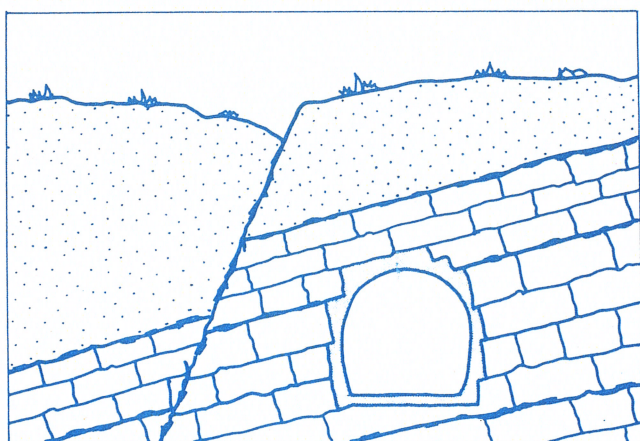


BeFo



Undermarksbyggande i svagt berg

4 Vattenproblem och tättningsåtgärder

Claes Alberts, Skånska Cementgjuteriet
Gunnar Gustafson, VIAK AB

Stiftelsen Bergteknisk Forskning — BeFo
Swedish Rock Engineering Research Foundation

Undermarksbyggande i svagt berg

4 Vattenproblem och tättningsåtgärder

Underground Construction in Weak Rock
4 Water problems and sealing measures

Civilingenjör Claes Alberts, Skånska Cementgjuteriet
Tekn dr Gunnar Gustafson, VIAK AB

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

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 berggutttag 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", "Berggutttag", "Stabilitet och förstärkning" samt "Vattenproblem". Dessa rapporter skall i första hand ses som tämligen ingående översikter över dagens

IV

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

FÖRFATTARFÖRORD

Följande skrift behandlar vattenproblem vid byggande i dåligt berg, hur de kan förutsägas och åtgärdas. Den ingår i en serie rapporter om byggande i dåligt berg, som tillkommit inom ramen för BEFO-projekt 106.

Skriften bygger dels på författarnas egna erfarenheter, dels på inhämtade kunskaper från erfarna bergbyggare, geologer och hydrogeologer, dels på litteraturstudier och besök på intressanta arbetsplatser. Svensk erfarenhet av byggande i dåligt berg har visat sig vara omfattande, både inom och utom landet.

Rapporten vänder sig främst till kalkylatorer och anläggningsingenjörer utan specialkunskap på vatten- och tätningsfrågor, men kan förhoppningsvis även läsas av andra med intresse för området.

Under arbetet med skriften har många råd och värdefulla synpunkter erhållits från intresserade kollegor. Några som särskilt bör nämnas är Sten Brännfors, Anders Claesson, Björn Emt, Hans Helfrich, Stig Myhré, Gunnar Nord och Håkan Stille. Vi är dessa och många andra stort tack skyldiga!

Stockholm augusti 1983

Claes Alberts

Gunnar Gustafson

FÖRFATTARFÖRORD	1
INNEHÅLL	2
1. BAKGRUND OCH SYFTE	4
2. VATTENPROBLEM I SVAGT BERG	5
3. GRUNDTVATNETS KRETSLOPP I BILDNING	5
3.1 Den hydrologiska cykeln	5
3.2 Den hydrologiska budgeten	7
4. GRUNDTVATNETS FÖREKOMST	9
4.1 Bergets porsystem och vattenvägar	9
4.2 Akviferer	12
5. GRUNDTVATNETS RÖRELSE	14
5.1 Grundvattnets trycknivå	14
5.2 Darcy's lag	14
5.3 Thiems brunnsekvation	16
6. GRUNDTVATNETS KEMISKA SAMMANSÄTTNING	17
6.1 Salter i nederbörden	17
6.2 Salter som upptas från marken	17
6.3 Saltvatteninträngning	18
6.4 Föroreningar	18
6.5 Hydrotermala processer	18
7. INLÄCKNING TILL BERGANLÄGGNINGAR	20
7.1 Vattenproblem vid tunneldrivning	20
7.2 Vattenproblemens beroende av geologin	22
7.3 Att undvika vattenproblem	24
7.4 Inläckning till berganläggningar	24
7.5 Inläckningens tidsförlopp	29
7.6 Influensradien kring en grundvattensänkning	30
8. FÖRUNDESRÖKNINGAR OCH DERAS TOLKNING	31
8.1 Geologisk beskrivning	31
8.2 Geofysiska mätningar	31
8.3 Borrningar och manschettmätningar	33
8.4 Borrhålsloggning	34

	SID
9. KOMPLETTERANDE UNDERSÖKNINGAR	36
9.1 Hydrogeologiska grunddata	36
9.2 Undersökningar under byggtiden	37
10. VATTENSITUATIONENS PÅVERKAN PÅ DRIVNINGSMETODEN	39
11. ANBUDSHANDLINGAR - VATTENPROBLEM	43
12. PUMPNING OCH LÄNSHÅLLNING	47
13. DRÄNERING	48
14. FRYSNING	51
15. TRYCKKAMMARE	53
16. INJEKTERING	54
16.1 Personal	54
16.2 Material	55
16.3 Maskiner och utrustning	58
16.4 Tillämpningar i vissa situationer	59
16.5 Speciella injekteringsmetoder	70
16.6 Exempel på utförda arbeten	76
17. SLUTORD	82
18. REFERENSER	85

VATTENPROBLEM OCH ÅTGÄRDER VID TUNNELDRIVNING I DÅLIGT BERG

1. BAKGRUND OCH SYFTE

Den vanligaste orsaken till att tunnelarbeten blivit avsevärt försenade och fördröjade är problem som uppstått i samband med vatten.

Svårigheterna, som kan vara stora nog i relativt hårt berg, kan bli ödesdigra i svaga och dåliga bergmaterial. Utöver de problem som stora vatteninbrott i sig själva utgör kan bergmaterialet helt förlora sin hållfasthet och struktur. Andra svårigheter möter vid svällande bergmaterial, karster, flowing ground m m.

Det är uppenbart att många av de katastrofartade situationer, som uppstått i samband med vatten hade kunnat undvikas med förutseende, kunskap och lämpliga åtgärder vidtagna vid rätt tidpunkt.

Svensk erfarenhet inom detta område är icke så begränsad som man kan förledas att tro. Genom åren har svenska firmor stött på dåligt berg med mycket svåra vattenproblem såväl i Sverige som i övriga världen.

Projektet vill öka förståelsen för vattenproblem i dåligt berg och därigenom ge bättre underlag för

- * Tolkning och utvärdering av anbudshandlingar
- * Teknisk och ekonomisk riskbedömning
- * Val mellan alternativa åtgärder

Genom ökad förståelse och bättre underlag ökar också möjligheten till att avge bättre anbud.

Förhoppningsvis skall forskningsprojektet också bidra med kunskaper, som kan vara värdefulla också vid övriga moment i vårt utlandsbyggande i bergformationer med växlande byggnadsgeologiska egenskaper.

2. VATTENPROBLEM I SVAGT BERG

I varje bergart finns porer och sprickor fyllda med grundvatten. I naturligt tillstånd rör sig grundvattnet långsamt mot naturliga dräneringspunkter som källor och utflödesområden. I samband med byggande i berget förändras emellertid radikalt den hydrologiska balansen, bergmassan dräneras.

I ett tätt berg av god kvalitet är vattenproblemen oftast obetydliga. Om berget är genomsläppligt och av låg kvalitet kan emellertid stora problem uppstå. Dels genom att stora inläckande vattenmängder är ett problem i sig, dels att vatteninflödet kan åtföljas av erosion i sprickzoner, svällande leror etc, som ger stabilitetsproblem. Vidare kan det inläckande vattnet ge bestående grundvattensänkningar, som medför sättningar vid markytan.

I det följande kommer vattenproblem vid byggande i svagt berg att behandlas ur olika synpunkter. Inledningsvis ges en orientering i de hydrogeologiska grunderna, varefter olika problem och deras åtgärdande tas upp ur praktisk synvinkel.

3. GRUNDVATTNETS KRETSLOPP OCH BILDNING

3.1 Den hydrologiska cykeln

I stort sett allt grundvatten har sitt ursprung från nederbörden. I normalfallet beskriver således vattnets väg ett slutet kretslopp, se figur 3.1.

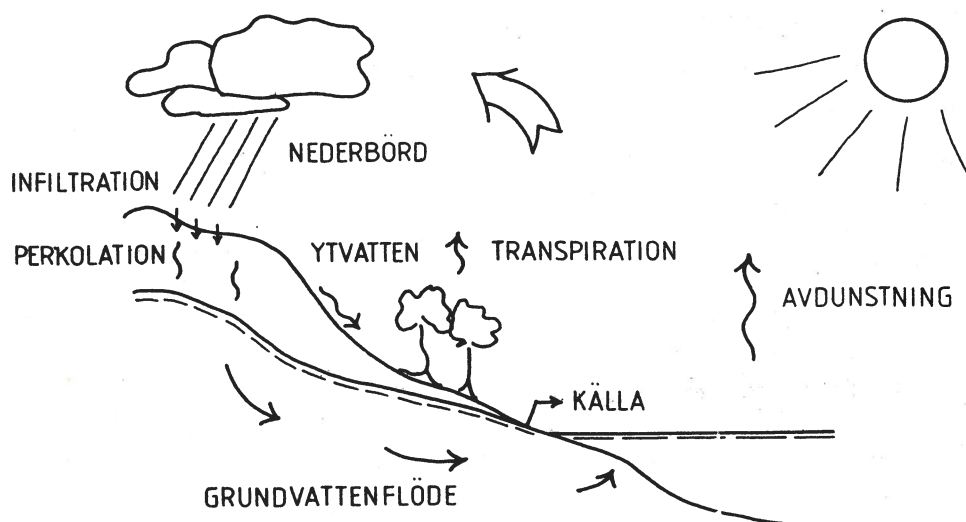


Fig 3.1 Vattnets kretslopp (Knutsson & Morfeldt, 1973)

Vatten avdunstar från mark och sjöar, växterna transpirerar och fuktigheten stiger upp och bildar moln. Från molnen faller nederbörd i form av regn och snö. En mindre del faller direkt på sjöar och vattendrag medan huvuddelen nedtränger i marken, infiltrerar. Av den infiltrerade delen upptar den största delen av växterna i markvattenzonen och återgår till atmosfären som transpiration. Återstoden perkolerar vidare till grundvattenmagasinet och går efter kortare eller längre tid ut i ytvattendrag vid källor och utläckningszoner.

Den största delen av grundvattnets omsättning sker i lokala grundvattenmagasin och går efter kort tid ut till ytvatten. Berggrunden, som normalt utgör det understa grundvattenmagasinet, får därför endast en begränsad vattenmängd och en långsam vattenomsättning - speciellt med hänsyn till att grundvattenmagasinet i berg har en ansenlig volym.

Karakteristiskt för Sverige är rikedom på sjöar. Globalt sett är sjöar en sällsynt förekomst och huvuddelen av världens färskvattentillgångar är grundvatten. Detta framgår tydligt av tabell 3.1.

Tabell 3.1. Världens vattentillgångar (Efter FAO 1974)

Vattenform	Procentuell andel av total vattenmängd	Procentuell andel av tillgängligt färskvatten
Hav	95	
Landisar	4	
Grundvatten	0,99	99
Sjöar	0,01	1
Markvatten	0,002	0,2
Floder	0,001	0,1
Vatten i atmosfären	0,001	0,1
Vatten i biosfären	0,0005	0,005

3.2 Den hydrologiska budgeten

I normalfallet råder en hydrologisk jämvikt i kretsloppet, inflödet i systemet balanseras av utflödet. För systemet kan en enkel budgetekvation ställas upp:

$$P - E = R_s + R_g + \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Följande beteckningar används:

P	Nederbörd
E	Avdunstning och transpiration
R_s	Ytvattenavrinning
R_g	Grundvattenavrinning
$\frac{\Delta M}{\Delta t}$	Magasinsförändring per tidsenhet

Om systemet är i jämvikt kommer för längre tidsperioder, Δt , magasinförändringen, ΔM , att bli försumbar och budgeten förenklas till:

$$P - E = R_s + R_g \quad (3.2)$$

Vi finner vidare att om ytterligare en avrinningsterin, R_A , förs in, t ex genom pumpning från en berganläggning under byggnad, så kommer budgeten att förändras till:

$$P - E = R_s + R_g + R_A + \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Da nederbörd och avdunstning knappast förändras av bygget kommer pumpningen från berget att i första hand motsvaras av en magasinsförändring och så småningom minska både yt- och grundvattenavrinning. Vid pumpning från ett bergbygge tas vattnet dels från magasinet, dels från avrinningen.

Vi finner också att budgeten påverkas av klimatet. Avdunstningens storlek är temperaturberoende och om nederbörden är begränsad kommer skillnaden dem emellan att bli mycket liten, $P-E \approx 0$. Vi får ett ökenklimat. Budgeten kommer då att förändras till:

$$0 = R_s + R_g + \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Varje avrinning kommer att ske på bekostnad av magasinet. Om grundvattnet avleds genom pumpning kommer detta att medföra en bestående grundvattensänkning. Detta förhållande råder idag inom stora ökenområden, där grundvattnet fylldes på i samband med vår istid. Detta medför att vattnet i magasinen är mycket gammalt och även om magasinen är stora är resursen ändlig.

Posterna i vattenbudgeten är som tidigare nämnts i hög grad beroende av klimatet. En hög temperatur medför en stor avdunstning. Vidare gäller att avdunstningen i det långa loppet aldrig kan vara större än nederbörden. Detta framgår av nedanstående sammanställning över kontinenternas vattenomsättning.

Tabell 3.2 Kontinenternas vattenomsättning (FAO 1974)

Kontinent	Nederbörd (mm/år)	Avdunstning (mm/år)	Avrinning (mm/år)
Europa	734	415	319
Asien	726	433	293
Afrika	686	547	139
Nordamerika	670	383	287
Sydamerika	1648	1065	583
Australien	440	393	47

4. GRUNDVATTNETS FÖREKOMST

4.1 Bergets porsystem och vattenvägar

Grundvattnet fyller ut de porer och hålrum, som finns i berget. Beroende på hur bergarten ser ut finns emellertid väsentliga skillnader mellan olika bergarter i hydrauliskt avseende.

En sedimentär bergart som sandsten, är uppbyggd av enskilda korn, som sedan cementerats av de olika geologiska processer, som bergarten genomgått, se figur 4.1.

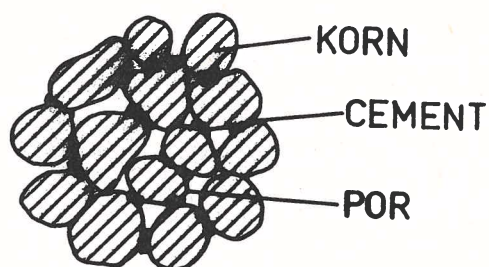


Fig 4.1 Sandstenens uppbyggnad

Sandstenen har således en primär porositet, som sedan något minskats genom cementeringen. Om bergarten omvandlats genom högt tryck och hög temperatur kan cementeringen gå så långt att primärporositeten i stort sett försvinner och mineralen omvandlas. Bergarten har metamorfoserats.

I normalfallet har emellertid sedimentära bergarter en hög porositet, 15-30 %, vilket medför att stora mängder vatten finns lagrat i berget. De enskilda porerna är emellertid ofta ganska små, vilket medför att genomsläppligheten, speciellt i finkorniga sedimentbergarter, kan vara begränsad.

I en kristallin bergart är primärporositeten ofta mycket låg. Bergarten är uppbyggd av mineralkorn, som passar in i varandra som ett pussel. Mineralernas mekaniska egenskaper gör emellertid att bergarten är spröd och spricker lätt. Sprickorna utgör en sekundär porositet, som bildats efter det att bergarten kristalliserats, se figur 4.2.

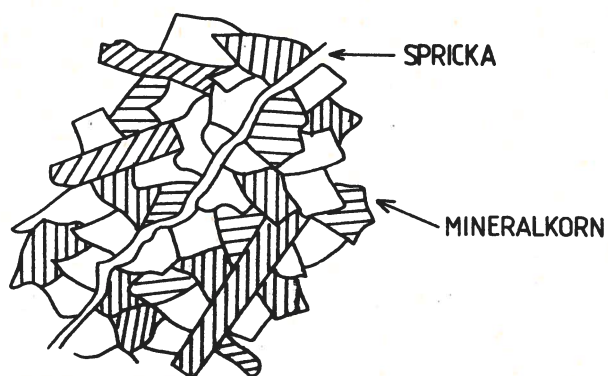


Fig 4.2 Uppbyggnaden hos en kristallin bergart

Då uppsprickningen normalt sker utan stora volymförändringar kommer den sekundära porositeten totalt sett att vara liten, 0,1 - 1 %. Vi finner emellertid att sprickorna utgör relativt stora porer, varför genomsläppligheten hos varje spricka kan vara relativt stor. Om sprickorna förekommer tätt kan också bergarten få hög genomsläpplighet.

Sekundär uppsprickning kan också förekomma i sedimentära bergarter. Speciellt uttalat är detta i spröda sandstenar. I en sprucken sandsten finns därför mycket vatten lagrat genom den höga primärporositeten och sprickigheten ger den en hög genomsläpplighet. Den blir således gynnsam att utvinna vatten ur genom brunnar, men mycket svår att bygga i.

En sammanställning över porositet och permeabilitet i olika geologiska formationer ges i tabell 4.1.

Tabell 4.1. Permeabilitet och porositet i jord och berg (Knutsson och Mohrfeldt 1973).

Jord- eller bergartstyp	Porositet		Permeabilitet						Vattenmängd		
	Primär (genom porer)	Sekundär (genom sprickor o.d. sällan >10 %)	Omfång (cm/sek)						Uttagbar i brunnar		
			10 ²	10 ⁰	10 ⁻²	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸	Hög	Måttlig	Låg
Σ											
<u>Jordarter</u>											
Grus	30-40		_____						_____		
Grovsand	30-40			_____						_____	
Mellansand-grovmo	30-35				_____					_____	
Finmo-mjäla	40-50	Tillfälligt					_____				_____
Lera, morän	45-55	Ställvis (sprickor, skikt)						_____			_____
<u>Sedimentära bergarter</u>											
Kalksten, dolomit	1-50	Karstsprickor, skiktrogar	_____						_____		
Grov-medelkornig sandsten	<20	Sprickor		_____						_____	
Finkornig sandsten	<10	Sprickor			_____						_____
Lerskiffer, mo- sten	-	Sprickor					_____				_____
<u>Vulkaniska bergarter</u>											
Basalt	-	Sprickor	_____						_____		
Porfyr o d	-	Sprickor				_____					_____
<u>Kristallina- bergarter</u>											
Granit, gnejs m fl	-	Sprickor och vittring (avtagande med tilltagande djup)				_____				_____	

4.2 Akviferer

En geologisk formation, som leder vatten i sådan mängd att det kan utvinnas ur en brunn eller orsaka besvär i samband med bergbyggnad benämnes för en akvifer. I analogi med det tidigare skiljer man på porakviferer i sedimentär berggrund och sprickakviferer i kristallin berggrund och vissa täta sedimentbergarter. Dessa huvudtyper har vissa typiska egenskaper:

4.2.1 Porakviferer

Förekommer som konglomerat, sandstenar, siltstenar och vissa kalkstenar. De har ofta stor utbredning och god homogenitet. De hydrogeologiska egenskaperna kan ofta förutsägas med god noggrannhet om grunddata finns. Porakviferer har

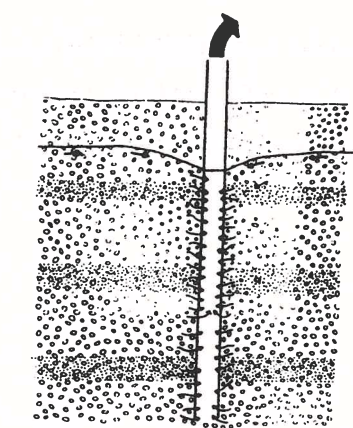
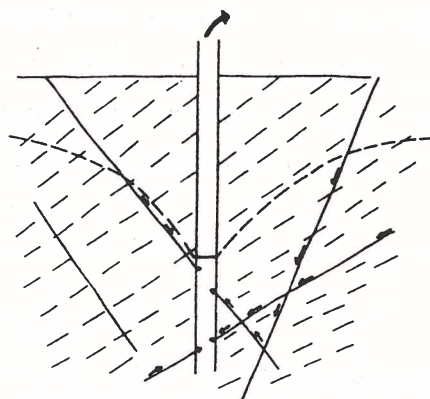
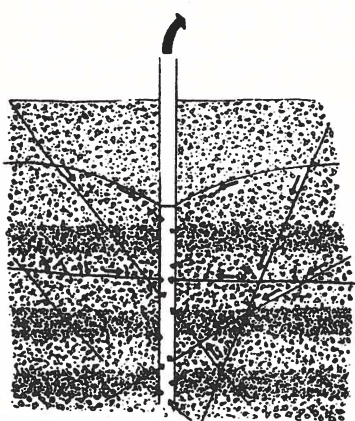
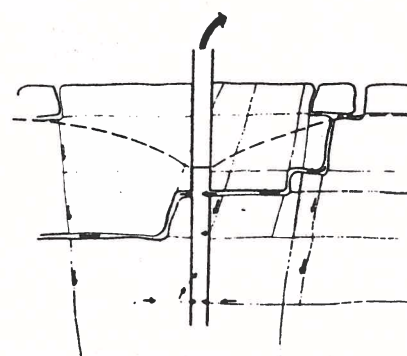
vanligtvis hög porositet. De grovkorniga sandstenarna har hög permeabilitet. Sekundär uppspräckning kan ge hög permeabilitet även i finkorniga sediment.

4.2.2 Sprickakviferer

Förekommer som kristallina och metamorfa bergarter samt i vissa kalkstenar. Bergarten som sådan kan ha stor utbredning men sprickigheten är oftast koncentrerad till vissa zoner. Detta ger heterogena egenskaper och förutsägelser om lokala förhållanden har dålig noggrannhet. Porositeten är oftast låg. Permeabiliteten kan vara hög i sprickzonerna men bergmassan är i sig själv tät.

4.2.3 Karster

Karbonatbergarter som kalksten och dolomit vittrar lätt om grundvattnet innehåller löst kolsyra. Detta medför att vattenförande sprickor vidgas genom att berget löses upp. I områden där vittringen pågått länge kan stora grottor bildas. Vittringsprodukterna kan ibland åter avlagras i karsterna och göra dem fyllda med lera och sand. I dessa grottor förekommer grundvattnet som underjordiska strömmar. Även i områden med måttlig karstvittring uppkommer ofta stora vattenproblem då hålor och kaviteter passeras.

**A** PORAKVIFER**B** SPRICKAKVIFER**C** POR-SPRICKAKVIFER**D** KARST-SPRICKAKVIFER

 Grundvattenyta
 Grundvattnets tryckyta
 Strömpil
 Brunn med uttag

 Spricka
 Skiffrighet
 Karstvittrad spricka

Fig 4.3 Olika typer av akviferer (efter Carlsson och Ohlsson, 1979)

M85.12-42.1335

5. GRUNDVATTNETS RÖRELSE

5.1 Grundvattnets trycknivå

Grundvattnets tryck mätes vanligtvis som hydrostatisk trycknivå relativt ett lämpligt referensplan. Trycknivån är således den nivå som vattnet kommer att stiga till i ett rör nedfört till mätpunkten. Denna kan naturligtvis också relateras som ett absoluttryck, se figur 5.1.

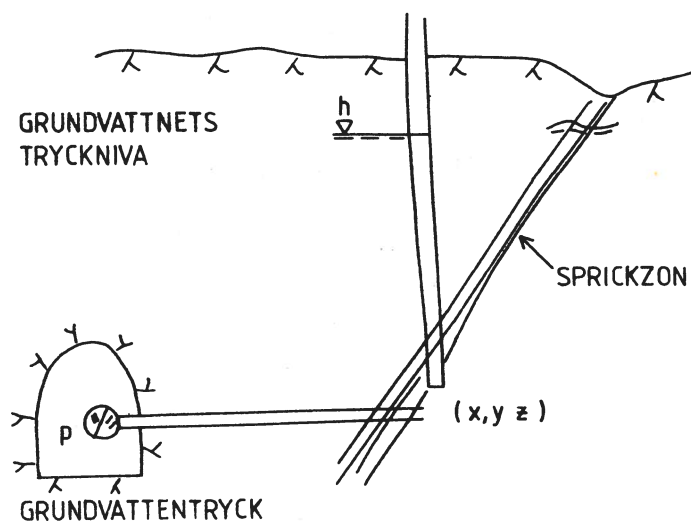


Fig 5.1 Grundvattentrycknivå och grundvattentryck

Grundvattentrycknivån är ett mått på grundvattnets lägesenergi och utgör drivkraften för allt grundvattenflöde. Om grundvattennivån står ovan mark säges grundvattnet vara artesiskt och hål borrade till en artesisisk akvifer ger själv rinnande brunnar.

5.2 Darcy's lag

Redan 1856 postulerade Darcy den lag som har fundamental betydelse för all kvantitativ behandling av grundvattenproblem. Han fann genom försök med filtersand att flödet genom sanden var proportionellt mot tvärsnittsarean och grundvattennivåskillnaderna mellan provets ändpunkter dividerad med flödessträckan, se figur 5.2.

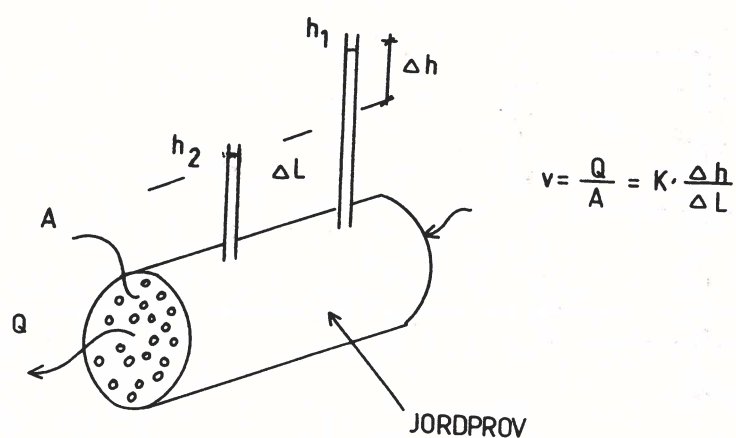


Fig 5.2 Darcy's lag

Kvoten $\frac{\Delta h}{\Delta L}$ benämnes vanligen gradienten och konstanten, K , permeabiliteten. Att flödet är proportionellt mot gradienten beror på att laminära flödesförhållanden råder i ett porssystem. Detta gäller även i normalfallet för sprickor i berg.

Darcy's lag har tillämpats på ett stort antal grundvattenproblem och har gett upphov till en viktig deldisciplin inom hydrauliken. Vi ska i denna framställning endast visa en tillämpning, som kommer att användas vid flera principiella resonemang. På grund av dess betydelse och relativt enkla härledning har denna här medtagits för att öka förståelsen för de formler, som ofta rutinmässigt används.

5.3 Thiems brunnsekvation

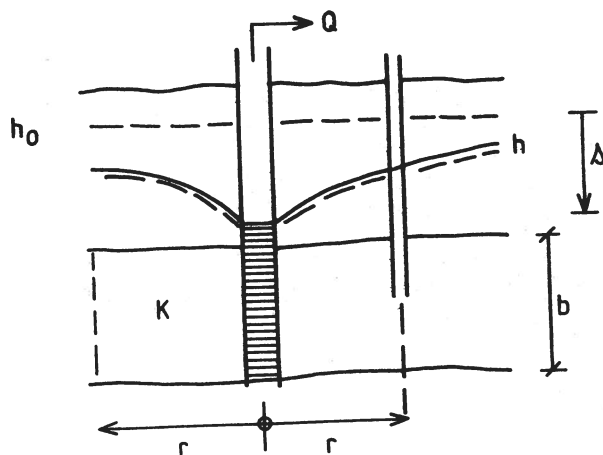


Fig 5.3 Thiems brunnsekvation

Flödet till en brunn under stationära förhållanden genom en cylinder med radien r kan beräknas som:

$$Q = A \cdot K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta r} = 2\pi r b \cdot K \cdot \frac{dh}{dr} \quad (5.1)$$

Där $\frac{dh}{dr}$ är gradienten på avståndet r från brunnen. Efter hyfsning erhålles:

$$dh = \frac{Q}{2\pi K \cdot b} \cdot \frac{dr}{r} \quad (5.2)$$

Differentialekvationen har lösningen

$$h = \frac{Q}{2\pi K b} \cdot \ln r + C \quad (5.3)$$

Produkten Kb är ett mått på akviferens totala genomsläpplighet och benämnes transmissivitet, T . Vidare gäller randvillkoret att på avståndet R_0 från brunnen är ingen avsänkning märkbar. Således erhålles:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R_0}{r} \quad (5.4)$$

Detta är Thiems brunnsekvation.

6. GRUNDVATTNETS KEMISKA SAMMANSÄTTNING

De ämnen som finns lösta i grundvattnet har sitt ursprung från tre huvudkällor: Salter i nederbörden, utlöst material från jord och berg samt salter i hav och ytvatten i kontakt med akviferen. Av underordnad betydelse kan föroreningar tillförda på markytan och gaser och andra ämnen tillförda från jordens inre vara.

6.1 Salter i nederbörden

Med nederbörden tillföres främst klorid och sulfat. Även om sulfathalten i nederbörden ökat under senare år genom försurningen är halterna relativt små.

I kontinentala områden är den totala kloriddepositionen ca 300 kg/ha·år. (Ericsson 1961). Emellertid sker genom avdunstningen en väsentlig koncentration av salterna. I mellansverige, där avdunstningen uppgår till ca 2/3 av årsnederbörden, sker således en trefaldig koncentration av salthalten. I ett torrt klimat kan koncentrationen ökas väsentligt mer.

Jonkoncentrationen, C , i grundvatten hos något lämpligt spårämne som t ex klorid, kan därför användas för att få ett ungefärligt värde på grundvattenbildningen om depositionen, D , är känd. Vi finner således att grundvattenbildningen, W , är:

$$W = \frac{D}{C} \quad (6.1)$$

6.2 Salter som upptas från marken

I markzonen pågår en intensiv biologisk aktivitet. Döda växtdelar bryts ned i flera steg och vid denna process bildas främst kolsyra och olika humussyror. Dessa syror löser ut kalcium och magnesium från karbonatmineral och påskyndar vittringen av olika silikatmineral. Detta medför en tillförsel av kalium, natrium och kisel och om syrefria förhållanden råder även järn och mangan.

I Sverige uppgår den vittrade markzonen högst till någon meters mäktighet. I områden med varmt klimat och där vittringen pågått under mycket lång tid kan den vittrade zonen vara mer än 50 m mäktig. Denna zon är starkt påverkad av vittringen och berget kan ha förvandlats till en vittringsjord. Man kan dock

påpeka att andra typer av vittring kan förekomma i anslutning till sprickor med cirkulerande vatten på mycket stora djup.

Även om den största jontillförseln sker i markzonen medför den vidare transporten genom grundvattenmagasinet en ytterligare jonupptagning och genom den ofta mycket långa uppehållstiden utbildas jämvikt mot förekommande mineral. Särskilt viktig är upplösning av karbonatbergarter, kalksten och dolomit, där stora håligheter kan bildas i berget, karstvittring.

6.3 Saltvatteninträngning

Genom att vatten med hög salthalt har högre densitet än färskvatten kommer i kustområden det salta havsvattnet att tränga in under landområdet och ge salt grundvatten på stora djup. Gränsskiktet är ofta skarpt, men genom grundvattenuttag förändras dess läge och brunnar som tidigare gett sött vatten kan få ökad salthalt.

6.4 Föroreningar

Genom olika utsläpp på markytan kan grundvattnets kvalitet påverkas. En stor del av det nitrat som finns i grundvattnet kommer från jordbruket. I tempererade områden är konstgödsel en viktig källa, men i torra områden ger boskap stora nitratmängder lokalt kring vattningsställen där boskapen samlas.

6.5 Hydrotermala processer

I vanliga fall ger grundvattnet och dess salter endast ringa påverkan på berget och dess hållfasthet. I områden med vulkanisk och tektonisk aktivitet kan emmelletid vatten med hög kolsyrehalt och hög temperatur tränga fram genom bergets sprickor. Detta medför en omvandling av sidoberget. Bland de mineral som kan bildas märks svällande lermineral och man får anta att de lerzoner som påträffas i svenskt urberg hör samman med tektoniska rörelser, som skett för mycket länge sedan. Zoner med svällande lermineral hör till de allvarligaste byggnadsproblemen som man kan träffa på i berg. De kan förekomma dels i områden med pågående vulkanism eller tektonisk aktivitet, dels i områden, som tidigare varit utsatta för detta. Sådana områden finns i vårt svenska urberg och de svällande lerorna har här bildats för mycket länge sedan. En utförligare behandling av problemet ges bl a i Fecker (1981).

6.6 Gaser i grundvattnet

I områden med djupt cirkulerande grundvatten förekommer ofta stora koldioxid-mängder lösta i vattnet. Genom att grundvatten flödar in i en tunnel sänks trycket och gasen frigörs. Koldioxid är i sig själv inte giftig, men om stora mängder kommer ut i en tunnel finns risk för kvävning.

I områden med sedimentär berggrund kan även metan finnas löst i vattnet. Då metan är brännbart finns en stor explosionsrisk.

I urberg och områden med uranhaltiga skiffrar finns ofta radon i små mängder löst i grundvattnet. Genom radonets radioaktiva sönderfall finns en uppenbar hälsorisk även vid låga halter.

Man bör således alltid vara uppmärksam på gasläckage från berg och vatten och sörja för en god ventilation i berganläggningen. Om möjligt bör inläckande vatten tas direkt på dräneringsborrhål och ledas i sluten ledning för att undvika gasavgång.

6.7 Vattenkvalitet och byggande

Grundvattnets sammansättning påverkar ofta härdningstiden för injekteringsbruk. En hög kloridhalt kan medföra snabbbindning av cementbaserade bruk. En vattenanalys är ofta ett gott hjälpmedel vid val av injekteringsmedel.

Vatten med hög salthalt är oftast mycket korrossiva, vilket kan ge problem i pumpar och rörledningar om inte materialet väljs med omsorg.

Vatten med hög hårdhet kan ge igensättningar i pumpar, liksom vatten med hög järnhalt.

7. INLÄCKNING TILL BERGANLÄGGNINGAR

Inläckande vatten till en anläggning under byggnad kan dels vara ett problem genom sin mängd, dels kan som en följd uppstå stabilitetsproblem och liknande besvärligheter. Man finner vidare att problemen nära hör samman med den geologiska situationen. I viss mån kan dessa påverkas av anläggningens utformning och problemen blir delvis olika för en tunnel och ett bergrum.

7.1 Vattenproblem vid tunneldrivning

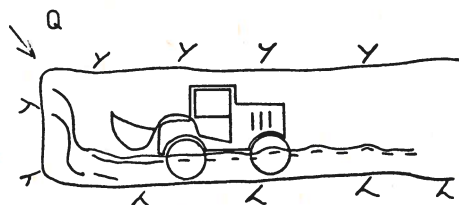


Fig 7.1 Stor vatteninläckning

En stor inläckande vattenmängd orsakar direkta problem vid drivningen genom att arbetet försvåras. Stora pumpkapaciteter fordras för länshållningen. En grundvattensänkning uppkommer kring inläckaget, som kan orsaka sättningar uppe vid markytan.

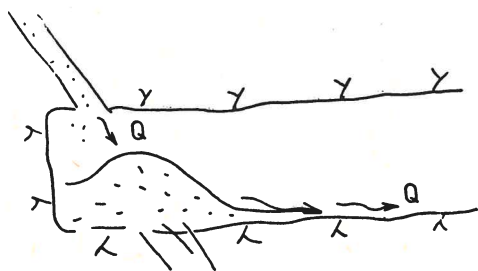


Fig 7.2 Erosion

Sprickzoner som skäres av tunneln kan vara fyllda av lösmassor, som eroderas och transporteras av inläckande vatten. Innan förstärkningar vidtagits kan tunneln fyllas av erosionsprodukter.

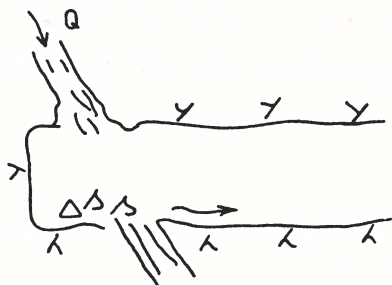


Fig 7.3 Svällande material

Vattenförande sprickzoner kan vara fyllda med svällande lermineral, som orsakar blocknedfall och andra stabilitetsproblem.

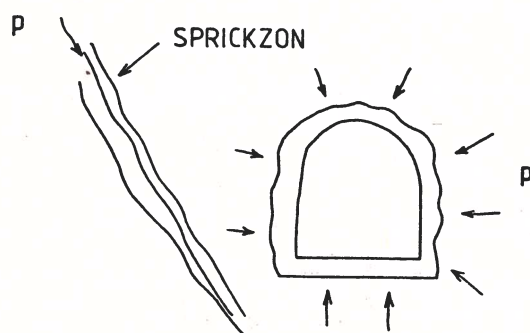


Fig 7.4 Högt vattentryck

Högt vattentryck kan öka risken för nedfall av block eller hela väggpartier. Vid helinklädnad medför det höga trycket att tunneldimensionen måste ökas för att tillräckligt kraftiga dimensioner skall kunna erhållas på valvbågarna.

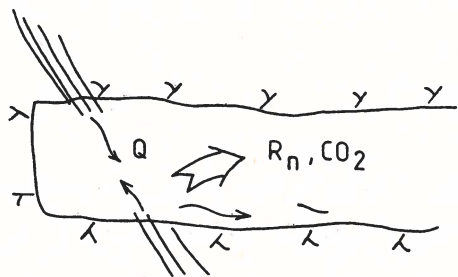


Fig 7.5 Inläckande gas

Inläckande vatten kan innehålla lösta gaser som t ex radon, koldioxid och metan, som kan fordra ökad ventilation för att tunnelarbetet skall kunna fortsättas med hänsyn till arbetarskyddet.

Ett vattenproblem som bör uppmärksammas i ett kallt klimat är svallisbildning på vintern. Speciellt markant är problemet i lutande tunnlar där självdrag kan uppkomma.

7.2 Vattenproblemens beroende av geologin

I ett urberg av den typ som finns i Sverige är de svaga partierna relaterade till krosszoner. Dessa är ofta också vattenförande. Krosszonerna är en följd av tektoniska rörelser i berggrunden och de kan ofta spåras i topografin ovanför tunnelbygget.

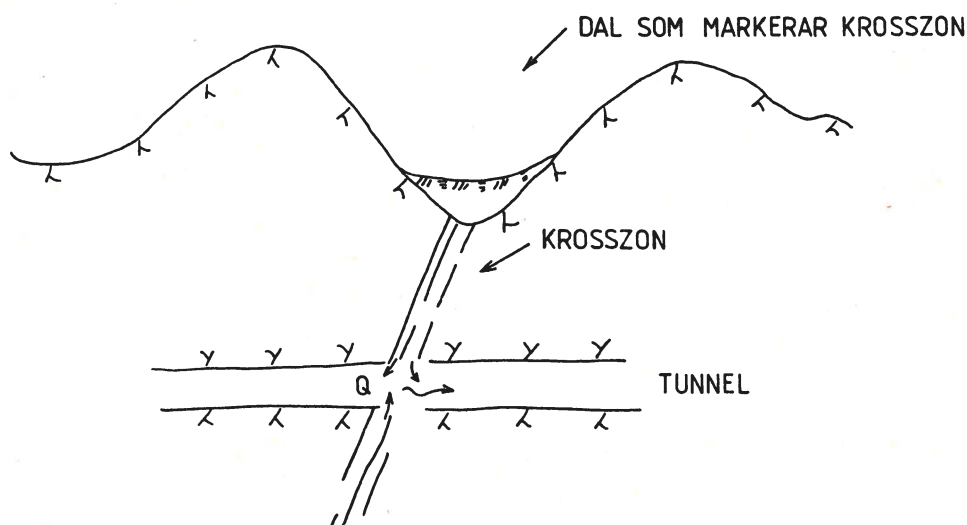


Fig 7.6 Svagt berg orsakat av tektoniska rörelser

I sedimentärt berg är förhållandena annorlunda. I lagerföljden kan genomsläppliga enheter finnas, där stora vattenmängder kan erhållas. Även i dessa fall kan berget vara tektoniskt påverkat och lagerföljden tippad och förkastad. Vattenproblemen kan förväntas där en tunnel skär igenom permeabla bergarter som t ex sandstenar.

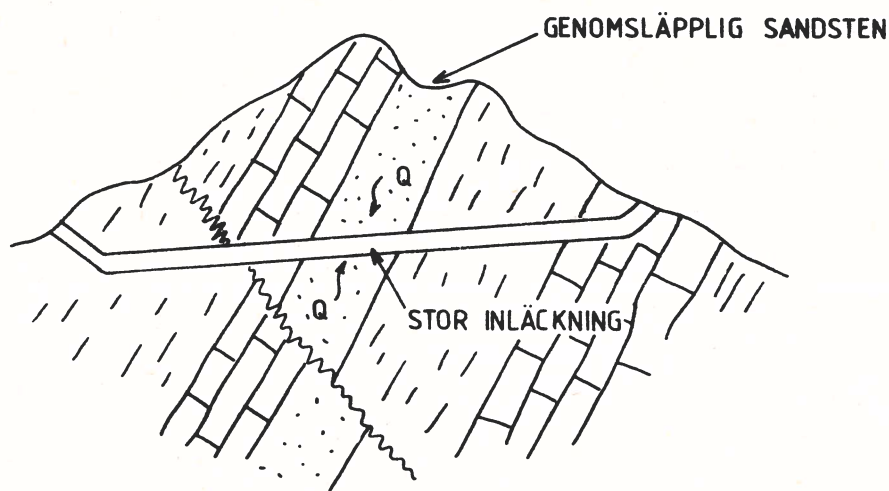


Fig 7.7 Vattenproblem i sedimentär berggrund

En viktig skillnad mot kristallint berg är att vattenproblemen förekommer i hela den sträcka tunneln går genom den genomsläppliga bergarten. Detta kan fordra annan förstärknings- och tätningsteknik.

Man bör också vara vaksam på att gränsskiktet mellan två olika bergarter ofta är mer genomsläppligt än bergarten som sådan. Detta orsakas av att bergarterna oftast har något olika mekaniska egenskaper och deformeras olika vid tektoniska rörelser.

I områden med varmt klimat som varit utsatta för vittring under lång tid kan den vittrade zonen nå ansenlig mäktighet, upp till ca 50 m i medeltal. I anslutning till sprickzoner kan vittringen ofta gå betydligt djupare.

Detta medför att bergtäckningen måste vara väsentligt mycket större än i ett tempererat klimat för att tätnings- och förstärkningsproblem skall i möjligaste mån reduceras.

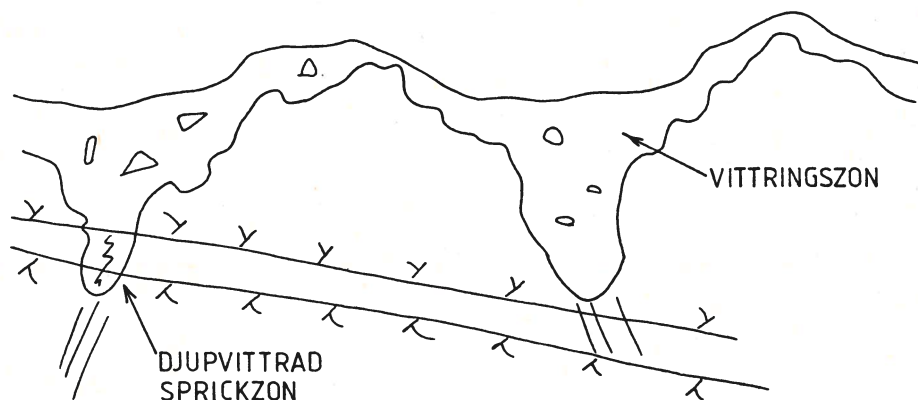


Fig 7.8 Djupvittring

7.3 Att undvika vattenproblem

Det bästa sättet att minimera vattenproblem är ofta att genom en lämplig orientering och lokalisering av anläggningen hålla sig borta från vattenförande bergarter och krosszoner.

För en tunnel sker detta genom att man genom att gå i så rät vinkel som möjligt mot de vattenförande strukturerna gör passagen kort.

Ett berggrum bör man eftersträva att lägga i hela och täta bergpartier och orienterade så att den dominerande sprickriktningen skäres i så stor vinkel som möjligt.

7.4 Inläckning till berganläggningar

Inläckningen till en tunnel som korsar en brantstående krosszon eller genomsläpplig bergart kan under förutsättning att tätning inte sker beräknas med Thiems brunnsekvation.

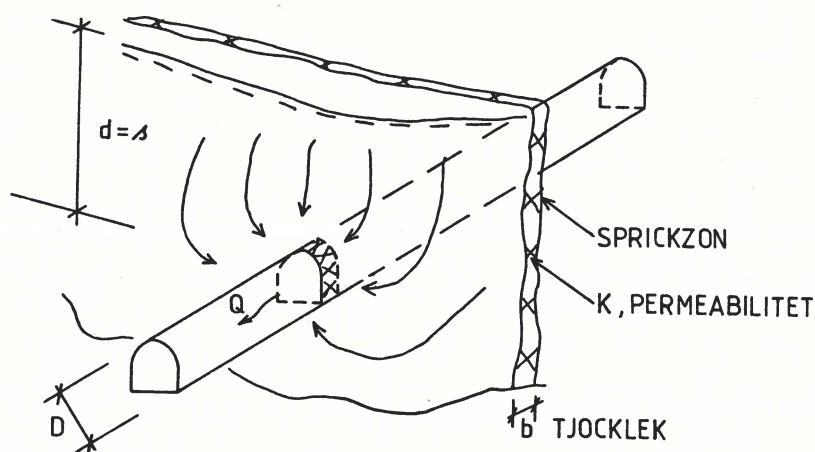


Fig 7.9 Vatteninflöde till tunnel som korsar sprickzon

För just detta fall blir influensradien $R_0 = 2d$ om tunneln går djupt under grundvattenytan. Om $D \approx 2r_w$ representerar en karakteristisk diameter på tunneln erhålles enligt ekvation 5.4:

$$Q = \frac{2\pi d \cdot K \cdot b}{\ln^4 d/D} \quad (7.1)$$

Vi finner således att flödet beror av logaritmen på tunneldiamtern och en dubbling av tunneldiametern medför endast ca 10 % högre inläckage. Vi finner vidare att inläckaget är proportionellt mot sprickzonens permeabilitet och en noggrann uppskattning av denna är väsentlig för att inläckande mängder skall vara möjliga att prognostisera.

För att studera inverkan av en injektering måste vi först modifiera Thiems brunnsekvation. Vid en borrhning är det ofta inte möjligt att göra ren borrhålsväggarna från borrhax. Det gör att man får ett extra inflödesmotstånd till brunnen och en extra avsänkning, s_s .

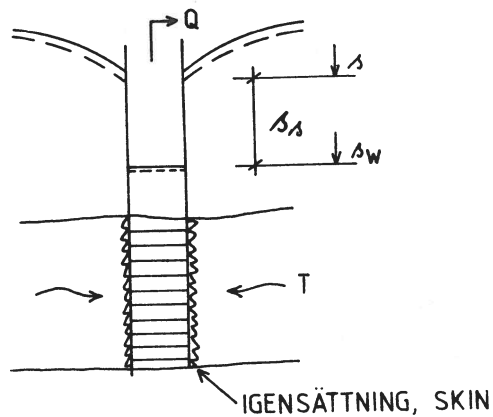


Fig 7.10 Avsänkning i brunn med igensättning

Tilläggsavsänkningen, som orsakas av igensättningen, normeras oftast mot transmissiviteten med hjälp av skinfaktorn, ξ , så att

$$s_s = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \xi \quad (7.2)$$

För en brunn med igensättningar modifieras således Thiems brunnsekvation till:

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} (\ln R_o/r_w + \xi) \quad (7.3)$$

En tunnel genom en sprickzon kan betraktas som en igensatt brunn där igensättningen motsvaras av injekteringen. Om vi antar att den injekterade zonens tjocklek är liten i förhållande till tunneldimensionen, $t \ll D$, kan situationen illustreras av figur 7.11.

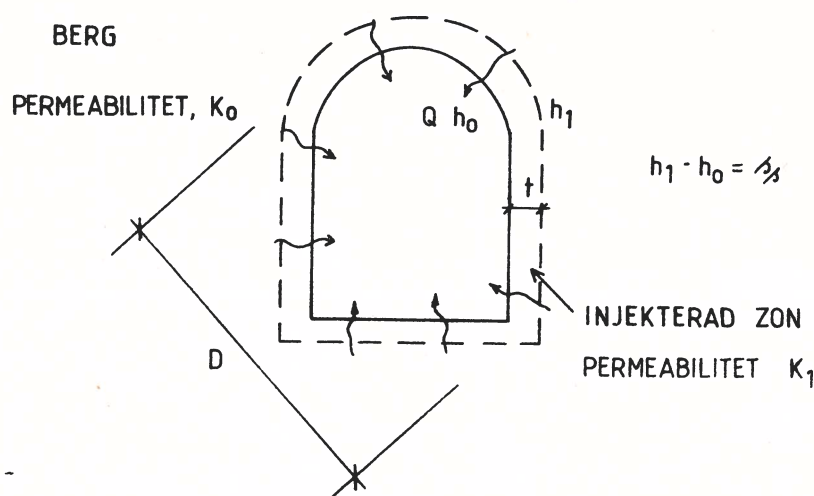


Fig 7.11 Inflöde till injekterad tunnel

Inflödet till tunneln kan enligt Darcy's lag beräknas till

$$Q = \frac{s_s}{t} \cdot Q \cdot b \cdot K_1 \quad (7.4)$$

Där $O = D$ betecknar omkretsen. Om detta insättes i ekvation 7.3 erhålles

$$s_s = \frac{Q \cdot t}{2\pi D \cdot b \cdot K_1} = \frac{Q}{2\pi K_0 b} \frac{K_0 t}{K_1 \cdot D} \cdot 2 \quad (7.5)$$

I analogi med ekvation 7.2 erhålles skinfaktorn

$$\xi = \frac{K_0 t}{K_1 D} \cdot 2 \quad (7.6)$$

Ekvation 7.1 för tunneldränaget förändras då till

$$Q = \frac{2\pi d K_0 \cdot b}{\ln 4d/D + \frac{K_0 t}{K_1 D} \cdot 2} \quad (7.7)$$

För låga värden på permeabiliteten i den injekterade zonen, $K_1 \ll K_0$ erhålles:

$$Q = \pi D b \cdot \frac{d}{t} \cdot K_1 \quad (7.8)$$

Dvs inflödet är proportionellt mot tunnelomkretsen och den injekterade zonens permeabilitet. Ett exempel med givna förutsättningar redovisas i figur 7.12.

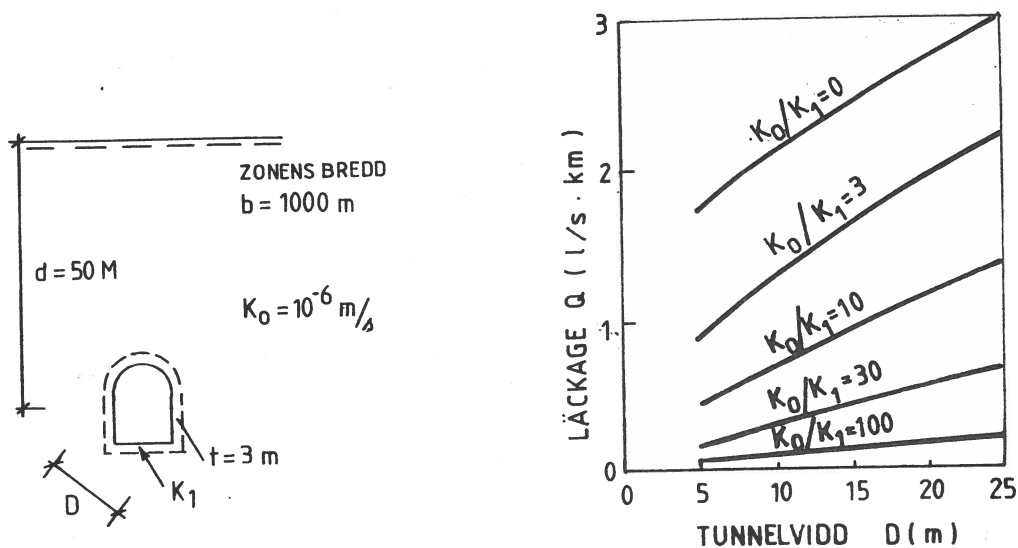


Fig 7.12 Inverkan av den injekterade zonens permeabilitet

Ett annat problem, som kan hanteras på liknande sätt är passagen genom en tjockare skiva av en permeabel bergart, t ex en skiva av sandsten i en sedimentär lagerpacke, se figur 7.13.

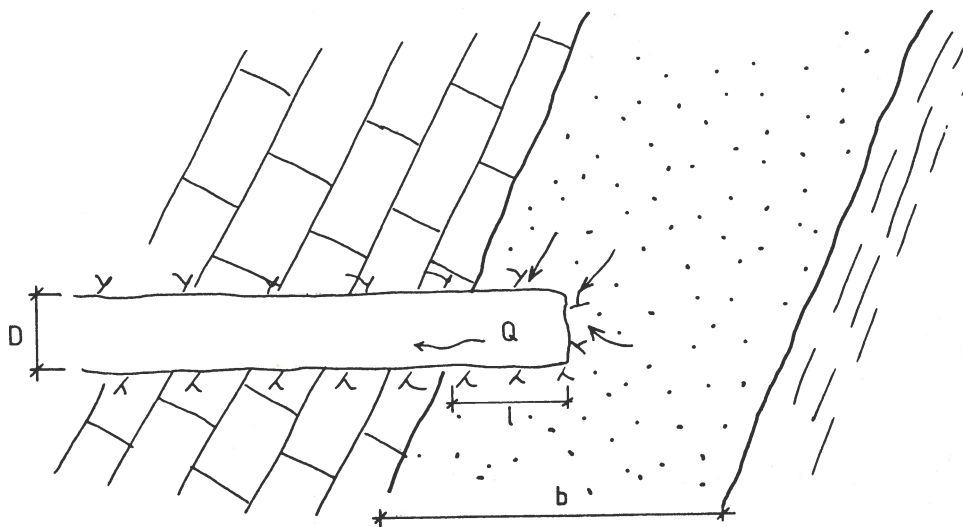


Fig 7.13 Läckage från en skiva av en permeabel bergart

Läckaget till tunneln när den gått igenom hela skivan kan beräknas med ekvation 7.1. När endast en del av skivan penetrerats fungerar tunneln som en brunn med begränsad inflödesarea. Denna kan beräkningsmässigt hanteras som en igensättning eller injektering. Kozeny (1953) m fl har visat att den resulterande skinfaktorn är en funktion av enbart de geometriska förhållandena. I figur 7.14 visas inläckande vattenmängd för olika värden på penetrationen, l/b , i förhållande till en oinjekterad tunnel som går igenom hela skivan.

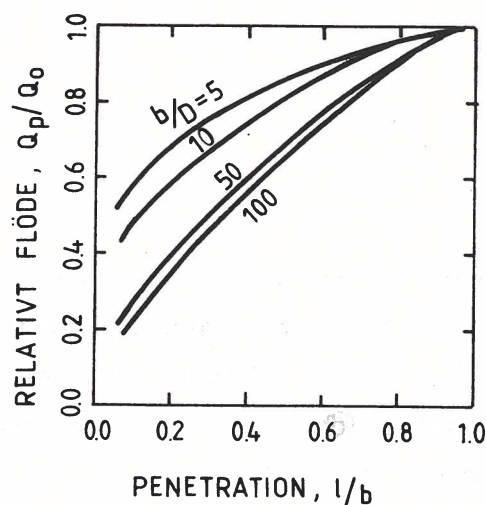


Fig 7.14 Relativ inläckning vid passage av en skiva genomsläppligt berg

Vi finner således att man redan efter en kort sträcka i den genomsläppliga bergarten har fått på sig en mycket stor del av den totala vattenmängden. Detta medför att man innan man går igenom en skiva genomsläppligt berg nog måste ta ställning till drivnings- och tättningsmetod för att kunna hantera vattenproblemen.

7.5 Inläckningens tidsförlopp

I det ovanstående har antagits att stationära flödesförhållanden råder. Det är självfallet inte så i verkligheten. Man finner emellertid att i de flesta fall flödet avklingar logaritmiskt. Detta medför att den inflödande vattenmängden kan vara mycket stor när vattnet påträffas men efter några dagar stabiliseras flödet och sjunker sedan endast långsamt.

7.6 Influenstradien kring en grundvattensänkning

Influensradien tillväxer ändå till dess att balans råder mellan inläckaget till berganläggningen och grundvattenbildningen inom avsänkningstratten. Influensradien bestäms således egentligen av förhållandena vid markytan, men genom att avsänkningstrattens yta tillväxer med kvadraten på influensradien nås relativt snabbt ett pseudostationärt tillstånd, där förändringarna är mycket långsamma.

Om Thiems brunnsekvation modifieras kan influensradien beräknas som:

$$R_0 = \frac{D}{2} \cdot e^{\frac{2\pi T_s}{Q}} \quad (7.9)$$

Där D betecknar ett karakteristiskt mått för berganläggningen. För en tunnel är D ungefär lika med diametern, för ett bergrum ungefär största tvärsnittet. Vi finner således att allteftersom inflödet minskar, ökar influensradien till dess jämvikt nås. Om grundvattenbildningen är liten kommer därför hela magasinet att tömmas och flödet att upphöra.

8. FÖRUNDERSÖKNINGAR OCH DERAS TOLKNING

8.1 Geologisk beskrivning

Innan en berganläggning lämnas ut på anbud utföres som regel någon form av förundersökning. Denna kan ha mycket varierande kvalitet. Oftast finns dock någon form av geologisk beskrivning över området, ett antal undersökningsbörningar och i vissa fall geofysiska mätningar. Tolkningsen av förundersökningarna måste baseras på erfarenhet, men viss principiella synpunkter kan ändå ges.

Undersökningarna av vattenförhållandena i berggrunden är också av varierande kvalitet. I många fall har manschettmätningar utförts i kärnbörnhål, vilket ger en viss möjlighet att bedöma sprickighet och permeabilitet för olika bergartsled. Dessa mätningar har emellertid liten areell representativitet, varför grundläggande geologisk kunskap måste paras ihop med givna data för att en representativ bild av området skall kunna erhållas.

Viktigt är att så tidigt som möjligt bygga upp en sannolik strukturgeologisk modell av området där läget av förekommande bergarter, förkastningar och andra element ingår. Geologen har ofta en god uppfattning om möjliga vattenproblem i olika bergarter, som t ex karstvittring i kalkstenar och dolomiter, porösa sandstenar med hög permeabilitet etc.

8.2 Geofysiska mätningar

De geofysiska metoder som främst kommit till användning är seismiska refraktionsmätningar och geoelektriska mätningar. När man arbetar i områden med annan geologi än i Sverige måste man vara medveten om att förutsättningarna för en tolkning kan vara väsentligt annorlunda. Metoderna bör därför i första hand ses som ett kvalitativt komplement till geologiskt fältarbete och börningar. I huvudsak hänvisas dock till speciallitteraturen.

Seismiska refraktionsmätningar bygger på att man oftast har en högre seismisk gånghastighet på större djup. Detta fungerar mycket bra i Sverige, där urberget har en stor hastighetskontrast mot jordlagren. I områden med djupvittrad berggrund eller sedimentära bergarter är tolkningen väsentligt mycket svårare att utföra, men i princip tillämpas samma metoder som i Sverige.

Geoelektriska mätningar har generellt fått större tillämpning utomlands än Sverige. Även i detta fall bör de främst ses som en kvalitativ metod där områden med låg resistivitet indikerar bergarter med högt vatteninnehåll.

En elektromagnetisk metod som på senare tid fått ökad användning kan förtjäna att nämnas. Det är VLF-mätningar (Very Low Frequency), där det elektromagnetiska fältet från befintliga långvågsstationer mätes. Metoden ger främst indikationer på brantstående elektriska ledare. Dessa kan t ex vara större krosszoner. Metoden är snabb och billig och kan vara ett gott komplement för att underlätta den tektoniska analysen av området.

I figur 8.1 visas ett exempel. VLF- och resistivitetsmätningar används för att lokalisera sprickzoner under ett lager vittringsjord i Övre Volta. I VLF-profilen indikeras zonerna av de punkter där fältlutningen, H_s/H_p , skär nollaxeln, i resistiviteitsprofilen av minimipunkterna för resistiviteten.

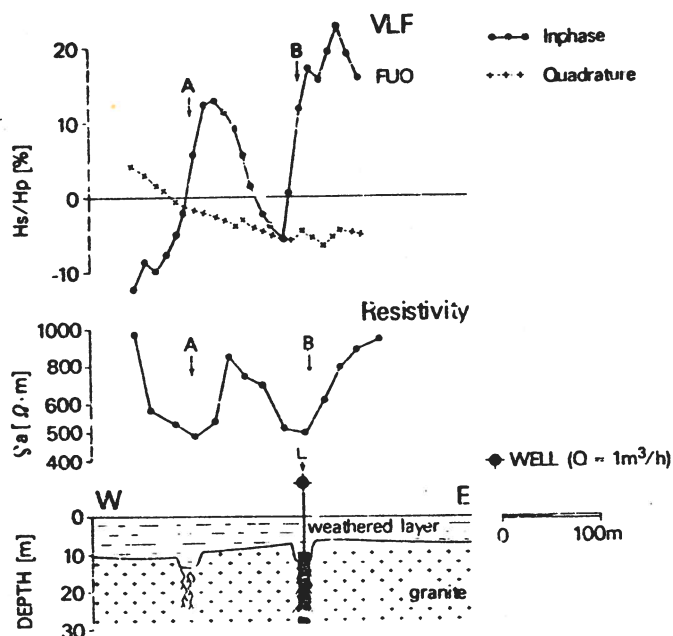


Fig 8.1

VLF- och resistivitetssmätningar i ett område i Övre Volta
(Palacky et al 1981)

8.3 Borrningar och manschettmätningar

Borrningarna utgör ett av de viktigaste stöden för den geologiska modellen över området. Vidare ger borrningar möjlighet till olika hydrauliska tester som t ex manschettmätningar.

Ofta ges i borrhingsdiagrammen värden för bergets permeabilitet, baserade på manschettmätningar. Vid mätningen avdelas en sektion av borrhålet med dubbla manschetter och vatten injiceras i mätsektionen, se figur 8.2.

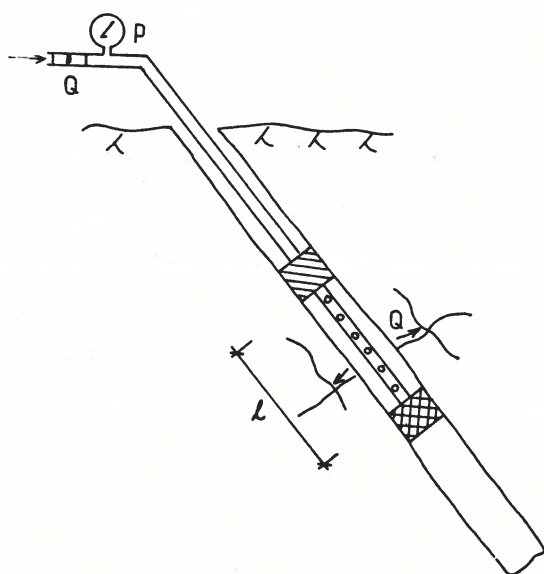


Fig 8.2 Manschettmätning

För varje sektion mätes vattenmängd och injektionstryck. Genom att manschetten flyttas i borrhålet kan hela hålet mätas upp. Utvärderingen baseras vanligen på antagande om stationärt tillstånd, radiellt flöde och isotropa förhållanden. Under dessa antaganden kan med en modifierad form av Thiems ekvation permeabiliteten beräknas som:

$$K = \frac{Q}{LH} \left(\frac{1 + \ln L/d}{2\pi} \right) \quad (8.1)$$

Vid en kritisk granskning av förutsättningarna finner man emellertid att dessa inte är uppfyllda annat än i undantagsfall. Tre faktorer ger en konsekvent övervärdering av permeabiliteten: För det första hinner man normalt inte uppnå

stationära förhållanden, vilket ger ett för stort flöde. För det andra kommer den korta mätsektionen att fungera som en ofullständig brunn på samma sätt som en tunnel genom en skiva genomsläppligt berg. För det tredje ger de sprickor som borrhålet penetrerar en större effektiv radie hos borrhålet än borrhålsradien, Till detta kan läckage vid manschetterna förekomma, som också verkar åt samma håll.

Problemet kan i viss mån avhjälpas genom att data ställs mot en mätning av hela hålet med enkelmanschett. Man finner då oftast att en summering av manschettmätningarna ger ett 3-8 gånger för högt värde på medelpermeabiliteten i hålet jämfört med enkelmanschettmätningen. Det senare är oftast ett bättre värde för hela bergmassans genomsläpplighet och bör därför användas för prognostisering av inläckande vattenmängder.

Det stora värdet med dubbelmanschettmätningar ligger i att sprickzoner med hög genomsläpplighet kan lokaliseras och att en relativbestämning av permeabiliteten kan utföras. Idag har också elektroniska hjälpmedel gjort det möjligt att utföra mätningarna med större precision och bättre tidsupplösning. Detta medför att bättre data erhålls, som kan utvärderas med större noggrannhet. I framtiden torde därför manschettmätningar bli ett ännu bättre verktyg.

8.4 Borrhålsloggning

Ett viktigt komplement till vattenförlustmätningar är geofysisk borrhålsloggning. Metoderna används knappast i Sverige, men har stor användning utomlands. Inom oljeindustrin har tekniken utvecklats till en mycket viktig del av undersökningsarbetet.

Metoderna bygger på att olika geofysiska mätsonder sänks ned i borrhålet och att signalen kontinuerligt registreras på en pappersremsa. De parametrar som mäts kan vara elektriska, elektromagnetiska eller akustiska. Även radioaktiv strålning kan detekteras aktivt eller passivt. Med en diameterlogg kan borrhålets geometri mätas upp.

I figur 8.3 visas hur några av de vanliga geofysiska loggningsmetoderna svarar på de geologiska förhållandena.

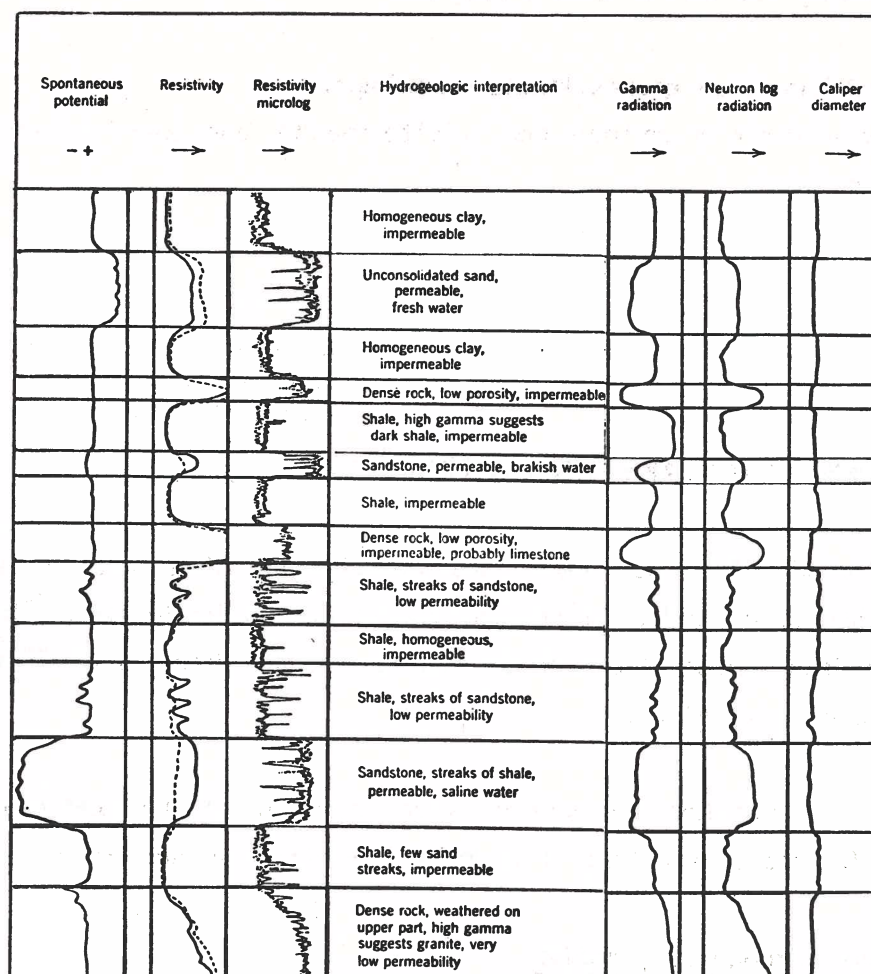


Fig 8.3 En kombination av sex vanliga logmetoder och deras hypotetiska svar på olika geologisk miljö (Campbell och Lehr, 1973)

Metoderna är främst tillämpliga i sedimentär berggrund och tre viktiga syften kan framhållas.

8.4.1 Litologisk beskrivning av borrhålet

I bergarter där kärnborrning är svår att utföra kan man med hjälp av borkaxprov och loggning ge en noggrann beskrivning av lagerföljden. Använda metoder är resistivetsloggning, seismisk gånghastighet och passiv gammamätning.

8.4.2 Kvantifiering av bergets egenskaper

Vissa viktiga bergartsp parametrar som t ex porositet och elasticitetsmodul kan med framgång bestämmas genom loggning.

8.4.3 Bestämning av grundvattnets egenskaper

Viktiga parametrar är salthalt och kolväteinnehåll, som kan bestämmas genom borrhålsloggning.

9. KOMPLETTERANDE UNDERSÖKNINGAR

På anbudsstadiet finns som regel inte möjlighet att göra några omfattande kompletteringar av undersökningarna. Viktigt är emellertid att samla in befintliga geologiska rapporter och andra hydrogeologiska data, som kan ge väsentliga upplysningar om området.

Inför ett byggande kan det däremot vara väsentligt att komplettera undersökningarna för att ge ett fullgott underlag för planering och val av byggmetod.

9.1 Hydrogeologiska grunddata

Då i de flesta områden grundvatten står för en stor del av vattenförsörjningen finns som regel ganska mycket data samlade hos myndigheter och andra organisationer som borrar brunnar, nästan oavsett var man befinner sig i världen.

Data kan finnas dels i olika översikter, som sammanställs för vattenplanering, samt i form av borrhings- och brunnsarkiv. I enstaka fall kan även detaljstudier av det intressanta området finnas. Alla sådana data är väsentliga att få tag i och utvärdera på ett så tidigt stadium som möjligt.

Speciellt viktiga är data från brunns- och borrhingsarkiv. I dessa finns uppgifter om lagerföljd, provpumpningsdata m m samlat i obearbetad form. Genom en ofta mycket enkel statistisk bearbetning kan man från dessa dra viktiga slutsatser om permeabiliteten i olika bergarter, bergkvalitet, vattenkemi m m, vilket kan ge en god grund för planering av brytningsmetod m m.

9.2 Undersökningar under byggtiden

De undersökningar som fordras under byggtiden kan vara av varierande art. Alltifrån grundläggande studier av hur ett objekt skall genomföras, där det hydrogeologiska arbetet kan vara en del i en större enhet, ned till rutinmässiga undersökningsmoment, som ingår som en integrerad del i drivningsarbetet.

I detta sammanhang skall endast pilothålsborrning och de data, som kan dras från denna nämnas. Bakgrunden är att man genom olika studier har visat att representativiteten hos hydrogeologiska data, speciellt i kristallin berggrund, är dålig. Man måste därför undersöka i detalj för att kunna ge detaljförutsättningar. Pilothålsborrning är därför ett mycket bra sätt, då man direkt får data från den framtida tunnelsträckningen. Från borrhjningsprotokollet har man direkt avläsa om man gått igenom sprickigt eller genomsläppligt berg och i bästa fall finns även en anteckning om hur mycket vatten hålet ger.

För att öka värdet av hålet kan man enkelt komplettera data med en tryckuppsygnadsmätning, se figur 9.1.

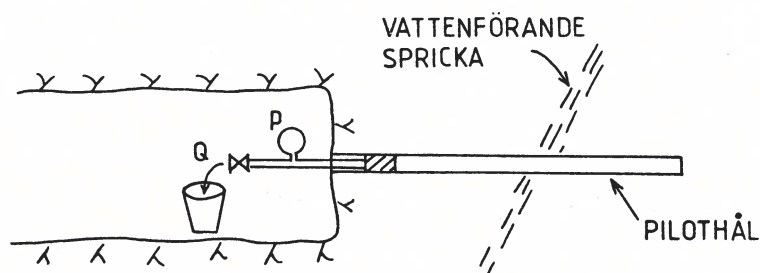


Fig 9.1 Tryckuppsygnadsmätning i pilothål

I hålet monteras en enkelmanschett försedd med manometer och avstängningsventil. Innan mätningen påbörjas mätes vattenflödet och när ventilen stängts mätes trycket regelbundet så att en tryckuppsygnadskurva kan erhållas. Data plottas sedan i ett halvlogaritmiskt diagram, se fig 9.2.

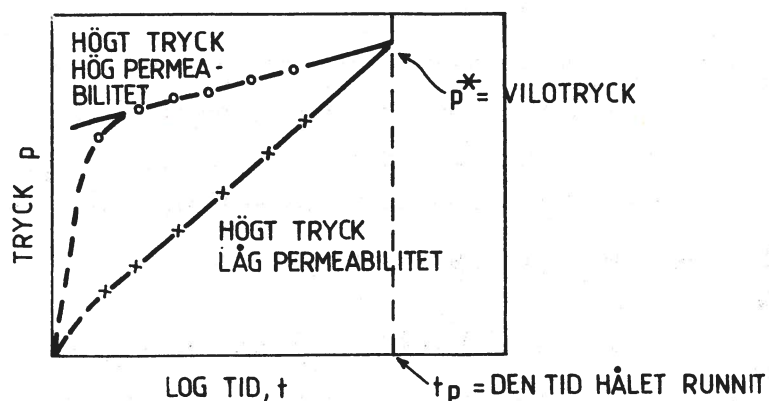


Fig 9.2 Utvärdering av tryckuppbyggnadsmätning

Olika utvärderingsmetoder för mätningarna finns men här skall endast nämnas några synpunkter. Vilotrycket fås genom att den linje som mätpunkterna bildar extrapoleras fram till den tid hålet fått rinna fritt efter det att det borrats. På så vis kan höga tryck i berget förutsägas. Man finner vidare att ju brantare linjen går i diagrammet desto lägre är permeabiliteten, tryckuppbyggnaden fördelas över en längre tidsperiod. Med Thiems ekvation kan transmissiviteten för de genomborrade sprickzonerna beräknas till:

$$T = \rho g \cdot \frac{Q}{2\pi p^*} \cdot \ln \frac{R_0}{r_w} \quad (9.1)$$

Med trycket i bar, flödet i l/s och $R_0/r_w = 1000$ erhålles

$$T \approx \frac{Q}{p^*} \cdot 10^{-4} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (9.2)$$

10. VATTENSITUATIONENS PÅVERKAN PÅ DRIVNINGSMETODEN.

Tunneldrivning sker i Sverige nästan uteslutande på konventionellt vis med borrhning, laddning och sprängning samt utlastning. Om man stöter på vatten kan ett injekteringsmoment tillkomma, som antingen kan vara förinjektering, då det systematiskt inpassas i drivningscykeln eller efterinjektering som utföres på lämplig tidpunkt efter det att brytningsfronten passerat.

I de mjukare bergarter man ofta träffar på utomlands blir frågan om val av drivningsmetod på ett helt annat sätt aktuell. Om inga särskilda komplikationer föreligger är fullortsborrning som regel den snabbaste och mest ekonomiska metoden vid tunnelareor mellan cirka 2,5 till 100 m².

Många värdefulla synpunkter på faktorer, som påverkar valet av drivningsmetod lämnas av A/S Geoteam i delrapporten "Berguttag". Man tar särskilt hänsyn till besvärliga bergförhållanden.

När man överväger att använda fullortsborrning i svagt berg under krävande och osäkra bergförhållanden rekommenderar man att värdera problemen efter följande prioritering:

1. Är det fara för mycket stora vattenläckage?
2. Finns det dåligt konsoliderade svaghetszoner som kan ge ögonblickliga inrasningar?
3. Väntas det problem med squeezing?

Anledningen till att vattenproblemen getts högsta prioritet är att fullortsborrningen är mera sårbar för överraskande stora vattenläckage och mindre flexibel än borrning och sprängning.

Det finns flera exempel på att man blivit tvungen att avbryta tunneldrivningen och överge tunnelborrningsaggregatet i förbindelse med våldsamma vatteninbrott, som ofta beledsagas av inflytning av flytsand, grus och sten.

MARULANDA (1983) beskriver hur ett sådant vatten- och sandinbrott inträffade vid tunnelfronten under utlastning. Vattenmängden var cirka $3 \text{ m}^3/\text{s}$, och sanden transporterades mer än 1.300 m. Sanden fyllde upp tunneln och begravnade all utrustning. Totala sandvolymen var cirka 7.000 kubikmeter.

RICHARDS (1982) redogör för besvärliga förhållanden för fullortsborrning i kalksten med karstbildningar. De största problemen uppstod i förbindelse med förkastningszoner.

Vattenmängder på 700 l/s måste pumpas ut från tunneln och en tunnelborrmaskin kunde återvinnas först efter två år.

Stora hålrum, i form av karstkanaler kan få till följd att maskinen inte kan få ordentligt fäste i berget för framdriften. Därigenom försvåras den fortsatta drivningen även sedan läckagen tätats och eventuella jordmassor lastats ut.

Ett annat mindre dramatiskt men nog så besvärande problem kan uppstå vid relativt begränsad vattenläckning genom att uppslammat finmaterial inte följer med transportanordningarna utan sedimenterar på tunnelbotten varifrån det måste lastas med låg kapacitet. Det finns exempel på att redan relativt små vattenläckage på grund av liknande komplikationer har sänkt framdriften avsevärt. Moderna tunnelbormaskiner är dock inte så känsliga för mindre läckage.

En annan komplikation som kan påverka valet av tunneldrivningsmetod är om berget måste förinjekteras på grund av risken för grundvattensänkning i känsliga områden. Detta medför större olägenheter för fullortsborrning än för konventionell tunneldrivning, men man har t ex från arbeten i Oslo visat att det går att lösa problemet med förinjektering på olika sätt med relativt tillfredsställande resultat av olika typer av tunnelbormaskiner, se ASTING (1980).

Spänningsförhållandena i berget närmast omkring tunneln och därmed inläckningen påverkas av drivningsmetoden. Vidare kommer sprickor av sprängningen att öka sannolikheten för kontakt med naturliga vattenförande sprickor i berget. Dock är det som huvudsakligen bestämmer vattenflödet till en tunnel bergets hydrogeologiska egenskaper och vattentrycket. Ingetdera går att påverka med drivningsmetoden. Den totalt inläckande mängden bör därmed vara i stort sett oberoende av drivningsmetoden. Sättet att ta hand om vattnet och kostnaderna för detta kan däremot vara väsentligt olika.

För konventionell tunnelsprängning är organisationen för tätning och förstärkning väl etablerad. För fullortsborrning är situationen något annorlunda. Genom att ett fullortsaggregat är dyrbart är gångtiden väsentlig för att få god ekonomi. Dessutom medför en tunnelkollaps, där aggregatet förloras en stor ekonomisk förlust. Båda dessa faktorer gör det ännu viktigare än vid konventionell tunneldrivning att tätning och förstärkning kan utföras snabbt och att en hög beredskap finns på plats.

Situationen kan jämföras med förhållandena vid en oljeborrning, där riggtiden är dyrbar och dyr utrustning finns nere i hålet. Detta har medfört att man inom oljeindustrin oftast har en omfattande utrustningspark på plats, som normalt står obemmanad men med kort varsel kan sättas i arbete.

Vid fullortsborrning är det därför viktigare än någonsin att bygga upp organisationen så att tätnings- och förstärkningsutrustning finns tillgänglig på arbetsplatsen för att kunna sättas in med kort varsel. Allt för att ge så korta drivningsavbrott som möjligt.

Sammanfattningsvis kan sägas, att många faktorer påverkar valet av drivningsmetod inte minst olika former av vattenproblem. En definitiv varningssignal kan ges för fullortsborrning om en tunnel måste drivas neråt i ett område där risk för karster och stora vattenläckage finns.

11. ANBUDSHANDLINGAR - VATTENPROBLEM

Erfarenhetsmässigt sammanhänger de verkligt stora avvikelserna mellan å ena sidan prognos, budget och anbud och å andra sidan tidsåtgång, kostnad och resultat med vattenproblem. Detta kan i sin tur leda till att de inblandade parterna blir djupt oense om hur uppkomna situationer skall lösas och vem som skall stå för kostnaderna.

Av denna anledning kan det vara motiverat att beröra hur situationen är i anbudsstadiet och vad som kan göras för att lägga grunden till ett korrekt anbud som senare kan underlätta effektiva lösningar i samförstånd av vattenproblem, som kan uppkomma.

Som bakgrund till det följande kapitlet om åtgärder erinras om de villkor som ofta gäller för en entreprenör, som skall avge ett anbud på ett tunnelprojekt utomlands. Framställningen följer i förkortad form en intern redogörelse av Sture Idner, Chief Estimator, Skanska, Danderyd. Vissa tillägg och synpunkter mera direkt kopplade till vattenfrågorna har tillkommit.

Entreprenören har följande anbudshandlingar (Tender Documents) att ta hänsyn till

- * Specifications, som tekniskt anger hur varje delarbete skall utföras.
- * Payment Clauses som reglerar hur entreprenören skall få betalt för det arbete han uträttat enligt specifikationerna.
- * Bill of Quantities som anger mängder på de olika delarbetena med en kolumn som entreprenören skall prissätta post för post.
- * "Information to Tenderer" som t ex handlar om regnmängder, vattenföring i älvar och de viktigaste egenskaperna hos berggrunden.
- * Drawings.

I anbudshandlingarna sägs också ofta att ett officiellt besök på arbetsplatsen (officiel site visit) skall ordnas på en viss dag.

Entreprenören skall producera ett anbud (Tender) innehållande bland annat följande:

- * Prissättning på Bill of Quantities
- * Clarifications
- * Method Statement, som skall innehålla en beskrivning av den maskinutrustning (plant) som han avser använda, den personal som han kommer att använda och metoder och tekniker

För att närmare se på ett par av de handlingar som ingår i anbudshandlingarna (Tender Documents) så är kontraktsvillkoren (Conditions of Contract) ofta baserade på FIDIC ("red book"). I denna finns ett par klausuler som är av särskild betydelse med avseende på bergfaktorerna (rock factors) inklusive vattenproblem.

I första avsnittet av Clause 12 talas det bland annat om förhållanden och hinder som en erfaren entreprenör rimligen inte kunnat förutse. Om man ser dessa formuleringar mot bakgrunden av svårigheterna att förutbestämma vattenproblem i dåligt berg över huvud taget och därtill betänker den bristfälliga standarden på många handlingar när det gäller dessa problem så kan man bättre förstå de motsättningar som kan uppstå mellan parterna på projekt som visar sig rymma oförutsedda vattenproblem. Dessa motsättningar utgör ofta ett hinder för rationella lösningar när dessa bäst skulle behövas. I stället uppstår icke så sällan handlingsförklamation och ställningskrig så att tidsåtgången och kostnaderna för projektet blir avsevärt mycket större än nödvändigt. Ofta blir alla inblandade parter lidande.

Andra avsnittet i Clause 12 handlar om "Adverse Physical Conditions and Artificial Obstruction" vilket är basen för de claim situationer som ofta uppstår mellan parterna. Ett claim från entreprenörens sida är ett anspråk på betalning, som måste baseras på de verkliga kostnader, som han åsamkats på grund av de oförutsebara förhållandena. Om emellertid entreprenören har missbedömt förhållandena så kommer han att förlora pengar och kan också få betala böter för att inte ha slutfört arbetet i rätt tid.

I betalningsvillkoren (Payment Clauses), som ofta är skilda från arbetsbeskrivningen (Specifications) är det mycket viktigt att fastställa vem som är ansvarig för att åtgärda och bekosta eventuella vattenproblem, som dels kan försvåra förstärkningsarbetena avsevärt och dels i sig själva kan kräva kostsamma åtgärder.

Betalningsföreskrifterna (Payment Clauses) kan stipulera gränser för entreprenörens ansvar att inom å priserna hålla tunnlarna läns. Det kan t ex vara en gräns på 1000 liter per minut och front och i ett sådant fall är det enklare för entreprenören att kalkylera vattenproblemen än om han har fullt ansvar.

Information till anbudsgivare (Information to Tenderer) har ofta utarbetats för projektörens ledning men har sedan sammanställts och utgivits tillsammans med anbudshandlingarna för att ge entreprenören någon ledning. Informationen till anbudsgivare är ofta så svårtolkad att den måste lämnas till specialerfarna konsulter för en bedömning av vad som verkligen är viktigt. Till exempel vilken typ av berg som berggrunden består av. Finns det några indikationer på karster eller andra kaviteter? Finns det några indikationer på krosszoner, sprickzoner och öppna sprickor. Vad kan utläsas om vatten, särskilt aggressivt vatten, explosiva gaser, svällande leror, rock bursts, kort och gott "warning signals". Det som man normalt finner är emellertid protokoll från kärnbörning, kanske från ett hål i ena änden av tunneln och ett annat hål i andra änden och man vet inte vad som finns däremellan.

Vid besök på arbetsplatsen (Site Investigation) är det möjligt att göra en rad iakttagelser som kan vara av värde för bedömning av vattenproblemen. Före besöket bör man ha satt sig in i de geologiska förhållandena så väl som möjligt eftersom man då kan tolka naturen bättre. Man vet vad man skall studera särskilt noga. Man bör naturligtvis gå in i eventuella inspektionstunnlar och bilda sig en uppfattning av berget i allmänhet och försöka bedöma vatteninläckningen. Ovan jord kan man få ett allmänt intryck av topografier, av berg och dalar, lutningar, raviner, förkastningar, vattensamlingar, sumpmarker m m. Man kan då i någon mån själv förutse var man kan vänta sig dåliga zoner och vattenproblem.

När det gäller vattenproblem vid dåligt berg, gäller det mer än vanligt att förutse och bedöma de stora riskerna. Man måste ibland ta risker men det gäller att kalkylera alternativa metoder på ett förnuftigt sätt även om underlaget för bedömningarna vid anbudsstadiet ofta är bristfälligt. Se Brännfors (1982).

12. PUMPNING OCH LÄNSHÄLLNING (Utan andra åtgärder)

I tidigare avsnitt har visats hur inläckande vattenmängder till en oinjekterad tunnel kan uppskattas. Med hänsyn till att tunneln strax efter sprängning normalt inte är tätad bör dessa mängder styra pumpvalet om inte särskilda tätningsmetoder utnyttjas.

Om inte omfattande förundersökningar vidtas bör pumpkapaciteten väljas med god säkerhetsmarginal då osäkerheten i bestämningarna är ganska stor. En god trygghet ger pilothålsborrning med tryck-uppbyggnadstest, som ger möjlighet att med god precision bestämma bergets genomsläpplighet i det aktuella tunnelläget.

Tunnellutningen kan också ha betydelse. Om man räknar med att gå igenom ett parti med stora vattenproblem är det lämpligt att ordna med pumpgrop och pumpanordningar innan arbetet påbörjas och sedan driva tunneln i svag lutning uppåt.

Det är vidare viktigt att fortlöpande mäta inläckning i tunneln. Dels för att kontrollera om utförda tätningsarbeten haft effekt, dels för att kontrollera läckaget vid tunnelfronten. Vattenmätning med god precision är svår att utföra men vissa möjligheter finns. Där så är möjligt och erforderligt kan mätöverfall anordnas där noggranna mätningar kan utföras. Pumparna bör vara utrustade med gångtidsmätare för att den uppfordrade mängden skall vara möjlig att uppskatta.

Vilken maximal vatteninläckning som kan tillåtas med hänsyn till acceptabla drivningsförhållanden beror på flera faktorer såsom tunnelns lutning i drivningsriktningen, tunnelns bredd och bergmassans egenskaper.

I entreprenadkontrakt finns ofta angivet en viss mängd vatten som entreprenören skall ta hand om utan extra ersättning. Vid utlandskontrakt får man ofta räkna med att denna mängd är mycket större än den vi är vana vid i Sverige. Man får då inte glömma bort att denna större vattenmängd inte bara representerar en pumpningskostnad utan också många komplikationer för tunneldrivningen och förstärkningsarbetet.

13. DRÄNERING

Dränering i olika former är ett mycket viktigt hjälpmedel vid byggande i berg med vattenproblem. Dels som självständig metod men framför allt i kombination med injektering och sprutbetong.

Tunneln är i sig själv en dräneringskanal. Ibland härrör vattnet från relativt begränsade förekomster av lagrat eller fångat vatten så att inflödet kan avta hastigt med tiden. I vissa situationer kan det vara befogat att observera kraftiga flöden under en tidsperiod, innan åtgärder vidtas för att stoppa dem med injektering. (E Wahlström).

En mycket viktig form av dränering som kan vara mycket framgångsrik när det gäller att passera zoner med flowing ground framgår i princip av figur

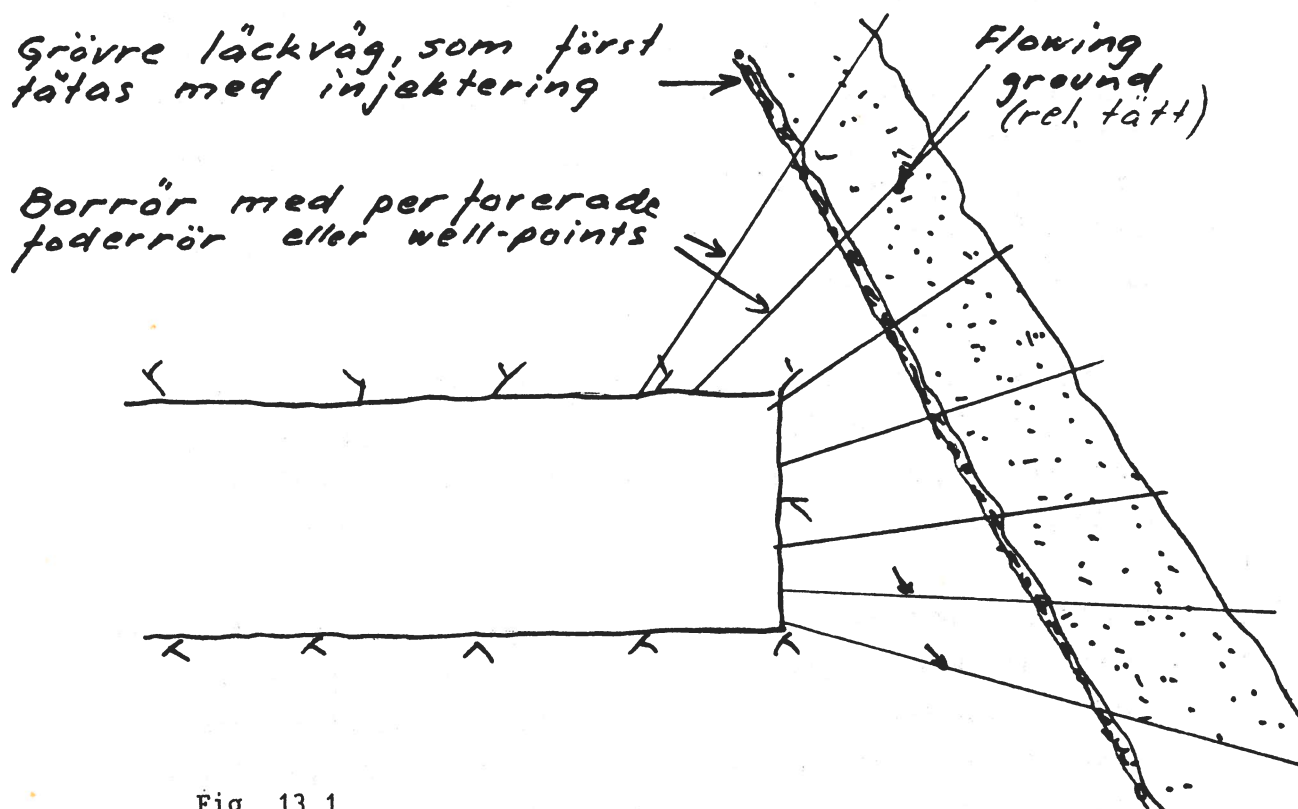


Fig. 13.1

Följande moment kan urskiljas:

- * Borrning av hål
- * Injektering av eventuellt förekommande grövre läckvägar
- * Placering av wellpointrör (ofta enkla perforerade rör) som avvattnar den flytbenägna jorden i zonen och avlastar trycket.
- * Förkortade indrifter.
- * Förstärkning med snabbbindande sprutbetong.
- * Kraftigare förstärkning.

Inom gruvindustrin dräneras oftast brytningsområdena så att brytningen skall kunna ske i torrhet. Orsaken är helt enkelt den att genom de sättningar som brytningen orsakar bryts injekteringar och andra tätningsåtgärder hela tiden upp och ger vattnet nya vägar.

Kring underjordsgruvor i drift finns därför oftast ett system med orter som dränerar berget kring malmen. Orterna anläggs ofta som kombinerade undersöknings- och dräneringsorter.

Vid en större underjordsanläggning finns ofta möjlighet att göra något liknande. Genom att djupt liggande tunnlar bryts så tidigt som möjligt kan man ofta sänka trycket kring högre liggande större bergrum och därmed minska vattenproblem. Ett exempel kan vara en underjordisk kraftstation där man genom att tidigt utföra sprängningarna för avloppstunnel och sugrör kan minska vattenproblemen i maskinhallen.

Dräneringshålen kan också användas till att underlätta avledning av vatten från området närmast stoffen genom att man via manschetter och slangar eller rör leder det bakåt i tunneln.

Ett exempel på användning av grundvattenkontroll genom borrhning i djupa brunnar kompletterad med ett system av well points i tunnelbotten beskrivs kort av T G Mc Cusker (1982)

"Groundwater control is usually maintained by pumping from deep wells, spaced 400-700 feet apart. So much reliance was placed in past practice that the Owner and the Contractor failed to observe significant facts related to the project now discussed.

The tunnel was at a much greater depth than most tunnels in the area with respect to the amount of sandstone overlying the tunnel. The alignment crossed a monocline which brought an aquiclude to within a few feet of the tunnel invert. Reliance was placed on a pumping test for another project a mile distant to provide dewatering data.

During construction, the deep well system did not control water adequately and the contractor was forced to resort to well-point systems in the tunnel invert to supplement deep-well pumping.

There was some evidence that significant aquitards of silty sandstone were present in addition to the underlying siltstone aquiclude.

No core had been recovered from borings, the logs being purely descriptive. Logging of strata exposed during well-drilled was so badly done as to obscure information which would otherwise have been seen to be significant".

14. FRYSNING

Principen är att vattnet i porer och sprickor fryses varigenom bergmassan temporärt får betydligt ökad hållfasthet och täthet. Köldalstringen baseras på den temperatursänkning som erhålles när ett lämpligt köldmedium övergår från vätska till gas.

Denna förångning kan man låta ske direkt i frysrör som placerats i borrhål i bergmassan. Efter förångningen kan köldmediet antingen gå i retur till en kompressor och kondensator eller också släppas ut i omgivningen. Vid s k indirekt frysning sker förångningen i en särskild värmeväxlare som kyler en s k köldbärare (t ex kalciumkloridlösning eller etylenglykol), som i sin tur får cirkulera i ett slutet system som kyler bergmassan. Med frysning kan man klara mycket svåra förhållanden t ex kross-zoner, förvittrade partier, sprickor fyllda med lera eller fin sand eller t o m passera besvärliga lösa jordlager eller rasmassor. De frysta partierna erhåller en betydande hållfasthet, som är högre ju lägre temperaturen är. Hållfastheten är vidare beroende av jordartens kornstorlek och vattenhalt. Frusen sand har avsevärt större hållfasthet än frusen lera. För ren is är hållfastheten lägre. Efter upptining är förhållandena i bergmassan relativt oförändrade vilket ibland kan vara önskvärt. Det förtjänar påpekas att också vattenmättat fruset poröst berg har avsevärt högre hållfasthet än ofruset.

En viktig förutsättning för att frysning skall kunna användas är att grundvattenströmningen under nedfrysningen är obetydlig. Ibland kan det vara nödvändigt att utföra en injektering före frysningen.

Vid kohesionsjord får man också vara medveten om att man kan få tjällyftningsproblem och att det bildas islameller som, när vattnet tinar, kan ge upphov till sättningar och otätheter.

Kostnaden för frysning är bl a beroende på

- * Borrningens omfattning och svårighet.
- * Längden på den tidsperiod som man vill underhålla frysningsningen.
- * Graden av störningar pga grundvattenströmmar.
- * Typ av frysning som kan användas.

I valet mellan injektering och frysning visar sig injektering för det mesta fördelaktigast men i vissa specialfall kan frysning lösa mycket svåra tekniska problem till lägre kostnad och på kortare tid.

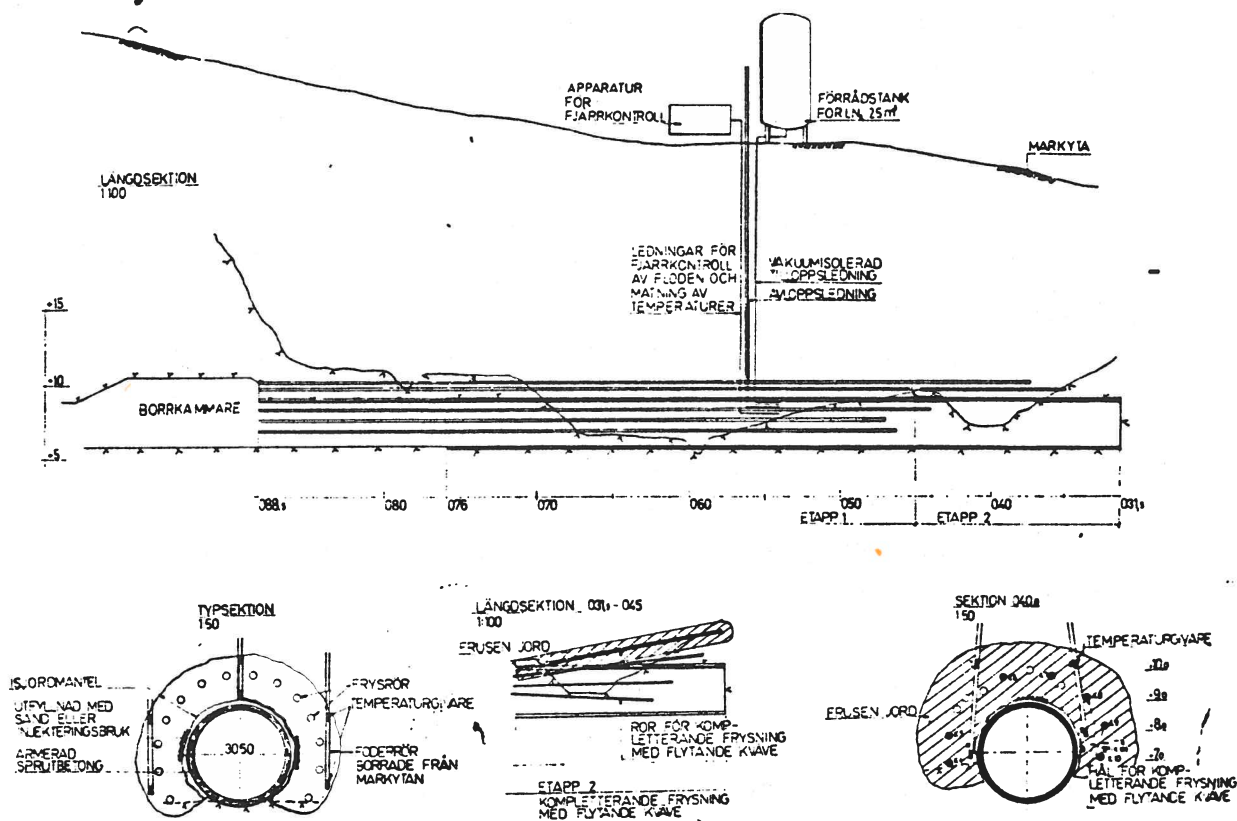


Fig. 14.1 Betongkulvert utförd i skydd av isjordsmantel. Huvuddelen av manteln har frysts med hjälp av kylkompressorer placerade i borrhållaren och freon R 22 som förångats vid -35°C i långa, med kulverten parallella fryskroppar. Kompletterande frysning mellan sektionerna 45 och 31 utfördes med flytande kväve L. Karlsson (1971)

15. TRYCKKAMMARE

Vid tunnelprojekt i lösa jordlager förekommer icke sällan att arbetet vid fronten försiggår i tryckluftkammare.

Mera sällan förekommer denna teknik vid bergprojekt. Nedan beskrivs helt kortfattat ett sådant projekt i Kanada, T G Mc Cusker (1982)

"Montreal is on an island in the St Lawrence River. Bedrock is limestone with overburden of glacial till. This till can be very dense silty clay with boulders to fine sand. Groundwater was expected to be a problem with a tunnel near the waterfront below mean water level. Limestone bedrock was present in the invert with a variable depth of waterhered limestone boulders (sapro-litic) above and till in the crown.

In the tunnel workshaft area, foundations for a large building constructed some years earlier had required dewatering and investigation indicated that a permanent lowering of the water table had resulted. This enabled the start of work to be in free air, although provision was made for compressed air working at a later stage. Three times during the excavation of the early 'dry' section of tunnel, water-filled sand pockets were encountered which led to runs to the surface. Since the tunnel was by this time approaching a section where it would be close to or below a sewer and beneath a city street, compressed air working was begun and no further problems of this type were encountered

16. INJEKTERING

När det gäller åtgärder utöver pumpning och dränering så är injektering i någon form det ojämförligt vanligaste hjälpmedlet mot vattenproblem.

Injekteringstekniken så som den vanligen bedrivs i Sverige, förutsättes känd, varför endast vissa synpunkter här skall ges, som sammanhänger med svårare vattenproblem eller mindre känd injekteringsteknik. För förklaring av grundläggande begrepp hänvisas till Cambefort (1967), Alberts (1971) eller handboken Bygg som väntas utkomma hösten 1983.

16. 1. Personal

Injektering betraktas inte bara i Sverige på många olika sätt:

- * Ett jobb för specialister och specialfirmor
- * Ett arbete som vem som helst kan klara
- * Exklusiv konst
- * Hokus pokus och svartkonst

Mera sällan är man medveten om att modern injektering i väsentliga delar är en teknik, som kan hanteras och kontrolleras ingenjörsmässigt. Men för det krävs både teoretisk utbildning och långvarig praktik hos ingenjörer och arbetsledare samt kunniga och samvetsgranna arbetare.

Injektering bedrivs ofta av specialfirmor på underentreprenad eller av ett specialutbildat lag. Detta kan medföra organisatoriska svårigheter med att inordna injekteringen i övriga drivnings- och förstärkningsarbeten. Särskilt vid förinjektering.

För att komma ifrån dessa svårigheter har man med växlande framgång provat lösningar där berglaget också utför injekteringsarbetena. För att denna integrerade lösning skall fungera krävs självfallet att man har tunnelarbetare med kompetens på såväl injektering som övriga arbetsrutiner i en tunnel. Det gäller också att man har arbetsledare, som har motsvarande bredd på sitt kunnande och sist men icke minst måste man se till att ingenjörs-kunnandet finns att tillgå med kort varsel. (Bergman, Nord). Detta är av största vikt när man ger sig i kast med tunnlar med svåra och omväxlande vattenproblem. Då hjälper det föga om man har många års erfarenhet av den typ av injektering där man jagar vattendroppar. Det kan inte nog kraftigt understrykas att den första viktiga fasen av tunnelarbete mot vattenrisker är *s o n d e r i n g s b o r r n i n g*. Riktning och omfattning avpassas till geologin och dess växlingar.

Allt för ofta verkar det som om tunnelbyggare är helt oförberedda och okunniga om hur man skall hantera vattenproblem. Detta kan också gälla för tillfällena, när man vid sonderingsborrningen lokaliserat en starkt vattenförande zon och varit förnuftig nog att inte spränga på sig vattnet på allvar, genom att man inte känt till hur man kan klara stora sprickor med grundvattenströmning. Exempel finns där framdriften hejdats i flera veckor där ett förberett och rutinerat agerande med rätt personal, material och utrustning skulle ha löst problemen på några dygn.

16.2 Material

Ett mycket stort antal material av de mest skilda ursprung används vid injektering. Gemensamt för dem är att det trycks in i form av en vätska. (I sällsynta fall kan gaser komma ifråga t ex som hårdare). Vanligen är det fråga om suspensioner, emulsioner eller lösningar baserade på vatten.

Vid valet av material blir svaret ofta en kompromiss, där man måste ta hänsyn till en mängd faktorer och krav t ex partikelstorlek, viskositet, gelningsförhållanden, stabilitet mot separation samt hållfasthet, täthet och beständighet. Vissa injekteringsmaterial fungerar inte i sura bergarter andra inte i basiska. Grundvattnets kemiska sammansättning kan också ha en avgörande betydelse för gelning, hårdnande och beständighet.

En egenskap som man måste fästa stort avseende vid är materialets eventuella vådlighet för arbetsmiljön i tunneln och på omgivningen. Många i övrigt förnämliga injekteringsmedel har helt förbjudits på grund av sin giftighet.

Vid varje materialval ställs man inför frågan om ekonomin. Det kan vara svårt nog att fastställa det injekteringsbruk som uppfyller de tekniska kraven och samtidigt ger den lägsta materialkostnaden men därtill kommer att hanteringskostnaden för olika bruk kan vara mycket varierande. Vidare tillkommer den viktiga effekten på övriga arbeten i tunneln. Ett snabbbindande injekteringsmedel som möjliggör salvbörning direkt efter en injekteringsomgång kan t ex medföra så stora fördelar att kostnaden för materialet är försumbar.

Det ojämeförlikast vanligaste injekteringsmedlet är vattensuspensioner av cement. Ofta används tillsatsmedel för att uppnå speciellt önskade effekter såsom förlängning eller förkortning av bindetiden, för minskning av sedimentationen, för minskning eller ökning av viskositeten och för minskning av sättningen. Polymera tillsatsmaterial börjar vinna insteg och mycket talar för en fortsatt utveckling inom detta område.

En fråga som diskuterats i injekteringssammanhang i decennier världen över är valet av cementsuspensionens vattencementtal dels vid starten och dels vid den fortsatta injekteringen. Vissa tekniker hävdar att man skall starta med ett mycket tunt bruk med t ex vct 10 (viktsförhållandet vatten till cement) som sedan

endast långsamt förtjockas. Andra åter hävdar att man praktiskt taget aldrig har anledning att starta med högre vattencementtal än ett eller två. Prov utförda av bl a US Army Corps of Engineers och av Water Resources Commission, Australien, ger stöd åt uppfattningen att de mycket tunna blandningarna är mindre lämpliga. Utvecklingen tycks långsamt gå mot användning av suspensioner från vct 2 och neråt.

Ett intressant bidrag till denna diskussion är de teorier och den forskning som utförts av W Wittke och M Wallner (1976). De framhåller att man endast behöver ett vattencementtal på ca 0,25-0,45 för cementets bindning och hårdnande och att den stora mängden överskottsvatten, som man ofta använder som transportmedel för cementet leder till ökad tidsåtgång och dåligt resultat om överskottsvattnet inte kan pressas ut igen.

Man har i stället föreslagit och provat ett förfarande som baserar sig på en vällingliknande stabil cementsuspension med tillsats av två å tre procent bentonit och ett lämpligt dispergerande tillsatsmedel. Prov har utförts med viktförhållande mellan vatten och summa fasta beståndsdelar på 0,45. Sprickor på 0,5 mm kunde penetreras och helt fyllas med injekteringsmedel utan vatten-separation.

Många av de mest använda injekteringsmedlet kan tillsättas luft och omvandlas till s k u m med stor användbarhet. Cambefort (1977). Skumbruk är ej annat än ett vanligt bruk med emulgerad gas och innehåller ej mycket fasta material. Ett skum baserat på cement kan jämföras med ett mycket utspätt cement-bentonitbruk. Men dessa två bruk uppför sig ej likadant. Under det att det utspädda cement-bentonitbruket är en nära på newtonsk vätska besitter däremot skumbruket en sådan styvhet att det praktiskt taget ej sjunker ihop förrän det kommer ut ur ledningen. Denna skillnad i egenskaper ger dem helt skilda användningsområden. Med polymera material kan man också åstadkomma ett injekteringsmedel som

skummar upp när trycket sjunker t ex om vätskan lämnar det höga trycket i ledningen och kommer ut i en öppen spricka eller hålighet i berget där trycket är lägre. - Viskositeten mångfaldigas härvid (upp till 100 ggr), vilket gör processen särskilt lämplig för att stoppa starka vattenströmmar även i mycket stora sprickor där traditionella injekteringsmedel skulle spolas bort. C. Alberts och K Lindman, (Sv pat 1976). När man väl fått stopp på vattnet bör man komplettera injekteringen med ett motståndskraftigare bruk t ex med cement.

Till samma ändamål lämpar sig också enkomponentiga injekteringsmedel baserade på polyuretan, som skummar och polymeriseras när det kommer i kontakt med vatten.

16. 3. Maskiner och utrustning

När det gäller den mångfald av blandare, kolloidkvarnar, omrörare, pumpar osv som finns i marknaden så hänvisar vi till speciallitteraturen. Här skall endast ges några korta synpunkter.

Se till att maskinerna kan blanda och pumpa även tjockt bruk med sand och sågspån eller att sådan utrustning snabbt kan tillgås. Många av de maskiner, som idag används i våra tunnlar är helt otillräckliga härvidlag. De är konstruerade för att hantera tunt cementbruk.

För att klara stora vattenflöden behövs också driftsäker utrustning med hög kapacitet. Tänk också på att man har tillgång till grova slangar, rör och manschetter som medger hög kapacitet.

I borrhål, som vill rasa igen kan man ha stor nytta av foderborrrör med ventiler (Ventilrörsmetoden). Uppblåsbara manschetter är också användbara i många fall.

16.3.1. Elektroniska hjälpmedel

Liksom på de flesta andra områden har elektroniken gjort sitt definitiva intåg vid injekteringsarbeten. De fördelar som man framför allt kan vinna är:

- * Bättre förståelse för vad som händer under injekteringens gång i berget.
- * Bättre beslutsunderlag för injekteringens fortsatta bedrivande.
- * Besparingar i tid och kostnader.

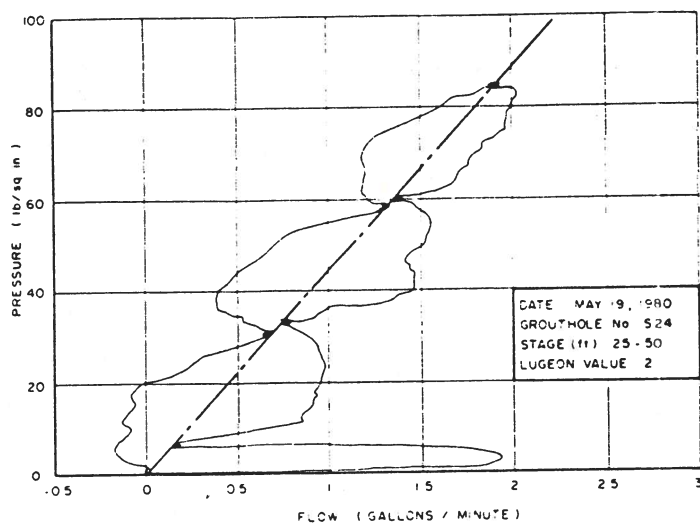
Konventionell övervakning av injekteringsarbeten kräver att trycket kan avläsas och kontrolleras vid injekteringsmanschettens överände och att injekteringsvolymen på en viss tidsperiod kan mätas vid injekteringsstationen. För att tillgodogöra sig fördelarna med elektronik skall åtminstone dessa parametrar avläsas och presenteras på ett ställe där kontrollventilerna för injekteringen kan manövreras medan både tryck och flöde kan observeras samtidigt. Detta ger maximal kontroll över förloppet.

Det finns på marknaden tillförlitliga och robusta elektroniska tryckmätare som kan kopplas in var som helst i systemet och som avger signaler, som kan tolkas och läsas in av en mikroprocessor.

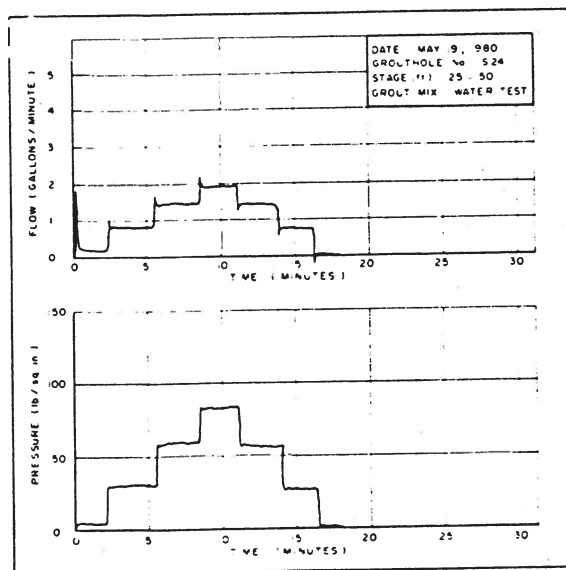
På samma sätt finns det elektroniska flödesmätare, som mäter strömningshastigheten och sedan utför integration över tid så att volymen erhålls.

Förutom den momentana kontrollen är det viktigt att skaffa sig en bild av hur tryck och flöde var för sig ändras med tiden. Detta kan åstadkommas med en kurvskrivare (chart recorder) med två ingångar. Ett hjälpmedel som verkligen kan öka förståelsen för vad som sker i berget under injekteringen är en kurva som anger sambandet direkt mellan flöde och tryck. Denna kan ritas upp automatiskt med hjälp av en x-y plotter (t ex Hewlett-Packard 7035 B).

Figuren visar de tre nämnda kurvorna. Dels för vattenförlust-
mätning och dels för cementinjektering. M.G. Jeffries et al.
(1982)

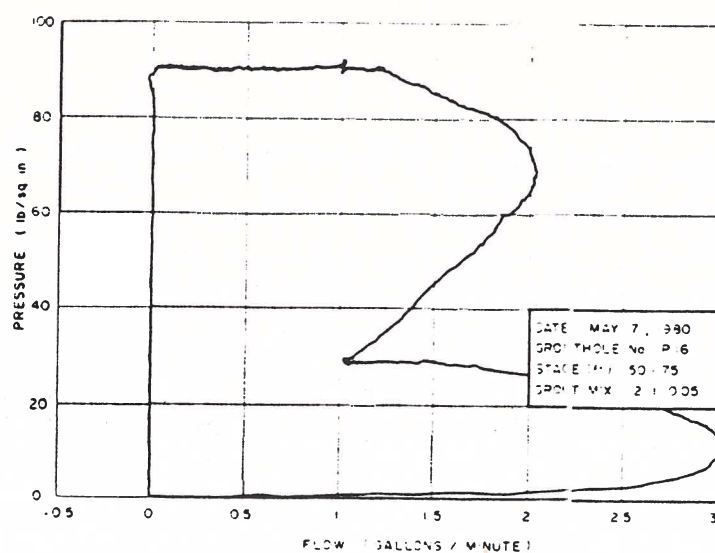


RECORD FROM X-Y PLOTTER



PLOT FROM CHART RECORDER
RESULTS OF LUGEON WATER TEST

Fig. 16.3.1



RECORD FROM X-Y PLOTTER

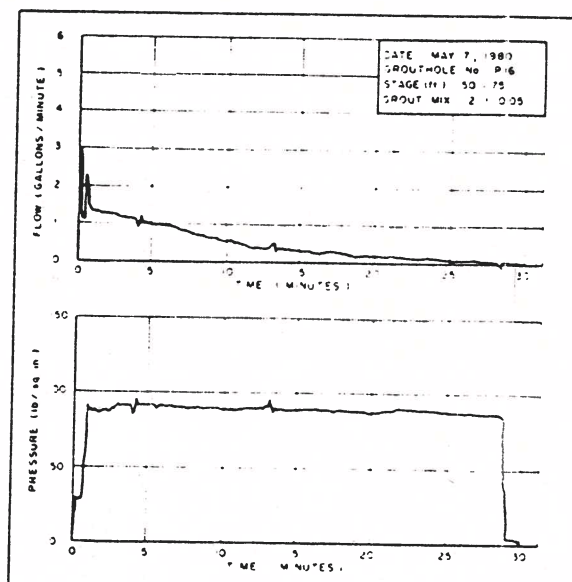
PLOT FROM CHART RECORDER
RESULTS OF GROUT INJECTION

Fig. 16.3.2

Med de hjälpmedel man redan har för mätning och övervakning av injekteringsprocessen samt med den därav följande ökade kännedomen och förståelsen för hur injekteringsmedlet fungerar i den aktuella berggrunden så öppnar sig nu stora möjligheter för styrning av själva arbetsprocessen. I första hand för reglering av pumpningsförloppet men på sikt också av blandare och transportanordningar.

Ett område där svensk teknik ligger mycket väl framme är flerhålsinjektering i tunnlar.

I och med att förinjektering har blivit allt vanligare har kravet ökat på att denna tidskrävande operation måste utföras snabbt och effektivt. Det ligger nära till hands att injektera flera hål samtidigt och helst från en gemensam pump. Kravet för en teknisk bedömning av resultatet är i regel att man skall kunna avläsa och registrera tryck och flöde i varje ledning. Detta har möjliggjorts genom införande av elektroniska hjälpmedel.

I och med att man kan bestämma tryck och flöde och omvandla dessa storheter till elektroniska och digitala signaler kan man också läsa in dem i en dator för registrering, bearbetning och lagring.

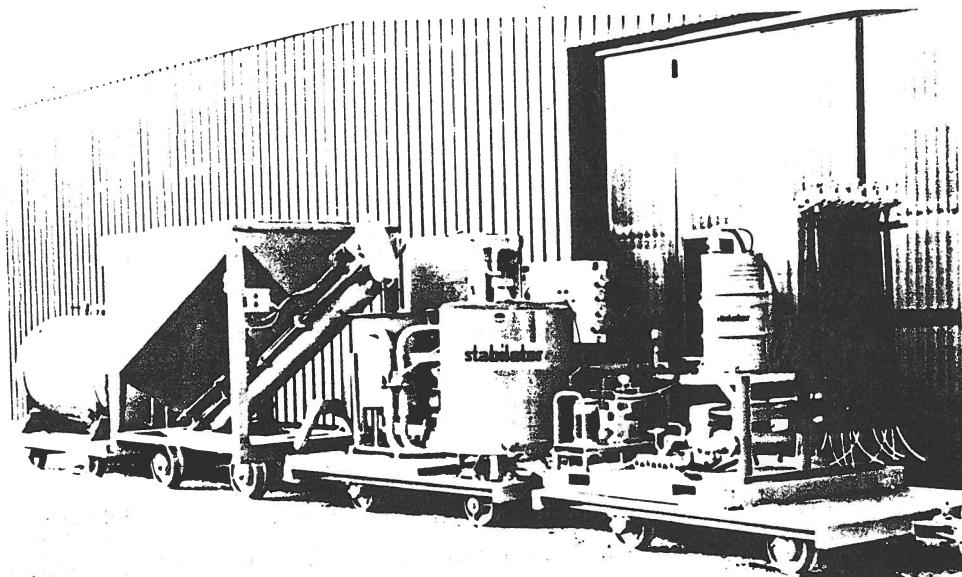


Fig. 16.3.3 Exempel på modern injekteringsutrustning med sex stycken ledningar vardera med flödesmätning och registrering.

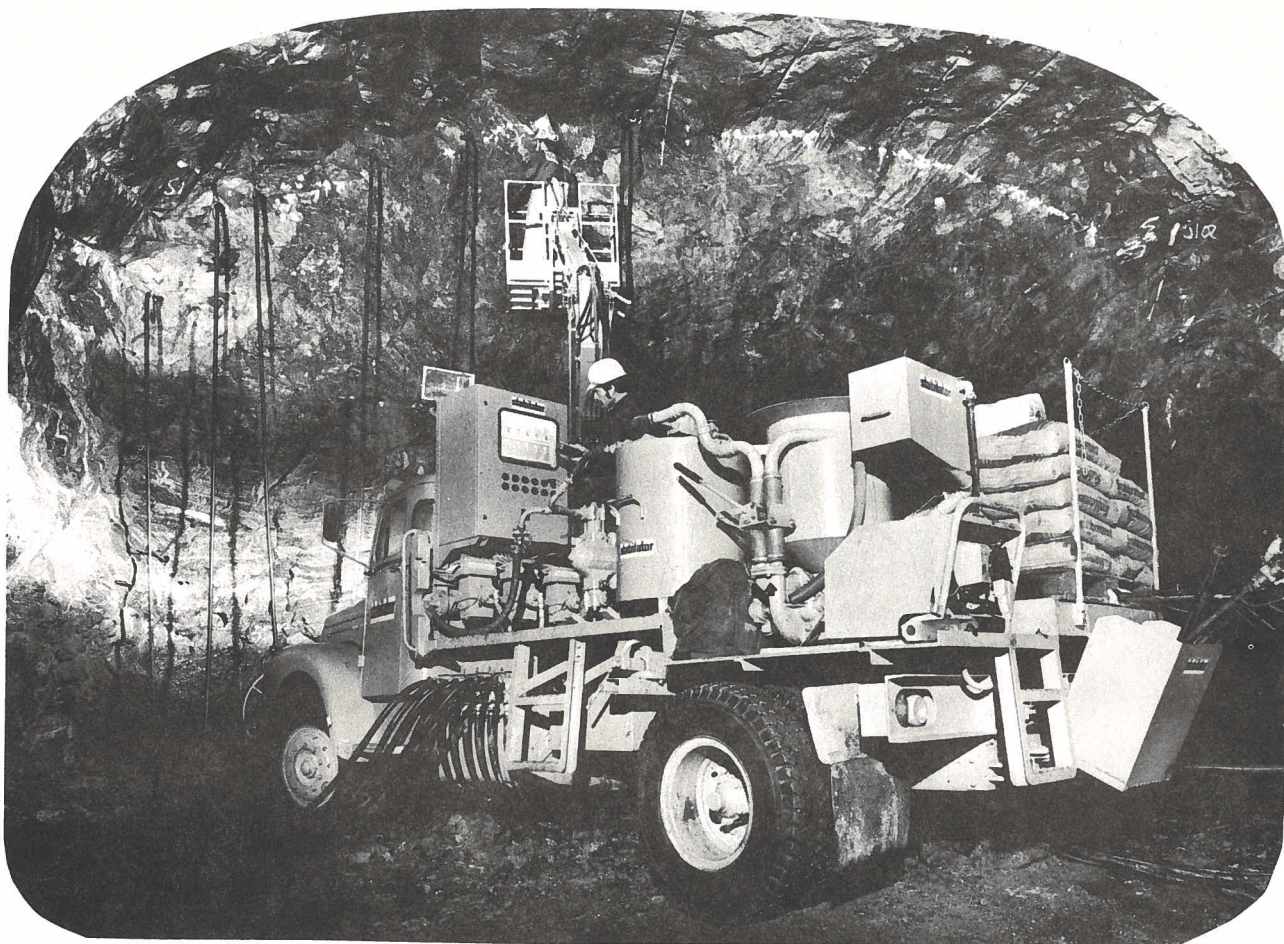


Fig. 16.3.4 Multi-hål injekteringsutrustning. Sex hål kan injekteras samtidigt, vilket medger hög kapacitet och snabb tunneldrivning. Elektroniska hjälpmedel ger det momentana flödet liksom det ackumulerade i varje slang för sig. Förutom blandare, omrörare och injekteringspump är enheten försedd med en sky-lift för två personer och med flera praktiska detaljer, som underlättar arbetet.

Elektronik och datorer har också börjat användas för administrativa rutiner med injekteringsprotokoll, fakturering och uppritning av flaggdiagram m m. Ett sådant fungerande system används i Kotmaleprojektet, Sri Lanka. (Entreprenör Skånska Cementgjuteriet, Stabilator).

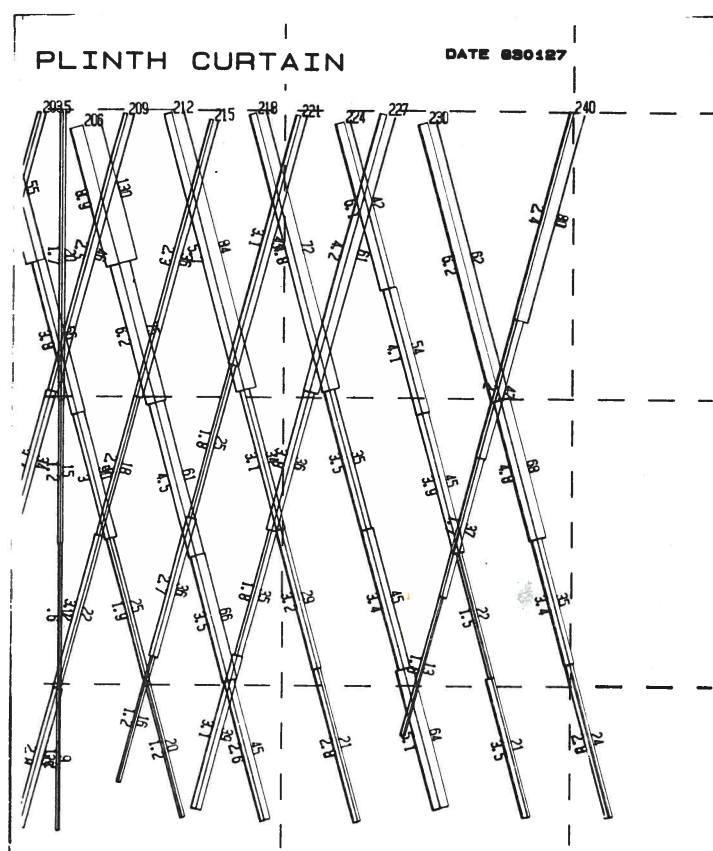


Fig 16.3.5 Redovisning av vattenförlustmätning och injektering med flaggdiagram med hjälp av en Wangdator och H-P plotter. I verkligheten är diagrammet i tre färger, vilket underlättar förståelsen.

16.4 Tillämpningar i vissa situationer

16.4.1 Förinjektering av stora skölar.

Om man vid sonderingsborrning från tunnelfronten träffar på skölar eller andra diskontinuiteter med stor vattenföring så kan det visa sig svårt att få en ordinär cementsuspension att lösa uppgiften att tätta berggrunden vid förinjekteringen, trots att läget då är avsevärt mycket bättre än om man hade sprängt loss berget och släppt vattnet fritt. Dessa sprickor kan tätas med ett mycket tjockt och tixotropt bruk som pressas in under relativt lågt tryck. Härigenom kan injekteringsmedlet hindras att flyta iväg eller att spolats ut av grundvattenströmmar. Ett dylikt injekteringsmedel kan t ex framställas av cement, bentonit, natrium-silikat och sand. Viskositeten bör vara så hög, att en fritt utflytande blandning på ett plant underlag ställer in sig i en lutning på ca 1:3 (höjd:bas).

Tillsatser av skumbildande medel kan vara mycket verkningsfullt. Om polymera skum används måste man vara särskilt på sin vakt så att inte länspumpar och dräneringslager i tunneln blir helt igen-satta.

16.4.2 Behandling av stora vatteninbrott.

Riktigt stora vatteninflöden till tunnlar är nu relativt sällsynta på grund av den ökade insikten om de stora olägenheter dessa kan föra med sig, och den ökande användningen av sonderingsborrning.

Om olyckan ändå är framme gäller det att snabbt inse att det inte duger med halvmesyrer, utan att radikala, väl planerade åtgärder måste sättas in om inte tunneln skall bli stående i veckor eller månader.

Vid mindre komplicerade förhållanden kan man förfara enligt fig 16.4.1.

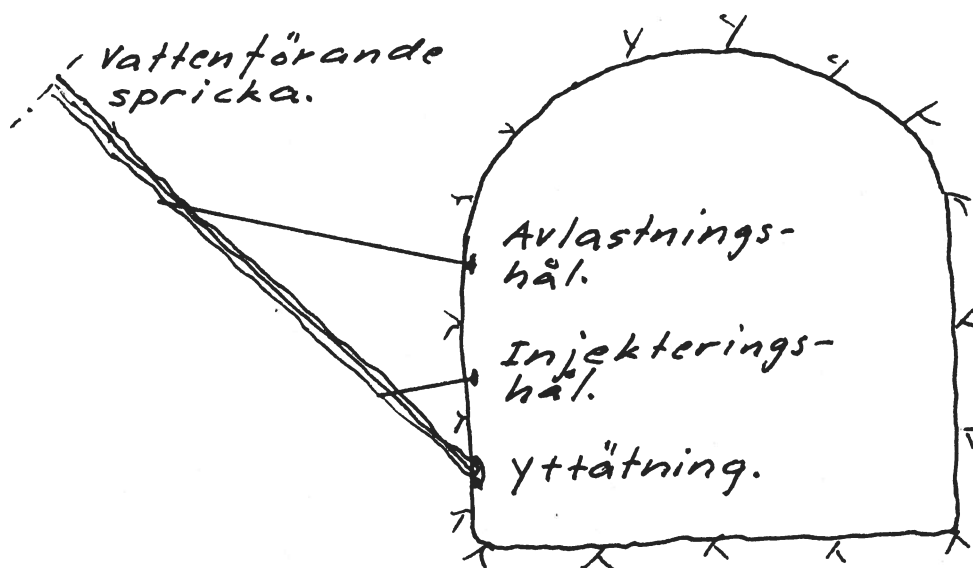


Fig. 16.4.1 Tätning av vattenflöde.

- * Borra tillräckligt många avlastningshål för avledning av vattenflödet i sprickan.
- * Borra korta injekteringshål som skär sprickan.
Täta mynningen på sprickan med tex kilar, drev och sprutbetong.
- * Injektera med stabilt, snabbbindande injekteringsmedel genom de korta injekteringshålen.
- * Stäng efter hand avlastningshålen.
- * Efter bindning komplettera injekteringen och sondera.

Mera komplicerade fall kan man lösa med hjälp av en förankrad betongplatta enligt följande figur:

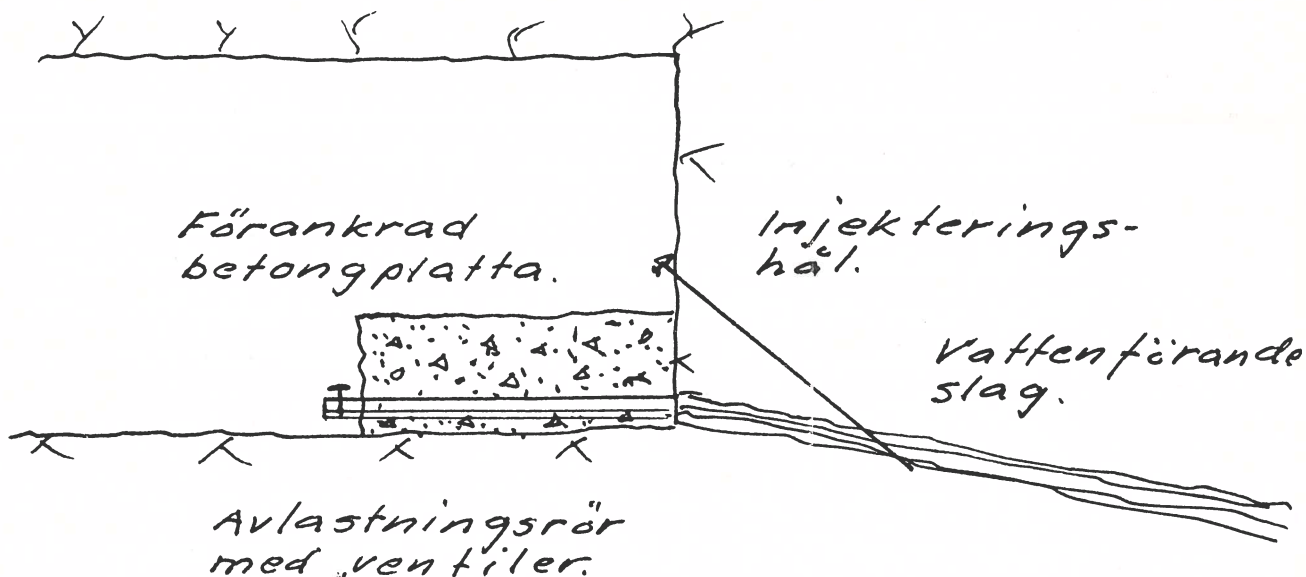


Fig. 16.4.2 Tätning av vattenflöde.

- * Placera grova avlastningsrör med ventiler.
- * Gjut en förankrad betongplatta.
- * Injektera slaget med lämpligt injekteringsmedel.

I mycket svåra fall kan man samla huvuddelen av vattenflödet i grova rör med avstängningsventiler och göra en full barriär med betongsäckar eller betong före injekteringen.

I samtliga fall bör resultatet kompletteras med mera normal injektering och sondering.

Sprickor i porösa bergarter.

Sedimentära bergarter kan i sig vara mycket permeabla och skiktfogarna kan utgöra ett vidsträckt kommuniserande underjordiskt vattensystem som matas från vattensamlingar på markytan genom kross- och sprickzoner.

Det är förenat med särskilda problem att täta en sådan bergmassa. Sedvanlig cementinjektering fungerar inte tillfredsställande på grund av att vattnet i suspensionen absorberas eller trycks in i porerna i sprickornas väggar utan att cementkornen kan följa med. Härigenom övergår cementsuspensionen snabbt till en tjockflytande pasta eller propp som snabbt hydratiseras utan att kunna tränga vidare in i spricksystemet.

Man kan i stället tillgripa utvägen att först utföra en kemisk injektering t ex baserad på silikat. Härigenom kan man täta porerna. Kohe-sionen på denna gel avpassas så att en efterföljande cementsuspension kan pressas in i sprickorna medan silikatgelen pressas vidare.

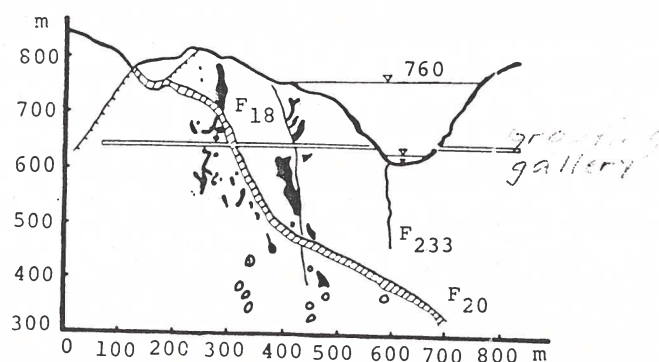
Behandling av karster.

Karstfenomen kan förekomma i karbonatbergarter t ex kalksten och gips. Under årmiljonernas lopp kan vatten i sprickor ha lakat ur bergarten och skapat allt ifrån obetydliga underjordiska kanaler till stora hålrum och grottor Morfeldt (1980). Dessa håligheter, som uppträder mycket oregelbundet, kan ibland vara fyllda med mjuk lera eller silt och ibland vara öppna vattenstråk med mycket stor vattenföringsförmåga. I båda fallen kan de bjuda på obehagliga överraskningar för tunnelbyggaren.

Om karsterna icke har något fyllnadsmaterial gäller det att fylla dem med betong eller stabilt injekteringsbruk med cement och sand.

I fallet med lerfyllning kan man konsolidera leran med injektering. Ett lämpligt injekteringsmedel pressas in under högt tryck i samma borrhål ett flertal omgångar ofta med flera dagars tidsmellanrum. Efter en sådan behandling är det rådligt att övertyga sig om att resultatet är tillfredsställande genom t ex en sonderingstunnel. Ett praktikfall visade, att man genom talrika uppspräckningar, kunna reducera mäktigheten hos ett löst lerskikt av beaktansvärd tjocklek till en tredjedel. Hållfastheten steg från 40 g/cm^2 till cirka 1000 g/cm^2 Cambefort (1967).

Ett intressant exempel på injektering av karster fyllda med lös lera i Kina beskrivs av Z Zuomei och H Pinshou (1982). Först redogörs för tekniken med cementinjektering vid högt tryck (ca 60 kg/cm^2) och därefter för de mekaniska och fysikaliska egenskaperna av provkroppar tagna från injekterade karster.



Schematic diagram showing the caves in left bank.

●--Caves encountered in the process of drilling and grouting;

○--Caves found by geophysical exploration.

Fig. 16.4.3

Figuren visar kaviteter i den vänstra flodsidan där karstbildningen är mycket betydande. Många av kaviteterna är fyllda med lös lera och fin sand. Karstbildning har upptäckts ända ner till ett djup av cirka 250 m under flodbädden.

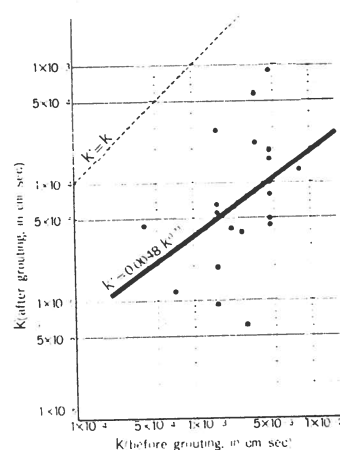
16.5 Speciella injekteringsmetoder

Vid byggande i dåligt berg kan man träffa på zoner, som knappast låter sig behandlas med de metoder som vanligen tillämpas vid berginjektering. Det kan t ex vara sprickzoner med risk för ur-spolning av ett mycket finkornigt sprickfyllnadsmaterial eller dåligt konsoliderade skikt i sedimentära bergmassor exempelvis sandskikt eller kalksten med lerkonsistens. I dylika fall kan tekniker ursprungligen avsedda för jordinjektering vara användbara.

16.5.1 Limited Area Grouting.

Detta i Japan utvecklade system för jordinjektering grundar sig på undersökningar som utfördes av R H Karol i USA. Dessa finns rapporterade redan 1961. Mycket korta geltider används. I bland bara ett par sekunder.

Japanerna har utvecklat ett lämpligt bruk med mycket kort geltid och ny utrustning såsom injekteringsrör, spetsarrangemang och munstycke, som uppges kunna hantera processen kontinuerligt och säkert. Detta sägs vidare ha möjliggjort stabilisering av avgränsade formationer nästan oberoende av de geologiska förhållandena.



Coefficient of permeability before and after grouting

Fig. 16.5.1 Sammanfattning av uppmätta data på permeabilitetskoefficienten före och efter injektering erhållna från ett tjugotal utförda arbeten där LAG-metoden (Limited Area Grouting) tillämpats. Se T Tokoro et al. (1982).

16.5.2 Squeeze-Grouting eller Grout Wedging

En annan typ av injektering, som i sina grunddrag använts i decennier för att lösa problem med stabilitet och vatten i gruvor och tunnlar är Squeeze-Grouting eller Grout-Wedging.

Man har framgångsrikt behandlat finsprickigt eller pulvriserat berg eller zoner med flowing ground.

Greenwood and Hutchinson (1982) redogör för en hypotes för att uppskatta avstånd mellan injekteringshål och injekteringstid i relation till jord och injekteringsmaterialens egenskaper i avsikt att tillåta bättre process-design för effektiv stabilisering och tätning. Squeeze-grouting teknik kan användas vid tunnelarbeten där grunden, som skall genomgå måste stabiliseras före passage och där inte materialet kan penetreras med injekteringsmedel. Stabiliseringen åstadkommes genom att konsolidera materialet framför tunnelfronten med injektering under högt tryck. Vid passagen hålls materialet på plats med kilar av stelnat injekteringsmedel. De använda injekteringsmängderna är ofta mycket små men trycket mellan kornen i bergmassan är tillräckligt högt för att hålla materialet på plats. Porositeten minskas endast obetydligt och beroende på volymen av hårdnat injekteringsmedel.

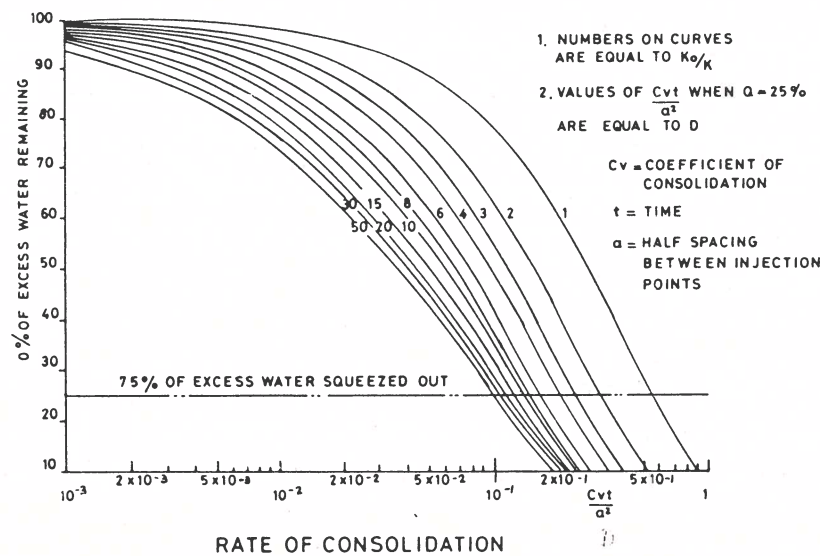


Fig 16.5.2

Ur en angiven ekvation, som anger sambandet mellan ett flertal parametrar har värden beräknats över ett brett område och representerats på figuren. I diagrammet har den kvarvarande vattenmängden angetts i procent av den totala vattenmängd, som skulle ha pressats ut efter oändligt lång tid.

Principen för Squeeze Grouting liknar den för compaction grouting men skiljer sig från denna genom att en större materialvolym trycks samman av injekteringsmedel som trängts ut i ett nätverk av fina sprickor som skapats genom uppspräckning av jordliknande material eller längs gångar förutbestämda av bergsprickor. De bruksliknande (mortar-like grouts) som används vid compaction-metoden kan inte injekteras in i t ex finsprickigt berg. För sådana fall kan endast ett mera penetrerande injekteringsmedel användas och en annan teknik.

Om man injekterar ett silt-graderat material, som är för finkornigt för penetration kan olika fall inträffa. I ett extremfall förblir injekteringsmedlet runt injekteringsspetsen som en boll (compaction grouting) och i det andra spräcker det upp materialet och bildar ett nätverk av sprickor fyllda med injekteringsmedel (squeezing). I första fallet är höga tryck koncentrerade runt bollen och konsolideringen är därför begränsad i räckvidd. I andra fallet sker konsolideringen längs sprickor med högt tryck varför konsolideringen får mycket större omfattning. Om emellertid injekteringsmedlet kan tränga för långt så kan det komma utanför zonen som skall konsolideras och kontrollen av processen går förlorad.

Det viktigaste vid Squeeze Grouting är därför kontrollerad uppspräckning av bergmassan kombinerad med ökning av trycket utöver det som råder i det ostörda berget tills tillräcklig styrka har erhållits för stabilitet. För att åstadkomma detta är det nödvändigt att kontrollera injekteringens egenskaper i två avseenden nämligen vattenseparation och flytegenskaper.

Vid fullbordandet av konsolideringen måste injekteringsmedlet stelna för att stänga inne det erhållna förhöjda effektiva trycket. Cementhaltiga injekteringsmedel är vanligen väsentliga för detta ändamål.

För att öka förståelsen för hur Squeeze Grouting verkar klassificerar författarna vidare två typer av injekteringsmedel:

- a. Newtoniska vätskor, som karaktäriseras av sin viskositet. Vatten och kemiska injekteringsmedel före gelningen är av denna typ.
- b. Vätskor karaktäriserade av både viskositet och flytgräns (yield stress). Dessa liknar approximativt Bingham material (Bingham bodies) och de börjar inte flyta förrän den skjuvspänning som appliceras på dem är större än deras yield stress. Exempel utgör cement- och bentonitbaserade injekteringsmedel.

Strömningen av ett separationsstabil injekteringsmedel i en spricka begränsas i vad avser hastigheten av viskositeten och vad avser utsträckningen av vätskans flytgräns. Man når en punkt när den kraft som utövas på vätskan av injekteringstrycket är lika stor som den yield stress som verkar på sprickans väggar och då upphör flödet. I praktiken gäller att om injekteringsmedlet har initierat sitt eget sprickmönster i en siltig eller lerhaltig jord så kommer en fortsatt injektering vid ett tryck över uppspräckningstrycket endast att vidga sprickan. Således ju högre yield stress desto kortare och tjockare blir den uppkomna sprickan.

Om injekteringsmedlet inte har någon yield stress så kommer tryckförlusten på grund av viskositeten vid flödet att förorsaka att tillräckligt tryck inte finns tillgängligt vid ett visst läge för att sprickan skall kunna fortskrida (propagate). Som tidigare kommer fortsatt injektering att förtjocka sprickan tills tryckförlusten (som är en funktion av sprickvidden) är så liten att fortsatt uppspräckning (hydrofracture) kan ske. Sålunda gäller för en given mängd injekteringsmedel att ju högre viskositet desto tjockare och kortare spricka.

Därför följer att man i princip kan kontrollera utbredningen av det sprickmönster som skapas genom uppspräckning genom att manipulera injekteringsmedlets flytegenskaper.

Swedish Valve Tube Grouting.

Denna metod som vi kallat ventilrörsmetoden finns beskriven i en rapport av B.A. Lamberton (1982).

of the Swedish Alvik Drilling System, a development of the Stabilator Division of Skanska Cementgjuteriet. It was the first use of this system in the United States.

A heavy percussion type drill rotates drill rod and casing down through the overburden as flushing water is forced down the drill rod, returning cuttings back through the annulus between drill rod and casing and out through a flushing assembly located below the hammer (Fig. 5). Used with an eccentric bit, it is referred to as the Alvik X System. The eccentric drilling bit is used whenever a hole must be advanced downwardly in successive stages as in a soil sampling or test grouting operation. By rotating the drill rod 180° in the direction reversed to drilling, the eccentric carbide-tipped cutting bit swings back into the drill bit body permitting extraction of the rod and bit through the casing. Production with the single cutting bit is much slower than with a normal 4-point fixed cutting bit and the eccentric bit is far more expensive in first cost and somewhat more expensive in terms of bit cost per foot.

The Alvik J System employing a knock-off type bit was used almost exclusively on the Crystal River Job. Since the bit remains in the ground below the casing, redrilling and casing advancement is usually not possible. The knock-off bit, either 4- or 6-point carbide tipped, is held on the tapered shank of the central pilot bit by a friction fit.

All Alvik Systems require use of a heavy pneumatic hammer with strong positive rotation. An Atlas Copco BBE-57 was used on this job. It delivers 1950 blows per minute at a maximum torque of 253 foot pounds. It was mounted on a ROC-600 air track (Fig. 6). The drill and air track require 600 cfm air @90 psi. Flushing water is provided at a rate of 15 gpm at pressures up to 200 psi. Casing and drill rod are

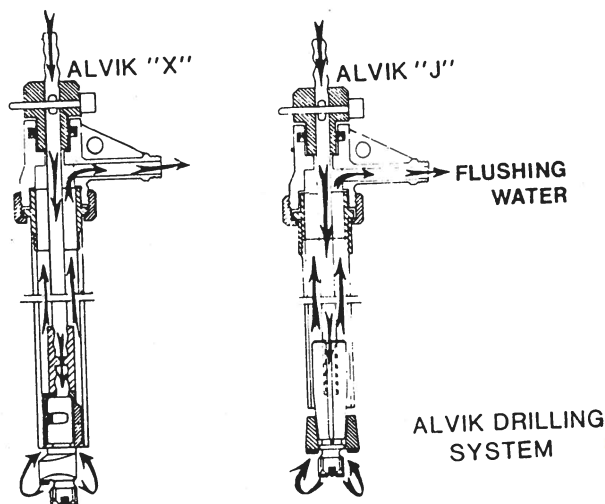


Fig. 16.5.3

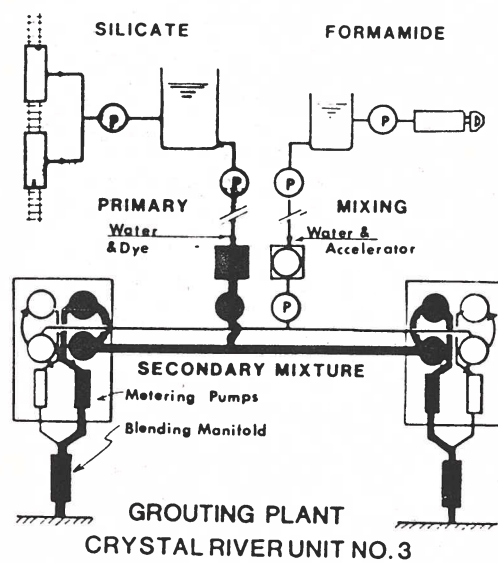
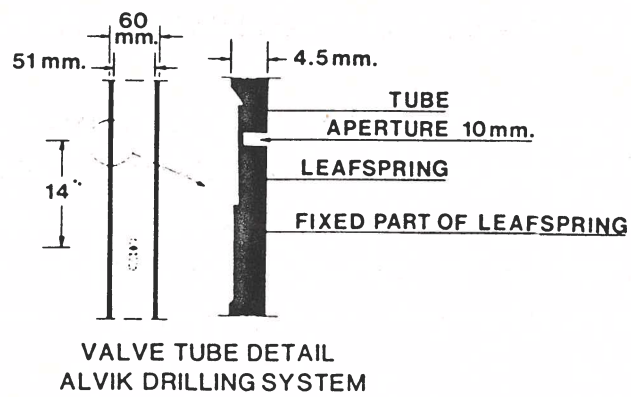


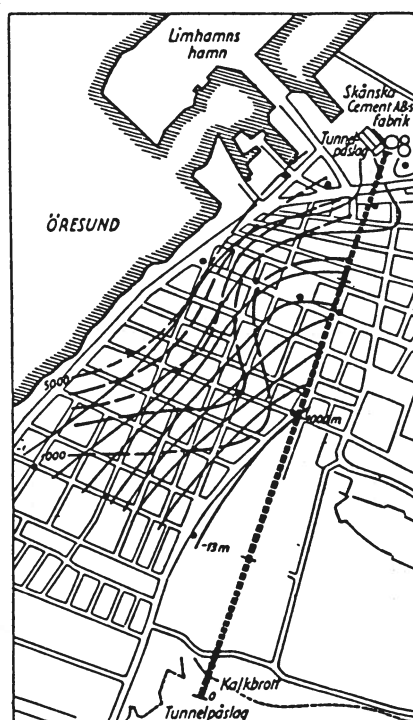
Fig. 16.5.4

16.6 Exempel på utförda arbeten

16.6.1 Limhamnstunneln

Ett exempel på vattenproblem i kalkberg utgör den 2 km långa tunnel, som sammanbinder kalkbrott och cementfabrik i Limhamn.

Tunneln går genom sydvästra Skånes kritavlagringar och hör geologiskt till senare delen av kritperioden. I kalkstenen uppträder skikt av mörkel eller lera. Flinta förekommer rikligt i tunneln i form av lagrade band eller spritt. Tunneln börjar i brottet på nivån - 45 m och går i jämn stigning på 1,56 % till fabriakens avlastningsstation, där den slutar på - 16 m.



Limhamnstunnelns läge samt ---
linjer för kloridhalt (mg/l) i grundvattnet;
● borrhål för övervakning av grundvatten.

Fig 16.6.1

Avståndet mellan tunnelns norra del och den ursprungliga strandlinjen är endast cirka 140 m.

Vid tunnelns norra nedfartsort fann man snart att kalkstenen var mycket vattenförande särskilt i partier med flintinslag. En omständighet, som under hela byggnadstiden var ett orosmoment var närvaron till Öresund. Som framgår av figuren var avståndet till den ursprungliga strandlinjen endast 140 m i norra delen av tunneln.

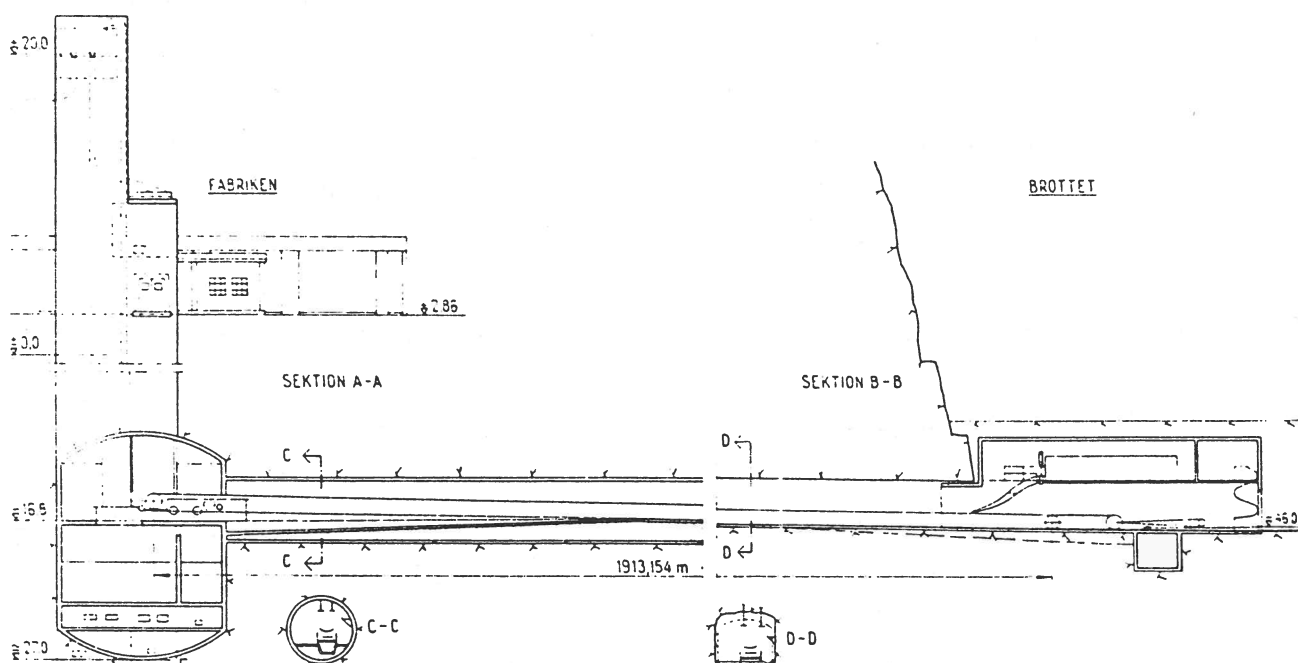


Fig. 16.6.2 Längdsektion och ett par typiska tvärsektioner
Tunnelbredd 4 m. Area cirka 12 m² O Berndtsson (1966).

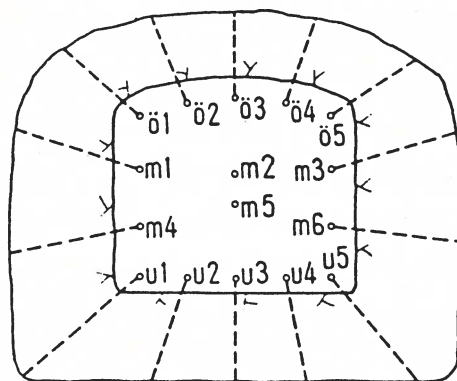
Till att börja med användes bultning som förstärkning, men vid uppborrning av bulthålen kom man att skära starkt vattenförande skikt. Efter hand övergick man till att utföra all förstärkning med sprutbetong och injektering.

Sedan man under sprängningen av den norra nedfartsorten och 60 meter av tunneln och successivt klarat av vattenproblemen med injektering och sprutning ökade vattenflödet oroväckande till cirka 12.000 lit per min. Orsaken till detta var det sprickiga kalkberget på - 17 m som bröts upp undan för undan av de inträngande vattnet. Detta skedde nästan uteslutande i golvpartierna, som icke var förstärkt med sprutbetong eller på annat sätt. Genom att mäta kloridhalten i läckvattnet kunde man konstatera att mer och mer havsvatten trängde in. Man vågade då naturligt nog inte gå vidare med tunneln utan att först vidtaga tätningsåtgärder.

För att tätta de svåra läckorna i sulan genomfördes följande program:

- * Anordnande av pumpgröpar och dräneringsrör med ventiler.
- * Utläggning av ca 20 cm tjockt lager av stenmaterial mindre än 64 mm.
- * Gjutning av en 20 cm betongplatta ovanpå stenmaterialet.
- * Betongsprutning och injektering av väggar och tak.
- * Stämpning av bottenplattan mot taket.
- * Prepaktbetong-injektering av stenmaterialet genom rör genom betongplattan.
- * Stegvis injektering av berget under Prepakt-betongen.

För den fortsatta drivningen i norra delen valde man sedan att sonderingsborra och förinjektera berget med hålavstånd och djup beroende på bergets karaktär. Ett exempel framgår av figuren som baserats på arbetsritningar av G Stjärnemyr. O Berndtsson (1966).

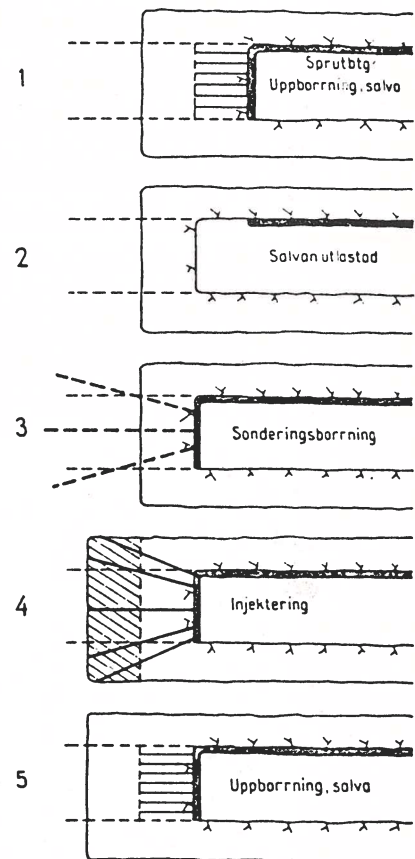
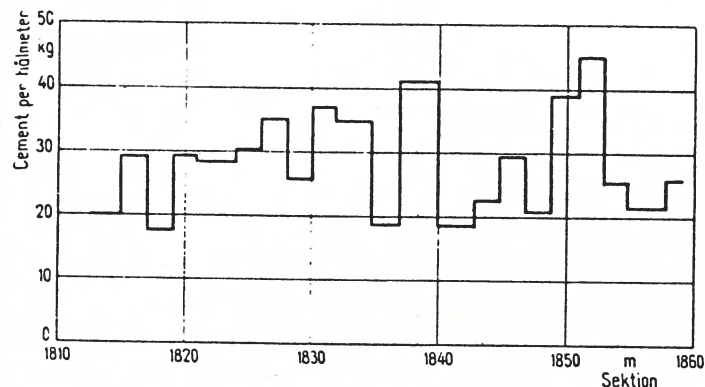


Ovan: Fig. 9. Borrplan vid förinjektering. I denna sektion har fem över- och underhål samt sex mellanhål kommit till användning. Enligt injekteringsrapport 307 har cementtågängen varit 2 450 kg. Dessutom har man tillsatt 24,5 kg Intrusion Aid

■ Above: Fig. 9. Drilling plan for pre-injection. In this section five upper and lower holes and six intermediate holes have been used. According to injection report no. 307, 2,450 kg cement have been used. In addition 24.5 kg Intrusion Aid have been added

T. h: Fig. 10. Arbetsgången vid förinjektering: 1. Sprutbetong på väggar, tak och stuf. Därefter vidtar borrning och laddning. 2. Salvan utskjuten och upplastad. 3. Sprutbetong påläggs nyutspänd bergtyr. Sonderingsborrning vidtar. 4. Förinjektering. 5. Samma som mom. 1

■ Right: Fig. 10. The work order for pre-injection: 1. Spray concrete over walls, roof and head. Afterwards drill and load. 2. Barrow out and filled. 3. Concrete sprayed on to newly blasted rock surfaces. Sound by drilling. 4. Pre-injection. 5. Same as 1



T. v: Injekterad cementmängd per halmeter
 ■ Left: Injected cement quantities per m hole

Figur 16.6.3 visar 16 hål till ca 6,4 m djup. Eftersom salvlängden reducerats till 2 m hade man ca 4 m förinjekterat berg kvar i stufven efter utskjuten salva. Efter utlastning och betongsprutning utfördes sonderingsborrningar genom den förinjekterade zonen och ytterligare 2,4 m in i berget.

På de avsnitt där man följde detta rigorösa mönster erhöill man också mycket gott resultat. Särskilt viktigt föreföll det vara att sprutbetongen applicerades så snart som möjligt efter salvan.

Med tanke på de många svaga partierna i berget där läckning och erosion skulle kunna starta efter det att anläggningen tagits i bruk beslöts att tunneln skulle klädas in på sådant sätt att inklädnaden kunde ta hela vattentrycket. Detta löstes med en kombination av gjuten betongplatta i botten och sprutbetong i väggar och tak. Eftersom tunneln hade en ur konstruktiv synpunkt för sprutbetong ogynnsam form med plant eller ibland t o m nedåt konvext tak så bjöd denna lösning på vissa svårigheter, som dock övervanns på ett tillfredsställande sätt och till betydligt lägre kostnader än för andra alternativ

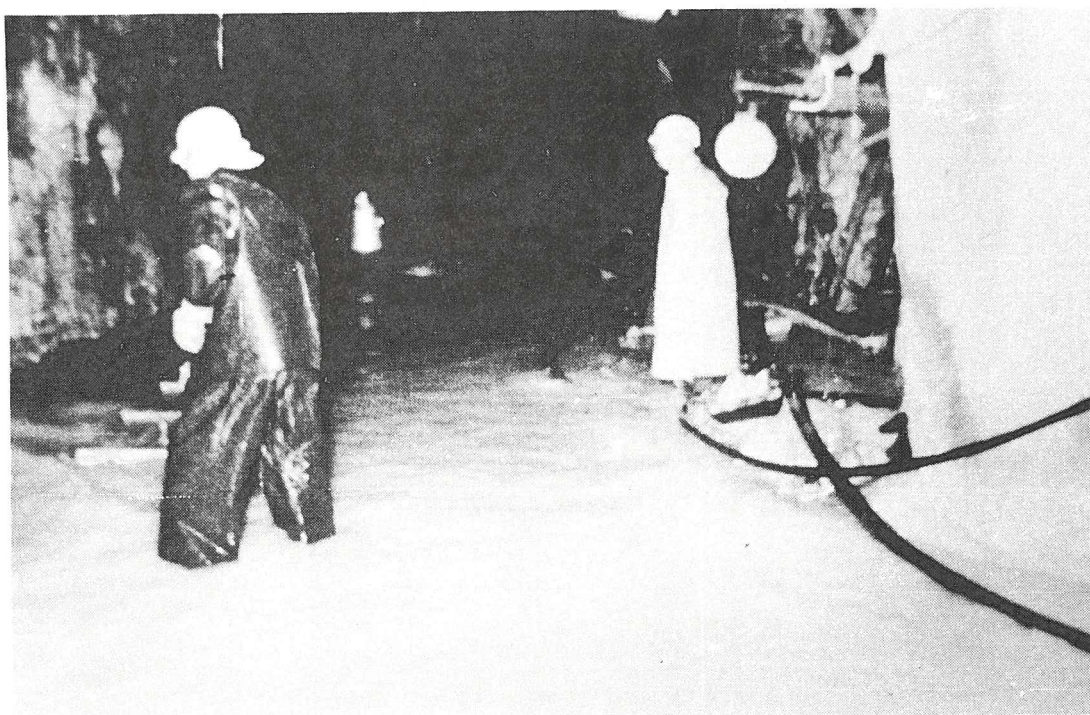


Fig. 16.6.4

I norra delen av tunneln ökade vattenflödet till cirka 12.000 liter per minut. Den ökade kloridhalten i vattnet tydde på att mycket havsvatten trängde in från Öresund.

Injekteringsskärm i kalksten m m för Kockums byggdocka

Ventilrörsmetoden användes vid utförande av en injekteringsskärm för Kockums byggdocka 1966-1968. Skärmen tätar mycket vattenförande lager av moränlera, kalkstensmorän och kalksten av varierande hårdhet.

Man visste innan arbetet med dockan startade att kalkstenen kunde vara mycket uppsprucken och starkt vattenförande. Därför utfördes på ett tidigt stadium omfattande kärnborrningar och provpumpningar samt ett stort provschakt inom spontväggar.

Valet av injekteringsmetod påverkades av följande faktorer:

- * Utförandet av injekteringsskärmen skulle kräva borrning av ca 20 m djupa hål genom fyllning med moränlera, morän och kalksten.
- * Endast de understa tio metrarna behövde injekteras.
- * Kalkberget var så uppsprucket att borrning och injektering utan foderrör skulle vara mycket svåra att genomföra.
- * Arbetet måste genomföras på mycket kort tid.

Endast någon form av foderrörsborrning kunde komma ifråga. De goda erfarenheterna från de tidigare utförda provinjekteringarna bidrog till att valet föll på Alvik-borrning med ventilrör.

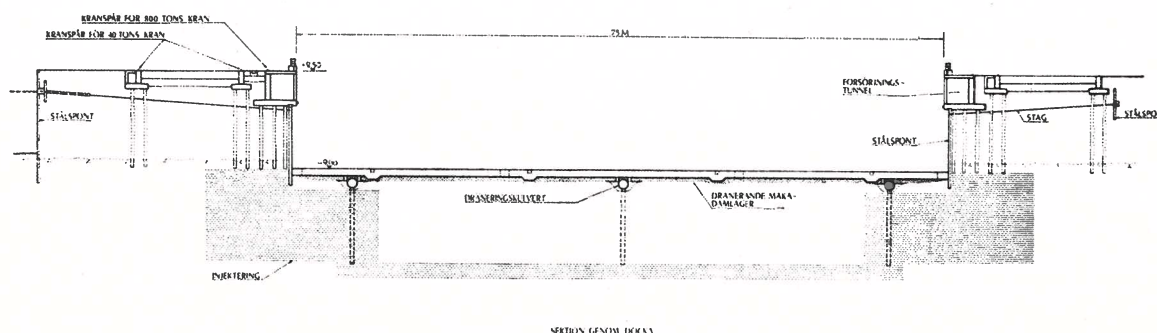


Fig. 16.6.5 sektion genom docka

17. SLUTORD

De verkligt stora avvikelserna mellan å ena sidan prognos, budget och anbud och å andra sidan tidsåtgång, kostnad och resultat sammanhänger ofta med vattenproblem i sedimentära bergarter.

Informationen till anbudsgivarna är ofta så svårtolkad att den måste lämnas till specialerfarna konsulter för en bedömning av det, som är verkligt viktigt; t ex indikationer på

- * Karster eller andra kaviteter
- * Krosszoner, sprickzoner och öppna sprickor
- * Bergarter, som i sig är starkt vattenförande
- * Aggressivt vatten
- * Explosiva eller krävande gaser
- * Svällande leror
- * Flowing ground

Med andra ord varningssignaler som bör beaktas i tid.

Avståndet är ofta mycket stort mellan nuvarande praxis och en insiktsfull bergteknisk - hydrogeologisk förväntningsmodell, som tillkommit i samarbete med ingenjörsgéologen och övriga tekniker, och som bl a avser en prognos på bergets genomsläpplighet och injekteringsbarhet. - Behovet av en sådan förväntningsmodell uppleves mycket angeläget.

Vid sidan av och i kombination med pumpning och dränering har injektering sedan länge haft en dominerande position för att lösa problem i samband med vatten.

Med nya landvinningar på injekteringsteknikens område av vilka ett fåtal berörts ovan torde injektering med cement eller andra medel få en ännu större betydelse i framtiden och det kan därför vara motiverat att fråga sig var injekteringstekniken idag står i Sverige vid en internationell jämförelse? Först måste man konstatera, att vi har en alltför liten bredd på tekniker och firmor, som har erfarenhet från verkligt svåra vattenproblem i dåligt berg. Om vi däremot ser på våra bästa resurser på området så är vi relativt väl rustade.

- * Vi har under mer än tre decennier haft goda internationella kontakter med erkända specialister i t ex USA, Frankrike, Schweiz, Norge och Finland.
- * Vi har genom åren stött på bergarbeten i Sverige med betydande vattenproblem, som lösts på ett fackmässigt sätt, och som givit värdefulla erfarenheter.
- * Vi har i internationell konkurrens tagit hem flera specialentreprenader på injektering, som varit framgångsrika.

De områden som vi är starka på är:

- * Organisation.
- * Välutbildad och pålitlig personal.
- * Materialkännedom.
- * Maskinutrustning.
- * Borrning för injektering.

Områden där vi bör öka vår kunskap genom studier, kontakter, forskning och utveckling är:

- * Precisering av en bergteknisk - hydrologisk förväntningsmodell i samarbetet med ingenjörsgologen vad avser bergets genomsläpplighet och injekterbarhet.

- * Elektronik och datorer för protokollhantering, dokumentation, uppritning, övervakning och styrning.
- * Ytterligare utveckling av injekteringsmedel t ex användning av polymerer i kombination med cementsuspensioner och silikatlösningar.
- * Förbestämning av riskabla passager och prognostisering av vattenmängden vid genomgången.
- * En del metoder, som ursprungligen tagits fram för jordinjektering, men som kan vara mycket användbara i sedimentära bergarter med svaga zoner eller vid rasmassor, t ex Limited Area Grouting och Squeeze-Grouting.
- * Erfarenheter från vattenproblem inom oljeborrnings- och gruvindustrierna, där man lagt ner mycket arbete och forskning på bl a injekteringstekniken.
- * Förbättrad styrning av flödet i berggrunden av vatten och injekteringsmedel. Särskilt viktigt vid efterinjektering. Ett hjälpmedel härvidlag utgör vakuummetoden. C. Alberts (1980).

18. REFERENSER

Alberts, C: Speciella förfaranden vid betongarbeten och injektering.
Cement- och Betonginstitutet, Stockholm 1971.

Alberts, C: Vakuummetoden - en effektiv teknik för efterinjektering?
Befo 1980.

Andréasson, L m fl: Provning av injekteringsmedel för fintätning av berg.
BFR R121:1980.

Asting, G: Erfaringer med fettning av avlopstunneler i Oslo-området.
Fjellsprengningskonferansen, Oslo, 1980.

Bergman, M: Grundvatteninläckning i tunnlar och berggrum.
BFR-rapport R51:1977.

Bergman, S G A & Nord, G: Täta tunnlar lagom.
BeFo Nr 64:1/82.

Berndtsson, O: Tunnelldrivning i kalkberg. Erfarenheter från utbyggnad av
cementfabrik i Limhamn.
Byggmästaren 1966 nr 3.

Brekke, T: Gas in tunnels.
BeFo No. 106: 1/83.

Bruce, N-E, Hellgren, A and Bäckström, S: Grouting of tunnels in order to
avoid detrimental groundwater Lowering.
Subsurface Space. Edit. Bergman, M.
Permgamon Press Oxford and New York 1980.

Brännfors, S: Underground construction in non-Scandinavian rock.
Skanska Workshop 1, 1982.

Cambefort, H: Injection des sols.
Editions Eyrolles, Paris 1967.

Cambefort, H: Principes et applications de l'injection.

Annales de l'institut Tech. du Batiment et des Travaux Publics. 1977 Sept.

Campbell, M D, Lehr, J H, 1973: Water Well Technology, McGraw - Hill Book Company.

Carlsson, A & Olsson, T: Bergtätning genom injektering är både teknik och geologi.

Byggmästaren, nr 7 och 8, 1981.

Carlsson, L & Olsson, T: Hydrogeologiska synpunkter på grundvattenläckage i tunnlar.

Bergmekanikdag Stockholm 1979.

Carol, R H: Chemical grouting technology.

Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division - Jan 1968.

Darcy, H, 1856: Les fontaines publiques de la ville de Dijon, V Dalmont, Paris.

Ericsson, E, 1961: On the Circulation of Chloride and Sulphur in the Hydrosphere, Tellus, Stockholm.

FAO, 1974: Människan i vattnets kretslopp, G Kemps, Lund.

Fagerström, H: Engineering geological classification of arid soil and rock. VBB special report 21:81.2.

Fecker, E: Influence of swelling rock on tunnelling.

Bulletin of the Intern. Ass. of Eng. Geology. Nr 24, 1981.

Greenwood, D A and Hutchinson, M T, 1982: Squeeze Grouting Unstable Ground in deep Tunnels.

Proceedings on the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering. New Orleans, USA.

Hanson, Tor: Tätning av gaslager i kalksten.

BeFo 1973.

Hartikainen, J: Soft ground tunnelling in the Kluuvi cleft by the freezing method.

Helfrich, H m fl: Förundersökningars värde och omfattning - BeFo-rapport 18:2/1979.

Helfrich, H K: 30 års bergmekanisk forskning - "xxx. Geomechanik - Kolloquium" i Salzburg.
Bergmekaniskt diskussionsmöte 1982, Stockholm.

Howard, G C & Fast, C R: Hydraulic fracturing.
Society of Petroleum Eng. of AIME, New York 1970.

Idner, S: Estimators Comments and viewpoints on rock factors of importance when submitting tenders.
Skanska Workshop 1, 1982.

Jones, M B: Ground freezing technology advances with speed.
Tunnels & Tunnelling, Dec 1982.

Jeffries, M G et al (1982): Electronic Monitoring of Grouting.
Proceedings on the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.
New Orleans, USA.

Karlsson, L: Fryst jord som provisoriska väggar och valv vid utförande av sänkschakt och jordtunnel.
Väg- och Vattenbyggaren nr 5 1971.

Knutsson, G, Mohrfeldt, C O, 1973: Vatten i jord och berg.
Ingenjörsläroverket, Stockholm.

Korbin, G E: Factors influencing the performance of full face hard rock tunnel boring machines.
University of California, 1979.

Korbin, G E: Mechanical excavation.
BeFo No. 106:1/83.

Kozeny, J, 1953: Theorie und Berechnung der Brunnen, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, Vol 28.

Lamberton, B A (1982): Swedish Valve Tube Grouting.
Proceedings on the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.
New Orleans, USA.

Lidström, G och Bäckström, S: Cement- och betongarbeten i samband med utförandet av Kockums byggdocka.
Cement och Betong 1968:2.

Lysén, L & Palmqvist: Tätning av bergtunnlar. Projekteringsmetodik, injektering och förstärkning.
BFR rapport R4:1976.

Marulanda, A: Hazardous wafer inflow in some tunnels in sedimentary rocks.
BeFo No. 106:1/83.

McCusker, T G: Contracting in North and South America.
Skanska Workshop 1, 1982.

McCusker, T G: Small diameter tunnel in Manhattan schist.
First US - Swedish Underground Workshop.
Stockholm 1976.

Morfeltdt, C-O: Sedimentär berggrund. Bergrum och tunnlar i sedimentärt berg.
Stockholm 1980.

Müller, L: Der Felsbau.
Stuttgart 1963.

Müller, L and Fecker, E: Geologically conditioned risks in construction of Hydro-Power plants.
Committee on Electric Power. Aten 1979.

Mueller, R E (1982): Multipel Hole Grouting Method.
Proceedings on the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.
New Orleans, USA.

O'Reilly, M P: Probing ahead for tunnels.

Tunnels & Tunnelling, Jan 1977.

Palacky, G J, et al, 1981: Electromagnetic prospecting for ground water in precambrian terrains in the republic of Upper Volta, Geophysical prospecting, 29, 1981.

Petersson, G: Considerations on excavation and support systems, Case history from Mexico City Tunnels.

BeFo No. 106:1/83.

Pettersson, G: Redogörelse och erfarenheter från svåra tunnelarbeten under Mexico City.

Bergsprängningsdagen 1973. Stockholm.

Pettersson, G: Redogörelse och erfarenheter från svåra tunnelarbeten under Mexico City.

Bergsprängningsdagen 1973. Stockholm.

Poupelloz, B & Toulemont, M: Stabilisation des terrains karstique par injection. Bulletin of the International Ass. of Engineering Geology. Nr 24, 1981.

Powers, J P: Groundwater control in tunnel construction.

Proceedings North American Rapid Excavation and Tunnelling Conf. Chicago 1972.

Richards, R: Tajo-Segura Irrigation Tunnel will bring relief to South East Spain. Tunnels and tunnelling, Jan, Feb 1982.

Strand, K: Tunnelndrift i vannsykt fjell.

Fjellsprengringsteknikk, Bergmekanikk, Geoteknikk.

Tapir 1981.

Sund, B, Roosar, H och Bergman, G: Vattenläckage i bergtunnlar - dess verkan och influensområde.

BFR-rapport R36:1977.

Thiem, G, 1906: Hydrologische Methoden, Gebhardt, Leipzig.

Tokoro, T et al: Grouting Method by Using Flash-Setting Grout.
Proceedings on the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.
New Orleans, USA, 1982.

Wahlstrom, E E: Tunnelling in rock
Elsevier. New York 1973.

Wallner, M: Ausbreitung von sedimentationsstabilen Zementpasten in klüftigen Fels.

Veröffentlichungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik
und Verkehrswasserbau der R W T H Aachen 1976.
(Herausgegeben von Wittke, W)

Verruijt, A & Barends, F B J: Flow and Transport in Porous Media.
A A Balkema. Rotterdam 1981.

Wittke, W & Louis, C: Anströmung von Hohlräumen in Fels.
Proceed. of the int. symposium of large permanent underground openings. Oslo
1970.

Zuomei, Z and Pinshou, H, 1982: Grouting of the Karstic Caves with Clay
Fillings.

Proceedings on the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.
New Orleans, USA.

