



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R130:1979

Förstärkning av lerzoner i berganläggningar

**Bengt Broms
Anders Heiner**

Byggforskningen

TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND
SEKTIONEN FÖR VÄG- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET

R130:1979

FÖRSTÄRKNING AV LERZONER
I BERGANLÄGGNINGAR

Bengt Broms
Anders Heiner

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
780073-4 från Statens råd för byggnadsforskning
till Vattenbyggnadsbyrån AB, Stockholm.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R130:1979

ISBN 91-540-3132-X
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1979 958082

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING	5
1. INLEDNING	9
2. ALLMÄNT	11
3. LERSLAG. TYPER OCH FÖREKOMST	13
3.1 Några exempel på problem i samband med svällande lera	15
4. METODER ATT IDENTIFIERA SVÄLLANDE LERA	19
4.1 Fältmetoder för att identifiera typ av lera	19
4.2 Laboratoriemetoder för att identifiera typ av lera	19
4.3 Direktmätning av svällegen- skaperna	23
5. FÖRSTÄRKNINGSMETODER	27
5.1 Driftförstärkningar	27
5.2 Permanentförstärkningar	27
5.3 Förstärkning av lerzoner	28
5.4 Fjädrande förstärkning	28
5.5 Förstärkningsmetod kontra leregenskaper	31
6. KOSTNADER FÖR BERGRAS OCH BERG- FÖRSTÄRKNINGAR	33
6.1 Höljes kraftverk	33
6.2 Långå kraftverk	35
6.3 Raset i Sällsjö	36
6.4 Tunnelraset i Stensjöfallet	37
6.5 Kafue Gorge kraftverk och Sao Paulo vattenförsörjning	38
6.6 Kidatu kraftverk	38
6.7 Framtida kostnader för berg- förstärkningar till följd av lerzoner	38
7. PROGRAM FÖR LABORATORIEUNDER- SÖKNING AV SVÄLLANDE LERORS GEOTEKNISKA EGENSKAPER	41
7.1 Syfte och nytta	41
7.2 Identifierande provningar	41
7.3 Ödometerförsök	42
7.4 Bestämning av skjuvhållfasthet	42
7.5 Tidåtgång och kostnad	43
8. PROGRAM FÖR MODELLFÖRSÖK	45
8.1 Syfte och nytta	45
8.2 Provmaterial	45
8.3 Försök	45
8.4 Tidåtgång och kostnad	49

	Sid
9.	PROGRAM FÖR FÄLTFÖRSÖK 51
9.1	Syfte 51
9.2	Försök 51
9.3	Tidåtgång 53
10.	SPÄNNINGSFÖRDELNING I OCH KRING LERSLAG I BERG 55
10.1	Inledning 55
10.2	Spänningsfördelning i ett ler- slag före svällning. 56
10.3	Spänningsfördelning i ett lerslag efter svällning 56
10.4	Spänningsfördelningen i det omgivande berget 57
10.5	Dimensioneringsprinciper 58
REFERENSER	59

SAMMANFATTNING

Ekonomiska aspekter

Investeringar i underjordsbyggande förväntas växa kraftigt i såväl industriländer som utvecklingsländer. Den utsprängda tunnelvolymen vid slutet av detta århundrade kommer, enligt prognoser, att öka i industriländerna till 4 å 5 gånger det nuvarande värdet. Det innebär för Sveriges del, om de totala förstärkningskostnaderna uppgår till i medeltal 20-30 % av utsprängningskostnaderna, att ca 1 miljard kronor kommer att behöva anslås för förstärkningar i underjordsanläggningar under 1970-talet. Mer än 4 miljarder svenska kronor erfordras för sådana förstärkningar fram till år 2000.

En avsevärd del av dessa kostnader orsakas av lerslag och lerzoner varför en tekniskt riktig dimensionering av de erforderliga förstärkningarna har stor ekonomisk betydelse.

Säkerhetsaspekter

Lerzoner i berganläggningar har emellertid inte bara ekonomiska konsekvenser. De innebär också direkta risker inte bara under själva byggandet utan även när tunneln används. Vid flera större inträffade tunnelras i Sverige och Norge har zoner med svällande lera varit den direkta orsaken. Den tekniska utvecklingen med allt större berganläggningar leder till ökade krav på säkerheten.

Syfte och nytta

Den här framlagda forskningsrapporten omfattar en inventering av använda laboratoriemetoder för bestämning av svällningspotentialen hos bergleror, en sammanställning av kostnaderna för utförda bergförstärkningar samt exempel på problem med bergstabilitet och förstärkningsmetoder vid olika typer av lerslag och lerzoner. Vidare ges förslag till program för provningar av bergleror i laboratorie-, modell- och fältförsök samt en teoretisk utredning om spänningsfördelning i och kring lerslag i berg.

Syftet med rapporten är

- att belysa de ekonomiska och säkerhetsmässiga konsekvenserna av lerslag i tunnlar och berggrum;
- att föreslå program för sådana undersökningar som kan leda till ett tekniskt riktig dimensionering av bergförstärkningar vid förekomst av svällande lera och

att därigenom förbilliga förstärkningsarbetena samt öka säkerheten i underjordsbyggandet.

Metoder och kostnader för bergförstärkning

I rapporten redovisas summariskt olika typer av förstärkningar för lerslag och lerzoner. Kostnaderna uppskattas härför i medeltal till 10-15 % av den totala utsprängningskostnaden.

Tumreglen att den genomsnittliga totala förstärkningskostnaden uppgår till 10 % av utsprängningskostnaden är i många fall för låg. I relativt gott berg kan man kanske räkna med att så är fallet men för dåligt berg kan kostnaderna stiga till kanske 100 %. Variationerna är således mycket stora och en korrekt kostnadsbedömning redan på projekteringsstadiet är därför ytterst viktig.

Försöksprogram

Ett program för laboratorieförsök har föreslagits som syftar till:

- o utprovning av laboratorierutiner för bestämning av svällande lersors materialegenskaper
- o klassificering av lertyper för laboratorie- och modellförsök
- o skjuvhållfasthetsbestämning och ödometerförsök för att studera svällningens inverkan på portryck och hållfasthet.

Programförslaget för modellförsök syftar till att klarlägga:

- o hur svälltrycket verkar i en bergspricka och mot en förstärkning
- o spänningsfördelning längs en spricka som funktion av förändringen av bergtryck, vattentillförsel, deformation och sprickvidd.

Enligt programförslaget för fältförsök skall följande mätningar göras:

- o Svälltryckets storlek i sprickor som funktion av avståndet från tunnelväggen

- o svälltryckets storlek mot styva och elastiska förstärkningar.

De olika försöksprogrammen uppskattas pågå under 1 à 2 år.

En prioritering med hänsyn till kostnader och forskningsresultat har gjorts. Laboratorieförsök och modellförsök kan lämpligen utföras parallellt. Det är en fördel om resultaten från dessa två första försöksserier föreligger, innan fältförsöken har genomförts i sin helhet.

Spänningsfördelning i och kring lerlag

Spänningsfördelningen har studerats dels alldeles efter det att en tunnel eller ett bergrum har sprängts ut innan någon ändring av lerans vattenhalt har skett, dels någon tid efter utsprängningen när leran i slaget har svällt.

Stora påkänningar uppträder i berget nära den frilagda bergytan alldeles efter utsprängningen, innan leran svällt och skjuvspänningarna minskar. I samband med svällningen flyttas bergspänningarna inåt från tunnelväggen. Genom denna spänningsförändring i kombination med urspolning eller andra effekter, ökar gradvis risken för bergutfall eller ras.

För att minska risken att leran skall tryckas eller spolas ut och förorsaka bergutfall kan man dränera berget och minska porvattentrycket i leran och sprickvattentrycket i berget. Om tunneln fylls med vatten måste man emellertid överväga att injektera dräneringshålen sedan förstärkningsarbetena slutförts, så att inte leran spolas ur.

1. INLEDNING

I början av 1960-talet utsprängdes i Sverige ca 21 Mm³ berg per år, varav inom gruvindustrin ca 9 Mm³ och inom byggnadsindustrin ca 12 Mm³. År 1967 hade utsprängningen ökat till 44 Mm³, varav 24 Mm³ inom byggnadsindustrin. Den senare volymen motsvarade i dåvarande penningvärde ca 1 miljard kronor i kostnad. Under 1970-talet kommer ännu större belopp att ha investerats i bergarbeten i Sverige, Brännfors (1964) Broms (1969) Jansson et al (1978). En stor del av förstärkningsarbetena är orsakade av zoner, slag och sprickor som innehåller lera. Särskilt besvärliga och dyrbara är förstärkningsarbetena där svällande lera förekommer.

Lerzoner i berganläggningar har inte bara ekonomiska konsekvenser. De innebär också direkta risker dels under själva arbetsskedet, dels under den följande nyttjandeperioden. Med ökande spännvidder på bergrum och tunnlar växer svårigheterna och behovet av förstärkningar. Samtidigt kan den tekniska rationaliseringen med därav följande större enheter leda till krav på ökad säkerhet för anläggningarna under hela deras livslängd. Vid några kända tunnelras i Sverige under senare år har det varit zoner med svällande lera som utlöst rasen. Man kan föreställa sig konsekvenserna om ras inträffar i en kylvattentunnel vid ett kärnkraftverk eller någon huvudvattentunnel till en storstad.

För att klarlägga problemen med lerzoner i berg, var de uppträder och lämpliga åtgärder för att förstärka berget där de uppträder har ett forskningsprogram finansierat av STU och BFR genomförts vid Statens geotekniska institut (SGI). SGI har publicerat en serie delrapporter som behandlar aktuell litteratur, berglerreförekomster inom Göteborgsområdet, identifiering av leromvandlat berg (i samarbete med SGU), förundersökningar och klassificering av leromvandlat berg.

Vid VBB har på anslag från BFR en förstudie utförts omfattande kostnader för utförda bergförstärkningar, program för laboratorieprovningar, program för modellförsök och fältförsök samt en teoretisk utredning av spänningsfördelning i och kring lerslag i berg. Förstudien utfördes av Hans Fagerström, Lars Hill och Ulf Kihlblom, VBB, under ledning av Erling Reinius, VBB och KTH. Utredningen om spänningsfördelning genomfördes av Bengt Broms, KTH. Förstudien publicerades i april 1974.

Föreliggande rapport är en bearbetning av denna förstudie som dessutom kompletterats med beskrivning av metoder för identifiering av svällande lera samt åtgärder för förstärkning av lerslag och lerzoner. Vidare har sammanställts beskrivningar av fall där lera i berg vållat problem.

De frågor som föreslås bli belysta av det fortsatta forskningsarbetet kan sammanfattas till:

- o ökar rasrisken kring lerslag i berg ju mer svällningsbenägen leran är?
- o när uppkommer svälltryck i lerzoner bakom bergförstärkningar?
- o behöver man dimensionera bergförstärkningar för svälltryck och i så fall hur stora?
- o bör man vänta med betongsprutning, tills leran hunnit svälla något och minskas därmed svälltrycken?
- o gör mjuka mellanlägg av typen mineralull nytta för att minska svälltryck mot betongförstärkningar?
- o hur inverkar dränering på svälltrycket?

Det finns ett stort behov av bättre kunskaper inom området, både med hänsyn till förstärkningsekonomi och framtida risker.

2. ALLMÄNT

Hittills vunna erfarenheter tyder på att lera förekommer i de flesta bergartstyper i vårt land. Kunskapen om var svällande lera finns i olika områden, hur den är sammansatt eller har bildats är dock tämligen bristfällig, Ziemelis (1972).

Lerzoner i berg ökar risken för bergutfall och ras och kan föranleda förstärkningsåtgärder. Främst gäller detta för tunnlar och bergrum. Nu är dock inte alla lerzoner lika farliga utan det är en kombination av faktorer, som påverkar stabiliteten:

- o lerzonens mäktighet och eventuella uppdelning i flera sprickor och slag
- o lerzonens riktning, dvs stupning och strykning i relation till berganläggningens väggar och tak
- o lerans mineralogiska sammansättning
- o lerans konsolideringsgrad
- o tillgången på vatten
- o sidobergets karaktär, dess hållfasthet, sprickfrekvens och tätthet
- o djupet under markytan.

Begreppet svällande lera i samband med lerzoner i berg är av tämligen sent datum och har använts mer allmänt först under slutet av sextioalet. Tidigare talade man ospecificerat om dåligt berg och svaghetszoner eller krosszoner i berg. Det är främst Selmer-Olsen vid Norges Tekniska Högskola som har bidragit med iakttagelser av olika lertypers förekomst och farlighet.

Därigenom öppnades möjligheter till rationella metoder för dimensionering och utförande av bergförstärkningar. Vidare har metoder för avlastning av svälltrycket kunnat utarbetas. Frågeställningarna är emellertid mycket komplexa och vägen till full förståelse är lång.

Tidigare saknades såväl klassificerande provningar som metoder för sådana. Därför görs i följande redovisning av platser och kostnader för bergförstärkningar ingen konsekvent åtskillnad mellan leror med olika svällningsbenägenhet. Framställningen omfattar alltså såväl starkt svällande leror som leror med lägre eller obetydlig svällning. I programförslagen för laboratorie-, modell- och fältförsök behandlas däremot endast svällande leror.

I litteraturen har redovisats lerfyllda sprickor och lerzoner med en mäktighet som varierar mellan några få millimeter och upp till ett femtiotal meter. Kostnaden för eventuella förstärkningsåtgärder eller ras står inte i någon direkt proportion till lerzonens mäktighet. Även blygsamma lerzoner eller tunna sprickor kan ge upphov till omfattande skador, speciellt om de innehåller svällande lermineral och/eller är omgivna av sprickigt och svagt berg.

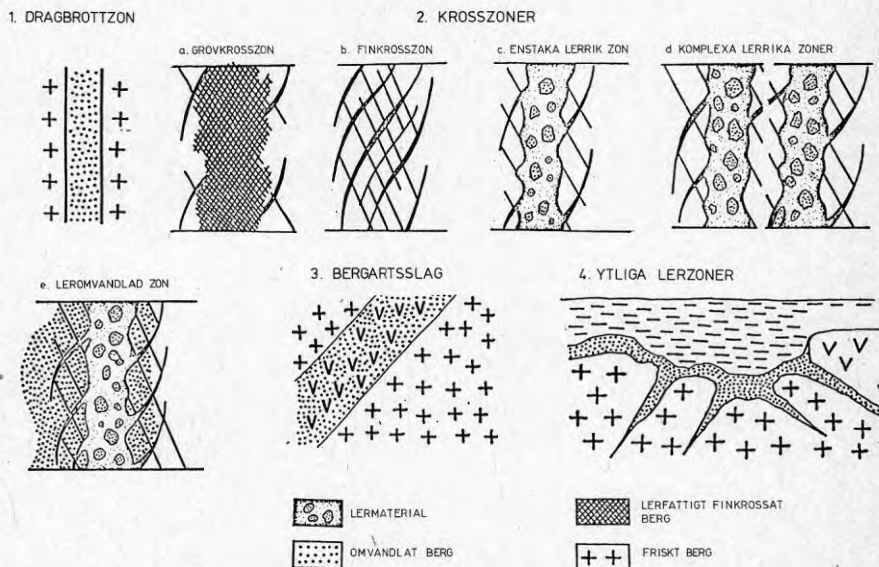
Vanligtvis är leran före utsprängning starkt överkonsoliderad och dess vattenhalt är låg. Omedelbart efter utsprängning kan en sådan lera vara torr och hård. För ett otränat öga kan det då vara svårt att skilja en sådan lerzon från det omgivande sidoberget. Om leran innehåller svällande mineral kan det räcka med att den upptar fuktighet från den omgivande luften för att börja svälla. Än allvarligare kan förhållandena bli om vatten letar sig fram genom sprickor eller borrhål direkt till den svällande leran, Selmer-Olsen (1971).

3. LERSLAG. TYPER OCH FÖREKOMST

Det har visat sig att lerfyllda slag förekommer i de flesta typer av bergarter fördelade över alla delar av världen.

Bildningen av lera i berg sker i huvudsak genom någon eller en kombination av följande processer. Den kan ske in situ antingen vid normala tryck och temperaturförhållanden (atmosfärisk vittring) eller vid förhöjda tryck och temperaturförhållanden (hydratermal omvandling). Lera kan också avsättas sedimentärt i öppna sprickor i berget.

Selmer-Olsen (1972) har föreslagit följande gruppindelning av lerfyllda sprickor och zoner, figur 1.



Figur 1. Olika typer av lerzoner. Gruppindelning, Selmer-Olsen (1972).

1. Dragbrottzoner. Dessa zoner är oftast väl definerade och sidoberget är opåverkat.
2. Krosszoner. Övergången från sprickrikt till helt berg sker gradvis. Zonerna innehåller nedkrossade bergarts- och mineralfragment. Följande undergrupper kan särskiljas.
 - a) Grovkrossade zoner som innehåller relativt tjocka lerskikt i åtskilda sprickor i ett förhållandevis grovt uppkrossningsmönster.
 - b) Finkrossade zoner utan lera eller med endast ett tunt lerlager i sprickor och på glidytor.
 - c) Enstaka lerzoner med ett centralt lerrikt parti i kombination med spridda lerfyllda sprickor i det uppkrossade sidoberget.
 - d) Komplexa störningszoner som har flera klart åtskilda större lerzoner och ett delvis uppsprucket sidoberg med en del lerfyllda sprickor.
 - e) Leromvandlade zoner i vilka fältspaten i sidoberget helt eller delvis är omvandlad till lera.
3. En tredje grupp lerzoner kan uppstå när bergarten i sig innehåller lermineral. Dessa zoner behöver inte ha någon anknytning till områdets tektonik.
4. En fjärde grupp lerzoner förekommer i bergets ytliga delar. De orsakas av ytvittring och inte som de övriga zonerna av processer i berget.

Lundgren (1974) gör en sammanställning av påträffade typer av leromvandlat berg och föreslår en indelning som anknyter till vissa typiska förhållanden.

- o Lerslag (bredd 1-2 cm)
 - Enskilda, lerfyllda slag eller sprickor
 - Lerslag uppträdande svärmvis
 - Lerslag i anslutning till amfibolitgångar eller kloritskölar

Lerslag i anslutning till andra inhomogeniteter

Lerslag i samband med tektoniska störningar

Lerslag i samband med olika bergartsstrukturer

- o Lergångar (bredd 10-20 cm)
- o Lerzoner med allmän eller selektiv grus- och leromvandling av bergartsbildande mineral
 - Enskilda vittrade zoner
 - Grus-lerzoner
 - Lerzoner i samband med inhomogeniteter eller speciella strukturer
 - Lerzoner och tektoniska störningar
- o Krosszoner med lerfilm på brottyterna
- o Speciella typer av lerförekomster.

3.1 Några exempel på problem i samband med svällande lera

Bjerrum, et al (1963) har beskrivit ett antal fall där problem med svällande lera förekommit.

Vid anläggandet av ett vattenkraftverk i Hemsedal 200 km nordväst om Oslo upptäcktes i slutet av den 13 km långa 12 m² tilloppstunneln två parallella 5 ä 20 cm breda montmorillonitförande slag. Slagen låg 2,5 m ifrån varandra. De var nästa vertikala och hade en strykning vinkelrätt mot tunnelaxeln. Berget mellan slagen var genomsatt av tunna kloritfyllda sprickor. Under utsprängningen uppstod inga problem och obetydliga övermassor erhöles i det torra berget. Efter utsprängningen torkade berget ytterligare i tunnelytan. Eftersom berget föreföll vara helt stabilt kläddes tunneln inte in med platsgjuten betong utan förstärktes endast med sprutbetong i anslutningen till sprickzonerna.

Efter det att anläggningen varit i drift 1 år observerades att tryckförlusten i tunneln ökat och den tömdes och inspekterades. Det visade sig då att materialet mellan slagen hade glidit ut till nästan en meter över tunneln. Den utrensade volymen var totalt 200 m³ med block upp till 3 m³. Händelseförloppet tycks i detta fall ha varit följande. Sprutbetongen hade inte kunnat förhindra att vattnet nådde lerzonen. Ej heller kunde den motstå svälltrycket från leran som utvecklades i samband med att den tog upp vatten. När sprutbetongen hade tryckts ut

spolades leran i slagen successivt ur varvid sidoberget rasade. Efter upprensning stabiliserades berget med kraftiga betongkonstruktioner.

Ett annat fall där stabilitetsproblem uppstod var i samband med byggandet av en 35 m² stor tunnel i fjällkedjebergarten nära Tunnsjö ca 200 km nordost om Trondheim. Där påträffades 2 tunna vertikala drag-sprickor som hade en strykning parallellt med tunneln. Avståndet mellan slagen var ca 6 m. Berget bestod av kvarts-biotit-diorit. Fältspaten i anslutning till sprickorna hade delvis omvandlats till montmorillonit. På tre partier hade inläckande vatten i tunneln påverkat leran varvid block lossnade från tak och väggar. Allteftersom det leriga berget utsattes för vatten ökade bergnedfallet. Driften måste inställas när tunneln var 50 m bortom rasplatsen tills man hade lyckats stabilisera berget med en gjuten betongkonstruktion.

Ett tredje exempel är en 8 km lång järnvägstunnel nära Kvineshei ca 400 km sydväst om Oslo. I den prekambrika graniten påträffades en bred krosszon med karbonater och montmorillonit. En dränerad betonginklädnad byggdes för att förhindra ras. 8 år senare observerades att läckaget runt och genom fogar i konstruktionen hade ökat avsevärt. Därefter inträffade ett ras varvid bildades ett hål i taket och vägginklädnaden sprack. Raset som var rörformat med 4 å 6 m diameter sträckte sig 34 m upp i krosszonen. Utlösning av karbonat medförde att vattnet kunde påverka leran så att den kunde svälla varvid hållfastheten reducerades.

Brekke och Selmer-Olsen (1965) har beskrivit ytterligare ett antal fall där svällande lera vållat problem. Ett exempel är Vrenga kraftstation öster om Oslo där klorit och montmorillonitlag förekommer i prekambiskt berg. En 5 m² tunnel med 17 m täckning går genom en zon där ett omfattande läckage observerades under byggnadstiden. Efter 10 månader började ett ras som pågick under 7 månader. Till slut sträckte det sig upp till markytan. Orsaken till raset var en kombination av kloritfyllning med låg skjuvhållfasthet och svällande montmorillonit.

Ett annat exempel är en 4 km lång vattentunnel vid Skogn norr om Trondheim med 30 m bergtäckning och 5 m² area som drevs genom fjällkedjebergarten. Tunneln passerade en zon där berget innehöll montmorillonit. Efter en vecka inträffade flera ras som nästan helt fyllde tunneln på en 40 m lång sträcka. Orsaken till rasen bedöms här vara att leran exponerats dels för läckvatten från berget dels att den hade tagit upp vatten ur luften i tunneln.

En kombination av höga bergtryck och lerfyllda slag orsakade problem i en järnvägstunnel vid Lieråsen.

Tunneln passerar där genom granitiskt berg ca 200 m under ytan. Lera förekommer i tunna slag i berget vilka under normala förhållanden inte skulle orsaka omfattande bergutfall. På grund av ett högt horisontellt bergtryck av tektoniskt ursprung i kombination med vattenläckage och lera av montmorillonittyp erhöles trots detta ett ras i tunneltaket några dagar efter utsprängningen.

Granström (1965) och Morfeldt (1965) har beskrivet problem som uppstod i samband med utsprängningen av ett bensinlager i berg.

Anläggningen som innehåller ett flertal bergrum ligger under grundvattenytan. Efter utsprängningen observerades stora vittringszoner som innehöll svällande lera. Eftersom dessa zoner var stora fanns en risk för genombrott mellan de olika utrymmena i anläggningen. För att säkerställa stabiliteten hos bergrummen strävade man i görlig mån att förhindra att lerzonerna utsattes för vatten. Zonerna plomberades efter det att allt löst material tagits bort och öppna sprickor tätades genom injektering. Plomberingen utfördes så att den färska framrensade berg- och lerytan sprutades med ett vattentätt plastmaterial varefter ett täckande betongskikt lades på.

Beroende på zonernas bredd utformas förstärkningarna något olika. När sprickzonen var mindre än 200 mm bedömdes vidhäftningen mellan rensat berg och plombering vara tillfyllest för att hålla den på plats. Sprickor med 200 till 400 mm bredd säkrades ytterligare genom att plomberingarna bultades. Vid sprickor större än 400 mm förstärktes bergrummen med gjutna eller sprutade valv.

Bergman, et al (1976) har beskrivit problem och åtgärder när en 12 m zon med svällande berg passerades. Denna zon påträffades vid byggandet av Järnvägsforsens vattenkraftverk. Tilloppstunneln som har ca 100 m² area drevs med galleri och pall genom granitiskt berg och gråvacka genomsatt av diabasgångar. Diabasen visade sig vara starkt vittrad och svällande. När bergytan i den 12 m breda zonen utsattes för den fuktiga luften i tunneln började materialet flyta och falla ut. För att stabilisera bergytan sprutades det torra berget i galleriet med sprutbetong utan föregående vattenspolning. Sprutbetongen armerades och förankrades nedtill med bultar. Efter det att zonen hade passerats stabiliserades partiet ytterligare med två sprutade bågar och väggbalkar.

När pallen togs ut stabiliserades väggarna omedelbart med armerad sprutbetong. Bergutfallet blev dock större än beräknat och med hjälp av mätningar konstaterades att väggarna rörde sig mot varandra. Tun-

nelns botten och pallväggarna förstärktes då med platsgjuten armerad betong som förankrades med bul-
tar. I och med att plattan i tunneln botten gjöts
avstannade rörelserna.

4. METODER ATT IDENTIFIERA SVÄLLANDE LERA

Lerbildning i berg är i allmänhet knuten till tektoniskt störda zoner. Påträffas lera i en viss typ av spricka är sannolikheten stor att lera även förekommer i andra likartade sprickor som bildades vid samma tillfälle och av samma tektoniska störning. Det är givetvis värdefullt att så tidigt som möjligt känna till vilken typ av lera som kan förväntas i olika spricksystem. När sprickor påträffas vid igångsättningen av ett arbete bör därför prover tas och undersökas.

Ofta kan det vara svårt att direkt efter utsprängning observera om berget är leromvandlat då det fortfarande har kvar bergstrukturen och kan vara mycket hårt konsoliderat. Det händer att sådana partier sprutas över och upptäcks först när materialet börjar svälla och skadar sprutbetongen. Partier där det är klart att leromvandlat berg förekommer måste ofta sprutas in relativt kort tid efter utskjutningen för att förhindra ras så att driften kan fortsättas. Det är därför angeläget att berget karteras efter hand som tunneldriften framskrider. I samband med karteringen tar man prover av lera där den påträffas. Karteringen och resultaten från laboratorieundersökningarna av proverna används sedan vid bedömning av eventuella ytterligare förstärkningar.

4.1 Fältmetoder för att identifiera typ av lera

Det är till stor hjälp om det redan i fält är möjligt att klarlägga vilken typ av lera som påträffats. Därvid kan olika färgtester användas varvid färgen hos de använda ämnena påverkas av de olika mineral som finns i leran. De ämnen som brukar användas är benzidin och malakitgrönt. Bensidinet färgas gult och malakitgrönt rött vid montmorillonit. Malakitgrönt blir blått vid kaolin. Det kan vara svårt att tolka resultaten om leran i sig har stark färg.

Ca 1 g av materialet läggs på ett urglas och 3-4 droppar av den aktuella lösningen tillsätts och blandas väl med leran. Om malakitgrönt används behandlas provet först med saltsyra så att eventuell kalkspat avlägsnas och provets pH-värde blir lägre än 2.

4.2 Laborariemetoder för att identifiera typ av lera

4.2.1 Mineralogisk identifiering

Ett flertal laborariemetoder står till buds för att identifiera olika lermineral. Vid några av des-

sa försök kan man också bestämma halten förekommande mineral. På speciella forskningslaboratorier kan differentialtermisk analys (DTA) och röntgendiffraktionsanalys utföras. Båda dessa försök är främst kvalitativa. Mycket små mängder av materialet fordras. Om möjligt bör dock ca 100 g tas ut så att referensmaterial kan sparas.

Vid differentialtermisk analys registreras de reaktioner som sker när materialet hettas upp. De flesta mineral friger eller förbrukar värme vid vissa bestämda temperaturer. Genom att jämföra provets temperaturkurva med kända temperaturkurvor för olika mineral kan provets sammansättning bestämmas.

I röntgen-diffraktionsanalysen jämförs förhållandet mellan intensiteterna hos diffraktionslinjerna för provet och intensiteterna hos linjerna från en standardsubstans.

4.2.2 Indextester

För att bestämma lermaterialens svällningsegenskaper används även några av de tester som normalt utförs i klassificeringssyfte vid geotekniska laboratorier. Följande tester kommer i första hand till användning:

- o Atterbergs gränser
- o fri svällningsbestämning
- o gradering och lerhaltsbestämning
- o vattenhalt.

Atterbergs gränser

Flera forskare har visat att ett samband existerar mellan svällningsegenskaper, plasticitetsgräns och flytgräns. Seed et al (1962) har funnit följande samband mellan svällningspotential och plasticitetsindex

$$S = (PI)^{2.44} \cdot 0,216 \cdot 10^{-3}$$

där S = svällningspotential, som definieras som den procentuella svällningen hos ett prov som efter inpackning till maximal torrdensitet vid optimal vattenhalt bestämd enligt standard proctorförfarandet vattendränks vid en överlast av 7 kPa.

Sambandet anges vara giltig då lerhalten hos provet är mellan 8 och 65 %.

Chen (1975) anger följande samband mellan svällningspotential och plasticitetsindex

Svällningspotential	Plasticitetsindex, %
Låg	0-15
Medium	10-20
Hög	20-35
Mycket hög	>35

Det skall noteras att en kraftigt svällande jord alltid har ett högt plasticitetsindex men att ett högt plasticitetsindex ej alltid innebär att jorden är kraftigt svällande.

Fri svällning

Vid detta försök hålls en känd volym torrt nedkrossat material i ett mätglas fyllt med vatten. Därefter avläses svällningen hos materialet sedan det satt sig utan överlast. Den fria svällningen är provets volym efter att ha fått svälla fritt vid sedimentation jämfört med det torra provets ursprungliga volym vid lös utfyllnad uttryckt i procent. Följande gränser används vid klassificeringen av leran.

Fri svällning

40- 70 % inaktiva leror

100-170 % aktiva leror

Ett klarare utslag på förekomst av svällande mineral erhålls genom att jämföra volymen hos det material som fått sedimentera i vatten med ett likadant prov som fått sedimentera i fotogen.

Lerhalt

Sambandet mellan svällningspotential och lerhalt kan enligt Seed et al (1962) uttryckas

$$S = KC^x$$

där

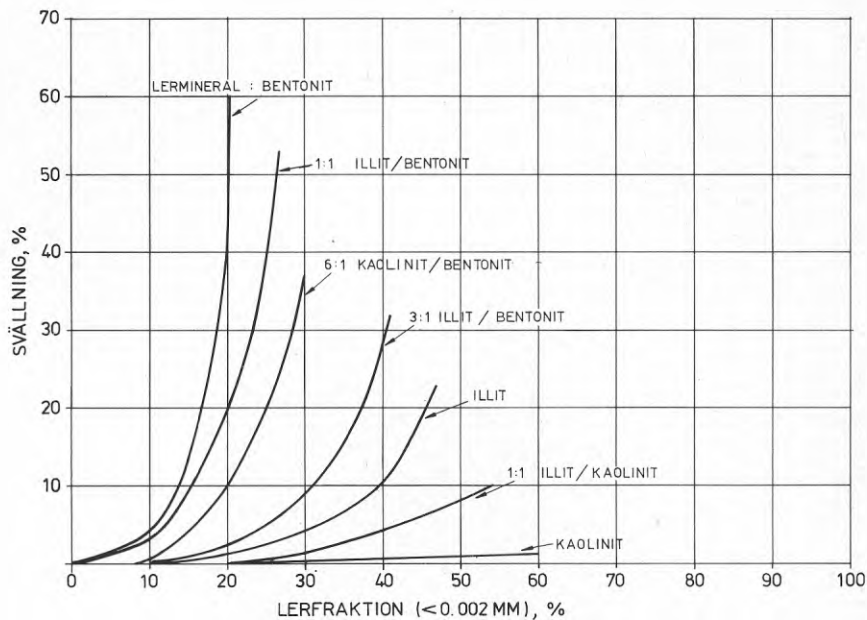
S = svällningspotential

C = procent ler (<0,002 mm)

x = exponent beroende av lertyp

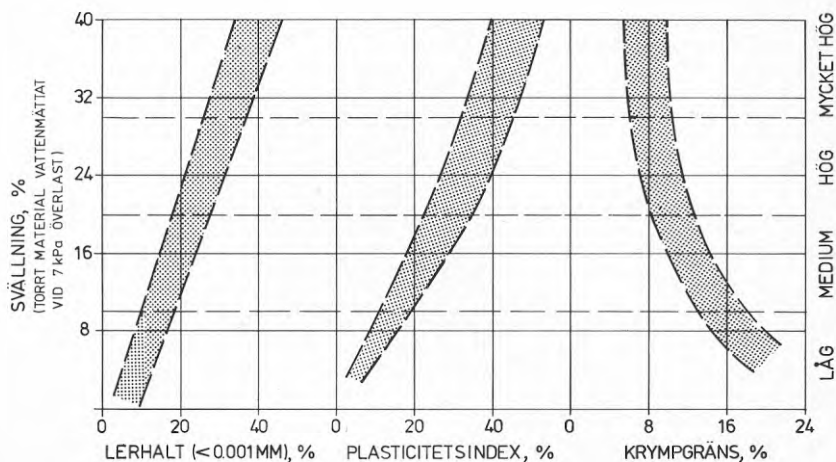
K = koefficient beroende av lertyp.

I figur 2 visas sambandet för några vanliga lertyper. Även provets gradering påverkar svällningen eftersom leran i ett ensgraderat material kan expandera i porerna i större omfattning än i ett välgraderat material med mindre porositet.



Figur 2. Samband mellan svällning och lerhalt i några kommersiellt tillgängliga försöksjordar. Seed et al (1962).

Holtz and Gibbs (1956) har sammanställt samband mellan svällning, lerhalt, plasticitetsindex och krympgräns, enligt figur 3.



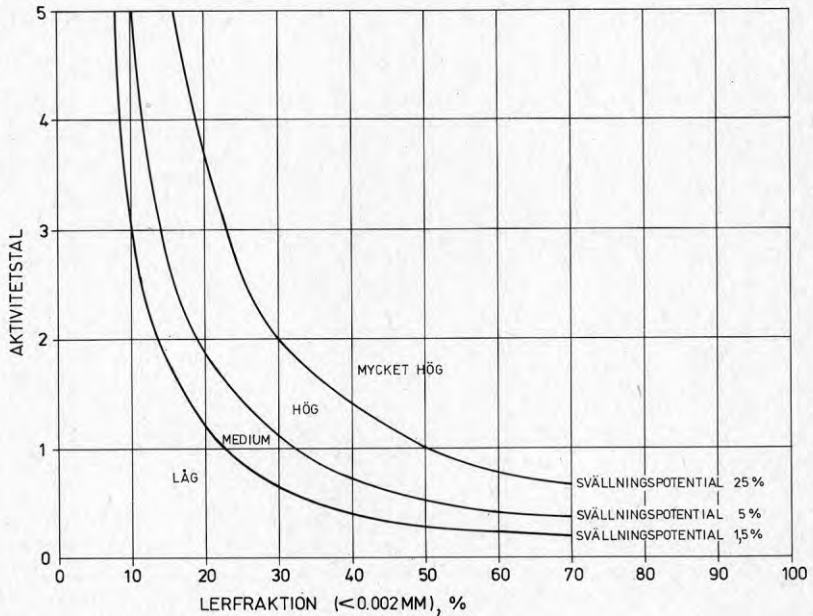
Figur 3. Samband mellan svällning och lerhalt, plasticitetsindex samt krympgräns. Holz and Gibbs (1956).

Aktivitetstal

Aktivitetstalet bestäms enligt ett förfarande som föreslagits av Seed et al (1962).

$$a_v = \frac{PI}{C-n}$$

där C är lerhalten (<0,002 mm) i procent och n är en konstant mellan 0 och 10. Ett rimligt värde för naturliga lermaterial bedöms vara n = 5. Klassificeringen föreslås ske med de i figur 4 angivna gränserna.



Figur 4. Förslag till klassificering.
Seed et al (1962).

4.3 Direktmätning av svällegenskaperna

4.3.1 Enkla svälltrycksförsök

Vid dessa försök används material vars kornstorlek är mindre än 0,02 mm. Efter torkning och nedmalning packas 20 g av materialet in i en ödometer. Provet konsolideras vid 2 MPa under 24 timmar. Sedan avlastas provet och får expandera tills volymen blir konstant. Provet vattendränks därefter och volymen hålls konstant genom pålastning. Materialets svälltryck är det tryck som erfordras för att hålla volymen konstant efter 24 timmar. Följande klassificering används.

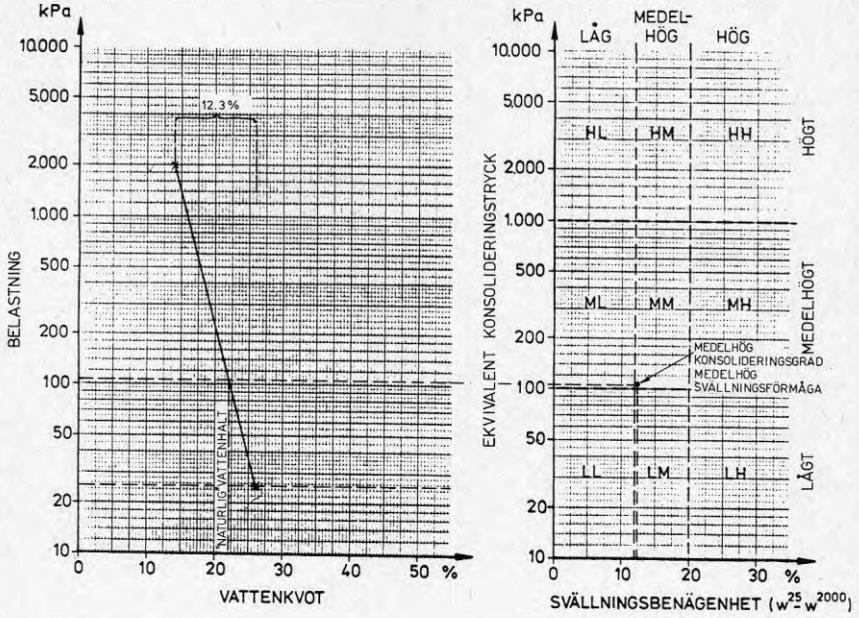
Svälltryck, MPa	Klassificering
<0,1	Inaktiv lera
0,1-0,2	Lågaktiv lera
0,2-0,5	Normalaktiv lera
>0,5	Högaktiv lera

Om inte sprickfyllnadsmaterialet till största delen består av finmaterial kan försöket endast användas för klassificering av ingående lermineral. Det uppmätta svälltrycket blir då i allmänhet betydligt större än den belastning som en eventuell förstärkning måste dimensioneras för.

4.3.2 NTH-metoden

Ett försök som i högre grad ger en uppfattning om de verkliga laster som kommer att påverka förstärkningen har utvecklats vid NTH av Selmer-Olsen och Rokoengen. Därvid bestäms den naturliga vattenhalten hos materialet i en spricka eller lerzon så snart efter utskjutningen som möjligt. Därefter plockas större partiklar (>1-4 mm) bort. Destillerat vatten tillsätts så att provet kan röras ut till en jämn smet. Två delprov tas ut och packas in i varsin ödometer. Proverna belastas sedan stegvis under 3 timmar. Det ena provet belastas till 25 kPa och det andra till 2000 kPa. När deformationerna avstannat, dock ej tidigare än efter 24 timmar tas proven ut och deras vattenhalter bestäms (w_{25} och w_{2000}).

Det är viktigt att bestämningen görs på de delar av provet som i så liten omfattning som möjligt sugit åt sig vatten vid avlastningen. Svällningsbenägenheten uttrycks som skillnaden mellan de båda provens vattenkvoter ($w_{25}-w_{2000}$). Det ekvivalanta konsolideringsstrycket bestäms genom att interpolera rättlinjigt med hjälp av den naturliga vattenkvoten, se figur 5.



Figur 5. Utvärdering av svällningsbenägenhet enligt NTH-metoden. Selmer-Olsen och Rokoengen (1974).

5. FÖRSTÄRKNINGSMETODER

Förstärkningar i tunnlar och bergrum kan indelas i driftförstärkningar och permanenta förstärkningar.

5.1 Driftförstärkningar

Mängden och kostnaden av driftförstärkningar beror inte enbart på bergets karaktär utan också på hur man har sprängt och hur man utfört och organiserat förstärkningsarbetena.

Många gånger utförs mera omfattande förstärkningar än vad som krävs ur stabilitetssynpunkt. Psykologiska faktorer inverkar därvid, eftersom säkerheten mot bergutfall är svår att bestämma. Känslan av säkerhet ökar med mängden och styrkan av förstärkningarna, t ex med mängden sprutbetong som appliceras på det nyskjutna berget. Kostnaderna kan lätt bli större än nödvändigt.

5.2 Permanentförstärkningar

Permanentförstärkningar i tunnlar bestäms numera på större arbetsplatser vanligen genom att bergförstärkningsexpertis etappvis går igenom besvärliga tunnelavsnitt och föreskriver erforderliga åtgärder. I detta skede är tunneltak och väggar på dåliga partier redan till stor del täckta med sprutbetong. Bedömningsunderlaget, förutom ännu blottade bergpartier, utgörs av dels arbetsplatsens bergkartering, innan driftförstärkningar, dels laboratorieklassificering av jordprover från lerslag.

De permanentförstärkningar som kommer i fråga brukar vara av följande slag:

- o bultning
- o bultning och nätning
- o oarmerad sprutbetong (5-10 cm)
- o armerad sprutbetong (8-15 cm)
- o sprutade armerade eller oarmerade betongbågar (20-30 cm)
- o platsgjutna armerade eller oarmerade betongbågar (30-60 cm)
- o hel inklädnad med platsgjuten armerad betong.

Kombinationer av dessa metoder, såsom bultning, nätning och sprutbetong i tak samt platsgjuten betong på väggar och golv förekommer. Enstaka lerslag brukar förstärkas med sprutbetong som eventuellt är armerad och förankrad i berget med bergbult. Vid mäktigare zoner utförs bågar av antingen armerad sprutbetong eller gjutbetong.

5.3 Förstärkning av lerzoner

Risken för bergutfall vid lerfyllda sprickor och lerzoner beror som nämnts av flera faktorer främst

- o sprickornas geometri
- o typ av lera
- o vattentillgång
- o lerans konsolideringsgrad och djupet under markytan.

I samband med utsprängningen förändras spänningsförhållandena i berget och permeabiliteten i en zon närmast tunnelns periferi ökar. Efter utsprängningen exponeras förekommande lerzoner för den ibland relativt fuktiga permeabiliteten i tunneln vidare medför den förhöjda permeabiliteten att bergvattnet snabbare kan nå dessa zoner. När leran tar upp vatten ökas dess volym och hållfastheten minskar. Innehåller leran aktivt lermineral sker volymförändringen snabbt och stabilitetsförhållandena försämras. Förhindras volymsökningen blir trycket i leran av samma storleksordning som bergtrycket. Sker däremot en volymförändring sjunker svälltrycket snabbt.

5.4. Fjädrande förstärkning

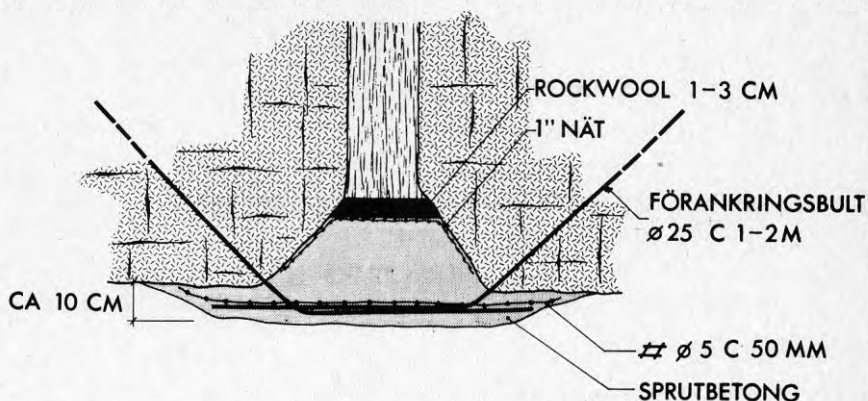
Om svällande lera tillåts utvidga sig, sjunker svälltrycket som nämnts kraftigt. Trycket kan t ex gå ned till hälften vid en 5 % ökning av lervolymer. I ett försök att minska svälltrycket har Selmer-Olsen (1971) föreslagit att lerzonen skall ges möjlighet till en begränsad svällning genom att den täcks med mineralull innan armerad sprutbetong appliceras.

För att denna förstärkning skall fungera tillfredsställande bör lerzonen stupa brant och vara smal. Leran bör ej heller vara alltför svällande och sidoberget bör vara av god kvalitet, så att förankringsbultar kan fästas på ömse sidor om zonen.

Beroende på den lerbärande zonens vidd och geometri föreslår Eurenus (1972) förstärkningen bli utformad på följande sätt:

5.4.1 Enstaka brant spricka, 60-90^o stupning, <200 mm enligt figur 6

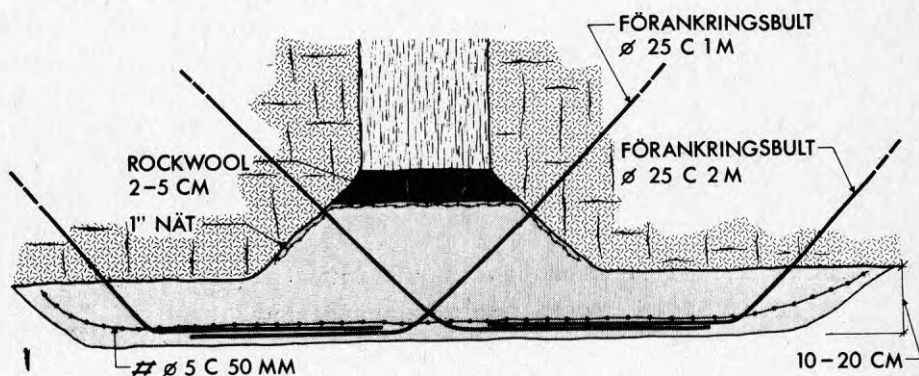
Sidoberget förstärks med dubbla rader bult \varnothing 25 mm c/c 1 m. Leran närmast bergytan skrapas bort och mineralull samt 25 mm nät läggs in varefter sprickan i väggar och tak täcks med 10 cm armerad sprutbetong. När sprickvidden är mindre än 1 à 2 cm och omgivande berg är av god kvalitet kan sprickan lämnas utan åtgärd.



Figur 6. Exempel på förstärkning vid enstaka brant spricka med svällande lera.

5.4.2 Enstaka brant spricka, 200 till 500 mm, figur 7

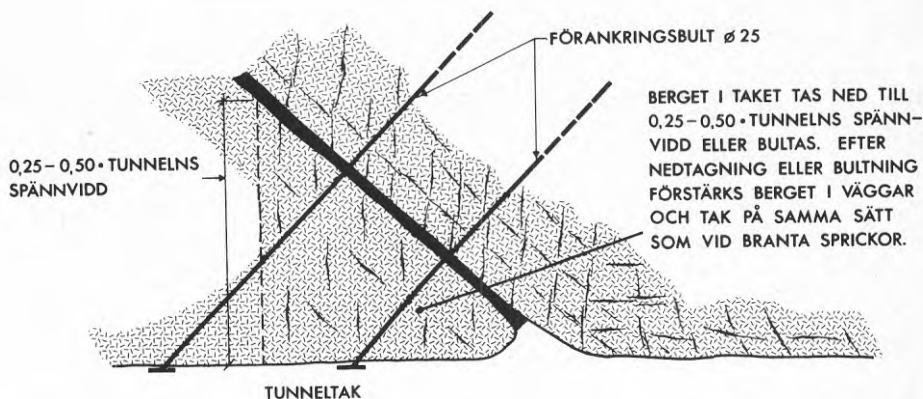
Sidoberget förstärks med fyrdubbla rader bult \varnothing 25 mm. Avståndet mellan bultarna i de inre raderna bör inte överstiga 1 m. Upp till 2 m kan accepteras i de yttre raderna. Sprickan täcks efter inläggning av mineralullsskiva och 25 mm nät med 20 cm armerad sprutbetong i väggar och tak.



Figur 7. Exempel på förstärkning vid enstaka brant spricka med svällande lera, sprickvidd 20-50 cm.

5.4.3 Enstaka medelbranta sprickor, 30-60^o stupning, figur 8

Dessa sprickor förstärks på samma sätt som branta sprickor efter det att berget tagits ned eller bultats.



Figur 8. Exempel på förstärkning vid enstaka medelbrant spricka.

5.4.4 Tättliggande branta eller medelbranta sprickor, figur 9

Efter rensning och skrotning placeras fjädrande mineralullsskivor i sprickzonerna. Om bergrummet har stor spännvidd eller ligger på stort djup förstärks väggar och tak med minst 30 cm platsgjuten betong.

För tunnlar med liten area och på ringa djup är i allmänhet en 10 å 20 cm tjock armerad sprutbetongförstärkning tillfyllest.

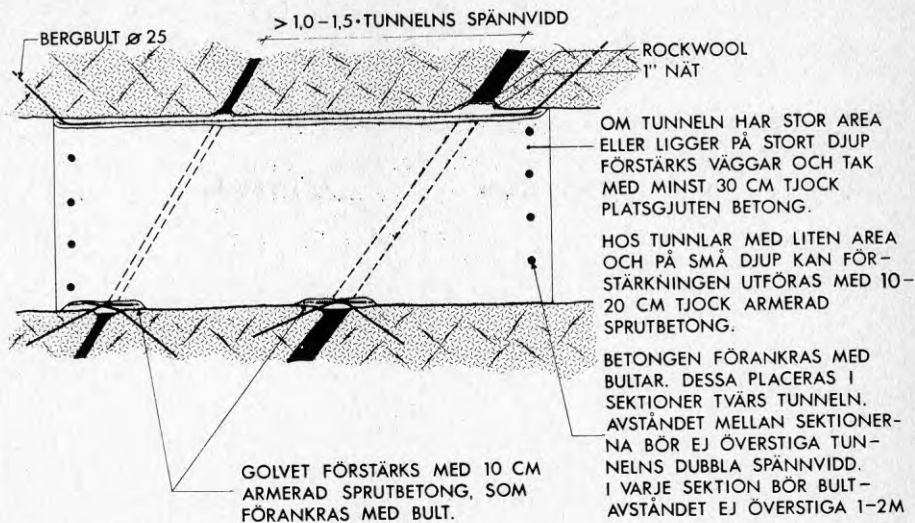
Betongen förankras med bultar placerade i sektioner tvärs tunneln. Avståndet mellan sektionerna bör ej vara större än tunnelns dubbla spännvidd. Bultarnas c/c-avstånd bör vara 1 å 2 m. Golvet förstärks vid sprickorna med 10 cm armerad sprutbetong, som förankras med bult.

5.4.5 Flacka sprickor

I allmänhet är det fördelaktigt att skrota det bergparti där sprickan når tunnelväggen. Kvarvarande berg bultas och förstärks med en båge av platsgjuten betong eller sprutbetong beroende på tunnelns spännvidd och lerslagets tjocklek. Lerslaget täcks med fjädrande mineralullsskiva.

5.4.6 Breda lerzoner

Breda lerzoner förstärks med bultförankrad platsgjuten betong som dimensioneras för beräknat svälltryck. En viss reduktion av svälltrycket sker på grund av tiden mellan utsprängning och när den gjutna konstruktionen belastas.

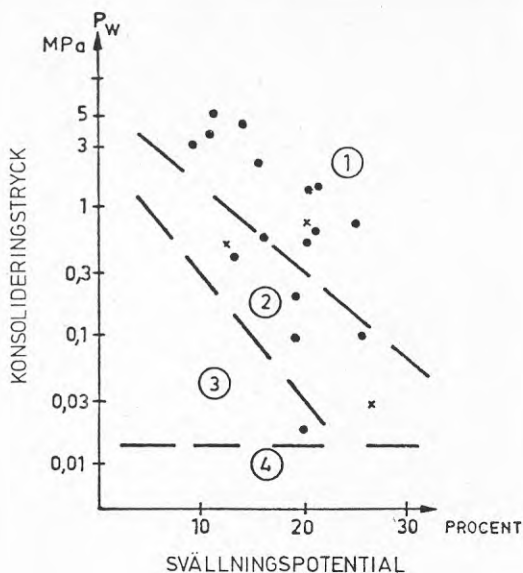


Figur 9. Exempel på förstärkning av tak och väggar vid flera tätliggande sprickor. Sprickavstånd $< 1-1,5 \times$ tunnelns spännvidd.

Dessa förstärkningsmetoder har använts med framgång av VBB bl a i tunnelarna för Långå och Järnvägsforsens kraftverk. Även om metoden är arbetskrävande har kostnaderna utöver de för bultning och sprutning varit rimliga. Det är först på senare år som metoden har använts varför den inte kan sägas vara helt utprovad. Vid dimensioneringen av förstärkningar väljer man därför i vissa fall ett högre tryck och därmed kraftigare betongförstärkning än som svarar mot de lastreduceringar mätningar på laboratoriet har visat.

5.5 Förstärkningsmetod kontra leregenskaper

Ett intressant försök att relatera förstärkningsmetoder till den svällande lerans egenskaper har gjorts av Selmer-Olsen och Rokoengen (1974). Svällningspotential och ekvivalent konsolideringstryck har bestämts hos lerprover som tagits från olika rastplatser. Motsvarande värden har sedan lagts in i ett diagram, figur 10.



Figur 10. Ekvivalent konsolideringstryck som funktion av svällningspotential. x indikerar att provet innehållit hög procent glimmar. (Selmer-Olsen och Rokoengen, 1974).

Svällningspotentialen definieras som skillnaden i vattenhalt efter konsolidering hos omrörda prover med kornstorlek $<0,5$ mm. Proverna konsolideras vid $0,025$ MPa och $2,0$ MPa och det ekvivalenta konsolideringstrycket bestäms.

Det ekvivalenta konsolideringstrycket definieras därvid som det normaltryck som vid pålastning av ett omrört, avluftat och dränerat prov i en ödometer ger samma vattenhalt och porositet som leran har i naturligt tillstånd.

Leran i de zoner som behövs förstärkas med platsgjutna bågar med en minimitjocklek av $0,3$ m är belägen inom område 1 i figuren.

I område 2 är erfarenheterna tvetydiga. Många zoner som inte har förstärkts har rasat efter 2 å 3 dagar. I en del lerrika zoner, som förstärkts med 5 å 10 cm sprutbetong, har sprutbetongen skadats om den applicerats omedelbart efter utsprängningen. Dessutom har en del mäktiga lerrika zoner behövs förstärkas med platsgjutna bågar.

Lera i område 3 har utvecklat ett så lågt svälltryck att armerad sprutbetong i kombination med bultning har varit full tillräcklig.

Inom område 4 har leran haft så hög vattenhalt och så låg skjuvhållfasthet att den flutit ut redan under eller omedelbart efter sprängningen.

6. KOSTNADER FÖR BERGRAS OCH BERGFÖRSTÄRKNINGAR

Det har ej varit möjligt att få fram helt tillförlitliga och jämförbara kostnader för bergförstärkningar som utförts av olika entreprenörer under olika förhållanden. I de flesta fall har det inte heller varit möjligt att erhålla preciserade kostnader för sådana förstärkningar som har orsakats av lerzoner. Detta beror i hög grad på att förstärkningskostnaderna inte har uppdelats efter orsak i de räkningar som entreprenören presenterat. Det krävs därför ett inträngande arbete för att analysera lerzonernas inverkan. Det är sällan man har haft tid och pengar. Likartade erfarenheter har också redovisats av Ahlberg et al (1972). Följande redovisningar har därför begränsats till de erfarenheter som har gjorts av VBB.

I tabell 1 listas 16 projekt där lera varit ett problem och där förstärkningsåtgärder vidtagits. Var de 13 svenska anläggningarna är belägna visas i figur 11. Redovisade värden är maximalt uppmätta värden. Definitionsmässigt hör de flesta lerorna till gruppen normalaktiva leror (svälltryck 0,2 till 0,5 MPa). Det förekommer dock några högaktiva leror, vars svälltryck har varit större än 0,5 MPa.

De angivna kostnaderna i tabellen är summan av alla förstärkningskostnader. Man ser att dessa i vissa fall kan bli stora och oväntat höga. Det är därför önskvärt att förbättra uppskattningen av förstärkningskostnaderna redan på projekteringsstadiet.

6.1 Höljes kraftverk

Avloppstunneln hade i detta projekt en area av 145 m² och en längd av 4,0 km. Tunneln går genom flera olika bergarter från porfyr i norra delen till kvartsit, gnejs och leptit i den södra. På många ställen fanns omvandlat berg med sericit, glimmerskiffer och amfibolit. Brant stupande amfibolitskikt karakteriserades av svaga kontaktzoner av skiffrika eller leriga material samt klorit. Längs älven löpte krosszoner. En del av sprickor i krosszonerna var fyllda med finkrossat stenmjöl, andra med lera. Det lösa materialet var eroderbart. Som exempel på dåligt berg kan nämnas att i dräneringsgalleriet under dammen störtade det 8 m tjocka bergtaket ned i den 2,2 m breda tunneln längs ett amfibolitslag och lämnade en 3 m² stor öppning upp till bergytan. Galleriet måste helt kläs in med betong.

Drivningen av avloppstunneln var ytterst besvärlig och många förstärkningar måste utföras. På en sträcka måste arean minskas från 145 till 85 m² och helförstärkas. Sprängningskostnaden skulle enligt anbudet exklusive förstärkningar uppgå till 14,5 Mkr. Total-

TABELL 1

Berganläggningar där lera har utgjort ett problem

Anläggning	Geografiskt läge	Byggnadsdel	Längd km	Area m ²	Svälltryck MPa (kp/cm ²)	Fri svällning %	Total svällning %	Drift- och permanentförstärkning	Förstärkningskostn. - Mkr
Bergvattnets vkr	Sjougårdälven	Överledningstunnel Avloppstunnel	6,2 5,9	21,0 30,5	-	-	-	Bultn, sprutbetong Bultn, sprutbetong, betongbågar	0,4 0,5
Dabbsjö vkr	Saxälven	Överledningstunnel	4,5	16,5	1,97 (19,7)	-	20,0	Bultn, sprutbetong	0,1
Fläsjön vkr	Ljungan	Tillfart till krfstn	-	-	0,18 (1,8)	147	11,4	Sprutbetong	
Hällby vkr	Angermanälven	Avloppskanal	1,0	-	0,24 (2,4)	-	10,5	Rörsträva omgjutna av betong	
Höljes vkr	Klarälven	Avloppstunnel	4,0	140	-	-	-	660 m helinklädd tunnel med minskad area, betongbågar, sprutbetong	
Långå vkr	Ljungan	Lossentunneln Mitttunneln Avloppstunneln	10,7 6,5 3,0	48 38 75	0,41 (4,1) 0,36 (3,6) 0,09 (0,9)	197 160 112	15,2 10,9 4,6	Sprutbetong, bultn, Sprutbåge Sprutbetong, bultn Sprutbetong, bultn	9,2
Stensjöfallets vkr	Härkan	Tilloppstunnel	7,7	25	0,18 (1,8)	137	4,2	Betongbåge, sprutbetong, bultn	1,1
Sällsjö vkr	Häckerströmmen	Avloppstunnel	7,0	64	0,23 (2,3)	120	-	Betongbåge, sprutbetong, bultn	3
Trångfors vkr	Ljungan	Avloppstunnel	-	-	0,18 (1,8)	92,5	5,5	Sprutbetong, bultn	
Vårö		Huvudtunnel	7,2	10	0,72 (7,2)	165	25,3	Pultning	
Adaistunnlarna (vattenförsörjning)	Angermanälven	Huvudtunnel	-	-	-	-	-	Sprutbetong, Gjutning, bultning	1,0
Oldens vkr	Långan	Huvudtunnel Anslutningstunnel	1,2 0,5	8 4	-	-	-		
Rätans vkr	Långan	Tilloppstunnel	11	26	0,15 (1,5)	80	-	Sprutbetong	
Kafue Gorge vkr	Ljungan	Avloppstunnel	3,5	80	0,26 (2,6)*	-	-	Gjutbetong i väggar och botten	
Kidatu vkr	Zambia	Tilloppstunnel	10	120	0,31 (3,1)	155	19,3	Gjutna bågar, sprutbetong och bultn	17
Sao Paulo, vattenförsörjning	Tanzania	Tilloppstunnel	10	70	0,27 (2,7)	95	-	Pultn, sprutbetong, delvis minskad area, Bygget pågår ännu.	
	Brasilien		18,7		0,57 (5,7)	208	33,4	Gjutna betongbågar och väggar.	25

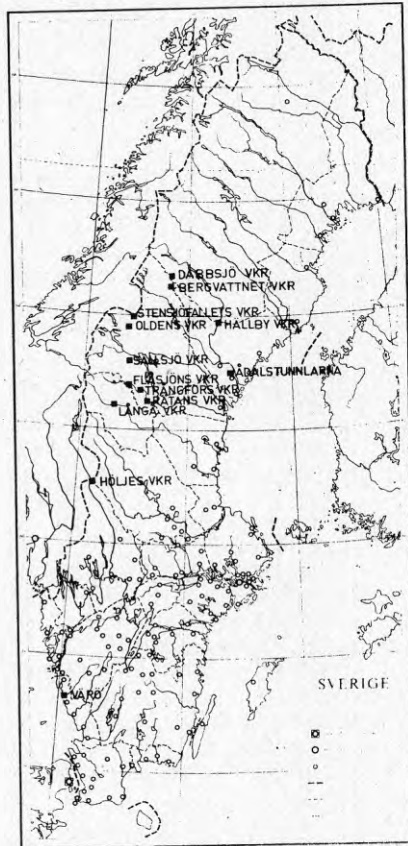
1) Svälltryck efter vattentillförsel vid helt förhindrad utvidgning.

2) Fri svällning av torrt material <0,5 mm efter sedimentation i destillerat vatten.

3) Fri svällning i axiell led i 80meter efter det att svälltrycket bestäms. Proverna utsatta för stämpellasten 0,004 MPa.

* Ej jämförbar med övriga bestämmingar då metoden var något annorlunda än den norska metoden, vilken numera används.

kostnaden blev 29,5 Mkr plus 1,9 Mkr indexpålägg, vilket betyder ett förstärkningstillägg av 104 %. Det kan noteras att sprutbetong med robotkanon användes här för första gången. Förstärkningsbetongen i valv och bågar uppgick till ca 40 000 m³ och sprutbetongen till ca 10 000 m³.



Figur 11. Läget av de svenska anläggningar som redovisas i Tabell 1.

6.2 Långå kraftverk

En av de mera väldokumenterade berganläggningarna när det gäller förstärkningar är Långå kraftverk, där utsprängningen omfattade 24 km tunnlar, Dahlin (1973). Kraftverket ligger i Ljusnan i Härjedalens fjällkedja. De vanligaste bergarterna i området är gnejs, gnejsgranit, sparagmit, kvartsit, grönsten och skiffer.

Vid Långå kraftverk utnyttjas två magasin - Lossenmagasinet och Grundsjömagasinet - med olika fallhöjder. Lossentunneln, som sammanbinder Lossenmagasinet med kraftverket, har undersökts noggrant vad beträffar förstärkningskostnaderna. Tunneln är 10,7 km lång och har en area på 48 m². Totalt har 6 300 m³ sprutbetong använts som drift- och permanentförstärkning. Driftförstärkningarna svarade för 70 % av den totala volymen eller 4 400 m³. Under driften påträffades 15 större lerzoner. Av dessa förstärktes 11 med sprutbetong av varierande tjocklek (6-40 cm). Två förstärktes enbart med bultning och en kunde lämnas utan åtgärd. Den 15e zonen var av sådan karaktär att tunneln på detta parti måste kläs in helt med gjutna väggar och sprutat tak.

Totalt har dessa förstärkningar av enbart lerzoner kostat ungefär 760 000 kronor, vilket motsvarar 11 % av de totala förstärkningskostnaderna. Detta är betydligt mindre än vad som brukar anses normalt. Selmer-Olsen har i olika publikationer angivit att 70-75 % av alla förstärkningar orsakas av lerzoner i berg, Selmer-Olsen (1971).

Baskostnaderna för sprutbetong var vid Långå kraftverk omkring 700 kr/m³. Efter tillägg för etablering för varje sprutning, stilleståndskostnader samt extra kostnader för ett tredje skift och arbete på sön- och helgdagar steg kostnaden till ungefär 1 000 kr/m³.

6.3 Raset i Sällsjö

Efter andra världskriget har över hundra vattenkraftverk utförts, där VBB har varit ansvarig för projektering och konstruktion. Betydande ras orsakade av svällande lera har inträffat i endast två fall efter det att kraftverken tagits i bruk. I båda fallen användes sprutbetong som förstärkning av de svaga områdena där ras sedermera skedde. Vid ett tredje fall, Tåsans kraftverk, analyserades inte leran och dess svällning.

Följderna av svällande lera blev dramatiskt belyst av raset i Sällsjö kraftverks avloppstunnel. Det första aggregatet i Sällsjö togs i drift i december 1966 och det andra i januari 1967. Framåt våren uppmärksammades att fallförlusten i avloppstunneln hade ökat. I samband med ett planerat driftstopp över sommaren beslöt man att tömma avloppstunneln. Det visade sig då att 4 000 å 5 000 m³ berg hade rasat ut i tunnelns höjdpunkt, där tidigare ett 15 cm luftningshål hade borrats. Under borrhningen hade en del berg fallit ut, varför man förstärkt berget omkring hålet med en båge. Dessutom hade berget sprutats med betong inom ett ca 80 m långt område omkring bågen. Vid raset gav sprutbetongförstärkningen vika, medan betongbågen stod kvar intakt.

Efter urschaktning av rasmassorna förstärktes tunneln med en 50 m lång, kraftig oarmerad betongbåge vars minsta tjocklek var 80 cm. För att förhindra skador på bågen, om ytterligare ras skulle inträffa, sprutades cementblandad sand in över bågen upp till ca 4 m över hjässan.

Det var på ett relativt sent stadium som orsaken till detta ras klargjordes. Från början ansåg man att orsaken var den dåliga bergkvaliteten i en rörelsezon. I och med att Selmer-Olsen kunde påvisa förekomsten av montmorillonit, stod dock sammanhanget klart.

6.4 Tunnelraset i Stensjöfallet

Raset i tilloppstunneln till Stensjöfallets kraftverk har ingående beskrivits av Sundquist (1972). I korthet skedde följande.

I juni 1971, ungefär 2 år efter att kraftverket hade tagits i drift, förstod man att ett ras måste ha inträffat eftersom fallförlusterna hade ökat i tilloppstunneln. Sedan tunneln tömts fann man att ungefär 2 500 m³ berg hade rasat ut.

Efter seismiska undersökningar och kärnborringar utförda innan byggnadsarbetena började visste man att svårigheter var att vänta i ett område nedströms om intaget från Lilla Stensjön. Undersökningarna visade dock ej att de största svårigheterna skulle uppträda på den sträcka där de verkligen förekom. Under utsprängningen förstärktes tunneln med sprutbetong i det område där raset senare skulle ske. Svällande lera tryckte ut sprutbetongskiktet och i samverkan med hydrauliska tryckändringar i tunneln utvecklades raset.

Efter en ganska besvärlig utschaktning kunde området kring rasplatsen förstärkas genom att helt klä in tunneln med ett betongsprutat armerat tak (minst 30 cm tjocklek), gjutna armerade väggar (minst 50 cm tjocklek) och en gjuten sula (minst 30 cm tjocklek). Dessutom bultades och sprutades ett område kring betongbågen.

I de i tabell 1 angivna kostnaderna för de båda rasen vid Sällsjö och Stensjöfallet ingår etablering, länspumpning, länshållning, schaktning och transport av rasmassor, formsättning, armering och gjutning. I slutkostnaden ingår dock ej bortfall av intäkter på grund av driftstoppet. Bortfallet var lyckligtvis litet i dessa båda fall, eftersom kraftstationerna är toppstationer, vilka normalt stängs av under sommaren.

6.5 Kafue Gorge kraftverk och Sao Paulo vattenförsörjning

Svällande lerzoner i de vattenförande tunnlarna för Kafue Gorge kraftverk i Zambia och Sao Paulo vattenförsörjning i Brasilien har krävt omfattande förstärkningsåtgärder. Förstärkningskostnaderna i Kafue Gorge uppgick till ungefär 17 Mkr och i Sao Paulo till ungefär 25 Mkr. Det är helt omöjligt att göra en direkt jämförelse med svenska förhållanden, eftersom prisstrukturen och de yttre omständigheterna är olika.

6.6 Kidatu kraftverk

I tilloppstunneln för Kidatu kraftverk i Tanzania finns flera krosszoner med lera. Omfattande ras har förekommit i en krosszon. Tunnelns riktning har på ett par ställen ändrats så att krosszonerna har korsats vinkelrätt. På en sträcka är berget skivigt med lera mellan skivorna. Tunnelarean har där minskats från 70 m² till 43 m² och tunneln har klätts in helt med sprutat och bultat tak samt gjuten botten och gjutna väggar. Vissa lerslag hölls under fortlöpande observation, tills man tagit slutgiltig ställning till omfattningen av de permanenta förstärkningarna.

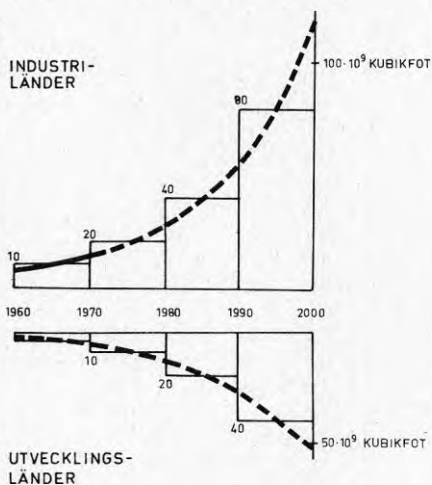
6.7 Framtida kostnader för bergförstärkningar till följd av lerzoner

Det finns alltså, som tidigare omtalats, ingen statistik från Sverige som visar de årliga förstärkningskostnaderna till följd av lerzoner i berg. I ett föredrag inför Svenska Geotekniska Föreningen 1970 angav Selmer-Olsen en del siffror som gäller Norge.

Förstärkningskostnaderna för kraftverkstunnlar varierade där vanligen mellan 8 och 15 % av utsprängningskostnaderna. För vissa anläggningar hade dock förstärkningarna dragit lika stora kostnader som själva utsprängningen. För anläggningar under jord i stadsområden gavs inga siffror, men man kan anta att kostnaderna på grund av striktare säkerhetskrav är större än de som gäller för kraftverkstunnlar. Trots att konsulter och entreprenörer medvetet satsar på att hålla nere förstärkningskostnaderna med hänsyn till lerslag, uppskattade Selmer-Olsen dessa till ungefär 50 miljoner norska kronor per år.

Under 1960-talet utsprängdes i Sverige ungefär 200 Mm³ berg, varav tunnlar och bergrum svarade för 35 Mm³ till en kostnad av ungefär 2 200 Mkr. 21 % av kostnaderna hänför sig till tunnlar och bergrum för kraftanläggningar och 27 % till underjordsbyggande i städer, t ex tunnelbanor, va-anläggningar, service-tunnlar etc.

De prognoser som har gjorts inom OECD pekar på att investeringarna i underjordsbyggande i industriländer kommer att fördubblas till volym och värde under 1970-talet. Vid slutet av detta sekel bör volymen ha ökat 4 à 5 gånger. (Jansson, 1974), se figur 12.



Figur 12. Tillväxten av underjordsbyggandet fram till år 2000. Jansson (1974).

Detta innebär för Sveriges del att ca 1 miljard kronor kommer att investeras i förstärkningar i underjordsanläggningar under 1970-talet. Därvid har antagits att förstärkningskostnaderna i medeltal motsvarar 20-30 % av utsprängningskostnaderna. Om kostnaderna ökar i takt med volymen blir det sammanlagda investeringsbehovet för bergförstärkningar mer än 4 000 Mkr fram till år 2000. En stor del av detta belopp är förstärkningar orsakade av lerslag och lerzoner, jfr tabell 2.

Det är givetvis önskvärt att förstärkningarna utförs så rationellt och billigt som möjligt med hänsyn till uppställda säkerhetskrav. Dagens förstärkningsmetoder bygger i stor utsträckning på allmänna principer, erfarenheter och bedömningar. Beräkningar, baserade på provtagningar och sprickkartering, görs sällan eller hinns ej med. En forskning med syfte att öka kunskaperna om leran i lerslag och krosszoner och speciellt svällande leras egenskaper samt att bättre klarlägga kraftspelet i berg med lerslag bör kunna resultera i bättre och därmed mera ekonomiska förstärkningar. Med hänsyn till de mycket stora belopp som här står på spel kan stora besparingar göras.

I följande avsnitt föreslås olika undersökningar som avser att belysa problematiken vid förstärkning av bergzoner med svällande lera.

Tabell 2. Uppskattning av förstärkningskostnader, som orsakats av lerzoner i tunnlar.

	1960 talet Miljar- der kr	1970 talet Miljar- der kr	1980 talet Miljar- der kr	1990 talet Miljar- der kr	Totalt Miljar- der kr
Tunnelbygg- arbeten	2,2	4,0	6,0-8,0	8,0-16,0	
Bergförstärk- ningar, omkr 20-30 %	0,4-0,6	0,8-1,2	1,2-2,4	1,6- 4,8	4-9
Därav förstärk- ningar orsakade av lerzoner, omkr 30-50 %	0,1-0,3	0,2-0,6	0,4-1,2	0,5-2,4	1-5

7. PROGRAM FÖR LABORATORIEUNDER- SÖKNING AV SVÄLLANDE LERORS GEOTEKNISKA EGENSKAPER

Svällande lerors egenskaper föreslås bli undersökta dels på laboratorium och dels i fält. I laboratorie-försöken klassificeras olika lertyper och deras hållfasthets- och svällningsegenskaper bestäms. Vidare utförs modellförsök där olika fältförhållanden simuleras. I fältförsöken görs mätningar av svälltryck vid lerfyllda slag.

7.1 Syfte och nytta

Syftet med de planerade undersökningarna är trefaldigt:

- o att prova ut laboratorierutiner för bestämning av svällande lerors materialegenskaper
- o att identifiera och karaktärisera de lertyper som provas vid laboratorie- och modellförsöken
- o att studera hur skjuvhållfastheten påverkas av svällningspotentialen.

Det finns ett behov av provningsmetoder som kan användas till att klassificera materialet i lerzoner med avseende på svällningsbenägenhet. Även i anslutning till provningar i modell eller i fält är det nödvändigt att karaktärisera förekommande lermaterial. Om något samband finns mellan skjuvhållfasthet och svällningspotential, har detta väsentlig betydelse för dimensionering av bergförstärkningar och bedömning av rasrisker.

Nyttan av de föreslagna laboratorieundersökningarna enligt föreliggande program förväntas bli:

- o bättre teknik för klassificering av svällande leror i sprickor och krosszoner
- o bättre underlag för dimensionering av bergförstärkningar i svällande lera
- o säkrare tunnlar och bergrum.

7.2 Identifierande provningar

För att identifiera och tekniskt beskriva de lertyper som provas med avseende på svällning måste följande materialegenskaper bestämmas:

- o kornfördelning
- o mineralogisk sammansättning

- o naturlig vattenhalt
- o konsistensegenskaper (Atterbergs gränser)
- o fri svällning
- o svällningsbenägenhet. (Skillnaden i vattenhalt efter konsolidering vid 0,025 och 2 MPa)
- o svälltryck efter vattentillförsel vid konstant volym
- o svälltryck efter vattentillförsel och 2,5 % utvidgning
- o ekvivalent konsolideringstryck. (Det normaltryck som erfordras för att ett omrört, avluftat, dränerad prov skall få samma vattenhalt och porositet som leran i naturligt tillstånd. Därvid fördras ett någorlunda välgraderat material med relativt låg glimmerhalt).

Knapphändiga uppgifter om inträffade skador av tunnelinklädnader till följd av svällning visar att lerzoner för att vara farliga måste ha både en hög svällningsbenägenhet och ett högt konsolideringstryck, jfr figur 10. Det förefaller som om lerzoner med lågt konsolideringstryck inte kan utbilda ett tillräckligt högt svälltryck, även om svällningspotentialen är hög.

7.3 Ödometerförsök

Avsikten med dessa försök är framför allt att genom parallellprovningar i modell och i ödometer klargöra hur lermaterialens egenskaper kan bestämmas med konventionella laborieförsök.

Konsolideringstrycket är för lerslag i berg vanligen lika stort som bergtrycket. Svälltrycket bör för aktiva leror vara av samma storleksordning som bergtrycket vinkelrätt mot bergslaget. Svälltrycket torde under vanliga förhållanden knappast överstiga bergtrycket. Dessa elementära antaganden bör prövas med laborieförsök.

7.4 Bestämning av skjuvhållfasthet

Det är välbekant att överkonsoliderade leror när de belastas når ett maximivärde redan efter en måttlig

deformation, men att hållfastheten sedan sjunker mot ett konstant restvärde när deformationen blir stor. Denna hållfasthetsminskning förorsakas av en nedbrytning av lerans struktur och en ökning av portrycket.

För att studera denna nedbrytning föreslås följande försök på inpackade prover såvida inte ostörda prover kan tas ut. I så fall koncentreras försöken till dessa.

- o Direkta dränerade skjuvförsök (CD-försök) på material med olika svällningspotential och olika vattenhalter efter svällning.
- o Direkta dränerade skjuvförsök (CD-försök) på material med olika svällningspotential vid konstant volym och olika vattenhalter efter svällning. Volymen hålls konstant genom att hålla provets höjd konstant.

Förändringarna i normaltryck motsvarar då de portrycksförändringar som skulle inträffa, om provet varit odränerat vid konstant normaltryck.

- o Dränerade direkta skjuvförsök vid kontrollerad deformation på material med olika svällningspotential och olika vattenhalter efter svällning.

Med denna metod registreras skjuvhållfasthetens toppvärde samt restvärde vid stor deformation (svällning). Detta kan åstadkommas genom att skjuva provet fram- och tillbaka.

- o Triaxialförsök med portrycksmätning på material med olika svällningspotential och olika vattenhalter.

7.5 Tidåtgång och kostnad

Arbetsinsatsen för den skisserade försöksserien kräver en laboratorieingenjör och en civilingenjör under ett halvt till ett år. På grund av svårigheter att få lämpliga prover måste man räkna med att försöken totalt kommer att pågå under ca 2 år.

8. PROGRAM FÖR MODELLFÖRSÖK

8.1 Syfte och nytta

Modellförsöken syftar till att klarlägga:

- o svälltryckets verkningssätt i en bergspricka och mot förstärkningar
- o spänningsfördelning längs en spricka som funktion av förändringar i bergtrycket vid sprickans ena ände samt vattentillförsel, deformation och sprickvidd.

Frågeställningarna är fundamentala och kan lämpligen undersökas med modellförsök på laboratorium. Dessa torde vara svårare att genomföra än laboratorieförsök men enklare än fältförsök.

Nyttan av genomförda modellförsök kan väntas bli:

- o bättre förståelse av svällningsfenomen i lerfyllda bergsprickor
- o bättre underlag för tekniskt riktig och därför mer ekonomisk dimensionering av bergförstärkningar mot svällande lera
- o säkrare tunnlar och bergrum.

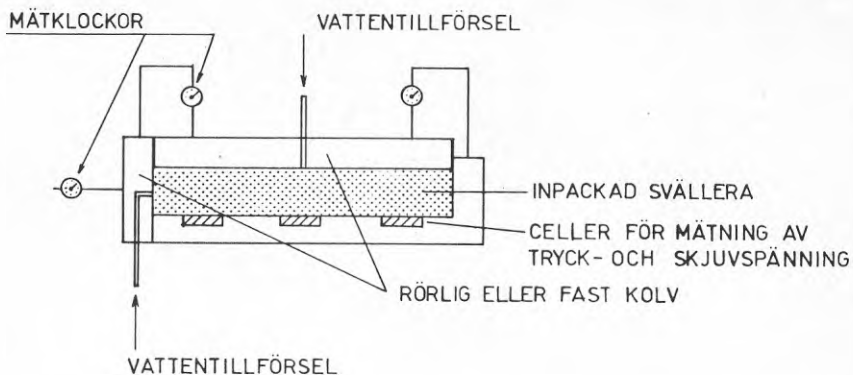
8.2 Provmaterial

Försöken utförs med dels högaktiv, dels normalaktiv lera. Samma material används i samtliga försöksserier. För utprovning av utrustningen bör en referenslera användas.

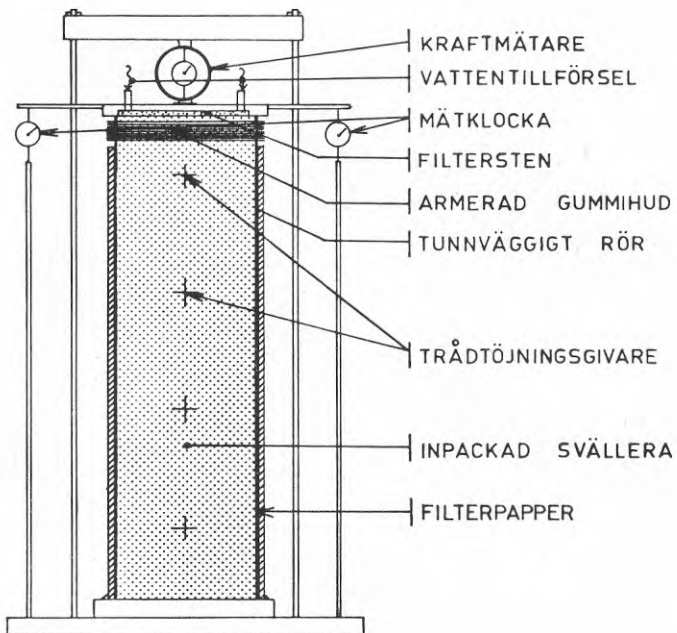
8.3 Försök

Modellförsöken utförs efter enklast möjliga principer. Man kan efterlikna en bergspricka med en modell uppbyggd av två planparallella skivor eller i form av en cylinder. Den senare modellen bedöms ha flera fördelar, då den ger enklare randvillkor. Den plana modellen efterliknar förhållandena i en spricka något bättre. Följande försök föreslås:

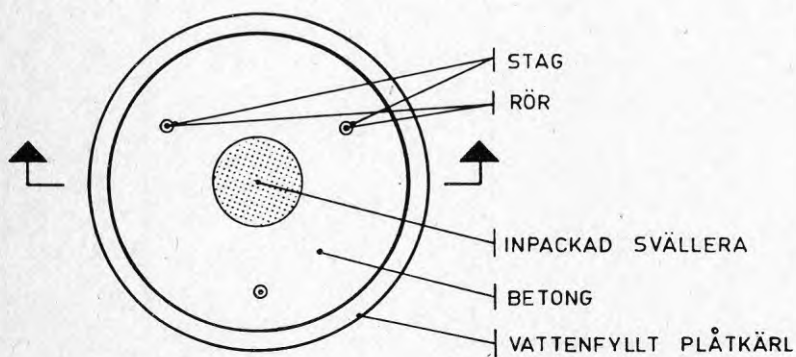
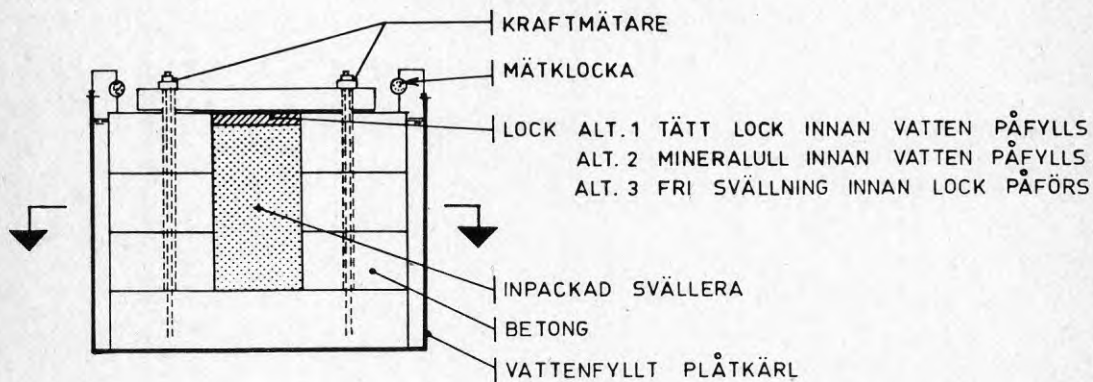
- o försök i plan modell med konstant volym och med utvidgning, figur 13
- o cylinderförsök, figur 14
- o simulerade fältförsök, figur 15, 16



Figur 13. Utrustning för försök i plan modell.

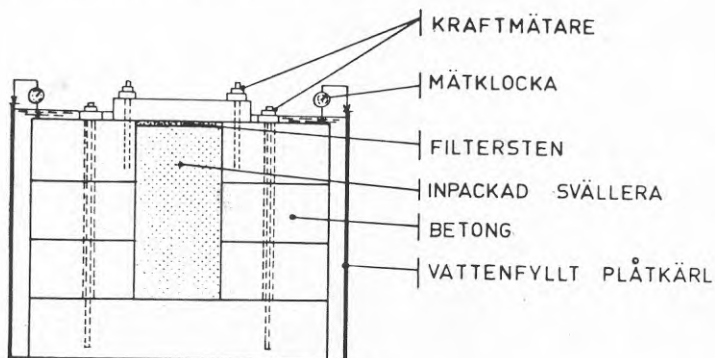


Figur 14. Cylinderförsök.



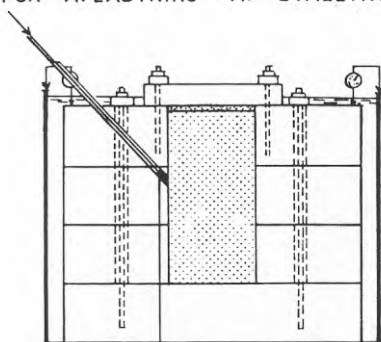
Figur 15. Simulerat fältförsök.

- o försök att minska svälltrycket på en bergförstärkning med mineralull, figur 15
- o försök för att bestämma den avlastande effekten av ett borrhål som passerar ett lerslag, figur 17.



Figur 16. Simulerat fältförsök. Separat mätning av svälltryck från lerzon och bergsprickor.

HÅL FÖR AVLASTNING AV SVÄLLTRYCK



GUMMIBLÅSA. FALLET MED DRÄNERING OCH AVLASTNING AV SVÄLLTRYCKET ERHÅLLES GENOM ATT TRYCKLUFTTILLFÖRSELN AVBRYTS OCH GUMMIBLÅSAN DRAS UT.

Figur 17. Simulerat fältförsök. Avlastning av svälltrycket med borrhål, som korsar lerslaget.

8.4 Tidåtgång och kostnad

Den skisserade försöksserien torde kräva en laboratorieingenjör och en civilingenjör under en effektiv arbetstid av 1 år. Dock måste man räkna med att undersökningen totalt kommer att spänna över 1 å 2 år.

9. PROGRAM FÖR FÄLTFÖRSÖK

9.1 Syfte

Fältförsöken syftar till att klarlägga:

- o svälltryckets storlek i sprickor som funktion av avståndet från tunnelväggen
- o svälltryckets storlek mot styva och elastiska förstärkningar.

Dessa försök är betydligt svårare att genomföra än laboratorie- och modellförsöken. Vid en prioritering sätts de därför i tredje hand med hänsyn till kostnaderna och förväntade resultat. Om undersökningen begränsas till laboratorie- och modellförsök erfordras någon form av fältmätningar för att kontrollera de teoretiska resultaten.

Praktiska svårigheter med fältförsöken är att man måste avvakta lämpligt tillfälle med hänsyn till:

- o förekomst av lerzoner
- o plats
- o driftförhållanden
- o personal
- o anslag m m.

Det skisserade programmet för fältförsöken kan därför dröja flera år innan det rätta tillfället inträffar.

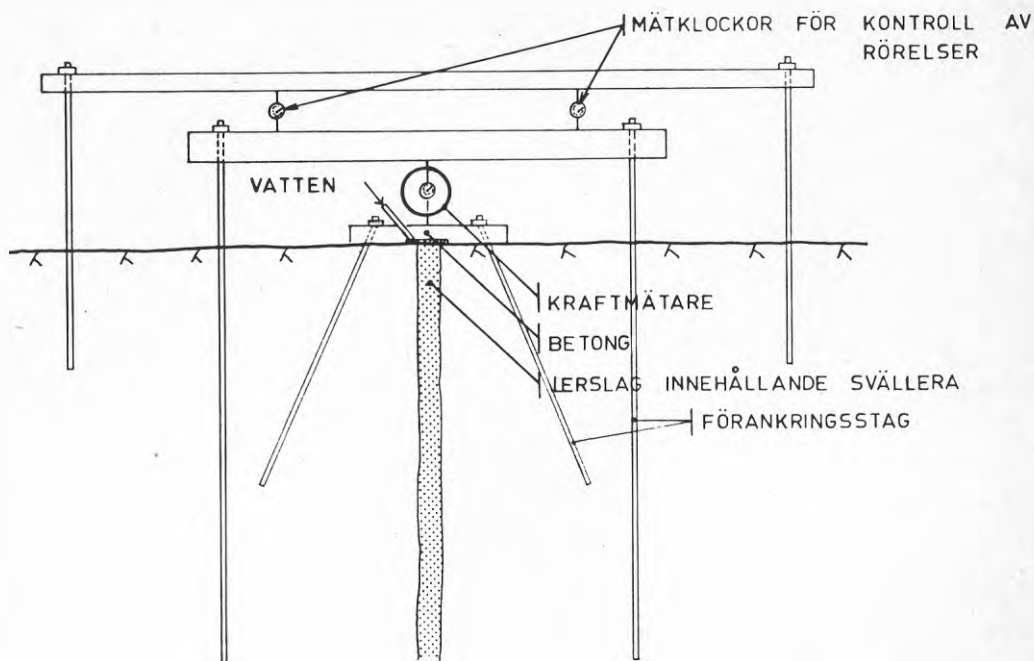
9.2 Försök

Två typer av fältförsök genomförs:

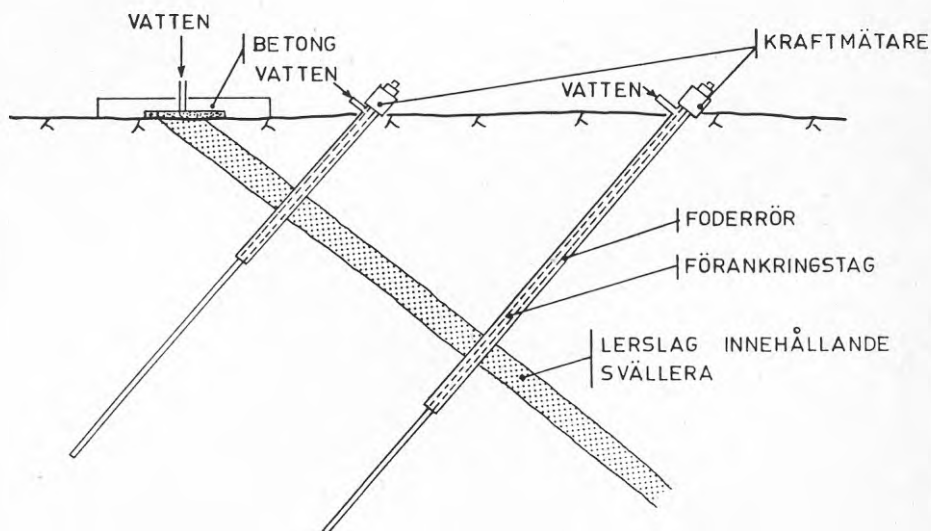
- o krafter på betongförstärkning, figur 18.

Dessa försök bör omfatta följande moment:

- o mätning av verkande krafter vid förhindrad utvidgning
- o bestämning av erforderlig rörelse för att reducera verkande krafter
- o prov med mellanlägg av mineralull
- o krafter på bultförstärkning till följd av sneda lerslag, figur 19.



Figur 18. Mätning av krafter på betongförstärkning.



Figur 19. Mätning av krafter på bultförstärkning till följd av lerslag

Dessa försök bör omfatta följande moment:

icke förspända bultar, mätning
av verkande krafter och rörelser

förspända bultar, mätning av ver-
kande krafter och rörelser

mätning av erforderlig rörelse
för att reducera verkande krafter.

9.3 Tidåtgång

Insatsen för den skisserade försöksserien kräver en gymnasieingenjör och en civilingenjör under en effektiv arbetstid av ett halvt till ett år. Totalt kan man räkna med att undersökningen spänner över 1 till 2 års tid.

10. SPÄNNINGSFÖRDELNING I OCH KRING LERSLAG I BERG

Reinius (1973) har diskuterat spänningsuppbyggnad och fördelning i ett lerslag som korsar en tunnel. Broms (1974) har utvecklat en beräkningsmetod vilken i det följande redovisas i sammandrag.

10.1 Inledning

I utredningen behandlas spänningsfördelningen i lerslag och i omgivande berg dels omedelbart efter utsprängning av en tunnel eller ett bergrum, dels efter viss tid när leran hunnit svälla och vattenhalten ökat.

Vid utsprängning av en tunnel eller ett bergrum sker en snabb förändring av spänningstillståndet i och kring existerande lerslag. Intill tunnelväggen kommer normalspänningen i slagets längdriktning att minska från det ursprungliga värdet till noll. Det ursprungliga normaltrycket är främst beroende av lerslagets orientering och av avståndet till markytan.

I vertikal led motsvarar det genomsnittliga effektivtrycket det effektiva överlagringstrycket, vilket kan beräknas. I horisontell led är effektivtrycket antingen högre eller lägre än överlagringstrycket beroende på områdets tektoniska historia.

Någon ändring av vattenhalten i lerslaget hinner knappast ske under utsprängningen. Förhållandena alldeles efter utsprängningen motsvarar lerans ursprungliga vattenhalt och således dess skivodränerade skjuvhållfasthet.

Vidhäftningen mellan lera och berg är beroende av de två omgivande bergytornas skrovlighet och av en eventuell parallellförskjutning av de två bergytorna i förhållande till varandra. Om en sådan parallellförskjutning skett, kommer vidhäftningen längs bergytorna att motsvara lermaterialets restskjuvhållfasthet snarare än dess maximala skjuvhållfasthet (toppvärdet). I det fall någon parallellrörelse ej förekommit motsvarar kohesionen troligtvis lerans toppvärde.

Vattenhalten ökar med tiden efter utsprängningen, allteftersom leran sväller. Därvid minskar lerans skjuvhållfasthet och vidhäftning längs de omgivande bergytorna. Även normaltrycket vinkelrätt mot bergytorna minskar med ökad vattenhalt. Denna minskning av skjuvspänningen och av normaltrycket medför att den maximala dragspänningen i det omgivande berget minskar. Den totala skjuvkraften, som överförs från lerslaget till det omgivande berget är dock konstant,

eftersom den är lika med produkten av det ursprungliga normaltrycket och lerslagets bredd. En viss skjuvkraft kommer därför med tiden att överföras över en allt längre sträcka, varvid skjovspänningens intensitet längs bergytorna gradvis minskar. De största påkänningarna i berget uppträder således alldeles efter utsprängningen, innan leran har svällt och skjupåkänningarna minskat.

Det minskade normaltrycket i ett lerslag parallellt med tunnelväggen har till följd att risken för bergutfall eller ras gradvis ökar på grund av att den mothållande friktionskraften längs sprickor och slag i berget minskar med minskad ringspänning runt en tunnelsektion.

10.2 Spänningsfördelning i ett lerslag före svällning

Under vissa rimliga förutsättningar visar beräkningarna att:

- o uttryckningen av leran vid tunnelväggen ökar linjärt med initialtrycket i lerslaget och bredden hos lerslaget
- o den del av lerslaget som påverkas av utsprängningen ökar med ökad bredd hos lerslaget och med minskad vidhäftning mellan lera och slag.

10.3 Spänningsfördelning i ett lerslag efter svällning

I utredningen görs en analys av fallen:

- o porvattentrycket i slaget försummas
- o porvattentrycket ökar linjärt med ökat avstånd från den plana bergytan.

För fallet med avsaknad av porvattentryck i slaget kan man under olika förutsättningar beräkna den längd som erfordras för att det effektiva normaltrycket i slagets längdriktning skall minska från ursprungstrycket till en viss procent därav.

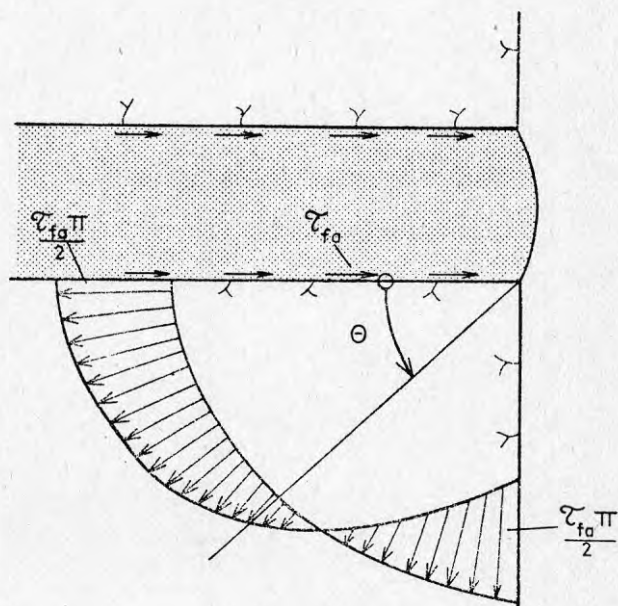
Analysen av fallet med linjärt ökande porvattentryck visar att strömningsgradienten har mycket stor inverkan på spänningsfördelningen längs ett lerslag. För att minska risken för att leran skall tryckas ut eller spolras ur och förorsaka bergutfall bör berget dräneras noggrant, så att porvattentrycket i lerslaget och sprickvattentrycket i det omgivande berget minskas.

10.4 Spänningsfördelningen i det omgivande berget

Spänningsfördelningen i berget på ömse sidor om ett lerslag kan beräknas ur elasticitetsläran, varvid de av Timoshenko och Goodier (1951), härledda uttrycken för normalspänning och skjuvspänning i radiell och tangentiell led används. I utredningen beräknas normalspänningen i radiell led med hjälp av Fourier-serieanalys för fallen:

- o jämnt fördelad skjuvspänning
- o jämnt fördelat normaltryck.

Beräkningarna visar att en konstant skjuvspänning, τ_{fa} , längs ett lerslag, som löper vinkelrätt mot en plan fri bergyta förorsakar en dragspänning parallellt med lerslaget som är lika med $\frac{\pi}{2} \cdot \tau_{fa}$, se figur 20. Däremot medför ett jämnt fördelat normaltryck inga dragspänningar i berget parallellt med lerslaget.

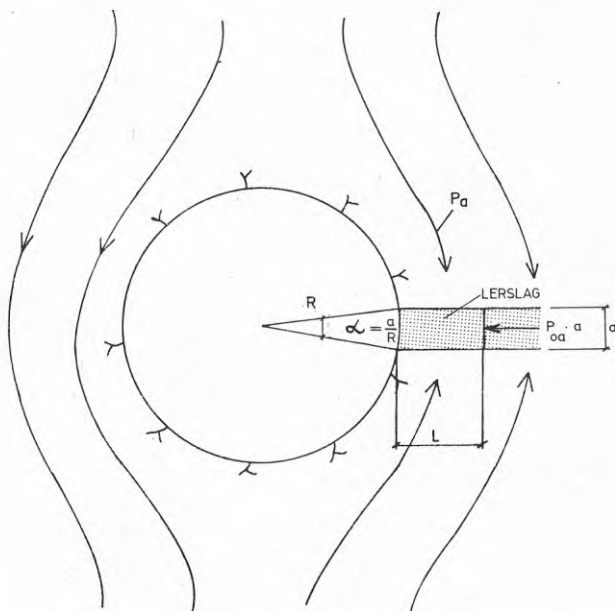


Figur 20. Fördelning av σ_r längs ett cirkulärt snitt vid konstant skjuvspänning.

10.5 Dimensioneringsprinciper

Vid dimensionering av en förstärkning bör beaktas att den kraft per längdenhet som överförs från ett lerslag till det omgivande berget motsvarar $p_{oa} \cdot a$, där p_{oa} är det ursprungliga totaltrycket i lerslaget vinkelrätt mot den utsprängda bergytan och a är lerslagets bredd, se figur 21.

Alldeles efter utsprängningen överförs kraften $p_{oa} \cdot a$ längs en sträcka som motsvarar 2,25 a till 6,75 a . Denna sträcka ökar, när lerans vattenhalt ökar och när skjuvhållfastheten och kohesionen minskar. När överföringslängden är relativt stor bärs en del av belastningen i lerslaget, $p_{oa} \cdot a$, genom valverken runt tunneln om lerslaget är parallellt med tunnelaxeln.



Figur 21. Valvverkan kring en cirkulär tunnel.

REFERENSER

- Aastrup, Å., and Sällström, S., 1961, Bergeforsen - a Swedish power plant built on nonresistant rock. Seventh International Congress on Large Dams. Question No. 25, R. 69, p. 473-489.
- Aastrup, Å., and Sällström, S., 1964, Further treatment of problematic rock foundation at Bergeforsen. Eighth International Congress on Large Dams. Question 28. R. 34, p. 627-636.
- Ahlberg, P., Lundgren, T., och Parekh, S., 1972, Presentation av genomförd enkät. SGI. Särtryck och Preliminära Rapporter. No. 49, p. 3-12.
- Ahlberg, P., och Lundgren, T., 1973, Lerzoner i berganläggningar. Sammanfattning av delrapporterna 1-5. Lägesrapport. SGI. Interna Rapporter No. 1.
- Ahlberg, P., och Lundgren, T., 1974, Lerzoner i berganläggningar. Geologiska förundersökningar och klassificering av leromvandlat berg. Slutrapport. SGI. Interna rapporter No 9.
- Alberts, C., 1965, Bergförstärkning genom betongsprutning och injektering. IVA:s Bergmekanikdagar 1965, IVA-Meddelande 142, p. 231-240.
- Alberts, C., 1972, Skarvbergstunneln på Nordkapvägen i Norge. SGI. Särtryck och Preliminära Rapport. No. 49, p. 53-58.
- Bergman, S.G.A., 1959, Permanenta bergförstärkningar. Väg- och vattenbyggaren 3 1959, p. 31-89.
- Bergman, S.G.A., Brännfors, S., och Dahlin, O., 1976, Passage av 12 m svällbergsson med 100 m² tunnel. Befo Bergmekanikdag 1976. P. 209-219.
- Bergman, S.G.A., och Larsson, T., 1973, Svenskt tunnelbygge. Byggforskningens informationsblad B10:1973.
- Bjerrum, L., Brekke, T.L., Mowm, J., and Selmer-Olsen, R., 1963. Some Norwegian Studies and Experiences with Swelling Materials in Rock Gouges. Norges Geotekniska Institut 57. Oslo. p. 23-31.
- Brekke, T.L., 1964, Om orsaken till og måing av svelleevnen hos montmorillonitt gruppens mineraler. Tidskr Kjemi, Bergv., Metallurgi, Bind 24 nr 8-9, p. 141-146.
- Brekke, T.L., 1965, On the measurement of the relative potential swellability of hydrothermal montmorillonite clay from joints and faults in precambrian and paleozoic rocks in Norway. International Journal Rock Mechanics and Mining Science. Vol. 2. p. 155-165.

Brekke, T.L., and Selmer-Olsen, R., 1965, Stability problems in underground constructions caused by montmorillonite-carrying joints and faults. *Engineering Geology* 1 (1), p. 3-19.

Brekke, T.L., and Selmer-Olsen, R., 1966. A survey of the main factors influencing the stability of underground constructions in Norway. *Proc. 1 Congr. Intern. Soc. Rock Mechanics*, Vol. 2, p. 257-260.

Broms, B.B., 1971, Lateral Earth Pressures due to compaction of cohesionless Soils, *Proc. 4th Conf. on Soil Mechanics*, Budapest, p. 373-384.

Broms, B.B., 1974, Spänningsfördelning i och kring lerslag i berg. Ingår som bilaga i rapporten Lerzoner i berganläggningar, förstärkningsåtgärder. BFR:s forskningsprojekt 73 03 49 - 2. Institutet för byggdokumentation. Stockholm.

Brusewitz, A.M., Snäll, S., Ahlberg, P., och Lundgren, T., 1974, Lerzoner i berganläggningar. Identifiering av leromvandlat berg. Kemisk-mineralogisk undersökning. SGI. Interna rapporter No 5.

Brännfors, S., 1964, Bergsprängningsteknik, Svenska Bokförlaget, Stockholm, p. 5-6.

Cecil, O., 1968, Evaluation of visual rock classification system for tunnel construction in Sweden. Bergmekaniskt diskussionsmöte 1968, IVA-rapport 4, p. 159-175.

Chen, F.H., 1975, Foundation on expansive soils. *Developments in geotechnical engineering*, 12. Elsevier scientific publishing company.

Dahlin, O., 1973, Bergkartering före driftsförstärkning med sprutbetong. BeFo Bergmekanikdag 1973, p. 171-188.

Dixon, S.J., and Jones, W.V., 1968, Soft Rock exploration with pressure equipment. *Civil Engineering - ASCE* October 1968, p. 34-36.

von Eckermann, H., 1954, Montmorillonitbildning i Bergeforsens gnejsgranit. Svenska föreningen för lerbeforsknig. *Meddelanden nr 2*. p. 456-459.

Emmelin, L.O., 1972, Sammanfattning av aktuella problemställningar. SGI. Särtryck och Preliminära Rapporter. No. 49, p. 71-75.

Eurenus, J., 1972, Förslag till bergförstärkning vid förekomst av svällande lera. Bergmekaniskt diskussionsmöte 1972, IVA-rapport 45, p. 189-197.

Eurenius, J., 1972, Klassificering av svällande leror i bergsprickor. SGI. Särtryck och Preliminära Rapporter. No. 49, p. 77-84.

Granström, S., 1965, Snabbt sönderfallande svenskt gråberg. Väg- och vattenbyggaren 2, 1965, p. 37-38.

Granström, S., 1972, Svällande lerzoner i oljelagringsanläggningar. SGI. Särtryck och Preliminära Rapporter. No. 49, p. 67-69.

Hansbo, S., 1957, A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test. Royal Swedish Geotechnical Institute Proceedings No. 14.

Heltzen, A.M., Moxon, S., and Schach, R., 1970. Support Considerations for a Railway Tunnel in Norway. Large Permanent Underground Openings. Proc. Intern. Symp. Oslo 1969, p. 233-236.

Holtz, W.G., och Gibbs, J.J., 1956, Engineering Properties of Expansive Clays. ASCE Trans. Paper No. 2814, Vol 121.

Jansson, B., 1971, The Urban Development and the Demand on the Underground during the year 2000. (Presented at the 1971 Annual Meeting of the Geological Society of America in Washington D.C.).

Jansson, B., 1974, Gå under jord - internationellt perspektiv. Arkitektur nr 1, p. 4-5.

Jansson B., 1974, Underground forecast. Human ways out of an urbanization dilemma. Tunnels and tunneling. January 1974, p. 30-33.

Jansson, B., och Winqvist, T., 1978, Undermarksplanering, Statens råd för byggnadsforskning. T8:1978.

Ljunggren, P., 1956, Lerfyllda sprickor i den fasta berggrunden. Teknisk Tidskrift 86:39. p. 899-900.

Lundgren, T., 1972, Spillvattentunnlar på Hisingen, Göteborg, SGI. Särtryck och Preliminära Rapporter. No. 49, p. 63-66.

Lundgren, T., 1973, Lerzoner i berganläggningar. Förteckning över aktuell litteratur. Delrapport 1. SGI. Interna Rapporter No. 2.

Lundgren, T., 1973, Lerzoner i berganläggningar. Sammandrag och referat av aktuell litteratur. Delrapport 2. SGI. Interna Rapporter No. 3.

Lundgren, T., 1974, Lerzoner i berganläggningar. Identifiering av leromvandlat berg. Förteckning över påträffade typer av leromvandlat berg. SGI. Interna Rapporter No. 6.

Lundgren, T., och Scherman, S., 1973, Lerzoner i berganläggningar. Lerförekomst i Göteborgsområdets berggrund - ovan- och underjordsstudier. Delrapport 3. SGI. Interna Rapporter No. 4.

Lundgren, T., och Scherman, S., 1974, Lerzoner i berganläggningar. Studerade fall av leromvandling i några svenska berganläggningar. Delrapport 4. SGI. Interna Rapporter No. 7

Martna, J., 1972, Leriga zoner i Sveriges berggrund, SGI. Särtryck och Preliminära Rapporter. No. 49, p. 13-38.

Morfeldt, C.O., 1962, Berggrundens diskontinuiteter. Särskilt med hänsyn till moderna byggnadsverk. Byggmästaren Nr 6, 1962, p. 121-130.

Morfeldt, C.O., 1965, Undersökningar, förstärkningar och tätningar föranledda av svällande vittringszoner i en svenska oljelagringsanläggning. IVA:s Bergmekanikdag 1965, IVA-Meddelande 142, p. 91-99.

Morfeldt, C.O., 1972, Praktiska erfarenheter av lerzoner i svensk berggrund. SGI. Särtryck och Preliminära Rapporter No. 49, p. 39-49.

Reinius, E., 1973, Bergspänningar på grund av svällande lera i bergsprickor. BeFo Bergmekanikdag 1973, p. 60-75.

Reinius, E., Fagerström, H., Kihlblom, U., och Hill, L., 1974, Lerzoner i berganläggningar. Förstärkningsåtgärder. (AB Vattenbyggnadsbyrån) Stockholm. Forskningsrapport, BFR-projekt 73 03 49 - 2.

Rosenström, S., 1969, "Praktikfall", Föredrag vid Svenska Teknologföreningens och Tekniska Läroverkens Ingenjörssförbunds kurs i "Bergmekanik i samband med gruv- och anläggningsarbeten" den 11-12 september 1969.

Rokoengen, K., 1973, Svelleirens egenskaper. Nordisk kurs om stabilitet og sikring av fjellrom. Kursdagene ved NTH, jan. 1973.

Rokoengen, K., 1973, Svelleegenskaper hos leirsoner i fjell. Avhandling för Tekniske Licenciatgrad. Norges Tekniske Høgskola.

Rokoengen, K., 1973, Måling av svelletrykk og fri svelling hos jordarter. Rapport nr 10. Norges Tekniske Høgskola.

Rokoengen, K., 1973, Klassifisering av leirsoner i fjell. Rapport nr 11. Norges Tekniska Högskola.

Roosaar, H., 1965, Leriga vittringszoner i svensk berggrund. IVA:s Bergmekanikdagar 1965, IVA-Meddelande 142, p. 84-90.

Roosaar, H., 1972, En zon av vittrat urberg i fjärrvärmetunnel under Linnégatan, Stockholm, SGI. Särtryck och Preliminära Rapporter, No. 49.

Seed, H.B., Woodward, R.J., och Lundgren, R., 1962, Prediction of swelling potential for compacted clays. J. Soil Mech. and Found. Div. Proc. ASCE Vol. 88. No. SM3. p. 53-87.

Selmer-Olsen, R., 1971, Problem with Swelling Clays in Norwegian Underground Constructions in Hard-Rocks. SGI. Särtryck och Preliminära Rapporter, No. 40.

Selmer-Olsen, R., 1973

- o Åpning,
- o Stabilitetsvurderingar,
- o Sikring av knusningsoner.

Nordisk kurs om stabilitet og sikring av fjellrom. Kursdagene ved NTH, jan. 1973.

Selmer-Olsen, R., and Rokoengen, K., 1974, About swelling tests and stability of clay zones in hard rock. International Society for Rock Mechanics. Third International Congress in Denver.

Sundquist, K.J., 1972, Raset i tilloppstunneln för Stensjöfallets kraftverk. IVA-rapport 45, p. 215-221.

Sällström, S., 1967, Berggrundsproblem vid Bergeforsens kraftverk. Väg- och vattenbyggaren 3, 1967.

Timoshenko, S., and Goodier, J.N., 1951, Theory of Elasticity, McGraw Hill Book Company, New York.

Wahlström, E.E., 1973, Tunneling in Rock, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, London, New York, p. 44-50 and p. 120-131.

Ziemelis, O., 1972, Svällande lera i berg. Bergmekaniskt diskussionsmöte 1972, IVA-rapport 45, p. 179-188.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 780073-4 från
Statens råd för byggnadsforskning till
Vattenbyggnadsbyrån AB, Stockholm.**

R130: 1979

**ISBN 91-540-3132-X
Statens råd för byggnadsforskning**

Art.nr: 6700030

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

TEKNISKA HOGSKOLEN
SEKTORER FÖR VÄG- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET
Cirkapris: 20 kr exkl moms.