

06018 2



KUNGL
TEKNISKA
HÖGSKOLAN

Tunneldrivning med sköld
- Riskbaserad beslutsmodell

Therese Isaksson

Stockholm 1998

Licentiate Thesis 2030
Division of Soil and Rock Mechanics
Department of Civil and Environmental Engineering
Royal Institute of Technology

SAMMANFATTNING

Erfarenheten visar, att många utförda tunnelprojekt inte kan genomföras med planerad budget och inom planerad tidsram. En av anledningarna är, att den valda tunneldrivningsmetoden inte är den mest lämpade för de projektspecifika förutsättningarna. Val av tunneldrivningsmetod måste ske tidigt i projektet, eftersom byte av metod leder till stora kostnadsökningar. Innan definitivt val av drivningsmetod sker, är det viktigt att bedöma risker med metoden.

Ofta står valet mellan helt mekaniserad och konventionell drivning. Vid helt mekaniserade drivningsmetoder måste en och samma maskin klara av alla de geologiska formationer, som kan tänkas förekomma längs hela tunnelsträckningen. Vidare har man vid dessa maskiner inte direkt tillgång till tunnelfronten. Speciellt vid komplexa geologiska förhållanden är därför riskerna stora vid användning av mekaniserade fullortsmaskiner (TBM) och sköldade maskiner.

För att kunna genomföra ett projekt i komplexa geologiska förhållanden och under ogynnsamma yttre förutsättningar på ett lyckosamt sätt ställs helt andra krav på beställare och anbud än vad som normalt är vanligt. Det är viktigt att ha en modell för att välja tunneldrivningsmetod, som ger en helhetsbild över projektet. Modellen måste ta hänsyn till möjliga kostnadsökningar, som uppkommer på grund av risk och variation i drivbarheten. Beräkning endast av normalkostnader, där hänsyn endast tas till normal drivbarhet, är inte tillräckligt att användas som beslutsunderlag. Vidare är det viktigt att ha en modell, som tar hänsyn till ändringar i drivbarheten vid användande av robusthetshöjande åtgärder hos drivningsmetoden.

Det behövs modeller, som möjliggör jämförelse mellan olika tunneldrivningsmetoder, tex olika sköldmaskintyper, och som tar hänsyn till hur olika geologiska faktorer påverkar drivningen. En sådan modell har utarbetats och beskrivs i denna avhandling. Med modellen beräknas troliga totala kostnader (och tider) och man får även ett mått på osäkerheten i prognosen. Därmed kan man också finna den drivningsmetod, som har de minsta riskerna.

I beräkningsmodellen delas den studerade tunneln in i geologiska zoner med likartade geologiska förhållanden. Framdriften genom en viss geologisk zon beror på vilken drivningsmetod som studeras. För varje geologisk zon sker en indelning av framdriften i ett antal drivbarhetsklasser, där varje drivbarhetsklass beskriver framdriften hos den studerade drivningsmetoden (tex låg, normal eller hög). Eftersom man inte vet, vilken drivbarhetsklass som verkligen råder i en viss geologisk zon, gör man en beräkning av sannolikheten för att en viss klass är den som råder i verkligheten. Sannolikheten kan beräknas genom att studera geologiska faktorer, som har inflytande på framdriften hos den studerade drivningsmetoden. Vid vissa värden hos den geologiska faktorn erhålles

signifikant ändrade framdrifter. Dessa värden kan betecknas som metods specifika gränsvärden. Sannolikheten bedöms för att verkliga geologiska värden överskrider eller underskrider de metods specifika gränsvärdena och sedan kan drivbarhetsklassens sannolikhet beräknas.

För varje drivbarhetsklass beräknas kostnaden för drivning med den studerade metoden. En uppdelning av kostnaderna har gjorts i normalkostnad och risk, se ekvation (1). Denna uppdelning har gjorts för att möjliggöra en separat riskstudie. Vid beräkning av normalkostnaden tas inte hänsyn till oönskade händelser utan endast en 'normal' variation av framdriften.

Risken uttrycks i detta fall som sannolikheter och konsekvenser för oönskade händelser. Risken varierar beroende på vilken drivbarhetsklass som studeras. Orsaken till att oönskade händelser inträffar kan vara tex geologiska faror eller maskinanknutna faror. Sannolikheten för att oönskade händelser skall inträffa kan t.ex. beräknas med hjälp av felträdsanalys. Konsekvenser av oönskade händelser kan bedömas med hjälp av erfarenheter från liknande projekt.

För att beräkna förväntade totala kostnader för en drivningsmetod viktas för varje zon normalkostnaden och risken för varje drivbarhetsklass med sannolikheten för respektive klass. Sedan görs en summering för hela tunneln, se ekvation (2).

Vissa i kostnadsberäkningen ingående parametrarna tex framdriften uttrycks som stokastiska variabler. En MonteCarlo simulering av de förväntade totala kostnaderna kan därför utföras.

Denna analys görs för var och en av de studerade drivningsmetoderna. Val görs därefter utifrån ett uppställt beslutskriterium. Ett kriterium för beslut om drivningsmetod är att man väljer den metod, som ger den lägsta förväntade totala kostnaden, men andra kriterier kan givetvis tänkas.

Modellen för beräkning av förväntade totala kostnader för en maskintyp kan även beskrivas enligt följande formler:

Kostnad vid viss drivbarhetsklass i en viss zon

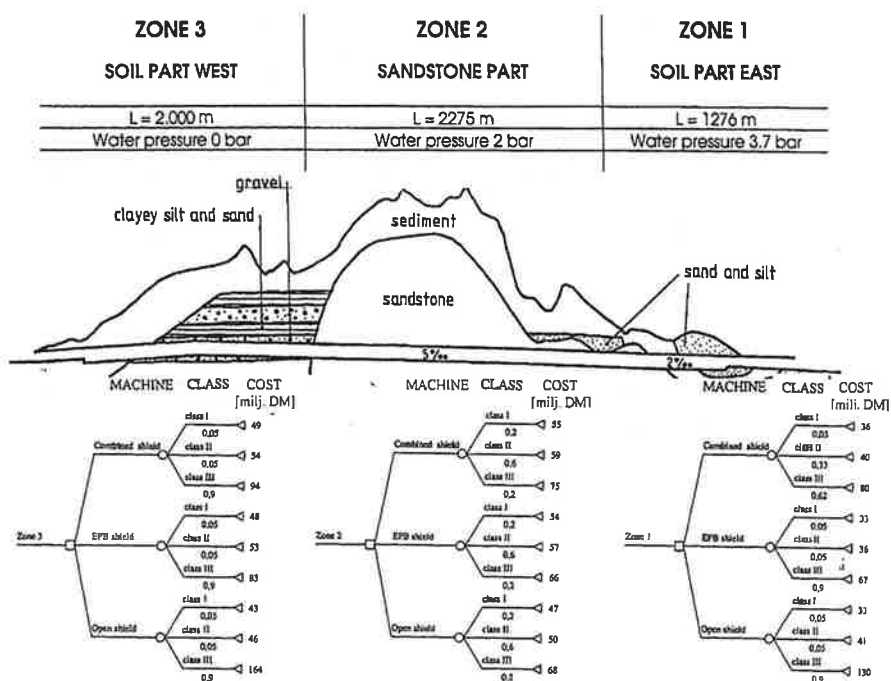
$$C_{ij} = C_{Nij} + \sum_{k=1}^n P_{f_{jk}} * C_{f_{jk}} \quad (1)$$

Förväntad total kostnad för hela tunneln

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^o (C_{ij} * P_{ij}) \quad (2)$$

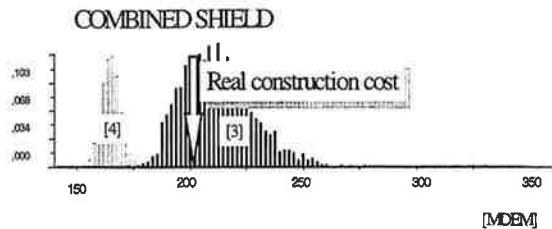
där $i = \text{zon}$, $j = \text{drivbarhetsklass}$, $k = \text{önskad händelse } k$, $C_{N_{ij}}$ = normalkostnaden för en zon och klass, $P_{f_{jk}}$ = sannolikheten för oförutsedd händelse k i viss zon och klass, $C_{f_{jk}}$ = kostnadskonsekvensen av händelse k i viss zon och klass, och P_{ij} = sannolikheten för drivbarhetsklass i i viss zon.

För att demonstrera användningen av den ovannämnda teoretiska modellen för val av tunneldrivningsmetod har Grauholztunneln i Bern, Schweiz, studerats. Tre olika sköldmaskintyper för drivning av den 1993 färdigställda tunneln har jämförts. I Figur 1 har en sannolik kostnad för drivning av tunneln beräknats för de tre olika sköldmaskintyperna.



Figur 1 Beslutsträd utan åtgärder

Figur 2 visar ett exempel på resultat av MonteCarlo simuleringen av förväntade totala kostnader vid drivning med kombisköld för hela tunneln, dvs summan av alla tre zonerna. Kostnaderna är beräknade med hänsyn tagen till drivbarhet och risker såväl med robustethöjande åtgärder [4] som utan åtgärder [3]. De totala förväntade kostnaderna med åtgärder är lägre än utan åtgärder, då sannolikheten för att önskad händelser skall inträffa blir lägre. Även verklig totalkostnad för tunneln visas i figuren.



Figur 2 Resultat av simuleringen med kostnader för utförandet av Grauholtztunneln med kombisköld utan [3] och med [4] robustethöjande åtgärder

Genom studien av olika sköldmaskiner för drivning av Grauholtztunneln kan följande konstateras:

1. Kombisköldtekniken är lämplig vid drivning i såväl jord under vattentryck som torr sandsten, vilket förekom vid Grauholtztunneln. Vid hög lerhalt blir dock kostnaden för separeringsarbetet omfattande.
2. EPB sköld är känslig för blockförekomst och låg finjordshalt. Kostnaden för EPB sköld skulle troligtvis bli lägre än för kombisköld, om det vore möjligt att krossa stenblock. Med nuvarande teknik är detta dock inte möjligt. Separeringskostnader uteblir vid denna maskin.
3. Öppen sköld kräver mycket omfattande dränerings- och förstärkningsåtgärder vid drivning av tunnlar med stor diameter i jord under högt vattentryck. Med denna maskin blir kostnaderna mycket höga.

Sammanfattningsvis kan konstateras att den utarbetade teoretiska modellen är användbar för val av sköldmaskintyp. Detta framkom vid tillämpningen på fallstudien Grauholtztunneln.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	v
SAMMANFATTNING	vii
SUMMARY	xi
BETECKNINGAR.....	xvii
1 INLEDNING.....	1
1.1 BAKGRUND OCH MÅL	1
1.2 Problembeskrivning.....	1
1.3 Studerat delområde	2
1.4 Tidigare utförda arbeten inom detta område.....	4
1.4.1 Simulering av tider och kostnader.....	4
1.4.2 Analys av risker.....	8
1.4.3 Sammanfattning.....	9
2 STUDERADE SKÖLDMASKINER.....	11
2.1 Teknisk beskrivning och användningsområde.....	11
2.1.1 Inledning.....	11
2.1.2 Sköld med slurrystöttad front	14
2.1.3 Kombisköld.....	15
2.1.4 Sköld utan frontstötning - öppen sköld.....	17
2.1.5 Sköld med jordstöttad front - EPB sköld.....	18
2.1.6 Permanentförstärkning.....	20
2.1.7 Borrverktyg.....	21
2.2 Jord- och Bergmekaniska aspekter	23
2.2.1 Inledning.....	23
2.2.2 Sköld utan frontstötning	25
2.2.3 Sköld med slurrystöttad front	26
2.2.4 Sköld med jordstöttad front	29
2.3 SLUTSATS	31
3 TEORETISK MODELL FÖR METODVAL.....	33
3.1 Inledning.....	33
3.1.1 Allmänt	33
3.1.2 Beräkningsmodell.....	34
3.1.3 Beslutsmodell.....	37
3.2 Metodik för beräkning av normalkostnader.....	38
3.2.1 Fasta och tidsberoende kostnader.....	38
3.2.2 Metodik för beräkning av framdrift med sköld	40
3.3 Bestämning av sannolikhet för drivbarhetsklass.....	47
3.3.1 Inledning.....	47
3.3.2 Robusthet hos metoden.....	49
3.3.3 Modell för beräkning av sannolikheten för drivbarhetsklass	53
3.4 Oförutsedda händelser - beräkningsmetodik.....	58
3.4.1 Inledning.....	58
3.4.2 Riskidentifiering	60
3.4.3 Sannolikhetsberäkning	71
3.4.4 Konsekvensberäkning.....	72
3.4.5 Robusthetshöjande och riskminskande åtgärder.....	74
3.5 Slutsats.....	81

4 FALLSTUDIE	83
4.1 Inledning	83
4.2 Projektbeskrivning	83
4.3 Geologi och hydrogeologi.....	85
4.4 Möjliga sköldmaskiner.....	88
4.5 Beräkning av normalkostnader	89
4.5.1 Fasta och tidsberoende kostnader.....	89
4.5.2 Beräkning av framdrift	93
4.5.3 Sammanställning av kostnader.....	95
4.6 Beräkning av sannolikheter för drivbarhetsklass	96
4.6.1 Inledning.....	96
4.6.2 Robustheten hos metoden	97
4.6.3 Beräkning	97
4.7 Beräkning av oförutsedda händelser	101
4.7.1 Riskidentifiering.....	101
4.7.2 Sannolikhetsberäkning.....	102
4.7.3 Konsekvensberäkning	102
4.7.4 Robusthethöjande åtgärder.....	105
4.8 Resultat av simuleringen.....	107
4.8.1 Allmänt	107
4.8.2 Kostnader.....	108
4.8.3 Byggtider	110
4.8.4 Slutsats av simuleringstudien.....	111
4.9 Analys och Verkligt utfall.....	111
4.9.1 Geologi.....	111
4.9.2 Val av sköldmaskin.....	112
4.9.3 Oförutsedda händelser.....	113
4.9.4 Sannolikhet för drivbarhet.....	115
4.9.5 Kostnad och byggtid.....	116
5 DISKUSSION OCH SLUTSATS	119
5.1 Allmänt teoretiska modellen	119
5.2 Oönskade händelser	119
5.3 Analys av teoretisk modell och fallstudie	119
6 FORTSATT FORSKNING	121
6.1 Modell för Val av tunneldrivningsmetod	121
6.1.1 Allmänt	121
6.1.2 Komplettering med konventionell drivning.....	121
6.1.3 Fördjupade studier av robusthet och beslutskriterier.....	121
6.1.4 Tillämpning på svenskt projekt	121
6.1.5 Jämförelse med annan metodik.....	122
6.2 Optimering av byggprocessen.....	122
6.2.1 Allmänt	122
6.2.2 Lagerhållning	122
6.2.3 Byggtid.....	122
6.2.4 Utbytesstrategier för komponenter.....	123
REFERENSER	125