

RØRSKJERM – DIMENSJONERING OG DESIGN

Pipe Umbrella – Dimensioning and Design

Helene Strømsvik, NTNU

Professor II Eivind Grøv, SINTEF/NTNU

Dr. ing. Helen Andersson, Huth & Wien Engineering

SAMMENDRAG

Rørskjerm er en metode som brukes til midlertidig sikring av stoff ved driving av tunnel gjennom soner med ekstremt og usedvanlig dårlig bergmassekvalitet. Metoden kan defineres mer som en drivemetode enn en sikringsmetode, da den ikke er en del av den permanente tunnelsikringen. Metodikken er ikke så mye brukt i Norge, men den har utstrakt bruk internasjonalt. Det finnes svært mange varianter for installasjon av rørskjerm og den er kjent under mange navn.

I foreliggende artikkel gis et utdrag av en masteroppgave som har sett på bruken av rørskjerm i Norge. I masteroppgaven ble det blant annet utført et empirisk studie for å se etter sammenheng mellom bergmassekvalitet og utforming i 20 utførte rørskjermprosjekter. Det ble også utviklet en modell for bruk ved dimensjonering og design av rørskjerm.

I det empiriske studiet ble Q-systemet benyttet som klassifikasjonssystem. Det ble konstatert at det ikke er noen sammenheng mellom Q-verdi og valg av diameter på stålrørene, avstand mellom stålrørene, eller overlapp mellom hver rørskjerm. Det ble vurdert som mer fordelaktig å se på grunnforholdene fra en geoteknisk synsvinkel. Studiet bekreftet at rørskjerm er en sikringsmetode som har fungert godt ved driving av tunneler gjennom områder med vanskelige grunnforhold.

Det er fortsatt ingen allment godkjente designkriterier for dimensjonering av rørskjerm, men den metoden som er mest brukt er bjelkemodell for elastiske fundamenter. Det ble derfor laget en slik bjelkemodell ved bruk av konstruksjonsprogrammet FAP og et parameterstudie ble utført med den utviklede modellen.

Masteroppgaven er veiledet av Professor II Eivind Grøv og Dr. ing. Helen Andersson har vært medveileder.

SUMMARY

Pipe Umbrella is a temporary pre-support method for tunnels, suited for extremely poor geological conditions. The method is not commonly used in Norway, but is widely used in other places of the world. There are many different techniques for installing Pipe Umbrellas, and the method is known by many names.

This article gives an extract of a master thesis that has considered the use of Pipe Umbrella in Norway. An empirical study was conducted to search for a correlation between Q-value and type of Pipe Umbrella. No relation was found between Q-value and the choice of diameter of the steel pipes, distance between the steel pipes, or overlap between each umbrella arch. It was considered more advantageous to look at the ground conditions from a geotechnical standpoint. However, the cases in the study confirmed that Pipe Umbrella is a method that successfully has been used for reinforcing the face of a tunnel in challenging geological conditions.

There are no generally accepted methods for designing and dimensioning a Pipe Umbrella. The method that is most used is the elastic foundation beam model. Therefore, an elastic foundation beam model was developed with the use of the construction program FAP, and a parameter study was conducted with the model.

INNLEDNING

Ved driving av tunneler i områder med ugunstige og vanskelige geologiske forhold kan det dukke opp problemer som ras, nedfall av masse og vanninnstrømning. Dette kan føre til store forsinkelser, økonomisk tap og i verste fall personskade. Det finnes flere metoder for å drive tunnel gjennom slike områder og internasjonalt er rørskjerm en anerkjent metode. I den siste tiden har metoden blitt gjennomført på enkelte prosjekter i Norge. Rørskjerm konstrueres ved at injiserbare stålrør bores inn i en vinkel rundt takprofilen fra stoff i driveretningen, slik at man hindrer at overliggende løsmasse raser ned på stoff ved videre driving av tunnelen.

Tekniske forbedringer av metoden gjør at den også kan installeres i områder med hardt berg og rørskjerm er derfor et alternativ ved forsering av svakhetssoner og soner med manglende, eller liten fjelloverdekning. Det finnes svært mange varianter og betegnelser på metodikken, men lite beskrivelser av hvilke forhold de ulike variantene egner seg til. Det finnes også mange metoder for design og dimensjonering, men det er fortsatt ingen allment godkjente designkriterier for dimensjonering av rørskjerm. Den mest brukte metoden er bjelkemodell for elastiske fundamenter.

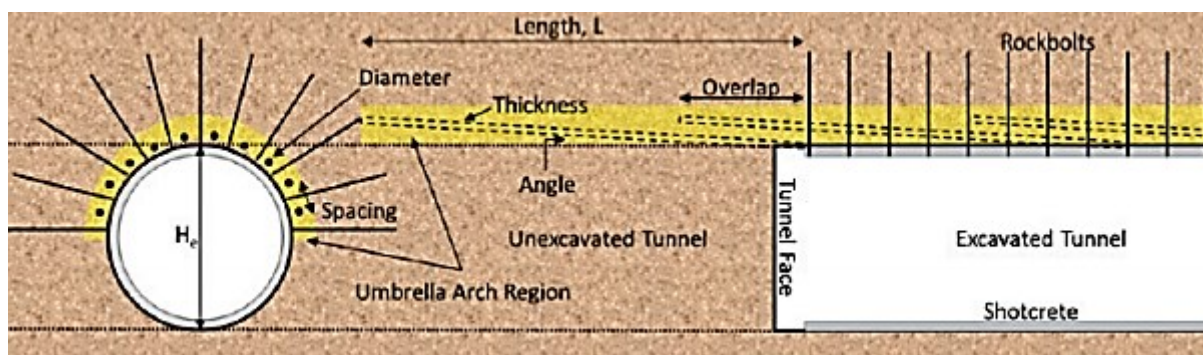
Rørskjermvarianten «Composite Pile Roofing» har vært brukt flere ganger i Norge, men offisielt regnes rørskjermen som ble brukt under drivingen av en jernbanetunnel i Holmestrand i 2013 som den første i Norge. Dette er mest sannsynlig på grunn av at denne varianten av rørskjerm er den mest tradisjonelle, med tanke på montering og type stålrør.

Med denne bakgrunnen ble det i masteroppgaven valgt å fokusere på anvendbarheten av rørskjerm i norsk tunneldrift og dimensjonering. Mange aspekter ved tunneldrift i Norge er basert på tidligere erfaringer, empiri. For at en ny metode skal få innpass ble det derfor ansett som nyttig å samle erfaringer fra utenlandske prosjekter, samt finne en enkel metode for dimensjonering ved ulike forhold.

GENERELL BESKRIVELSE AV RØRSKJERM

En generell beskrivelse av rørskjerm er at det er en metode for å sikre foran stuff, ved at man installerer stålrør rundt takprofilen inn i bergmassen/løsmassen i driveretningen, se Figur 1. Metoden har derfor likhetstrekk med metoden som vi kjenner som forbolting. Rørene forankres til en gitterbue ved stuff og injiseres, før videre driving av tunnelen. Figur 2 viser en rørskjerm av typen «Composite Pile Roofing» etter installasjon.

Rørskjerm har tradisjonelt vært brukt i forbindelse med tunneldriving i løsmasser, men tekniske forbedringer av metoden gjør den betydelig enklere å bruke ved tunneldriving også i hardt berg. Metoden kan derfor være aktuell ved tunneldriving i berg med mektige svakhetssoner med løsmassekarakter (NFF, 2008). Hovedmålet med å benytte denne teknikken er å forhindre utrasing på stuff og kontrollere setninger før permanent tunnelsikring kommer på plass (Zhang et al., 2014).

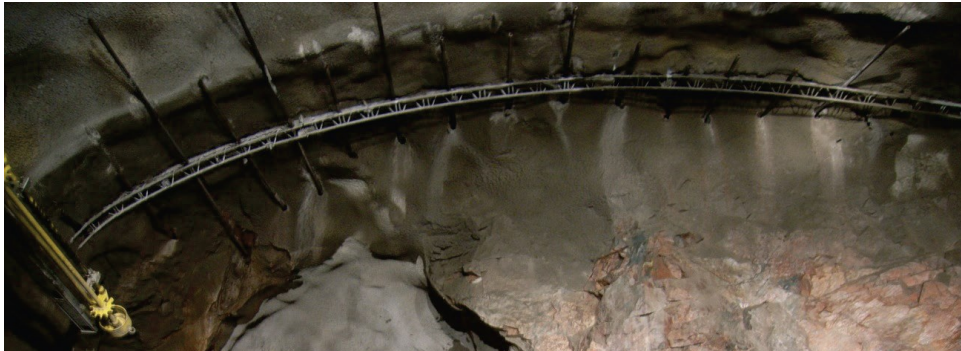


Figur 1: Illustrasjon av en rørskjerm i tverrprofil og lengdeprofil, men henvisning til noen av de vanligste designparametrene (Oke et al., 2014).

Figure 1: Cross-sectional and longitudinal section of an installed Pipe Umbrella, with design parameters (Oke et al., 2014).

Diameteren på stålrørene er vanligvis mellom 60 mm og 200 mm, med en veggtykkelse på 4 mm til 8 mm. Lengden på rørene i hver skjerm er vanligvis mellom 12 til 15 meter, med en monteringsavstand mellom rørene på 0.4-0.6 m. Det er også vanlig at hver skjerm overlapper, der overlappingslengden avhenger av grunnforholdene. Vanlig installasjonsvinkel er under 15° ut fra tunnelprofilen (Volkman og Schubert, 2007, Song et al., 2013).

Systemet kan kontinuerlig tilpasses grunnforholdene man påtreffer under driving. For å installere stålrørene kan man bruke konvensjonelle borerigger, eller spesialtilpassede maskiner. Ved installasjon kan man enten benytte selvboende stålrør med engangs borkrone på enden, eller man kan først bore et hull, for deretter å installere røret i etterkant. Ved svært dårlige bergmasseforhold kan borhullet kollapse og det blir vanskelig å installere røret. Det kan derfor være en fordel å bruke selvboende stålrør under slike forhold (Volkman og Schubert, 2007).

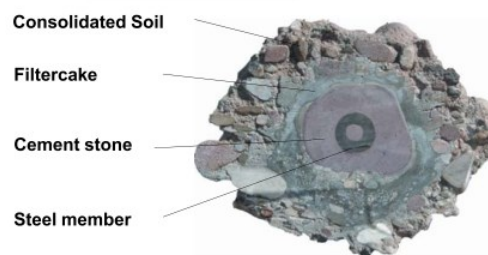


Figur 2: «Composite Pile Roofing» montert i forbindelse med tunnelprosjektet Yxhugget i Stockholm, (Foto: Roland Ekenberg)

Figure 2: «Composite Pile Roofing» installed at Yxhugget (Photo: Roland Ekenberg).

Etter at rørboltene er montert, injiseres de. Injeksjonsmassen fyller innsiden av røret, tomrommet mellom røret og den omliggende løsmassen, eventuelt sprekker i omliggende bergmasse, se Figur 3. Hvordan injeksjonen utføres kan variere ved ulike typer stålrør. Noen rør har perforeringer langs siden, i andre rør pumpes injeksjonsmassen ut enden av røret og i noen varianter kan rørene injiseres under boring. Disse metodene sørger for at injeksjonsmassen blir godt fordelt i og rundt stålrørene. Det er også mulig å injisere ved forbolting, men da har man mye mindre kontroll over fordelingen av injeksjonsmassen, da man injiserer fra stuff og innover via tomrommet mellom kamstål og omliggende bergmasse. Kollaps av bergmassen rundt kamstålsboltene vil for eksempel hindre injeksjonsmassen fra å nå enden av borhullet.

Injeksjonsmassen har flere ulike egenskaper: den forsterker bøyemotstanden til rørene, øker lastoverføringen og forbedrer stivheten til den omliggende løsmassen (Volkman og Schubert, 2008). Ved bruk av helgjenget stål med dype kammer vil heften mellom stålrøret og injeksjonsmassen også gi en betydelig lastoverføring av skjærkrefter (Ischebeck, 2010).



Figur 3: Tverrsnitt av et injisert stålrør av typen TITAN Hollow bar (Ischebeck, 2010)

Figure 3: Cross-section of an injected TITAN Hollow bar (Ischebeck, 2010)

Det finnes mange ulike varianter av rørbolter med engangskroner både for berg og løsmasse (NFF, 2008). To ulike typer stålrør som er blitt benyttet i Norge er AT Ø114 fra ALWAG og TITAN Hollow Bar 40/16 fra Ischebeck (Andersson, 2015, Drageset, 2013). Tabell 1 gir en oversikt over tunnelprosjekter der rørsjerm har blitt benyttet i Norge.

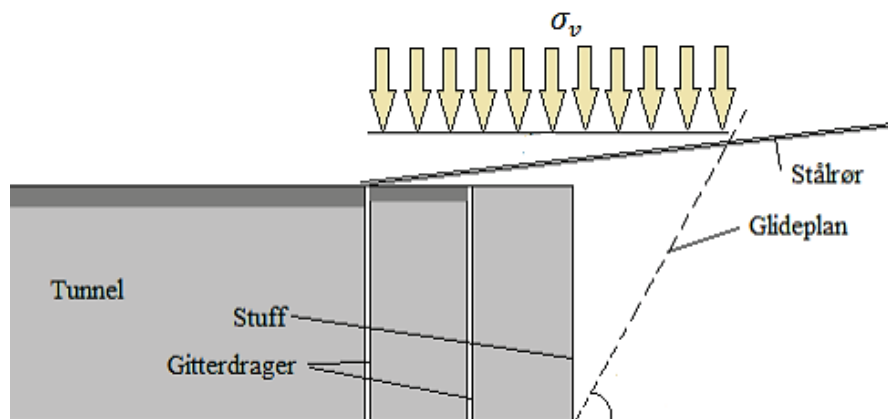
Tabell 1: Norske prosjekter der rørskjerm har blitt benyttet (Andersson, 2015, Dragset, 2013)
 Table 1: Norwegian projects where pipe umbrella is installed (Andersson, 2015, Dragset, 2013)

Tunnelprosjekt	Type rørskjerm
Nationalteateret (1997)	Composite Pile Roofing
T-baneringen (2004)	Composite Pile Roofing
Akersgata (2008)	Composite Pile Roofing
Gevingåsen (2010)	Composite Pile Roofing
Espatunnelen (2013)	Composite Pile Roofing
Holmestrand (2013)	AT-Pipe Umbrella System

Noen av de mest brukte betegnelse for rørskjerm er «Pipe Roof Umbrella», «Steel Pipe Umbrella System», «Umbrella Arch Method», «Pipe Forepole Umbrella», «Long-Span Steel Pipe Fore-Piling» og «Steel Pipe Canpy» (Volkman og Schubert, 2007). I følge Oke et al. (2014) er det ingen standardisert bruk av betegnelse på de ulike variantene av rørskjermer. De viktigste designparameterne som benyttes ved dimensjonering er: lengde på rør, installasjonsvinkel på rør, overlapp mellom hver skjerm, avstand mellom hvert stålrør, diameter på stålrørene og injeksjonstrykk (Oke et al., 2014). Noen av disse designparameterne er illustrert i Figur 1.

RØRSKJERMERS FUNKSJON I GRUNNEN

Rørskjerm regnes som en midlertidig sikring for å bevare profilet, før man får etablert permanent sikring, og regnes ikke som en del av den permanente tunnelsikringen (NFF, 2008). Man kan derfor si at det er mer en drivemetode enn en sikringsmetode.



Figur 4: Illustrasjon over den bærende funksjonen til rørene i en rørskjerm, der σ_v er silotrykket fra den overliggende massen (Strømsvik, 2015).

Figure 4: Illustration showing how the steel pipes work as supporting beams (Strømsvik, 2015).

Etter installasjon av rørene vil lasten som virker på rørene være tilnærmet null. De nyinstallerte rørene blir ikke påvirket i særlig grad av tidligere aktivitet i tunnelen, men videre driving vil føre til at stålrørene påføres last fra overliggende masse. Dette vil aktivere en støttende effekt fra rørene. Rørskjermen vil utsettes for størst belastning og

tøyning i den usikrede delen inn mot stuff. Den enden av rørskjermen som er bak stuff er montert fast til en gitterbue sprøytet inn med fiberarmert sprøytebetong, som er en del av den permanente sikringen. Den andre enden av rørene ligger i bergmassen/løsmassen foran stuff, der den opprettholder lasten som utløses fra massene her (Zhang et al., 2014). På denne måten virker hele systemet som en støttende bjelke, illustrert i Figur 4.

Rørskjermen trenger bare å støtte den overliggende massen for en kort periode. Etter hvert som man driver fremover vil bjelkeeffekten forsvinne og rørskjermen vil ikke lengre virke som en lastbærende komponent i sikringssystemet. Funksjonen til rørskjermen som sikring under driving er på dette tidspunktet utført (Zhang et al., 2014).

I tillegg til effekten av de injiserte stålrørene vil styrken og stivheten til rørskjermssystemet også avhenge av egenskapene til den omliggende grunnen og styrke- og stivhetsegenskapene til sprøytebetongen og gitterbuen, som rørene er festet til bak stuff (Volkmann og Schubert, 2010).

RELASJONER MELLOM GEOLOGISKE FORHOLD OG VALG AV RØRSKJERMVARIANT

I det empiriske studiet er det tatt utgangspunkt i vellykkede rørsjermprosjekter, som er utført under ulike geologiske forhold internasjonalt. En oversikt over de utvalgte prosjektene er gitt i Tabell 2. Disse prosjektene omfavner tunneler drevet i ren løsmasse, manglende bergoverdekning og forsering av svakhetssoner. Q-systemet ble valgt som klassifikasjonssystem, da dette er det mest benyttede bergmasseklassifikasjonssystemet i Norge. Det er anslått en Q-verdi for hvert prosjekt etter retningslinjene til Q-systemet og utført flere plot i Q-systemets sikringsdiagram. I plottene ble det sett etter korrelasjoner mellom grunnforhold og bruk av rørsjerm, samt valg av rørsjermens design. Hensikten med dette var å se om Q-systemet kunne være egnet til å gi generelle anbefalinger angående sikring med rørsjerm.

Figur 5 a) viser plot i Q-systemets sikringsdiagram for alle 20 utvalgte prosjekter. Samtlige prosjekter faller innenfor bergmassekvalitetene G og F, ekstremt og usedvanlig dårlig bergmasse. Alle, utenom ett prosjekt har en Q-verdi mellom 0,003 og 0,030 og ligger i sikringskategoriene 7 og 8. Figur 5 b), c) og d) viser henholdsvis plot over diameter på stålrør, rørlengde og overlapp mellom hver rørsjerm.

Ingen av plottene viser trender mellom Q-verdi og diameter på stålrør, lengde på stålrør, eller overlapp mellom rørsjerner. Under studiet av de 20 prosjektene ble det lagt merke til at den mest vanlige komplikasjonen ved driving av rørsjerm virker til å være nedfall av masse mellom stålrørene. Dette er et problem som, i følge Furukawa et al. (2007), kan løses ved redusert monteringsavstand mellom stålrørene og justering av injeksjonsmassen.

Tabell 2: Utvalgte prosjekter med estimert Q-verdi og designparametere (Strømsvik, 2015).
Table 2: Selected projects with estimated Q-value and design parameters (Strømsvik, 2016).

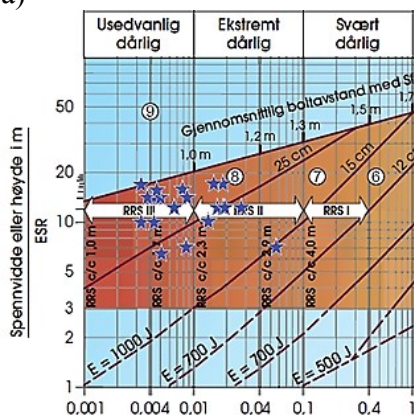
Prosjekt	Diameter stålrør [mm]	Veggtykkelse stålrør [mm]	Lengde stålrør [m]	Overlapp [m]	c/c stålrør [m]	Beregnet Q-verdi	Spennvidde /ESR
Holmestrand	114	6,3	15	4	0,3	0,0250	11
Takakoa	60	-	12	3	0,45	0,0031	10
Fort Canning	114	6	12,5	3,5	0,4	0,0031	15
Dulles Corridor	150	-	18	4,6	0,3	0,0041	10
Elite Tunnel	168	7	12	3	0,4	0,0041	12
Yxhugget	36	10	15	12	0,4	0,0165	15
Erlangshan	102	10	30	-	0,4	0,0083	7
Istanbul metro	114	6,3	9	3	0,3-0,4	0,0050	6,3
La Perosa	101	10	12	9	-	0,0075	13,5
Nathpa Jhakri	114	8,8	12	3,5	0,5	0,0038	12
Tujiangchong	108	6	19/40	-	0,42/0,4	0,0088	12
Caldecott 4th Bore	203	-	52	-	0,5	0,0135	15
Trojane	114	6,3	-	-	-	0,0175	11
Birgl	114	6,3	-	-	-	0,0050	12
Fiumelatte	84	4,5	12	4	-	0,0118	10
Delle Tanze	84	4,5	12	3	-	0,0546	7
Cernobbio	148	6	18	5	-	0,0144	11
Serre la Voute	140	10	14	4	-	0,0180	11
Pietragliata	101	10	18	4	-	0,0063	11
Serena	114	7	12	9	-	0,0046	13

Tilgjengelig informasjon om grunnforholdene på mange av prosjektene var svært begrenset og det ble vanskelig å beregne en nøyaktig Q-verdi basert på denne informasjonen. En annen faktor som påvirker nøyaktigheten til Q-verdien er at Q-systemet ikke er egnet til å klassifisere løsmasse. I mange av prosjektene var det vanskelig å velge parametere som representerer grunnforholdene på stedet, da grunnforholdene var preget av løsmasse. Usikkerheten i Q-verdien kan derfor være hovedårsaken til at det ikke er mulighet å se noen sammenheng mellom bergmassekvalitet og de ulike designparametere.

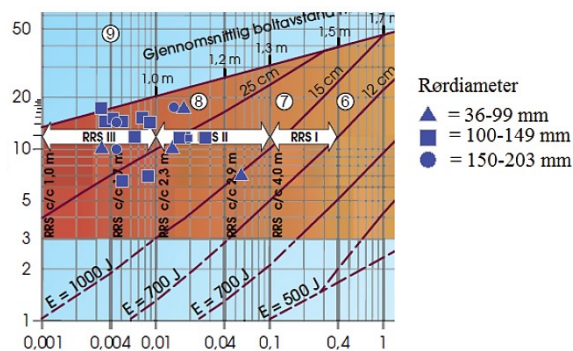
For å finne mer egnede måter for å klassifisere de geologiske forholdene i denne sammenhengen, kan det være mer hensiktsmessig å se de geologiske forholdene i et mer geoteknisk perspektiv. Med dette menes et klassifikasjonssystem for løsmasser, som betrakter parametere som kohesjon, friksjonsvinkel, kornstørrelse og vannmetning. Det ble ikke sett nærmere på om det finnes et slikt klassifikasjonssystem i løpet av denne masteroppgaven. I Q-systemets sikringsdiagram ble det også lagt merke til at sikringsanbefalingene i dette diagrammet bare gjelder permanent sikring, ikke midlertidig sikring. Det ansees av disse grunnene som vanskelig å implementere rørskjerm som en sikringsanbefaling i dette sikringsdiagrammet.

Det som også var interessant ved dette studiet var å se diversiteten i metoden, med tanke på grunnforhold og utforming av rørskjermene. De ulike prosjektene viser at det er mulig å bruke rørskjerm i svært mange tilfeller, hvor man driver en tunnel gjennom vanskelige geologiske forhold, og at ulike problemstillinger som dukker opp under driving kan løses på forskjellige måter ved hjelp av ulike tilpasninger.

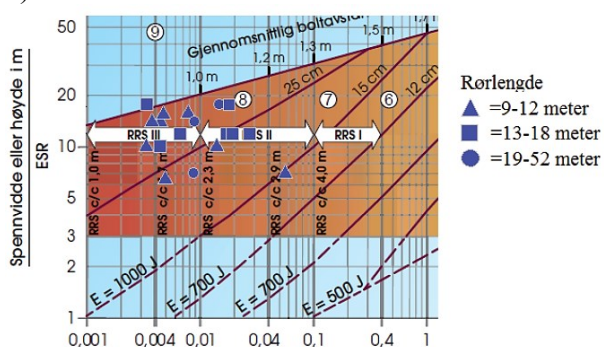
a)



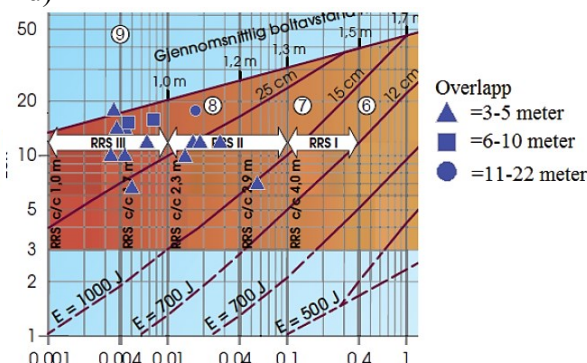
b)



c)



d)



Figur 5: a) sikringsdiagrammet i Q-systemet med plottet Q-verdi for alle 20 utvalgte prosjekter, b) prosjekter plottet med hensyn på rørdiameter, c) prosjekter plottet med hensyn på rørlengde, d) prosjekter plottet med hensyn på overlapp (Strømsvik, 2015)

Figure 5: a) Rock support chart with plotts of Q-values for all 20 projects, b) plotted projects with regard to pipe diameter, c) plotted projects with regard to pipe length, plotted projects with regard to overlap (Strømsvik, 2015).

METODE FOR DIMENSJONERING OG DESIGN AV RØRSKJERM

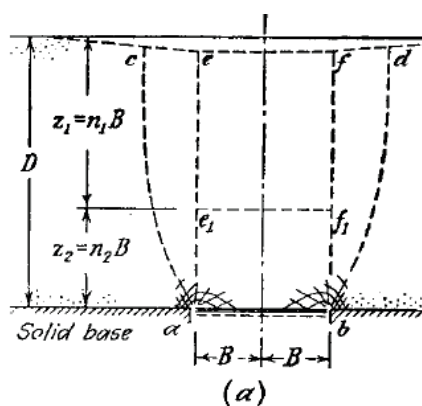
Bjelkemodell for elastiske fundamenter lages ved bruk av endelig elementmetode, såkalt FEM-analyse. Først beregnes inngangsparameterne som behøves. I dette tilfellet må følgende parametere beregnes:

- **Silotrykket:** trykket som skapes fra den overliggende massen som virker på stålrørene.
- **Instabil sone:** lengden på den sonen hvor silotrykket belaster stålrørene.
- **Fjærstivheten til grunnen:** definerer stivheten i den omliggende grunnen rørene ligger i og støttes av.

For beregning av silotrykket på stålrørene i denne masteroppgaven anses Terzaghis formel for sviktende horisontal sikring (Formel 1) som den mest egnede formelen. Det finnes flere varianter av denne formelen, men den aktuelle varianten ble valgt da den er mest egnet ved beregning langs tunnelprofilen og den forutsetter ikke at den dårlige bergmassen/løsmassen befinner seg i hele profilet.

$$\sigma = \frac{B(\gamma - \frac{c}{B})}{K_0 \tan \phi} * \left(1 - e^{-K_0 \tan \phi (\frac{h}{B})}\right) + q e^{-K_0 \tan \phi (\frac{h}{B})} \quad (1)$$

σ er silotrykket, ϕ er friksjonsvinkel løsmasse, γ er tyngdetetthet løsmasse, K_0 er lateral jordtrykkskoeffisient, h er overdekning, c er kohesjon i løsmasse, B er halve lengden på instabil sone, q er overlaster, se Figur 6 og 7 for prinsippskisser.

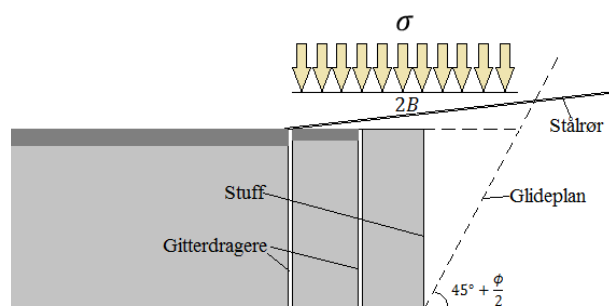


Figur 6: Illustrasjon over aktive løsmasser ved en sviktende sikring mellom to solide baser, som er prinsippskissen for Terzaghis formel, D er overdekning, betegnet som h her (Terzaghi, 1943).
 Figure 6: Illustration showing zone with soil movement caused of failing support between two solid bases (Terzaghi, 1943).

Terzaghi (1943) utførte eksperimenter der han fant at den gjennomsnittlige vinkelen for glideplanet var $45^\circ + \frac{\phi}{2}$, der ϕ er friksjonsvinkelen til løsmassen. Ut i fra denne antagelsen er Formel 2 utledet for å beregne lengden på instabil sone. Det ble bestemt at den instabile sonen skulle inkludere to inndriftsrunder etter siste installasjon av rørsjerm og sone med instabil masse foran stuff, slik som illustrert i Figur 7. Dette er på grunn av at man ikke kan definere den siste runden med gitterbue og sprøytebetong som fullt bærende, og at den instabile sonen kan rase ut. På denne måten får man beregnet for et «worst case scenario».

$$2B = 2L_e + H_L \tan \left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad (2)$$

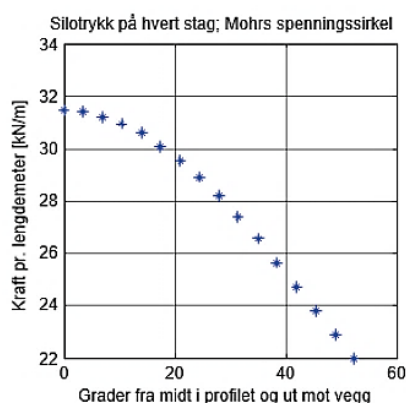
L_e er en inndrift, H_L er dybden av løsmasse i tunnelprofilet på stuff og ϕ er friksjonsvinkel på løsmasse. B er en inngangsparameter for å beregne silotrykket og er halve lengden på den instabile sonen i tunneltaket.



Figur 7: Illustrasjon som viser utstrekning av området hvor jordtrykket virker (instabil sone), samt hvordan vinkelen på glideplanet beregnes (modifisert etter Strømsvik, 2015).

Figure 7: Illustration showing the zone with earth pressure and calculation of the slip plane at the face of the tunnel (modified after Strømsvik, 2015)

For å finne hvilket rør som utsettes for størst last i en rørsjerm, ble det gjort en beregning for hvordan normalkraften per løpemetre på hvert stålrør utvikler seg utover i profilet, med hensyn på økende overdekning, se Figur 8.

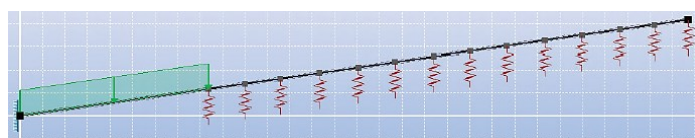


Figur 8: Plot over normalkrefter som virker på stålrørene utover profilet med hensyn på økende overdekning. Inngangsparametere fra prosjektet Yxhugget (Strømsvik, 2015).

Figure 8: Plot showing normal force acting on the steel pipes outwardly in the profile, with regards on increase in overburden (Strømsvik, 2015).

Resultatene i Figur 8 indikerer at det stålrøret som opplever størst last i en rørsjerm er det øverste røret i profilet og at det derfor er hensiktsmessig å utføre dimensjoneringen etter lasten på dette stålrøret.

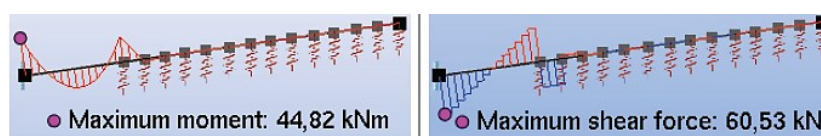
Det finnes svært mange konstruksjonsprogrammer som er egnet til å utføre FEM-analyser. Her ble det valgt å benytte konstruksjonsprogrammet FAP, som er utviklet av studenter ved NTNU. I programmet kan man tegne inn stålrør med ønsket rørlengde og installasjonsvinkel. Videre konstruerer man modellen etter beregnet lengde på instabil sone, setter inn ønskede grensebetingelser for hvert element, legger inn beregnet silotrykk og fjærstivhet. Figur 9 viser hvordan dette vil se ut i FAP. Alle punktene i figuren er noder hvor elementene er knyttet sammen med grensebetingelser.



Figur 9: Bjelkemodell for elastiske fundamenter konstruert i FAP. Grønt område illustrerer sonen der silotrykket virker over instabil sone, fjærene illustrerer stivheten i grunnen foran instabil sone (Strømsvik, 2015)

Figure 9: Elastic foundation beam model constructed in FAP (Strømsvik, 2015).

Deretter kjører man en analyse på dette oppsettet. Et utdrag av resultatene etter analysen i FAP vises i Figur 10. Man vil også få et anslag på størrelsen av deformasjon av røret, men for at dette skal være relevante resultater må man ha inngående opplysninger om materialegenskaper og rørets geometri, noe som ikke er nødvendig ved beregning av moment og skjærkrefter.



Figur 10: Beregnet maksimum moment og maksimum skjærkraft som virker på det stålrøret som opplever størst belastning (Strømsvik, 2015).

Figure 10: Calculated maximum moment and maximum shear force in FAP (Strømsvik, 2015).

PARAMETERSTUDIE UTFØRT MED BJELKEMODELL FOR ELASTISKE FUNDAMENTER

Tabell 3 viser variabler som er nødvendig for å utføre utviklet bjelkemodell for elastiske fundamenter og hvilke verdier som ble benyttet ved parameterstudiet. Verdiene er hentet fra Yxhugget, som er en tunnelseksjon som ble drevet under nasjonalparken i Stockholm, som utgjør en del av «Norra Länken».

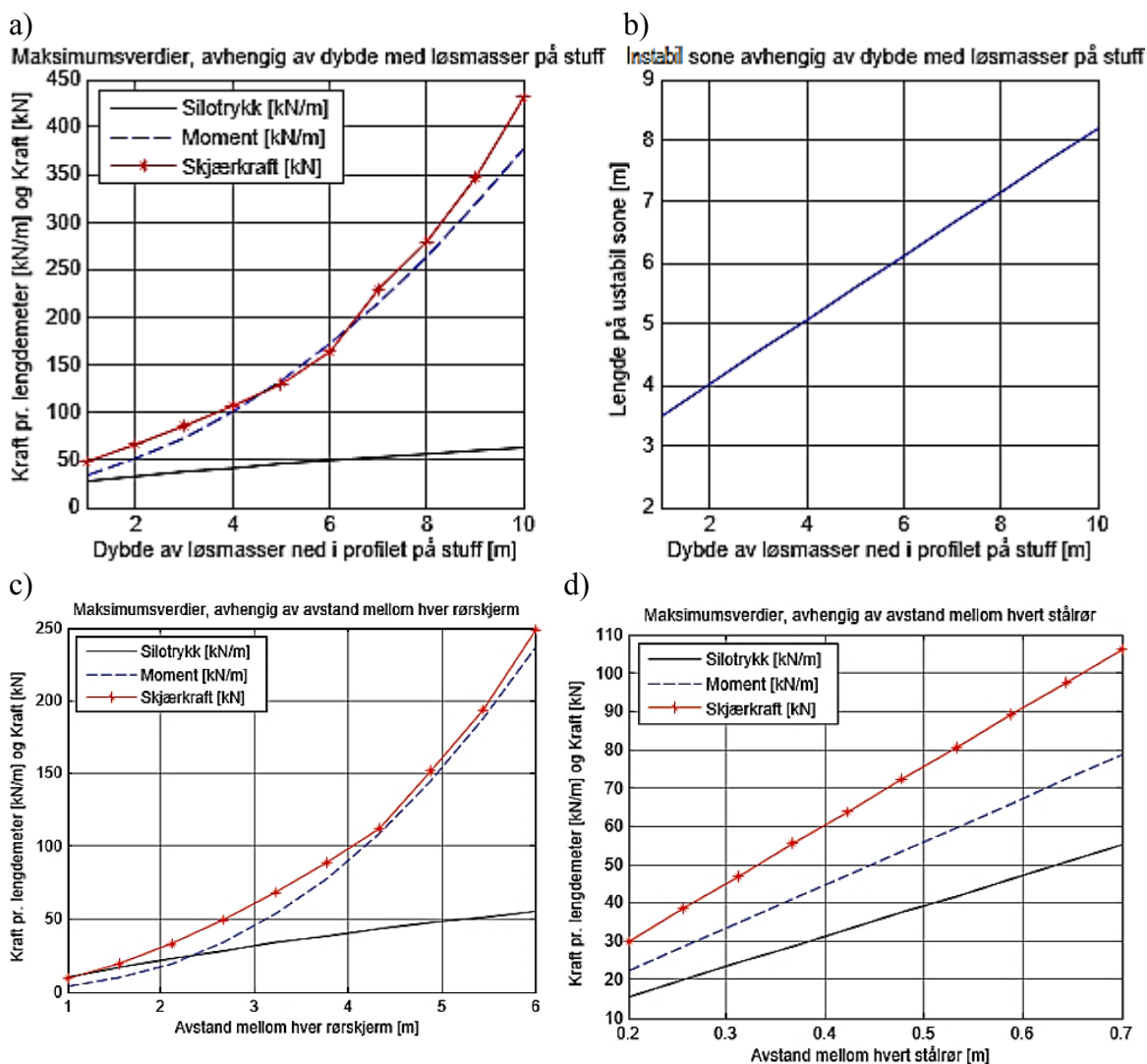
Tabell 3: Variabler hentet fra Yxhugget i Stockholm (Andersson et al.,2011, Borchardt, 2006).

Table 3: Input variables from Yxhugget in Stockholm (Andersson et al.,2011, Borchardt, 2006).

Friksjonsvinkel løsmasse	ϕ	35°
Tyngdetetthet av overdekning	γ	20 kN/m ³
Kohesjon løsmasse	c	10 kPa
Youngs modulus i masse foran stuff	E	20 MPa
Poissons ratio i masse foran stuff	ν	0.4
Lateral jordtrykkskoeffisient	K_0	0.5
Overliggende last	q	15 kPa
Overdekning	h	16 meter
Lengde på stålrør i rørsjerm	L	15 meter
Installasjonsvinkel på stålrør	θ_L	8°
Lengde av løsmasse ned i profilet/stuff	H_L	1.7m (Parameterstudie 1: 1-10 m)
Inndrift pr. salve	L_e	3 m (Parameterstudie 2: 0.5-3 m)
Monteringsavstand mellom stålrør	S_T	0.4 m (Parameterstudie 3: 0.2-0.7 m)

Det ble utført tre parameterstudier med bjelkemodellen for elastiske fundamenter. Utviklingen av silotrykk, maksimum moment og skjærkraft som virker på det røret som utsettes for størst belastning ved:

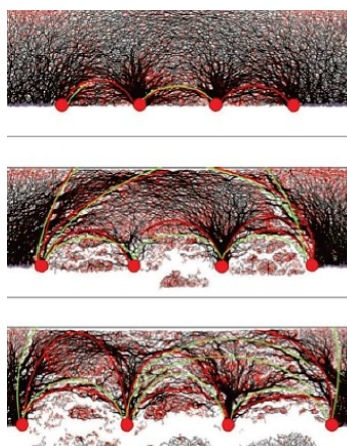
1. økende dybde løsmasse ned i profilet på stuff, samt utviklingen av instabil sone.
2. økende avstand mellom hver rørsjerm
3. økende avstand mellom hvert rør i en rørsjerm



Figur 11: a) Utvikling av silotrykk, moment og skjærkraft med økende dybde løsmasse på stuff, b) økende lengde på instabil sone ved økende dybde av løsmasse på stuff, c) utvikling av silotrykk, moment og skjærkraft med økende avstand mellom hver rørsjerm, d) utvikling av silotrykk, moment og skjærkraft med økende avstand mellom hvert rør (Strømsvik, 2015).

Figure 11: a) development of earth pressure, moment and shear force with increasing depth of soil at the tunnel face, b) increase in unstable zone with increasing depth of soil at the tunnel face, c) development of earth pressure, moment and shear force with increasing distance between each umbrella arch, d) development of earth pressure, moment and shear force with increasing distance between each steel pipe (Strømsvik, 2015)

Resultatene fra de tre parameterstudiene (Figur 11) viser at monteringsavstanden mellom hvert stålrør ikke har like stor betydning for maksimum moment og maksimum skjærspenning på stålrørene, som ved endring av dybde løsmasse ned i profilet på stuff og installasjonsintervall mellom hver rørsjerm. I denne sammenhengen er det viktig å nevne at avstanden mellom hvert stålrør i rørsjerm har stor betydning med tanke på å opprettholde en bærende bue-effekt i løsmassen, slik at løsmassen ikke renner mellom stagene, denne effekten er beskrevet av Eckl (2012) og er illustrert i Figur 12.



Figur 12: Bue-effekt i sand med ulik bolteavstand, hentet fra Eckl (2012), sitert Stökl(2002).

Figure 12: Arching effect in sand with regard to increasing distance between bolts, from Eckl (2012), sited Stökl(2002).

Bjelkemodell for elastiske fundamenter kan være et nyttig hjelpemiddel for å bestemme noen av de viktigste designparameterne ved dimensjonering av rørsjerm. Ved relativt enkle inngangsparametere kan man gjøre vurderinger angående silotrykket som virker på stålrørene, finne optimalt installasjonsintervall mellom rørsjermene, i samsvar med hvor dypt løsmassene ligger i profilet på stuff. Når det kommer til monteringsavstanden mellom hvert stålrør er dette en variabel som bør fastsettes ved andre metoder, men vil være en viktig inngangsparameter til bjelkemodellen.

Det er også mulig å se på deformasjon av rørene i konstruksjonsprogrammet FAP, men da er det svært viktig å få implementert riktig materialeegenskaper og geometri på stålrørene. De ulike stålrørene som brukes til montering av rørsjerm har forskjellige egenskaper, som er avhengig av overflatestruktur, tykkelse, diameter og koblinger. Rørene kan forankres på ulike måter i grunnen, tåler ulike moment og skjærkrefter, og vil ha ulike deformasjonsegenskaper. Dette kan være utfordrende da FAP er et basisprogram utviklet av studenter på NTNU. Det finnes mer profesjonelle konstruksjonsprogrammer hvor det er muligheter for en mer detaljert analyse. Disse kan være av interesse om deformasjon av rørene er viktig med hensyn på setninger.

Under utvikling av metoden er det valgt å være konservativ. Ved beregning av lengden på instabil sone er det beregnet for siste runde med sprøytebetong og gitterbue, siste inndriftsrunde og hele lengden på instabil masse foran stuff, for å få et silotrykk som representerer verste tilfelle (se Figur 7). I tillegg beregner bjelkemodellen for elastiske

fundamenter bare for bæreevnen til en rørsjerm, slik at ved overlappende rørsjermer, blir denne metoden for dimensjonering enda mer konservativ. Bjelkemodellen tar heller ikke hensyn til de forsterkende egenskapene til injeksjonsmassen, da man ikke kan garantere at denne omslutter hele stålrøret.

KONKLUSJON

I det empiriske studiet ble det konstatert at det ikke var noen sammenheng mellom Q-verdi og valg av diameter på stålrørene, avstand mellom stålrørene, eller overlapp mellom hver rørsjerm. Det ble vurdert som mer fordelaktig å se på grunnforholdene fra en geoteknisk synsvinkel, da dette vil gi en bedre beskrivelse av egenskapene til grunnen og kan gi bedre forutsetninger for å velge riktig sikringsmetode.

Studiet bekreftet at rørsjerm er en sikringsmetode som har fungert godt som midlertidig sikring av stoff ved driving av mange tunneler i områder med vanskelige geologiske forhold i form av løsmassesoner, manglende bergoverdekning og svakhetssoner. Det ble også funnet at den mest vanlige komplikasjonen ved sikring med rørsjerm virker å være rennende masse mellom stålrørene. Etter litteraturstudiet ble det sett flere fordeler med å bruke rørsjerm kontra tradisjonell norsk forbolting i områder med spesielt dårlig geologi i norsk tunneldrift. Hovedfordelen ble betraktet å være bedre kontroll på fordelingen av injeksjonsmassen ved injisering av stålrørene, da injeksjonsmassen har flere gunstige egenskaper.

Bjelkemodellen for elastiske fundamenter som ble utviklet i masteroppgaven ansees for å være vel tilpasset hensikten. Den kan fungere som et godt verktøy ved dimensjonering av rørsjermer, men metoden mangler utprøving på andre prosjekter. For å teste påliteligheten til beregningsmetoden hadde det vært svært interessant å prøve den på flere prosjekter, spesielt tilfeller med svakhetssoner av ulik karakter.

REFERANSER

Andersson, H., Borchardt, P. & Dalmalm, T. (2011): "Bergtunnel utan bergtäckning". *Fjellsprengningsdagen 2011*, NFF, s. 30.1-30.10.

Andersson, H. (2015): Personlig kommunikasjon via møte, e-mail og telefon.

Borchardt, P. (2006): "Norra Länken, passage av Yxhygget, Stockholm; Beräkning och dimensionering av tunnelförstärkning under framdrift". Borchardt Infosystem AB.

Drageset, L. N. (2013); "Jernbanetunnel Holm-Nykirke; "Rørparaplymetoden". Overraskende parti med lite overdekning". *Fjellsprengningsdagen 2013*. NFF, s.13.1-13.11.

Eckl, M. (2012); "Tragverhalten von Rohrschirmdecken beim Tunnelbau im Lockergestein". Schriftenreihe lehrstuhl und pruefamt fuer grundbau, bodenmechanik, felsmechanik und tunnelbau der Technischen Universitaet Muenchen.

Furukawa, F., Hino, Y., Inoue, H., Inoue, H., Asari, K. & Yorita, J. (2007); "Tunneling in water-bearing unconsolidated ground according to specifications for auxiliary methods

revised to reflect varying soil conditions - Constructions in the north work section of the Takaoka tunnel on the Hokuriku-Shinkansen railway line”. *Underground Space; The 4th Dimension of Metropolises*, CRC Press.

Ischebeck, E. F. (2010): “The Design and Execution of Drilled and Flush-grouted Titan Micropiles is Governed in European Union by National Technical Approval Z-34.14-209 (DIBT) ”. *International Society for Micropiles 10th International Workshop on Micropiles*, 2010 Washington, D.C., USA.

Oke, J., Vlachopoulos, N. & Marinos, V.(2014): “Umbrella Arch Nomenclature and Selection Methodology for Temporary Support Systems for the Design and Construction of Tunnels”. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32, s. 97-130.

Stöckl, C. (2002): “Numerische Berechnungen der Tragwirkung von Rohrschirmen mit PFC2D-Kalibrierung mit simulierten Base Friction Versuchen”. Graz University of Technology.

Strømsvik, H. (2015): “Rørskjerm- Midlertidig sikring av stoff ved driving av tunnel gjennom soner med dårlig geologi”. *MSc*, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU).

NFF (2008): “Tung bergsikring i undergrunnsanlegg”. Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk.

Song, K.-I., Cho, G.-C., Chang, S.-B. & Lee, I.-M. (2013): “Beam-spring structural analysis for the design of a tunnel pre-reinforcement support system”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 59, s. 139-150.

Terzaghi, K. (1943): “Earth pressure on temporary supports in cuts, tunnels and shafts”. *Theoretical soil mechanics*. New York: J. Wiley and Sons, inc.

Volkman, G. & Schubert, W. (2007): “Geotechnical model for pipe roof supports in tunneling”. *Proceedings of the 33rd ITA-AITES world tunneling congress, underground space—the 4th dimension of metropolises*. Prague: Taylor and Francis Group, 2007. s.755-760.

Volkman, G. M. & Schubert, W (2008). “Tender document specifications for pipe umbrella installation methods”. *Proc. of the 34th ITA-AITES World Tunneling Congress, Underground Facilities for Better Environment & Safety*, 2008. s.285-293.

Volkman, G. M. & Schubert, W (2010): “A load and load transfer model for pipe umbrella support”. *European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2010*, Lausanne, Switzerland. Taylor & Francis - Balkema, s.379-382.

Zhang, Z., Li, H., Liu, H., Li, G. & Shi, X. (2014): “Load transferring mechanism of pipe umbrella support in shallow-buried tunnels”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, s.213-221