuger eller bandfilter. För att undvika

hopklibbning av borrhuvudet kan ett separat centerhuvud installeras eller spolmunstycken på väggen till arbetskammaren. Vid drivning med EPB-sköld stöttar jordblandningen i arbetskammaren fronten. Till skillnad från kombisköld är det inte möjligt att integrera en stenkross i borrhuvudet. För att erhålla en bättre konsistens på jorden kan skum och olika additiv, såsom bentonit eller polymerer användas. Stora problem kan uppstå vid drivning med öppen sköld i kohesionslös jord under vattenytan. För att öka metodens robusthet i denna typ av jord kan åtgärder, såsom grundvattensänkning med brunnar, vakuumlanser eller frysning användas.

#### *Använd tunneldrivningsmetod*

Robusthetshöjande åtgärder var nödvändiga för drivning genom den komplicerade geologin. För att fastställa vilka robusthetshöjande åtgärder, som skulle komma till användning, användes erfarenheter från andra projekt. Problem som orsakats av förekomst av stenblock i jorden vid Hera-tunneln i Hamburg resulterade t.ex. i att en stenkross integrerades i borrhuvudet. Vissa robusthetshöjande åtgärder, som integrerades i sköldmaskinen som användes i Hera-tunneln, är uppräknade nedan:

- en stenkross i mitten av borrhuvudet (för att hantera block),
- en jämn vägg på arbetskammaren (för att hantera hög lerhalt),
- ett sprut munstycke på väggen till arbetskammaren (för att hantera hög lerhalt).

Alla dessa åtgärder applicerades på kombiskölden från början av bygget av Grauholztunneln och är i denna beräkning benämnda ”låg robusthetsgrad”. Eftersom geologin visade sig leda till mer problem än beräknat, applicerades ytterligare robusthetshöjande åtgärder under byggets gång. Svaga punkter följdes kontinuerligt upp via data. Man konstaterade, att centrifuger erfordrades för att förbättra separeringsprocessen och att ett slitlager på kuttrarna erfordrades för att reducera antalet kutterbyten.

Enligt de geologiska förundersökningarna förväntades det att zon 3 till största delen skulle bestå av kompakt jord. Zon 3 var därför planerad att drivas torrt – att endast övertryck skulle användas som stötning av fronten. För att öka robustheten hos metoden beslutades dock att börja med hydraulisk stötning av fronten. Vid ett första försök med endast övertryck i arbetskammaren skedde stora förluster av lufttrycket. Det blev således erforderligt att använda tilläggsmaterial (sågspån) i bentoniteslurryn för att erhålla en vattentät filterkaka på tunnelnfronten.

Följande åtgärder ansågs erforderliga under byggnad av zon 3:

- Centrifuger i stället för bandpressar (för att hantera hög finjordshalt),
- Sågspån i bentoniten (för att hantera låg halt av finjord),
- Slitlager på kuttrarna (för att reducera antalet kutterbyten).

Dessa åtgärder tillsammans med de förstnämnda åtgärderna kallas ”hög robusthet” i beräkningen. De verkliga kostnaderna för dessa ytterligare åtgärderna för att erhålla en låg robusthet (stenkross) var ungefär 2% av anbudspriset. Att få en hög robusthet (centrifuger

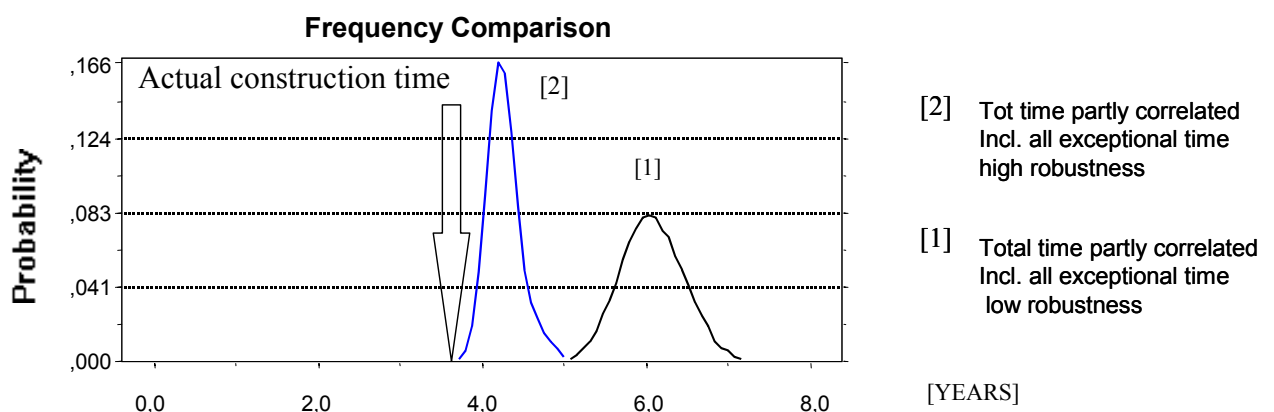
och slitlager) kostade ungefär 4% av anbudspriset och stabilisering av jord för att erhålla säkert kutterbyte omkring 4.5%.

Om drivningen hade utförts utan någon typ av robusthetshöjande åtgärd, hade stora problem, såsom blockering av borrhuvudet på grund av stenblock och ihopklibbning av borrhuvudet med stor sannolikhet inträffat i hela zon 1. Stilleståndstiden för varje problem skulle varit en till flera veckor. Detta skulle resulterat i stora förseningar jämfört med planerad byggtid. Beräkning av den totala byggtiden utan någon robusthetshöjande åtgärd alls har därför inte gjorts i denna studie.

### 4.3 Resultat av beräkningarna

Den totala byggtiden och kostnaden för Grauholtztunneln har beräknats med den föreslagna modellen. I beräkningarna som visas här har alla typer av oönskade händelser inkluderats. Med det kontrakt typer som används i detta fall motsvarar detta mer byggherrens ansvar än entreprenörens. Baserat på resultaten från beräkningarna av byggtid kan konstateras, att den verkliga byggtiden generellt var lägre än den som beräknats med modellen vid låg robusthet hos metoden. Detta resultat är realistiskt, eftersom robusthetshöjande åtgärder användes. Vid hög robusthet uppvisar beräknad och verklig tid en mindre skillnad.

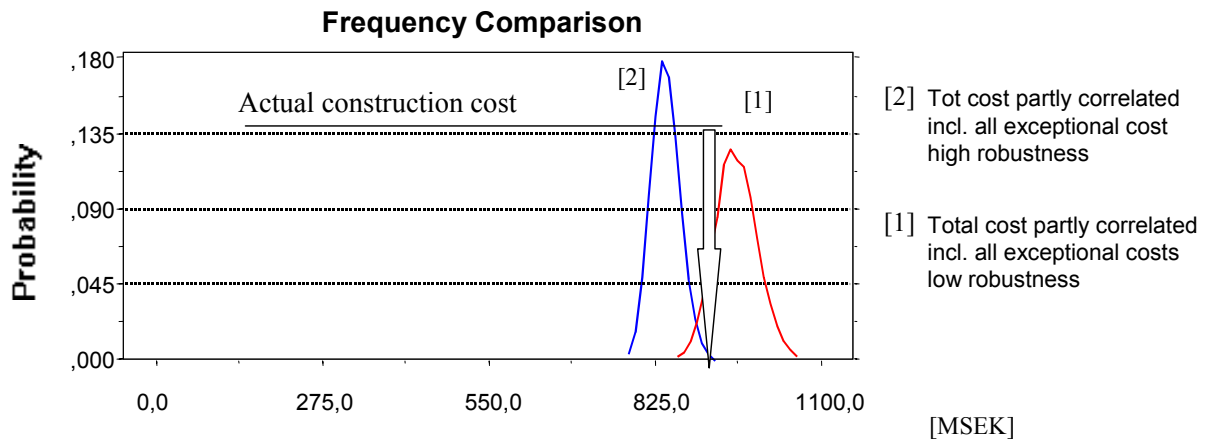
Anledningen till differensen mellan beräknad och verklig tid kan bero på att åtgärder användes i zon 2 och 3 för att öka framdriften, så att tidsplanen skulle kunna hållas (åtgärderna var t.ex. ett ökat antal arbetstimmar per månad). Om inga ytterligare åtgärder hade använts för att öka framdriften, skulle skillnaden mellan verklig och beräknad tid troligtvis varit mindre. Den totala beräknade byggtiden med låg robusthet var omkring sex år och med hög robusthet omkring fyra år. Eftersom åtgärder användes för att öka framdriften under bygget, så överskred den beräknade byggtiden den verkliga, som var omkring tre år och sex månader (figur 11).



Figur 11 Jämförelse mellan verklig och beräknad byggtid inklusive exceptionell tid och [1] låg robusthet och [2] hög robusthet.

Figure 11 Comparison of actual and estimated construction time with exceptional cost, and [1] a low degree of robustness, and [2] a high degree of robustness.

Den totala byggkostnaden har också beräknats för hög och låg robusthet. Figur 12 visar den verkliga byggkostnaden och beräknad byggkostnad inklusive alla exceptionella kostnader vid låg och hög robusthet för tunnelmetoden. Anledningen till att verklig byggkostnad överskrider medelvärdet av beräknad kostnad vid hög robusthet kan vara att robustethöjande åtgärder användes efter det att bygget hade påbörjats och inte från start. Tilläggs-kostnader uppstod också på grund av erforderliga extra åtgärder för att öka metodens kapacitet (för att hålla tidsramarna).



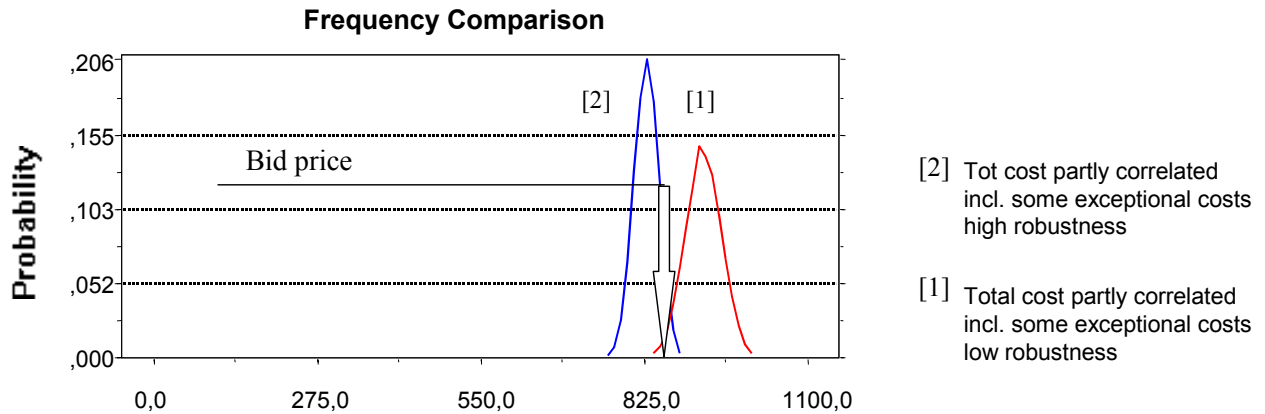
Figur 12 Verklig kontra beräknad total byggkostnad (MSEK) vid [1] låg robusthet och alla exceptionella kostnader och [2] hög robusthet och alla exceptionella kostnader.

Figure 12 Actual versus estimated total construction costs (in millions of Swedish kronor [MSEK]) with [1] a low degree of robustness and all exceptional costs, and [2] a high degree of robustness and all exceptional costs.

Som diskuterats kan robustethöjande åtgärder användas för att öka byggmetodens användbarhet i ett bredare geologiskt område med normal eller låg produktionsansträngning. Detta betyder, att området av geotekniska egenskaper, där metoden fungerar vid normal eller låg produktivitetsansträngning, har ökat. Om man använder robustethöjande åtgärder kan detta leda till ökad normal kostnad och minskad exceptionell kostnad, eftersom åtgärderna minskar metodens känslighet och därigenom minskar konsekvensen och sannolikheten för oönskade händelser. Vissa åtgärder kan öka en metods robusthet mer än andra. Graden av robusthet påverkar hur mycket den erforderliga produktionsansträngningen kan minskas, och sannolikheten och konsekvensen för oönskade händelser kan minskas, och därigenom också hur mycket den totala byggtiden och kostnaden kan minskas. Dessa åtgärder är lönsamma, om kostnaden för dem minskar den totala tiden och kostnaden med samma summa eller mer än om inga åtgärder skulle ha använts. Vid drivning i geologi, som kan anses som dålig och i komplexa geologiska förhållanden, är det normalt ett behov av vissa tilläggsåtgärder för att minska sannolikheten för betydande tids- och kostnadsöverskridanden. Kurva 2 i figur 12 visar användandet av ytterligare åtgärder vid hög robusthet – såsom centrifuger i en separationsprocess, och ett separat kutterhuvud i centrum av borrhuvudet för att hantera hög lerhalt i jorden. Kurva 1 i samma figur visar användandet av ytterligare åtgärder vid låg robusthet – såsom integrering av en stenkross i borrhuvudet för att hantera stenblock. Dessa åtgärder ökar framdriften och minskar sannolikheten och/eller konsekvensen för oönskade händelser. Eftersom användandet av åtgärder för att erhålla en högre robusthet

minskade den totala byggkostnaden mer än de ökade kostnaderna, var de i detta fall lönsamma.

Figur 13 visar anbudspris och beräknad byggkostnad inklusive vissa exceptionella kostnader vid låg och hög robusthet för tunnelmetoden. De exceptionella kostnaderna inkluderade i detta fall är kostnader som borde vara entreprenörens ansvar vid enhetspriskontrakt, såsom kostnaden för ett trasigt huvudlager och hopklibbning. Det verkliga anbudspriset från entreprenören är litet högre än medelvärdet av kostnaden beräknad med modellen vid hög robusthet.

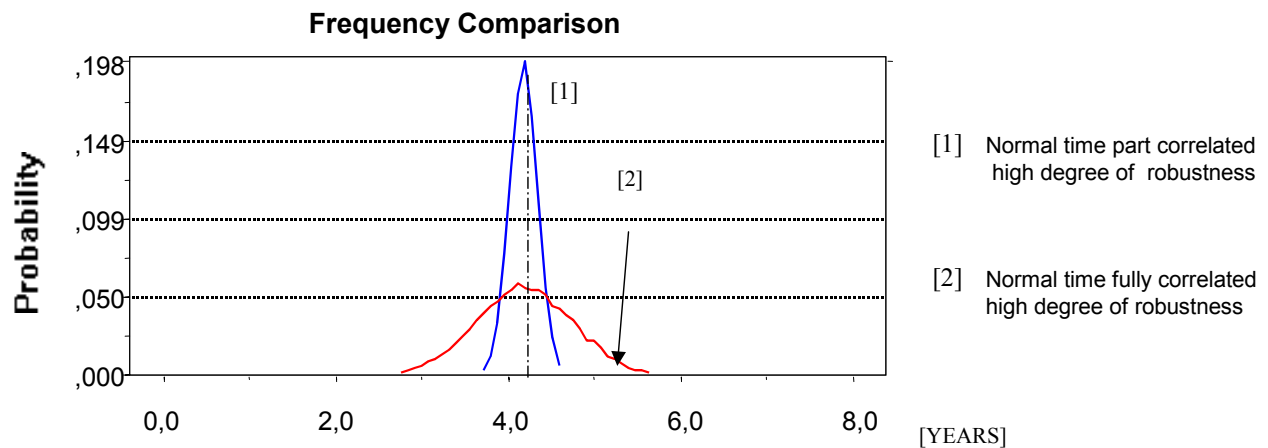


Figur 13 Verklig kontra beräknad total byggkostnad (MSEK) vid [1] låg robusthet och en del exceptionella kostnader och [2] hög robusthet och en del exceptionella kostnader.

Figure 13 Actual versus estimated total construction costs in millions of Swedish kronor [MSEK] with [1] a low degree of robustness and some exceptional costs, and [2] a high degree of robustness and some exceptional costs.

#### 4.4 Faktorerers inverkan på resultatet

Som diskuterats i avsnitt 3 är det ofta korrelation mellan de geotekniska egenskaperna. Korrelationsgraden, här definierad som avståndet inom vilket de geotekniska egenskaperna visar relativt stark korrelation från en punkt till en annan, påverkar fördelning av total tid och kostnad. Eftersom kunskap om de geotekniska egenskaperna är begränsade är det svårt att veta avståndet mellan de korrelerade punkterna som skall beaktas och vilken variation som är korrekt att använda i beräkningen. Avståndet mellan korrelerade punkter är baserat på subjektiva beräkningar. Figur 14 visar fördelningen av normal byggtid och kostnad för helt och delvis korrelerade egenskaper.



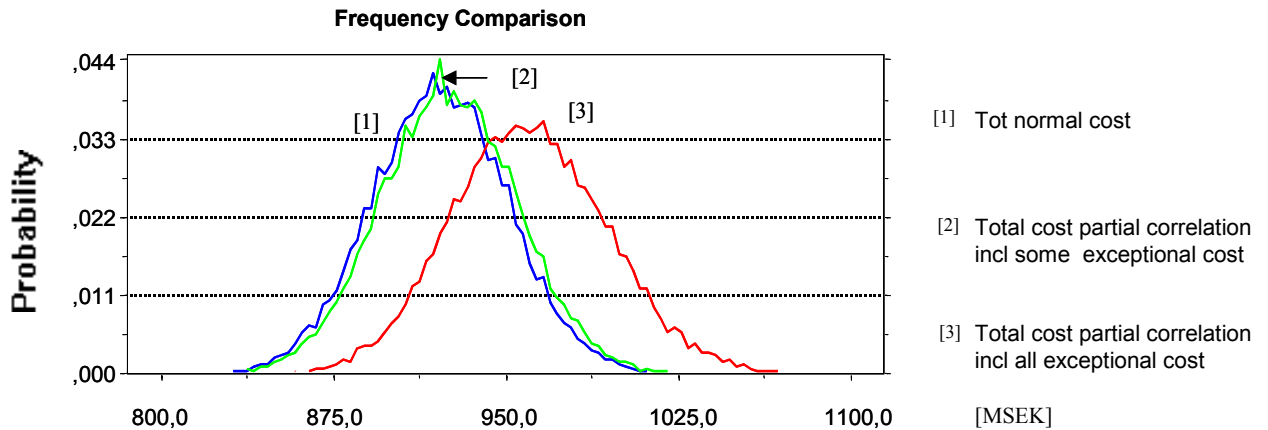
Figur 14 Normal tid med [1] delvis och [2] helt korrelerade faktorer.

Figure 14 Normal time with [1] partially and [2] fully-correlated factors.

Som framgår av figur 14 påverkar avståndet mellan korrelerade punkter fördelningen mycket. Som diskuterats i avsnitt 2 finns det olika beslutsfattare med olika ansvar för ökningarna i tid och kostnad beroende på oönskade händelser. Byggherren måste bestämma budgeten för projektet och entreprenören anbudspriset. Byggherren måste beakta huvudparten av alla tänkbara exceptionella kostnader som kan påverka projektet, eftersom det är byggherren som har huvudansvaret. Använd kontraktstyp och organisation vid projektet avgör vilka typer av exceptionella kostnader som entreprenören måste beakta, eftersom dessa faktorer avgör vilka kostnader som kommer att betalas av byggherren om de skulle uppträda. Om entreprenören har mindre ansvar till exempel vid ett enhetspriskontrakt, behöver inte exceptionella kostnader beaktas. Den normala kostnaden kan därför utgöra bas för beslut om anbudspris. Om entreprenören har ett visst ansvar t.ex. då entreprenören har ett enhetspriskontrakt, bör en del av den exceptionella kostnaden beaktas av entreprenören. I detta exempel användes enhetspriskontrakt och entreprenören ansvarade för kostnadsökningar beroende på maskinhaveri. Där entreprenören har ett stort ansvar, tex vid lump sum kontrakt bör alla exceptionella kostnader beaktas.

Figur 15 visar resultatet av en Monte Carlo simulering av de totala byggkostnaderna med hänsyn till olika kostnadstyper. I denna figur visas den normala byggkostnaden utan hänsyn tagen till exceptionella kostnader [1]. Samma figur visar byggkostnaden inklusive vissa exceptionella kostnader [2], och också med alla exceptionella kostnader inkluderade [3].





*Figur 15 Resultat av simuleringen i [MSEK] för [1] normalkostnad, [2] total kostnad inklusive vissa exceptionella kostnader, och [3] total kostnad inklusive alla exceptionella kostnader*

*Figure 15 Results of the simulation in millions of Swedish kronor [MSEK] for [1] normal cost, [2] total costs taking some exceptional cost into account, and [3] total costs taking all exceptional costs into account.*

Den beaktade tunneldrivningsmetoden har en betydande inverkan på den totala tiden och kostnaden för ett tunnelprojekt. Figur 16 och 17 visar resultatet av Monte Carlo simuleringen av den totala byggtiden och kostnaden för tunneln vid användande av olika drivningsmetoder, t.ex. kombisköld, EPB och öppen sköld. Antalet Monte Carlo körningar använda i beräkningarna är 10.000 per simulering.

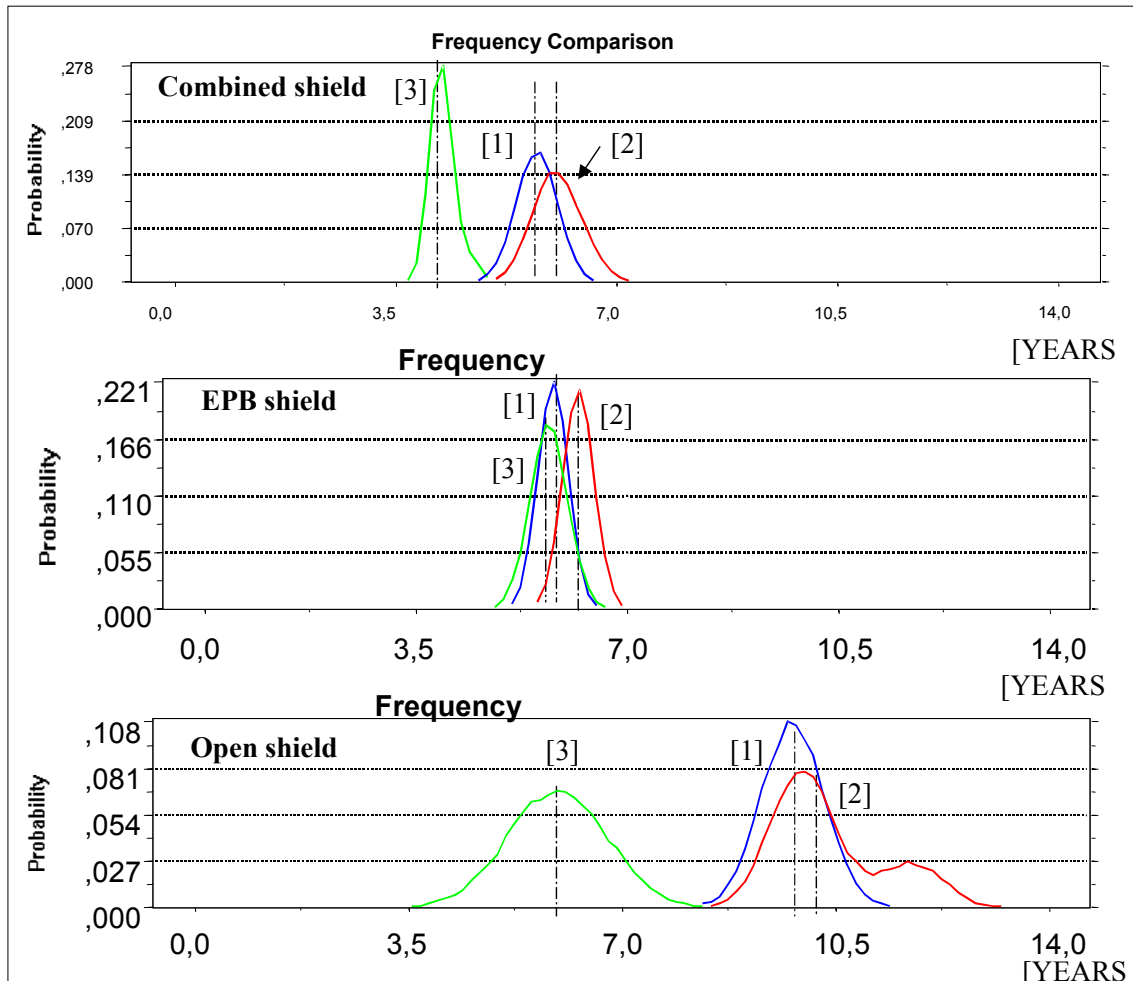


Figure16 Resultat av simuleringar med sköldmaskin, där [1] är normal byggtid vid låg robusthet och delvis korrelerade egenskaper utan hänsyn tagen till exceptionell tid; [2] är den totala byggtiden för låg robusthet och delvis korrelerade egenskaper inklusive all exceptionell tid; och [3] är den totala byggtiden för hög robusthet och delvis korrelation inklusive all exceptionell tid.

Figure16 Result of simulations by shield machine type, where [1] is normal construction time for a low degree of robustness and partial correlation without considering exceptional time; [2] is the total construction time for a low degree of robustness and partial correlation considering all exceptional time; and [3] is the total construction time for a high degree of robustness and partial correlation considering all exceptional time.

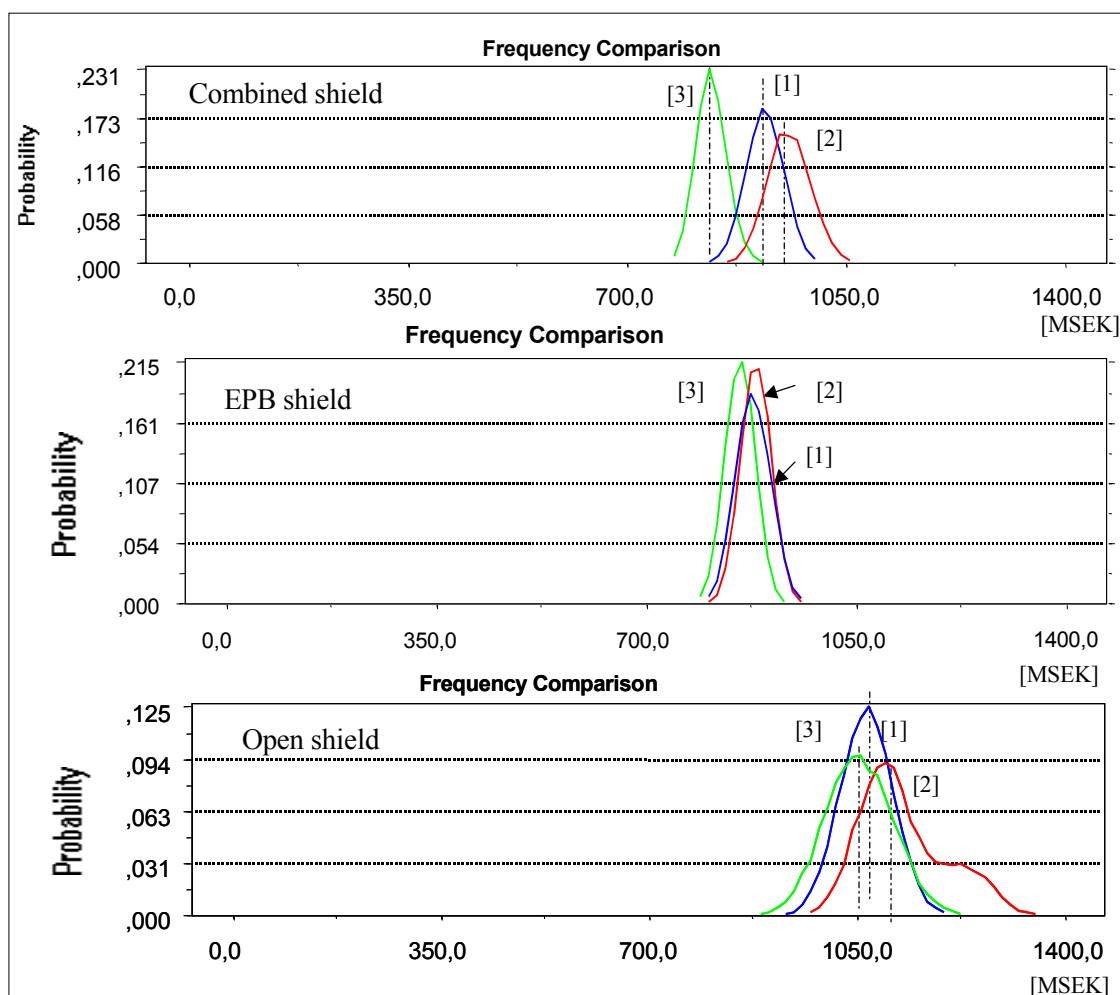


Figure 17 Resultat av simuleringarna med sköldmaskin i miljoner kronor [MSEK], där [1] är normal byggkostnad vid låg robusthet och delvis korrelerade egenskaper utan hänsyn tagen till exceptionell kostnad; [2] är den totala byggkostnaden för låg robusthet och delvis korrelerade egenskaper inklusive all exceptionell kostnad; och [3] är den totala byggkostnaden för hög robusthet och delvis korrelation inklusive all exceptionell kostnad

Figure 17 Results of the simulation by shield machine type in millions of Swedish kronor [MSEK], where [1] is the normal construction cost for a low degree of robustness and partial correlation without considering exceptional cost; [2] is the total construction cost for a low degree of robustness and partial correlation considering all exceptional costs; and [3] is the total construction cost for a high degree of robustness and partial correlation considering all exceptional costs.

Analysen av den totala byggtiden och kostnaden för de olika sköldmaskinstyperna visar, att det inte är några större skillnader mellan den totala byggkostnaden för kombi och EPB-sköld. Kombiskölden uppvisar dock en väsentligt lägre byggtid vid hög robusthet jämfört med EPB-sköld. Anledningen kan vara, att kombiskölden är lämpligare för drivning både i jord under vattentryck och i torr sandsten, vilket fanns vid Grauholz-projektet. Speciellt områdena med hög halt av finjord kan hanteras på rätt sätt med välanpassad separeringsanläggning. I det aktuella fallet vid byggandet av Grauholz-tunneln användes kombisköld. Anledningen till den längre byggtiden vid användande av EPB-sköld är troligtvis, att den metoden är känslig för förekomst av stenblock. Denna typ av sköldmaskin skulle troligtvis ha varit bättre, om den hade möjligheten att krossa stenar.

Detta är dock inte möjligt med nuvarande teknik. Denna metod har ingen separering. Den totala byggtiden liksom kostnaden för öppen sköld överskrider både den för kombisköld och EPB-sköld. Anledningen till detta kan vara, att öppen sköld erfordrar stora dränerings- och förstärkningsåtgärder för drivning av en tunnel med stor diameter i jord under högt vattentryck. Användande av denna metod innebär väldigt stora kostnader. Denna analys visar också, att användande av öppen sköld vid de aktuella förutsättningarna innebär en mycket stor osäkerhet.

## 5 SLUTSATSER

I regel beslutar byggherren och entreprenören om budget respektive anbudspris. Emellertid behöver båda parter tillgång till en beräknad sannolikhetsfördelning av total kostnad och tid, som bas för deras beslut. Användandet av en beräkningsmodell som ger en översikt över kostnad och tider, som troligen kan uppkomma under byggtiden av projektet, kan ge ett bättre underlag för beslut.

Det har konstaterats, att tunnelprojekt är känsliga för störningar. Anledningen till detta är, att tunnelprocessen kan uttryckas som ett seriesystem i två avseenden. För det första är möjligheterna att byta till en alternativ arbetsplats i ett seriesystem – i detta fall en tunnel - begränsade, om man inte har tillgång till mer än en tunnelfront. För det andra är möjligheten att utföra mer än en huvudaktivitet åt gången ofta begränsad av utrymmesskäl i ett tunnelprojekt. Därför har ofta störningar en större inverkan på tid och kostnad i tunnelprojekt än in andra typer av konstruktioner.

Olika studier av t.ex. Kastbjerg (1994), Andreossi (1998), och HSE (1996) har visat, att stora kostnads- och tidsöverskridanden är vanliga i infrastrukturprojekt inklusive tunnelprojekt. Eftersom dessa överskridanden orsakar stora problem för alla involverade parter i tunnelprocessen, är det viktigt att riskfaktorerna beaktas på ett stringent sätt.

Baserat på diskussioner om olika riskfaktorer och deras inverkan på kostnader och tider i tunnelprojekt har det konstaterats, att det är viktigt att tydligt skilja mellan *normal kostnad och tid* och de *oönskade händelser*, som förorsakar *exceptionella kostnader och tider*. Befintliga beräkningsmodeller för beslutshjälp, som behandlar variationer i variablerna (sådan som successiva metoden och DAT) behandlar inte dessa faktorer separat i beräkningen.

Variationer på grund av normala riskfaktorer baseras i denna studie på analys av ”faktorer som orsakar avvikelser i den normala tiden och kostnadsspannet”. Exempel är kapacitetsrelaterade faktorer, såsom framdrift av drivningsmetoden.

Oönskade händelser definieras som “händelser som orsakar stora oplanerade förändringar i tunneldrivningsprocessen”. Sådana händelser orsakas ofta av fysiska faktorer som geologiska och hydrogeologiska förhållanden. Tunnelras och oväntade förändringar i geologiska förhållanden eller ett icke förutsett byte av drivningsmetod, är exempel på oönskade händelser.

I denna studie anger termen “robusthet” flexibilitet och beredskap för att hantera aktuella förhållanden. Baserat på fallstudier av t.ex. Hentschel (1997), Wenger (1994), och Beck och Thullner (1998), kan man dra slutsatsen att användandet av åtgärder som ökar robustheten av tunneldrivningsmetoden minskar förekomsten av oönskade händelser. Hänsyn måste därför tas till graden av robusthet i beräkningen.

Osäkerhet som finns vid bedömning av indata för tids- och kostnadsberäkningar visar på behovet att använda en probabilistisk (sannolikhetsbaserad) hantering i stället för den traditionella deterministiska bedömningen.

Analysmetoder och beslutskriterier, som beaktar sannolikhetsfördelningar, behövs för att välja rätt tunneldrivningsmetod. Det är inte alltid den lägsta förväntade totala kostnaden eller tiden som skall styra, det kan också vara den förväntade variationen eller sannolikheten för att överskrida ett visst värde.

Den beräkningsmodell, som beskrivs i denna rapport, har använts på fallstudien Grauholztunneln i Schweiz. Det resultat som erhållits med beräkningsmodellen kan betraktas som realistiskt. Den totala byggtiden och kostnaden, enligt beräkningen, motsvarar i stora drag den verkliga byggtiden och kostnaden.

Den separata beräkningen av normal och exceptionell tid och kostnad bidrar till tydlighet i resultatet. Det har visat sig, att den normala tiden och kostnaden mest påverkar byggtid och kostnad och att en beräkning av exceptionell tid och kostnad för varje identifierad oönskad händelse är möjlig. Detta underlättar för de båda parterna (byggherre och entreprenör) att använda resultatet i olika kontrakts- och organisationsformer.

På grund av den separata behandlingen av olika faktorer som påverkar resultatet kan en känslighetsanalys också utföras som visar vilka faktorer som har den största påverkan på resultatet.

## 6 REFERENSER

- Andreossi, E. M. 1998: Assessing underground tunnelling projects past and future role of reinsurers. *Proc. Reducing risk in tunnel design and construction*, 7-8 December, Basel, Switzerland, Independent Technical Conferences Ltd, Bredford, UK.
- 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.
- Beck, D., Thullner, T., 1998: Der Engelbergbasistunnel und der Umbau des Autobahndreiecks Leonberg. *Tiefbau* 10/1998 (In German).
- Bell, E. Raiffa, H. Tversky, A. 1988: Decision making, Descriptive, normative, and prescriptive interactions. Cambridge university press, Cambridge.
- Benjamin, J R, and Cornell, C.A, 1970: Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers McGraw-Hill, New York, N.Y. 684pp.
- Bunner, J., Råsled, B., Söderberg, E., 1981: Byggstyrning-begrepp Ekonomi och förvaltning, Handboken Bygg, Liber Förlag (In Swedish).
- Chapman, C.B., Cooper, D.F., Cammaert, A.B. 1981: Model and situation specific or methods: risk engineering reliability analysis of an ing. Facility. XIII- TIMS/LURO-III, Athens, July, (1977).
- Charoenngam, C., Yeh, C-Y., 1999: Contractual risk and liability sharing in hydropower construction. *International Journal of Project Management*, Vol 17, No 1, pp 29-37.
- Danielson, U., 1975: Produktionskalkylen - Byggarnas Resursadministration. Williamsson Offsettryck AB, Stockholm 1975 (In Swedish).
- Drees, G., Bahner, A., 1992: Kalkulation von Baupreisen, 3. neubearbeitete Auflage Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin (In German).
- Einstein, H.H., Dudt, J.-P., Halabe, V.B., Descoedres, F., 1996: Geologic uncertainties in Tunnelling , Proc., *Uncertainty in the Geologic Environment: from Theory to Practice*.
- Einstein, H.H, Salazar, G.F., Kim, Y.W., Ioannou, P.G., 1987: Computer Based Decision Support Systems for Underground Construction , Proc., *RETC*, Ch. 77, pp. 1287-1307.
- Einstein, H.H, Descoedres, F., Dudt, J.P., Halabe, V., Oktober 1991: Entscheidungshilfen für den Tunnelbau , *Schlussbericht über die im Auftrag des Bundesamtes für Verkehr ausgeführten Arbeiten* (In German).
- Einstein, H.H. and Vick, S.G, 1974: Geological model for a tunnel cost model. Proc. *Rapid Excavation and Tunneling Conf.*, 2nd, II:1701-1720.
- Girmscheid, G. 2000: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. Ernst & Son Verlag GmbH, Berlin.

- Harr, M. E., 1987: Reliability-Based design in Civil Engineering. McGraw-Hill Company, New York.
- Harsch, W., 1990: Geologie und Hydrogeologie des Grauholztunnels. *Referate der Studientagung vom 23. August 1990 in Schönbühl Fachgruppe für Untertagebau*, SIA Dokumentation D063, Grauholztunnel (In German).
- Health and Safety Executive, 1996: Safety of New Austrian Tunnelling Method tunnels - a review of sprayed concrete lined tunnels with particular reference to London Clay. *HSE Books* 1996, 86pp.
- Hentschel, H. 1997: Difficult Start to Adler Tunnel. *Tunnel* Nr 1/97.
- Isaksson, T. 2002: Model for estimation of time and cost based on risk evaluation applied on tunnel projects. Doctoral Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Dep. of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Sweden.
- Isaksson, T., Reilly, J., Anderson, J., 1999a: Risk mitigation for tunnelling projects - a structured approach. *Challenges for the 21<sup>st</sup> Century*, ITA Oslo, Norway
- Isaksson, T., Reilly, J., Anderson, J., 1999b: Mit Risikoanalyse und Innovativer Projektsteuerung Kostenbewußt Bauen. *Unterirdisches Bauen 2000 - Herausforderungen und Entwicklungspotentiale*, STUVA-Tagung in Frankfurt, Germany
- John, M., Wogrin, J., Heißel, G. 1987: Analyse des Verbrauches im Landrückentunnel, Baulos Mitte. *Felsbau* 5 (1987) Nr.2 (In German).
- Kastbjerg Skamris, M. 1994: Large Transport Projects - Forecast versus Actual Traffic and Costs. Master's Thesis in International Technology Planning, Aalborg University, Denmark.
- Kovári, K., Fechtig, R., Amstad, Ch, 1991: Erfahrungen mit Vortriebsmaschinen grossen Durchmessers in der Schweiz. STUVA-Tagung, Düsseldorf (In German).
- Lichtenberg, S. 1990: Projekt Planlægning - i en foranderlig verden. Polyteknisk Forlag, Denmark. (In Danish).
- Maidl, B. 1988: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus Band I: Konstruktion und Verfahren: 1994, Zweite Auflage pp 163-178 Band II: Grundlagen und Zusatzleistungen für Planung und Ausführung, Verlag Glückauf GmbH, Essen, pp 210-211 (In German).
- Moavenzadeh, F., and Markow, M.J., 1976: Simulation model for tunnel construction costs. *J. Contr. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, CO1: 51-66.
- Müller, L, 1978: Der Felsbau Dritte Band: Tunnelbau, Salzburg, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart (In German).
- Nilsen, B., Palmström, A., Stille, H., 1999: Quality control of a sub-sea tunnel project in complex ground conditions. Proc of Challenges for the 21<sup>st</sup> Century, Alten et al. (eds), Balkema, Rotterdam.
- Nelson, P.P., Al-Jalil, Y.A., Laughton, C., 1994: Tunnel Boring Machine Project Data Bases and Construction Simulation. *Geotechnical Engineering Report GR94-4*, The University of Texas at Austin, Austin, Texas 78712.



- Nylén, K-O., 1999: Civil Works - Unique projects or a repeatable process? Doctoral thesis, Division of Construction Management and Economics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Olsson, L., 1986: Tillämpning av  $\beta$ -metoden inom Geotekniken - Illustrerad med spontberäkning Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Dep. of soil and Rock Mechanics, Stockholm (In Swedish).
- Platz, M., 1991: Problem der Bauzeitprognose bei konventionellen Vortrieben. *Sicherheit und Risiken bei Untertagebauwerken*, ETH-Symposium, 21/22 März 1991, Zürich (In German).
- Quellmelz, F. 1987: Die Neue Österreichische Tunnelbauweise - Technische und wirtschaftliche Einsatzkriterien für ausgewählte Betriebsmittel, Sicherungselemente und Bauverfahren. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin (In German).
- Rausand, M., 1991: Risiko Analyse Veiledning til NS 5814, Tapir forlag. (In Norwegian).
- Reilly, J., Anderson, J., Isaksson, T. 1998: Tunnel Project Procurement and Processes - Fundamental Issues of Concern. *Reducing risk in tunnel design and construction*, Basel
- Reilly, J., Isaksson, T., Anderson, J. 1999: Tunnel Procurement Process - Management Issues and Risk Mitigation - Getting it Right from the Beginning - Policy, Management, Procurement, Risk Evaluation and Decision Methodologies for Optimal Results. *10th Australian tunnelling conference: The race for space in Melbourne, March '99*
- RRV 1994: Infrastrukturinvesteringar - en kostnadsjämförelse mellan plan och utfall i 15 större projekt inom Vägverket och Banverket Riksrevisionsverket 1994:23.
- Rohrer, U. 1994: Überlegungen des Unternehmers in der Offertphase. *Referate der Studientagung vom 26. Mai 1994 in Schönbühl Fachgruppe für Untertagebau*, SIA Dokumentation D0116, Grauholztunnel II
- Salazar, G F, 1983: Stochastic and Economic Evaluation of Adaptability in Tunneling Design and Construction. Doctoral Thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Salazar, G F, 1985: Simulation model for tunneling through difficult ground conditions. Department of Civil Engineering, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts.
- Stille, H., Sturk, R., Olsson, L., 1998: Quality systems and risk analysis - new philosophies in underground construction industry *Proc of the International Conference on Underground Construction in Modern Infrastructure*, Stockholm, Sweden, 7-9 June 1998, AA Balkema.
- Tengborg, P. Olsson, L., Johansson, J., Brantmark, J. 1998: Systemanalys för Hvalfjärdurtunneln. *Bergsprängningskommitténs diskussionsmöte* i Stockholm, 11 mars 1997 (In Swedish).
- Thoft-Christensen, P., Baker, M.J., 1982: Structural Reliability Theory and its Applications. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Vanmarcke, E.H. 1977: Probabilistic Modeling of Soil Profiles. *Journal of the Geotechnical Engineering*, Div. ASCE, Vol 103, No GT 11, Nov 1977.
- Wallis, S. 1993: Storebaelt Review. *World Tunnelling*, April 1993.

Wenger, P, 1994 : Besondere Ereignisse beim Vortrieb. *Referate der Studentagung vom 26. Mai 1994 in Schönbühl Fachgruppe für Untertagebau*, SIA Dokumentation D0116, Grauholtztunnel II (In German).