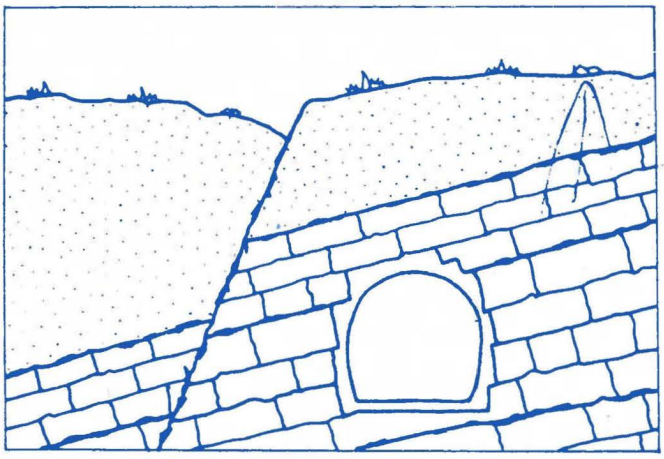
BeFo



Undermarksbyggande i svagt berg
2B Fullortsborrning Fräsande brytning

Torgeir Blindheim, Geoteam A/S
Mats Olsson, SveDeFo

Stiftelsen Bergteknisk Forskning — BeFo
Swedish Rock Engineering Research Foundation

BeFo 106

Undermarksbyggande i svagt berg
2B Fullortsborrning Fräsande brytning

Underground Construction in Weak Rock
2B Excavation with TBM and cutting machines

Dr ing Torgeir Blindheim, Geoteam A/S
Bergsingenjör Mats Olsson, SveDeFo

Stiftelsen Bergteknisk Forskning — BeFo
Stockholm 1983

Undermarksbyggande i svagt berg

Styrgrupp

Direktör Björn Monsén, Nitro Nobel, ordf
Direktör Tore Hallenius, WP-System
Överingenjör Gösta Jansson, SCG
Tekn dr Carl-Olof Morfeldt, Hagconsult
Tekn dr Lennart Rundgren, VBB
Civilingenjör Göran Svensson, VIAK
Forskningsdir Tomas Franzén, BeFo

Rådgivande grupp

Docent Sten G A Bergman
Civilingenjör Sten Brännfors
Bergsingenjör Ivar Öhman, Tyréns
Fil dr Per Anders Persson, Nitro Nobel
Professor Hans Helfrich
Avdeln dir Jüri Martna, Vattenfall
Civilingenjör Göran Gustafsson, ABV

Projektgrupper

1	Byggnadsgeologi	Civiling Hans Fagerström	VBB	Proj.ledare
		Docent Anders Carlsson	Vattenfall	
		Tekn dr Carl-Olof Morfeldt	Hagconsult	
2	Berguttag	Direktör Roger Holmberg	SveDeFo	Proj.ledare
		Dr ing Torgeir Blindheim	Geoteam	
		Bergsing Mats Olsson	SveDeFo	
		Ingenjör Conny Sjöberg	Nitro Consult	
		Bergsingenjör Ulla Smedberg	SveDeFo	
		Ingenjör Ingvar Bergqvist	Nitro Nobel	
		Överingenjör Karl-Erik Buhre	ABV	
		Ingenjör Allan Ragnarsson	SCG	
		Ingenjör Ivar Sagefors	WP-System	
3	Stabilitet och förstärkning	Tekn dr Håkan Stille	KTH	Proj.ledare
		Civilingenjör Tomas Franzén	BeFo	
		Tekn lic Anders Heiner	VBB	
		Civilingenjör Gunnar Nord	SCG	
4	Vattenproblem	Civilingenjör Claes Alberts	SCG	Proj.ledare
		Tekn dr Gunnar Gustafson	VIAK	

FÖRORD

Konsult- och entreprenadtjänster samt utrustning för bergarbeten är en viktig del i Sveriges export. I samband med en vikande hemmamarknad har utlandsdelen kommit att bli av allt större betydelse för BeFos huvudmän. Intresset för att utveckla det svenska bergkunnandet och främja dess användning utomlands har därför ökat markant under senare år.

Bergarbeten utomlands sker till största delen i sedimentärt eller svagt berg, vilket betyder att man inte alltid direkt kan tillämpa de metoder som av tradition i första hand är inriktade på svenska hårdbergförhållanden. Olika geologier ställer skilda krav på såväl förundersökningar som berguttag och förstärkning.

Det kan förefalla som om problemen utomlands är väsentligt annorlunda än dem vi är vana vid. Strikt tekniskt-vetenskapligt är det dock i de flesta fall snarare fråga om en grad- än en artskillnad. Samtidigt måste man konstatera att bergbyggnadstekniken som vetenskap i hög grad är empiriskt grundad och att man som byggare till stor del har att lita till erfarenheter från tidigare arbeten. Detta betyder att byggande i främmande geologiska miljöer i praktiken leder till en rad nya och ofta svårbedömda situationer.

En stor del av BeFos forskningsprogram är inriktat på kunskapsuppbyggnad av betydelse för den internationella verksamheten och under perioden 1981-83 har gjorts en särskild satsning på området "Undermarksbyggande i svagt berg". Syftet med detta speciellt inriktade projekt, där flera av BeFos huvudmän bidragit med betydande egna insatser, är dels att främja användningen av traditionell, kvalificerad svensk bergbyggnadsteknik genom anpassning till främmande geologiska förhållanden, dels att höja det svenska kunnandet ifråga om andra metoder, så att dessa kan inlemmas i svensk kompetens och nyttjas under förhållanden för vilka de är bäst lämpade.

Den första uppgiften har varit att ställa samman rapporter över dagens teknikläge under huvudrubrikerna "Byggnadsgeologi", "Berguttag", "Stabilitet och förstärkning" samt "Vattenproblem". Dessa rapporter skall i första hand ses som tämligen ingående översikter över dagens

kunnande, där utöver de engagerade författarnas egen specialkunskap ett stort antal internationellt publicerade arbeten har utnyttjats. Rapporterna kompletterar och överlappar varandra delvis. Avsikten är att man ska kunna läsa varje rapport för sig och få olika problem belysta i sitt sammanhang. Författarna har också uppmanats att uttrycka sin egen ståndpunkt i olika frågor, varför materialet kan tjäna som diskussionsunderlag i frågor som inte alltid kan ges ett entydigt svar.

Det är vår förhoppning att materialet tillsammans med givna referenser skall vara till god hjälp såväl i samband med anbudsgivning och upprättande av handlingar som vid direkt byggande. Rapporterna bör också vara väl användbara för utbildningsändamål.

Projektet har under BeFos programstyrelse letts av en särskild styrgrupp under ordförandeskap av direktör Björn Monsén. Under projektarbetet har därutöver en rådgivande grupp av experter lämnat synpunkter som stöd åt de olika arbetsgrupperna. BeFos tidigare forskningsdirektör Sten Bjurström har svarat för uppläggning och organisation samt övergripande projektledning fram till våren 1983.

Till alla som aktivt medverkat i projektet riktas ett varmt tack, liksom till de företag som delvis i form av egna bidrag ställt personal till förfogande för arbete i projektet, nämligen ABV, Skånska Cementgjuteriet, WP-System, Hagconsult, VBB, VIAK, Nitro Nobel, Nitro Consult och Vattenfall.

Stockholm i november 1983

STIFTELSEN BERGTEKNISK FORSKNING - BeFo

Tomas Franzén

SAMMANFATTNING

Föreliggande rapport tillhör delprojektet "Berguttag", som omfattar tre avsnitt, publicerade i två volymer enligt följande:

2 A: Borrning och sprängning

2 B: Fullortsborrning
Fräsande brytning

Borrnings- och sprängningsdelen är utarbetad av Roger Holmberg, Mats Olsson, Ulla Smedberg SveDeFo, Conny Sjöberg och Torgny af Forselles, Nitro Consult AB. Fullortsborrningsdelen är skriven av Torgeir Blindheim, Geoteam, Trondheim och Fräsande brytning av Mats Olsson.

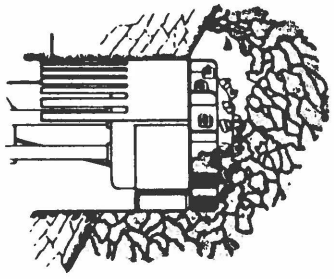
Allmänt kan sägas att frästeknik och fullortsborrning finns relativt väl dokumenterade i Sverige. Mindre material, finns beklagligt nog om borrning och sprängning, trots att detta är den mest flexibla och användbara metoden.

Ett varmt tack riktas till projektgruppens ledamöter, för deras råd under projektets gång. Dessutom riktas ett tack till Gunnar Pettersson och Reidar Hoffner, WP-system, samt Gustaf Svantesson och dr Karl Heinz Gehring Voest Alpine för deras bidrag till avsnittet "Frästeknik". Författarna ber även att få tacka Jörgen Hammarstedt, ABV för hans insatser inom området fullortsborrning.

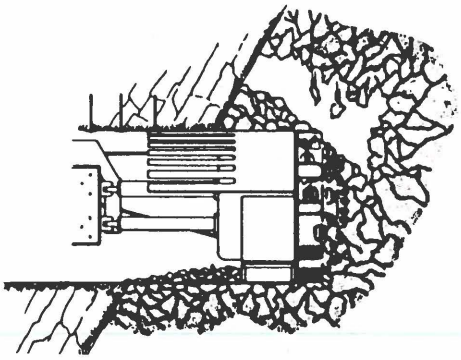
Projektgruppen har bestått av:

Direktör Roger Holmberg, SveDeFo (projektledare)
Civilingenjör Ingvar Bergqvist, Nitro Nobel AB
Civilingenjör Karl-Erik Buhre, ABV
Bergsingenjör Mats Olsson, SveDeFo
Ingenjör Allan Ragnarsson, AB Skånska Cementgjuteriet
Ingenjör Ivar Sagefors, WP-system
Chefskonsult Conny Sjöberg, Nitro Consult AB

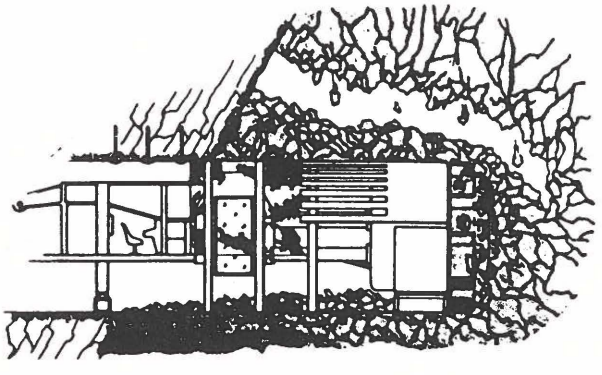
Fullortsborrning
Sid 1-111



Position 1



Position 2



Position 3

INLEDNING

Rapporten gir en oversikt over fullprofilboring av tunneler med hovedvekt på de fjelltekniske forholdene. Faktorer som påvirker selve utbrytningen og inndriften for øvrig diskuteres i detalj for å klarlegge hvordan fjellforholdene kan gi problemer med gjennomføringen, spesielt med tanke på metodens anvendelse under vanskelige fjellforhold eller "svakt fjell".

Rapporten er basert på undersøkelser i fullprofilborede tunneler, intervjuer og litteraturstudier og er søkt dokumentert ved lett tilgjengelige referanser.

Fullprofilboring gir mulighet for meget høye inndrifter. En dobling av ukeinndriftene i forhold til boring og sprengning er ikke uvanlig.

Under gunstige fjellforhold, dvs. når fjellet har god borbarhet og en tilstrekkelig "stand-up-time" til at ras kan unngås på tunnelbormaskinen, kan fullprofilboring gi lavere utdrivingskostnad pr. lm tunnel enn boring og sprengning.

Fullprofilboring med rullende boreverktøy har ikke de samme skarpe begrensningene med hensyn på fjellmassens borbarhet som fresende utvinning.

Høy drivehastighet og mindre ventilasjonsbehov ved fullprofilboring gir store besparelser ved at det er mulig å drive lengre stuffer og å redusere byggetiden. Dessuten kan besparelser i permanente sikringsarbeider, reduksjon av injiseringsbehov, samt det at man unngår sprengningsrystelser, gjøre metoden konkurransedyktig med boring og sprengning selv under mer krevende fjellforhold.

Metodens begrensninger ligger ved siden av tverrsnittsforhold i at den er mindre fleksibel og derfor mer sårbar overfor enkelte typer fjellforhold, særlig dersom disse kommer overraskende. Dette gjelder spesielt store vannlekkasjer, dårlig konsoliderte knusningssoner og ekstreme bergtrykksproblemer med avskalling eller "squeezing".

Uansett stabilitetsproblem er det meget viktig for inndriften og derved kostnadene at det kan utføres sikringsarbeider rett bak borhodet. Maskiner med heldekkende skjold og systematisk sikring med betongelementer kan være gunstige i bestemte situasjoner, men noen universalmaskin er ennå ikke utviklet.

Forundersøkelsene for fullprofilboring må være grundige og det er viktig at detaljerte undersøkelser gjøres på et tidlig tidspunkt i planleggingen. En opprydding og systematisering av borbarhetstester og prognosemodeller er påkrevet.

INNHOLD SIDE

INLEDNING 2

1. HVA ER FULLPROFILBORING 7

1.1. Maskintyper 7

1.1.1. Tunnelbormaskinen er hovedkomponenten i et tunneldrivingssystem 7

1.1.2. Tunnelbormaskiner bør også kunne tillate sikringsarbeider 9

1.1.3. Skjoldmaskiner kan være meget effektive 12

1.1.4. Eksisterer det noen universalmaskin? 13

1.1.5. Rullemeisler dominerer fullprofil-boring av fjell 14

1.2. Brytningsprinsipp 16

1.2.1. Boreprosessen er et komplisert samspill av maskinelle og geologiske faktorer 16

1.2.2. Avskallingen domineres av riss-dannelse p.g.a. strekkspenninger 17

1.2.3. Stuffen forteller om hvordan boringen går 19

1.2.4. Høy matekraft har utvidet anvendelses-området 21

1.2.5. Høyt dreiemoment tillater effektiv boring 22

1.2.6. Vibrasjoner og slagpåkjenninger kan ikke unngås 25

1.2.7. Inndriften er tilnærmet proporsjonal med omdreiningstallet 26

1.2.8. Meiselsporavstanden bør være stor i svakt fjell 26

SIDE

2. FAKTORER SOM PÅVIRKER DRIVINGEN 28

2.1. Inndrift 28

2.1.1. Netto inndrift og utnyttelsesgrad kan variere voldsomt 28

2.2. Borbarhet 29

2.2.1. Bergartens borbarhet er viktig 29

2.2.2. Slitasjetypen avhenger av mating og bergart 30

2.2.3. Fjellmassens borbarhet avhenger av svakhetsflatene 32

2.2.4. Prognosemodell for svakhetsflatenes innvirkning 35

2.2.5. Slepper og knusningssoner er lettborede, men forsinker fremdriften 37

2.2.6. Reduksjon i matekraft kan bli nødvendig på grunn av oppsprekning 38

2.3. Stabilitet 39

2.3.1. Oppsprekning gir normalt små problemer 39

2.3.2. Knusningssoner kan gi alvorlige forsinkelser 42

2.3.3. Bergtrykksproblemer forsinker, men stopper ikke åpne tunnelbormaskiner 54

2.4. Lekkasjer og temperatur 61

2.4.1. Store vannlekkasjer kan stoppe driften helt 61

2.4.2. Moderate vannlekkasjer kan mestres 63

2.4.3. Systematisk forinjisering kan tette små lekkasjer 64

2.4.4. Gasslekkasjer krever god ventilasjon 69

2.4.5. Varme og frost kan gi forsinkelser 70

		SIDE
3.	PERMANENTE SIKRINGSARBEIDER	71
	3.1. Sikringskostnadene kan ofte halveres	71
	3.2. I dårlig fjell avgjør "stand-up-time" besparelsene	72
4.	INNDRIFTER, KOSTNADER OG ANVENDELSE AV BORKAKSET	77
	4.1. Totalutnyttelsen er normalt lavest i svakt fjell	77
	4.2. I svakt fjell gir fullprofilboring lave utdrivingskostnader	80
	4.3. Fullprofilboring muliggjør prosjektendring og redusert byggetid	84
	4.4. Borkakset trenger normalt bearbeiding før anvendelse	85
5.	VALG AV DRIVEMETODE	88
	5.1. Anleggets geometriske utforming	88
	5.2. Spesielle utførelser og miljøforhold etc.	90
	5.3. Krevende og usikre fjellforhold	92
6.	FORUNDERSØKELSER	93
	6.1. Forundersøkelser for fullprofilboring må være grundige	93
	6.2. Borbarhetstester utføres for flere formål	96
	6.3. Borbarhetstester er ennå ikke standardiserte	99
7.	REFERANSER	105

1. HVA ER FULLPROFILBORING

1.1. Maskintyper

1.1.1. Tunnelbormaskinen er hovedkomponenten i et tunneldrivingssystem

Fullprofilboring består i at en tunnelbormaskin borer ut hele tverrsnittet eller profilet av en tunnel i en tilnærmet kontinuerlig eller egentlig syklisk arbeidsprosess. En tunnelbormaskin består av et borhode med boreverktøy, maskinkropp, et system for borkakshåndtering samt eventuelle systemer for fjellsikring.

Maskinen utgjør den viktigste komponenten i tunneldrivingssystemet som også omfatter bakrigg, det øvrige transportsystemet for borkaks og materiell, samt installasjoner for luft, vann, elektrisk strøm etc.

Tradisjonelt har tunnelbormaskiner bygd spesielt for hardt fjell vært åpne i sin oppbygging og nesten ikke vært utstyrt med spesielle systemer for fjellsikring. Dette har i en rekke tilfeller ført til situasjoner der det har vært en slående kontrast mellom effektiviteten til tunneldrivingen i kompetent fjell og til den manglende effektiviteten ved improviserte sikringsarbeider under ustabile fjellforhold.

I den andre enden av skalaen finner man maskiner bygd spesielt for meget ustabilt fjell, eller endog jordmateriale ("soft ground"). Disse karakteriseres av en fullstendig innkapsling. Borhodet er utstyrt med sikringsplater for å sikre stabiliteten på stuffen. Maskinen har videre heldekkende skjold og det sikres systematisk under fremdriften, f.eks. ved hjelp av heldekkende betongelementer.

Maskiner som benytter et slurry-kammer foran på borhodet for å kontrollere stabiliteten til stuffen har vært brukt både i løsmasser og der stuffen har bestått av både løsmasser og fjell. Den mest omfattende erfaring og utvikling innen dette feltet finnes i Japan.

Det siste utviklingstrinnet består i den såkalte EPB-metoden, ("Earth Pressure Balanced"), som for å kontrollere grunnvannet og forhindre sammenbrudd av stuffen, benytter et trykkammer som hele tiden balanserer trykket fra stuffen.

Et tunneldrivingssystem der det inngår en tunnelbormaskin vil være mindre fleksibelt enn både konvensjonell drift og driving med delprofilmaskiner med fresende utbrytning. Det er kort og godt ikke mulig å få maskinen ut av veien i en fart dersom andre arbeider enn boring skal utføres. Eventuelle sikringsarbeider som må utføres umiddelbart må derfor nøye innpasses både teknisk og tidsmessig. Andre begrensninger finnes også; f.eks. kan det være umulig eller problematisk å utføre nisjesprengning ved maskinen.

Overraskelser eller komponentfeil vil kunne føre til at hele systemet står. Man har mindre mulighet for og plass til å improvisere. Skifting av større deler på en tunnelbormaskin blir også lett meget tidkrevende. Sikringsarbeider man ikke er forberedt på kan bli hasardiøse med hensyn til arbeidssikkerheten og dessuten meget kostbare.

På den andre siden kan man ved fullprofilboring oppnå langt høyere inndrifter pr. dag, uke eller over hele prosjekttiden. En rekke betingelser må være oppfylt, men totalresultatet kan bli langt bedre ved fullprofilboring, både med hensyn til drivetid, sikringskostnader og kvaliteten av det endelige produktet.

Man kan si det slik at spillet blir høyere; både risiko og gevinstmuligheter blir større.

Gevinstmulighetene er i stor grad knyttet til de mulige høyere drivehastighetene, ved siden av reduksjon av de permanente sikringsarbeidene og forhold som skyldes omgivelsene f.eks. at sprengningsrystelser unngås. Ved høye drivehastigheter blir imidlertid de geologiske eller fjelltekniske forholdene viktigere.

Møter man uventede fjellforhold kan veien være kort fra suksess til fiasko. Denne økte følsomheten for fjellforholdene i forhold til konvensjonell drift stiller på mange måter større krav

til alle ledd i prosessen; til forundersøkelser og planlegging, organisasjon og utførelse.

I de følgende kapitler vil det derfor bli lagt vekt på å diskutere hvordan fjellforholdene påvirker fullprofilboringen.

1.1.2. Tunnelbormaskinen bør også kunne tillate sikringsarbeider

En tunnelbormaskin består som nevnt av et borhode med boreverktøy, maskinkropp og et system for borkakshåndtering. Dessuten bør også sikringssystemer som gjør det mulig å opprettholde en akseptabel fremdrift under ustabile fjellforhold finnes på maskinen.

Det finnes en mengde forskjellige typer og kombinasjoner slik at en kort gjennomgåelse vanskelig kan bli særlig dekkende eller presis. Ved levering av nye maskiner foretas ofte en betydelig grad av "skreddersøm" for det enkelte prosjekt. Dessuten har de enkelte maskinleverandørene spesielle utførelser. En oversikt over maskinleverandører og maskintyper er gitt av THON [1].

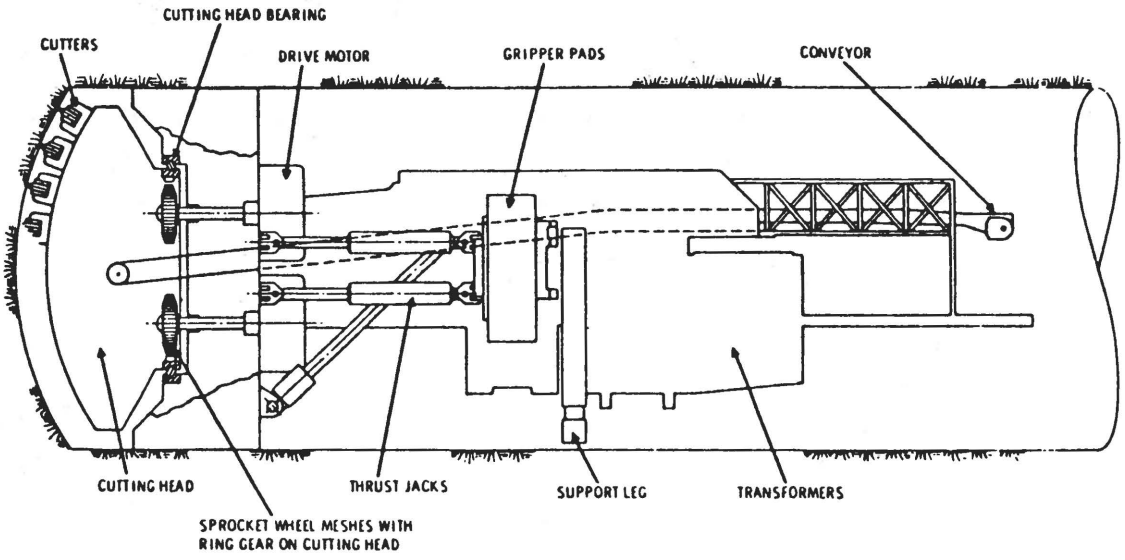
Figur 1 viser en skisse av en vanlig tunnelbormaskin der hovedkomponentene fremgår.

Den dominerende kuttertypen for boring av fjell er i dag enkeltrings-rullemeisler. Kuttertypene blir nærmere omtalt i det neste avsnittet. Kutterne er montert, som regel fra fremsiden, på borhodets frontplate. Denne kan være konveks eller flat, med unntak av i periferien der den alltid er noe avrundet. Formen på borhodet påvirker styringsegenskapene og maskinleverandørene har ulike syn på hva som er gunstigst i forskjellige situasjoner.

Borhodet er lagret opp på et stort rullelager (hovedlageret) og roteres ved hjelp av elektromotorer. Én maskintype har hydraulisk overføring og derfor kontinuerlig regulerbar rotasjon.

Under boring presses borhodet mot stuffen ved hjelp av to eller flere hydrauliske matesylindre. Disse sparker ifra mot fastspenningslabbene (gripper pads), som spennes hydraulisk ut mot

tunnelveggen. De maskintypene som har bare ett sett fast-spenningslabber (som i figur 1) har et system av hydraulisk opererte borhodestøtter (cutter-head support, ikke vist på figur 1), som stabiliserer borhodet under boring idet de spennes ut mot tunnelveggen og låses med en viss liten klaring til denne.

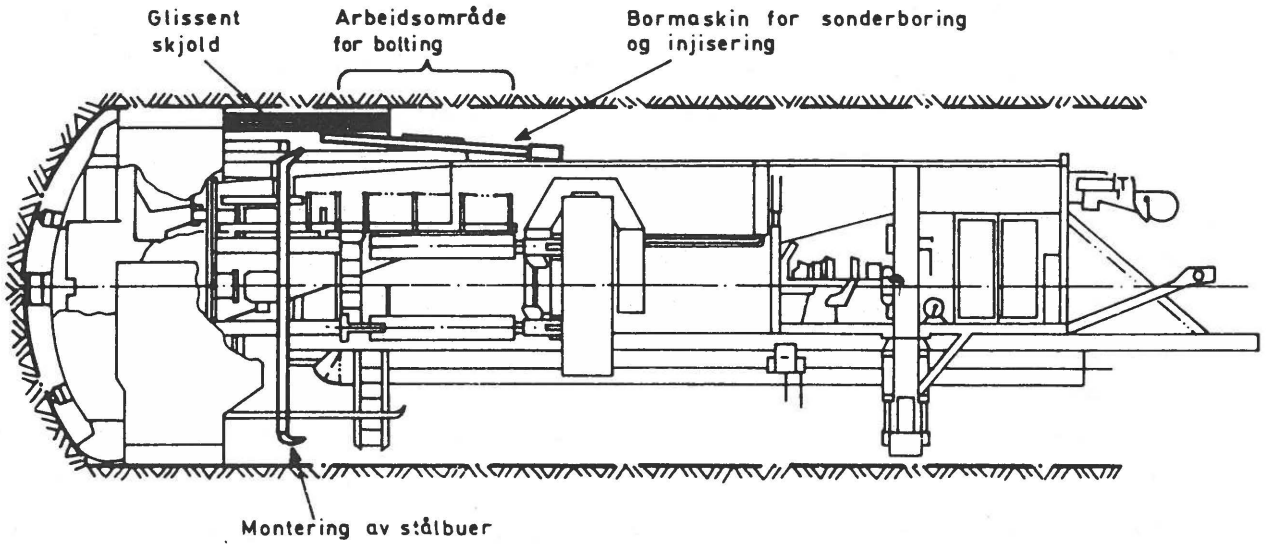


Figur 1. Skjematisk skisse av en tunnelbormaskin. (Etter Thon [1]).

Andre maskiner har borhodet lagret opp på en hovedbjelke eller hovedaksling slik at denne krages ut under hvert borflytt eller utslag av matesylindrene. Det er da nødvendig med to sett fast-spenningslabber. Avhengig av diameter og leverandør kan det være to eller fire fastspenningslabber i hvert sett. For små maskiner kan rotasjonsmotorene være plassert bak på tunnel-bormaskinen og de roterer da borhodet ved hjelp av hoved-akslingen.

Plassforholdene rett bak borhodet og ellers på tunnelbormaskinen er i stor grad avhengig av hvordan rotasjons-, oppspennings- og matesystemet er utformet. Dette har igjen meget å si for hvor-dan og når sikringsarbeider kan utføres. Ved siden av de rent maskinelle fordelene og ulempene med de forskjellige systemene påvirker de altså også totalresultatet gjennom mulighetene for effektiv sikring etc. Spesielt under dårlige stabilitetsforhold kan dette være utslagsgivende.

Maskinkroppen forbinder de forskjellige komponentene, har støttebein til bruk under forflytning (re-gripping), og for større diametere inneholder den komponenter som ellers må plasseres i bakriggen. Dersom det er påmontert utstyr for fjellsikring, f.eks. plattformer og utstyr for bolting, vil dette som regel være montert på maskinkroppen idet denne jo står stille under boringen, slik at arbeidene kan utføres mens borhodet beveges fremover. Se eksempel i figur 2, der også det glisne fingerskjoldet som følger borhodet er antydet.



Figur 2. Skisse av åpen tunnelbormaskin med påmontert utstyr for fjellsikring. (Etter Blindheim & Helgebostad [2]).

Borkakset, som drysser ned mellom kutterne fremme på stuffen, samles opp av skovler montert på borhodet, føres gjennom dette og over på et transportbånd. Tidligere forekom kjedetransportører under maskinene, men disse var sterkt utsatt for slitasje i abrasive bergarter og er nå stort sett forlatt.

Borkakset føres videre på transportbåndet i bro over området rett bak maskinen, der skinnegangen legges, og videre over bakriggen. Dette systemet er i dag ofte langt nok til at et helt vaggsett kan kjøres inn under det uten veksling. For store tverrsnitt er buffersiloer og hjultransport tatt i bruk. Bakriggens utforming er som regel dimensjonerende for hvilke

kurveradier det kan bores med. For øvrig er transportsystemets evne til å tåle blokk (løsrevne) og vannlekkasjer (på stuff eller fra veggene) viktig for utnyttelsesgraden.

Omtalen ovenfor går først og fremst på de typiske åpne tunnelbormaskiner for relativt stabilt fjell. For meget ustabile fjellforhold har forskjellige løsninger med innebygging av deler av eller hele maskinkroppen vært prøvd. Disse maskintypene omtales i neste avsnitt.

1.1.3. Skjoldmaskiner kan være meget effektive

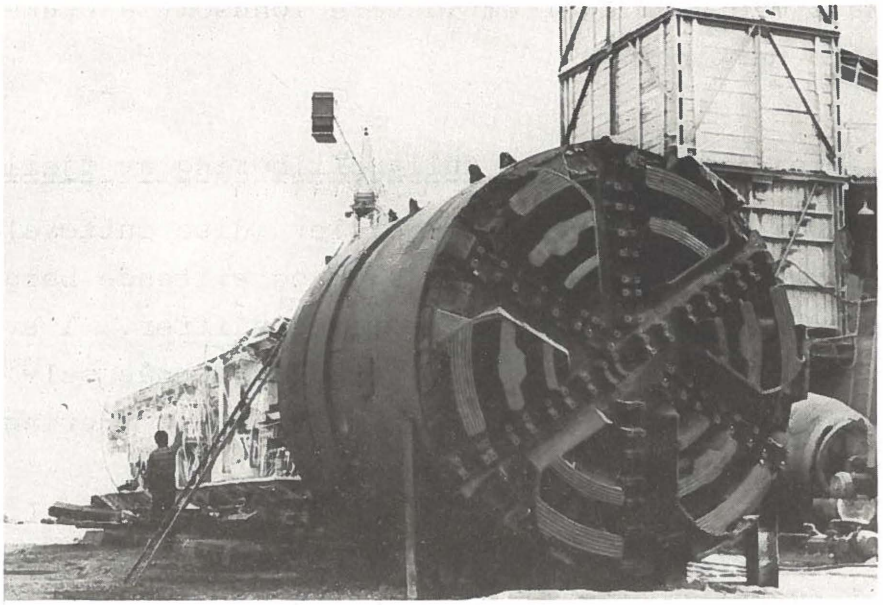
En tunnelbormaskin dekket med skjold må i hovedsak bestå av de samme komponentene. Slike maskiner kombineres som regel med et system for montering av heldekkende sikringselementer av betong i den bakre delen av skjoldet. Skjoldet er derfor gjerne dobbelt med teleskop-virkning slik at betongelementene kan monteres under boring uten at noen del av fjellflaten blir eksponert.

Fastspenning av maskinen skjer ved utsparinger gjennom skjoldet eller ved at deler av skjoldet kan ekspandere. Matekreftene overføres til fjellet via denne fastspenningen, men svært ofte har slike maskiner også et matesystem som kan spenne langs tunnelaksen mot de allerede monterte betongelementene.

Borhodet må bore ut en tunnel med noe større diameter enn skjoldets ytterdiameter slik at en viss klaring oppnås. Dermed muliggjøres styring og fastkiling unngås.

Borhodet er gjerne utstyrt med støtteplater eller ribber som dekker de største åpningene mellom kutterne. Det kan også benyttes en mer heldekkende frontplate ("false face"). Dette reduserer slagpåkjenningen fra store blokker som løsner fra stuffen og hindrer at de blokkerer borkaksoppsamlerne.

Et eksempel på en slik maskin under modifisering er vist i figur 3 etter GRANDORI [3]. Slike maskiner inngår nå også i flere av maskinleverandørenes program. At de også kan være utsatt for alvorlige problemer, spesielt med fastkiling av skjoldet, skal omtales senere.



Figur 3. *Tunnelbormaskin med heldekkende dobbelt teleskopskjold. Borhodet modifiseres med roterende støtteribber for å hindre blokkering i ukonsoliderte knusningssoner. Kutterne er ikke montert. (Etter Grandori [3]).*

1.1.4. Eksisterer det noen universalmaskin?

Vi kan allerede slå fast at den effektive universalmaskinen ennå ikke er bygd. ROBBINS [4] antyder et konsept som kombinerer en skjoldmaskin for hardt fjell med et slurry-kammer under trykk på borhodet. Det skulle i dag være fullt mulig å bygge en slik maskin som ville kunne tilfredsstille flere av de krav man måtte stille til en universalmaskin.

En slik universalmaskin måtte kunne kontrollere de store deformasjonene fra "squeezing ground" uten nødvendigvis selv å ta opp alle kreftene direkte. Videre måtte den kunne mestre store innbrudd av vann, sand og annet materiale fra ukonsoliderte soner eller lag. På strekninger der slike tiltak ikke er nødvendige burde den dessuten bore like fort som en vanlig maskin for hardt fjell.

Alle disse kravene tilfredsstilles ikke samtidig av dagens maskiner. I situasjoner der man ikke trenger den mer fullstendige sikkerheten mot overraskelser av alle slag vil det

derfor ennå i overskuelig fremtid være lønnsomt å bruke mer spesialiserte maskiner.

1.1.5. Rullemeisler dominerer fullprofilboring av fjell

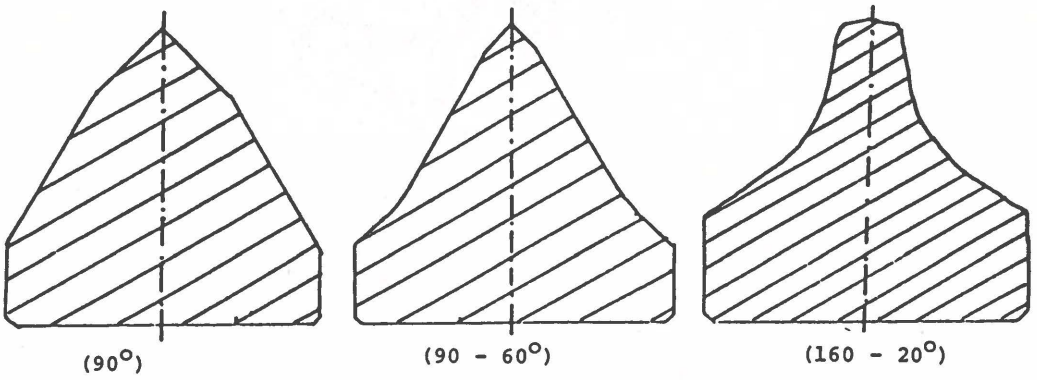
I dag dominerer enkeltrings rullemeisler (disc cutters) av herdet stål ved tunnelboring. I harde og slitende bergarter anvendes ofte rullemeisler med hardmetallstifter. I svake bergarter, der rimelig gode inndrifter kan oppnås selv for en moderat matekraft pr. meiselring, har to- og trerings rullemeisler fremdeles en viss anvendelse.

Fresende boreverktøy (pick cutters) anvendes i en viss utstrekning i svake og lite slitende bergarter. Denne type kuttere har imidlertid sin klare begrensning med hensyn til fjellmassens borbarhet. Under mer krevende forhold med hensyn til bergartens styrke og abrasivitet samt ved manglende svakhetsflater i fjellmassen, kommer denne typen kuttere til kort sammenlignet med rullende boreverktøy.

Underkuttings-prinsippet, der fresende boreverktøy skar ut bare ca. 1/3 av bergartsvolumet, mens det øvrige ble brutt løs i større fragmenter, er nå forlatt på grunn av disse begrensningene.

For fullprofilboring av tunneler i fjell dominerer altså rullende boreverktøy. Utviklingen av kutterne har stort sett foregått etter prøve- og feilemetoden. Forskningen innen dette feltet har ligget med et solid etterslep i forhold til leverandørenes utvikling og utprøving av stadig kraftigere og mer effektive kuttere. Et utvalg av dagens aktuelle rullemeiseltyper er vist i figur 4.

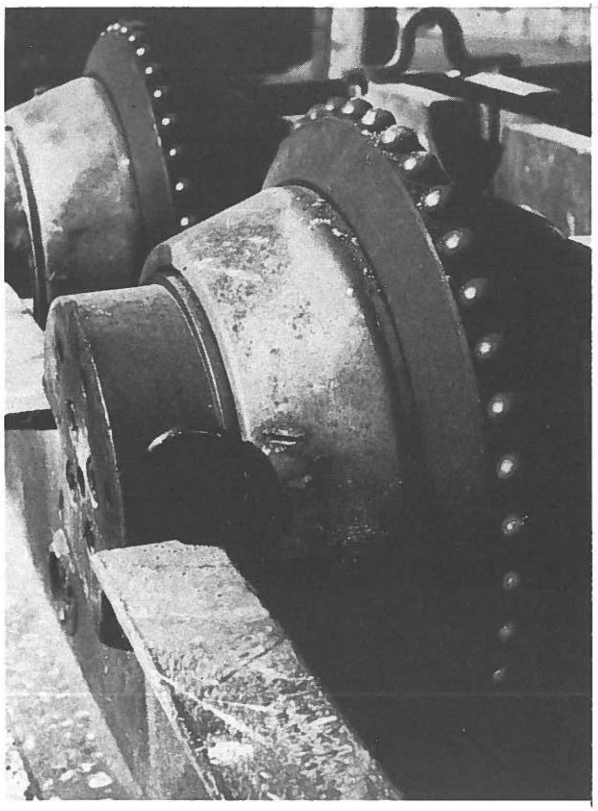




Figur 4. *Øverst : Kuttere med enkeltrings rullemeisler med diameter 40 cm og 90° eggvinkel.*

Nederst: Snitt av rullemeiselringer. "Konstant tverrsnitt"-typen til høyre.

For å forlenge kutterskiftintervallet i moderat harde, men abrasive bergarter kan rullemeiselringer av "konstant tverrsnitt"-typen med spesielt stor eggbredde (opptil 25 mm) anvendes. Ringer med større ytterdiameter enn 40 cm er også tatt i bruk. I hardt slitende fjell brukes videre rullemeisler med hardmetallstifter. Disse finnes nå med utskiftbare ringer som vist i figur 5, og anvendes gjerne i senter og langs periferien.



Figur 5. Kutter med utskiftbar, enkeltrings rullemeisel med hardmetallstifter.

Disse kutterne består altså av en aksling, kraftige, koniske rullelagre, tetningsringer, hylse samt de utskiftbare rullemeiselringene med låseringer. De finnes i en rekke utgaver med forskjellig eggvinkel eller tverrsnitt. Vanligste ytterdiameter er i dag 40 cm (15½ - 16"), men 30 og 35 cm brukes ennå, spesielt på eldre maskiner og i svakere bergarter.

1.2. Brytningsprinsipp

1.2.1. Boreprosessen er et komplisert samspill av maskinelle og geologiske faktorer

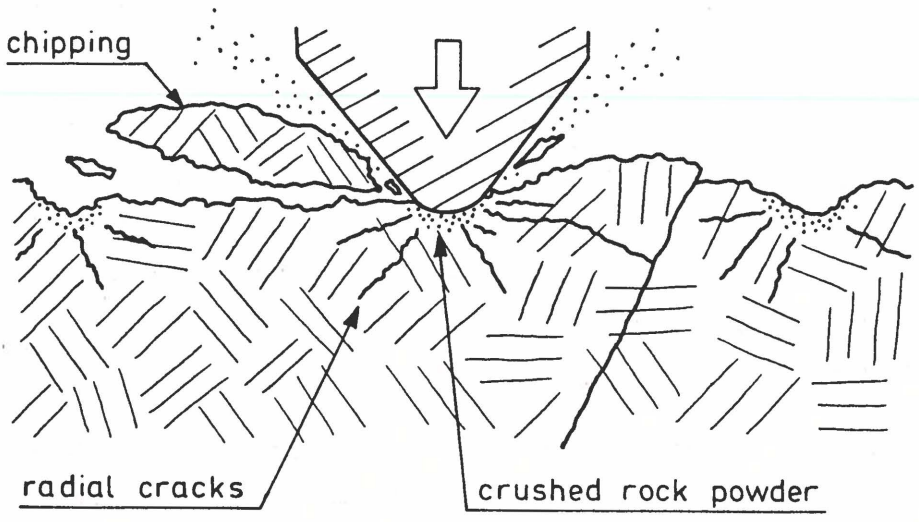
Først i den siste 5-årsperioden har man virkelig begynt å forstå hva som skjer på et borhode og under en kutter. Dette har påskyndet maskinutviklingen og også gjort det mulig å forutsi inndrifter med brukbar nøyaktighet. Spesielt er samspillet mellom de maskinelle faktorene som matekraft, meiselsporavstand, dreiemomentbehov etc. bedre klarlagt. Videre forstår man bedre

hvilke bergartsegenskaper som påvirker brytningen og klarlegging av svakhetsflatenes innvirkning er i gang.

En rekke forskningsprogrammer og systematisk erfaringsinnsamling har bidratt til dette. Blant disse har Colorado School of Mines ved fullskala laboratorieforsøk gitt et viktig bidrag til forståelsen og kvantifiseringen av det kompliserte samspillet mellom de maskinelle faktorene og bruddmekanismen i bergartsmaterialet, se f.eks. OZDEMIR et al. [5]. Ved observasjoner, bl.a. ved hjelp av høyhastighetsfilming er det videre klarlagt hva som skjer under (eller foran) en rullemeiselegg og som enhver kan se resultatet av på en fullprofilboret stuff.

1.2.2. Avskallingen domineres av rissdannelse på grunn av strekkspenninger

Som illustrert i figur 6 pulveriseres bergarten rett under en rullende rullemeiselegg. En del av dette pulveret "blåses" ut langs meiseleggen med stor hastighet. Videre dannes det riss ut fra denne sonen tilsvarende de radielle rissene fra et borhull under sprengning. Som ved sprengning skyldes disse rissene induserte strekkspenninger.



Figur 6. Pulverisering, rissdannelse og avskalling under en rullemeiselegg.

Til siden for eggen skaller bergarten av i mindre og større flak. Denne avskallingen behøver ikke alltid å skje for hver passering av eggen, f.eks. kan to eller tre passeringer være nødvendig før ryggen mellom meiselsporene skaller av. Denne avskallingen er hovedårsaken til den høyst varierende belastningen som hver enkelt kutter opplever.

OZDEMIR et al. [5] utviklet en matematisk modell av denne prosessen der kutterkreftene bl.a. beregnes ut fra de kreftene som skal til for å overvinne skjærfastheten mellom kuttersporene. Modellen har vært anvendt med gode resultater til å forutsi inndrifter for tilnærmet isotrope, massive og middels sterke bergarter, OZDEMIR & WANG [6].

Selv om skjærkrefter meget vel kan være i aksjon i avskallingsprosessen, er det nå mer alminnelig akseptert at rissdannelsen og avskallingen mellom kuttersporene primært er et resultat av strekkspenninger. Dette bekreftes av f.eks. LINDQVIST & RÅNMAN [7].

Ved boring i finkornige sedimentære bergarter kan det for øvrig ofte iakttas såkalte fjær- eller flodmønstre (river-pattern) i overflaten til borkakset. Dette gir en klar indikasjon på "kløvningsbrudd", typiske for sprøbrudd og induserte strekkpåkjenninger.

Ellers er det fullt mulig at en del av avskallingen skjer under avlastning, dvs. idet meiseleggen ruller videre. Avskalling under avlastning er et kjent fenomen for bergartsmateriale, sammenlign med f.eks. "core discing" under friboring av kjerner i bergartsmateriale som står under trykkspenninger parallelt hullbunnen.

Det finknuste pulveret som blåser ut langs meiseleggen vil slite på denne, omtrent som ved en sandblåsing. Det pulveret som blir liggende igjen i sporet blir **hardt** komprimert og rekonsolidert.

Forsøk av HAI-HUI et al. [8] viser at dette rekonsoliderte pulveret har en negativ effekt på boreprosessen idet kreftene fra meiseleggen vil bli dempet og fordelt jevnere og over et

noe større areal. I hvor stor grad dette rekonsoliderte pulveret totalt sett påvirker boreprosessen vil ellers være avhengig av tykkelsen av pulverlaget i forhold til rulle-meiselens inntrengning pr. omdreining.

I prinsippet er det de samme elementene i bruddmekanismen som går igjen enten eggen er mer eller mindre skarp, om den er av den butte typen med "konstant tverrsnitt" eller om den består av en rad avrundete hardmetallstifter. Effektiviteten blir avhengig av matekraft, kontaktareal og avstanden til nabo-sporene.

De samme mekanismene er det også som opptrer ved slaghammer-boring eller rotasjonsboring med rulleborkroner, selv om måle-stokken der er forskjellig og eggen ikke treffer samme spor bestandig. Dette er årsaken til at det er de samme bergarts-egenskapene som er viktige for borbarheten både ved slaghammer-boring og fullprofilboring.

En del av rissdannelsen skjer innover i stuffen. Det meste av rissdannelsen som gir avskalling går imidlertid tilnærmet parallelt med stufflaten. Dette betyr at bergartens strekk-fasthet i retning langs tunnelaksen vil være vesentlig for resultatet.

1.2.3. Stuffen forteller om hvordan boringen går

Stufflaten og fasongen på borkakset vil fortelle en hel del om effektiviteten i boreprosessen. En relativ jevn stufflate for-teller at boreprosessen er effektiv og at meiselsporavstanden ikke er for stor i forhold til matekraften.

En stufflate med mer vekslende "daler" og rygger mellom meisel-sporene er et tegn på at avskallingen ikke skjer jevnt for hver passering, men at det bygges opp rygger mellom meiselsporene inntil rissene til slutt når sammen. Dette kan gi borkaks der også undersiden kan være buet. Boreprosessen kan fremdeles være meget effektiv, kanskje optimal med hensyn til borkaksstørrelse (og derved også spesifikk energi) og boreverktøyslitasje.

Dersom kutter- eller meiselsporavstanden er klart for stor i forhold til matekraft og bergartsstyrke, vil det imidlertid bygges opp langsgående, sammenhengende rygger mellom sporene. Boreprosessen blir ineffektiv og andelen av finstoff øker. Dessuten finnes en del fragmenter med fasong som lange flatklemte bananer. Disse er ikke et tegn på effektiv boring. Tvert imot viser de at meiselsporavstanden er over det optimale for den anvendte matekraft i vedkommende bergart.

I figur 7 ses de lyse sporene eller rullemeislene med pulverisert bergartsmateriale og de friske bruddflatene mellom kuttersporene. Mens veggene i en fullprofilboret tunnel blir så jevne at det kan være vanskelig å se f.eks. mindre svakhetsflater som stikk o.lign., gir stuffen et meget godt bilde av boreprosessens effektivitet, samt alle detaljer i bergarten, variasjoner, oppsprekning o.lign.

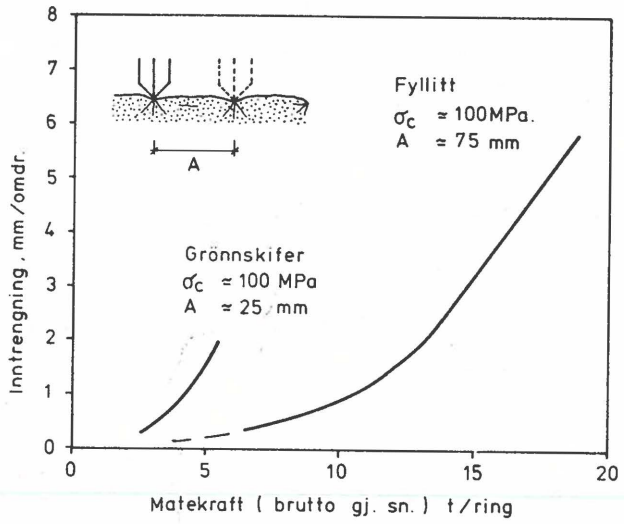


Figur 7. *Stuff der meiselsporene tydelig ses. Litt oppsprukket fjell lengst til venstre. Til høyre ses enkeltrings rullemeisler (single disc cutters).*

1.2.4. Høy matekraft har utvidet anvendelsesområdet

På grunn av utviklingen av større og bedre kutterlagre og overgang til enkeltrings rullemeisler har man hatt en sterk økning av maksimal matekraft pr. meiselring de siste årene. Det er denne økningen som har gjort fullprofilboring interessant i annet enn lettborede bergarter.

Forholdet er illustrert i figur 8. En registreringskurve fra 1972 for boring med trerings rullemeisler i grønnskifer ses til venstre. Maksimal matekraft var dengang 5,5 t/meiselring. Til høyre i diagrammet ses en tilsvarende registreringskurve fra 1981 for en moderne fullprofilmaskin med enkeltrings rullemeisler og langt større meiselsporavstand.



Figur 8. *Inntrengning som funksjon av matekraft. Økt matekraft pr. ring gir høyere inndrift selv ved økt meiselsporavstand. (σ_c = enaksiell trykkfasthet).*

Kurvene illustrerer også et annet viktig forhold. Etter at en viss "kritisk" matekraft er overskredet, øker inntrengningen raskt og tilnærmet lineært med matekraften.

Noen avflatning av slike kurver er ikke påvist ut fra bruddmekaniske årsaker, og vil trolig ikke opptre før godt over de 12 - 15 mm pr. omdreining som i dag i praksis er det øvre nivå. Imidlertid kan en rekke andre praktiske begrensninger

inntre. Dreiemomentkapasiteten på borhodet kan bli for liten ved de store inntrengningene. Videre kan kapasiteten på borkakshåndteringen bli for liten; dette gjelder oppsamling og transport av borkaks på og gjennom borhodet, og videre med transportbåndet. Flaskehalser kan være lagt inn bevisst av produsentene som en sikkerhet mot overbelastning.

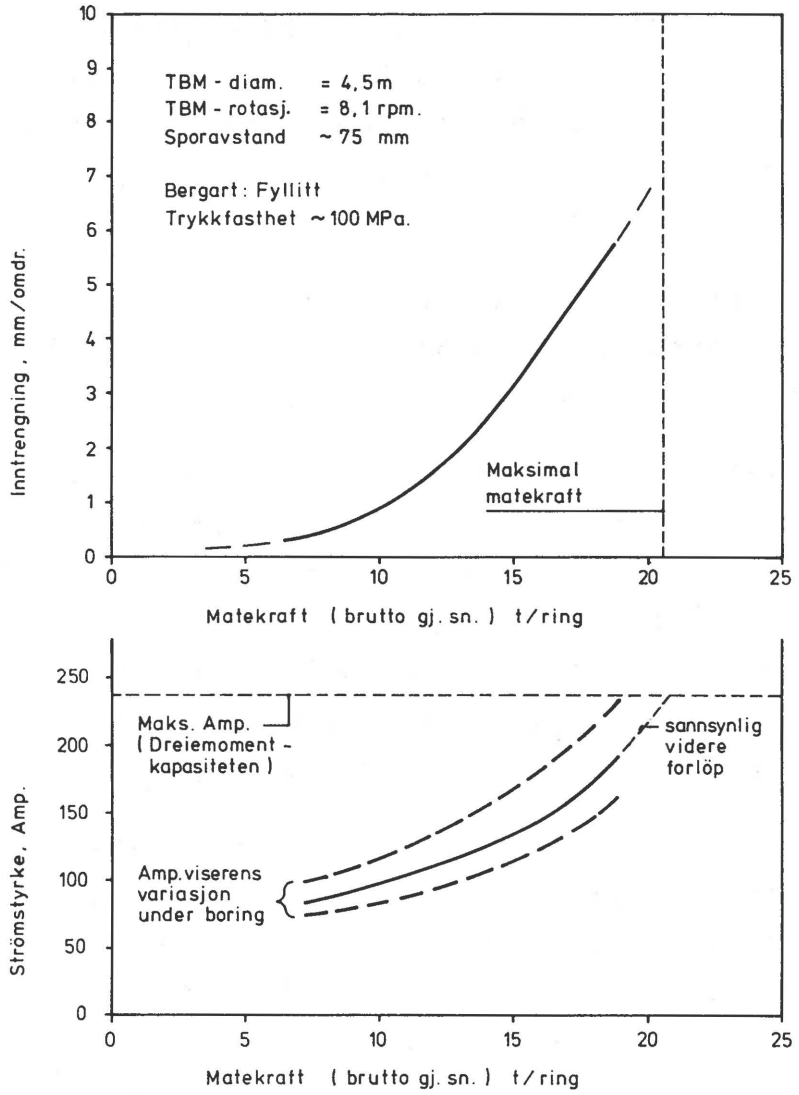
Dessuten kan f.eks. vibrasjoner resultere i at matekraftkapasiteten ikke blir utnyttet fullt ut, ut fra begrunnet eller ubegrunnet frykt for skader og avbrudd.

Det finnes altså bruddmekanisk sett ingen "optimal matekraft" ved boring av en bestemt bergart. Jo høyere matekraft pr. meiselring man har til rådighet, desto fortere kan bergarten bores. Tidligere var den totale matekraftkapasiteten til maskinen ofte den begrensende faktor. Dette er sjelden tilfelle på moderne maskiner.

1.2.5. Høyt dreiemoment tillater effektiv boring

I harde og massive bergarter vil som oftest den maksimale, tillatte matekraften pr. kutterlager være den begrensende faktor. I svakere bergarter vil imidlertid flaskehalsen hyppigere være dreiemomentet.

I en og samme tunnel kan derfor en tunnelbormaskin være begrenset av enten matekraft- eller dreiemomentkapasiteten alt etter variasjonene i fjellets borbarhet. I noen situasjoner vil maskinen være godt utnyttet m.h.p. begge forhold. Et eksempel på dette er vist i figur 9. Det fremgår av registreringskurvene for inntrengning og effektuttak at maskinen på det høyest anvendte nivået for matekraft under produksjonsboring (brutto gjennomsnittlig 18,7 t/ring), ikke utnytter hverken matekraft- eller dreiemomentkapasitet fullt ut. Dette er et vanlig forhold i praksis. Normal utnyttelsesgrad for matekraften i massivt fjell er ofte ca. 90%.



Figur 9. Inntrengning og dreiemomentbehov som funksjon av matekraften.

Det fremgår også av figuren at ved en økning av matekraften inntil kapasiteten på 20,5 t/ring ville sannsynligvis også dreiemomentkapasiteten blitt helt utnyttet. Praktiske ulemper som kan inntre ved en slik fullstendig utnyttelse av kapasiteten kan være løsriving av kutternes festebolter, hyppigere varmgang av motorene etc.

Borhodets dreiemomentbehov gis av summen av rullekreftene ganger radius til de enkelte kutterne, pluss det dreiemoment som trengs til å overvinne friksjonen og det som går med til borkaksoppsamlingen.

Den malsimale effekten som kan tilføres borhodet for en vanlig tunnelbormaskin i dag, vil iallfall for de mindre diametrene være begrenset av plassforholdene. Den senere tids overgang til vannkjølte elektromotorer har tillatt større effekt uten at motorene tar større plass.

For en bestemt installert effekt til borhodet vil dreiemomentet være direkte avhengig av omdreiningstallet. Ved økende omdreiningstall reduseres dreiemomentet og omvendt.

Nå må omdreiningstallet for de fleste tunnelbormaskiner velges på forhånd, eventuelt finnes en omsjaltingsmulighet til et lavere omdreiningstall på maskiner med store diametere. Én maskintype har hydraulisk regulerbart omdreiningstall. Det største omdreiningstallet som tillater full utnyttelse av matekraftkapasiteten (til de enkelte kutterne eller maskinen totalt), vil gi den beste utnyttelse av den installerte effekten.

I harde bergarter med relativt lav inntrengning begrenses som regel omdreiningstallet av den maksimale periferihastigheten eller rullehastigheten som man tør utsette kutterne for. I den siste tiden har maskinleverandørene justert denne hastigheten oppover etter som utviklingen har gitt stadig bedre rullelagre. I dag leveres f.eks. maskiner med 3,5 m diameter med et omdreiningstall på 15 - 16 rpm for boring i hardt fjell, mens det for et par år siden var vanlig med omkring 8 - 10 rpm for denne diameter.

Avveiningen av dreiemoment og omdreiningstall skjer i stor grad skjønnsmessig. Overslag kan baseres på erfaringstall for "kuttekoeffisienten", dvs. forholdet mellom rullekraft og matekraft. Dette forholdet ligger omkring 0,1 (i området 0,06 - 0,16) og varierer med inntrengning, meiselavstand og bergartstype.

Dersom man velger for høyt omdreiningstall for en gitt situasjon, kan det bety at man ikke får utnyttet matekraftkapasiteten fullt ut. Dette vil bety lavere inndrift pr. omdreining og derved mindre effektiv boring med hensyn til borkaksstørrelse

og boreverktøyslitasje. En best mulig utnyttelse av matekraftkapasiteten til kutterne vil derfor være gunstig i de fleste tilfellene.

1.2.6. Vibrasjoner og slagpåkjenninger kan ikke unngås

Avveiningen av omdreiningstall/dreiemoment må ta hensyn til både eggslitasje og brekkasje av rullelager o.a. Det må også vurderes om et høyere boreverktøyforbruk kan aksepteres for å oppnå økt inndrift.

Siden inntrengning og avskalling gir de enkelte kutterne en høyst varierende belastning, uttrykker det praktiske begrepet matekraft pr. meiselring, som brukt foran, bare den gjennomsnittlige matekraften.

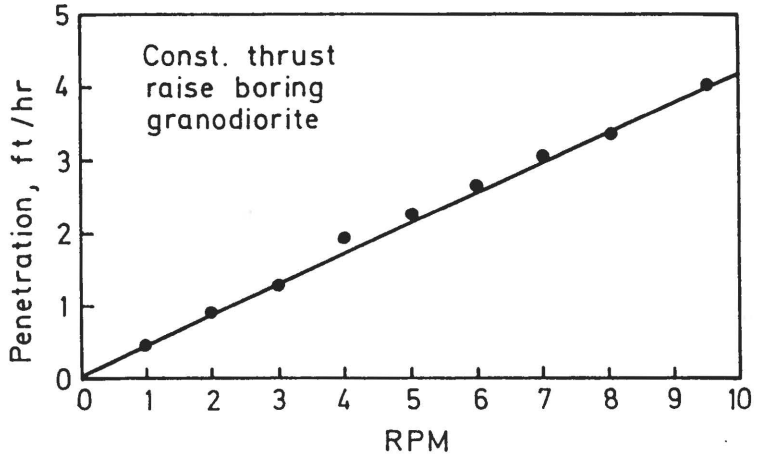
Ser man mer detaljert på dette, er det innlysende at periferikutterne, som både står tettere og har en annen vinkel til tunnelaksen enn de øvrige (senter- og "strosse"-kutterne), vil få en mindre gjennomsnittlig belastning. På den andre siden er de kanskje mer utsatt for slagpåkjenninger og skjevbelastninger. Fra en undersøkelse der en del av rullemeislene på en tunnelbormaskin ble instrumentert, rapporterer GOBETZ [9] at de maksimale kutterkreftene var meget varierende ved boring i en blandet stuff av skifrer og sandsteiner. De maksimale normal(mate)-kreftene for f.eks. periferikutterne var 10 ganger så høye som de gjennomsnittlige.

Vibrasjoner kan ikke generelt sies å være ugunstige. Dersom det bores fort, er det ikke til å unngå at det rister litt. Hvis vibrasjonene er av en slik art at borhodet kan få en sidevegs forskyvning under boring, vil de derimot gi en sterk økning i boreverktøykostnadene.

Økte slagpåkjenninger på grunn av at stuffen har blandet hardhet eller er oppsprukket, kan gi økte boreverktøykostnader på grunn av ring- og lagerbrekkasje m.m. Dette har imidlertid sjelden noen utslagsgivende betydning for boreverktøykostnadene dersom boreprosessen for øvrig er effektiv.

1.2.7. Inndriften er tilnærmet proporsjonal med omdreiningstallet

For det området av omdreiningstall som i dag er vanligst i tunnelboring, dvs. opp til ca. 10 rpm, kan man for praktiske formål sette inndriften pr. time proporsjonal med omdreiningstallet. Dette er illustrert i figur 10 etter HAMILTON & DOLLINGER [10]. I hvilken grad dette også gjelder for omdreiningstall på ca. 15 rpm og enda høyere vet man ennå ikke.



Figur 10. Inndrift som funksjon av omdreiningstallet. (Eksempel Hamilton & Dollinger [10]).

Økende rullehastighet gir imidlertid redusert ringlevetid, f.eks. omtalt av BLINDHEIM & HELGEBOSTAD [2]. Rullelagrenes levetid uttrykt i rullet lengde vil også kunne reduseres ved den økte slagpåkjenningen som en høyere rullehastighet medfører. Det blir igjen en avveining av hva som gir det optimale resultatet; å belaste kutterne med høy matekraft eller med høy rullehastighet. De forskjellige maskinleverandørene har til dels forskjellig syn på hva som er best.

1.2.8. Meiselsporavstanden bør være stor i svakt fjell

Bruddmekanismene kan også ses fra en annen synsvinkel. Når kutterstørrelse og lagerdimensjon er gitt, er valget av kutteravstanden eller mer presist, avstanden mellom meiselsporene

meget viktig, idet denne vil være avgjørende for maskinens ytelse ved boring gjennom varierende fjellforhold.

Avstanden kan endres ved ombygging av borhodet, men dette vil sjelden være lønnsomt, annet enn f.eks. ved overgang til andre typer (større) kuttere.

Tidligere var det vanlig med kutteravstander på omkring 50 mm ved to- og trerings rullemeisler. Dersom disse rullet i spor mellom hverandre, ble meiselsporavstanden og derved maksimal bredde på borkakset ca. 25 mm. For maskiner med enkeltrings rullemeisler med matekraftkapasitet på omkring 20 t er meisel-sporavstander opp til 100 mm i dag ganske vanlige ved boring i svake til middels harde bergarter. Ved boring i meget harde bergarter (der også dreiemomentbehovet normalt ikke har vært den begrensende faktor), er meiselsporavstander omkring 65 - 75 mm vanlige. Meiselsporavstanden for nye maskiner velges ofte for den første jobben, men senere anvendelser bør også tas med i betraktningen i den grad **de kan forutses.**

OZDEMIR et **al.** [5] fant ved lineære kutteforsøk i full skala at den optimale meiselsporavstanden (A) med hensyn på spesifikk energi (dvs. at fjellet blir knust minst ned og den midlere borkaksstørrelsen er størst), lå i området mellom 10 - 25 ganger inntrengningen pr. omdreining (I) og vanligst i området 15 - 20 ganger inntrengningen.

Andre observasjoner fra lignende forsøk i laboratorium, SNOWDON et al. [11], og observasjoner av trearms tunnelbormaskiner, der kutteravstanden kan varieres under boring, tyder på at et høyere inntrengningsnivå kan bevirke at et lavere A/I-forhold er gunstigere, BLINDHEIM & AASEN [12].

Energiforbruket teller i seg selv lite rent praktisk eller økonomisk. Et lavt energiforbruk indikerer imidlertid at bore-prosessen er effektiv. Når borkakset knuses minst mulig, blir også boreverktøyslitasjen lavest mulig.

2. FAKTORER SOM PÅVIRKER DRIVINGEN

2.1. Inndrift

2.1.1. Netto inndrift og utnyttelsesgrad kan variere voldsomt

Fullprofilboringens kanskje viktigste fordel er den mulige høye inndriften.

Bergartens borbarhet er en av de viktigste geologiske faktorene som påvirker drivehastigheten ved fullprofilboring. Tidligere var borbarheten også den viktigste begrensende faktor for anvendelsen av fullprofilbormaskiner, enten med hensyn til inndrift eller boreverktøyforbruk eller begge deler. Dette nødvendiggjorde en fokusering på boreprosessen og selve bergartsmaterialets borbarhet.

Etter hvert som tunnelbormaskinenes økte matekraft- og dreiemomentkapasitet har muliggjort effektiv boring av stadig hardere bergarter, har imidlertid den relative betydning av borbarheten i de svakere bergartene blitt redusert. Fremdeles er selvsagt den maksimalt oppnåelige netto inndrift også viktig i svake bergarter. Det må imidlertid også tas hensyn til andre momenter som svakhetsflatenes innvirkning på inndrift og stabilitet, innflytelse av svakhetssoner og bergtrykk, samt lekkasjer og miljøforhold dersom gode resultater skal oppnås.

Dette har resultert i en større oppmerksomhet mot helhetsbildet, slik at både forundersøkelser og organisering av arbeidet tar hensyn til dette. Det er klart at f.eks. en økning i netto inndrift i lett borbart fjell lett kan spises opp av forsinkelser på grunn av vannlekkasjer. Eller at selv en dobling i ukeinndrift kan være for lite hvis man forsinkes i ukevis ved passering av knusningssoner.

Fullprofilboring kan i dag i lettborede bergarter muliggjøre ukeinndrifter som er både 2 og 3 ganger høyere enn det som kan oppnås ved konvensjonell drift. Gjennomsnittlige ukeinndrifter på 100 - 150 m regnet over hele prosjektet er ikke uvanlige.

Variasjonsområdet er imidlertid voldsomt. Som eksempel kan nevnes hvordan velorganisert drift i lettborede bergarter i Hadestunnelen i Utah muliggjorde en toppinndrift på 391 m på én uke, MARTIN [13]. I samme tunnel tok det 40 døgn å drive en strekning på 12 m gjennom et parti med løs sand, dvs. en fremdrift på 1,5 m/uke.

2.2. Borbarhet

2.2.1. Bergartens borbarhet er viktig

Bergartens borbarhet defineres som den ytelse i form av netto inndrift som oppnås ved boring med et bestemt boreutstyr under bestemte arbeidsbetingelser, samt den slitasje som bergarten forårsaker på boreverktøyet.

Bergartens borbarhetsegenskaper ved fullprofilboring kan uttrykkes på flere måter, men viktigst er:

- bergartens motstandsevne mot slagpåkjenning,
- bergartens slitasjeegenskaper.

Fullprofilboring innebærer som diskutert i forrige avsnitt hurtige pålastninger med derpå følgende nedknusing og avskallinger.

Erfaringer har vist at metoder som etterligner denne "slagpåkjenningen" har gitt gode korrelasjoner med virkelige boreresultater.

Den mest anvendte styrkeparameter for bergarter, enaksiell trykkfasthet, gir alene ingen fullgod beskrivelse av borbarheten, men har en viss verdi som støtteparameter og kommunikasjonsmiddel.

Det finnes en rekke testmetoder som etterligner boreprosessen i større eller mindre grad. Det er i dag i gang et standardiseringsarbeid i regi av ISRM. Dette vil forhåpentlig resultere i et begrenset utvalg av anbefalte tester som kan uttrykke de interessante bergartsegenskapene på en rimelig god måte.

Testmetodene vil bli nærmere diskutert i avsnitt 6. Her skal **det bare** påpekes at følgende parametere er interessante i denne sammenheng:

- sprøhet/seighet (brittleness/toughness)

  flere parametere kan uttrykke dette:

  - Sprøhetstallet fra den svenske fallprøven,
  - Robbins' "toughness value" (dynamisk avklipping),
  - forholdet mellom trykk- og skjærfasthet brukes av og til for å uttrykke "sprøheten".

- styrkeparametere
  - punktlaststyrke eller strekkfasthet,
  - trykkfasthet,
  - skjærfasthet.

- abrasivitet
  - slitasjeegenskaper ut fra mineralinnhold og kornform uttrykt ved tromletester, pulvertester, ripetester el.lign.

Med hensyn på slitasjen er det klart at alle de faktorene som påvirker inndriften også påvirker slitasjen. Dessuten teller bergartens abrasivitet i form av mineralinnhold, kornbinding, styrke og kornform.

Det er i dag mulig med rimelig god pålitelighet å gjøre overslag over netto inndrift ut fra bergartsegenskapene, dels etter empiriske og dels etter mer teoretiske metoder. Generelt bør flere metoder forsøkes anvendt idet begrensninger i anvendelsesområdene og usikkerheter forekommer. For overslag over slitasje- eller boreverktøyforbruk er de foreliggende metodene meget empiriske og til dels svært usikre.

2.2.2. Slitasjetypen avhenger av mating og bergart

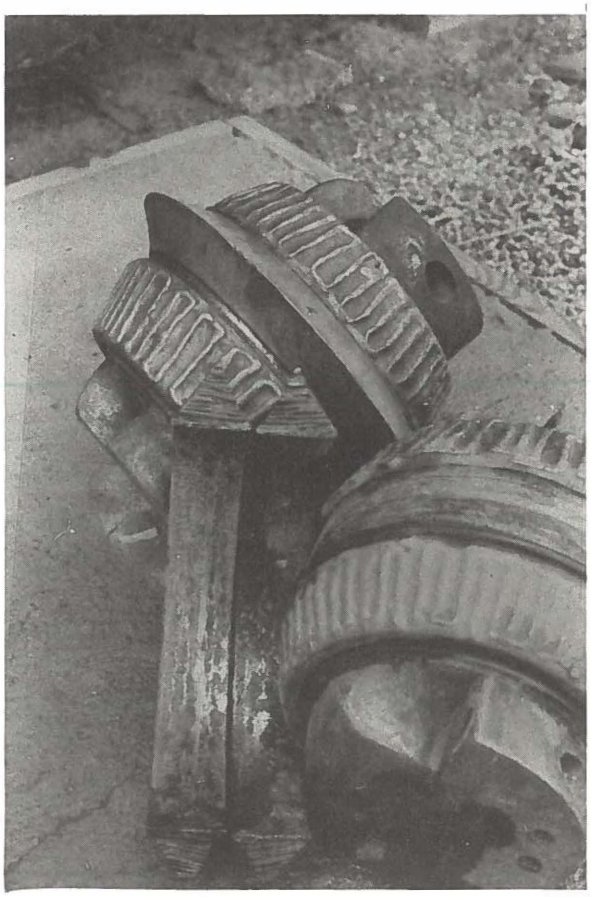
Angående det mer generelle slitasjebildet skal her kort nevnes at det avhenger av ved hvilket matekraftnivå det bores. Ligger

anvendt matetrykk bare like over det kritiske, er flatsliting med utvikling av en butt egg det vanlige, dersom bergarten inneholder mineraler som sliter på vanlig herdet kutterstål.

Dersom det anvendes et høyt matetrykk i forhold til det kritiske, og det følgelig oppnås stor inntrengning pr. omdreining, kan selvskjerping av kuttereggen finne sted. Dette er gunstig med hensyn til inndriften idet kuttereggen beholdes skarp. Spesielt kan dette opptre i relativt svake bergarter med innhold av abrasive mineraler som kvarts, epidot etc. Det kan også opptre i sterkere bergarter dersom disse er tett oppsprukket slik at det oppnås høy inntrengning pr. omdreining.

Anvendes kuttere med hardmetallstifter i tilsvarende situasjoner, kan disse bli utsatt for såkalt "tannkjøtt-slitasje", dvs. slitasje på stålinnfatningen slik at stiftene brekker eller løsner.

Figur 11 viser et eksempel på rullemeiselringer utsatt for selvskjerpende slitasje.



Figur 11. *Rullemeisler som har vært utsatt for selvskjerpende slitasje (én ring er delt opp). Lagerhylsa er påsveiset sliteribber. (Etter Blindheim [14]).*

Hvis det bores i bergarter med ikke slitende mineraler, som f.eks. for kalksteiner, marmor e.lign., kan meiselringene som da får lang levetid, bli utsatt for tretthetsbrudd på grunn av slag- og temperaturpåkjenninger.

For å mestre disse vidt forskjellige situasjonene finnes en rekke forskjellige typer og utforminger av meiselringene.

2.2.3. Fjellmassens borbarhet avhenger av svakhetsflatene

Fjellmassens borbarhet påvirkes i tillegg til bergartens borbarhet av de forskjellige svakhetsflatene i fjellmassen. Denne effekten er avhengig av svakhetsflatenes

- type, åpenhet, ruhet, belegg,
- frekvens og utholdenhet,
- orientering.

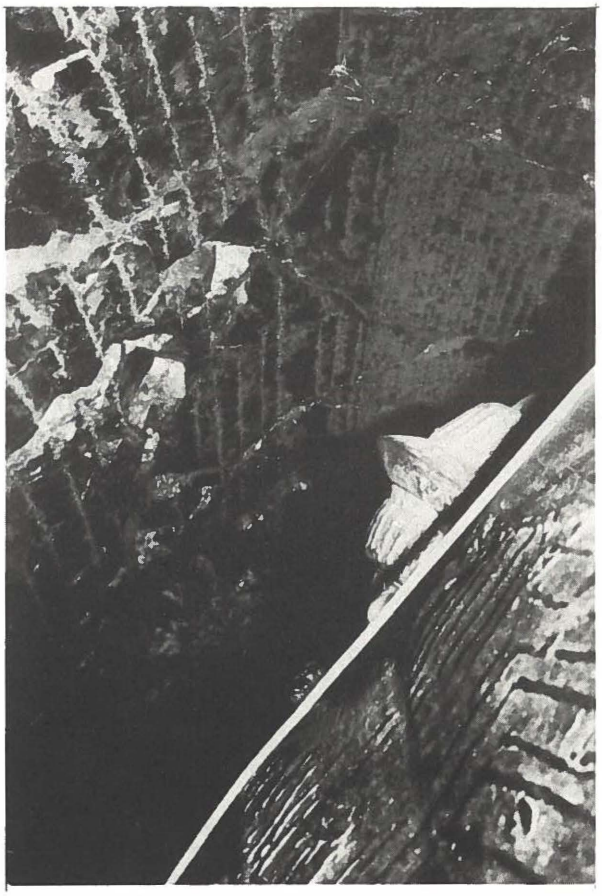
At borbarheten lettes av svakhetsflater, overbevises man lettest om framme på stuffen der man kan se at fjellet brytes ut foran kuttersporene. De kutterne som passerer sprekkene blir avlastet og matekraften overføres til de andre som derved får høyere inntrengning.

Figur 12 illustrerer dette idet det fremgår at kuttersporene ikke blir helt sammenhengende.

I tett oppsprukket fjell kan så mye bryte ut langs sprekker at meiselsporene kan mangle på store deler av stuff-flaten, BLINDHEIM & HELGEBOSTAD [2] rapporterer f.eks. et tilfelle der 40 - 50% av stuffen er brutt ut langs sprekkeflater.

Oppsprekningen kan ved siden av at den letter borbarheten, forårsake vibrasjoner og slag, samt forringe stabiliteten av stuffen og tunnelen. Denne effekten bør vurderes separat og omtales i avsnitt 3.3.

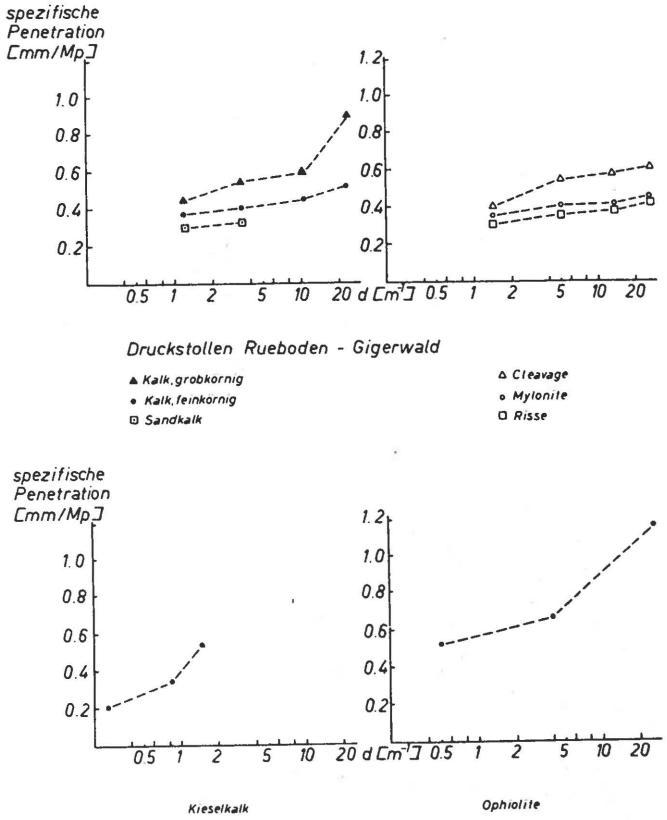
Innflytelsen av svakhetsflatene på resultatene fra fullprofilboring er meget stor. Sammenlignet med den innsatsen som har vært rettet mot bergartenes borbarhet, har det inntil for få år siden vært brukt lite energi på å prøve å kvantifisere disse effektene.



Figur 12. Stuff i oppsprukket andesitt-lava. Fjellet bryter mot sprekkene og dette letter frem-driften. (Etter Blindheim [14]).

WANNER [15] publiserte allerede i 1975 resultater som viste den store innflytelsen vinkelen mellom skifrighetsplan og tunnelakse hadde på inndriften. Han har senere vist at sprekker dannet ved strekkspenninger, dvs. ru sprekker, ikke påvirker nettoinndriften så mye som sprekker som er dannet ved skjærbevegelser i fjellmassen, som gir glatte sprekke-flater, [16].

For øvrig viser hans og Aeberli's data, som han refererer, at innflytelsen av anisotropien og oppsprekningen kan påvirke netto inndrift med en faktor på inntil henholdsvis 1,5 og 2,5, endog mer hvis man ligger nær det kritiske matetrykket for bergarten.



Figur 13. *Innflytelse av oppsprekningen på spesifikk inndrift (inntrengning/matekraft). (Etter Aeberli 1978 i [16]).*

Figur 13 viser eksempler på dette og illustrerer forskjellen på innflytelsen av skjærbrudds-plan og strekk-riss (øverst til venstre). Det er også verdt å merke seg at disse store relative forskjellene opptrer i svake metamorfe kalkholdige sedimentbergarter, dvs. svakt fjell etter skandinavisk målestokk.

Også andre har påpekt betydningen av oppsprekningen på inndriften, men det har vært en klar tendens til å se denne som mindre vesentlig for sprekkeavstander større enn ca. 0,3 m.

Både HANDEWITH [17] og McFEAT-SMITH & TARKOY [18] påpeker at inndriften ved fullprofilboring øker signifikant når sprekkeavstanden kommer under 0,3 m, mens KORBIN [19] hevder at denne effekten først blir signifikant når sprekkeavstanden kommer ned mot meiselsporavstanden.

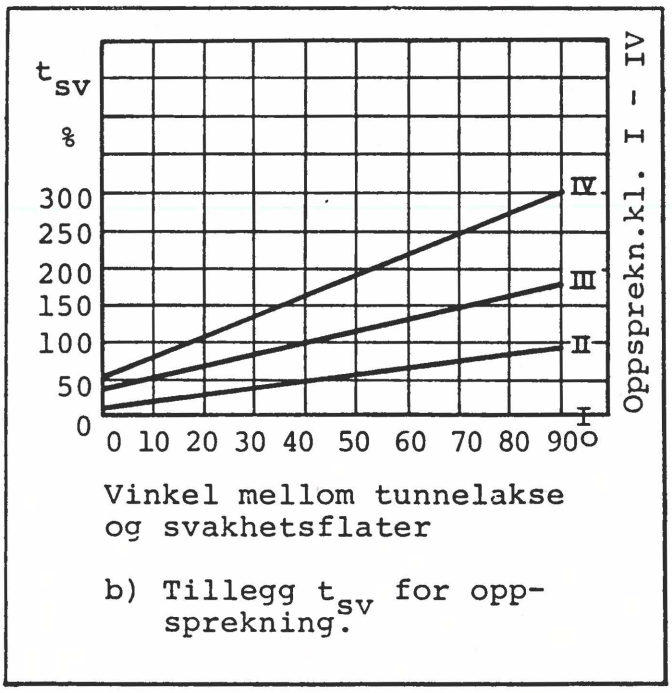
2.2.4. Prognosemodell for svakhetsflatenes innvirkning

Et mer fullstendig forsøk på å kvantifisere effekten av svakhetsflater foreligger i PROSJEKTRAPPORT 1-79 [20] fra NTH. Denne gir et fullstendig system for å beregne netto inndrift etc. ved fullprofilboring. Her inngår bl.a. et diagram for å beregne et mulig tillegg i netto inndrift på grunn av svakhetsflater i fjellmassen.

Dette diagrammet er gjengitt i figur 14, og er satt opp på basis av innsamlede erfaringsdata fra en lang rekke fullprofilborede tunneler.

Som svakhetsflater er regnet flater med meget liten eller ingen strekkstyrke normalt flaten, slik som

- stikk og sprekker,
- foliasjonsflater, med sammenhengende flater av parallellorienterte mineraler; glimmer, kloritt etc.,
- lagdelingsflater, dersom de utgjør en mekanisk diskontinuitet, og benkningssprekker.



b) Tillegg t_{sv} for oppsprekning.

Oppsprekningsklasse	Avstand mellom svakhetsflater
I	40 cm eller mer
II	20 cm
III	10 cm
IV	5 cm

Oppsprekningsklasse I regnes som tilnærmet massivt og brukes som basis.

Figur 14. Diagram for beregning av tillegg i netto inndrift på grunn av svakhetsflater i fjellmassen. (Etter Prosjektrapport 1-79 [20]).

Som det fremgår er oppsprekningsgraden delt inn i fire klasser med klasse I med sprekkeavstand 40 cm som basis.

Diagrammet illustrerer den store effekten som tilstedeværelsen av svakhetsflater i fjellmassen kan ha på netto inndrift. Diagrammet tar ikke hensyn til andre begrensende faktorer som oppsprekningens virkning på stabiliteten, dreiemomentbehovet, vibrasjoner o.lign.

Det er også klart at et rettlinjet kurveforløp representerer en forenkling. Resultater fra inntrengningstester publisert av WANNER [16] kan indikere at for anisotrope bergarter kan gunstigste vinkel mellom tunnelakse og svakhetsflater være lavere enn 90^{o}. Dette spørsmålet er ikke avklart.

Videre er det klart at for store sprekkeavstander kan det være gunstigere å bore langs sprekkene enn på tvers i en ellers tilnærmet isotrop fjellmasse.

Det bør videre bemerkes at det tillegget som kan anslås ut fra diagrammet i figur 14, kommer som et påslag på en basisinndrift beregnet ut fra borbarhetstester som på grunn av nedknusing av prøvematerialet ekskluderer svakhetsflater i bergarten som har større avstand enn ca. 2 cm. Slike svakhetsflater kan påvirke testresultatene f.eks. for trykkfasthetstesting på kjerner med lengde ca. 10 cm.

Det er klart at dette forsøket på en systematisk beregning av effekten må forbedres etter hvert som flere erfaringsdata gjør dette mulig. Ferske erfaringer viser at den viste inndelingen i sprekkeklasser som er anvendt i Prosjektrapport 1-79 er for enkel, BLINDHEIM [21]. I helt massivt fjell har man behov for en "oppsprekningsklasse 0". Det har nemlig vist seg at i helt massivt og tungt borbart fjell, har selv en oppsprekning med større avstand enn 40 cm vesentlig betydning for resultatene. Dette gjelder spesielt når kritisk matekraft ligger helt opp mot den praktiske maksimale matekraften på 18 - 20 t/ring for moderne rullemeisler.

For svakere bergarter regnes den relative innflytelsen av svakhetsflater og oppsprekning å være mindre. Mens diagrammet i figur 14 gjelder for normalt borbart fjell etter skandinaviske forhold, kan den tilsvarende effekten i svake lettborede bergarter, f.eks. meget svake sandsteiner, kalksteiner el.lign., være i størrelsesorden ned mot halvparten.

Bruken av slike systemer vanskeliggjøres av at naturen er langt mer variert enn en slik enkel inndeling kan fange opp. Noen ganger dominerer gjennomsettende sprekker, andre ganger lagdelingsstikk. I skifrige bergarter er det ofte vanskelig å skille mellom bergartens anisotropi (bergartsmaterialets egenskaper) og stikk langs skifrighetsplanet (fjellmassens egenskaper).

Folding vil også komplisere bildet og normalt forverre borbarheten dersom foldingen ikke har gitt økt oppsprekning. Den samlede effekten av flere systemer av svakhetsflater kan ikke kvantifiseres pålitelig i dag.

2.2.5. Slepper og knusningssoner er lettborede, men forsinker fremdriften

At netto inndrift også øker eller kan økes kraftig i forbindelse med slepper, knusningssoner o.lign., er velkjent. Denne effekten er imidlertid lite interessant sammenlignet med den langt viktigere problemstillingen angående hvordan stabilitetsforholdene ved passeringen kan forsinke inndriften.

Selv om det derfor på forhånd ikke har noen hensikt å regne med den økte nettoinndriften ved passering gjennom svakhetssoner, er den likevel nyttig. En plutselig økning i inndrift gir nemlig maskinoperatøren en klar indikasjon på en endring av fjellforholdene. Øker f.eks. netto inndrift brått med mer enn 50%, kan dette gi maskinoperatøren en klar advarsel om at man er i ferd med å bore inn i en svakhetssone, og at nærmere inspeksjon og vurdering av eventuelle sikringstiltak er påkrevd.

Selv små slepper kan operatøren merke idet inndriften øker for samme matekraft samtidig som dreiemomentbehovet går opp.

Kommer man brått på kraftige knusningssoner slik at borbarhetsforholdene endres fort, kan uforsiktig behandling forårsake hovedakselbrudd, hvis ikke overvåkingssystemene for strømbelastningen er effektive nok, [14].

2.2.6. Reduksjon i matekraft kan bli nødvendig på grunn av oppsprekningen

I oppsprukket fjell øker inntrengningen pr. omdreining og derved dreiemomentbehovet. Dersom dette overskrider maskinens kapasitet, kan det bli nødvendig å redusere matekraften. Det kan også bli nødvendig å redusere matekraften dersom oppsprekningen forårsaker vibrasjoner og slag på kutterne og borhodet. Dette gjelder spesielt hvis sprekkene er gjennomsettende og hvis det opptrer flere sprekkesystemer.

Løsriving av blokker fra stuffen kan også skje og dette kan forårsake brekkasje eller løsriving av kutterne og fastkiling i borkaksoppsamlerne. Brekkasjen kan bestå i at meiselringer, lagre eller festebolter ryker.



Figur 15. *Grovt borkaks på transportbåndet ved boring i blokkig fjell i Seabrook. (Etter Blindheim [21]).*

I tett oppsprukket fjell kan en reduksjon av matekraften helt ned til det halve av normalt arbeidstrykk være nødvendig. Det vil allikevel gå meget raskere å bore slikt fjell. Dobbel hastighet i forhold til massivt fjell kan være mulig selv ved en slik reduksjon av matekraften, [2]. Figur 15 illustrerer hvor grovt "borkakset" kan være ved boring i slikt oppsprukket fjell.

2.3. Stabilitet

2.3.1. Oppsprekning gir normalt små problemer

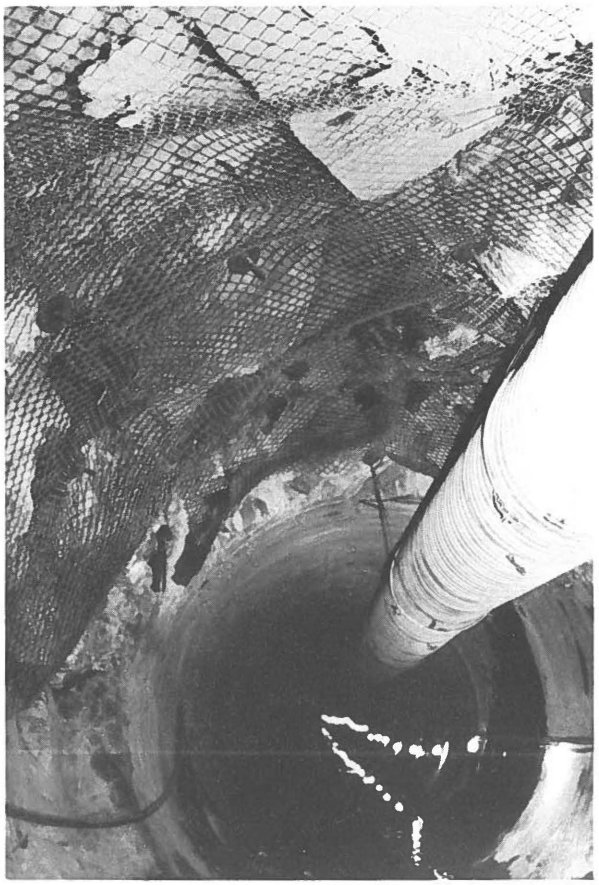
Mens den nevnte utriving av blokker på stuffen direkte kan påvirke borbarheten og hvilken netto inndrift som er oppnåelig, vil også oppsprekningen kunne gi stabilitetsproblemer i tunnelen og derved redusere utnyttelsen av maskinen.

Dette kan bety at boring i tett oppsprukket fjell kan bli langsommere m.h.p. ukeinndrifter, selv om nettoinndriften er høyere. De to effektene, innvirkningen på borbarhet og stabilitet, bør imidlertid behandles og vurderes hver for seg, idet forskjellige typer av oppsprekning vil slå forskjellig ut.

Figur 16 viser et eksempel på at relativt sterkt oppsprukket fjell, som må sikres i sprengt profil, kan stå usikret i fullprofilboret. Her er altså oppsprekningen bare en fordel for borbarheten uten å gi stabilitetsproblemer.

I så oppsprukket fjell som vist i figur 15, blir imidlertid sikringsarbeider nødvendige. Se bilde i figur 17 fra samme anlegg.

I slikt fjell kan også sikring med bolter og bånd være meget effektivt dersom ikke sprekketettheten er for stor og sprekkeorienteringen for ugunstig.



Figur 16. *Oppsprukket gneis krever sikring i sprengt tunnel, men kan stå usikret i boret, Washington D.C., diameter 3,8 m. (Etter Blindheim [21]).*



Figur 17. *Sikring av tett oppsprukket fjell med stålbuer, Seabrook. (Etter Blindheim [21]).*

At orienteringen er meget viktig fremgår av eksemplet i figur 18. Ved vinkler mellom sprekkeplan på under 10 - 15° kan selv moderat oppsprekning forårsake utfall. Utfallet utløses ofte av fastspenningslabbene.



Figur 18. Utfall på grunn av flattliggende benkningsstikk i kalkstein og en steil sprekk nær parallelt tunnelen, Chicago. (Etter Blindheim [21]).

Dersom det opptrer kun ett sprekkesystem, som f.eks. ved skifrighet eller benkningssprekker, og dette står i en gunstig vinkel til tunnelaksen, behøver det ikke å være stabilitetsproblemer selv for sprekkeavstander helt ned til f.eks. 5 cm.

Står sprekkene nær parallelt tunnelen, dvs. med en vinkel på mindre enn 10 - 15°, kan utfall forekomme for meget beskjedne sprekkefrekvenser.

Selve utboringen gir meget små påkjenninger på fjellet i hengen og veggene. Løse partier, som ved konvensjonell drift ville kommet ned sammen med sprengningen, kan derfor utløses av fastspenningslabbene. Dersom slike problemer forårsaket av oppsprekning inntreffer, er det meget viktig å ha muligheten til å utføre bolting rett bak borhodet og foran fastspenningslabbene.

Slik arbeidssikring utføres effektivt med bolter, eventuelt i kombinasjon med bånd og/eller netting. For litt større tunneltverrsnitt er det stor nok plass til at slik bolting kan utføres uten at inndriften forsinkes nevneverdig, [14]. For tunneldiametere mindre enn ca. 4,5 m er imidlertid plassforholdene normalt så dårlige at en viss forsinkelse må påregnes. Det er da spesielt viktig at matebommer osv. er montert slik at boltingen kan utføres rasjonelt.

Alminnelig skifrighet, som i fyllitter, glimmerskifrer el.lign., gir alene sjelden problemer med stabiliteten ved fullprofilboring. Som eksempel kan nevnes boring i fyllitter og krystaline skifrer ved Aurlands-anleggene. ASKILDSRUD [22] rapporterer at ved fullprofilboring av 6,2 km tunnel med 3,5 m diameter var det overhodet ikke nødvendig med sikringsarbeider under fremdriften selv om tunnelen gikk nær parallelt skifrighetsplanet.

Det er nettopp i svake bergartsformasjoner som f.eks. i nær flattliggende sedimentbergarter med benkningssprekker at fullprofilboring først hadde sitt gjennombrudd og hvor de virkelig høye inndrifter kan oppnås. Under slike forhold er det i dag ikke uvanlig med gjennomsnittlige døgninndrifter på over 30 m for tunneltverrsnitt på 6 m og større, selv med systematisk bolting under inndriften. Tilsvarende kan det for de mindre tverrsnitt f.eks. omkring 3,5 m diameter oppnås skift-inndrifter på samme nivå.

Organisasjon, transportkapasitet osv. er da utslagsgivende for resultatene. Selv under slike ideelle forhold for tunnelboring kan imidlertid andre geologiske faktorer komme til som alvorlige driftsforstyrrelser. Dette tas opp i de følgende avsnitt.

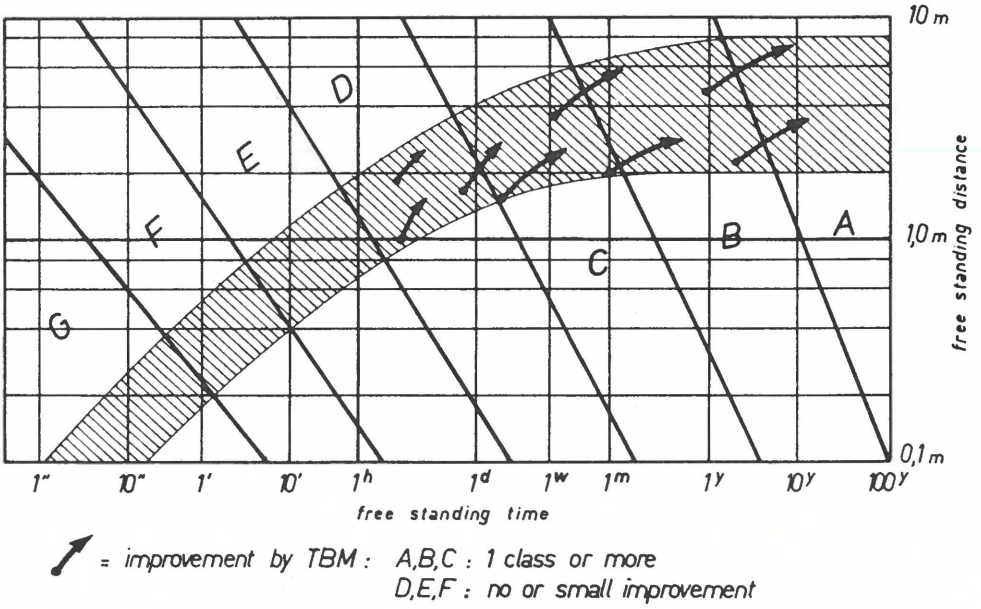
2.3.2. Knusningssoner kan gi alvorlige forsinkelser

Knusningssoner som er godt konsoliderte og som ikke er vannførende behøver ikke å by på store problemer, iallfall ikke i små tverrsnitt. Mindre knusningssoner kan ofte gjennombores uten at det overhodet oppstår problemer.

Det kan imidlertid være meget vanskelig å passere dårlig konsoliderte soner, spesielt de som i tillegg til oppknust og leirholdig materiale også fører vann. Slike soner kan gi store utrasinger foran, over og på sidene av borhodet. Resultatet kan bli langvarige forsinkelser og utrygge arbeidsforhold, enten sonene er forutsett eller ikke.

Under slike forhold kan kostnadene med passering og sikring av sonene bli langt høyere ved fullprofilboring enn ved konvensjonell drift. Har derimot sonene en "stand-up-time" på opp imot et døgn eller mer, vil det som regel være fordelaktig med fullprofilboring, dersom sonene kan sikres raskt nok.

Forskjellen mellom såkalte "hard rock" fjellforhold og "soft rock" ligger ikke så meget i typen av problemer, men mer i omfanget. Dette betyr at de erfaringer man gjør ved passering av svakhetssoner på f.eks. 10 m mektighet i "hard rock"-formasjoner meget vel kan anvendes på samme problemstilling i "soft rock"-formasjoner. På den annen side har improviserte metoder som kan være tilstrekkelige i små og sjeldne knusningssoner, gjerne lite for seg dersom lengre strekninger av tunnelen har like dårlig fjellkvalitet som knusningssonene.



Figur 19. Forbedring av stabilitetsforholdene ved fullprofilboring illustrert i Lauffer's klassifikasjonsdiagram. (Etter Wanner [23], [24]).

WANNER [23] og [24] illustrerer ved hjelp av Lauffer's klassifikasjonsdiagram for "free standing time/distance" hvordan tunnelboring kan forbedre forholdene for fjellklasse D og bedre. Hvis altså fjellet kan stå usikret over minst ca. 1 m i mer enn noen få timer, kan det sikres og tunnelboring vil være effektivt. Han hevder at for dårligere fjellkvalitet er tunnelboring ikke egnet. Se figur 19.

Han påpeker også at det er viktig at det finnes mulighet for å utføre de nødvendige sikringsarbeidene nær nok stuffen. Dette vil de følgende eksempler demonstrere nærmere.

Erfaringer med åpne tunnelbormaskiner

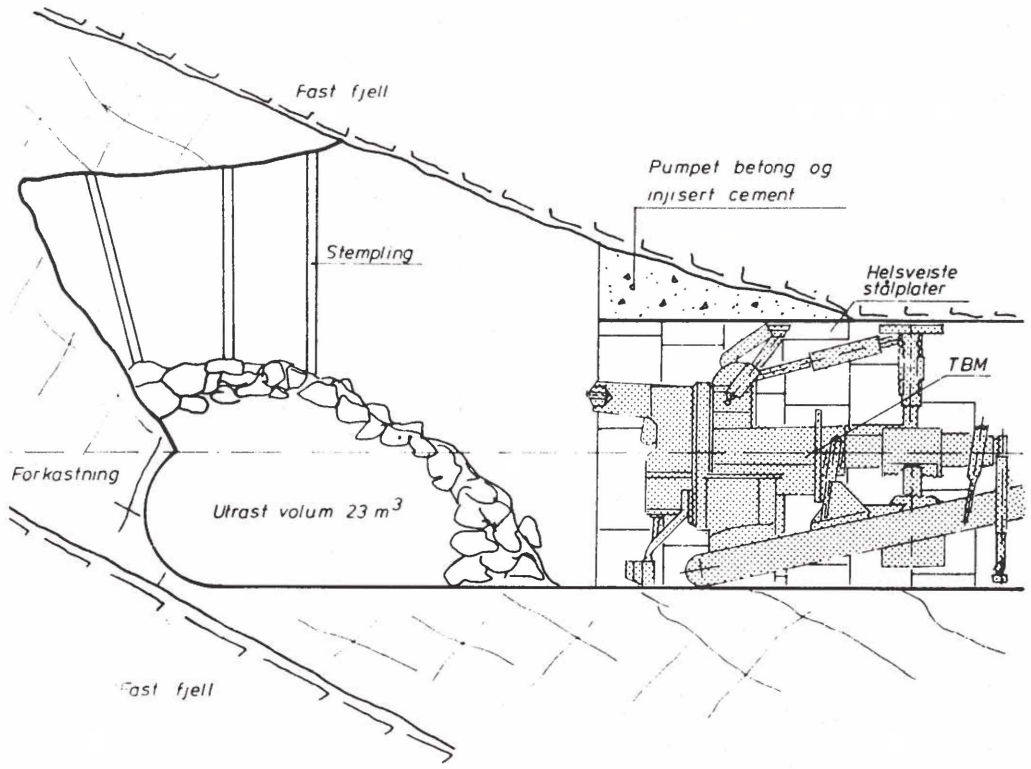
GARSHOL [25] beskriver i detalj hvordan man med en åpen hardfjells tunnelbormaskin med diameter 3,5 m fikk alvorlige problemer og brukte 10 uker på å drive 47 m tunnel gjennom et parti med flere leirslepper og knusningssoner. Bergarten var en finkornet, rød sandstein (mudstone) fra silur. Ved siden av sleppene og knusningssonene opptrådte glatte sprekker og stikk med belegg av leire eller kloritt. Partivis forekom også vann på flatene.

Først fikk man ras på siden av maskinen ved at fastspenningslabbene presset fjellet mot en leirsleppe som sto nær parallelt med tunnelen, se figur 20. Etter utlasting for hånd ble det på en strekning av 20 m sikret systematisk ved montering av heldekkende sikringsplater av stål ("liner plates") og bakstøp med betong samtidig som man boret skrittvis.

Deretter ble en strekning på 23 m boret gjennom meget dårlig fjell, men uten at ras oppsto. Man boret så inn i en dårlig konsolidert knusningssone med sterkt oppknust sidefjell og denne ga ras på borhodet.

Etter utlasting av rasmassene med borhodet, ble det i to omganger pumpet inn betong foran borhodet. Denne betongkaken ble deretter gjennomboret og den dannet da et hvelv. Dette ga god arbeidssikkerhet ved passering av sonen, se figur 21.

det er en fordel med bare ett sett fastspenningslabber, idet et bakre sett må spenne opp mot allerede forstyrret fjell, og for øvrig behovet for gode adkomstforhold for manuell utlasting osv.



Figur 23. Sikring av tunnel gjennom forkastningssone. (Etter Lange Larsen [27]).

Opplysninger samlet inn direkte fra en av entreprenørene ved hovedkloakktunnelprosjektet i Oslo viser tilsvarende resultater, OPPEDAL & SKJEGGEDAL [30]. Her oppsto det ras ved innboring i en svakhetssone med mektighet på mindre enn 10 m. Bergarten var en oppsprukket kalkstein og svakhetssonen fantes i tilknytning til en sverm av sterkt oppknuste diabas- og syenittganger. I løpet av to dager utviklet det seg et ras foran og over borhodet på tunnelbormaskinen.

Raset ble passert ved hjelp av prebolting ("spiling"), sprøytebetong, montering av sikringsplater, støping bak disse, samt innpumping av betong over rasmassene foran og til siden for borhodet. Til tross for at dette arbeidet ble effektivt utført,

rett bak borhodet er utslagsgivende for maskinutnyttelsen og derved fremdriften. Dette gjaldt i nær flattliggende sedimentære bergarter gjennomsatt av en rekke forkastningssoner.

For den ene av de tre tunnelmaskinene som ble brukt på dette prosjektet kunne det sikres 3 m bak borhodet. I den trange tunnelen med 3,5 m diameter, kunne ikke dette utføres uten forsinkelse for boringen, men maskinutnyttelsen og fremdriften var vesentlig høyere for denne maskinen enn for de to andre, der første mulighet for sikring var hele 12 m fra stuffen.

Berry beskriver for øvrig forskjellige metoder som ble brukt til å passere spesielt dårlige forkastningssoner som ga ras. Dels ble det drevet en stoll ved manuell utgraving og sikring med stålbuer over skjoldet på maskinen, dels ble det drevet manuelt foran maskinen med fortløpende utføring og utlasting av massene med maskinen eller ved hjelp av forlenget transportbånd. For driving gjennom en 100 m lang ustabil sone på denne måten tok det 7 måneder. Dette tilsvarer ca. 1,1 m pr. skift ved 3-skifts drift.

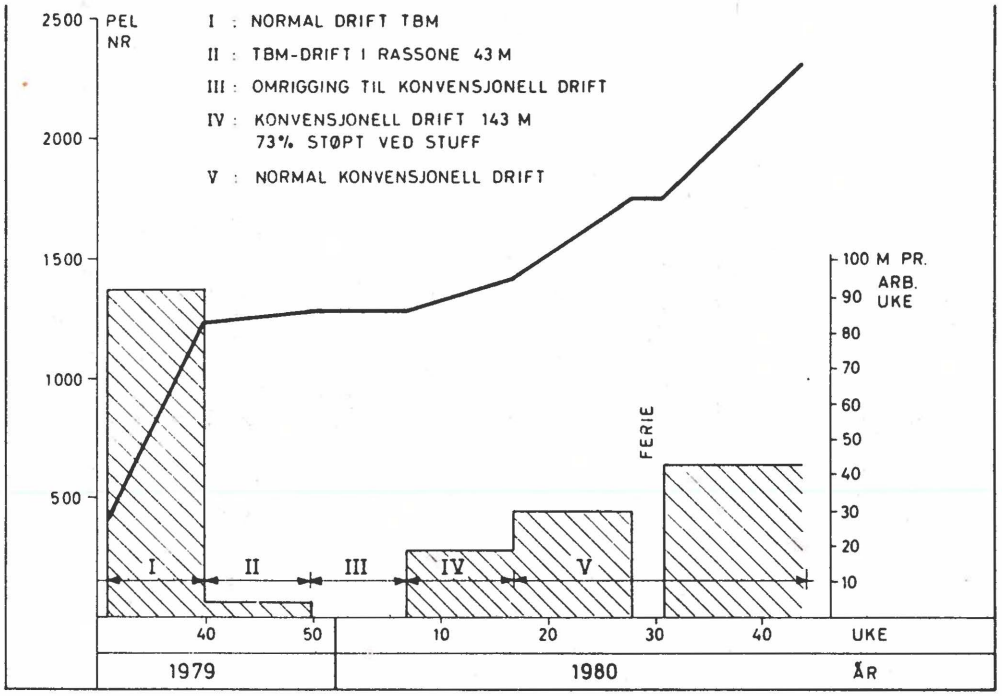
LANGE LARSEN [27] rapporterer passering av en forkastningssone som ga ras, med sikring med heldekkende stålplater, bakstøp og injisering. Etter at teknikken med sikring på denne måten var innarbeidet, produserte man 1 m ferdig støpt tunnel pr. skift. Dette gjelder en maskin med diameter 3,0 m der adkomstforholdene til stuffen er spesielt gode, se figur 23.

HENNEKE & SETZEPFANDI [28] rapporterer om passering av en forkastningssone, som med liten vinkel til tunnelen fulgte denne over 300 m, og forsinket tunnelarbeidene med 9 måneder. Dette tilsvarer en fremdrift på ca. 0,5 - 0,6 m/skift.

McFEAT-SMITH & TARKOY [29] gir en rekke eksempler på alvorlige forsinkelser ved kryssing av knusningssoner og svakhetssoner med åpne sprekker. De viser at tidsforbruket pr. m tunnel kan gå opp i 20 - 30 ganger det motsatte. De understreker nytten av korte takskjold som gir mulighet for å installere midlertidige sikringsmidler rett bak borhodet. De påpeker videre at

Da fjellet fortsatt viste seg å være meget dårlig og den disponible tiden for den videre tunneldriften var meget knapp, gikk man over til konvensjonell drift. På den første strekningen videre, på 143 m, måtte 3/4 støpes på stuff. Figur 22 illustrerer forskjellene i inndrift og kostnad for tunnelboring og konvensjonell drift under disse forhold.

Garshol summerer opp svakhetene ved åpne hardt fjells tunnelbormaskiner under slike forhold. Han konkluderer med at utstyr for prebolting eller "spiling" vil kunne være til stor hjelp i blokkig fjell. Han påpeker videre at maskiner med heldekkende, teleskopbare skjold har vist seg å være effektive under vanskelige forhold, og understreker hvor viktig det er å velge riktig tunnelbormaskin ut fra fjellforholdene.



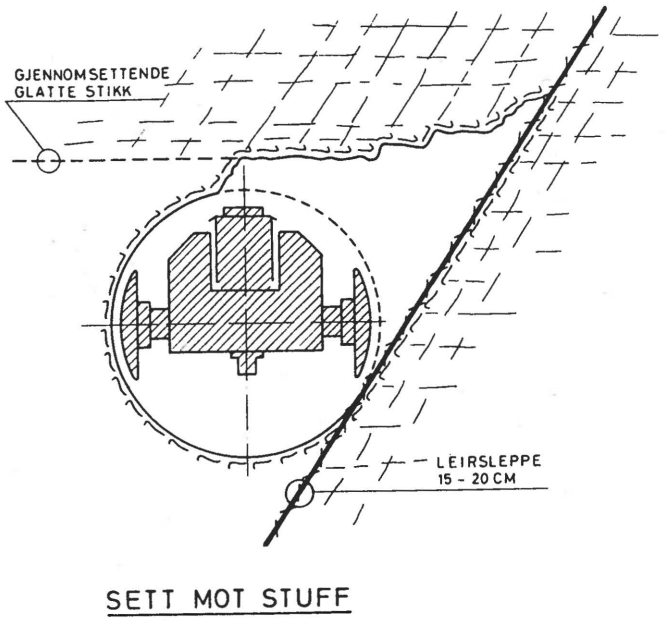
Figur 22. *Inndrifter ved fullprofilboring og konvensjonell drift i rassonen:*

II TBM : 4,5 m/uke, NOK 36.000,-/m

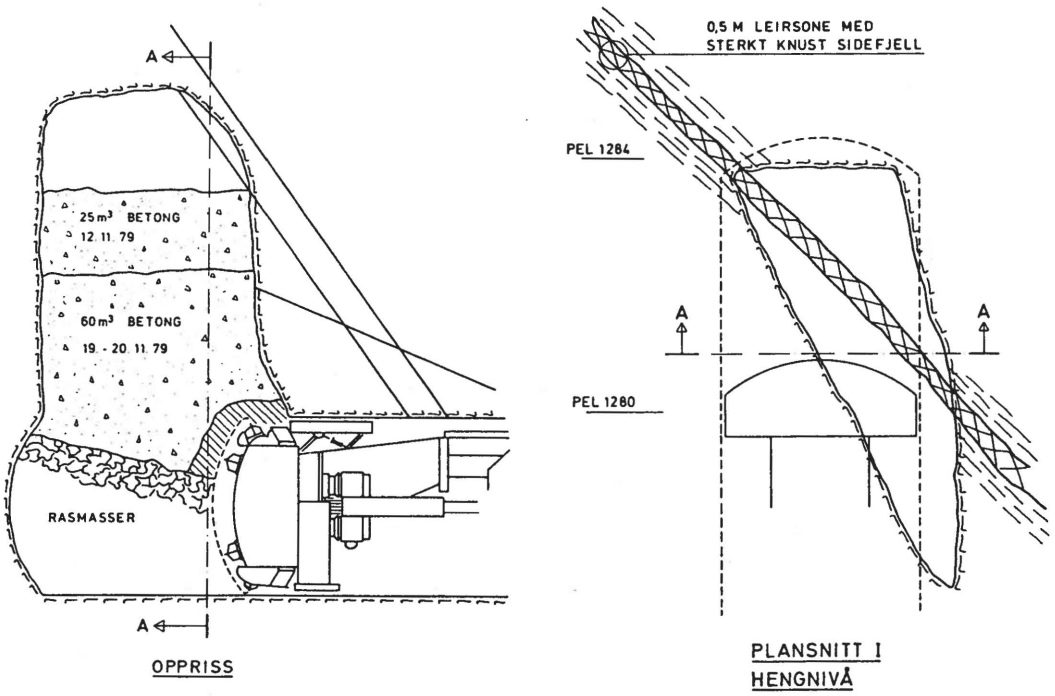
IV Konvensj.: 19 m/uke, NOK 10.000,-/m

(Etter Garshol [25]).

BERRY [26] konkluderer etter grundige studier i Kielder-tunnelen at muligheten for å kunne utføre sikringsarbeider



Figur 20. *Ras langs maskinkroppen utløst av at fastspenningslabbene presset fjellet mot en leirsleppe. (Etter Garshol [25]).*

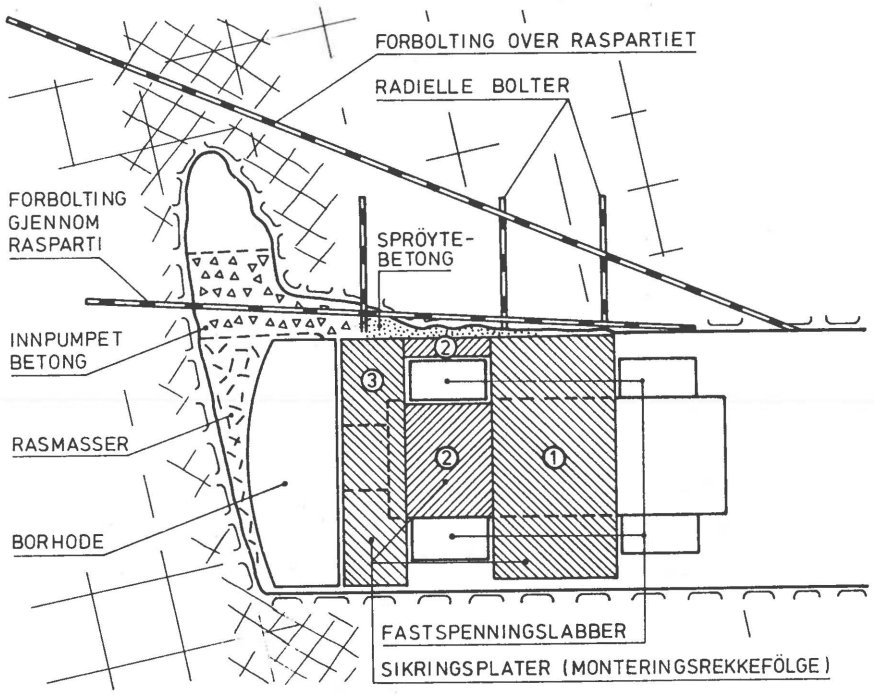


Figur 21. *Rassone med 3" borhull for sondering og innpumping av betong. (Etter Garshol [25]).*

tok det tre uker å drive gjennom sonen. Dette tilsvarer en fremdrift på omtrent 0,3 m/skift. Se figur 24.

Det er etter en detaljert gjennomgåelse av situasjonen og hendelsesforløpet vanskelig å peke på noe som entreprenøren kunne gjort vesentlig bedre. Prebolting ble tatt i bruk raskt før raset fikk anledning til å utvikle seg for meget. Dette var muliggjort ved at maskinen hadde utstyr for og mannskapet var trenet i boring av sonderings- og injiseringshull. Man fikk på denne måten begrenset omfanget av raset og problemet.

På den annen side har maskinen to sett fastspenningslabber, slik at det er meget trang plass for utlasting av rasmasser, isetting av radielle bolter, sprøytebetongsikring, samt montering av sikringsplater langs maskinkroppen. Slike heldekkende sikringsplater i stål ble montert systematisk fra sikkert fjell inn mot rassonen og bakfylt med betong, se figur 24.

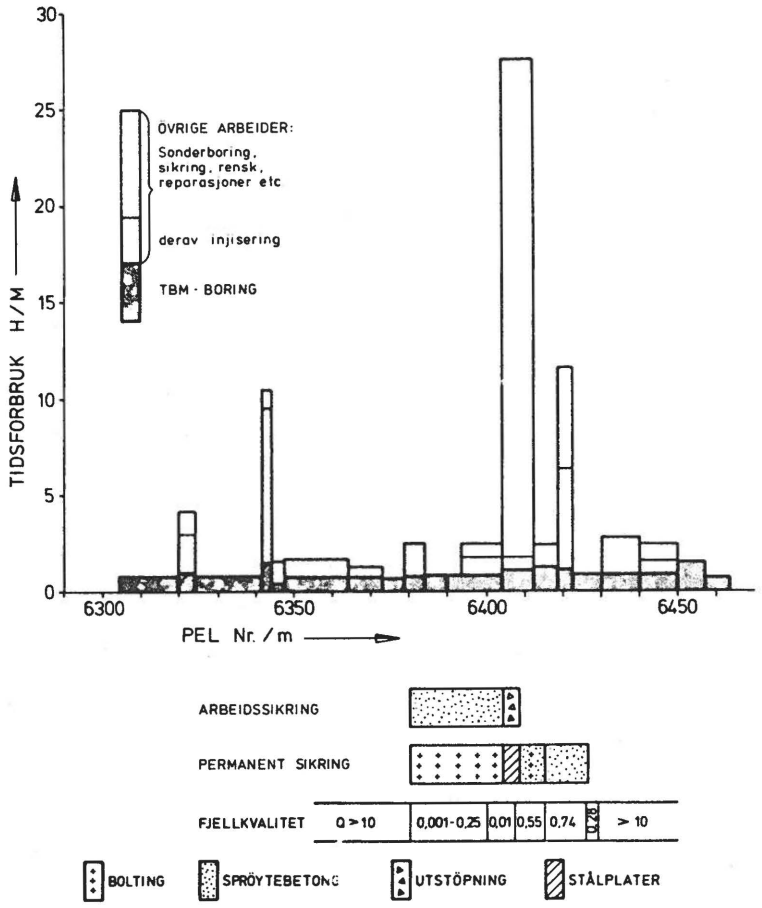


Figur 24. *Sikring av ras ved passering av dårlig konsolidert knusningssone ved hjelp av forbolting, sikringsplater, sprøytebetong og innpumpet betong. (Etter Oppedal & Skjeggedal [30]).*

Skiftrapportene viser at mens tidsforbruket for normal drift eksklusive forinjisering lå på ca. 1 time/m tunnel, økte dette til nesten 30 timer/m ved passering av selve sonen, se figur 25.

Det må til slutt påpekes at sonen var ventet og at sonderboring foran stuffen viste vanskelig fjell. Det var imidlertid ingen indikasjoner, heller ikke fra forundersøkelsene, på at denne sonen skulle bli spesielt problematisk. Ved innboring i sonen ble forholdene inspisert og forbolting satt i gang. Denne begrenset videre rasutvikling, men montering av sikringsplater og innpumping av betong var allikevel nødvendig. Den effektive reaksjonen ville trolig gitt bedre resultater ved en tunnelbormaskin med bedre plassforhold bak borhodet.

Erfaringene fra de foregående eksemplene peker stort sett i samme retning.



Figur 25. *Tidsforbruk ved passering av rassone ved pel 6409 ved Sandvika, Oslo. (Etter Oppedal & Skjeggedal [30]).*

Oppsummering

- Uansett maskintype kan dårlig konsoliderte knusningssoner gi ras foran, over og til siden for tunnelbormaskinen slik at det oppstår alvorlige forsinkelser ved gjennomboringen. Kostnadene ved TBM-drift under slike forhold blir meget høye og arbeidsforholdene meget vanskelige. Kvaliteten til stuffmannskap og ledelse settes på prøve, idet det kan oppstå alvorlige problemer med arbeidssikkerheten.

- Slike ras kan oppstå selv om forholdene er godt kjent fra forundersøkelsene og kontrollert ved sonderboring. En hurtig reaksjon med de riktige sikringsmidler er viktig dersom ikke raset skal få utvikle seg videre. Plassforholdene rett bak borhodet er utslagsgivende for hvordan forholdene kan mestres og for tidsforbruket ved passering.

- En effektiv passering kan oppnås ved en kombinasjon av prebolting ("spiling"), innpumping av betong over rasmassene for å danne et nytt hvelv samt montering av heldekkende stålplater med bakfylling av betong, slik at det sikres mot nedfall og oppspenning av maskinen er mulig. For kortere svakhetssoner betyr dette at forsinkelsene kan reduseres til 2 - 3 uker, mot langt mer dersom man mister kontrollen med stuffen.

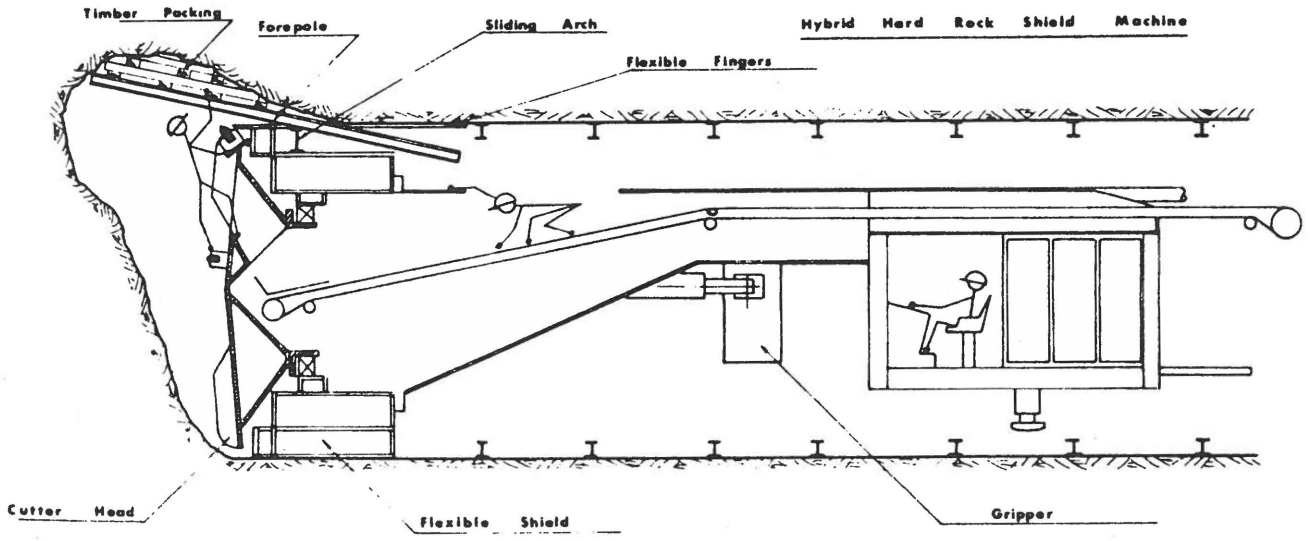
- For lengre soner eller lengre partier med tilsvarende dårlig fjell blir dette ikke effektivt nok, og det må da overveies tatt i bruk andre maskintyper enn vanlige åpne tunnelbormaskiner.

Erfaringer med skjoldmaskiner

Det er tidligere gjort omfattende erfaringer med skjoldmaskiner. Det har vært utviklet og utprøvd forskjellige typer, ofte som et resultat av modifikasjoner gjort på stedet for spesielle forhold. Noen detaljert gjennomgåelse synes å ha liten hensikt, idet en rekke slike tidligere utmerkede resultater med skjoldmaskiner nå blir overgått av vanlige åpne tunnelbormaskiner med et tilpasset sikringsopplegg og velorganisert drift.

Det er allikevel riktig å peke på et par av de viktige gjennombrudd som har vært gjort med skjoldmaskiner for krevende grunnforhold.

En maskintype som ga meget gode resultater i dårlig fjell, som hyppig krevde sikring over og foran borhodet, var den såkalte 'Melbourne-typen'. Den utmerket seg med et kort fleksibelt skjold og en meget åpen konstruksjon av borhodet, som tillot lett adgang til stuffen for sikringsarbeider m.m. Se prinsippskisse etter SUGDEN [31] i figur 26.



Figur 26. *Tunnelbormaskin av "Melbourne-typen" med fleksibelt kort skjold og åpen konstruksjon av borhodet. (Etter Sugden [31])*

GRANDORI [3] modifiserte som nevnt, se figur 3, en maskin med et slikt åpent borhode til en mer lukket utgave med støtteribber som skulle hindre blokkering av borhodet i ukonsoliderte knusningssoner. Dette virket utmerket i knusningssoner som ga innrasing av blokker og flytende leire, samt vannlekkasjer. Disse ble passert med en lav, men jevn hastighet også takket være det dobbelte teleskoperende skjoldet og installering av sikringselementer av betong. Betongelementene ble montert i

bakre ende av skjoldet, ekspandert ut mot fjellet og låst med en egen låseblokk. I dårlig fjell kunne maskinens matekraft rettes mot de allerede monterte betongelementene. I godt fjell kunne maskinen spennes fast mot tunnelveggen slik at sikringen kunne sløyfes.

Denne maskintypen representerte et gjennombrudd for skjold-maskiner og en rekke maskiner er bygd etter lignende prin-sipper. Brukt i kombinasjon med heldekkende sikringselementer av betong har slike maskiner hatt betydelig suksess. I f.eks. Buckskin-tunnelen i Arizona ble det boret med diameter 7,2 m i til dels meget oppknust andesitt-lava. For denne maskinen ble for øvrig skjoldet modifisert i tunnelen fra å være ekspanderende til å bli et stivt skjold. Det ble videre mon-tert en heldekkende ekstra frontplate for å hindre blokkering av borhodet. Dette er omtalt av flere, bl.a. [14].

I situasjoner der problemstillingen er å produsere en tunnel ferdig sikret med betongelementer og der det er omfattende stabilitetsproblemer med dårlig konsoliderte knusningssoner, eller løst oppknust fjell, kan denne maskintypen være velegnet. Dette gjelder spesielt for store tverrsnitt som tillater hurtig og effektiv montering av betongelementene.

Et eksempel på dette er Gubrist-tunnelen i Zürich som bores med diameter 11,45 m i molasse (svak sandstein) og sikres fort-løpende med betongelementer pluss støping av kjørebane med en hastighet av 60 m/uke. Et annet eksempel er Buckskin-tunnelen, som også ble sikret med betongelementer, med typisk inndrift på 100 m/uke.

Metoden vil imidlertid bli mindre konkurransedyktig for små tverrsnitt og der hvor fjellet stort sett ikke trenger full sikring som arbeidssikring. Selv i formasjoner som hører inn under kategorien "soft rock" utgjør ofte de virkelig dårlige partiene kun relativt begrensede strekninger, og maskiner som tillater en mer selektiv sikring vil derfor ofte være å fore-trekke.

Det er imidlertid et av de feltene der det er forskjellige synspunkter om hva som er beste metode for å oppnå det riktige resultat. Dette avhenger bl.a. av kravet til standarden på den permanente sikringen. Innen disse problemstillingene ligger også de viktigste utfordringene til utvikling av fullprofilboring både med hensyn til utstyr og metoder.

2.3.3. Bergtrykksproblemer forsinker, men stopper ikke åpne tunnelbormaskiner

Bergtrykksproblemer omfatter både den avskalling som normalt finner sted langs konsentrerte deler av tunnelperiferien eller eventuelt stuffen og den "squeezing" eller innpresning av fjellmassen som kan finne sted. "Squeezing" kan bestå i at fjellmassen bryter sammen i form av mange småavskallinger eller oppflising eller mer sjeldent en plastisk deformasjon av lite sprø bergarter. Ofte vil denne deformasjonen bare være tilsynelatende plastisk idet rissdannelser skjer i mikroskala.

På grunn av at fjellkonturen ikke blir gjennomsatt av sprengningsriss kan høye spenninger stå nærmere ut mot tunnelveggen. Dette betyr at i massivt fjell kan bergslagsfenomenene bli mer intense, men samtidig mer konsentrerte i en boret tunnel enn i en sprengt.

Som de følgende eksemplene vil belyse kan dette gi alvorlige forsinkelser, spesielt dersom hensiktsmessige tiltak ikke kan utføres på grunn av plassforholdene etc. Er man på den annen side godt forberedt, behøver bergslagsproblemer ikke å få katastrofale følger for fremdriften, selv om forsinkelser nok må ventes uansett.

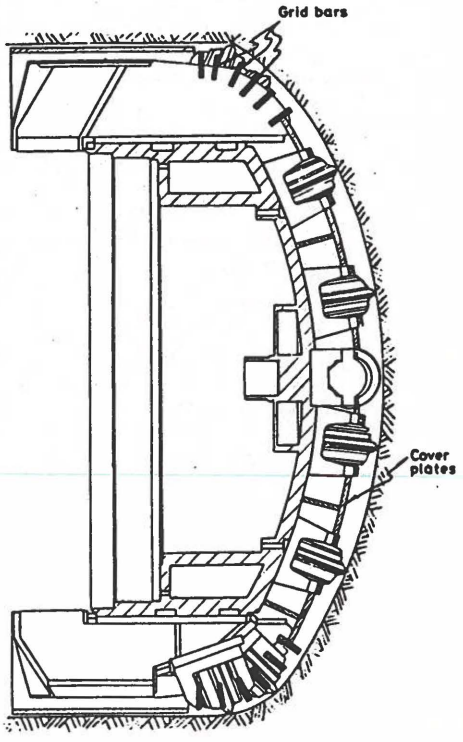
GRAHAM [32] beskriver hvordan fullprofilboring av en tunnel med diameter 3,4 m, som i 1975 ble boret i kvartsitt på 2280 m dyp i Lebanon Gold Mine, ble alvorlig forsinket på grunn av bergtrykksavskallinger. Det fant sted en intens avskalling av tynne flak i veggene og på stuffen på grunn av de høye vertikale spenningene. Avskallingen var særlig intens der det fantes nær flattliggende lagdelingsstikk.

Selv om maskinen hadde et dreibart fastspenningssystem og faktisk kunne spennes fast i heng og såle, istedenfor som normalt i veggene, forårsaket utfallet problemer. Dårlige fastspenningsforhold ga også økte boreverktøykostnader. Bergslagsavskallingen fant sted helt frem til og på stuffen. Dette ga bl.a. problemer med blokkering av borkaksoppsamlerne.

Graham's forslag til modifikasjoner er kort oppsummert:

- montering av en ekstra frontplate på borhodet og støtteribber langs periferien for å hindre slag på kutterne og fastkiling av løse flak, se figur 27.

- montering av et glissent fingerskjold rett bak borhodet for å muliggjøre bolting.



Figur 27. *Forslag til modifikasjoner på borhodet til tunnelbormaskin under bergslagsforhold. (Etter Graham [32]).*

Det er interessant å legge merke til at tilnærmet slik utforming av borhodet i dag kan fås som standardutstyr og at dette også egner seg utmerket i oppsprukket og sleppete fjell.

Senere erfaringer med tunnelbormaskiner under lignende forhold bekrefter hvor viktig det er å sikre gode fastspenningsforhold. Et eksempel på hvordan avskallingene kan være konsentrert i en kjøl langs veggene ved høye vertikale spenninger er vist i figur 28, etter BLINDHEIM [33]. Dette peker på at bergslags-avskallingene kan bli mer intense i en fullprofilboret tunnel, men at utbredelsen i profilet blir mindre enn i en konvensjonelt drevet.



Figur 28. Avskalling langs konsentrert kjøl i veggen på grunn av høye vertikale spenninger, East Driefontein. (Etter Blindheim [33]).

I områder der høye anisotrope spenninger står med en annen orientering vil selvsagt avskallingene komme et annet sted langs konturen, f.eks. langs såle og heng ved høye horisontale spenninger.

Som et eksempel på de forsinkelser som kan oppstå når fjell-massens styrke overskrides av spenningene og "squeezing" oppstår,

omtales nedenfor Tunjita-Valle-tunnelen på Chivor-anlegget i Colombia, BLINDHEIM [33].

På strekninger med moderate bergslagsytringer var bolting og bånd tilstrekkelig sikring. Boltingen, som kunne utføres rett bak borhodet på den åpne tunnelbormaskinen med diameter 4,3 m, hadde bare forårsaket små forsinkelser.

På en strekning av ca. 450 m der overdekningen var ca. 500 m og bergartene kvartsittisk sandstein og leirskifer i vekslende lag, fikk man intense bergtrykksproblemer. Disse forårsaket til dels store utfall i den ene siden av hengen der lagdeling og trolig også største hovedspenning tangerte tunnelprofilet. Sålen bladet seg kraftig opp slik at betongsåleelementene ble forskjøvet, se figur 29.

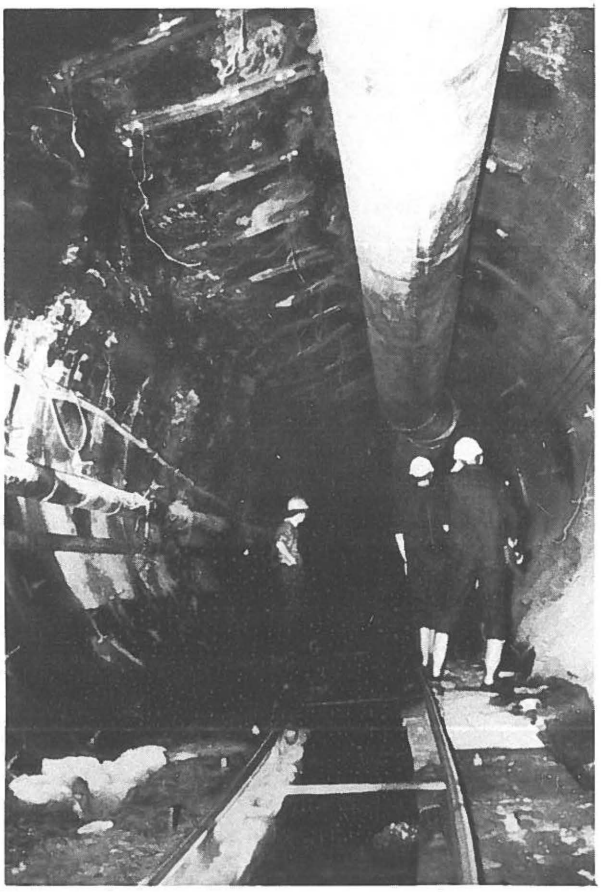
Disse problemene ga betydelige og stadige driftsavbrudd slik at maskinutnyttelsen ble redusert til 25 - 50% av det normale. På det verste måtte bakriggen hektes av slik at såleelementene kunne tas opp og sålen renskes for oppfliset fjell.

Fjellmassen ble altså for svak i forhold til bergtrykket. Dette skyldtes ikke bare bergartsstyrken, men også at fjellmassen inneholdt lagdelingsstikk og for deler av strekningen også glidespeil på grunn av tidligere forskyvninger.

Fordi man her drev med en åpen tunnelbormaskin var det mulig å overvinne problemene og drive videre. Etter forfatterens vurdering kunne problemene blitt ekstreme ved bruk av en skjoldmaskin. Dette belyses av neste eksempel.

Ved Stillwater-anlegget i Utah drev man i 1978-79 med en fjelloverdekning på opp til 600 - 700 m i nær flattliggende sedimentære bergarter som var gjennomskåret av flere forkastningssoner.

Tunnelbormaskinen hadde et heldekkende, teleskopisk og leddet skjold med diameter 2,9 m og lengde 7,3 m. Maskinen hadde to sett fastspenningslabber og et hjelpematesystem som kunne spennes mot de prefabrikkerte sikringselementene av betong som ble montert i den bakre delen av skjoldet.



Figur 29. *Overmasser i venstre side av heng (sikret med bolter og bånd) og såleløfting i høyre side på grunn av høye bergtrykk i skifrig fjell, (bemerk sidehellingen på skinnegangen).*

Hendelsesforløpet er diskutert i detalj av MARUSHACK & TILP [34] og MORTON & PROVOST [35] og er også kort summert opp i [33]. Gjentatte ganger fikk man problemer med fastlåsing av tunnelbormaskinen i en leirskifer, spesielt der svakhetsflater i fjellmassen som glidespeil o.lign. ga for lav styrke i forhold til bergtrykket. Når friksjonskraften på skjoldet ble for stor på grunn av "squeezing" eller blokknedfall, ble det ekstra matekraftsystemet brukt for å overvinne denne. Betongelementene var ikke konstruert for denne høye kraften langs tunnelen slik at de fikk skader som oppsprekning av hjørner, innbyrdes forskyvning etc.

Etter gjentatte fastlåsinger og forbedringer, bl.a. ble borediameteren økt for å gi større klaring, økte inndriftene opp til maksimalt 148 m/uke. I en knusningssone ble imidlertid inndriften redusert til ca. 0,2 m/skift over en 3-måneders periode og til slutt ble boringen avbrutt.

Entreprenøren trekker disse konklusjonene:

- skjoldet var ikke egnet til å sikre fremdriften,
- effektiv sikring av nylig eksponert fjell rett bak borhodet var ikke mulig,
- betongelementenes utforming var ikke egnet,
- hele systemet var for lite fleksibelt.

Den fulle årsakssammenhengen kan selvsagt diskuteres videre. Her skal bare påpekes at skjoldet under de rådende forhold iallfall var for langt idet det særlig ble klemt fast på bakre del.

Oppsummering angående bergtrykksproblemer

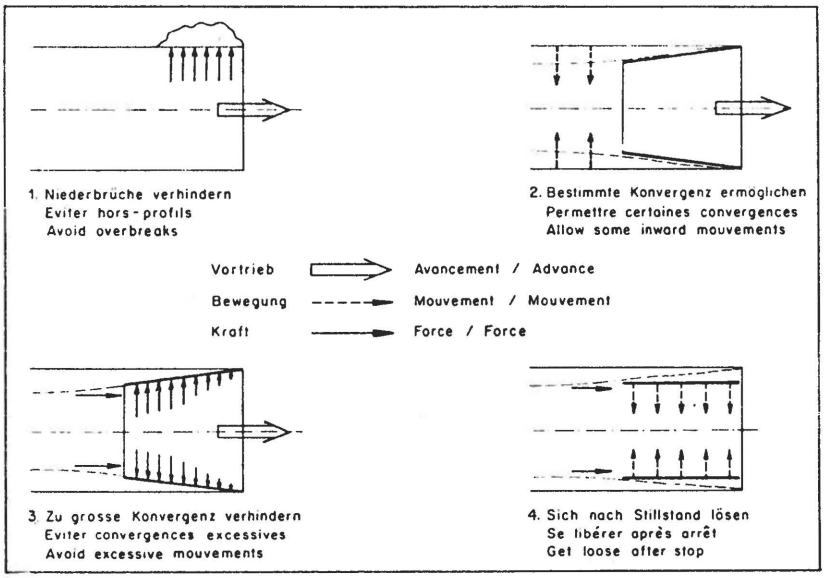
- Bergslagsutviklingen kan ved fullprofilboring, som ved konvensjonell drift, komme meget raskt eller over noe tid. Ved en hurtig utvikling vil det være behov for sikring rett bak borhodet slik at både hengstabiliteten og fastspenningsmulighetene kan beholdes. Slik sikring kan utføres effektivt ved bolting, bånd og eventuelt netting. Korte bolter med en viss deformasjonsevne kan også være nyttige. Forsinkelsene kan bli store dersom denne sikringsmuligheten ikke finnes.

- Avskallingen kan skje både i form av store flak og små fliser. I massivt fjell vil bergslagsytringene bli mer konsentrerte og intense enn i en sprengt tunnel. Sikringsarbeidene vil derfor ofte kunne konsentreres om en noe mindre del av periferien.

- Det står igjen å avklare hvorvidt lengre strekninger av tunnelene vil bli berørt av bergtrykksproblemer ved fullprofilboring enn ved konvensjonell drift. Det samme gjelder om bergslagsytringene vil bruke lengre tid på å utvikle seg eller ikke.

- Skjoldmaskiner synes ikke å representere noen god løsning under bergtrykksproblemer, hverken for avskallinger eller oppflising, eventuelt "squeezing" fjell. Skjoldet løser ikke problemet, men utsetter det bare. I mellomtiden kan problemet forverre seg. Det er viktig at skjoldet ikke er for langt i forhold til tunneldiameteren.

LOMBARDI [36] har illustrert de krav som må stilles til en tunnelbormaskin under forhold med store deformasjoner, se figur 30. Hvorvidt disse lar seg løse for teleskoperende skjold er usikkert. Dersom skjoldene blir for kompliserte vil maskinene kunne bli for langsomme å bruke på de strekningene der skjoldene ikke trenges.



Figur 30. *Betingelser som må oppfylles av en TBM under forhold med store deformasjoner. (Etter Lombardi [36]).*

- Konklusjonen synes i dag å være at selv ved intens oppflising av fjellet vil åpne tunnelbormaskiner være å foretrekke. Dette bekreftes bl.a. av erfaringene fra den nevnte Hades-tunnelen [13], som ble drevet nedstrøms Stillwater-tunnelen i samme geologiske formasjon, med en vanlig åpen tunnelbormaskin. Overdekningsforholdene var gunstigere, men på en strekning av 500 m opptrådte "badly squeezing shale". Det

var nødvendig å sette stålbuer for hver 0,6 m og gjenta sikringsarbeidene tre ganger før deformasjonene var stabilisert. Allikevel ble tunnelen fullført ett år foran tidsskjemaet, mens boringen med skjoldmaskinen i Stillwater måtte avbrytes.

- Bergslag av moderat karakter vil kunne sikres tilfredsstillende med hurtig bruk av bolter, bånd og eventuelt netting rett bak borhodet. Ved langsom utvikling kan sikringsarbeidene utføres lenger bak.

- Dersom ikke bolter, bånd og netting er tilstrekkelig, kan ribber med strekkmetallrister el.lign. være en effektiv og hurtig sikring rett bak borhodet. Disse vil kunne ta ganske store deformasjoner, men samtidig sikre profilet og fremdriften. Alternativt kan det brukes stålbuer, alene eller som forsterkning, og det hele kan sprøytes eller støpes inn etter behov.

2.4. Lekkasjer og temperatur

2.4.1. Store vannlekkasjer kan stoppe driften helt

Store vannlekkasjer er trolig det problem som er vanskeligst å mestre med tilfredsstillende resultat i forbindelse med fullprofilboring. Det finnes flere eksempler på at tunnelboring er blitt avbrutt og maskiner tapt, iallfall midlertidig, i forbindelse med voldsomme vanninnbrudd, som ofte følges av en innvasking av sand, grus og stein.

RICHARDS [37] beskriver vanskelige forhold for tunnelboring med diameter 5,05 og 3,5 m i kalksteiner med karstfenomener. Vannmengder på 700 l/s måtte pumpes ut av tunnelsystemet og innbrudd på 300 l/s var vanlige. De største vanntrykkene opptrådte på de samme stedene som de verste forkastningssonene. En tunnelbormaskin ble begravd i en slik sone og ble først frigjort etter to år.

Dramatiske vanninnbrudd på 340 l/s stoppet en 5,7 m tunnelbormaskin i en karstsone i Guatemala. MORALES [38] rapporterer

at tunnelen ble drevet videre inntil et innbrudd av slam og stein begravde den fullstendig, trolig for godt. De hadde ellers vannproblemer på flere stuffer. Ved en utstøpning av sålen med en åpen kanal, som under skinnegangen kunne føre opptil 240 l/s, oppnådde de en vesentlig forbedring.

I Hades-tunnelen traff man en vannførende sone og fikk vannmengder på mer enn 750 l/s inn i tunnelen som gikk på 0,177% stigning. Istedenfor å starte et tidkrevende injeksjonsprogram installerte man to 100 hk pumper og 4 stk. 12" rørledninger. Etter 16 dager hadde man forholdene under kontroll og kunne gjenoppta boringen, [13].

Mindre katastrofale var forholdene i Buffalo, men her krevde en 90 m sone med vanninnbrudd på opptil 160 l/s én måned til passering med en 4,9 m tunnelbormaskin. Dette tilsvarer en inndrift på ca. 1,5 m/skift. At det kan være temmelig tilfeldig om man treffer på lekkasjer av denne typen bekreftes av det forhold at man i en parallell-tunnel 18 m unna ikke hadde fått vannlekkasjer i dette området, TORPEY [39].

Slike voldsomme vanninnbrudd er altså gjerne knyttet til forkastningssoner eller karstkanaler og da kan vannet stå under høyt trykk avhengig av overdekningsforholdene. I tunneler som går på stup vil alvorlige driftsavbrudd bli resultatet uansett drivemetode.

Store vanninnbrudd er spesielt problematiske dersom løsmateriale vaskes inn. At det kan bli store mengder med løsmasser viser det eksemplet som er beskrevet av MENDAÑA & del RIO [40]. En tunnelbormaskin med 6,0 m diameter ble halvveis begravd i en knusningssone i overgangen mellom devon- og carbon-bergarter, idet 60% av tunneltverrsnittet ble fylt opp i en lengde av 30 - 40 m. Da tar det tid både å fjerne massene samt å få maskinen i driftsklar stand igjen.

Dessuten kan større hulrom i form av karstkanaler gjøre at maskinen mister fastspenningsmulighetene, noe som vanskeliggjør videre fremdrift selv etter at lekkasjene har gitt seg og eventuelle innvaskede masser er fjernet.

Omfattende arbeider i form av injeksjon, innpumping av betong, pumping, driving av hjelpestoller o.lign. kan da bli nødvendige. Slike arbeider vil normalt være vanskelige å improvisere ved fullprofilboring.

2.4.2. Moderate vannlekkasjer kan mestres

Mindre voldsomme vannlekkasjer kan også gi driftsproblemer. Dette gjelder spesielt med transporten av borkakset. Blir det for meget vann på stuffen, virker borkaksoppsamlerne dårlig, finstoffet samler seg langs sålen og nødvendiggjør manuell opprensking. Nedvasking av finstoff fra båndtransportørene og pakking av borkaks i vaggene er også med på å redusere effektiviteten.

Disse problemene er prosaiske nok, men de kan redusere utnyttelsesgraden og derved inndriften vesentlig. Ved et tunnelanlegg der det ble boret i glimmerskifer og glimmergneis, altså bergarter med normalt lave lekkasjer, gikk inndriften ned fra i gjennomsnitt 120 m/uke til 55 m/uke, mens man hadde slike mindre problemer med vannlekkasjer.

Dersom man ikke er forberedt, kan selv små lekkasjer gi lignende problemer, spesielt hvis man driver på stup.

Ved fornuftig utforming og utstyring av fullprofilmaskinene burde problemene kunne mestres på en brukbar måte. Enkle tiltak som tilpasning av borkaksoppsamlerne, montering av skrapere for sålerensk, at transportbåndene ikke har for bratt helningsvinkel, god forsegling av hovedlageret, skjerming o.lign. kan ha god effekt.

Forutsatt at disse tiltakene er gjennomført kan heften ved moderate eller mindre vannlekkasjer bli mindre ved fullprofilboring enn ved konvensjonell drift. Moderne tunnelbormaskiner behøver altså ikke å være så følsomme for mindre lekkasjer, men igjen er beredskapen meget viktig.

2.4.3. Systematisk forinjisering kan tette små lekkasjer

Forinjisering har vært brukt både for konvensjonell drift og fullprofilboring for å redusere alvorlige lekkasjer som har hindret fremdriften. Et annet behov for å forinjisere kan være hensynet til omgivelsene. Lekkasjer inn i tunnelen kan forårsake poretrykkssenkning og setninger i ovenforliggende løsmasser. Under spesielle forhold som f.eks. under avsetninger av marin leire, er det meget viktig at selv små lekkasjer unngås.

Forinjisering er da nødvendig, selv om det ved strenge krav til tettheten ofte også må foretas etterinjisering.

Det er naturlig at spenningsvollen vil komme nærmere tunnelkonturen ved fullprofilboring enn ved konvensjonell drift. Det er imidlertid ikke sannsynlig at denne effekten vil ha nevneverdig innflytelse på lekkasjevolumet. De fleste lekkasjer, små eller store, følger nemlig i hovedsak kanaler langs ellers helt eller delvis igjenfylte sprekker. Den noe større spenningskonsentrasjonen i konturen til en fullprofilboret tunnel vil derfor ikke bety at selve lekkasjeåpningene lukkes noe særlig mer enn ved konvensjonell drift.

En annen effekt er imidlertid at en sprengt tunnel inklusive sonen med sprengningsriss rundt konturen, berører et større volum i fjellmassen enn en fullprofilboret tunnel, spesielt om man sammenligner for vanntransport-tunneler. Dette betyr at sjansene for å støte på en lekkasjekanal er noe mindre ved fullprofilboring.

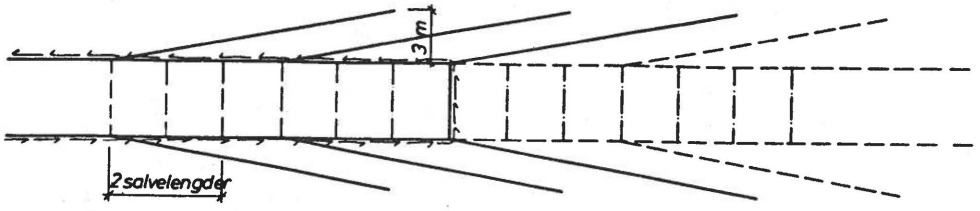
Ved konvensjonell drift er det lett å tilpasse systematisk forinjisering til den sykliske arbeidsrytmen. Selv om fullprofilboring ikke er helkontinuerlig, lar forinjisering seg ikke innpasse uten betydelige avbrudd i fremdriften. På grunn av plassforholdene er det ikke mulig å utføre systematisk forinjisering effektivt ved fullprofilboring uten at dette er forberedt.

Den systematiske forinjiseringen i forbindelse med fullprofil-boringen av hovedkloakktunnel-prosjektet i Oslo representerer et gjennombrudd på dette området og diskuteres derfor nærmere nedenfor.

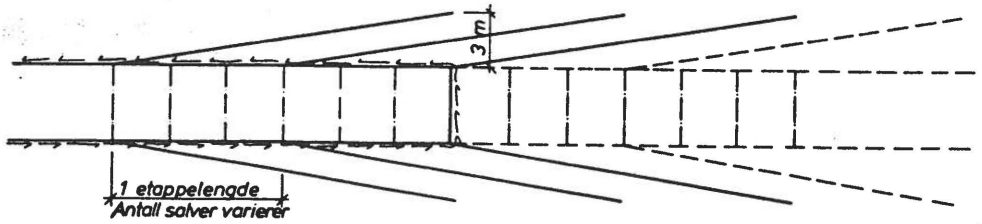
I kambrosiluriske sedimentbergarter, gjennomskåret av stort sett oppsprukne eruptive gangbergarter, hadde man hatt gode erfaringer med systematisk forinjisering ved konvensjonell drift. Erfaringene fra den første fullprofilborede strekningen i hovedkloakktunnelen viste at de dårlige plassforholdene ved en vanlig tunnelbormaskin ikke tillot effektiv forinjisering. Derfor stilte man senere meget strenge krav til at tunnelbor-maskinene skulle tilpasses og utstyres for forinjisering. Dette ble løst på litt forskjellig måte for de forskjellige typene av tunnelbormaskiner som var i bruk ved anlegget (i alt 4). Felles var et gjennomtenkt og klargjort opplegg for feste og manøvrering av matebom for bormaskinene for boring av sonder- og injiseringshull, samt for påskråming av hullene.

For to av maskintypene trekkes tunnelbormaskinen tilbake, og en hydraulisk matebom med bormaskin føres frem og monteres på spesielt tillagede braketter. En tredje maskintype hadde en bormaskin med bom montert på hver side av maskinkroppen som var forlenget spesielt. Ansett av borhull foregikk rett bak bor-hodet, dvs. 3 m fra stuffen. For en fjerde maskintype var bor-maskinene plassert rett bak maskinkroppen med hullansett 6 m bak stuff.

ASTING [41] gir en grundig beskrivelse av erfaringene inklusive den detaljerte prosedyren med boring av sonderhull, vanninn-presningsmålinger, injeksjon og kontrollmålinger. Vanlig etappe-lengde mellom hver forinjeksjonsomgang var 20 m. Normalt ble de fullprofilborede tunnelene drevet med enkel injeksjonsskjerm, med unntak av enkelte spesielt vanskelige strekninger. Kon-vensjonelt drevne tunneler ble normalt drevet med dobbel skjerm, se figur 31.

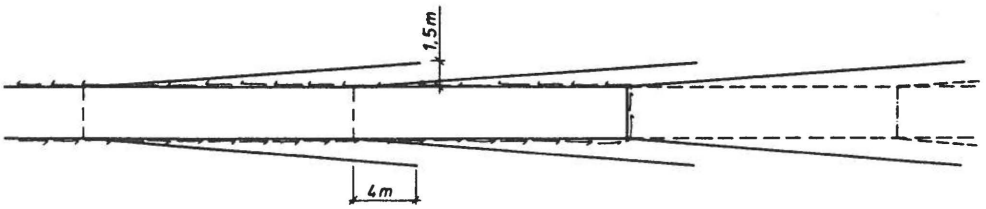


Oslo Sentrum
Sandvika - Lysaker

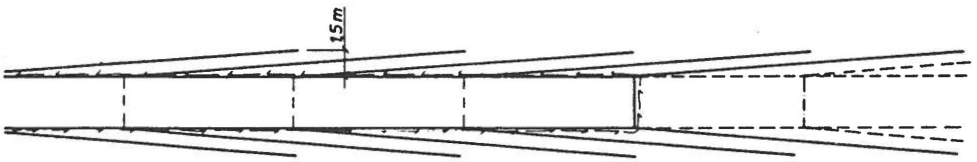


SRV - Sandvika
Festningen - Filipstad

Utsprengte tunneler. Prinsipp for sonder- og forinjeksjonshull.



Ordinært injeksjonsopplegg



Injeksjonsopplegg med „dobbel" skjerm
Entreprise Oslo Sentrum

Fullprofilborede tunneler. Prinsipp for sonder- og forinjeksjonshull.

Figur 31. *Prinsipp for sonder- og forinjeksjonshull. Øverst: konvensjonell drift, nederst: fullprofilboring (enkel skjerm vanligst). (Etter Asting [41]).*

Asting summerer ellers opp erfaringer med forskjellige typer injeksjonsmidler og gir videre detaljerte oversikter over utførte injeksjonsarbeider på de enkelte tunnelstrekningene både for konvensjonell drift og for fullprofilboring. Nå kan enkeltstrekningene ikke sammenlignes direkte, men til sammen viser erfaringene at mengden av borhull, medgått sement og kjemiske injeksjonsmidler i de fullprofilborede tunnel-

strekningene stort sett ligger på omkring 1/3 - 1/2 av mengdene medgått i de sprengte tunnelene, se tabell 1. Tunnelene ble fullprofilboret med diametere fra 3,1 til 3,5 m.

Tunnelstrekning	Utført tunnel-lengde pr. 1.10.80(m)	Forinjeksjon. Gjennomsnittlige mengder pr. meter tunnel		
		Borhull(m)	Sement (kg)	Kjemiske midler(1)
Majorstua - Torshov	2660	29,3	91,1	147,0
Majorstua - Ruseløkkv	1090	24,4	38,3	85,8
Skarpsnotunnelen	545	35,1	155,7	252,7
Sandvika - Lysaker	6167	8,9	139,0	31,2
Stabekktunnelen	455	5,8	51,6	37,7
Holmen - Sandvika	4757	6,7	70,7	5,5
Holmen - SRV	5020	8,0	137,0	10,1

Fullprofilborede tunneler. Gjennomsnittlige mengder pr. m tunnel.

Tunnelstrekning	Utført pr. 1.10.	Forinjeksjon. Gj. sn. mengde pr. m tunnel		
		Borhull(m)	Sement(kg)	Kjemiske midler(1)
Adkomst Middelthunsgt.	260 m	41,2	295	137
Adkomst Filipstad	219 m	80,9	484	244
Ruseløkka-Rådhusplassen	179 m	65,4	775	403
Adkomst Pipervika	116 m	54,7	497	130
Rådhusplassen-Festningen	297 m	55,1	405	283
Adkomst Ola Narr	171 m	44,8	418	197

Utsprengte tunneler, eksempler fra Oslo. Gjennomsnittlige mengder pr. m.

Tabell 1. Resultater fra forinjeksjon i fullprofil-borede og utsprengte tunneler i Oslo. (Etter Asting [41].

For konvensjonell drift under disse forholdene ligger injeksjonskostnadene på 2 - 3 ganger utdrivingskostnaden, mens de for fullprofilboring ligger fra ca. 1/4 til ca. 1,5 ganger utdrivingskostnaden, se tabell 2.

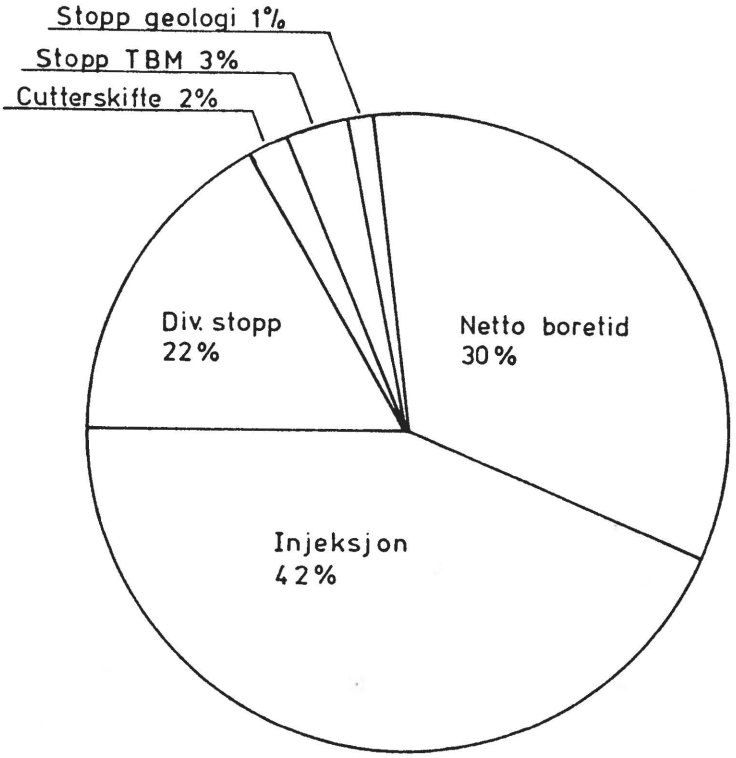
Den rapporterte innlekkasjen etter drivingen er noe høyere for fullprofilborede tunneler, men resultatene er tilfredsstillende for begge drivemetoder.

Tunnelstrekning	Pris-nivå	Drive-metode	Tunnel-lengder pr. 1.10.80	Kostnader kr. pr. m tunnel		
				Tunnel-driving	Sikring på stuff	For-injeksjon
Majorstua - Torshov	Høst 67	TBM	2666	3124	226 (7)	3.955 (127)
Majorstua - Skarpsno	»	TBM	1635	3358	116 (4)	4.007 (119)
Sandvika - Lysaker	»	TBM	6167	3470	84 (2)	1.343 (39)
Stabekktunnelen	»	TBM	455	3445	0 (0)	879 (26)
Holmen - Sandvika	Vår 77	TBM	4757	2426	85 (4)	720 (30)
Holmen - SRV	»	TBM	5020	2421	35 (2)	1.102 (46)
Filipstad - Rådhusplassen	Høst 78	Sprengt	398	3645	3342 (92)	12.199 (335)
Rådhusplassen - Festningen	»	Sprengt	414	4016	1170 (29)	10.410 (259)
Adkomst Ola Narr	Høst 76	Sprengt	171	3312	303 (9)	6.592 (199)

Tallene i parentes angir i prosent kostnader i forhold til selve tunneldrivingen.

Tabell 2. Kostnader for forinjeksjon, driving og sikring på stuff. Kostnder er ikke korrigert for prisstigning. (Etter Asting [41]).

Som eksempel på det omfattende tidsforbruket ved slik omhyggelig utført forinjisering er vist en oversikt etter SKJEGGEDAL [42], basert på 4,3 km tunnel som ble fullprofil-boret med 3,35 m diameter og en gjennomsnittlig fremdrift på 60 m/uke, se figur 32. Skjeggedal regner med at uten injisering ville gjennomsnittlig inndrift vært rundt 105 m/uke.



Figur 32. Eksempel på gjennomsnittlig tidsforbruk ved omfattende systematisk forinjisering. (Etter Skjeggedal [42]).

Oppsummering

Ved omfattende injiseringsarbeider med store krav til tetthet (1 l/s pr km) er det meget viktig at arbeidene utføres med tilpasset utstyr og etter gjennomtenkte rutiner, ellers vil injeksjonen lett kunne ta mer tid enn alle de øvrige operasjonene ved tunneldriften til sammen.

På den annen side viser erfaringene også at det er mulig å fullprofilbore tunneler i kombinasjon med systematisk forinjeksjon til gode ukeinndrifter og at injiseringsmengdene (m.h.p. borhull og forbruk av injiseringsmidler) blir sterkt redusert.

2.4.4. Gasslekkasjer krever god ventilasjon

Det er flere typer gass som man kan støte på ved tunneldrift. Metan er vanligst. Metan er eksplosjonsfarlig i bestemte konsentrasjoner og vil, siden den er lettere enn luft, kunne samle seg under hengen i tunnelen, i lommer under maskindeksler o.lign.

Løsningen på problemene ligger i forberedelser i form av tilstrekkelig ventilasjon, varslingssystemer og tilpassing av maskinen. Det finnes i dag flere typer varslingssystemer for å påvise metan eller andre gasser.

Gasslekkasjer opptrer oftest i bestemte geologiske formasjoner, men kan også forekomme overraskende i lommer eller sprekker i helt andre bergarter enn de opprinnelige kildebergartene. Siden problemene ikke er så utbredt, er det viktig å skaffe seg kjennskap til problemstillingen og gjøre forberedelser.

Tunnelbormaskiner anvendes i utstrakt grad i kullførende formasjoner, f.eks. til driving av transportstoller i kullgruver. Maskinene har en spesiell utførelse som tar hensyn til eksplosjonsfaren og man må si at slike problemer i dag kan mestres rutinemessig ved fullprofilboring så vel som ved konvensjonell drift.

2.4.5. Varme og frost kan gi forsinkelser

På store dyp kan høye fjelltemperaturer gi driftsproblemer fordi kuttere, hydraulikk-pumper o.lign. ikke får tilstrekkelig avkjøling. Fjelltemperaturer omkring 50 - 60°C er ikke uvanlige for 2 km dyp. Dette har forårsaket utstyrsproblemer med varmgang av motorer o.lign., ved siden av at arbeidsforholdene blir dårlige for mannskapene.

Selv ved langt grunnere anlegg kan man få høye temperaturer, f.eks. der hvor det i yngre fjellkjeder opptrer spesielt varme soner eller der hvor vannlekkasjer fra større dyp holder høyere temperatur enn fjellet. Løsningene ligger normalt i god ventilasjon.

Under ekstreme forhold på grunn av innlekkasje av varmt vann med temperaturer over 60°C i Tunjita-Valle-tunnelen i Colombia, ble problemene løst ved at det ble kjørt is inn i tunnelen. Isen ble brukt til å kjøle kjølevannet til en radiatorvifte, som ble montert bak tunnelbormaskinen.

Spesielt lave temperaturer, som i permafrostområder, vil neppe gi nevneverdige driftsproblemer med selve tunnelboringen idet denne jo utvikler atskillig varme. Borkakset tilføres imidlertid en del vann for støvdemping. Dette kan ved senere frysing under transporten gi problemer ved at borkakset fryser fast i vaggene.

3. PERMANENTE SIKRINGSARBEIDER

3.1. Sikringskostnadene kan ofte halveres

Det sirkulære tverrsnittet fremheves ofte som viktig for den gode stabiliteten i fullprofilborede tunneler. I enkelte situasjoner er selvsagt denne tverrsnittsformen spesielt gunstig, men det vesentlige er at det omliggende fjellet ikke er revet opp av sprengningsriss. De permanente sikringsarbeidene kan videre som regel utføres mer rasjonelt, dessuten gjør tverrsnittsformen det i noen tilfeller mulig å redusere dimensjonene.

Det finnes få systematiske undersøkelser som tillater en direkte sammenligning av sikringsomfang og kostnader mellom fullprofilboring og konvensjonell drift. Selv på samme anlegg kan jo de geologiske forholdene variere slik at fullprofilboring eller boring og sprengning blir valgt på strekninger der den enkelte metode egner seg best. Noen retningslinjer basert på erfaringer kan likevel gis.

I vanlig godt tunnelfjell, der det kun opptrer enkelte oppsprukne partier, samt mindre slepper og svakhetssoner som ikke inneholder mektige partier med svelleleire, vil sikringsbehovet reduseres vesentlig. Et rimelig anslag kan være at sikringskostnadene ved fullprofilboring kan ligge i området fra 1/3 til 2/3 av kostnadene ved konvensjonell drift av samme tverrsnitt. For vanntunneler kan reduksjonen bli større fordi de kan bores med redusert tverrsnitt og fordi kravene til detaljsikkerhet ofte er beskjedne.

I kraftverkstunneler i moderat oppsprukket fjell kan ofte fullprofilboring bety at sikring kan sløyfes helt. Dette gjelder imidlertid situasjoner der sikringskostnadene ved konvensjonell drift heller ikke er så høye.

I tett oppsprukket fjell der man ved konvensjonell drift får mye nedfall og overmasser samt behov for systematisk sikring f.eks. i form av bolting og sprøytebetong kan reduksjonen i sikringskostnader ved fullprofilboring bli relativt større.

Under slike forhold er sikringskostnader på 1/4 til 1/5 av sikringskostnadene ved konvensjonell drift ikke uvanlige. Dette gjelder imidlertid under den forutsetning at det er mulig å foreta f.eks. en rasjonell bolting rett bak borhodet på de strekninger der dette er nødvendig, og at denne boltingen kan inngå i den permanente sikringen.

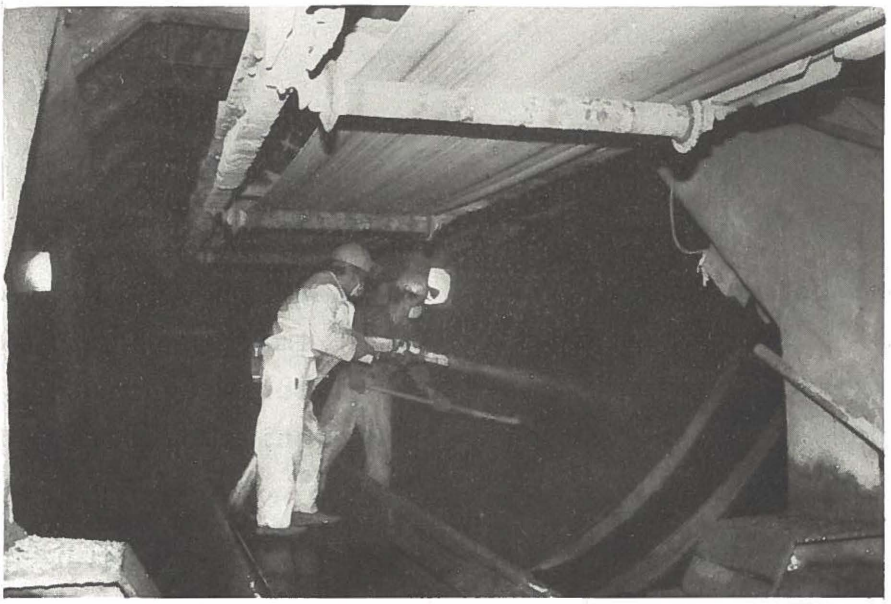
I tillegg til at antall bolter kan reduseres anvendes ofte kortere bolter enn vanlig for de samme spennvidder i sprengte tverrsnitt. Boltelengder på ca. 1/3 av tunneldiameteren anses gjerne for tilstrekkelig. Påskråming, montering av underlagsplater eller bånd går også raskere.

3.2. I dårlig fjell avgjør "stand-up-time" besparelsene

I svakhetssoner er det hurtigheten i passeringen av sonen som blir utslagsgivende for totalkostnadene. Kan sonen passeres uten at den hindrer inndriften, er vesentlige besparelser mulige også under slike forhold. For svelleleireholdige knusningssoner må det imidlertid ved fullprofilboring legges større vekt på å legge inn et avlastende svellevolum i form av steinull, sand el.lign. bak utstøpningen. Dette fordi kontakten til fjellet naturlig nok blir noe bedre enn ved vanlig utførelse av kontaktstøp i sprengte tverrsnitt. Selv om utførelsen derved kan bli mer komplisert, vil dette normalt tjenes inn i form av redusert betongvolum til utstøpningen.

Sprøytebetongsikring brukes ved konvensjonell drift under slike forhold som en effektiv driftssikring som også kan utgjøre eller inngå i den permanente sikringen. For store tverrsnitt er det samme mulig ved fullprofilboring. Skal tilsøling av maskin og utstyr unngås, bør sprøytingen foregå i et eget kammer. For mindre maskindiametere er dette vanskelig å oppnå. Dersom det boltes eller settes stålbuer rett bak borhodet og sprøytebetongen påføres bak fastspenningslabbene, kan en effektiv midlertidig sikring oppnås. Denne kan inngå i den permanente sikringen, se figur 33. Sprøytebetongtykkelsen kan om nødvendig økes ved senere påsprøytinger.

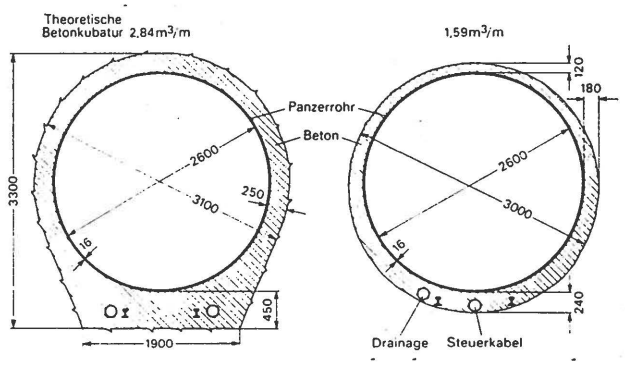
Ved full utstøpning blir størrelsen av besparelsen først og fremst bestemt av om utstøpningen foretas systematisk i hele eller på lengre strekninger av tunnelen, eller om den kun foretas selektivt på enkelte partier. Man slipper å fylle opp overmasse-volum med betong. Dessuten reduseres normalt minstekravet til betongtykkelse på grunn av det jevne og sirkulære profilet. En reduksjon fra 30 til 20 cm minstetykkelse på utstøpning er ikke uvanlig. På lengre strekninger kan dette utgjøre store beløp.



Figur 33. Sprøytebetongsikring i bor-conveyer-området, dvs. mellom TBM og bakrigg.

Som eksempel kan nevnes at ved full utstøpning av Kielder-tunnelen var kostnadene ved utstøpning av sprengt tunnel 40% høyere enn for den fullprofilborede, herav 25% på grunn av økning i materialer, FAWCETT [43]. Minste betongtykkelse var 20 cm i den borede tunnelen med 3,55 m diameter. Tunnelen ble utstøpt systematisk etter at utdrivingen var ferdig. MASTERTON [44] rapporterer at for to sammenlignbare delstrekninger i samme tunnel ble betongvolumet for den plass-støpte sikringen henholdsvis 4,6 og 3,1 m^3/lm for henholdsvis boret og sprengt tunnel, dvs. en reduksjon på ca. 33% ved fullprofilboring.

Gjennomsnittlig utstøpningshastighet var 138 m/uke i den borede tunnelen mot 127 m/uke i den sprengte til tross for lengre transportveg.



Figur 34. Besparelse i betongforbruk ved full utstøpning. (Etter Hambach [45]).

Ved utstøpningen av en trykksjakt i granitt i Gran Emosson med indre diameter 2,6 m sparte man 2,45 m^3/lm på grunn av redusert minimumstykkelse, se figur 34, samt manglende overmasser i den fullprofilborede delen av sjakten. Teoretisk besparelse lå på det halve, HAMBACH [45].

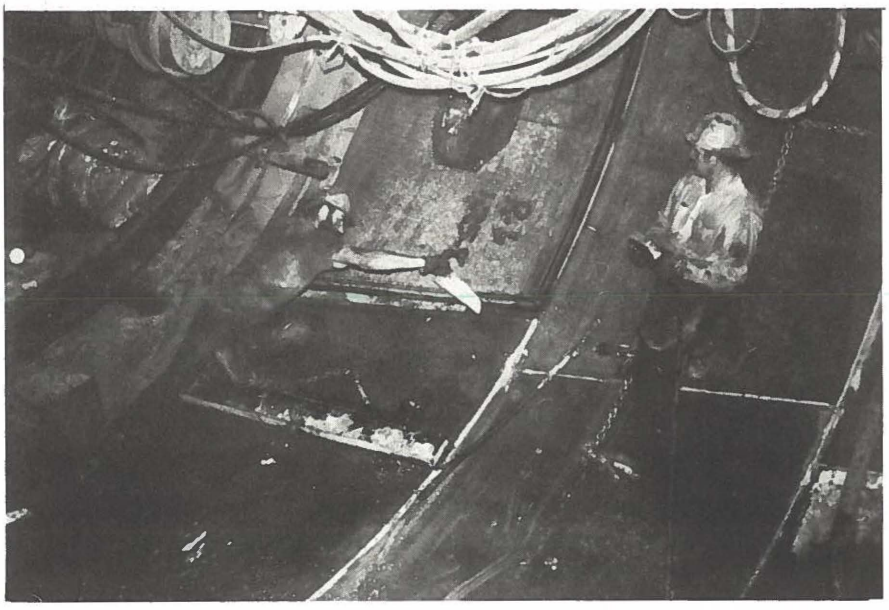
Dersom det kun er en enkelt eller noen få soner som skal støpes ut, kan situasjonen være at man ikke vil snevre inn tverrsnittet. Det kan da bli nødvendig med utstrossing både i sonen og i sidefjellet for å få god dekning. Dette er et kostbart og sikkerhetsmessig tvilsomt arbeid i partier som allerede har dårlig stabilitet.

Dersom en viss tverrsnittsreduksjon tillates, kan sprøytebetongsikring i form av armerte ribber med jevne overganger til siden være gunstig. For svelleleiresoner er det imidlertid uhyre viktig at det oppnås et svellevolum bak betongen, og dette er ikke alltid like lett å få til ved sprøytebetongsikring.

Fullprofilboring og permanent sikring med betongelementer utgjør et effektivt system der fjellforholdene jevnt over er dårlige. Både for små og store tverrsnitt kan dette under spesielt vanskelige forhold gi ferdig sikret tunnel for langt lavere kostnader

enn konvensjonell drift og full utstøpning. Dette gjelder både fordi betongelementene kan monteres rasjonelt under fremdriften og derved fjerne behovet for midlertidig sikring og fordi man ikke trenger bakstøp. Sikringselementer av betong bakfylles ofte med ertesingel som injiseres med sementmørtel. For mindre tverrsnitt spennes hver ring av elementene helt ut mot fjellet og låses med en spesiell låseblokk for deretter å injiseres med sementmørtel. Utførelsen for øvrig avhenger selvsagt av kravet til tetting mot ut- eller innlekkasje, og et godt resultat er meget avhengig av en omhyggelig utførelse. Det blir mange fuger som skal tettes!

Den tidligere nevnte Buckskin-tunnelen er et godt eksempel på at et slikt system kan innpasses med gode fremdrifter. Her ble det for en 7,2 m tunnel som ble sikret systematisk med betongelementer oppnådd inndrifter på helt opp til 41 m/døgn og f.eks. ca. 100 m/uke over en fem-måneders-periode [45], [25], se figur 35.



Figur 35. Montering av betongelementer i Buckskin-tunnelen i bakre del av skjoldet ved hjelp av hydraulisk monteringsarm, [14].

Hvorvidt det er mest lønnsomt med utboring først og deretter full utstøpning til slutt eller fortløpende boring og sikring etter hvert avhenger av situasjonen. Dagens åpne tunnelbormaskiner har så stor kapasitet at det kan være mulig å bore tunnelen først og deretter støpe ut på til sammen kortere tid enn det tar å bore med skjoldmaskin med fortløpende sikring. Har fjellet lav "stand-up-time" slik at det ikke lar seg sikre midlertidig med rimelige sikringsmetoder som bolting el.lign., kan systematisk sikring med betongelementer under fremdriften allikevel være det gunstigste.

Oppsummering

Fullprofilboring muliggjør en reduksjon i de permanente sikringsarbeidene. I oppsprukket og sleppete fjell blir reduksjonen størst relativt sett, men den absolutte forskjellen i sikringskostnad blir normalt større ved mer omfattende sikringsarbeider, som f.eks. på grunn av innspart betongforbruk ved full utstøpning.

Forutsetningen for at det skal kunne oppnås besparelser totalt sett er at den midlertidige stabiliteten kan sikres effektivt, slik at ras o.lign. unngås.

4. INNDRIFTER, KOSTNADER OG ANVENDELSE AV BORKAKSET

4.1. Totalutnyttelsen er normalt lavest i svakt fjell

Netto inndrift defineres som inndriften, f.eks. uttrykt i m/time, i den tiden som borhodet roteres samtidig som det mates mot stuffen.

Brutto inndrift er inndriften over en lengre periode, f.eks. én uke. Denne vil derfor avhenge av antall boretimer i løpet av perioden.

Antall timer det kan bores i løpet av en uke er avhengig av en rekke forhold:

Skiftordningen gir antall og lengde av skift pr. uke. Ved ordinær to-skifts drift kan disponibelt antall timer ligge på ca. 75 timer pr. uke. Ved helkontinuerlig skiftordning, som er mulig i enkelte land, kan disponibelt antall timer nå opp til 7 x 24 timer lik 168 timer. Skiftordninger som gir et disponibelt antall timer på 100 - 120 timer pr. uke er imidlertid det vanligste ved fullprofilboring.

Disponibel maskintid er den tid maskinen er tilgjengelig for boring i løpet av en periode. Denne ligger normalt på 80 - 90% av total disponibel tid. Er den lavere, skyldes det unormalt mye reparasjoner.

Maskinutnyttelsen er netto boretid i prosent av disponibel maskintid. Denne parameteren er mindre interessant enn totalutnyttelsen eller utnyttelsesgraden som er netto boretid uttrykt i prosent av disponibel driftstid. Dette er en meget praktisk parameter idet den i kombinasjon med disponibel tid og netto inndrift gir brutto inndrift, f.eks. i m/uke.

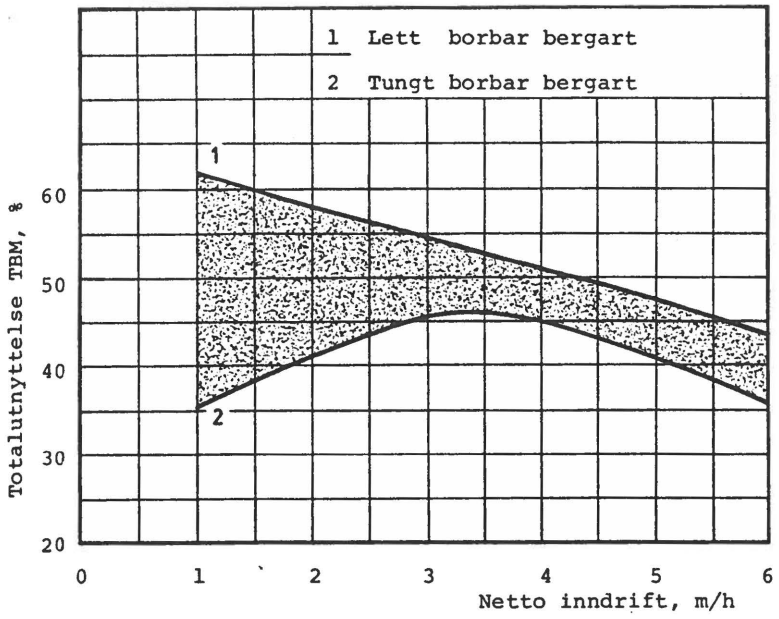
Den disponible tiden går med til:

- netto boretid,
- takskifte med retningskontroll og justering, dette tar typisk 1 - 3 min pr. gang under normale forhold,
- kutterinspeksjon og skifting,

- service og reparasjoner, stopp på grunn av arbeider bak stuff, stikning, venting, tilfeldige tapstider osv.,
- løpende sikringsarbeider av begrenset omfang som må utføres under fremdriften,
- lengre avbrudd på grunn av omfattende sikringsarbeider på partier med spesielt dårlig fjell.

Det er ved overslag naturlig å holde mer omfattende sikringsarbeider på partier med spesielt dårlig fjell utenfor totalutnyttelsen og heller regne tillegg i tidsforbruket for passering av slike partier. Det samme gjelder for permanent sikring og andre arbeider som: rigging av fullprofilmaskinen og andre installasjoner, sprengning av nisjer o.lign.

Figur 36 viser vanlig område for totalutnyttelsen ved velorganisert drift som funksjon av inndrift og borbarhet, etter NTH's erfaringsdata [20].



Figur 36. Vanlig område for totalutnyttelse ved regulær to-skifts drift i snitt over maskinens avskrivningstid. (Etter Prosjektrapport 1-79 [20]).

Det skraverte området må kun anses som rettledende. Et veltrimmet mannskap vil med en innkjørt maskin og utprøvd opplegg kunne oppnå noe bedre utnyttelse, iallfall over kortere perioder.

Spesielt slitende bergarter kan gi lavere totalutnyttelse ved at det blir nødvendig med hyppige kutterskift. All unormal venting, forsinkelser på grunn av overraskende fjellforhold osv. kan lett gi lavere utnyttelser. Alle tilfeldige forsinkelser reduserer utnyttelsen; en god totalutnyttelse kommer ikke tilfeldig!

Det synes å være en utbredt tendens til at entreprenører som har sin erfaring fra sterkt fjell er for optimistiske ved overslag av totalutnyttelsen i svake og lettborede bergarter. Det virker innlysende at jo lettere fjellet er å bore, desto bedre burde utnyttelsen bli. Som den øvre kurven i figur 36 illustrerer stemmer ikke dette. Ved høye nettoinndrifter får bl.a. takskiftet større relativ innflytelse.

Ved bruk av erfaringsdata for totalutnyttelsen bør det også presiseres nøye hva som inkluderes. Det kan være store forskjeller for prosjektets totalutnyttelse og totalutnyttelsen fra uke til uke.

Det må derfor understrekes at man bør være nøktern ved anslag av totalutnyttelsen spesielt i svakt fjell, som kan gi høye nettoinndrifter, men samtidig en del heft på grunn av stabilitetsproblemer, vannlekkasjer o.lign.

For øvrig er det også lett å undervurdere den nødvendige mertid som passering av svakhetssoner krever. FLØNES [46] rapporterer hvordan normale inndrifter på 130 - 150 m/uke ble redusert til ca. 80 m/uke i sleppesoner med 10 - 15 m utstrekning. Til tross for at disse sonene ble sikret meget effektivt med lette sikringselementer av kanaljern og strekkmetall-rister, representerer altså hver av sonene en forsinkelse på nærmere 1/2 uke.

Dersom det f.eks. opptrer 10 slike soner langs en tunnelstrekning, vil selv en slik beskjeden forsinkelse medføre et økt tidsforbruk på til sammen 5 - 6 uker. Dersom svakhetssoner går til ras, kan forsinkelsen bli like mye eller mer for hver enkelt sone.

I tillegg til at det bør regnes særskilt tidsforbruk for sikring av spesielle partier med dårlig fjell som er påvist i forundersøkelsene, bør det regnes reservetid for uventede fjellforhold. Dette må vurderes mot typen av geologisk formasjon man arbeider i, samt kvaliteten og omfanget av forundersøkelsene.

For øvrig er det illustrerende at gjennomsnittlige ukeinndrifter svært ofte bare ligger på det halve av de maksimale ukeinndriftene som oppnås, [1].

4.2. I svakt fjell gir fullprofilboring lave utdrivingskostnader

Selv om det ikke er mulig å gi noen fullstendig kostnadssammenligning, vil noen eksempler belyse forholdene.

Figur 37 viser en sammenligning av ukeinndrifter og utdrivingskostnader basert på en systematisk gjennomregning av erfaringsdata. Diagrammene gjelder for driving av vanntunneler idet tverrsnittet ved fullprofilboring er regnet om til ekvivalent tverrsnitt med hensyn til vanntransportevne, se avsnitt 5.1. Forutsetninger for øvrig er bruksavhengig avskrivning for hovedutstyret for tunnelen, for TBM og bakrigg er det regnet med økonomisk levetid på 20.000 timer, og større overhaling eller salg av maskinen ved 10.000 timer, som da er nedskrevet til 12,5%. For øvrig vises til [20].

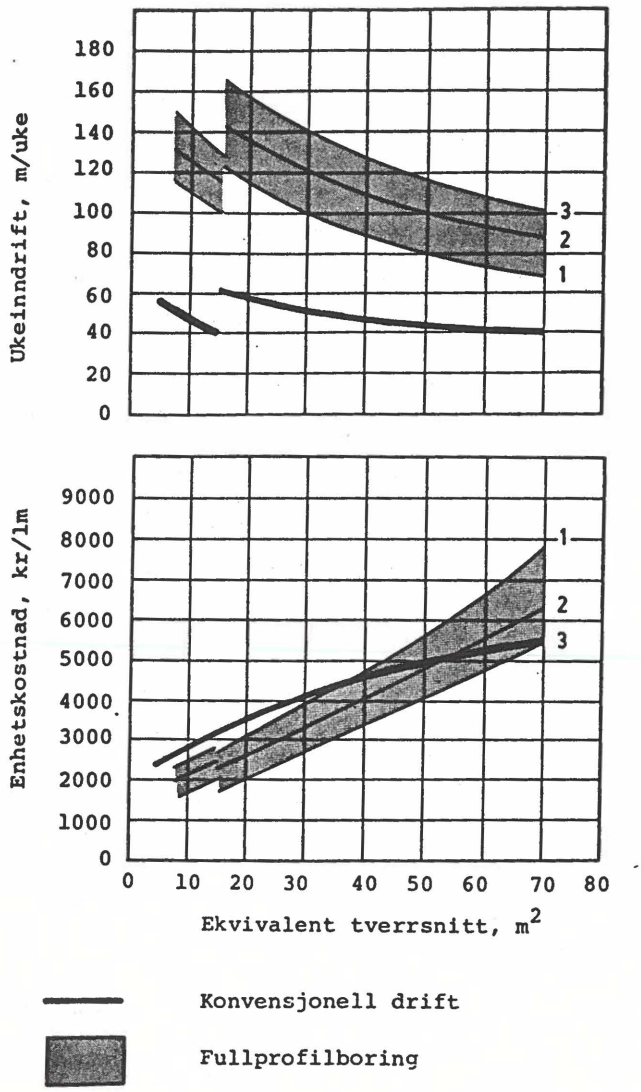
Her skal bare påpekes at fullprofilboring gir klart lavere utdrivingskostnader i lettboret fjell for små tverrsnitt, men at kostnadene øker raskere med tverrsnittet enn for konvensjonell drift. Ukeinndriftene for fullprofilboring ligger i størrelsesorden på det dobbelte av inndriftene ved boring og sprengning. Dette betyr at fullprofilboring totalt sett kan bli rimeligere også for større tverrsnitt på grunn av mulighetene for redusert byggetid.

Betydelige avvik kan forekomme fra slike kurver. FUHRE [47] gir et ferskt eksempel på at konvensjonell drift kan gå langt raskere. Etter driving av 1,2 km av en 9 m^2 tunnel i fjell

av varierende kvalitet hadde man et gjennomsnitt på 78 m/uke, og enkeltresultater på over 100 m/uke.

Ellers slår skiftordningen sterkt ut. Variasjonsområdet for fullprofilboring kan under slike forhold ligge på fra 1 til 3 x ukeinndriftene for konvensjonell drift under forutsetning av at man ikke har problemer med stabiliteten.

For sterkere fjell øker kostnadene ved fullprofilboring slik at metoden vanskelig kan konkurrere på utdrivingskostnader alene.



Figur 37. *Ukeinndrifter og utdrivingskostnader, prisnivå i NOK våren 1979. Kurve 1: god borbarhet, kurve 3: meget god borbarhet. (Etter Prosjektrapport 1-79 [20]).*

Skal tverrsnittene sammenlignes direkte, blir fordelene ved fullprofilboring redusert. FLIEGNER [48] har foretatt en kostnadssammenligning for utdriving av undergrunnsbane-tunneler med 6,7 m diameter. For å kunne konkurrere med en utdrivingskostnad på 3.500 DM/lm ved konvensjonell drift med fremdrift på 5 m/døgn, må fullprofilboringen kunne oppnå en fremdrift på ca. 14 m/døgn (ved 3 km tunnellengde). Man må altså opp i en 3 ganger så høy fremdrift dersom fullprofil-boring skal kunne konkurrere pr. lm tunnel. Forutsetningene for beregningene er noe annerledes enn for de som ligger bak diagrammene i figur 37, slik at noen direkte sammenligning ikke er mulig. Konklusjonen blir imidlertid at høye inndrifter er nødvendig dersom fullprofilboring skal kunne konkurrere direkte. Dette er vanskelig å oppnå for større tunneltverr-snitt.

Kostnadsoverslag foretatt av INGULSTAD [49] for ett-spors jernbanetunneler med diameter 6,9 m viser at i en leirskifer med meget god borbarhet er både utdrivings- og sikrings-kostnadene lavere for fullprofilboring enn for boring og sprengning, mens i en kalkstein med god borbarhet balanserer utdrivingskostnadene. Sikringskostnadene i boret tunnel vil være noe under det halve av kostnadene i sprengt tunnel. Overslagene er basert på erfaringsgrunnlaget i Prosjektrapport 1-79 [20], men er gjort for konkrete prosjekt.

I fjell med god borbarhet, og som samtidig har såpass god stabilitet at det ikke er nødvendig med mer enn begrensede midlertidige sikringsarbeider vil kostnadene ved fullprofil-boring kunne bli spesielt lave. Under slike forhold vil full-profilboring kunne konkurrere m for m med konvensjonell drift selv for ganske store tverrsnitt.

Siden kostnadene ved fullprofilboring er sterkt influert av de høye investeringene, er kostnadssammenligningen med kon-vensjonell drift i stor grad avhengig av hvilken avskrivnings-takt som velges for utstyret. Dersom en fullprofilmaskin f.eks. må avskrives helt på det første prosjektet den anvendes, kan dette alene gjøre metoden kostbarere enn konvensjonell drift,

uansett hvor gunstige fjellforholdene måtte være for full-profilboring.

Bemanningen blir normalt noe redusert ved fullprofilboring i forhold til konvensjonell drift. Hvor stor reduksjonen blir avhenger av tradisjonell bemanning ved boring og sprengning i vedkommende land. Dette er igjen avhengig av arbeidskraftsituasjonen, lønnsforhold, fagforeningsbestemmelser o.lign. Sammenlignet med skandinaviske drivemetoder, med den lave stuffbemanningen som er vanlig her, vil besparelsen normalt være liten, spesielt dersom man må bruke eget mannskap for å utføre sikring under fremdriften for ikke å sinke denne.

En reduksjon av bemanningen til ned mot det halve kan være mulig i land med tradisjonelt stor bemanning og der fjellforholdene krever omfattende fremdriftssikring ved konvensjonell drift. Dette, sammen med en mulig høyere drivehastighet, kan gi et vesentlig bidrag til reduksjon av kostnadene.

Fullprofilboring setter ellers større krav til tilrigginger, bemanning, drift av verksteder osv.

Det må antas at utviklingen fortsatt vil gå til favør av full-profilboring, både på grunn av den tekniske utvikling av maskinene og hvis økningen av lønnskostnadene fortsetter.

Hvilke tunnellengder som det er lønnsomt å fullprofilbore, avgjøres helt av forutsetningene på det enkelte prosjekt. I New York ble det f.eks. boret 4 parallelle tunneler med diametere på 6,2 og 6,7 m og lengder på bare 400 - 450 m. Her dekket store besparelser i betongutstøpning den høye riggkostnaden, se figur 39, avsnitt 5.2.

Små maskiner er rimeligere å rigge enn store og kan derfor oftere være aktuelt for korte tunnelstrekninger.

Vanligvis må det bores ca. 150 - 200 m før hele bakriggen er kommet inn i tunnelen. Det er ikke uvanlig at den første km som bores går med til justeringer og innkjørings-problemer selv for nye eller nyoverhalte maskiner.

Dette, sammen med at høyere kostnader til tilrigging etc. skal fordeles, gjør at fullprofilboring sjelden er direkte konkurransedyktig med boring og sprengning for kortere tunneler enn ca. 3 km.

FLEIGNER's [47] kostnadssammenligning, som ble omtalt ovenfor viser f.eks. at for det nevnte eksempel må drivehastigheten økes til nesten 4 ganger hastigheten ved konvensjonell drift, dersom fullprofilboring (med diameter 6,7 m) skal konkurrere for 1 km tunnellengde.

For små tverrsnitt vil derimot stufflengder på mer enn ca. 3 - 4 km medføre en vesentlig økning i utdrivingskostnaden på grunn av venting på transport. Dette gjør at en diameter på ca. 3,5 m ofte vil gi et praktisk "minimumstverrsnitt" for lengre tunneler, idet denne diameteren tillater bruk av California-pens.

For meget små tverrsnitt kan sikringsarbeider også bli så tungvinte å utføre at dette ikke oppveies av den bedre stabiliteten en reduksjon i tverrsnittet normalt gir.

4.3. Fullprofilboring muliggjør prosjektendring og redusert byggetid

Høye inndrifter og mindre ventilasjonsbehov ved fullprofilboring kan gjøre det mulig å utforme f.eks. kraftanlegg på en helt annen måte. Sløyfing av tverrslag, med redusert vegbygging og naturinngrep ellers, kan bety meget store kostnadsbesparelser. Eksempel på dette for et større kraftverksprosjekt er vist og diskutert av BLINDHEIM et al. [50].

Besparelsene på grunn av redusert byggetid kan også bli store, og for kraftverksprosjekt med lange tunneler kan dette bety mye, spesielt når tunneldrivingen er bestemmende for total byggetid.

Selv om prosjektets utforming med hensyn til antall tverrslag osv. ikke kan endres, vil en reduksjon i byggetid allikevel muliggjøre store besparelser.

Disse forholdene er meget prosjektavhengige og må beregnes spesielt for hvert enkelt tilfelle. Følgende forhold er imidlertid karakteristiske for situasjoner der store kostnadsbesparelser er mulige ved fullprofilboring:

- gunstige fjellforhold, dvs. god borbarhet og relativt brukbar stabilitet, som tidligere diskutert,
- lange tunnelstrekninger med små muligheter for tverrslag,
- vanskelige forhold for adkomst og drift av tverrslag,
- tverrsnittsmessige fordeler, f.eks. som for vanntunneler,
- spart rystelseskontroll og eventuelle erstatninger for sprengningsskader i tettbygde strøk.

4.4. Borkakset trenger normalt bearbeiding før anvendelse

Ved fullprofilboring blir steinmassene langt mer nedknust enn ved utsprengning. Kornform og kornfordeling på borkakset varierer mye med meiselsporavstand og matekraftnivå, bergartstype og borretning i forhold til eventuell skifrighet.

Bredden til de groveste fragmentene vil sjelden overstige 10 cm, som er største anvendte meiselsporavstand i dag. Tykkelsen av de groveste fragmentene er typisk omkring 1/4 - 1/3 av bredden. Dette henger sammen med at de ikke skaller av for hver omdreining av borhodet, men først etter flere passeringer. En del av de største flakene kan være langstrakte som flatklemte bananer, med en lengde på flere ganger bredden.

Innholdet av slike lange flak blir spesielt store dersom meiselsporavstanden er for stor i forhold til anvendt matekraft og bergartsstyrke. Et stort innhold av slike korn er altså ikke et tegn på effektiv boring.

Ved effektiv boring blir stuffen ganske flat, og tykkelsen av kornene kommer mer ned mot inntrengningen pr. omdreining.

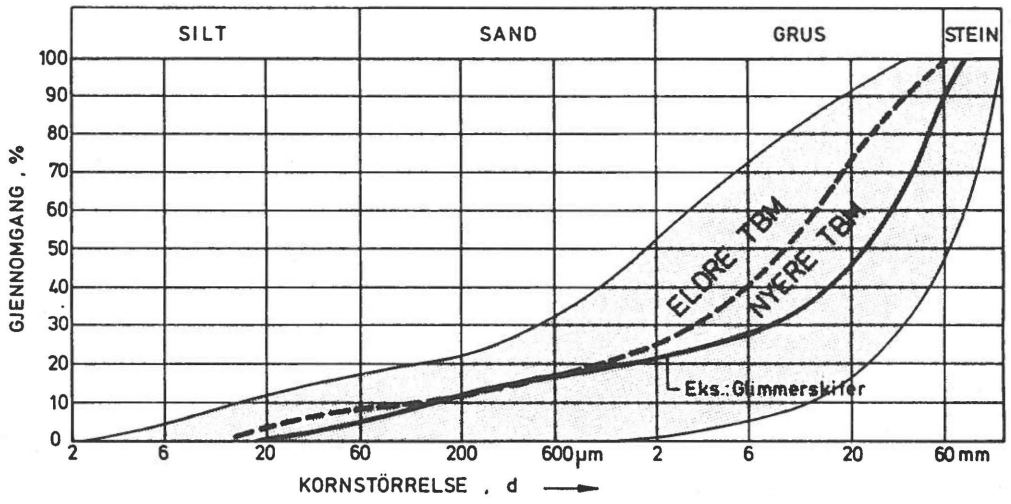
Under selve kuttereggen knuses bergarten ned til et finkornig pulver. Er boringen effektiv, med skarpe kuttere, blir den relative andelen av slikt pulver mindre.

Dersom fjellmassen inneholder sprekker, skifrighetsstikk o.lign., kan utbrytingen skje delvis langs disse svakhetsflatene. Dette vil påvirke kornformen og kornstørrelsen. I blokkig fjell kan f.eks. utriving av småblokker øke maksimal kornstørrelse utover meiselsporavstanden, se figur 15, side 38.

Kornfordelingen påvirkes altså av bergartens og fjellmassens egenskaper, samt av hvordan maskinen borer.

I figur 38 er det normale variasjonsområdet for kornfordelingskurver for borkaks angitt. Det fremgår at eldre tunnelbormaskiner, som hadde liten meiselsporavstand og matekraft, ga et mer finkornig borkaks enn nyere maskiner med stor sporavstand og matekraft.

En stor del av materialet kommer i grusfraksjonen. Spesielt de groveste fraksjonene har en svært bladig kornform. Finstoffinnholdet (materiale mindre enn 20 μm) kan ofte være på flere vektprosent. Dette betyr at borkakset kan være telefarlig.



Figur 38. Variasjonsområder for kornfordelingskurver for borkaks. (Etter Blindheim & Aagaard [51]).

Spesielt hvis borkakset kommer fra glimmerrike bergarter, slik at den kapillære stigehøyden for finstoffet blir høy i forhold til finstoffinnholdet, kan borkakset være telefarlig selv om

det har et stort innhold av grove fragmenter. Slike materialer vil i tillegg lettere knuses ned under belastning.

For anvendelse til vegformål vil borkakset derfor trenge videre bearbeiding i form av kubisering av de grovere fraksjonene og frasikting av finstoff. Til sekundærveger, under fortau o.lign., der kravene på grunn av liten trafikkpåkjenning er små, kan borkakset ofte finne direkte anvendelse. Til andre formål som betongtilslag, tetningskjerner i fyllingsdammer osv., må behandling i knuse- og sorteringsverk påregnes. Borkakset har brukbare pakningsegenskaper. De mest utpreget bladige kornene brekker gjerne opp ved pakning. Materialet kan anvendes til grøfteavrettingsmateriale, grøftefyll o.lign. dersom det tilfredsstiller kravene til telefarlighet.

Generelt må borkakset tilfredsstille øvrige krav til styrke, slitestyrke, mineralogi etc. ved anvendelse til f.eks. vegformål. Man må være oppmerksom på at fragmentene ofte inneholder en del riss fra boreprosessen slik at de også av denne grunn kan være svakere enn tilsvarende fraksjoner av sprengt og knust stein.

For svake bergarter er anvendelsesmulighetene begrenset. For noe bedre bergartskvaliteter kan anvendelse av borkakset, eventuelt i bearbeidet tilstand, bety et interessant tilskudd til driften, særlig i tettbygde strøk.

Ved utfylling i vann vil massene være utsatt for erosjon og bør beskyttes bak plastringshud av sprengstein.

5. VALG AV DRIVEMETODE

5.1. Anleggets geometriske utforming

Utformingen av et prosjekt med hensyn til antall angrepspunkter, høyde-trasé, kurveradier o.lign. vil ha innflytelse på valg av drivemetode og i enkelte tilfelle kan spesielle krav være utslagsgivende ved siden av de rent kostnadsmessige vurderingene.

Det aktuelle tverrsnittsområdet er fra 2,5 til over 100 m^2 (diameter 1,8 - 11,5 m). Tverrsnittet er sirkulært; maskiner som kan bore andre tverrsnitt med samme type kuttere har vært bygd, men har ikke slått igjennom.

For de fleste maskintyper kan diameteren endres noe ved ombygging. Den mulige endringen ligger på opptil ± 10% noe avhengig av diameter og fabrikat.

Fullprofilmaskiner kan bygges for alle stigningsforhold. Maskiner som kan bore vertikale sjakter nedover eller oppover får en spesiell utforming på grunn av de forskjellige behovene for borkakstransport samt fastspenning og mating.

Tunnelbormaskiner modifisert for skråsjaktboring er vanlige i bruk. Ved boring av sjakter med inntil 45^{o} stigning kan vanlige tunnelbormaskiner med ekstra utstyr for fastspennings-sikring anvendes. Båndtransportøren tas av og borkakset spyles ned langs sålen. Slakere fall enn 25 - 30^{o} krever spesielle tiltak utover spyling for uttransport av massene. Brattere fall enn ca. 40^{o} krever tillaging av nedspylingskanaler, dersom ikke borkakset kan tillates å drysse fritt.

For mindre diametere enn ca. 6 m må transporten foregå med skinnedrift. Maksimal stigning er da begrenset til ca. 18 - $20^{o}/oo$. Ved diametere over 6 m er det mulig å drive med sporfri transport selv om dette ikke er vanlig. Under forutsetning av at det støpes kjørebane kan det da være mulig å drive med helning inntil ± 1:6. Vanlig utførelse er imidlertid skinnedrift i nær flattliggende tunneler i kombinasjon med sjakter.

Ved brattere drift på stup enn det er mulig med skinnedrift, anvendes ofte transportbånd.

Utvikling av spesialutstyr for sporfri drift i små tverrsnitt, pumping av borkaks (eventuelt i nedknust tilstand) eller spesiell båndtransport er under utvikling og utprøving.

Tunnelbormaskinene alene har en minste kurveradius i størrelsesorden på 15 ganger maskindiameteren. For enkelte maskintyper kan den være større. Imidlertid er det normalt bakriggen som er dimensjonerende for minste kurveradius. I praksis vil derfor ofte kurveradier under 150 - 200 m kunne by på praktiske problemer. Ved spesielt lange og stive bakrigger (der transportbåndet ikke er delt opp) kan problemer oppstå for langt høyere kurveradier. Dette er noe som kan tilpasses forholdene.

Dersom bakriggen kommer i konflikt med installert sikring i form av stålbuer, betongelementer o.lign., vil det påvirke minste kurveradius.

Tverrsnittsforhold som f.eks. krav til en bestemt utforming av trafikkarealet i veg- og jernbanetunneler, kan ofte gjøre at en stor del av det utborede arealet ikke kan utnyttes. Spesielt gjelder dette for tofelts eller tospors trafikk dersom det ikke strosses i sidene, dvs. at fullprofilboring og sprengning kombineres. Enkeltspors jernbanetunnel passer for øvrig ganske bra til det sirkulære tverrsnittet dersom vanlige krav til ballasttykkelse kan tilpasses.

Retningsavviket er normalt ikke noe problem. Det er vanligvis enkelt å holde avviket innenfor 5 cm fra teoretisk tunnelakse for mindre maskiner. Borenøyaktigheten avhenger dels av fjellforholdene og utformingen av borhodet, dels av maskinoperatøren.

Et buet borhode med borhodestøtter kan tillate kurskorrigeringer under boring. Det er utsatt for retningsavvik ved blandet stuff, som hvis gangbergarter kommer inn på skrå i stuffen. Et flatt borhode anses normalt for å være noe mer retningsstabilt, men det kan også gi avvik når borhodet er helt fremkraget og hvis stuffen har blandet hardhet. Maskinleverandørene diskuterer hvilket system som er best.

Uansett er borenøyaktigheten svært avhengig av operatøren og dersom det er nødvendig, kan meget god retningskontroll oppnås ved at innretting og påskråning utføres spesielt omhyggelig.

I bløte svakhetssoner kan fremtunge maskiner ha en tendens til å ville bore på stup. Dette kan bedres ved montering av ekstra bæreplater i sålen bak borhodet.

5.2. Spesielle utførelser, miljøforhold etc.

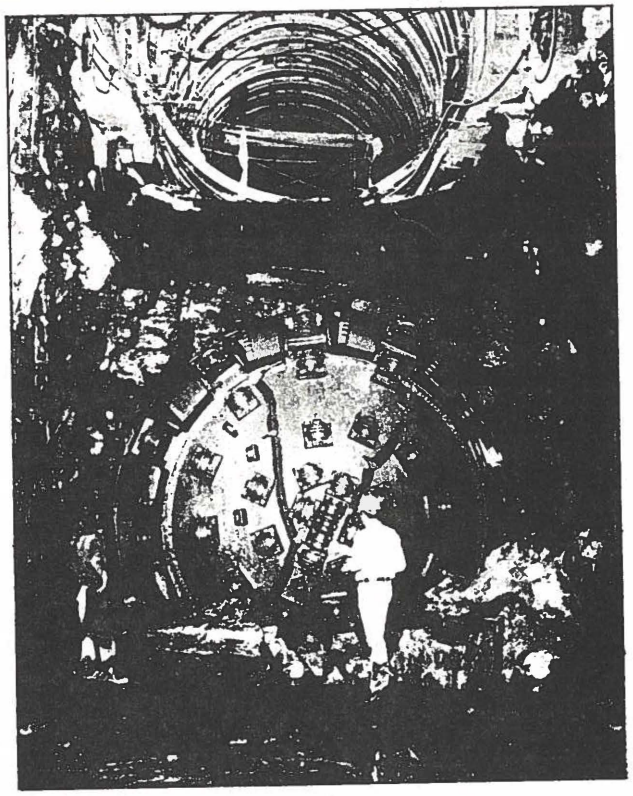
Spesielle utførelser som tettliggende parallelle tunneler kan være mulig ved fullprofilboring. Et aktuelt eksempel er undergrunnsbanen i New York der det ble drevet fire parallelle tunneler med innbyrdes avstand horisontalt og vertikalt på 1,8 - 2,4 m avstand. Dette krevde bl.a. forsiktig bruk av fastspenningslabbene, men muliggjorde meget store besparelser av betong ved at fjellet imellom tunnelene kunne stå igjen, se figur 39.

Fullprofiltunneler kan drives med meget små fjelloverdekninger og dette kan i spesielle situasjoner være utslagsgivende for gjennomførbarheten av en tunnel. Som for boring og sprengning setter imidlertid lav overdekning spesielle krav til forundersøkelsene.

Behovet for å unngå sprengningsrystelser i byer og tettbygde strøk er et vesentlig moment i valg av metode. Dette kan komme inn som et absolutt miljøkrav på grunn av spesielle forhold som historiske bygninger eller spesielt følsomme installasjoner som dataanlegg, papirmaskiner o.lign. Kostnadsmessig kan spart rystelseskontroll, husbesiktigelse og problemer med erstatningskrav bety besparelser opptil 500 - 1000 NOK pr. lm eller mer, sterkt avhengig av lokale forhold.

Muligheten for å skaffe kvalifisert arbeidskraft vil kunne påvirke valg av metode. Dette er ikke bare et kostnadsspørsmål idet det i en rekke land kan være vanskelig å skaffe kvalifiserte fagfolk til boring og sprengning. Spesielt gjelder

dette for sjaktdriving. Andre steder kan ønske eller krav om å oppnå en størst mulig beskjeftigelse av lokal arbeidskraft bety at fullprofilboring er uaktuelt.



Figur 39. Gjennombrudd av den andre av fire undergrunnsbanetunneler med avstand på 1,8 - 2,4 m, New York. (Tunnels & Tunnelling, Jan./Febr. 81).

For øvrig kan tollbestemmelser f.eks. for innføring av utstyr begrense muligheten for å innføre en fullprofilmaskin i et land.

Krav til kort byggetid kan tvinge frem fullprofilboring, liksom spesielle anvendelser som f.eks. driving av lange undersjøiske tunneler, kan sette krav til meget høye inndrifter, som bare er oppnåelig ved fullprofilboring.

Krav til kvaliteten av det endelige produktet kan også være medvirkende ved valg av drivemetode. Fullprofilboring kan redusere behovet for fremtidige drifts- og vedlikeholdsarbeider,

f.eks. stabilitetskontroll, rengjøring av vannforsynings-tunneler etc.

5.3. Krevende og usikre fjellforhold

Ut fra den foregående diskusjonen er det klart at valg av drivemetode influeres sterkt av fjellforholdene idet resultatene for fullprofilboring er så følsomme for disse.

Her skal kun påpekes at i tillegg til de kostnadsoverslag som gjøres ut fra de ventede fjellforholdene, foretas det ofte en vurdering av hva slags problemer som kan dukke opp som overraskelser. Dette påvirker valget. Dersom en tunnel må drives på stup (med fallet) i et område der risikoen for å treffe karst og dermed meget store vannlekkasjer er til stede, kan det medføre at man ikke vil velge fullprofilboring.

Avhengig av erfaringer, mannskap og innstilling vil noen entreprenører foretrekke å drive med boring og sprengning under ukjente forhold eller der forundersøkelsene er mangelfulle, på grunn av metodens fleksibilitet. Andre entreprenører uttaler at de foretrekker å drive med fullprofilboring under tilsvarende forhold, bl.a. på grunn av de bedrede stabilitetsforholdene.

Ved vurdering av fullprofilboring i svakt fjell under krevende og usikre fjellforhold bør de mulige problemene vurderes etter følgende prioriterte spørsmålsliste:

1. Er det fare for meget store vannlekkasjer?
2. Finnes det dårlig konsoliderte svakhetssoner som kan gi øyeblikkelige innrasinger?
3. Ventes det problemer med "squeezing"-fjell?
4. Hva blir det mest hyppige eller fortløpende stabilitetsproblem?
5. Er det sannsynlig med store variasjoner i borbarhetsforholdene ut fra bergart og oppsprekningsgrad?

6. FORUNDERSØKELSER

6.1. Forundersøkelser for fullprofilboring må være grundige

Fullprofilboring er mer følsomt for fjellforholdene enn boring og sprengning, både med hensyn til drivehastighet og økonomi og er også normalt mer sårbart for overraskelser. For-undersøkelsene må derfor gjøres grundigere. Siden valg av metode i noen tilfeller kan påvirke utformingen av prosjektet, kan det allerede på forprosjektstadiet bli nødvendig å foreta ganske grundige undersøkelser.

Til anbudsstadiet i et internasjonalt tilbud bør det foreligge resultater fra følgende typer forundersøkelser:

- geologisk kartlegging, bergartsfordeling etc.
- kjerneboring som gir typiske snitt av lagpakkene, inklusive logging av bergartstyper og svakhetsflater,
- testresultater for bergartsprøver, generelle data for styrke samt mineralsammensetning og struktur, spesielle borbarhets- og slitasjetester,
- ingeniørgeologisk kartlegging og vurderinger, inklusive bl.a. vurderinger av oppsprekningsgrad, stabilitetsforhold, prøve-representativitet etc.

Det kan også være ønskelig, iallfall i en del situasjoner, å ha med:

- refraksjonsseismikk for påvisning av svakhetssoner,
- geoelektriske målinger for påvisning og eventuelt vurdering av typen av svakhetssoner,
- pumpe- eller vanninnpresningsforsøk,
- bergtrykksmålinger.

Behovet for geofysiske målinger og kjerneboring varierer med den geologiske formasjonen. Forholdene blir vesensforskjellige i en flattliggende umetamorf lagpakke av sedimentbergarter og i en uoversiktlig fjellkjede med foldninger, skyveplan etc.

Vanskelighetsgraden til anlegget og mulige konsekvenser av forsinkelser på grunn av overraskende fjellforhold teller selvsagt også med. Det gjelder også hvilke muligheter man har til å kartlegge nøyaktig i overflaten. Dersom fjellet er dekket av løsmasser og forvitringshud, øker selvsagt behovet både for indirekte målinger og kjerneboring.

Kartleggingen av borbarheten bør ikke bare søke å klarlegge de gjennomsnittlige forholdene, noe som vanligvis er tilstrekkelig for boring og sprengning. Det er viktig at variasjonsområdet i egenskapene klarlegges. Spesielt bør de ugunstigste forholdene man kan støte på være forutsett idet dette kan påvirke gjennomførbarheten. F.eks. er ikke harde kvartsittbenker uvanlige i geologiske formasjoner som ellers består av bergarter som kan fortjene betegnelsen "svakt fjell".

Forundersøkelsene bør ellers klarlegge alle de tidligere diskuterte forholdene som har med fullprofilmaskinens tilpasning til fjellforholdene å gjøre med hensyn på borhodet, fastspenning, hengstabilitet, uttransport og ventilasjon, se ellers diskusjon av WANNER [52], detaljert gjennomgåelse av casehistories av KORBIN [19] eller kort oversikt i [20].

Omfanget av forundersøkelsene må uansett generelle ønsker om detaljerte informasjoner, tilpasses situasjonen. Kostnadene ved undersøkelsene må avveies mot nytten og påliteligheten i de informasjonene som kan skaffes. Dersom de viktigste forholdene er rimelig presis beskrevet, kan det ofte være riktig å satse på et oppfølgingsprogram under driften, fremfor ytterligere forundersøkelser.

Et slikt oppfølgingsprogram kan baseres på data for inndrift og kutterforbruk til tunnelbormaskinen forutsatt at denne arbeider under nærmere angitte normale betingelser, registrering av sprekkefrekvenser i tunnelen, samt prøvetaking og testing av bergartene det bores gjennom.

Ved en tilpasset utforming av anbudspapirer og kontrakter kan et slikt program sikre fornuftige resultater både for **byggherre**

og entreprenør, uten at kostnadene til forundersøkelsene behøver å bli skyhøye selv under ganske kompliserte fjellforhold.

BECKMANN [53] viser et eksempel på et klassifiseringssystem med 6 klasser for både borbarhet og stabilitetsforhold og som han foreslår brukt både til anbud og oppfølging. Ulempen ved å knytte slike klassifiseringssystemer direkte til maskinytelsene ligger i at klassifiseringssystemet ikke blir uavhengig av maskintype og maskinutvikling. Det vil derfor være bedre å benytte eksisterende eller tilpassede klassifiseringssystem for borbarhet og stabilitet, men på en slik måte at de blir mest mulig uavhengige av maskinelle faktorer.

Forundersøkelser for fullprofilboring har ofte i alt for stor grad vært konsentrert om å klarlegge borbarhetsforholdene ut fra de opptredende bergartene. Det må imidlertid også legges stor vekt på registrering av svakhetsflater og stabilitetsforhold, i tillegg til spesielle forhold som lekkasjer, bergtrykk osv.

Det finnes en rekke generelle klassifiseringssystemer som kan være til nytte, fra de generelle bergmekaniske; BIENAWSKI [54] og [55] (der bl.a. RQD inngår), ROCHA et al. [56], til systemer rettet mot bestemte formål. Eksempler på slike er Q-systemet, BARTON et al. [57] som er et hjelpemiddel til å klassifisere fjell med hensyn til sikringsarbeider. PALMSTRØM [58] anvender et system som gir et sprekketall med hensyn til fjellvolumet. Den inndelingen i oppsprekningsklasser som Prosjektrapport 1-79 [20] anvender er målrettet for fullprofilboring, og vil etter en pågående revisjon dekke hele variasjonsområdet fra helt massivt til meget oppsprukket fjell.

Det er i øyeblikket ikke mulig å peke ut et bestemt system som det beste for å dekke både borbarhet og stabilitetsforhold. En systematisk sammenstilling og tilpasning til fullprofilboring synes derfor nødvendig, spesielt siden de generelle bergmekaniske klassifikasjonssystemene bare inneholder enaksiell trykkfasthet som bergartsparameter.

6.2. Borbarhetstester utføres for flere formål

Som for andre boremetoder kan borbarhetstester for fullprofilboring bli utført med meget forskjellige siktemål. Følgende hovedformål er vanlige:

- utforskning av bruddmekanismene, materialslitasje o.lign.,
- utvikling av metoder og utstyr, full- eller delskalaforsøk i testgruver el.lign.,
- anvendelse til prognosemetoder for å forutsi ytelser.

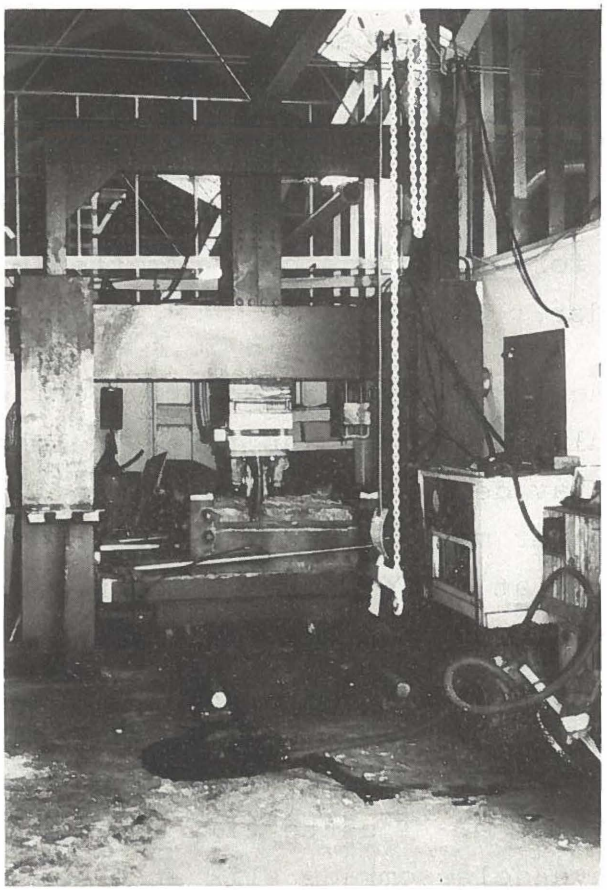
Til utforskning av bruddmekanismene etc. kan svært mye av den testing som skjer i de lineære eller roterende testriggene, som nå finnes ved en rekke forskningsinstitusjoner, regnes. Disse etterligner i prinsippet meget godt bruddmekanismene ved fullprofilboring, selv om ikke testingen alltid foregår i full skala eller med vanlig produksjonsboreverktøy.

Mye av den forståelse man i dag har om bruddmekanismene og den kvantitative sammenhengen mellom de enkelte faktorene, skyldes slike forsøk. De lineære kutteforsøkene som ble utført ved Colorado School of Mines (CSM) ga et gjennombrudd innen dette feltet, se figur 40 og OZDEMIR et al. [5] og [6]. Lignende og videre utviklede testprogrammer har vært og er under utførelse en rekke steder i verden. En rigg for roterende testing med borhodediameter 1,8 m er nå bygd ved CSM.

Slike kutteforsøk kan også brukes til å forutsi resultater for fullprofilboring i bestemte bergarter. På grunn av størrelsen av de blokkene som brukes og tidkrevende prosedyrer kan imidlertid slik testing kun komme på tale i spesielle tilfelle og sjelden i forbindelse med rutinemessige forundersøkelser. De kan også i liten grad ta hensyn til de naturlige variasjonene i bergartsmaterialet. Forhold som svakhetsflater i fjellmassen, fuktighetsinnholdet i bergarten o.lign. har i liten grad vært med i testprogrammene hittil.

Et meget viktig moment i forbindelse med slik etterlignende testing er at bergartsoverflaten under forsøkene blir utsatt

for gjentatte påkjenninger. Dette betyr at man bedre etterligner forholdene på stuffen der bergarten blir utsatt for rissdannelse.



Figur 40. *Colorado School of Mines' testrigg for lineær kutting med rullemeisler el.lign.*

LINDQVIST [59] rapporterer nylig resultater bl.a. fra slike fullskala kutteforsøk, som har bidratt til å bedre forståelsen av bruddmekanismene ved avskallingen mellom meiselsporene og betydningen av egenskapene til det finknuste pulveret som dannes og pakkes under kuttereggen.

For utvikling og utprøving av metoder og utstyr foretas det iblant fullskala-forsøk også med fullprofilmaskiner. Dette innebærer gjerne omfattende testprogram og store kostnader.

Til denne kategori kan f.eks. regnes den fullprofilboringen som ble foretatt i krittbergarter ved Chinnor i England. Det samme gjelder forsøkene med vannjet-assistert tunnelboring rapportert av WANG et al. [60], samt HENNEKE & BAUMANN [61].

Begge disse to nevnte hovedtyper av forsøk kan, ved siden av å bedre forståelsen for boreprosessen og hvordan denne kan forbedres, gi resultater som kan være nyttige ved prognoser for konkrete anlegg.

Borbarhetstesting for prognosemetoder omfatter både direkte og indirekte metoder.

De direkte metodene forutsetter altså prøveboringer i full eller tilnærmet full skala. De kan foregå i laboratoriet, der etterligningen av de in-situ-forholdene nødvendigvis ikke kan bli **hel**t reell, eller mer sjelden i felten. Det finnes faktisk eksempler på at små fullprofilmaskiner har vært brukt til direkte prøveboring uten annet formål enn å teste bergartens borbarhet. HAMBACH [45] refererer at en tunnelbormaskin med diameter på 2,4 m i 1968 ble brukt for å kontrollere borbarheten til en granitt der det etterpå ble boret en trykksjakt med diameter 3,0 m. I dette tilfelle var det snakk om å utvide metodens anvendelsesområde slik at en så kostbar prøveboring kunne forsvares.

De indirekte metodene spenner over et vidt spekter av metoder fra etterlignende (bore)forsøk i laboratoriet, via testing av bergartsprøver til mer eller mindre systematisert bruk av erfaringer.

Ved de vanlige anbudssituasjoner er det normalt bare de indirekte metodene som blir brukt. Byggherren oppgir ut fra forundersøkelsene opplysninger om fjellforholdene og testresultater, og overlater til entreprenøren å vurdere disse.

Dersom entreprenøren og eventuelt maskinleverandøren overhodet får anledning til å utføre supplerende tester, vil det som regel ikke bli tid til å utføre annet enn enkle laboratorieforsøk samt ta i bruk "erfarings-metoden".

I avsnitt 2.2.1 ble det diskutert hvilke bergartsegenskaper som er viktige for bergartens borbarhet med hensyn til inndrift og slitasje. En del materialparametere for sprøhet, seighet, styrke og abrasivitet ble nevnt.

Listen over aktuelle testmetoder kan gjøres ganske lang. Det inngår både vanlige styrkeparametre, som trykk- og strekkfasthet, og etterlignende forsøk som inntrengningstester, miniatyrboretester, ripe- og tromletester samt skleroskoptester. En rekke av de anvendte testmetodene har vært eller er i bruk som borbarhetstester også for andre boremetoder. De har ofte sin spesielle forhistorie og plass innen helthetsbildet.

Det vil her ikke bli gitt noen oversikt over testmetodene eller prosedyrene da dette allerede foreligger flere steder. KORBIN [19] gir en oversikt over fysiske modeller og indekstester. Han understreker at alle indekstester som kalibreres mot en spesiell tunnelbormaskin bare har direkte gyldighet for prognoser for den samme maskin og tilsvarende arbeidsbetingelser.

Ellers gir RÅNMAN [62] en oversikt over borbarhetstester for fullprofilboring og RÅNMAN & SUNDIN [63] en tilsvarende oversikt over slitasjetester. BLINDHEIM [64] diskuterer bakgrunnen og anvendelsen av borbarhetsindeksene DRI og BWI, som også finnes oversiktlig beskrevet i Prosjektrapport 8-79 [65].

6.3. Borbarhetstester er ennå ikke standardiserte

International Society for Rock Mechanics har nå en kommisjon i gang med å standardisere testmetoder for borbarhet for både fullprofilboring, fresing og vanlig boring. Det bør kunne etableres et begrenset utvalg av anbefalte tester som uttrykker de vesentlige bergartsegenskapene og dessuten tilfredsstiller rimelige krav til enkelthet i utførelse og reproduserbarhet. Kan dette oppnås, vil meget være vunnet angående forenkling av forundersøkelser og utforming av materiell til anbudspapirer.

Det er innlysende at de som har sine erfaringsdata knyttet til de forskjellige spesialtestene, må legge arbeid i også å knytte disse til slike utvalgte testmetoder.

Nedenfor følger en oppsummering av de viktigste krav og en del momenter det bør tas hensyn til ved utvalg, utforming og utførelse av borbarhetstester.

- Det er meget viktig at det i et testsystem tas med metoder som gir et mål for bergartens motstandsevne mot slagpåkjenning. Boreprosessen er i stor grad preget av slagpåkjenninger når kutterne ruller på stuffen.

- Avskallingen mellom kuttersporene skjer på grunn av strekkspenninger i materialet selv i såkalte "bløte" bergarter. Strekkfastheten, eller parametere som gir et mål for denne som f.eks. punktlaststyrken, er derfor viktig.

- At avskallingen domineres av strekkspenninger forhindrer ikke at teoretiske modeller som baserer seg på skjærfasthet kan være brukbare. CSM-modellen [5] [6], som baserer seg på trykkfasthet og skjærfasthet, har gitt gode korrelasjoner i middels hardt og tilnærmet massivt fjell. I meget tungt borbart fjell synes modellen å være for pessimistisk, mens den i meget lettboret fjell er for optimistisk med hensyn til inndrift, [64]. Den tar ikke hensyn til oppsprekningen.

- Det bør alltid være med styrketester som gir bruddflater av tilnærmet samme størrelse som det meste av borkakset. Dette for at ikke størrelseseffekter skal slå for mye ut for grovkornige og inhomogene bergarter.

- Det er en fordel at testene er enkle å utføre slik at dette ikke begrenser antall forsøk for meget; sprøbrudd gir stor spredning og krever derfor mange parallell-forsøk dersom pålitelige testresultater skal oppnås. Eventuelt bør testene i seg selv gi gjennomsnittsverdier, f.eks. ved at de kan utføres på sammenslåtte prøver, som morter-tester el.lign.

- Inntrengningstester med rullemeiselsegmenter synes å bli en interessant metode. Disse kan utføres på prøvestykker av

forholdet mellom matekraft og inntrengning i vedkommende bergart. INKMANN [66] utviklet testprosedyrer og fant gode korrelasjoner mellom testresultater og inndrifter. Videre utvikling av denne testtypen er nå i gang flere steder. Se figur 41.



Figur 41. Inntrengningstest med rullemeiselsegment. Bemerk avskalling mot "nabo-spor" i det innstøpte prøvestykket.

- På grunn av bergartsstyrkens avhengighet av vanninnholdet, bør testene gjøres med et kontrollert og standardisert vanninnhold. Testing i tørr tilstand har vært vanlig, men f.eks. ved punktlasttesting krever det lite merarbeid å teste prøvene i vannmettet tilstand. Dette er svært ofte mer representativt for in situ-tilstanden.

- Skleroskoptester er i enkelte tilfelle påvist å gi korrelasjoner til boreresultater for fullprofilboring, f.eks. av

TARKOY [67]. Denne type test har imidlertid sin største verdi som supplerende parameter. F.eks. kan bergarter med samme styrke ha forskjellig borbarhet på grunn av forskjell i elastisitet. Dette kan skleroskoptester gi indikasjoner om, men som selvstendig borbarhetsparameter i et vidt spekter av bergartstyper, f.eks. i et utvalg av sandsteiner med varierende kornstørrelse og styrke, kan nok skleroskoptester gi en rimelig god korrelasjon med styrken, liksom for betong. Dette svikter imidlertid når eruptive og spesielt metamorfe bergarter tas med i betraktning.

Testen kan imidlertid være et nyttig hjelpemiddel ved kartlegging av oppsprekningsgrad i tunneler. WANNER [16] viser hvordan slike tester kan brukes til å indikere ikke synlige mikroriss i nærheten av synlige sprekker i tunnelveggen.

- Innhold av svakheter som stikk, større porer, riss etc. i prøvematerialet og prøvestykket må tas med i betraktningen både ved testingen og ved bruken av resultatene. Skjer f.eks. testen på en utboret kjerne med lengde 10 cm (som ved trykkfasthetstesting), kan flere svakheter finnes i prøvestykket enn ved testing av knust materiale mellom 16 og 11 mm (som ved NTH's borbarhetsindekser). Dette påvirker hvordan testresultatene skal brukes sammen med resultatene fra kartlegging av svakheter i bergarter og i fjellmassen.

- Ved slitasje- eller abrasivitetstester er det utslagsgivende for verdien av testen at det er bergartens virkning på kuttermaterialet som undersøkes og ikke omvendt. Slitasjetester bør derfor utføres ved at man måler slitasjen på henholdsvis herdet stål eller hardmetall alt etter hva slags kuttermateriale som skal brukes. Materialkvalitetene må være tilsvarende m.h.p. herding for stål eller kornstørrelse og WC/Co-innhold for hardmetall. Tester der f.eks. en slipeskive av carborundum sliter på bergarten har liten verdi og det er heller ikke påvist klare korrelasjoner mellom slike tester og praktisk kutterslitasje.

- Så lenge man holder seg til sedimentære bergarter, kan grove anslag av slitasjeegenskapene gjøres ut fra en registrering

av kvartsinnhold, kornstørrelse og strekkfasthet. SCHIMAZEK & KNATZ [68] har vist dette for fresende boreverktøy. Kornformen har imidlertid også stor betydning, derfor sliter skarpkantede kvartskorn i eruptive eller metamorfe bergarter mer enn avrundete i de sedimentære bergartene.

- Dersom det foreligger kjerneprøver, bør disse også utnyttes til å logge sprekkefrekvens, sprekketype og om mulig orientering. Dessuten bør bergartsfordeling og variasjoner innen samme type undersøkes.

- Uansett hvor fornuftig et testprogram er bygd opp og hvor omhyggelig testene er utført, står og faller verdien av resultatene med prøverepresentativiteten. Den naturlige variasjonen i bergartenes egenskaper undervurderes regelmessig både av de som kartlegger og av de som skal vurdere testresultatene. Selv innen tilsynelatende ensartede lagpakker av sedimentære bergarter kan det være store forskjeller i egenskaper på grunn av at avsetningsbetingelsene har variert, hyppig eller gradvis. Forskjeller i mekaniske egenskaper behøver ikke være synlige. Også for eruptive bergarter som ofte regnes som homogene og isotrope kan det finnes variasjoner i kornstørrelse og derved styrke, og lagdeling. At metamorfe bergarter varierer i egenskaper er mer åpenbart, men bredden i variasjonsområdet f.eks. i en gneisformasjon undervurderes lett.

- I iseroderte områder kan det ofte tas overflateprøver av sterke bergarter uten at disse behøver å være vesentlig påkjent av forvitring. Selv om ikke bergartsprøvene ser forvitret ut, kan allikevel styrken være svekket på grunn av usynlig utluting langs korngrenser, frostforvitring langs glimmerstikk og annen forvitring. For overflateprøver bør derfor alltid muligheten for forvitring tas med i betraktningen.

- I områder som ikke er iserodert må det tas kjerneprøver for å få prøvemateriale som ikke er forvitret, dersom det er dyptliggende tunneler som skal vurderes. Overflateprøver

kan allikevel ha en viss supplerende verdi for å gi inntrykk av bergartsfordeling, variasjoner i type og tekstur etc. Abrasiviteten kan også ofte vurderes brukbart selv om prøvene er litt forvitret.

Oppsummering

Ved vurdering av borbarhet bør det anvendes mekaniske tester i tillegg til de opplysningene om borbarhet som kan trekkes ut av informasjonene om geologi, bergartenes alder, type mineralsammensetning, tekstur etc.

Borbarhetsvurderingene bør støtte seg på flere tester der det er med parametere som uttrykker:

- bergartens generelle styrke, som f.eks. punktlaststyrke (strekkfasthet) og eventuelle anisotropi. Bergartens trykk- og skjærfasthet kan tjene som støtteparametere.

- bergartens motstandsevne mot slagpåkjenning utover det som styrken forteller, dvs. tester som gir mål for sprøhet eller seighet. Skleroskoptester kan ha en viss verdi som støtteparametere, men bør ikke brukes alene.

- bergartens abrasivitet uttrykt ved sliteevne på det aktuelle kuttermaterialet.

Inntil et utvalg av tester og internasjonal standard er etablert, vil bildet fortsatt være noe broget.

7. REFERANSER.

[1] THON, J.G. (1982) : "Tunnel Boring Machines." In Tunnel Engineering Handbook, Ed. J.O. Bickel & T.R. Kuesel, Van Nostrand Reinhold Co., New York.

[2] BLINDHEIM, O.T. & HELGEBOSTAD, J. (1980): "Fullprofilboring ved Seabrookanlegget. Borbarhet og sikringsarbeider." Rapport nr. 14, Geologisk Institutt, NTH, Trondheim.

[3] GRANDORI, C. (1976): "Fully mechanized Tunnelling Machine and Method to Cope with the Widest Range of Ground Conditions. Experiences with a Hard Rock Prototype Machine." Proc. RETC Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Las Vegas.

[4] ROBBINS, R.J. (1982): "The Application of Tunnel Boring Machines to Bad Rock Conditions." Proc. ISRM Symp.: Rock Mechanics, Caverns and Pressure Shafts, Aachen.

[5] OZDEMIR, L., MILLER, R. & WANG, F.-D. (1977): "Mechanical Tunnel Boring. Prediction and Machine Design." Annual Report, Excavation Engineering and Earth Mechanics Institute, Colorado School of Mines.

[6] OZDEMIR, L. & WANG, F.-D. (1979): "Mechanical Tunnel Boring. Prediction and Machine Design." Final report. Excavation Engineering and Earth Mechanics Institute, Colorado School of Mines.

[7] LINDQVIST, P.-A. & RÅNMAN, K.E. (1980): "Mechanical Rock Fragmentation. Chipping under a Disc Cutter." Technical Report 1980:59 T, University of Luelå.

[8] HAI-HUI, L., LINDQVIST, P.-A. & RÅNMAN, K.E. (1980): "Reconsolidation of Crushed Rock Fragments under a Button Indenter." Research Report 1980-21, University of Luleå.

[9] GOBETZ, F.W. (1973): "Development of a boring machine cutter instrumentation program." United Aircraft Research Laboratories, East Hartford, Conn., Report for U.S. Bureau of Mines.

[10] HAMILTON, W.H. & DOLLINGER, G.L. (1979): "Optimizing tunnel boring machine and cutter design for greater boreability." 4th Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Atlanta.

[11] SNOWDON, R.A., RYLEY, M.D. & TEMPORAL, J. (1982): "A Study of Disc Cutting in Selected British Rocks." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 19.

[12] BLINDHEIM, O.T. & AASEN, O. (1981): "Fullprofilboring i Oslo med tre-arms tunnelbormaskin med rullemeisler." Rapport nr. 18, Geologisk Institutt, NTH, Trondheim.

[13] MARTIN, D. (1983): "Hades and Rhodes water tunnel are streets ahead of schedule." Tunnels & Tunnelling, Jan. -83.

[14] BLINDHEIM, O.T. (1978): "Borbarhet og sikringsarbeider ved fullprofilboring av tunneler i USA." Rapport nr. 6, Geologisk Institutt, NTH, Trondheim.

[15] WANNER, H. (1975): "On the influence of geological conditions at the application of tunnel boring machines." The Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 12, Krefeld.

[16] WANNER, H. (1980): "Klüftigheit und Gesteins-Anisotropie beim mechanischen Tunnel Vortrieb." Rock Mechanics, suppl. 10.
Med referanse til:
Aeberli, U.: (1978): "Einsatz von Tunnelvortriebmaschinen in schwach metamorphen, kalkigen Sedimentgesteinen." Diss. No. 6089, ETH, Zürich.

[17] HANDEWITH, H. (1972): "Suggested Tunnel Investigation Criteria for Rock Boring Machines." Proc. 8th Symp. Rock Mech. Univ. of Toronto.

[18] Mc FEAT-SMITH, I. & TARKOY, P.J. (1980): "Site investigations for machine tunnelling contracts." Tunnels & Tunnelling.

[19] KORBIN, G.E. (1979): "Factors influencing the performance of full-face hard rock tunnel boring machines." Report No. UMTA-CA-06-0122-79-1, Dept. of Civ. Eng., Univ. of Calif.

[20] PROSJEKTRAPPORT 1-79 (1979): "Fullprofilboring av tunneler." Institutt for Anleggsdrift, Geologisk Institutt, NTH, Trondheim.

[21] BLINDHEIM, O.T. (1982): "Nye erfaringer om oppsprekningens innvirkning på borbarhet og stabilitet ved fullprofil-boring." Bergmekanikkdagen, Oslo, Tapirs forlag.

[22] ASKILDSRUD, O.G. (1978): "Erfaringer fra Nurland." Fjell-sprengningskonferansen, Oslo, Tapirs forlag.

[23] WANNER, H. (1980): "Stability problems by full-face tunnel boring." Bergmekanikkdagen, Oslo, Tapirs forlag.

[24] WANNER, H. (1981): "Gebirgsklassifizierung für Tunnel-vortriebmaschinen." Tunnel '81, Int. Kongr., Düsseldorf.

[25] GARSHOL, K. (1980): "Fullprofilboring i ustabilt fjell." Fjellsprengningskoneransen, Oslo, Tapirs forlag.

[26] BERRY, N.S.M. (1980): "Tunnelling by full-face machines in Carboniferous strata." Inst. Min. & Metall., Vol. 89, July.

[27] LANGE LARSSEN, T. (1979): "Fullprofilboring. Nye erfaringer fra Oslo sentrum." Fjellsprengningskonferansen, Oslo, Tapirs forlag.

[28] HENNEKE, J. & SETZEPFANDI, W. (1981): "Tunnel Boring with Hydraulic Debris Disposal." Proc. 1981 Rapid Excav. & Tunn. Conf., San Francisco.

[29] Mc FEAT-SMITH, I. & TARKOY, P.J. (1980): "Tunnel boring machines in difficult ground." Tunnels & Tunnelling, Jan./ Feb.

[30] OPPEDAL, O. & SKJEGGEDAL, T. (1980, 82): Opplysninger om ras i avløpstunnel Sandvika - Lysaker. Notater, skisser, tunnellogger, forundersøkelses-rapporter m.m. stilt til rådighet av entreprenør A/S Høyer-Ellefsen, Oslo.

[31] SUGDEN, D.G. (1975): "Tunnel Boring Machine and Systems: A Survey." Annual Eng. Conf. Hobart., The Inst. of Eng. Austr., Feb.

[32] GRAHAM, P.C. (1976): "Some problems associated with the use of a tunnel machine in deep-level gold-mines." Tunnelling '76, London.

[33] BLINDHEIM, O.T. (1981): "Fullprofilboring i anlegg med bergtrykksproblemer." In Bergmekanikkdagen, Oslo, 1982, Tapirs forlag.

[34] MARUSHACK, J.M. & TILP, P.J. (1980): "Stillwater Tunnel - A Progress Report." Newsletter, U.S. National Committee on Tunnelling Technology.

[35] MORTON, J.D. & PROVOST, A.G. (1980): "Stillwater Tunnel: A Classroom in Engineering Geology." Can. Rock Mech. Symp., Proc. 13th Conf., Ontario, Can. Inst. Min. & Metall.

[36] LOMBARDI, G. (1981): "Bau von Tunneln bei grossen Verformungen des Gebirges." Tunnel '81, Düsseldorf.

[37] RICHARDS, R. (1982): "Tajo - Segura irrigation tunnel will bring relief to south east Spain." Tunnels & Tunnelling Jan./Feb.

[38] MORALES (1981): "Mechanical Drivage of a 26 km tunnel for a Hydroscheme in Guatemala." Tunnel '81, Int. Kongr., Düsseldorf.

[39] TORPEY, K.W. (1982): "Tunnelled sections for the Buffalo Metro." Tunnels & Tunnelling, Dec.

[40] MENDAÑA, F. & del RIO, J.A. (1979): "Excavation and support of the Padrun tunnel, Spain." Tunnelling '79, London.

[41] ASTING, G. (1980): "Erfaringer med tetting av avløps-tunneler i Oslo-området." Fjellsprengningskonferansen, Oslo, Tapirs forlag.

[42] SKJEGGEDAL, T. (1979): "Nye erfaringer fra fullprofil-boring i Bærum og Eidfjord." Fjellsprengningskonferansen, Oslo, Tapirs forlag.

[43] FAWCETT, D.F. (1980): "Tunnelling at Kielder, with particular reference to drill and blast driving and in-situ lining operations." Eurotunnel '80, Basle.

[44] MASTERTON, G.G.T. (1981): "Concrete lining of the Kielder water tunnel." Tunnels & Tunnelling, Nov.

[45] HAMBACH, P. (1970): "Experience gathered in drilling an inclined gallery through hard rock." Tunnels & Tunnelling, May.

[46] FLØNES, O. (1981): "Fullprofilboring ved Orkla - Grana-anleggene." Fjellsprengningskonferansen, Oslo, Tapirs forlag.

[47] FUHRE, B. (1982): "Inndrift fra 78 til 102 meter pr. uke." Byggeindustrien 14/82, Oslo.

[48] FLEIGNER, E. (1980): "Wege zu verbesseren Wirtschaftlich-keit maschineller Vortriebe im Festgestein." Tunnelbau 5/90.

[49] INGULSTAD, T. (1980): "Fullprofilboring av jernbane-tunneler." NSB-teknikk nr. 3. Informasjonsblad for Norges Statsbaner, Oslo.

[50] BLINDHEIM, O.T., DAHL JOHANSEN, E. & JOHANNESSEN, O. (1979): "Criteria for the selection of fullface tunnel boring or conventional tunnelling." Proc. 4th Congr. Int. Soc. Rock Mech., Montreux.

[51] BLINDHEIM, O.T. & AAGAARD, B. (1983): "Bruk av borkaks fra fullprofilboring i vegoverbygning." A/S GEOTEAM, rapport nr. 8190.01 til Vegkontoret i Sør-Trøndelag, Trondheim, upublisert.

[52] WANNER, H. (1979): "Deciding on the Excavation Method for a Tunnel - From the Geologist's Point of View." Underground space, Vol. 3, No. 6, Pergamon Press.

[53] BECKMAN, U. & SIMONS, H. (1982): "Vergütung für TBM-Vortriebe auf der Grundlage angetroffener Gebirgseinflüsse."

[54] BIENAWSKI, Z.T. (1973): "Engineering classification of jointed rock masses." The Civil Engineer in South Africa, Dec.

[55] BIENAWSKI, Z.T. (1974): "Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelling." Adv. in Rock Mech. Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech., Denver, Vol. II A.

[56] ROCHA, M. (Coordinator) (1981): "Basic geotechnical description of rock masses (BGD)." Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., Vol. 18.

[57] BARTON, N., LIEN, R. & LUNDE, J. (1975): "Estimation of support requirements for underground excavations." Design Methods in Rock Mechanics, Proc. 16th Symp. on Rock Mech., Univ. of Minnesota.

[58] PALMSTRØM, A. (1982): "The volumetric joint count, A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing." Proc. 4th Int. Congr. IAEG, New Dehli.

[59] LINDQVIST, P.-A. (1982): "Rock fragmentation by indentation and disc cutting. Some theoretical and experimental studies." Doct. thesis 1982:20 D, University of Luleå.

[60] WANG, F.-D. & ROBBINS, R. & OLSEN, J. (1976): "Water Jet Assisted Tunnel Boring." Paper E6, Proc. 3rd Int. Symp. Jet Cutting Techn. BHRA Fluid Engineering, Cranfield.

[61] HENNEKE, J. & BAUMANN, Z (1978): "Jet Assisted Tunnel Boring in Coal-measure Strata." 4th Int. Symp. Jet Cutting Techn. BHRA Fluid Engineering, Cranfield.

[62] RÅNMAN, K.E. (1981): "Boreability Test for Full-face Boring." Techn. Report 1981:69 T, University of Luleå.

[63] RÅNMAN, K.E. & SUNDIN, N.O. (1982): "Test Methods for Rock Abrasivity in Full-face Boring." Techn. Report 1982:26 T, University of Luleå.

[64] BLINDHEIM, O.T. (1979): "Bergarters borbarhet. Borbarhets-prognoser for tunnelanlegg." Dr.ing.-avhandl., Rapport nr. 10, Geologisk Institutt, NTH, Trondheim.

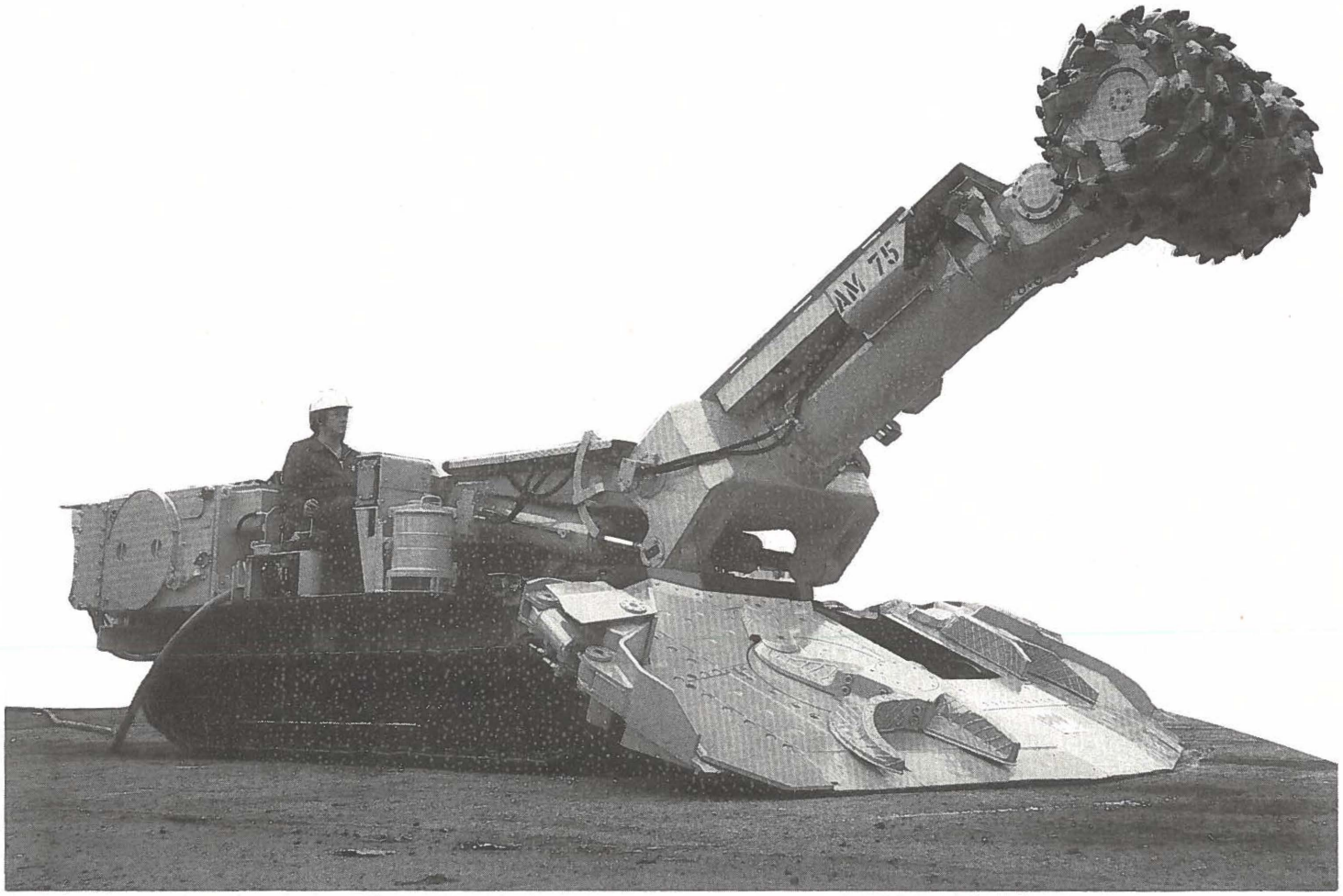
[65] PROSJEKTRAPPORT 8-79 (1981): "Borbarhet. Katalog over borbarhetsindekser." Også i engelsk utgave. Institutt for Anleggsdrift, Geologisk Institutt, NTH, Trondheim.

[66] INKMANN, M. (1978): "Development of a Laboratory Indentation Test to Predict the Performance of Tunnel Boring Machines Equipped with Disc Cutters." Thesis T 2050, M.Sc. Colorado School of Mines.

[67] TARKOY, P.J. (1973): "Predicting TBM penetration rates in selected rock types." 9th Can. Symp. Rock Mech., Montreal.

[68] SCHIMAZEK, J. & KNATZ, H. (1970): "Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meisselverschleiss von Streckenvortrieb-Maschinen." Glückauf, 106.

Fräsande brytning
Sid 1-59



SAMMANFATTNING

Föreliggande rapport beskriver principer för fräsande brytning.

Fräsande brytning kan vara ett bra alternativ till borrning-sprängning och TBM om förutsättningarna är de rätta. Frästeknik liksom TBM fordrar dock mycket noggranna förundersökningar, en väl genomtänkt och mekaniserad bergförstärkningsmetod, ett bra underhåll, en god organisation och ett effektivt utlastnings- och transportsystem.

Bergets hårdhet begränsar främst användningsområdet för frästeknik. Den ekonomiska gränsen för fräsning beror i dag på bergets tryck-hållfasthet. Tryckhållfastheten bör vara lägre än 70 MPa.

Fördelarna med frästeknik är främst att tunnelprofiler kan varieras, dess skonsamhet mot berget och därvid minskning av överberget, samt ett kontinuerligt bergflöde.

Rapporten utgör en delrapport inom projekt BeFo 106 "Undermarks-byggande i svagt berg".

SUMMARY

This report describes the principals of rock cutting.

Excavation with cutting machines might be an excellent alternative to drilling and blasting and to TBM if certain conditions are fullfilled. The most important restriction is the compressive strength of the rock. The upper economic limit is today given by a compressive strength of 70 MPa.

The advantages with cutting technique are the relative low investment costs, the use in varying cross-sections and the possibility to avoid overbreak.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING Sid

1.	INTRODUKTION	2
2.	PRINCIPER FÖR FRÄSANDE BRYTNING	3
2.1	Maskintyper	3
2.2	Sönderbrytningsförlopp vid fräsning	7
3.	PARAMETRAR INVERKANDE PÅ METODVAL	8
3.1	Allmänna synpunkter vid ett metodval	8
3.2	Tekniska begränsningar	9
3.3	Ekonomiska begränsningar	15
4.	TESTER FÖR INDRIFTER OCH SLITAGE	19
5.	PRAKTISK ANVÄNDNING	25
5.1	Användningsområden	25
5.2	För- och nackdelar med olika frästyper	28
5.3	Speciella problem	31
5.4	Marknadsöversikt	34
6.	FRÄSNING - TBM - BORRNING/SPRÄNGNING? VAD STYR VALET OCH VILKA RESULTAT KAN UPPNÅS?	36
7.	NÅGRA INTRESSANTA TUNNELPROJEKT	46
8.	DISKUSSION	56
9.	REFERENSER	57

1. INTRODUKTION

I avsikt att höja svenska teknikers kunskaper om berguttags-metoder i för Sverige ovanliga bergartsförhållanden har ett BeFo-projekt, "Undermarksbyggande i svagt berg", initierats. Parallellt drivs vid SveDeFo ett projekt "Brytning i sedimentära bergarter" där målsättningen är att inhämta och delge svenska konsulter, entreprenörer och gruvföretag brytningstekniska lösningar avseende brytning av svagare bergarter.

Denna rapport som färdigställts inom de båda projekten avser att bilda underlag till en state of the art-rapport om berguttagsmetoder som skall ges ut inom BeFo-projektet.

Materialet till denna delrapport har erhållits via litteratur-studier samt via kontakter med tillverkare och användare. Svenska vedertagna uttryck och termer saknas ibland och därför anges efter varje nytt begrepp också den engelska beteckningen. (En stor hjälp härvid har varit K-E Rånmans "Introduktion till fräsande brytning". /18/).

Diagrammen som redovisas i rapporten för kostnader och kapaciteter skall endast ses som trender. Detta beroende på att enbart en källa legat till grund för diagrammen. Entreprenörer har ofta skilda tekniska lösningar och därmed varierande totalkostnader.

Författaren riktar ett varmt tack till ingenjör Gustaf Svantesson och Dr. Karlheinz Gehring, Voest Alpine samt civilingenjör Gunnar Pettersson och bergsingenjör Reidar Hoffner WP-system, som bidragit med material och idéer till denna rapport.

2. PRINCIPER FÖR FRÄSANDE BRYTNING

Brytningsmaskinerna kan indelas i några olika huvudtyper efter sitt arbetssätt. Gemensamt är dock att berget sönderdelas med hjälp av ett roterande huvud försett med verktyg (mejslar eller spetsar) samt lastas och transporteras bakåt av ett transportband. Maskinernas underreden är oftast försedda med larvband. Motorerna för själva fräsningen är elektriska eller el-hydrauliska. Skillnaderna består främst i verktygens rörelsemönster, rörelseriktning, inträngningsdjup, maskinens vikt och installerad effekt.

2.1 Maskintyper

Huvudsakligen förekommer två fräsmaskintyper:

A) Bommaskin (Boom-types; Roadheaders)

B) Trummaskin (Drum-type)

Dessutom förekommer en borrande variant. Denna liknar en fullortsmaskin då den borrar ut hela ortprofilen på en gång. Maskinen har 2-4 roterande borrhuvuden med rotationsaxeln parallell med drivningsriktningen. På borrhuvudet sitter skärverktygen utplacerade. Kapaciteten för maskinen är upp emot 15 ton/min, men maskinen kan endast användas i mycket lösa bergarter. /18/.

Denna rapport kommer uteslutande att beröra de två första typerna eftersom de är vanligast och används i hårdare bergarter.

A) Bommaskiner

Bommaskiner förekommer som malande maskin (milling-type) och rivande maskin (ripper-type). Gemensamt är att borrhuvudet sitter på en bom som kan röras vertikalt och i sidled. Bommen sitter fast i ett underrede försett med larvband. Den erforderliga matningskraften kommer från banden. Bandtrycket bör vara lågt så att maskinen kan arbeta även om underlaget (sulan) är dåligt.

Lastningen av det sönderfrästa berget sker ofta med hjälp av krafslastning.

a) Malande maskin

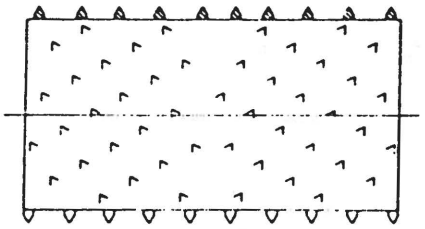
Borrhuvudet har sin rotationsaxel parallell med bommen och drivningsriktningen.
Borrhuvudet är ofta koniskt och dess verktyg sitter spiralformigt utplacerade. Se figur 1.

b) Rivande maskin

Här är borrhuvudets rotationsaxel vinkelrät mot bommen.
Borrhuvudet, ofta 2 st, har en rätt komplicerad växelkonstruktion.
Borrhuvudet är fingerborgsutformat och försett med snedställda verktyg.
Se figur 2. Denna typ har högre kapacitet än den malande. Till rivande maskiner hör även "fräslastaren".

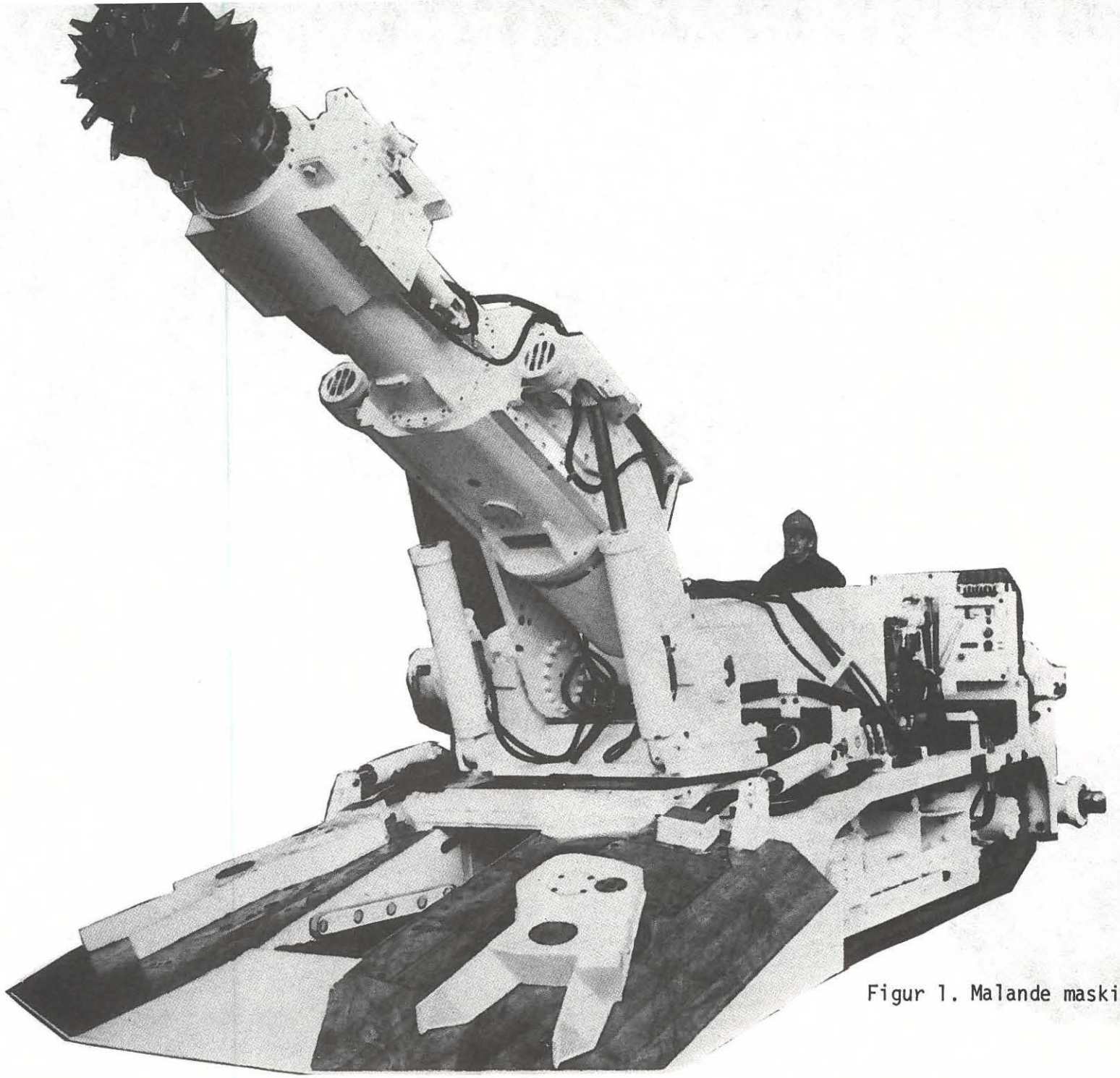
B. Trummaskin

Borrhuvudet, trummans, rotationsaxel är vinkelrät mot drivningsriktningen.

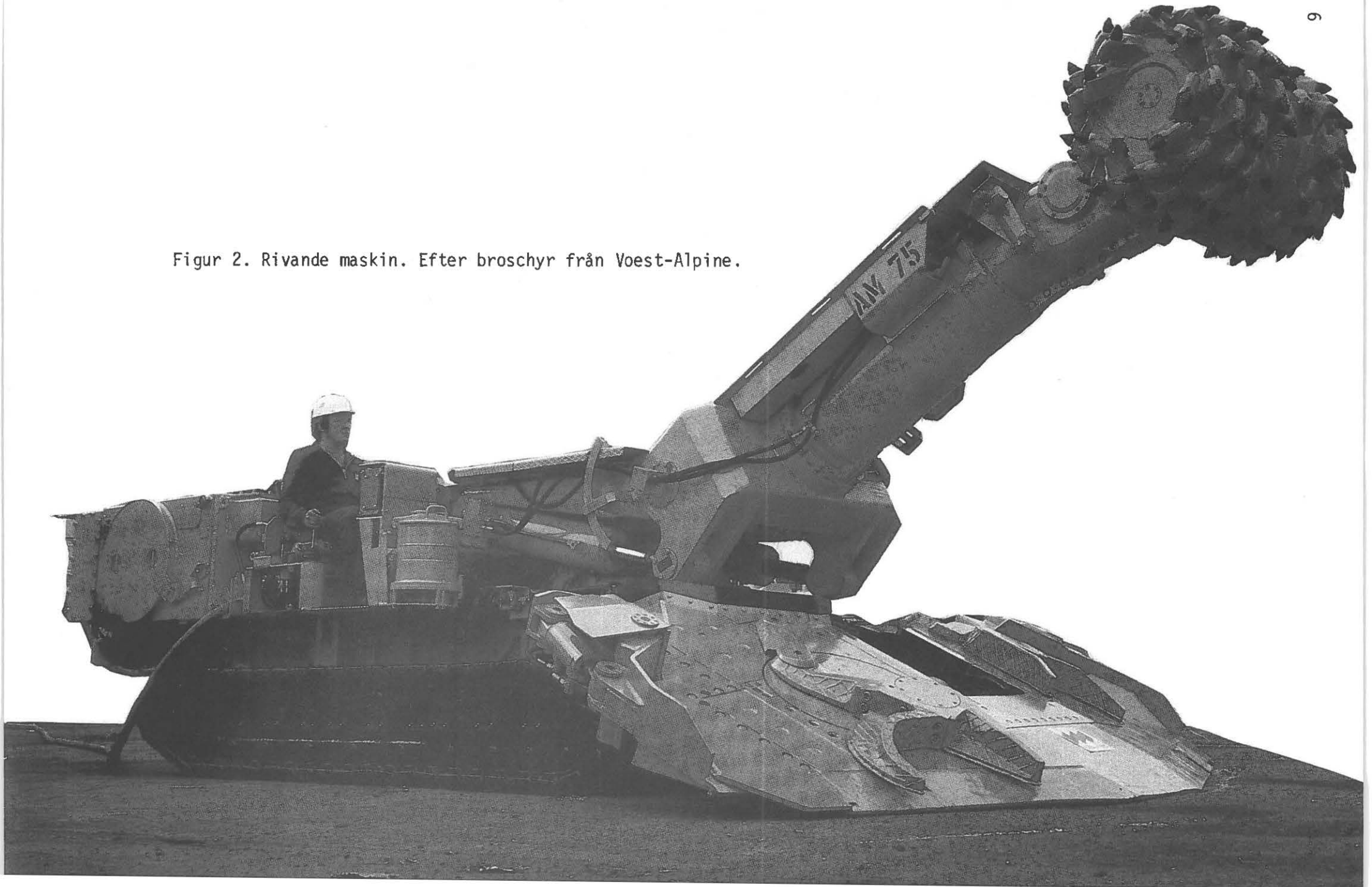


Figur 3. Trummaskin.

Trumman har mejslar över hela längden, varför totala antalet verktyg blir stort. Detta medför att denna maskin ej klarar hårdare bergarter, ty matningskraften per verktyg blir låg.



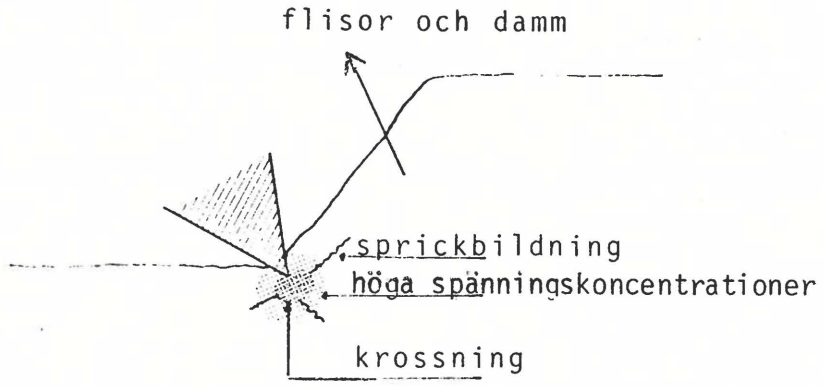
Figur 1. Malande maskin.



Figur 2. Rivande maskin. Efter broschyr från Voest-Alpine.

2.2 Sönderbrytningsförlopp vid fräsning

Förloppet när verktyget träffar berget kan uppdelas i tre faser; krossning, sprickbildning och borttransport av flisor och damm. Se figur 4.



Figur 4. Inträngningsförloppet vid fräsning.

Verktygen som åstadkommer sönderbrytningen av berget är utformade som mejslar eller spetsar, ("picks"). Då verktyget tränger in i berget utsätts detta för en tryckbelastning och brott uppstår. En helt klar bild av förloppet är svårt att få då verktygen samtidigt roterar. Mer om sönderbrytningsförloppet och fragmenteringsteorier kan läsas i "Introduktion till fräsande brytning". /18/.

3. PARAMETRAR INVERKANDE PÅ METODVAL

3.1 Allmänna synpunkter vid ett metodval

Valet av uttagsmetod begränsas av ett stort antal tekniska och ekonomiska faktorer samt naturligtvis även av miljöaspekter.

Redan i anbudshandlingen kan det vara bestämt vilken uttagsmetod som skall användas, alltså redan i ett mycket tidigt skede. Tiden mellan anbud och offert är sedan vanligtvis så kort att den inte medger ingående analyser om metodval.

Ett metodval styrs huvudsakligen av följande faktorer; enligt Gehring /3/:

a) Projektberoende
- längden av uttaget
- arean " "
- avståndet till överytan och till närliggande tunnlar, bergrum
- tillgängligheten
- ändamålet
- tillgång till energi
- projekttid och startdatum
- eventuell användning av den utbrutna bergmassan.

b) Geologiska
- kvalitet och mängd av bergarter
- lagertjocklek
- petrografin
- bergmekaniska egenskaper
- sprickighet
- vatten

Dessutom styrs valet av miljösynpunkter och entreprenörens förmåga att tillhandahålla rätt utrustning och kvalificerad personal samt möjligheten att använda utrustningen för andra projekt.

3.2 Tekniska begränsningar

3.2.1 Tunnelberoende

a) Profil
Förutom vid önskemål om helt cirkulär profil, kan fräsning användas vid alla profiler (från hästskoformade orter till fyrkantiga). Detta gäller dock endast för bommaskiner, då dess borrhuvud med hjälp av bommen kan styras i alla riktningar.

b) Tunnelns lutning
Eftersom matningskraften kommer från banden så är fräsmaskinerna ej lämpliga i branta uppåtlutande tunnlar. Vid drivning under sådana förhållanden kan emellertid maskinen spännas fast. Vanligtvis klarar maskinerna lutningar på $\pm 20^{o}$ och sidolutningar på $\pm 5^{o}$ utan extra åtgärder.

c) Kurvradier
Med borrning-sprängning klarar man alla krökningsradier. Detsamma gäller i princip även frästekniken i motsats till TBM som fordrar 200-300 m som minsta krökningsradie.

d) Area
Minsta erforderliga area är omkring 7 m^2. Vid mindre area måste ventilationen arrangeras speciellt. Största arean som kan fräsas ut i en uppställning är omkring 45 m^2.

3.2.2 Bergberoende

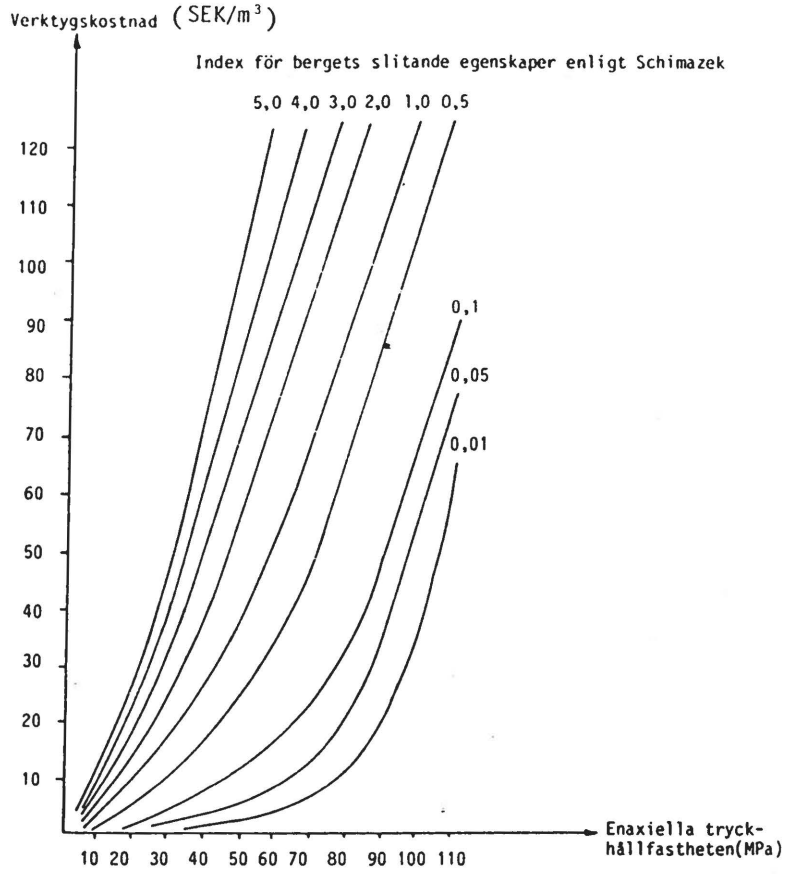
Den största begränsningen utgöres av bergets hårdhet, slitande egenskaper och stabilitet.

a) Bergets hårdhet
Bergets hårdhet uttrycks oftast med hjälp av tryckhållfastheten. Tryckhållfastheten ingår därför nästan alltid som en parameter vid testförfarande för att förutsäga indrifter. Vid fräsning är den tekniska begränsningen på bergets tryckhållfasthet omkring 150 MPa.

b) Bergets slitande egenskaper
Dessa är mycket betydelsefulla för livslängden på verktygen och därför också på totalekonomin. Slitageförmågan beror på petrografiska egen-

skaper som mängd hårda material, storleken på hårda mineral samt kornens hållfasthet och bindningsstyrka. Bergets slitageegenskaper ingår också som parameter vid tester.

Figur 5 visar hur verktygskostnaden påverkas av bergets slitande egenskaper (index enligt Schimazek /7/, se avsnitt Tester) och bergets tryckhållfasthet. Berg med index 5 är mest slitande och ger redan vid låga tryckhållfasthetsvärden höga verktygskostnader.



Figur 5. Verktygskostnadens (koniska spetsar) beroende av den enaxiella tryckhållfastheten och inverkan av bergets slitande egenskaper. Efter Gehring /2/. Kostnaderna är beräknade enligt gällande valutakurs hösten 1982, 2.50 SEK/DM.

c) Bergets sprickighet

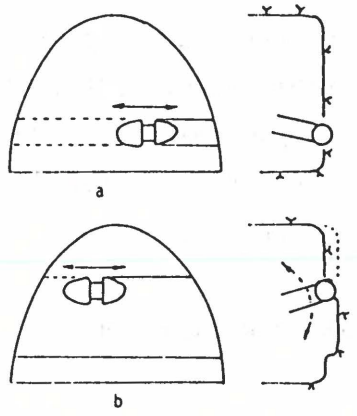
Generellt ökar uttagskapaciteten med antalet sprickor i berget. Tyvärr ökar även bergförstärkningsbehovet med sprickigheten. Vid mycket sönder-sprucket berg, där bergets stabilitet är låg, blir därför också in-driften låg.

d) Bergets stabilitet

Bergets stabilitet har en avgörande betydelse vid metodval. Frästeknik utmärks av hög flexibilitet och är därför mindre beroende av bergets stabilitet än fullortsborrning. Man kommer dessutom betydligt lättare åt att förstärka vid fräsning än vid fullortsborrning. Fräsning är skonsamt mot berget och kan därför vara att föredra vid dålig stabilitet (jmf borrning-sprängning).

3.2.3 Konstruktionsberoende

Uttagssättet vid fräsning kan indelas i två delar. Först gör man ett påhugg i ortgaveln. Detta utvidgas sedan enligt olika principer. Rivande maskiner fräser först en slits tvärs över ortgaveln och utvidgar denna till önskad profil, se figur 6.



Figur 6. Arbetsordningen vid fräsning med roadheaders består först av slitsfräsning (a) och sedan utvidgning (b). Efter Gehring /1/.

Uttagskapaciteten beror på vilken del som fräses. Vid lösare bergarter är kapaciteten störst när slitsen fräses. I hårdare bergarter är kapaciteten avsevärt lägre under utfräsning av slitsen än under utvidgnings-delen. Detta beror på att under utfräsning av slitsen så är flera mejslar i kontakt med berget vilket medför att matningskraften per mejsel minskar.

a) Rotationshastigheten
Hastigheten på fräshuvudet har naturligtvis en stor betydelse för indriften och slitaget på verktygen.

Vid ökad rotation ökar indriften. Värmeutvecklingen i verktygen kommer då också att öka ty friktionen blir större.(Hårdmetallverktyg bör ej utsättas för mer än 500^{o}C).

Vid hårdare bergarter bör hastigheten sänkas, ty kontakttiden per verktyg måste ökas. (I allmänhet varierar rotationshastigheten mellan 30 - 60 rpm).

b) "Bomhastigheten"
Genom att bommen förflyttas kommer verktygen att röra sig i en spiralformad bana. Spiralens lutning bestämmes av rotations- och bomhastigheten.

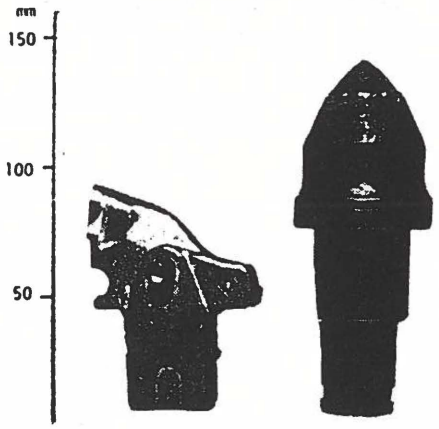
Då verktygen sitter i fasta lägen på huvudet kan sönderbrytningssättet endast varieras genom en ändring av rotations- och bomhastigheten. Vid hårdare bergarter bör bomhastigheten minskas.

c) Antalet verktyg (picks)
Den tillgängliga matningskraften borde, teoretiskt sett, fördelas till ett varierande antal verktyg beroende på bergmaterialet. Detta skulle emellertid innebära att man måste ha en stor uppsättning fräshuvuden tillgängliga för olika typer av berg. Så är inte fallet, utan man använder samma fräshuvud hela tiden under ett projekt.

Det finns dock maskiner där ett sådant byte kan göras i fält.

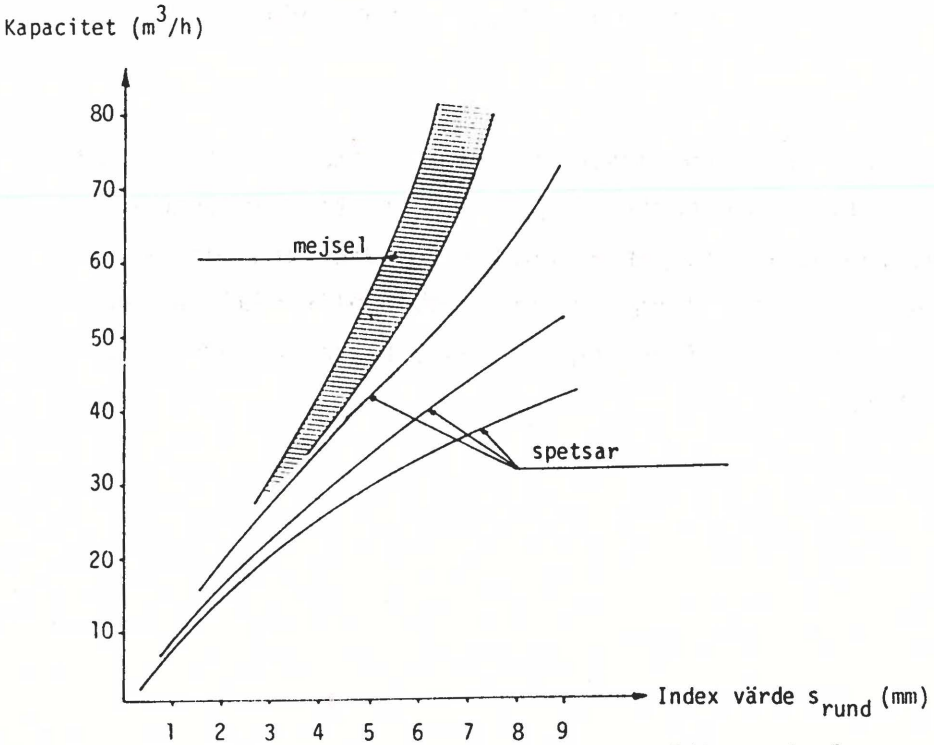
d) Olika slags verktyg

Man kan särskilja två olika typer av verktyg, mejslar och koniska spetsar s k "point attack picks", se figur 7.



Figur 7. Olika verktygstyper. Den vänstra är en mejsel medan de övriga är koniska spetsar av "point attack" typ.

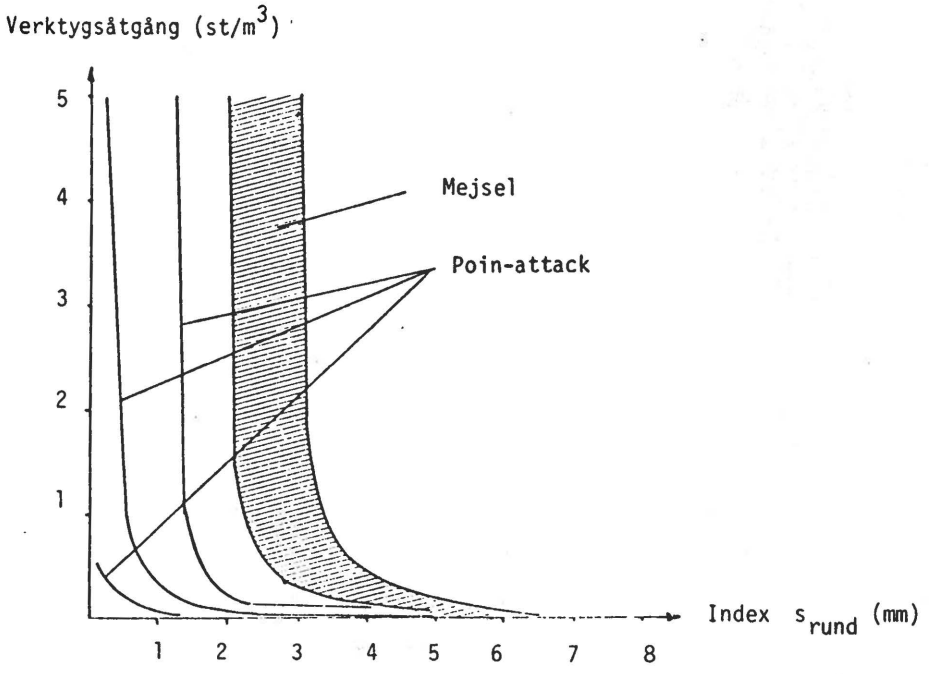
I figur 8 visas ett exempel på kapaciteter som kan uppnås med de olika verktygen som funktion av bergets hållfasthet (uttryckt i ett s-index, se sid 22). Valet beror också på bergets slitande egenskaper. Verktygen kan också slitas om skärdjupet är för litet så att hela mejseln inte kommer i kontakt med berget.



Figur 8. Kapaciteter som kan uppnås med olika mejseltyper vid varierande berghållfasthet. Berghållfastheten är uttryckt i indexvärden s_{rund}. Efter Gehring /1/.

e) Fräsdjupet

Fräsdjupet kan ändras så att det bäst passar bergarten. I sedimentär berggrund är detta väsentligt då fräsdjupet kan varieras för olika lager. Om fräsdjupet ej anpassas till berget ökar slitaget på verktygen. Figur 9 visar verktygsåtgången som funktion av bergets tryckhållfasthet (uttryckt i ett index "s").



Figur 9. Verktygsåtgången som funktion av s_{rund}. Efter Gehring /1/.

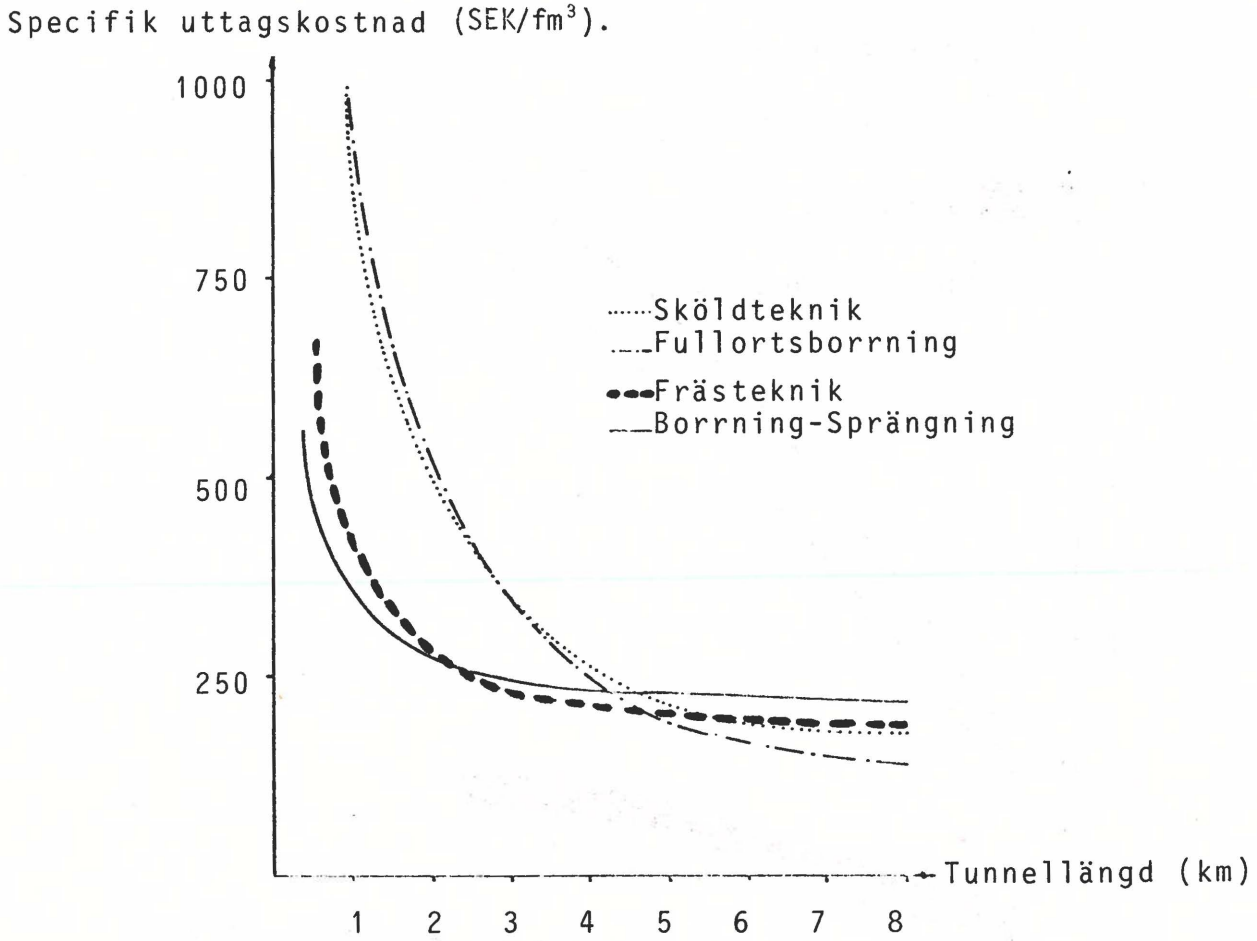
I hårdare bergarter bör spetsarna användas. Dessa monteras ofta med 50^{o} vinkel i förhållande till rörelseriktningen, och så att verktygen kan rotera fritt i verktygshållaren. Denna montering medför att verktygen automatiskt får en jämn förslitning, och på så sätt blir självvässande. Spetsarna blir mycket heta vid fräsning i hårdare bergarter och kyles därför ofta med vatten.

3.3 Ekonomiska begränsningar

Kostnaderna i figur 10-12 är beräknade under förutsättningen att utrustningarna avskrives på ett projekt. Priserna baserar sig på gällande marknadspriser år 1981 i Tyskland och med 10% årlig ränta. Kostnaderna är beräknade enligt gällande valutakurs hösten 1982, 2.50 SEK/DM.

a) Tunnellängder

Tunnellängd och tunnelarea spelar en stor roll vid val av uttagsmetod. Investeringskostnaden är i allmänhet högre vid mekaniserade uttagsmetoder än för borrning-sprängning varför ekonomin blir bättre vid ökade tunnellängder. Figur 10 visar uttagskostnaden som funktion av tunnellängden i bergarten märgel med en enaxlig tryckhållfasthet på 50-80 MPa (arean 26 m^2). Vid en tunnellängd under 2000 m är sprängning att föredra. Vid 4000 m är kostnaderna lika.



Figur 10. Uttagskostnaden som funktion av tunnellängden. Tryckhållfastheten: 50-80 MPa. Tunnelarean: 26 m^2. Efter Gehring /3/. Kostnaderna inkluderar maskiner, förbrukningsmaterial, energi och personal.

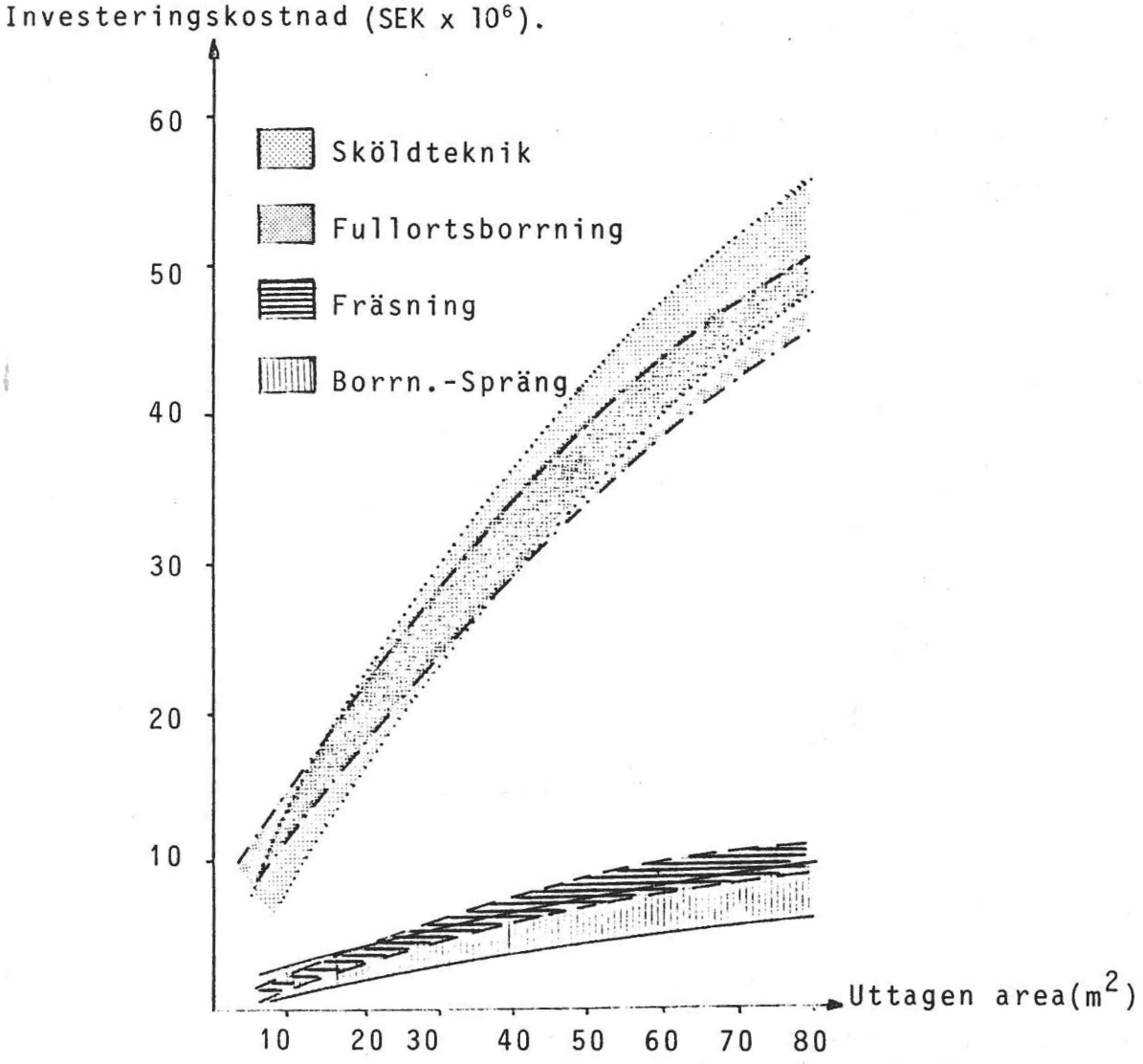
Överslagsmässigt kan man säga att den ekonomiska gränsen, dvs avståndet i km när fräsning blir aktuellt, är 0.5 - 0.8 x tunneldiametern /3/. The National Coal Board (N.C.B.) of Great Britain föreslår som ekonomisk regel att vikten av fräsmaskinen bör ej vara större än

10 ton/100 m, d v s en 80 tons maskin behöver åtminstone 800 m för att fräsning skall vara ekonomiskt /17/. Detta gäller emellertid vid gruvbrytning och kan knappast gälla vid anläggnings-tunneldrivning.

b) Arean

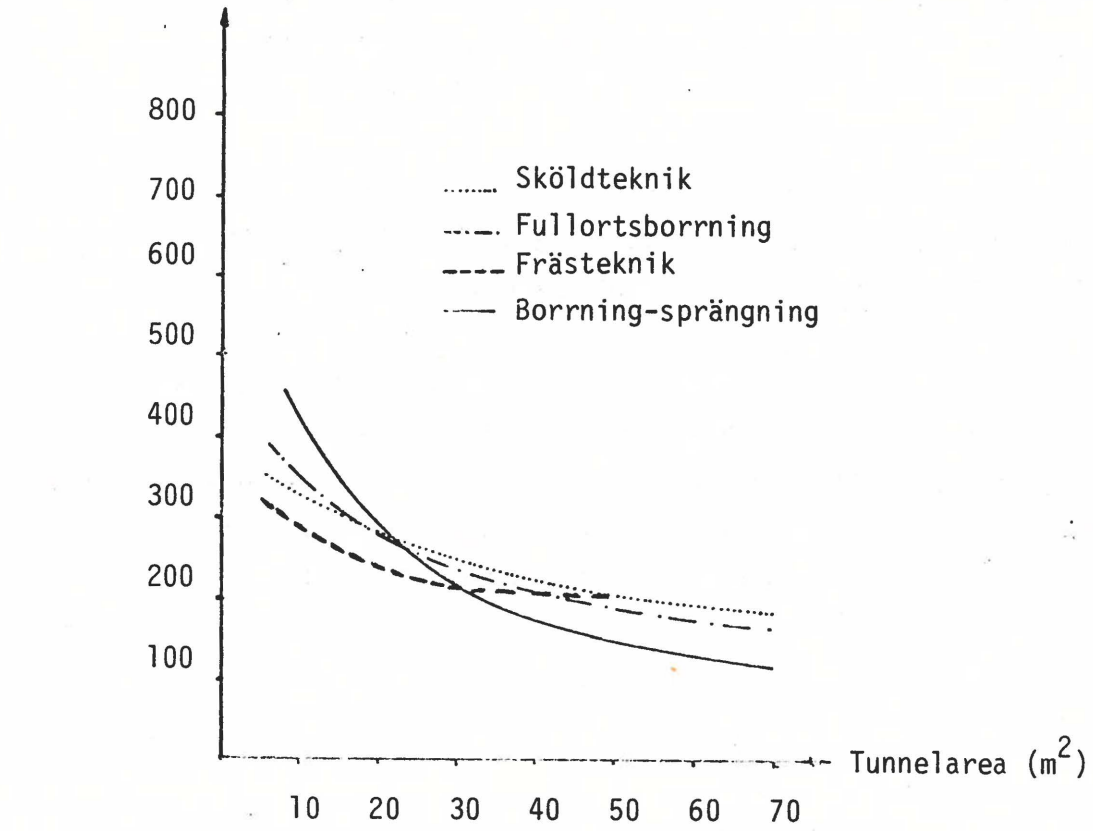
Investeringskostnaderna för olika uttagsmetoder beror i hög grad på arean av tunneln.

Figur 11 visar investeringskostnaderna som funktion av tunnelarean för några olika uttagsmetoder. Man ser här att investeringskostnaderna för fräsning är relativt låga.



Figur 11. Investeringskostnaden för olika uttagsmetoder som funktion av uttagen area. Efter Gehring /3/.

Figur 12 visar att uttagskostnaden för fräsning, relativt andra metoder, är lägst vid arean under 20 m^2 (bergarten märgel med tryckhållfastheten 50 - 80 MPa).



Figur 12. Specifika uttagskostnaden som funktion av tunnelarean vid olika uttagsmetoder. Efter Gehring /3/. Kostnaderna inkluderar maskiner, förbrukningsmaterial, energi och personal.

c) Tillgängligheten

För att hålla nere reparationstiden bör fräsmaskinen vara lättarbetad. Den bör vara uppbyggd i ett modulsystem som medger snabba byten av felande, utslitna delar.

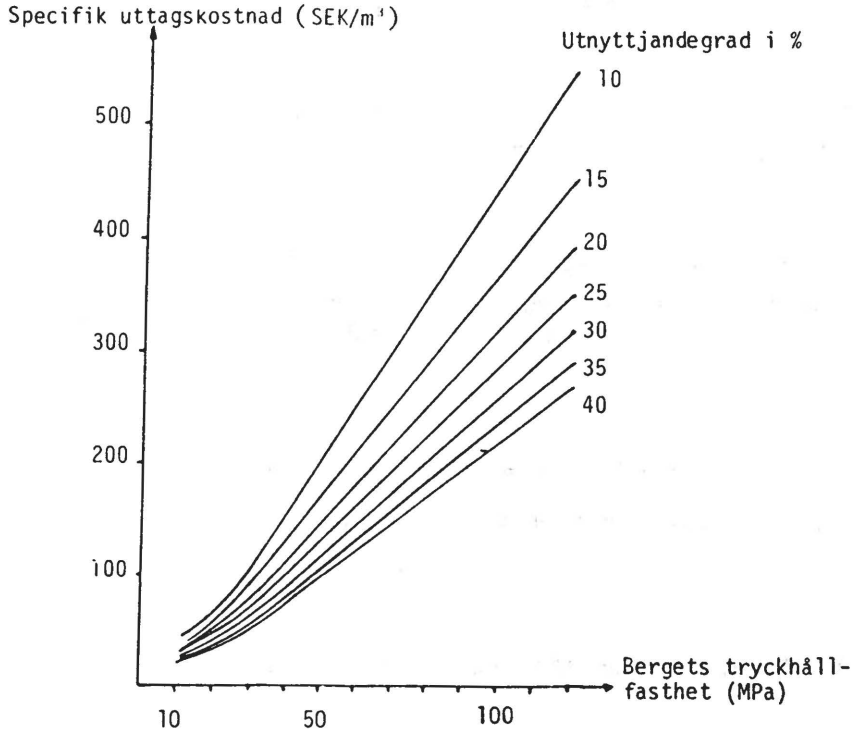
Vid inköp av fräsmaskin måste man lägga upp ett stort förråd av reservdelar, främst verktyg.

d) Utnyttjandegraden

Fräsmaskinens skiftkapacitet beror naturligtvis på utnyttjandegraden. Det påpekas ofta att frästeknik har en låg utnyttjandegrad, d v s maskinen jobbar bara under kort tid av tillgänglig tid. Resten av tiden går åt till bergförstärkning m m. Detta torde emellertid gälla alla uttagsmetoder i dåligt berg. Uttagstiden är låg och förstärkningstiden hög. En väl genomtänkt och mekaniserad bergförstärkningsmetod, ett bra underhåll, en god organisation och ett effektivt uttagnings- och transportsystem är en förutsättning för alla uttagsmetoder, inte minst frästeknik.

För att höja utnyttjandegraden kan utrustning för bergförstärkning monteras direkt på fräsmaskinen. Vid större areor kan bergförstärkning pågå samtidigt med uttaget från en separat utrustning.

Figur 13 visar uttagskostnadens (exkl installations- och mejselkostnad) beroende av bergets tryckhållfasthet vid olika utnyttjandegrader. Här framgår tydligt att uttagskostnaden blir hög vid en låg utnyttjandegrad. Om utnyttjandegraden kan fyrdubblas halveras uttagskostnaden. Vid tryckhållfastheter större än 30 MPa är kostnadsökningen linjär.



Figur 13. Utnyttjandegradens betydelse för den specifika uttagskostnaden vid varierande tryckhållfasthet. (Voest-Alpine AM-100) efter Gehring /2/. Kostnaderna är medelvärden för olika projekt och inkluderar priser för inköp (inklusive avskrivningar och ränta), reservdelar, förbrukningsmaterial, energi och personal. Kostnaderna är omräknade enligt gällande valutakurs hösten 1982, 6.60 SEK/$.

4. TESTER FÖR INDRIFTER OCH SLITAGE

För att kunna förutsäga om fräsning är möjligt, och i så fall bestämma, indrifter och slitage, gör man olika slags tester. Dessa är ofta företagsspecifika och därför finns många olika testförfaranden.

För den speciellt intresserade rekommenderas kontakt med maskintillverkarna och läsning av en rapport från LuH /18/. I rapporten beskrivs in-situ-tester, inträngningstester, tester som visar korrelationen mellan indrift och bergets sprickighet samt en metod där bergets draghållfasthet mäts indirekt genom att en kil pressas in i ett borrhål till dess att ett stycke berg lossnar. Draghållfastheten är proportionell mot $F/(d^2+rd)$, där F är maximal kraft på kilen, d = håldjupet och r = hålradien. Detta kallas in-situ strength index ISSI och stämmer bra med den i fält uppmätta specifika energiförbrukningen vid fräsning /10/.

I denna rapport kommer 2 st testmetoder att närmare beskrivas, McFeat-Smiths och Voest-Alpines metoder.

4.1 McFeat-Smith

Denna test är vanlig hos engelska maskintillverkare. Genom att pressa in en kon i en provbit kan den s k specifika energin (S.E.) laboratoriemässigt bestämmas /18/.

Den specifika energin (S.E.) erhålles ur följande ekvation:

$$S.E. = -0.65+0.41\ CI^2+1.81k^{1/3} \pm 2.6\ (MJ/m^3)$$

där CI = ett index för inträngningsförmågan. Den uttrycks i en skala från 0-6, där 0 är mycket löst berg och 6 mycket hårt.

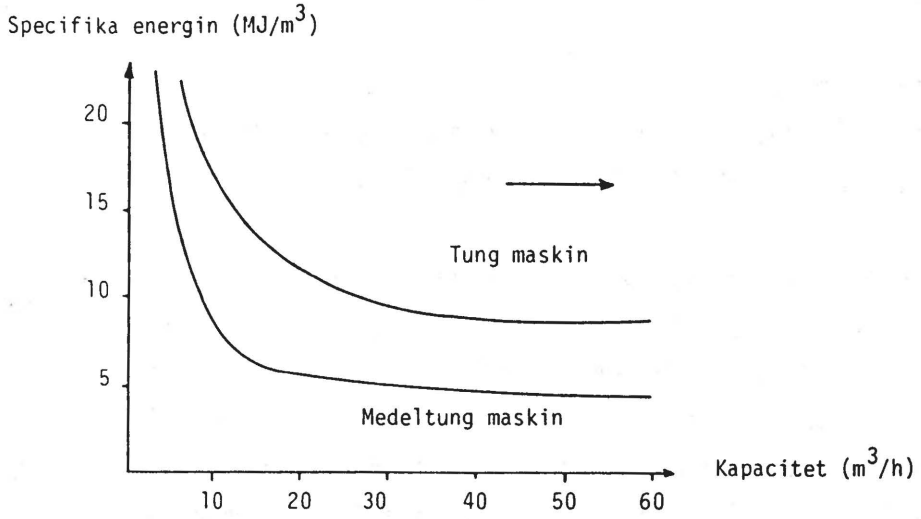
k = en plasticitetskoefficient som definieras genom

$k = (H_2 - H_1)\cdot 100/H_1$ i % där

H_2= slutlig hårdhet efter upprepad provning 20 ggr i samma punkt

H_1= genomsnittsvärde för hela provbiten

Figur 14 visar hur den specifika energin förhåller sig till verklig indrift i m^3/h /15/.



Figur 14. Specifika energin som funktion av kapaciteten.
Efter McFeat-Smith /15/.

Slitaget bestäms ur ett samband mellan Shore's hårdhet, sammanhållningskraften mellan mineralkornen och kvartsinnehållet. Mellan detta laboratorievärde och det verkliga slitaget (verktyg/m^3) råder ett linjärt förhållande.

Rock Type	Cut-ting Indi-ces		Predicted Performance			Machine Used	Actual Performance
	SE MJ/m³	CW mg/m	C.R. m³/h	P.C.° Picks/m³	Performance		
Mudstone	5.3	0.3	12.0	0.17	Easy cutting	Light	As predicted
Ciliceos Sandstone	20.5	1.64	1.5	0.95	Not applicable	Light	As predicted. C.R. =3.7m³/h. Machine withdrawn.
Mudstone	5.1	0.39	23.0	0.23	Easy cutting	Medium	As Predicted. C.R.=20 m³/h.
Calcareous Mudstone	5.8	0.58	16.0	0.34	Easy moderate	Medium	As Predicted. C.R.=15 m³/h.
Silty Seatearth	8.1	1.7	10.5	1.0	Moderate	Medium	High cutting rate (18m³/h). Due to close jointing.
Sandstone	8.3	1.98	10.1	1.14	Moderate	Medium	As predicted.
Limestone Conglomerate	17.0	0.5	4.5	0.29	Very difficult	Medium	As predicted. Marginal cutting impact tool damage. Lower speed motor improved cutting to 5 m³/h.
Siliceous Sandstone	12.6	5.34	7.3	3.1	Difficult	Medium	Cutting performance reduced by exceptionally high tool wear. Machine withdrawn.
Silty Mudstone	7.9	0.3	40.0	0.17	Easy cutting	Heavy	As predicted. C.R. =36m³/h. P.C.=0.12 picks/m³.
Anhydrite	25.0	0.34	4.0	0.2	Difficult	Heavy	C.R. as predicted. High tool consumption due to impact shattering.
Limestone	29.1	0.88	3.5	0.51	Very difficult	Heavy	Cutting performance very poor as predicted. High tool consumption due to impact shattering.
Siliceous Sandstone	26.4	4.01	4.0	2.32	Very difficult	Heavy	As predicted. Very high pick consumption.

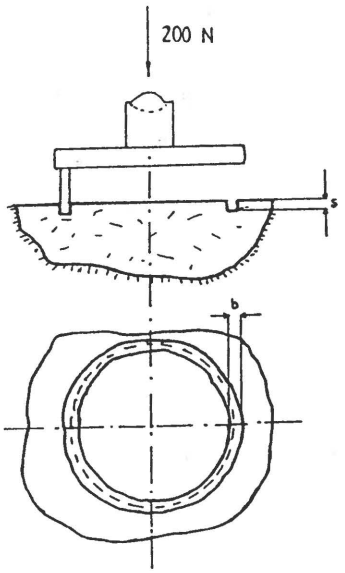
Tabell 1. Teoretiska och verkliga värden enligt McFeat-Smith /13/.

Tabell 1 visar exempel på hur god överensstämmelsen mellan teoretiska och verkliga värden är. I de flesta fall är den som synes god /13/. Högt verktygsslitage leder ofta till att metoden måste ersättas med borrning-sprängning.

4.2 Voest-Alpine

4.2.1 Maximalt uttag (m^3/h) /8/

En knytnävstor provbit av berget gjuts in i en 100 x 100 mm betongkub. Kuben klyvs, och man får två likadana ytor. En belastad mejsel får sedan rotera runt provet med hastigheten 2 m/sekund och under 5 sekunder varefter spårets djup, (s), och bredd, (b), mätes i fyra punkter 90^o från varandra för att kompensera eventuella skillnader i berget, se figur 15. Detta ger 2 index, s_{rund} (mm) och b_{rund} (mm).



Figur 15. Testmetod för maximalt uttag, enligt Voest-Alpine. Efter Gehring /4/.

Dessutom mäts volymen av det lossbrutna materialet. Med hjälp av s_{rund}, d v s spårets djup, kan därefter maximalt berguttag (i m^3/h) bestämmas enligt

$$L_s = A \cdot s_{rund} \cdot B$$

där A och B är värden som beror på vilken utrustning som väljs.

Bland de faktorer som påverkar index kan nämnas
- lagertjockleken
- hållfastheten hos olika lager
- avstånd mellan svaghetspunkter
- sprickytornas residuala skjuvhållfasthet

4.2.2 Bergets slitageegenskaper

Bergets slitageegenskaper vill man veta för att kunna förutsäga verktygskostnaden.

Voest-Alpin anger två sätt att mäta slitageegenskaperna:

a) Schimazek's metod /7/
Här bestäms en koefficient A på basis av petrografiska studier. Genom att mikroskopiera ett tunnslip kan man bestämma det procentuella innehållet av hårda mineral V (relaterat till kvarts) samt mäta medelvärdet på kvartskornens diameter. Tillsammans med draghållfastheten enligt Brasilientest (σ_t), fås slitagekoefficienten T enligt

$$T = \frac{V \cdot Ø \cdot \sigma_t}{100}$$

Tabell 2 visar mineralens hårdhet relativt kvarts.

Mohs hårdhetsskala	Hårdhet relativt kvarts
1	0
1.5	0
2	0.021
2.5	0.015
3	0.036
3.5	0.038
4	0.042
4.5	0.047
5	0.055
5.5	0.16
6	0.31
6.5	0.55
7	1

Tabell 2.

Metoden kan ej användas om kvarts saknas och metoden är dessutom ganska arbetskrävande.

b) VVUU-Radvanice-metod /6/

Provet prepareras på liknande sätt som vid bestämning av s_{rund}. Man låter 5 st belastade stålpinnar rotera i olika banor runt provet. Stålpinnarnas vikt bestäms före och efter testet och med hjälp av viktsskillnaden ΔM erhålles följande formel för slitaget

$$T_{Radv.} = \frac{\Delta M}{15}(mg/m)$$

(Noggrannheten är 0.1 mg och stålpinnarna skall vara 20 (±5) mm långa och 3.5(±0.3) mm i diameter. De belastas med 100 N och får rotera så att den sammanlagda sträckan blir 15 m). Denna metod medför en mer direkt mätning av slitaget och har inte samma begränsningar som Schimazek's.

5. PRAKTISK ANVÄNDNING

5.1 Användningsområden

Uttag med fräsande brytning i tunneldrivning sker främst på följande sätt: /5/

- fullprofilfräsning
- lång takort
- kort takort
- konturfräsning

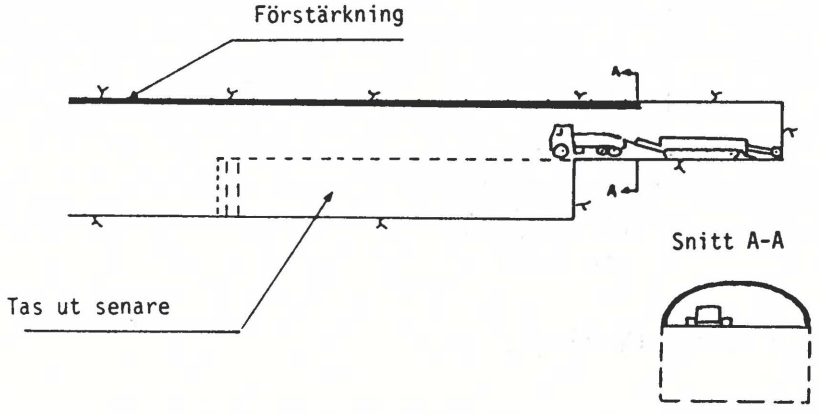
5.1.1 Fullprofilfräsning

Tunnelarean begränsar tillämpningen av denna teknik. De på marknaden vanligaste fräsmaskinerna klarar att fräsa ut max 45 m^2 tunnelarea från samma uppställning. (Räckvidden uppåt är den största begränsningen). Vid fullprofilfräsning måste bergets hållfasthet vara bra.

5.1.2 Lång takort

Vid större tunnelareor och under förutsättning att bergets hållfasthet är bra (ty man frilägger hela taket på en gång),kan man tillämpa denna teknik. Förfarandet framgår bäst av figur 16. Först drivs en lång takort som förstärkes, sedan tas resten av arean ut genom pallsprängning eller fräsning.

Vid drivning av Milchbuck-tunneln i Zürich valde man att tillämpa denna teknik. Se sid. 46.



Figur 16. Berguttag med lång takort. Efter Gehring /5/.

5.1.3 Kort takort

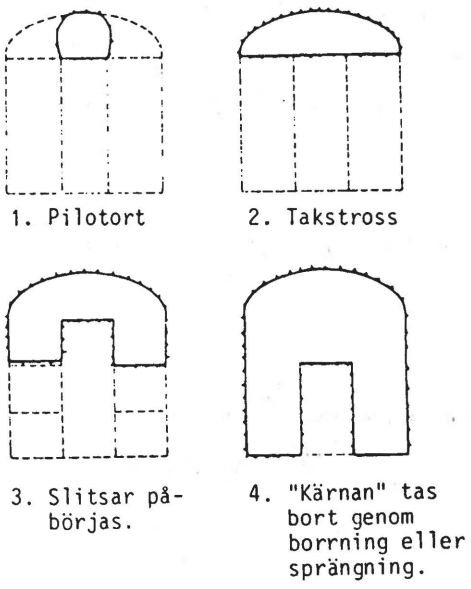
Vid stora tunnelareor > 30 m^2 och vid dåliga bergförhållanden kan man sätta ett fräshuvud på en lång grävmaskinsarm och ta ut en kort 2 - 3 m lång takort, som därefter förstärks varpå resten av arean tas ut. Vid mindre areor kan man använda en s k fräslastare. Fördelen med denna teknik är att fräsmaskinen under hela uttaget står kvar på sulan, och därifrån genom bomförlängning når att ta ut en kort takort.

5.1.4 Konturfräsning

Konturfräsning används vid mycket stora areor i dåligt berg. Tekniken framgår av figur 17.

En pilotort drivs och strossas ut varpå taket förstärks. Sedan gör man slitsar längs ytterprofilen, förstärker väggar och tar slutligen ut kärnan i mitten.

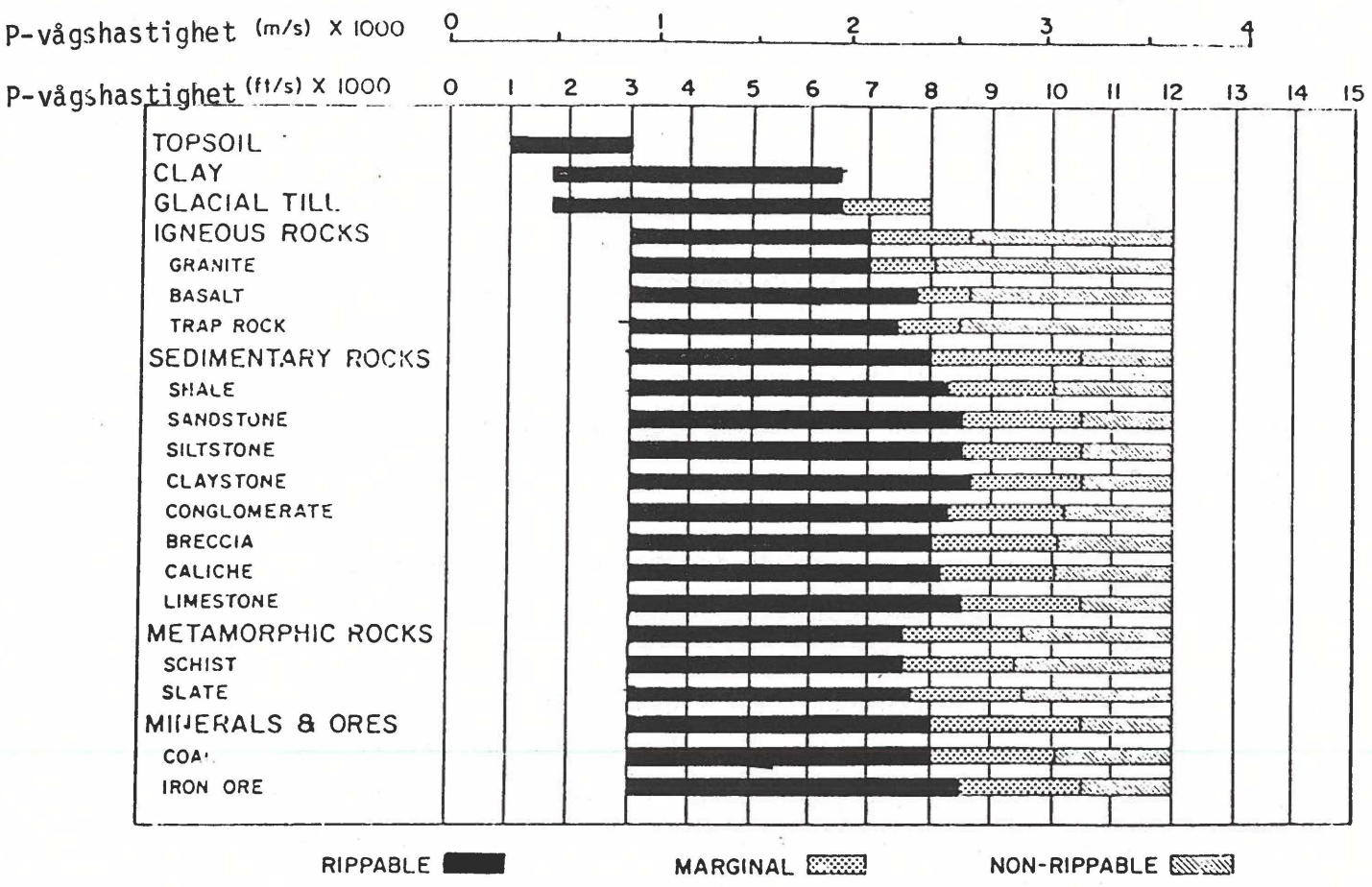
Vid slitsuttaget måste man använda mycket kompakta maskiner för att få plats. I starkare berg kan man fräsa ut hela takprofilen på en gång.



Figur 17. Konturfräsning. Efter Gehring /5/.

5.1.5 "Ripping"

Ofta kombineras fräsning med "ripping". Takorten fräses ut och sedan rippar man resten av pallen med hjälp av en schaktmaskin försedd med en "mejsel" som river sönder berget. Tarkoy /25/ visar att man med hjälp av seismik kan bestämma vilka bergarter som kan tas ut med "ripping". Se figur 18. /25/.



Figur 18. Användning av ripping i olika bergarter. /25/.

5.2 För- och nackdelar med olika frästyper

5.2.1 Trummaskiner

Dessa användes enbart i lösa bergarter med σ_c < 35 MPa. Maskinerna är mycket dyra och är därför lönsammast vid stora berguttag, typ kolbrytning /17/.

Huvudet består av upp till 250 verktyg, vilket medför att materialet som utbryts blir väldigt fint och ger upphov till mycket damm.
Fräsning med trummaskiner medger inte bomrörelser i sidled. När man fräser i hårdare bergarter, t ex i kalksten, måste trummans verktyg sitta tätt ty annars bryts ej berget bort mellan verktygen. Den utfrästa arean blir rektangulär.

5.2.2 Bommaskiner

Man brukar tala om 1:a, 2:a och 3:e generationens bommaskiner /17/.

Första generationen var lätta maskiner, 5 - 17 ton och klarade av berg med tryckhållfastheter 40 - 50 MPa. Dessa användes främst vid gruvbrytning.

Den andra generationen väger 20 - 45 ton och klarar av berg med tryckhållfastheter upp mot 84 MPa.

Den tredje generationen kan indelas i tre viktklasser, supertunga > 60 ton (för areor över 20 m^2), tunga 35 - 60 ton och medeltunga 15 - 35 ton. De medeltunga användes i bergarter med tryckhållfastheter mellan 10 - 84 MPa. (Berg som har en tryckhållfasthet > 50 MPa måste ha en låg draghållfasthet och vara söndersprucket för att fräsning skall vara ekonomiskt). Bommaskinernas kapacitet ligger ofta mellan 10 - 100 m^3/h.

A. Malande maskin

Vid denna metod, där alltså borrhuvudets rotationsaxel är parallell med bommen, måste maskinen vid fräsning i hårdare berg, spännas fast mot väggen. Detta beror på att skärkraften huvudsakligen är riktad i sidled så att maskinens tyngd ej kan tillgodogöras. Fastspänningen tar tid och medför att maskinen blir inflexibel. Den erforderliga matningskraften kommer från banden /16/, /17/.

Maskinen måste också spännas fast vid fräsning i höga och breda tunnlar. Dosco har en maskin med två borrhuvuden som roterar mot varandra. Med denna lösning behöver maskinen inte spännas fast.

Vid fräsning med malande maskin kastas berget åt sidan vilket speciellt i "blöta" tunnlar gör det mer svårlastat. Det sönderfrästa berget vill lätt sköljas ut vid sidan om maskinen och bakåt i tunneln.

En fördel med den malande maskinen är den enkla konstruktionen av kraftöverföringen. Maskinen används med fördel vid selektiv brytning av typ kolflötsbrytning ty borrhuvudet är smalt. Påhugget kan göras där det passar bäst. Utförandet av borrhuvudet och mängden verktyg varierar med tillverkaren.

Nästan alla engelska maskiner är malande maskiner.

B. Rivande maskin

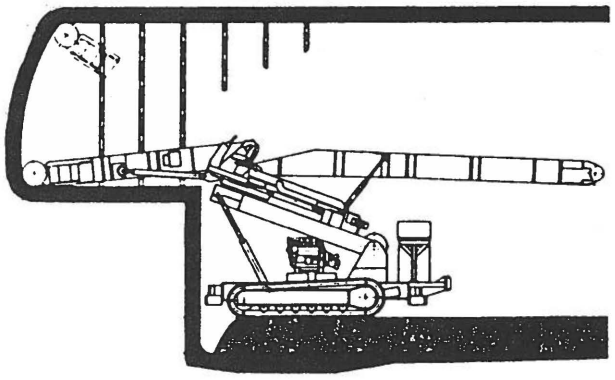
Här är borrhuvudets rotationsaxel vinkelrät mot bommen
Maskinen behöver ej fastspännas, då skärkraften är i bomriktningen och maskinens vikt tjänstgör som motkraft.

Under utfräsning av slitsen, se kapitel 3.2.3, fordras en hög matningskraft, högre än för motsvarande del med den malande maskinen. (Slitsens djup brukar bli omkring 2/3 av borrhuvudets diameter). Matningskraften kommer i detta fall från banden och varierar mellan tillverkarna från 100 - 1200 kN (10 - 120 t). Några fabrikat har teleskopbom vilket medför längre räckvidd och matning med bommen (förekommer även hos malande maskiner). Vid utvidgning av slitsen behövs ej så hög matningskraft utan i stället bromsas aggregatet fast och matningskraften beror av maskinens vikt och bommens rörelse /16/, /17/.

Rivande maskiner kastar det utfrästa berget rakt ner, vilket medför att 80% av allt berg hamnar i krafslastaren.

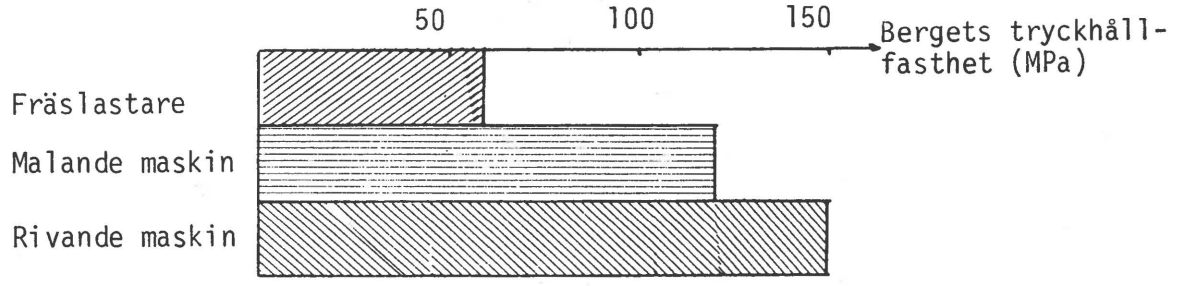
Anledningen till att maskinen kan fräsa i hårda bergarter är att matningskraften koncentreras, beroende på borrhuvudets utformning, till ett fåtal verktyg.

Fräslastaren är en speciell typ av rivande maskin, se figur 19. Här sitter fräshuvudet längst ut på transportanordningen och medför att berget lastas direkt på transportören. En fräslastare är därför speciellt lämplig vid uttag av kort takort. Se pkt 2.3.3. /9/.



Figur 19. Fräslastare. Efter Unger /9/.

Figur 20 visar överskådligt den tekniska begränsningen hos de olika typerna.



Figur 20. Begränsning i bergets tryckhållfasthet för olika frästyper. Efter Gehring /5/.

Rivande maskiner kan användas i berg med en högre tryckhållfasthet än malande maskiner.

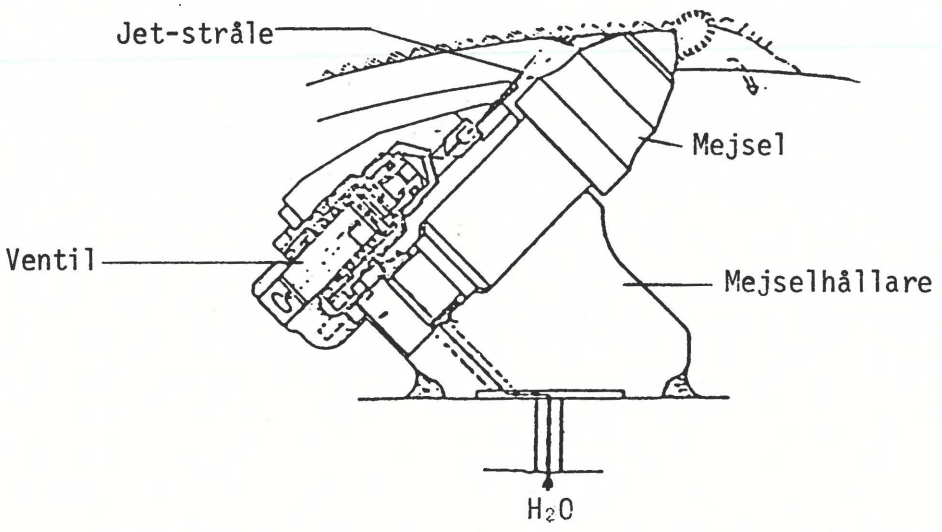
5.3 Speciella problem

5.3.1 Berget

Även om det tekniskt är möjligt att fräsa bergarter med en tryckhållfasthet upp mot 150 MPa är det knappast ekonomiskt.

I bergarter som har en tryckhållfasthet på mer än 70 MPa och som dessutom sliter mycket på verktygen kan det vara nödvändigt att övergår till borrning-sprängning. Om man vet att sådant berg skall passeras kan fräsmaskinen utrustas med borrigg. Denna kan då också användas vid bergförstärkning till att borra injekterings- och bulthål. Fräsmaskinen bör också utrustas med speciella mejslar för hårt berg. I speciellt dåligt berg kan drivningen underlättas genom ett slags "gående" sköld som sätts upp över maskinen. På så sätt förhindras nedrasningar och utnyttjandegraden kan höjas /18/.

För närvarande pågår forskning kring vattenjet /2/ och dess inverkan på kapacitet och slitage. Genom att spruta vatten med högt tryck (150 - 200 bar) mot berget underlättas sönderbrytningen, verktygen kyls och slitaget på verktygen minskar. Dessutom reduceras dammningen och risker för explosioner vid fräsning i t ex kol minskar. Vattenåtgången är låg ty vattnet sprutar enbart när verktyget är i kontakt med berget, se figur 21.



Figur 21. Vattenjet vid fräsning.

5.3.2 Dammet

Det bildas mycket damm vid fräsning. Dammet bekämpas med stora dammsugare dit dammet sugs direkt från borrhuvudet, eller genom en speciell ventilationsteknik som medför att en luftvägg bildas, se figur 22 /2/.

Tabell 3 visar hur mycket dammet kan minskas om man använder vattenjet.. Försöken är gjorda i provbänk /2/. Svenskt gränsvärde enligt AFS 1981:8 för totaldammet är 10 mg/m^3. (Finns kvarts är gränsvärdet för respirabelt damm 0.1 mg/cm^3).

Operating Condition	fine dust concentration	coarse dust concentration
without integrated water jetting system (mg/cm^3)	70.1	1075.6
with integrated (mg/cm^3) water jetting system	11.3	85.2
reduction of dust concentration (%)	83.9	92.1

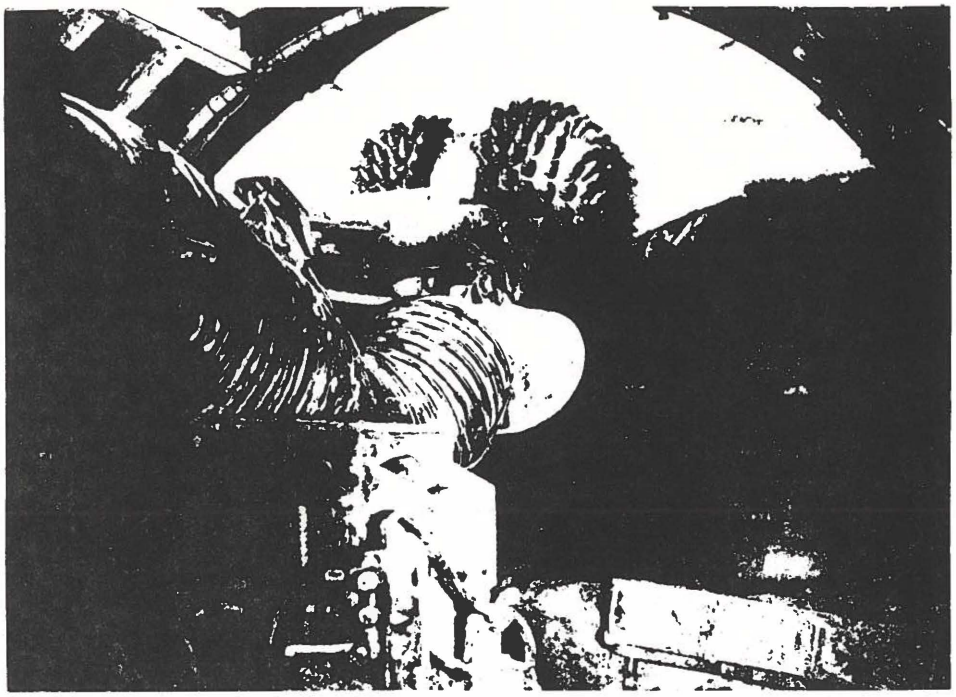
Tabell 3.

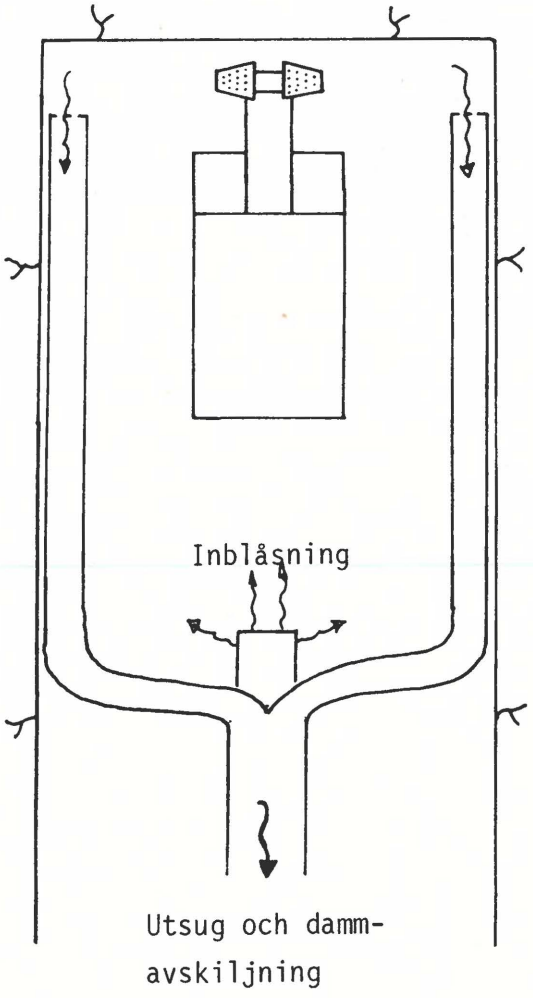
Dammet kan också bekämpas genom vattendysa eller genom att använda kylvattnet till verktygen. Vattnet passerar då en kanal genom verktyget och sprutas därefter ut mot berget. I vissa bergarter kan ej vatten användas. Då blir naturligtvis kraven på god ventilation extra höga. P g a den stora värmeutvecklingen som då uppstår i verktygen bör fräsning begränsas till mindre hårda bergarter (tryckhållfasthet < 40 MPa).

Om en genomgående pilotort har drivits kan denna användas som ventilationskanal.

5.3.3 Vatten

Eventuella vatteninbrottsproblem får stor betydelse vid mekaniserade uttagsmetoder. Motorer måste kunna arbeta i vatten och maskinen kunna förflytta sig utan att köra fast i lervälling. Generellt bör man välja en tung maskin som bättre klarar sådana förhållanden.





Figur 22. Dammbekämpning vid fräsning.

5.4 Marknadsöversikt

Det finns en uppsjö tillverkare av fräsmaskiner varav de flesta är europeiska. Tabell 4a, b visar en marknadsöversikt över fräsmaskiner och deras arbetssätt samt viktiga data. Tabell 4a visar trummaskiner, medan tabell 4b visar bommaskiner och sköldmaskiner. Varje tillverkare har ett brett program av olika tunga maskiner. Marknadens för närvarande största och kraftigaste bommaskin har en kapacitet på 1000t/h. Maskinen är då försedd med två bommar (AEC Inc). En speciellt intressant maskin, som också tillverkas av AEC i USA, medger byte i fält av hela borrhuvudet, "Super Roc Miner".

Manufacturer Model	Weight t	Cutter kW	Total kW	Cutter type	Forward thrust t	Down thrust t	Cut height min/max m	Cut width m	Ground loading bars	Travel speed m/min sump-max.	Load system
Jeffrey Mining Machinery Division, Dresser Industries, 274 East First Ave., Columbus, Ohio 43216, U.S.A.											
120 HR "Heliminer"	59	2 x 205/221*	410	Gear drive Helix pattern	46	25	2.4/3.7	3.3/3.9/4.7	2.3	2.1-37	GA/FCC
Joy Manufacturing Company, Henry W. Oliver Bldg., Pittsburgh, Pennsylvania 15222, U.S.A.											
12 HM 9	59	2 x 115/130	400	Gear drive R/V chain	45	26.4	1.7/4.6	3.3	1.9	2.5-15	GA/FCC
Lee Norse Company (Ingersoll-Rand), PO Box 2863, Pittsburgh, Pennsylvania 15230, U.S.A.											
LN 800	41-48	2 x 105/139	405/470	Gear drive Two-piece shaft	33/40.5	22.1/22.7	1.4/4.0	2.8/3.1	1.5	0-21.3	GA or disc FCC
National Mine Service Company, 4900/600 Grant Street, Pittsburgh, Pennsylvania 15219, U.S.A.											
NMS 5012	47	2 x 150	462	Shaft drive Canted drums			1.5/3.7	2.6/3.3	2.1	2.6-20.7	GA/FCC

Tabell 4a. Trummaskiner /16/.

Manufacturer Type	Weight approx. t	Cutter cont. kW	Total power kW	Cutter type*	Tractive effort max. t	Slewing thrust max. t	Cutting height min/max m	Cutting width min/max m	Ground loading bars	Operating gradient max. degr.	Travel speed m/min	Loading system§
AEC Inc., 531 E. Marylyn Ave., State College, Pennsylvania 16801, U.S.A.												
115 Roc-Miner	12	41	86	T	8.2	1.9	1.6/3.81	1.9/4.62	0.6	18°	0-15.3	G/SW + SC
140H Roc-Miner	20	112	187	I/T	13.6	3.1	1.6/4.2	1.9/5.56	0.8	18°	0-5.5	G/SW + SC
265HR Hard Roc-Miner	27	123	198	I/T	18.4	5.0	1.6/4.11	2.1/5.58	1.1	18°	0-15.3	G/SW + SC
H265H Hard Roc-Miner	28.5	123	198	I/T	19.4	5.0	2/4.49	2.1/5.56	1.1	18°	0-15.3	G/SW + SC
L330 Super Roc-Miner	41.5	160	327	I/T	28.2	10	2/4.09	2.4/5.61	1.1	18°	0-15.3	G/SW + SC
330 Super Roc-Miner	51	160	327	I/T	34.6	10	1.6/4.55	2.4/6.01	1.2	18°	0-15.3	G/SW + SC
H330 Super Roc-Miner	75	160	327	I/T	51	14	2.2/6.0	3.8/9.03	1.4	18°	0-15.3	G/SW + SC
SH330 Super Roc-Miner	100	300	467	I/T	68	20	3.0/7.00	4.4/9.1	1.6	18°	0-10	G/SW + SC
Anderson Strathclyde, 47 Broad Street, Bridgeton, Glasgow, Scotland.												
Boom Miner	21	60	120	I	13.2	3	1.8/3.6	2.4/3.8	1.4	10	10.0	FC + SC
RH22	35	90/112	180/224	I	30	5	2.3/5.0	3.6/5.0	1.56	14	8.6	G + SC
RH 1/4	66	112	224	I	55	10	3.6/5.6	4.9/5.6	1.47	14	10.3	G + SC
Shield	15 + shield	49	98	I	var	3.5	2 m-3.5 m diam.		na	14	n/a	Scroll + SC
Shield	22 + shield	49	115	I	var.	3.5	3.5 m-5.5 m diam.		na	14	n/a	G + SC
Shield	30 + sheild	90	180	I	var.	6.0	4.5 m-6.5 m diam.		na	14	n/a	G + SC
Excavator mounting	3/5	49/90	na	I	var.	3.5/5	6/9.5	8/9.5	na	var.	var.	Loader
Dosco Overseas Engineering Ltd., Ollerton Rd., Tuxford, Notts. NG22 0PQ, England.												
Mk 2A	23	37-67	93-150	I	16	3.5	1.7/4.8	3/6.3	1.3	14	7.2	SC
SL 120	33	82	164	I	26	7.8	2/4.3	2/4.1	1.3	14	—	G + SC
Mk 2B	39	82	194	I	26	5.5-7.7	2/4.3	3.1/5.8	1.2	14	11.8	SW/G + SC
LH 1300	44	223	400	I	13	2.6	1.5/5.5	3.0/5.5	1.3	—	—	G + SC
Mk 3	71	142/186	299	I	41	16	2.6/4.4	4.1/6.5	1.2	14	1.5/9.5	SW/G + SC
TB 600 (twin boom)	82	2 × 224	746	I	74	10	3/4.1	4.1/6.5	1.4	14	1.4/29	SW/G + SC
TB 2000 (twin boom)	51	2 × 224	671	I	41	10	1.5/2.9	4.1/6.7	1.3	14	—	G + SC
TM 1800 (shield)	n/a	48.5	104	I	12 (thrust)	3.3	1.8-5.2 diam.		n/a	n/a	n/a	various
SB 600 (shield)	n/a	142	198	I	74 (thrust)	10	5-8 diam.		n/a	n/a	n/a	various
Eickhoff, PO Box 629, 4630 Bochum 1, F.R.G.												
ET-160	66	160	320	I/T	66	12	2.5/5.2	4/7.1	1.4	15-20U/15D	2.3/8.5	G/Rakes + SC
also ET-160K articulated boom.				T								
Machinoexport, 117330 Moscow V-330 (Mosfilmovskaya 35), U.S.S.R.												
GPK	18	55	175	I			1.8/3.6	2.6/4.7		+10—25	6.8	G + SC
4PP2	40	105	230	I			2.6/4.5	3.6/6.2	1.1	10	2	G + SC
Mannesmann-Demag, Wolfgang-Reuter-Platz, 4100 Duisburg 1, F.R.G.												
VS3	63	160/200	265	I	40	7-9	2.4/5	4.2/6.9	1.45	+15/—12	3.5/7	Twin FC
VS 3/2	75	160/200	300	I/T	40/track	7-9	2.7/5	5.4/6.9	1.25	18	8.5	Rakes + SC
VS4 (gantry)	50 + 45	132/200	300	I/T	46	7-9	3.8/4.7	5.2/6.8	1.0	18	8.5	Rakes + SC
Excavator mounting		160	n/a	I	varies	7-9	4.7/8.9	4.8/10	n/a	n/a	32	Separate
Paurat, 4223 Voerde 2 (Friedrichsfeld), F.R.G.												
E 169	45	100	185	I	18	6.5	2.2/4.4	3.0/5.6	1.25	16	9.3/18.6	G + SC
E 195	42	170	263	I	16	7.5-9.5	2.2/4.2	3.0/5.2	1.25	16	9.3/18.6 (opt)	G + SC
E 134	70	115/230	353	I/T	25	10	2.6/4.8	4.5/6.8	1.4	16	6.0	G + SC/twin FC
E 200	110	150/300	462	I/T	60	20	3.5/6.0	5.5/7.0	1.8	16	4.6	Twin FC
Salzgitter Maschinen & Anlagen AG, PF 511640, 3320 Salzgitter 51, F.R.G.												
STM 160	45	132/160	229/257	T	50	12	2.0/4.4	3.0/6.2	1.3/1.6	+18/—20	6/12	G + SC
Thyssen (GB) Ltd, Bynea, Llanelli, Dyfed, Wales.												
Titan E 169	46	80	165	I	18	6.5	2.2/4.5	3.0/5.6	1.25	10	6	G + SC
Titan E 134	65	100/200	290	I	25	10	2.6/4.8	4.5/6.8,7.1	1.4	10	6	FC
Voest-Alpine, Prinz-Eugen-Strasse, A-1040 Vienna, Austria.												
F-6A	12	30	60	T	30	13	2.0/3.4	2.5/4.5	1.1	16	5	G + SC
AM 50	24	100	155	T	51	36	2.2/4.0	2.8/4.8	1.3	16	6	G + SC
AM 75	43	160	290	T	70	60	2.0/4.5	3.5/6.8	1.1	18	4.4/13.3	G + SC
AM 100	83	225	425/450	T	114	88	3.0/5.5	5.5/7.3	1.9	18	3.2/23	G + SC (slewing) (option)
Webster Machine Co., Wortley Rd, Rotherham S61 1LZ, England (see text).												
Westfalia Lünen, 4670 Lünen, F.R.G.												
FL-3R-40 Füchs	9	31/40	73	T	3.3/track		1.7/3.6	1.5/4.0	1.0	+35/—14	13	Top FC
FL-4R-53 Dachs	13	53	101	T	6.9/track		2.2/4.35	2.5/4.3	0.9	+44/—14	18	Top FC
FL-5R-90 Lüchs	24.5	90/110	150	T	8.5/track		2.5/5.0	2.3/5.0	1.0	+33/—14	10-30	Top FC
WAV 170 Büffel	55	200	290/345	T	14.5/track		3.5/5.4	3.8/4.8	1.65	20	7-27	G + SC
WAV 200 Bison	74	200	300	T	20.5/track		3.6/5.3	5.1/6.7	2.2	20	6-17	G + SC
WAV 300	74	300	435	T	20.5/track		2.3/5.3	4.2/6.7	1.6	22	6-17	G + SC
WAV 209 Wisent	140	200	356	T	30/track		4.5/8.9	5.6/9.8	2.0	+9/—7	5-13	G + SC
Shield Excavator type **ZOKOR Corporation/ZOKOR International Ltd.**, 1470 North Farnsworth, Aurora, Illinois 60507, U.S.A. All models are shield mounted in circular or other cross sections					breakout t		diameters					
1290	75	225/338	353/470	Tine	90		3-4.3			15		Belt conveyor
1590	100	300/450	480/638	Tine	90		4.0/5.5			15		Belt conveyor
1890	130	380/600	593/840	Tine	90		4.9/6.4			15		Belt conveyor
2290	165	800/1000	1000/1400	Tine	90		6.1/7.6			15		Belt conveyor
2890	210	1000/1200	1200/1500	Tine	90		7.3/9.8			15		Belt conveyor

+ indicates combination./indicates alternatives. *1: in-line; T: transverse. § G: gathering arms; SW: star wheel; FC: flight chain; SC: scraper chain.

Tractive effort = bandens matningskraft
Slewing thrust = bommens vridkraft
Ground loading = bandtryck

*In-line = borrhuvudets rotationsaxel parallell med bommen, malande maskin
Transverse= " " vinkelrät mot " rivande maskin

Tabell 4b. Bommaskiner och sköldmaskiner /16/.

6. FRÄSNING - TBM - BORRNING ELLER SPRÄNGNING? VAD STYR VALET OCH VILKA RESULTAT KAN UPPNÅS?

Jämförelser visas här mest i form av tabeller och diagram. De flesta refererande till Gehrings artiklar.

Kostnaderna i figur 23, 24, 25, 27 är beräknade under förutsättningen att utrustningarna avskrives på ett projekt. Priserna baserar sig på gällande marknadspriser år 1981 i Tyskland och med 10% årlig ränta. Kostnaderna är beräknade enligt gällande valutakurs hösten 1982, 2.50 SEK/DM.

Tabell 5 visar en jämförelse mellan olika metoders investerings- och driftskostnader, kapaciteter, begränsningar, användning, förstärkning, vibrationer i berget m m.

Bland fördelarna med fräsning märks de relativt låga investeringskostnaderna, låga förstärkningskostnader, inga problem med vibrationer i berget till följd av uttagsmetoden, ett stort profilval, möjlighet att arbeta från många påslag utan störningar samt en hög flexibilitet.

Tabell 6, som är en sammanställning av data från engelska tunnlar, visar en skiftanalys med utnyttjandegrad och indrifter för olika uttagsmetoder i varierande bergarter. Det kan vara svårt att göra en rättvis jämförelse mellan olika uttagsmetoder eftersom bergmaterialet varierar i denna tabell. Till frästeknikens stora fördel hör också ett kontinuerligt bergflöde. Vid borrning-sprängning tar lastningen av bergmassorna en stor del av tillgänglig tid. Observera dock att lastning sker med kastlastare. Alla metoder med mekaniserat uttag är starkt beroende av bergets hårdhet och kvalitet. Höga indrifter kan erhållas om förhållandena är de rätta.

Den viktigaste faktorn inför val av frästeknik är bergets hållfasthet. Figur 23 visar uttagskostnaden för olika drivningstekniker som funktion av bergets tryckhållfasthet. (Observera förutsättningarna!). Här framgår att uttagskostnaden ökar kraftigt med tryckhållfastheten vid fräsning. Vid 70 - 100 MPa är uttagskostnaden ungefär lika (sköldmetoden är dock alltid dyrast och tillämpas bara om inget annat går).

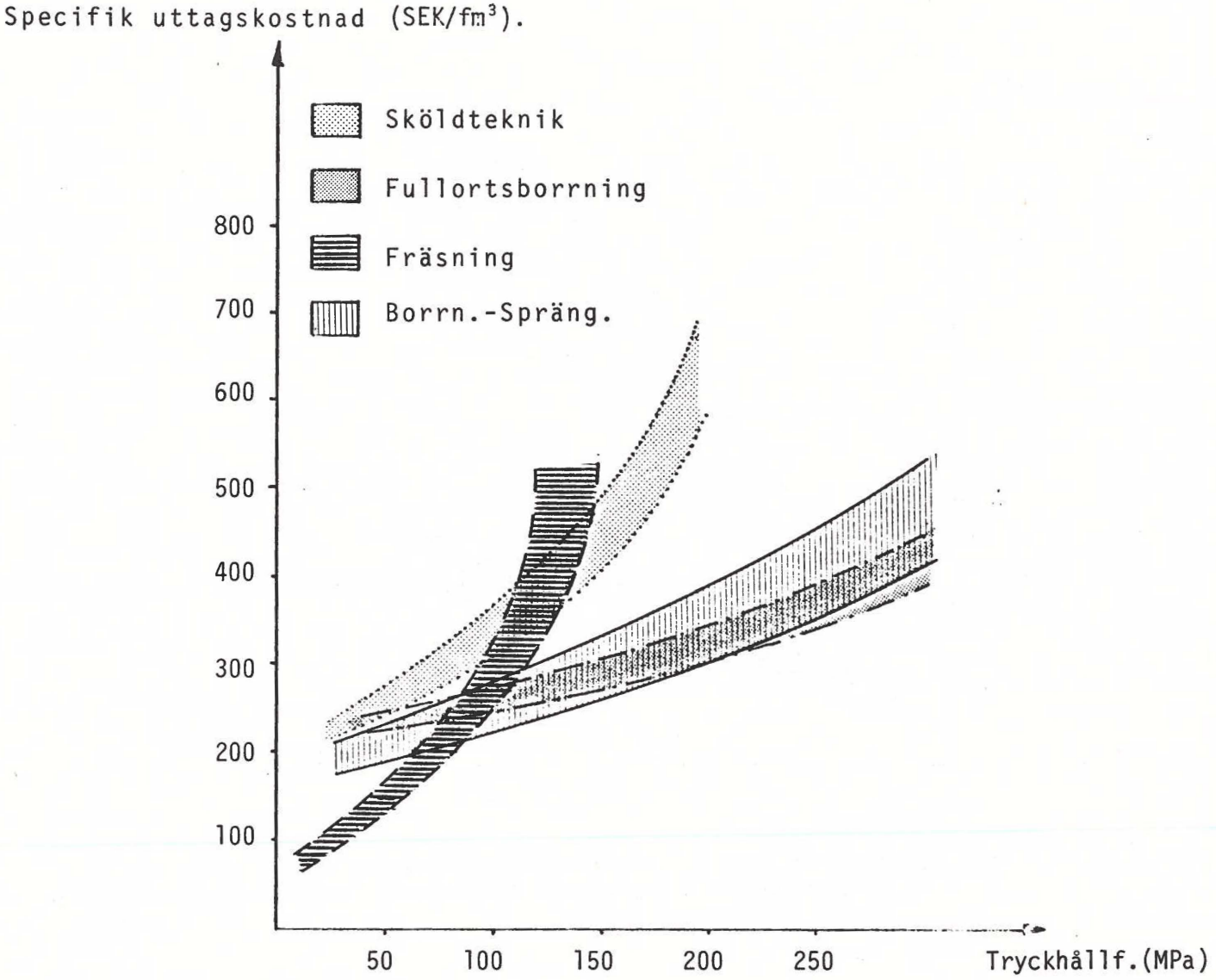
Tabell 5. Jämförelse mellan olika uttagsmetoder (tunnlarnas diameter 3 - 5 m). Efter McFeat-Smith /15/.

Item		Drill and blast	Roadheader (non-shielded)	Mini- and midi-fullfacers	Soft rock TBM	Hard rock TBM Open	Hard rock TBM Shielded
Cost	Initial	Low	Low–medium	High	High	High	
	Running	High	Low	Medium	Low	Medium	
Typical progress, m/100 h	Favourable ground	45	70	150	200	170	120
	Faulted ground	35	35	20–70	50	20–40	80
Installation	Equipment delivery time*	1 month	2 months	6–8 months	9 months	9–12 months	
	Installation and erection time	2 weeks	2 weeks	1 week	4 weeks	4–8 weeks	
	Space required	No restrictions	Most within tunnel diameter	6-m long starting bay with vertical walls	Chamber 1 m > tunnel diameter	Chamber 1.5–2.0 x tunnel diameter	
	Minimum radius, m	No restrictions	5	Mini, 50 Midi, 30	300	200–300	300
	Normal maximum gradient, °	About 30	Generally 15	Up, 30 Down, 20	Generally 10	Generally 10	
	Geometry	Variable	Variable	Modified horseshoe	Fixed circular	Fixed circular	
	Excavated size range, m	Any	2.0–6+	Mini, 1.5 x 2.4 Midi, 2.1 x 3.2	2.5–10 (approx.)	1.8–12	
Type of tools employed		Drill bits	Mainly drag, forward attack or point attack picks	Picks	Picks or discs	Single disc, multiple disc, button, or roller cutters	
Application	Rock type	Any	Most sedimentary; some metamorphic	All sedimentary; some metamorphic	Cohesive ground up to soft rock	Most rock types	
	Mining	Normal method	Production and development	Exploration, production and development	Not commonly used	Access roadways	
Support	Quantity	Can be high	Minimum	Minimum	Continuous	Minimum	Continuous
	Position installed	Face	Face	4 m behind face	Within machine body	3–12 m behind face	Within machine body
	Type	Any	Any temporary	Temporary – rockbolts and mesh	Precast concrete segments	Temporary – no shotcrete	Precast concrete segments
Ground disturbance and overbreak		High	Low	Low	Low	Low	Low
General access for tunnelling operations		Good	Good	Mini, fair Midi, good	Good	Variable – poor to fair	Fair
Faulted ground		No major restrictions	No major restrictions	Variable progress; easy access to face for men and materials	Instability of face can give over excavation	Variable progress; ground control equipment may be necessary	No major restrictions
Ground treatment and advanced probing		No major restrictions	No major restrictions	No major restrictions	Can be achieved	Difficult	Can be achieved

*Time required for purchase of new equipment; leases for machines may be negotiable.

Tabell 6. Skiftanalys för olika uttagsmetoder. Efter McFeat-Smith /15/.

Excavation method		Drill and blast		Roadheader				Full-face TBM			
Machine type		Pneumatic rotary percussion drills + rocker shovel		Light weight	Medium weight	Medium weight	Heavy weight	Single disc	Single disc	Triple disc	Triple disc
Rock type		Fresh granite	Weathered granite	Sandstone Mudstone	Soft sandstone	Siltstone	Hard sandstone	Mudstone	Sandstone	Limestone	Dolerite
Tunnel diameter, m (or equivalent)		5.7	5.7	4.4	4.4	4.4	4.4	3.5	3.5	3.5	3.5
Shift analysis	Non-essential stoppages, %	10.1	13.8	19.3	22.1	17.1	19.3	24.0	20.6	11.5	19.1
	Essential stoppages, %	6.6	5.2	9.1	17.1	13.9	12.0	12.7	20.0	23.2	23.9
	Support, %	–	20.0	20.6	2.2	12.6	15.3	17.7	6.9	1.0	0.1
	Mucking, %	44.5	32.9	8.8	12.0	–	–	9.6	17.5	8.2	9.0
	Utilization, %	38.8	28.1	42.2	46.6	56.4	53.4	36.0	35.0	56.1	47.9
	Cutting rate, m^3/h	13.8	18.5	11.0	23.2	15.5	13.0	28.0	36.0	13.5	5.8
Progress data	Weekly progress, m/120 h	25	24	37	85	69	55	126	158	95	35

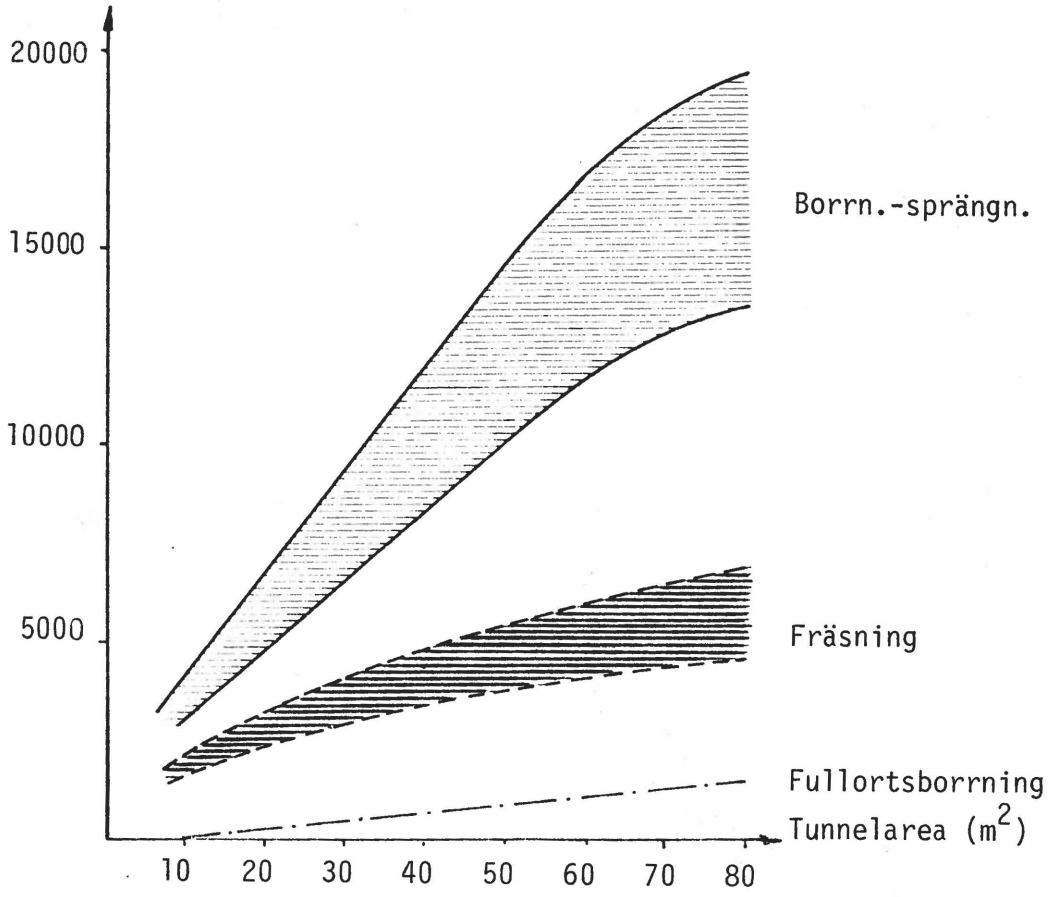


Figur 23. Uttagskostnad som funktion av tryckhållfastheten. Efter Gehring /3/.

Tunnellängd: 4000 m
Tunnelarea: 26 m^2
Bergklass: I, se figur 26.

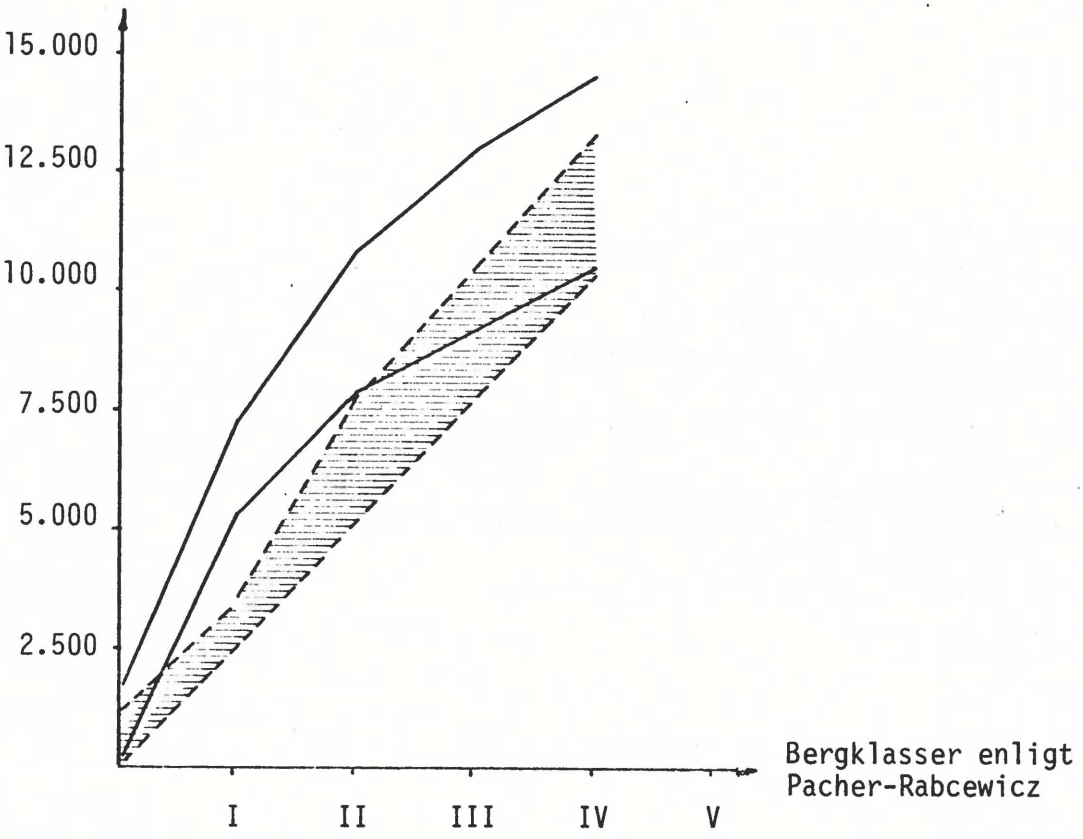
Kostnaderna inkluderar maskiner, förbrukningsmaterial, energi och personal.

Merkostnad för betong beroende på för stor profil (SEK/tunnelmeter).



Figur 24. Merkostnaden för betong per tunnelmeter vid för stor uttagen profil beroende på tunnelarean. Bergklass II, se figur 26. Efter Gehring /3/.

Merkostnad för betong beroende på för stor profil (SEK/tunnelmeter).



Figur 25. Merkostnaden för betong per tunnelmeter vid för stor uttagen profil beroende på olika bergklasser. (Önskat tvärsnitt 26 m^2). Den streckade kurvan visar fräsning och den andra borrning-sprängning. Efter Gehring /3/.

Type	General description
I	stable rock
II	slightly friable rock
III	fractured, medium to highly friable rock
IV	unstable, rock-pressure-exerting rock
V a	highly plastic, squeezing, swelling and high rock-pressure exerting rock
V b	cohesionless, running ground

Figur 26. Bergklasser enligt Rabcewicz-Pacher

Ett stort problem vid borrning-sprängning av tunnlar är överberget och kostnader för extra betong. Vid fräsning och fullortsborrning minimeras dessa kostnader och därför bör man aldrig jämföra enbart uttagskostnader utan komplettera dessa med kostnad för extra betong. Figur 24 visar merkostnaden för betong som funktion av arean. Figur 25 visar merkostnaden för betong som funktion av bergskvaliteten. (Berget är klassificerat efter Rabcewicz-Pacher, se figur 26). I mycket dåligt berg, klass V, är kostnaderna ungefär lika.

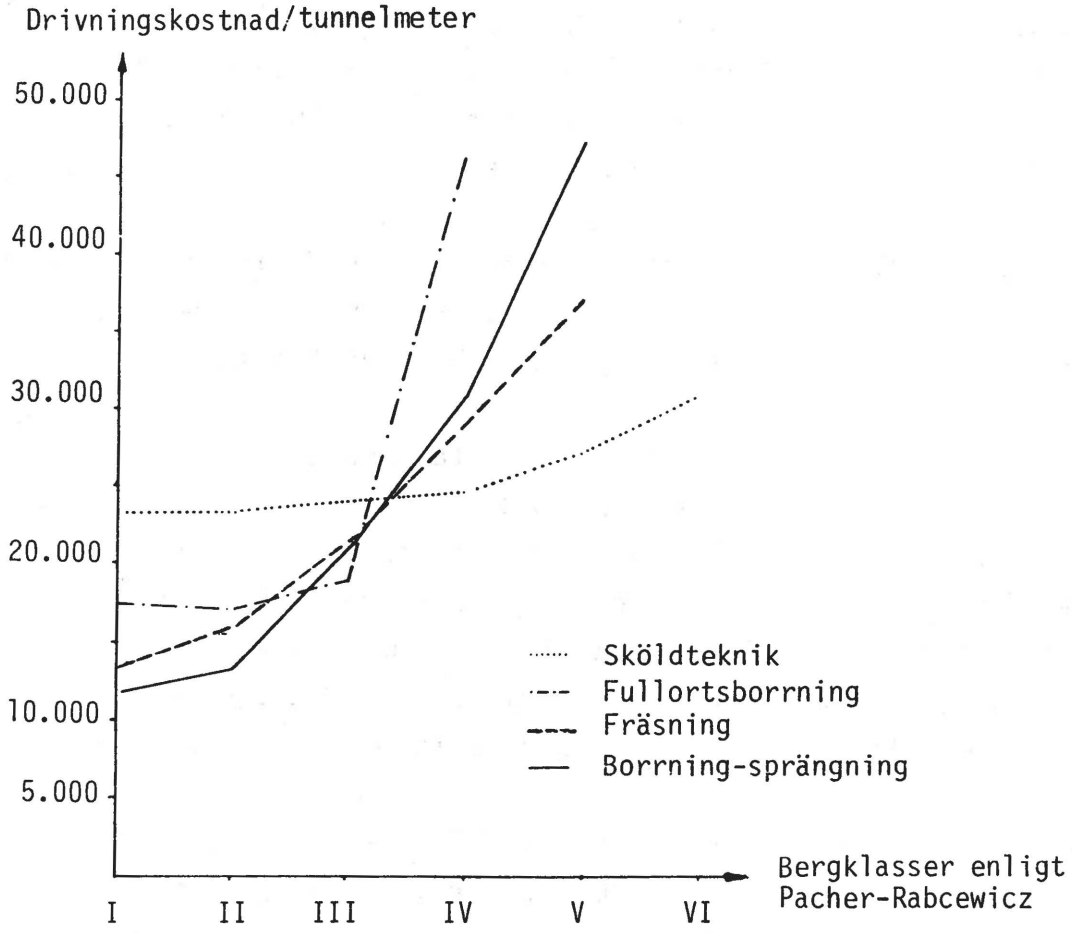
Figur 27 visar hur den totala drivningskostnaden ökar med sämre berg. Observera förutsättningarna!) Kostnaden innehåller uttagskostnad, förstärkningskostnad, transport, ventilation, reservdelar, materialkostnader och personalkostnader. Det är uppenbart att sprängning här är den billigaste metoden vid bra berg. Vid klass III är kostnaderna ungefär lika höga.

Vid mycket dåligt berg, (när fullortsborrning ej bör användas), blir fräsning ofta billigare än borrning-sprängning. Detta beror på att man med fräsning får en exaktare profil och mindre överberg.

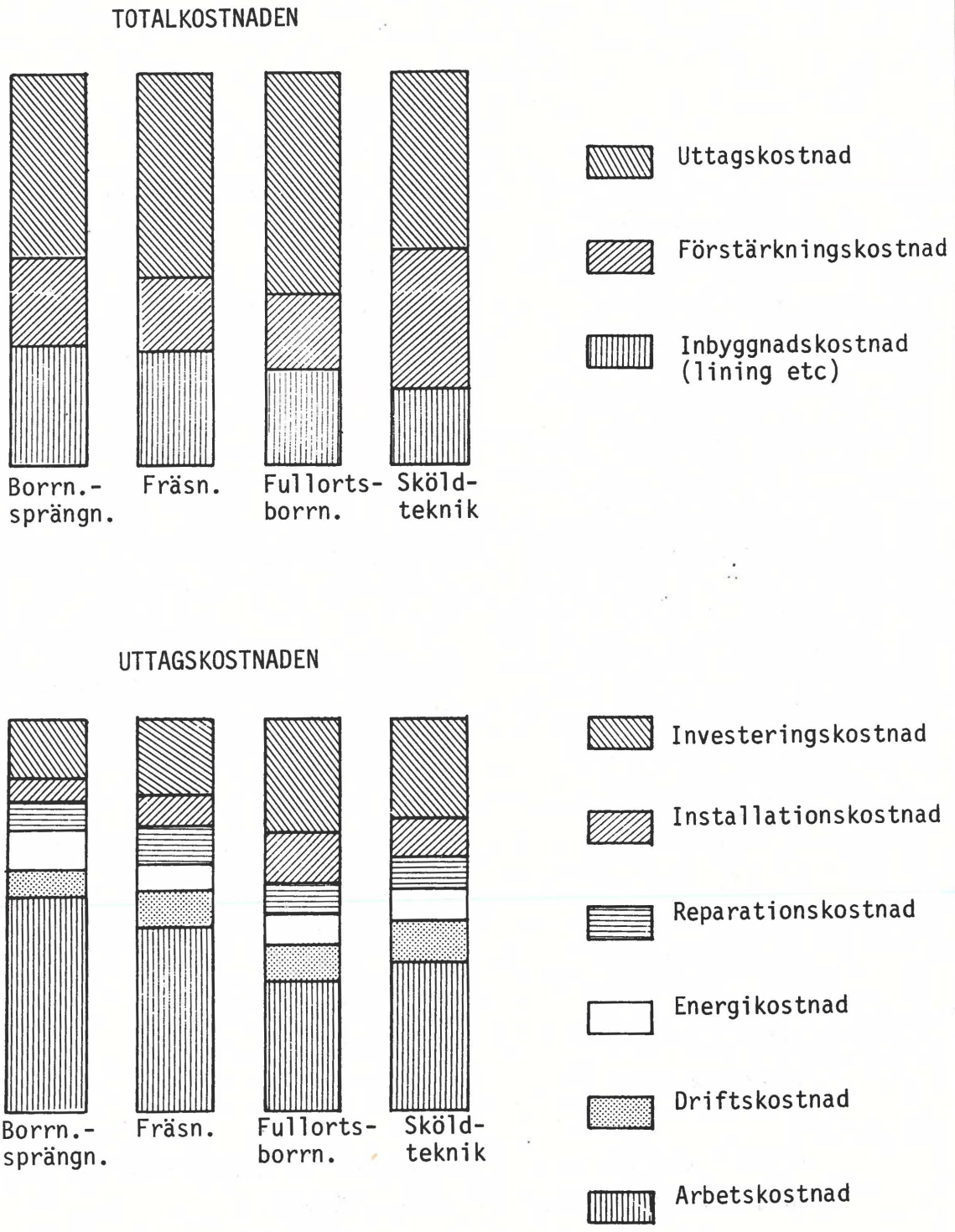
Det kan vara intressant att se hur kostnaderna fördelas hos olika uttagstyper, se figur 28. Det framgår tydligt att själva uttagskostnaden är störst vid mekaniskt uttag medan förstärkningskostnaderna blir lägre vid mekaniskt uttag än vid borrning-sprängning. Betraktar man därefter uttagskostnadens olika delkostnader ser man att frästekniken har relativt låg investeringskostnad och arbetskostnad, medan drift- och reparationskostnader är högre för fräsning än för borrning-sprängning.

Fräsning är ett flexibelt system. Med TBM får man däremot ett system som är betydligt känsligare för störningar. Ev utsprängning av hårdare material och bergförstärkning är besvärligt att utföra. Det är lättare att utföra dessa moment vid fräsning än med TBM.

Borrning-sprängning får dock anses som den flexiblaste uttagsmetoden. Borraggregaten är t ex lättrörliga och kan enkelt flyttas mellan fronterna.



Figur 27. Drivningskostnaden för olika bergklasser och uttagsmetoder. (Arean 26 m^2, längden 4 000 m, tryckhållfastheten 50-80 MPa). Efter Gehring /3/.



Figur 28. Kostnadsfördelning för olika uttagsmetoder. Efter Gehring /5/.

7. NÅGRA INTRESSANTA TUNNELPROJEKT

1. Hürtgen-Kleinhau — en avloppstunnel /2/

Data

Area	6.5 m^2
Berg	Finkornig sandsten
Tryckhållfasthet	20 - 63 MPa, undantagsvis upp till 90 MPa
Draghållfasthet	2.6 - 7.0 MPa
Bergförstärkning	Sprutbetong 3 - 15 cm och 2 m bultar
Maskin	Voest-Alpine AM-50
Utnyttjandegrad	15% (smal tunnel med vattenproblem)
Indrifter	4 m/dag (2 x 8 tim)
Verktygsåtgång	0.01 st/m^3

2. Milchbuck-tunneln — motorvägstunnel /2/

Data

Area	Tot. 154 m^2. Indriftsdata gäller för en 40 m^2 takort
Berg	Märgel och sandsten samt vattenförande morän
Tryckhållfasthet	20 - 82 MPa
Draghållfasthet	2.3 - 5.5 MPa
Bergförstärkning	Sprutbetong och ingjutna balkar 4 - 8 m samt stålbågar i dåliga partier
Maskin	Voest-Alpine AM 100
Utnyttjandegrad	17%
Indrifter	3 - 6 m/dag (2 x 8 tim)
Kapacitet	35 - 55 m^3/h
Verktygsåtgång	0.08 st/m^3

I taket gjordes först 3 st orter med en diameter på 3 m. Den mittersta fungerade som ledning för dammutsugningen.

3. Tunnel under Rhen /9/

Data	
Area	10 m^2
Längd	375 m. I tunneländarna en stigning på 60%
Berg	Lerskiffer
Tryckhållfasthet	78 - 250 MPa
Bergförstärkning	Sprutbetong 10
Maskin	Westfalia Lünen fräslastare
Indrifter	20 m/vecka
Verktygskostnad	15 - 17 DM/fm^3 (40 kr/fm^3) (1982)

70 m av tunnelns längd sprängdes ut, resten frästes. Fräsmaskinen fick spännas fast vid de branta stigningarna.

4. Tunnelbana i München /9/

Data	
Area	80 m^2, 36 - 38 m^2
Längd	300 m, 500 m
Berg	Märgel
Tryckhållfasthet	25 - 30 MPa
Maskin	Westfalia Lünen fräslastare
Indrifter	4 m/dag

5. Ortdrivning — New Silverdale, England /14/

Data	
Area	~ 30 m^2
Längd	1075 m
Berg	Huvudsakligen sandsten
Tryckhållfasthet	70 - 170 MPa
Draghållfasthet	13 - 26 MPa
Förstärkning	Stålbågar
Maskin	RH 1/3, Anderson Strathclyde Ltd
Indrifter	12.5 m/vecka, max 27.5 m

6. WP-systems beräkningar inför ett speciellt projekt /20/

Data	
Area	81 m^2. Fräsning i takorter.
Längd	2 x 440 m
Berg	Sandsten
Tryckhållfasthet	max 38 MPa
Bergförstärkning	Sprutbetong och systembultning
Maskin	Voest Alpine AM 50 (2 st)

En jämförande undersökning mellan borrning-sprängning och fräsning (1982) gav

	Fräsning	Borrning-sprängning
Bergvolym (m^3)	77125	77125
inkl 8% överberg (m^3)	-	83295
" 4% "	80120	-
Investkostn x 2(kkr)	4 994	4 725
Direkta kostnader (kkr)	4 722	9 374
Kostnader (kr/m^3)	59	112

Avskrivningskostnaden för fräsning täcks av de minskade kostnaderna man får p g a betydligt mindre överberg.

	Fräsning I	Fräsning II
Kapacitet m^3/h	23	23
Driftskostn. kr/m^3	19.6	11.9
Avskrivningskostn. kr/m^3	24.5	19.6
Totalt	44.1	31.5

Totalkostnaden skiljer sig beroende på vilken fräsmaskin man väljer.

7. Aslantas-projektet, Turkiet /19, 21/

Utfördes 1975-1978 med WP-system som konsult. Det är ett kraftverksprojekt.

Data

Omloppstunnlar	Area	65 m^2
	Längd	1720 m
Tillfartstunnel	Area	25 m^2
	Längd	425 m
Tilloppstunnel	Area	85 m^2
	Längd	172 m
Berg	Lerskiffer genomdragen av sandsten. Tunnellinjen genomkorsas av krosszoner.	
Maskin	2 st Dosco och 1 st Westfalia Lünen.	

I figur 29 har man jämfört Dosco- och Westfalia Lünen maskinen. Det framgår att den senare givit en lägre uttagskostnad.

Några jämförelsesiffror

Data	Dosco	Westfalia (Lünen)
Inköpspris (1976)	1,9 milj. kr	3,1 milj. kr
Avskrivning	5 år	5 år
Vikt	23,4 ton	50 ton
Tid en runda (80 fm^3)	6-12 tim	3-6 tim
Medelkapacitet i Aslantas	80 fm^3/24 tim	160 fm^3/24 tim
Besättning	1 förare + 2 reparatörer	1 förare + 2 reparatörer
Elförbrukning (max. teoretiskt)	168 kW	272 kW
Elkostnad	0.19 kr/kWh	0,18 kr/kWh

Kostnad per m^3 lösstaget berg

	Dosco	Westfalia (Lünen)
Förare + reparatörer	4.11 kr	2.17 kr
Tunnelarbetare	4.35 kr	2.17 kr
Elförbrukning (medelförbrukning = 65 % av max.förbrukning)	2.42 kr	1.93 kr
Reservdelar, olja m m	7.25 kr	2.90 kr
Avskrivning	14.00 kr	11.35 kr
Övriga kostnader	14.50 kr	14.50 kr
Summa Skr/m^3 lösstaget berg	46.63 kr	35.02 kr

Figur 29. Jämförelse mellan två maskintyper i Aslantas /19, 21/.

Övre delen av tunneln togs ut genom fräsning. Från början kördes Dosco-maskinerna av engelska instruktörer. Man hade då 2 m indrift (36 m^2) på 3-4 tim och tunneln fick en mycket bra profil, utan överberg.

Vid hårdare lager av sandsten, som var vattenförande, fick man problem med Dosco'n. Den kunde ej fräsa i tjockare sandstenslager och körde fast i lervällingen som bildas av vattnet.

Westfalia Lünen-maskinen, som var tyngre och starkare, fungerade däremot bra.

Förf.anm
(Problemet med maskiner typ Dosco är att fräshuvudet är parallellt med matningsbommen och det sönderfrästa stenmaterialet kastas åt sidan. Maskinens krafsarmar får då problem att lasta vattenförande berg).

Bergförstärkning: Enligt tekniska specifikationer skulle alla förstärkningsarbeten i tunnlarna bestå av sprutbetong, armeringsnät, bergbultar och slanka stålbågar. Detta system var en tillämpning på den österrikiska tunnelmetoden NATM, som föreskrevs av beställarens konsulter. Metoden fungerade dåligt. Rörelserna i berget togs ej upp av bultarna. Indriften blev endast 27-35 m/mån. Genom att använda formar som fylldes med betong kunde indriften höjas till 75 m/mån. Återstående del av tunnelarean togs ut genom ripping.

Arbetscykeln för 2 m framdrift i Aslantas framgår av tabell 7.

Arbetsmoment	Normal tid		Max. tid
	Timmar	%	Timmar
1. Utschaktning + borttagning av maskinen	3	13	9
2. Betongsprutning ibland kompletterad med bultning	2	8	5
3. Sättning av bågar inkl. fästbultning	5	22	10
4. Placering av luckor och avstängningsform	8	35	10
5. Betonggjutning (förstärkn. gjutn.)	5	22	12
		100	

Tabell 7. Arbetscykeln i Atlantas.

WP-system anger att skälet till att man valde frästeknik i Aslantas var tron på

1) tidsvinst
2) mindre vibrationer med mindre risk för ras
3) mindre överberg

WP-system påstår att endast pkt 2 uppfylldes men till betydligt ökade kostnader.

WP-system lämnar följande allmänna synpunkter på frästeknik:

a) Berguttaget med fräsning representerar en liten del av tidsåtgång och kostnader. Den effektiva arbetstiden för fräsning i Aslantas var 15-20% av hela cykeln av utschaktning och förstärkning. Tas dessutom hänsyn till tid för förskärningar och betonginklädnad så blir fräsmaskinens arbetstid enbart 5-7% av den totala tunnelarbetstiden. Alltså är det förstärkningsarbetena som är de viktigaste för tunnelekonomin.

b) Välj rätt typ av fräsmaskin och mekanisera hela tunnelarbetet. Kan ej förstärkningsarbetet mekaniseras bör man ej satsa på fräsning.

c) Ripper-type bättre än milling type.

d) Kylning av verktygen är viktig.

e) Tillse att god ventilation finns.

f) Kan vara svårt att hålla överberget nere, ty utmålade konturer fräses bort.

g) Fräsning fordrar färre olika specialister än borrning-sprängning.

h) Tunnellängden har stor betydelse vid val av uttagsmetod.

i) Fräsmaskinen måste lätt kunna bogseras bort vid eventuellt haveri.

8. URFA-tunnlarna, Turkiet /22/

2 st parallella vattentunnlar är under konstruktion.

Data

Area	Ø 8.5 m
Längd	25 km
Berg	Märgel som är hårt kompakterat
Maskin	3 st Westfalia-Lünen WAV 170
	2 st Dosco MK 2B
	x st Paurat E 134

Allmänt Westfalia-Lünen maskinerna har gått bra och man kunde ta ut ca 1 m takort per timme. Borrning-sprängning fungerar inte bra i denna tunnel. Man fick problem med överberg och vibrationer.
Entreprenören har här varit nöjd med frästekniken.

Förstärkning Nätning, bultning och sprutbetong.

9. Tunnelbana i Melbourne /23/

Area	38 m^2 (Hela arean kunde ej fräsas ut direkt. Fräsning i takort och pall).
Berg	Sandsten, lerskiffer, basalt
Tryckhållfasthet	max 70 MPa vid fräsning
Bergförstärkning	Stålbågar och sprutbetong
Maskin	Voest-Alpine AM-50 och Dosco
Indrift	11 m/vecka som genomsnitt (max 33 m)
Allmänt	Såväl borrning, sprängning som fullorts-borrning och fräsande brytning tillämpades. Valet av metod berodde på förväntad bergkvalitet och restriktioner på vibrationer.

Följande tabeller visar hur arbetsmomenten fördelar sig vid de olika uttagsmetoderna. Arbetsmomenten är dock utförda under något olika geologiska förutsättningar.

Total genomsnittlig indrift blev för

Borrning-sprängning		18 m/vecka
Fullortsborrning	1.	25 m/vecka
"	2.	60 m/vecka
Fräsning		11 m/vecka

Arbetstiden på en vecka är 17 x 8 tim.

a) Borrning-sprängning

Förutsättningar

Indrift	26.2 m/vecka (1,2—1,5 m/salva)
Transportavstånd	1500 m
Förstärkning	Stålbågar c-c 1,5 m och sprutbetong

Aktivitet	Min/m	%	
Borrning	36.9	11.8	
Laddning	19.6	6.3	uttag 40.6
Ventilation	8.2	2.6	
Lastning	61.8	19.9	
Uppsättning av bågar	47.3	15.2	förstärkning 26.2
Sprutbetong	34.2	11.0	
Övrigt	103.4	33.2	övrigt 33.2
Totalt	311.4	100	

b) Fullortsborrning

Förutsättningar

Indrift	84 m/vecka
Transportavstånd	1700 m
Förstärkning	Prefabricerade betongsegment och sprutbetong

Aktivitet	Min/m	%	
Flyttningar	5	5.2	uttag 41.3
Borrning	35	36.1	
Förstärkning	25	25.8	förstärkning 25.8
Övrigt	32	32.9	övrigt 32.9
Totalt	97	100	

c) Fräsning

Förutsättningar

Indrift	2lm/vecka gäller takort (vid pallning upp till 33 m/vecka)
Transportavstånd	200 m
Förstärkning	Betongsegment

Aktivitet	Min/m	%	
Fräsning	150	41.7	uttag 41.7
Sprutbetong	45	12.5	förstärkning 25.0
Stålbågar	45	12.5	
Övrigt	120	33.3	övrigt 33.3
Totalt	360	100	

10. Fräsning i Bjuvs kolgruva, Höganäs AB /26/

Area	2.8 x 3.2 m
Berg	Kol- och lerskiffer
Tryckhållfasthet	10-20 MPa
Bergförstärkning	Trästämplingar
Maskin	PK-7 (rysk maskin, typ malande), 10 ton
Indrifter	5 m/7h (90 ton/skift)
Verktygskostnad	0.6 kr/ton (-72)

Maskinen provades 1972

Omdöme	Problem att kontinuerligt lasta ut berget. Dammproblem till följd av små orter.

11. Avloppstunnel i Bristol City /27/

Area	Diameter ~ 3 m
Längd	3500 m
Berg	Lava och sandsten
Bergförstärkning	Fräsmaskinen arbetar under sköld. Prefabricerade betongsegment uppsättes sedan.
Maskin	Dosco TM 1800
Indrifter	~ 8 m/dag
Total kostnad	~ 1000 £/m (april -82)

Maskinen utrustades med ett 30 m skraplastningstransportör från fronten och bakåt till tippning i 1.5 m^3 vagnar.

The New Silverdale Colliery Project.-
Proc. Tunneling, March 12-16, London,
pp 1-12, (1979).

Survey of Rock Tunneling Machines
Available for Mining Projects.-
Trans. Instn. Min. Metal, (Section A.
Mineral Industry) 91, pp 23-31 (1982).

Tunneling by Machine.-
Mining Magazine, June, pp 469-484,(1982).

Roadheaders in North America.-
State College, Pennsylvania, USA, pp 8-53.

Introduktion till fräsande brytning.-
Teknisk rapport 1981:70T. Ramprogram
för fullborrning, STU D:nr 79-8204,
pp 1-43.

Redogörelse för några svåra och för
svenska förhållanden ovanliga berg-
sprängningsarbeten i dåligt berg vid
kraftverksbyggen utomlands.- Protokoll från
Bergsprängningskommitténs diskussionsmöte
pp 275-301,(1979).

Kalkyler för Laiban-projektet, Filippinerna.-
Rapport från WP-system.

Artiklar om Aslantas-projektet.-
Januari 1976, december 1976, december 1977
och december 1978.

Some Observations on the Urfa Tunnel
Project Made at a Visit to Turkey,
October 4-13th,(1978)-
Retyped, Stockholm September 7th, 1982
samt material som erhållits av WP-system
vid personlig kontakt.

Comparison of Rock Tunnel Excavation
Methods Used on the Melbourne Underground
Rail Loop.-
4th Australian Tunneling Conference,
Melbourne, March, pp 61-79,(1981).

Kritische Betrachtungen über die Einsatz-
kriterien maschineller Gestein- und
Flötzstreckenvortriebe und deren Wirt-
schaftlichkeit im Vergleich zu Spreng-
vortrieben.-
Nobelhefte okt-dec, pp 121-129,(1980).

onkurrerande
et fordras dock
en god
jet kan här vara

ridå i
areor, där inte
iella lösningar.

ergmaterialet.
ökningar för att
.

ssystem

enhet och fyllnad

igtvis
orer.

25. Tarkoy, P. — Tunnel Boring Machine Performance as a Function of Local Geology Bulletin of the Association of Engineering Geologists.- Vol. XVIII, No 2, pp 169-186,(1981).

26. Gustavsson, A. m.fl. — Prov med maskin för mekaniserad ortdrivning.- Bergsprängningskommittén, Stockholm, pp 123-132, 1972 samt material från personlig kontakt.

27. Martin, D. — Sewage Scheme Will Make River Avon "Shipshape and Bristol Fashion".- Tunnels & Tunnelling, April, pp 26-28, (1982).