

KBS TEKNISK RAPPORT

71

Bergspricktätning med bentonit

Roland Pusch

Högskolan i Luleå 1978-11-16

BERGSPRICKTÄTNING MED BENTONIT

Roland Pusch

Högskolan i Luleå 1978-11-16

Denna rapport utgör redovisning av ett arbete som utförts på uppdrag av KBS. Slutsatser och värderingar i rapporten är författarens och behöver inte nödvändigtvis sammanfalla med uppdragsgivarens.

I slutet av rapporten har bifogats en förteckning över av KBS hittills publicerade tekniska rapporter i denna serie.

TEKNISK RAPPORT **KBS10**

FÖRSÖK MED

BERGSPRICKTÄTNING MED BENTONIT

1977-11-16
Högskolan i Luleå
Avd för Geoteknik
Roland Pusch



HÖGSKOLAN I LULEÅ
MASKINTEKNIK • GEOTEKNOLOGI • ARBETSVETENSKAP

ROCK SEALING WITH BENTONITE

Roland Pusch

If the rock which surrounds the deposition holes with radioactive canisters can be effectively sealed, they will be situated in a practically impervious medium with very favourable diffusion properties.

This report presents a new technique for sealing narrow rock joints by applying electro-phoresis. The idea is that 4-8 holes for electrodes are bored around the central deposition hole. A bentonite slurry with a water content of 500-2000% is applied in the central hole and is injected into the joints by applying an under-pressure in the surrounding holes (an over-pressure in the central hole can be applied as well). Then, anodes are inserted in the outer holes and a cathode in the central hole and a direct current of 200-2000 V (0.5-5 V/cm) is applied for one or two weeks. The deposition hole is cleaned after which the application of highly compacted bentonite bodies and canister can begin.

The report describes a series of preliminary tests with parallel glass plates simulating rock joints with a width of 0.01-0.2 mm. It was found that the "electro-kinetic" treatment had a considerable sealing effect. Thus the percolation rate value was reduced to 1/1000 or less of the value of the open passage.

The report also describes the preliminary results of an investigation where fairly dry, highly compacted bentonite confined in a cylindrical space was exposed to water through narrow slots. The slots (0.025-0.5 mm wide) simulated joints opened by stress changes in the rock where the deposition holes with highly compacted bentonite and canisters are situated.

The idea was to find out if the water uptake in the bentonite would cause a rapid swelling and extrusion through the slots. After 10 days the device was opened and it was found that bentonite had been extruded only through the 0.5, 0.3 and 0.15 mm wide slots. In the first-mentioned slot the extrusion depth was about 8 mm. The rate of extrusion was found to decrease rapidly.

BERGSPRICKTÄTNING MED BENTONIT

av

Roland Pusch

INNEHÅLLSFÖRTECKNING:

	sid
PROBLEMSTÄLLNING	1
STRÖMNINGS- OCH DIFFUSIONSVÄGAR I BERG	2
ELEKTROKINETISK INJEKTION AV SMEKTIT I BERGSPRICKOR	6
Försökens utförande	7
HÖGKOMPRIMERAD BENTONITS SPRICKTÄTANDE FUNKTION	13
Försökens utförande	13

BERGSPRICKTÄTNING MED BENTONIT

PROBLEMSTÄLLNING

En av de viktigaste men föga utredda frågorna i samband med deponering av högaktivt avfall på stort djup i svenskt urberg är bergets täthet, både med avseende på vattengenomsläpplighet (permeabilitet) och jondiffusion. Ända till för någon vecka sedan antydde pågående KBS-undersökningar (HAGCONSULT och ACRES CONSULTING SERV LTD) att man för urberget på ca 500 m djup inte kan räkna med lägre värde på permeabilitetskoefficienten k än 10^{-8} à 10^{-9} m/s. Senare har man dock visat att medelvärdet på denna koefficient kan vara betydligt lägre för berg vid sådana djup. Ett realistiskt k -värde, uppskattat på basis av bl a Stripa-mätningarna, skulle enligt dessa bedömningar kunna vara $5 \cdot 10^{-11}$ m/s och det finns också andra undersökningar¹⁾ som antyder att så tätt berg förekommer. Det sistnämnda permeabilitetsvärdet innebär att tätheten är så betydande att berget fungerar som en effektiv barriär. Det är inte fallet om det förstnämnda värdet är representativt. I det pågående utredningsarbetet finns det knappast tid att uttömmande behandla frågan om berggrundens täthet. Det innebär att det kommer att kvarstå en osäkerhet om bergets funktion som barriär vilket kan utgöra grund för en mindre positiv syn på hela deponeringstekniken. En möjlighet att göra frågan om bergmassans täthet oväsentlig vore att på artificiell väg åstadkomma en sådan täthetsökning hos berget närmast deponeringsutrymmena att det fungerar som ett i praktiken helt tätt medium. Författaren bedömer att en reduktion av medelpermeabiliteten

¹⁾ A CARLSSON & T OLSSON: Hydraulic properties of Swedish crystalline rocks. Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala, vol. 7 1977.

till 10^{-12} ä 10^{-13} m/s är tillräcklig för en sådan funktion. Det är tänkbara metoder för sådan tätning som diskuteras i denna rapport. Tillämpningen är tänkt att ske endast vid borrhålsdeponering.

När det gäller jondiffusion gäller andra bedömningar till vilka vi återkommer.

STRÖMNING- OCH DIFFUSIONSVÄGAR I BERG

När vi talar om permeabilitet hos berg skall vi ha klart för oss att atomgittren hos de enskilda kristallerna i bergmassan är helt täta. Det är i kontinuerliga sprickor, fissurer (Fig 1) och por-system som strömning sker.

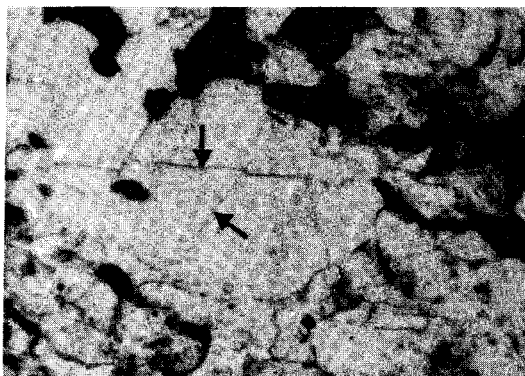


Fig 1. Finsprickor (fissurer) i kristaller.
Bergart: granit, förstoring ca 50 x.

Porsystemet utgörs i huvudsak av ofullständiga kornkontakter (Fig 2). Sprickor och fissurer är i praktiken avgörande för permeabiliteten speciellt på större djup där det höga trycket förbättrar kornkontakten. Att ökat tryck verkligen avsevärt förbättrar kornens kontakt och därmed bergmaterialets täthet illustreras av Fig 3.

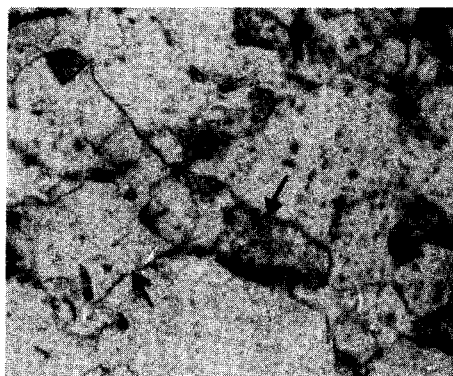


Fig 2. Ofullständiga kornkontakter i granit. Förstoring ca 50 x.

Tryckets inverkan på sprickvidden bestäms dels av bergmaterialets elasticitet och dels av dess hållfasthetsegenskaper. Denna inverkan har inte gjorts till föremål för något systematiskt studium men det är rimligt att tro att enstaka uthålliga sprickor på det aktuella djupet svarar för nästan hela vattengenomsläppligheten. Detta antagande grundas främst på det faktum att vid samma vidd på "strömkanalen" (lika vidd för samma tryck!) ger det starkt oregelbundna systemet av öppningar mellan kristallkornen betydligt större strömningsmotstånd än den plana sprickan. Samma resonemang bör gälla också diffusionsvägarna i berget.

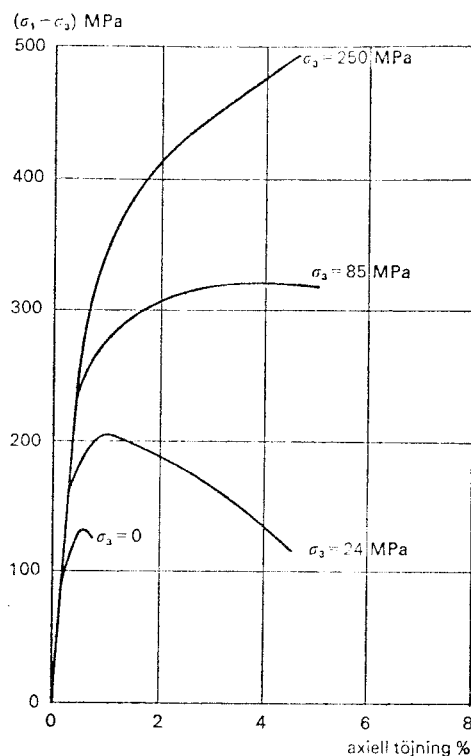


Fig 3. Treaxliga kompressionsförsök med Carraramarmor. Man ser att en ökning av minsta huvudspänningen kraftigt ökar maximala deviatorspänningen och därmed skjuvhållfastheten. Den beror på en tryckinducerad förbättring av kornkontakten.

För det fortsatta resonemanget är det viktigt att beakta vilken betydelse som sprickor verkligen har för bergets permeabilitet. Låt oss som exempel anta att vi i en viss volym av mycket tätt berg har en serie av 0.1 mm vida sprickor på 1 m inbördes avstånd orienterade i strömningsriktningen (hydrauliska gradientens riktning). Med gängse uttryck för vattenflödet (jfr PUSCH: Bergmekanik, Almqvist & Wiksell, 1974, sid 92-93) svarar detta mot ett medelvärde på permeabilitetskoefficienten av $8 \cdot 10^{-7}$ m/s. Vid en hydraulisk gradient av 10^{-2} blir vattenflödet per m² genomströmmad yta $8 \cdot 10^{-9}$ m³/s, dvs ca 10^{-2} ml/s eller ca 30 ml/timme. Hela denna mängd transporteras i sprickorna. Om man nu tätar dessa så att den effektiva vidden minskar till en tiondel, dvs till 0.01 mm,

så svarar detta mot ett medelvärde på permeabilitetskoefficienten av $8 \cdot 10^{-10}$ m/s. Med den ovan nämnda gradienten blir vattenflödet per m^2 genomströmmad yta i detta fall ca 10^{-5} ml/s eller ca 0.03 ml/timme. En minskning av effektiva sprickvidden till en hundradel dvs till 10^{-3} mm, svarar mot ett medelvärde på permeabilitetskoefficienten av $8 \cdot 10^{-13}$ m/s.

Vi ser alltså att en praktiskt taget strömningstät bergkropp kan skapas runt deponeringshålen om sprickorna kan tätas effektivt. Som framgår av exemplen ovan måste tätning ju kunna ske av sprickor som har en vidd understigande 0.1 mm. Önskar man en reduktion av effektiva sprickvidden till 10^{-2} à 10^{-3} mm är den idag enda kända tekniken kemisk injektering men inträngningsdjupet är svårt att förutsäga och kontrollera. Däremot visar en av försöksserierna som redovisas i denna rapport att önskad effekt kanske kan uppnås med smektit¹⁾ som i suspensionsform förs in i bergspricksystemen med hjälp av elektriska likströmsfält. Den fysikaliska principen är elektrofores men tekniken benämns här "Elektrokinetisk injektion av smektit för tätning av bergsprickor". Från jondiffusionssynpunkt innebär spricktätningen främst att man intill önskat avstånd från deponeringshålets väggar - 2 à 3 m bör vara ett rimligt mått - får en sprickfyllnad med mycket goda jonbytesegenskaper (ca 100 m ekv/100 g torrt material). En gynnsam egenskap hos smektitfyllningen är att den är plastisk och därmed garanterar utfyllning också vid mindre ändringar av sprickvidder och vid mindre bergrörelser p g a termisk inverkan och mikroseismisk påverkan.

1) Smektit är synonymt med montmorillonit, det "aktiva" lermineralet i bentonit.

ELEKTROKINETISK INJEKTION AV SMEKTIT I BERGSPRICKOR

Författarens idé innebär att man genom anbringande av ett elektriskt likströmsfält i berget skall kunna transportera en sådan mängd smektitpartiklar in i bergsprickorna som utgår från deponeringshålet att de bildar en gel med tätande och jonadsorberande verkan. Praktiskt skulle detta kunna ske genom att fylla deponeringshålet med en bentonitsuspension (vattenkvot ca 500-1000%) och placera en central katod i hålet och anoder i ett antal borrhål runt deponeringshålet.

Idén bygger på erfarenheten (jfr t ex PUSCH: Markförstärkning genom elektroosmos och elektrokemisk behandling. Byggforskningen Rapport 69, 1961) att man vid elektroosmotisk avvattning av finkornig jord får en anrikning av mycket fina lermineralpartiklar vid anoderna (Fig 4) medan vatten transporteras mot katoderna. Anledningen till partikelvandringen är att lermineralen har en negativ nettoladdning främst beroende på vakanser och substitution av Si^{4+} mot Al^{3+} i kisel/syretetraedrarna. Smektitpartiklar har särskilt hög nettoladdning och kan även ha utomordentligt små dimensioner. Effektiv mekanisk dispergering av en bentonitsuspension ger t ex upphov till mycket stora mängder flata partiklar med tjockleken ca 10-50 Å och medeldiametern 50-500 Å. Tanken var därför att man med den föreslagna tekniken skulle kunna föra in smektitpartiklar i sprickor med mycket små vidder, 10^{-2} mm eller mindre. Försöken visade också att detta är möjligt. Erfarenheten säger att smektitrika suspensioner är utpräglat tixotropa. Detta skulle kunna vara en önskvärd egenskap vid spricktätningen på så sätt att partiklarna under intransporten kan förväntas utgöra en sol medan brytningen av strömmen vid behandlingens slut leder till gelbildning.

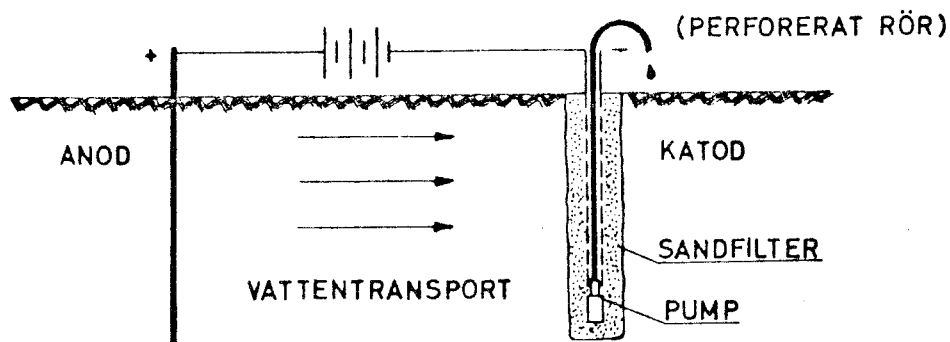


Fig 4. Principen för elektroosmotisk avvattning av jord. Vatten transporteras mot katoden medan mycket små lerpartiklar med negativ ytladdning transporteras mot anoden.

Genom att det elektriska fältet bör vara jämförelsevis homogent och de olika spricksystemen i berget erfarenhetsmässigt har en betydande grad av kontinuitet bör partikeltransporten kunna ske effektivt även om inte anoderna placerats speciellt strategiskt, dvs i eventuella kontinuerliga sprickplan utgående från deponeringshålet.

Försökens utförande

Syftet med försöken var att utröna om smektitpartiklar kan transporteras i fina sprickor i sådan mängd att de kan bilda tätande geler i sprickorna. Bergsprickorna simulerades med hjälp av planparallella 6 mm tjocka glasplattor med inbördes avstånden 0.2 mm, 0.1 mm och ca 0.01 mm. De två förstnämnda avstånden åstadkoms genom att använda täckglas för mikroskopiska preparat som mellanlägg. Avståndet 0.01 mm är det uppskattade avståndet mellan två glasskivor som limmats ihop utan mellanlägg i ett antal punk-

ter. Varje par glasplattor, vilka hade planmått 100 x 500 mm, limmades utmed långsidorna och anslöts tätt till två behållare av plexiglasrör. Genom att ansluta röret på ena sidan till en högre belägen behållare kunde därför en hydraulisk gradient åstadkommas för undersökning av permeabiliteten hos respektive "spricka" som alltså utgjordes av en 500 mm lång spalt med tvärsektionen 0.2 x 100 mm, 0.1 x 100 mm respektive 0.01 x 100 mm.

I den första försöksserien fylldes plexiglasrören på ena sidan med en bentonitsuspension med vattenkvoten 1000%. Rören på andra sidan fylldes med destillerat vatten i vilket NaCl lösts till salthalten 2%. Också bentonitsuspensionerna iordningställdes med användande av denna saltlösning. I vardera röret anbringades en kopparelektrod. En likspänning på ca 48 V lades över elektroderna och fick verka i ett dygn. Strömstyrkan blev ca 0.3 mA utom i den finaste "sprickan" där uppmätt värde endast var 0.025 mA. Fig 5 visar anordningen.

Mängden transporterade smektitpartiklar bedömdes vara för obetydlig för att kunna ge en effektiv fyllning av "sprickorna" och likspänningen ökades därför till ca 240 V. Efter några minuter observerades att en nästan ogenomskinlig smektitsuspension vandrade in i sprickorna. Vandringsfronten var mycket tydlig i 0.1 och 0.2 mm-"sprickorna" och den markerades med svart färg för några olika tidpunkter (jfr Fig 6). Efter 2 dygn hade 0.2 mm-"sprickan" helt fyllts av smektitsuspensionen medan 0.1 mm-"sprickan" visserligen innehöll stråk av smektitsuspensionen utmed hela "spricklängden" men vissa centrala delar var ofyllda. Sannolikt har glas-skivorna av något skäl här legat närmare varandra än 0.1 mm. Det kan också vara så att gelning och därmed tätning uppkom då fronten befann sig i ett visst läge. Ytterligare smektit har därför inte kunnat vandra vidare.

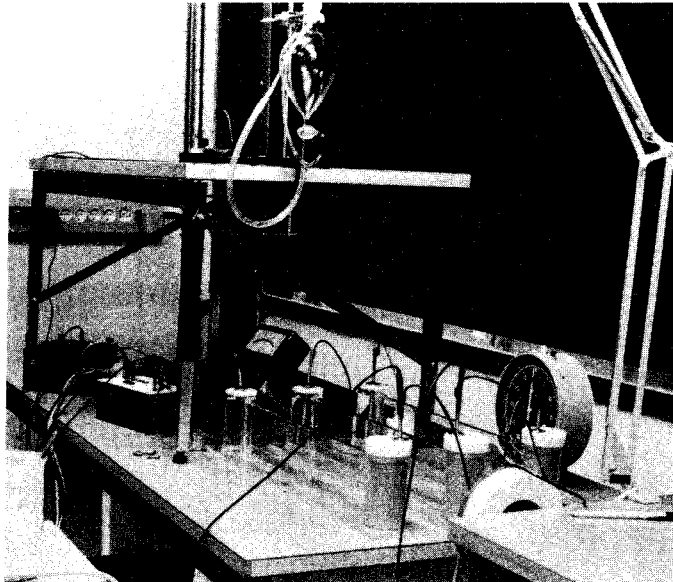


Fig 5. Försöksutrustningen med glasplattor förbundna med yttre plexiglasrör. De hitre är fyllda med bentonitsuspension. Överst den yttre behållaren för åstadkommande av högre gradienter.

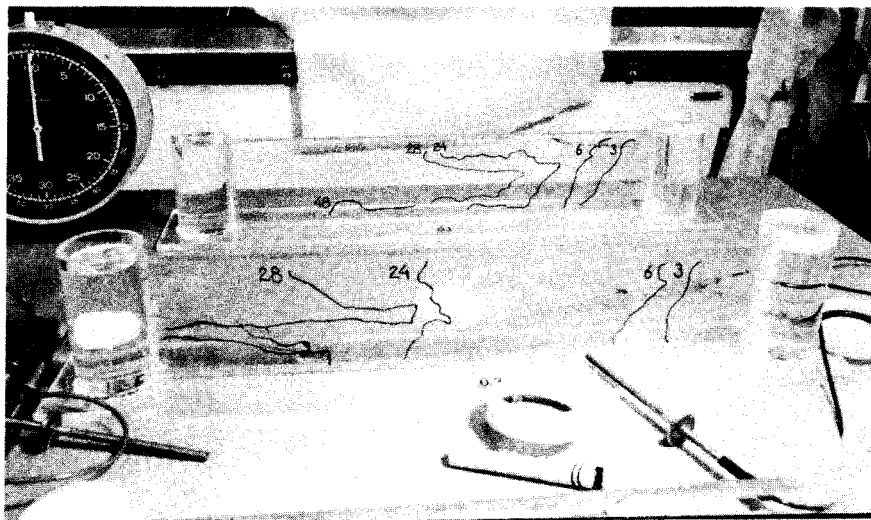


Fig 6. Frontlägena hos smektitsuspensionen vid olika tidpunkter efter start (sifferbeteckningar).

Avsikten var nu att anbringa en hydraulisk gradient för att utröna om vattengenomsläppligheten reducerats. Före behandlingen bestämdes den vid gradienten 1 (50 cm tryckhöjdskillnad över 50 cm strömningslängd) till 0.1 ml/s vid 0.1 mm "sprickvidd" och 0.13 ml/s vid 0.2 mm "sprickvidd". Den tredje, smalaste "sprickan" släppte inte igenom någon mätbar vattenvolym på 1 dygn. Efter behandlingen anbringades samma höga gradient och det visade sig då att smektitgelen till största delen pressades ut. Vissa mindre smektitöar som kvarstod svarade för den till ungefär 10% uppgående minskningen av vattengenomsläppligheten.

Eftersom gradienten som ger upphov till horisontell strömning i deponeringshålets omgivning i verkligheten är mycket liten och teoretiskt sett bara kan bli betydande under det korta moment då deponeringshålet tömts på bentonitsuspensionen och ännu inte fyllts med buffertmassa, utfördes en andra försöksserie där gradienten valdes till 0.2. Det bör tilläggas att man genom länspumpning av anodernas borrhål i verkligheten säkerligen kan åstadkomma att gradienten inte i något skede kan bli högre än detta värde. Eftersom en reduktion av det elektriska motståndet hos smektitsuspensionen möjligen kunde medföra en ökad transportkapacitet valdes också en högre salthalt, 10% i den andra serien. En annan åtgärd vidtogs också i den andra försöksserien i syfte att pröva en kombination med en annan teknik: införande av en bentonitsuspension genom strömning under inverkan av en hydraulisk gradient. För detta ändamål fylldes den yttre behållaren med en bentonitsuspension med vattenkvoten 2000% som under inverkan av gradienten 1 fick strömma in i "sprickorna". Inströmningen gick mycket lätt och hundraprocentig fyllning åstadkoms. Ett efterföljande försök med bestämning av vattengenomsläppligheten med gradienten 0.2 visade dock att bentoniten lätt strömmade ut.

Bentonitsuspensionens koncentration på katodsidan ökades härfter så att vattenkvoten var 500% då spänningen, 240 V, lades på. Den fick verka i 3 dygn varefter vattengenomsläppligheten bestämdes med gradienten 0.2 och det visade sig då att 0.2 mm-"sprickan" på ca 5 dygn endast släppt igenom några få droppar. Vattenföringen, som visade sig vara avtagande, var vid försökets avbrytande ca $4 \cdot 10^{-5}$ ml/s för 0.1 mm-"sprickan", dvs mindre än 1/1000 av vattenföringen i den ofyllda "sprickan". Tekniken som användes i den andra försöksserien visade sig alltså kunna åstadkomma en effektiv tätning av spalter mellan silikatplattor med mycket stor ytjämnhet. Det finns därför skäl att anta att tätningseffekten kan bli ännu större i bergsprickor med mera ytaktiva (vittrade) mineralytor till vilka smektitpartiklarna kan bindas bättre. Naturligtvis fordras omfattande tester på bergvolymmer med olika struktur för att bevisa teknikens praktiska användbarhet särskilt med hänsyn till val av elektrodlägen och elektrisk spänning. För dagen ser det lämpligaste programmet för behandling ut på följande sätt:

1. Runt deponeringshålet borrar ringformigt placerade 4-8 borrhål för anoder. Avståndet från deponeringshålets väggar kan vara 2-3 m.
2. Deponeringshålet fylls med en bentonitsuspension med vattenkvoten 2000%.
3. Anodborrhålen ansluts tätt till en sugpump enligt samma princip som vid wellpoint-dränering ("vacuummetoden"). Härigenom åstadkoms en betydande hydraulisk gradient som för ut bentonitsuspensionen i sprickor med större vidd än någon hundradels millimeter. Behandlingen bör pågå några dygn.
4. Anodborrhålen fylls med vatten (saltlösning $\leq 10\%$).

5. Elektroder (t ex Cu) anbringas i anodborrhålen och centralt i deponeringshålet.¹⁾
6. Likspänning (potentialgradient 0.5-5 v/cm) anbringas under 1 å 2 veckor.
7. Strömmen bryts, anodhålen torrläggs och undertryck anbringas under något dygn.
8. Deponeringshålet töms och anbringandet av buffertmassa och kanistrar börjar. Tekniken är sannolikt mest lämplig för långa borrhål med ett flertal kanistrar.

¹⁾ Bentonitsuspensionen görs i detta skede mera koncentrerad. Vattenkvoten kan lämpligen vara 500%.

HÖGKOMPRIMERAD BENTONITS SPRICKTÄTANDE FUNKTION

Under hösten 1977 har Kåre Hannerz, ASEA-Atom, föreslagit användning av högkomprimerad bentonit ($\rho = 2-2.2 \text{ t/m}^3$) som buffertmassa vid borrhålsdeponering. Skälet är att en sådan massa är praktiskt taget helt tät när det gäller vattenströmning och att den sannolikt också är relativt diffusionstät. Under alla omständigheter har den en mycket god jonbytande funktion (C.E.C. 80-100 mekv/100 g).

Tekniken för användning av sådant material är i korthet att formpressade bentonitblock passas in i deponeringshålet med kanistern så att ett minimum av fritt utrymme återstår mellan bergväggen och blocken respektive mellan kanisterväggen och blocken. Mellanrummen fylls med bentonitpulver (granulerat) under vibrering. Noggrann plombering och låsning av plomberingarna erfordras eftersom vatten från omgivande berg så småningom kommer att byggas in i bentoniten och härvid orsaka mycket kraftiga svällningstryck.

Hannerz' hypotes att den högkomprimerade bentoniten borde ha gynnsamma spricktätande effekter har prövats i ett försök som redovisas i följande text. Hypotesen innebär att om öppna sprickor mynnar i deponeringshålets väggar så borde i sprickorna tillströmmande vatten tas upp av massan med svällning och därmed inträngning i sprickorna som följd. Härigenom sker självtätning. Det är inte i första hand vid deponeringstillfället existerande sprickor som avses bli tätade utan sprickor som kan uppkomma senare som följd av termisk eller tektonisk påverkan.

Försökens utförande

Undersökningen gjordes med hjälp av en av ASEA-Atom framställd anordning bestående av en packe ringformiga skivor sammanhållna av genomgående bultar.

Skivpacken kan spännas in mellan yttre basplattor med rostfria filterstenar. Basplattorna hålls samman av fyra grova bultar (jfr Fig 7). De ringformiga skivorna är försedda med olika vida slitsar som simulerar sprickor vilka står i förbindelse med det inre cylindriska hålrummet som har höjden 50 mm och diametern 45 mm. Skivorna har också likadana slitsar som utgår från hålrummet men som inte når fram till skivornas yttre periferi, "återvändsgränder". Slitstjocklekarna ("sprickvidderna") är:

0.5 mm
0.3 "
0.15 "
0.10 "
0.05 "
0.025 "

Försöket tillgick så att bentonitpulver (granulerat, jfr kornfördelningskurvan i Fig 8) fylldes i skikt i det cylindriska hålrummet och skiktvis förbelastades under ett tryck av 5 MPa (Fig 9). Bentonitprovet komprimerades sedan under ett tryck av 50 MPa i en större press varefter anordningen snabbt hopmonterades. I detta skick motsvarade alltså anordningen tillståndet i deponeringshålet sedan de formpressade bentonitbitarna anbringats, fogarna fyllts och hålet plomberats oeftergivligt. Vattenupptagning i massan kan härefter ske genom tillströmning av vatten från sprickor som mynnar i deponeringshålet. För att efterlikna detta skedande tätades röranslutningarna till filterstenarna varefter hela anordningen sänktes ned i vatten (2% NaCl-lösning). Vatten kunde således tränga in till den högkomprimerade bentonitkroppen endast via slitsarna.

Efter 3 dygn mättes utträngningen av bentonitmassa från det centrala hålrummet in i slitsarna med

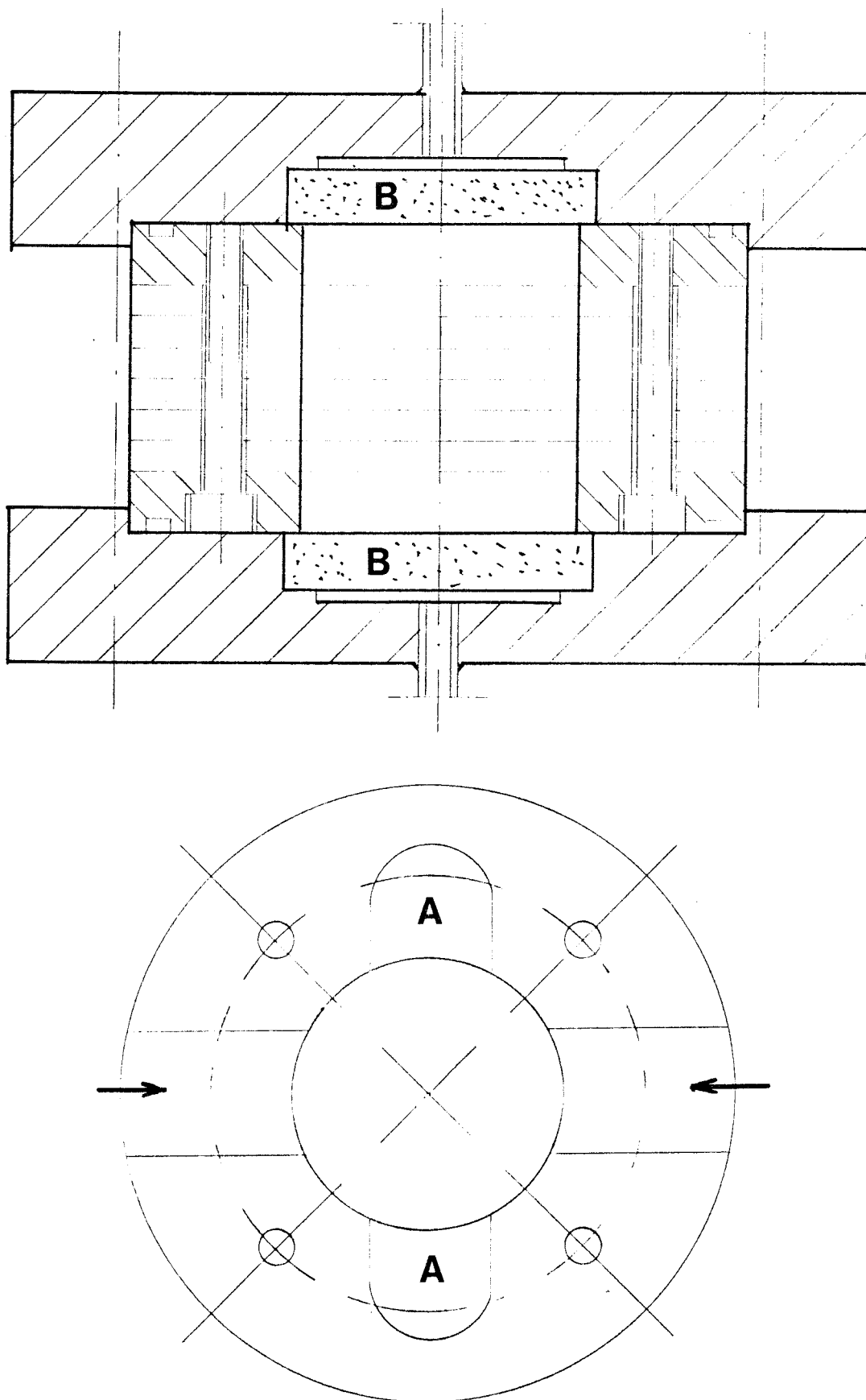


Fig 7. Vertikal (överst) och horisontell sektion av ASEA-Atoms anordning. Pilarna i undre bilden visar slitsarna ("sprickorna") för vatteninträning. A markerar de slutna slitsarna ("återvändsgränderna"). B markerar filterstenarna.

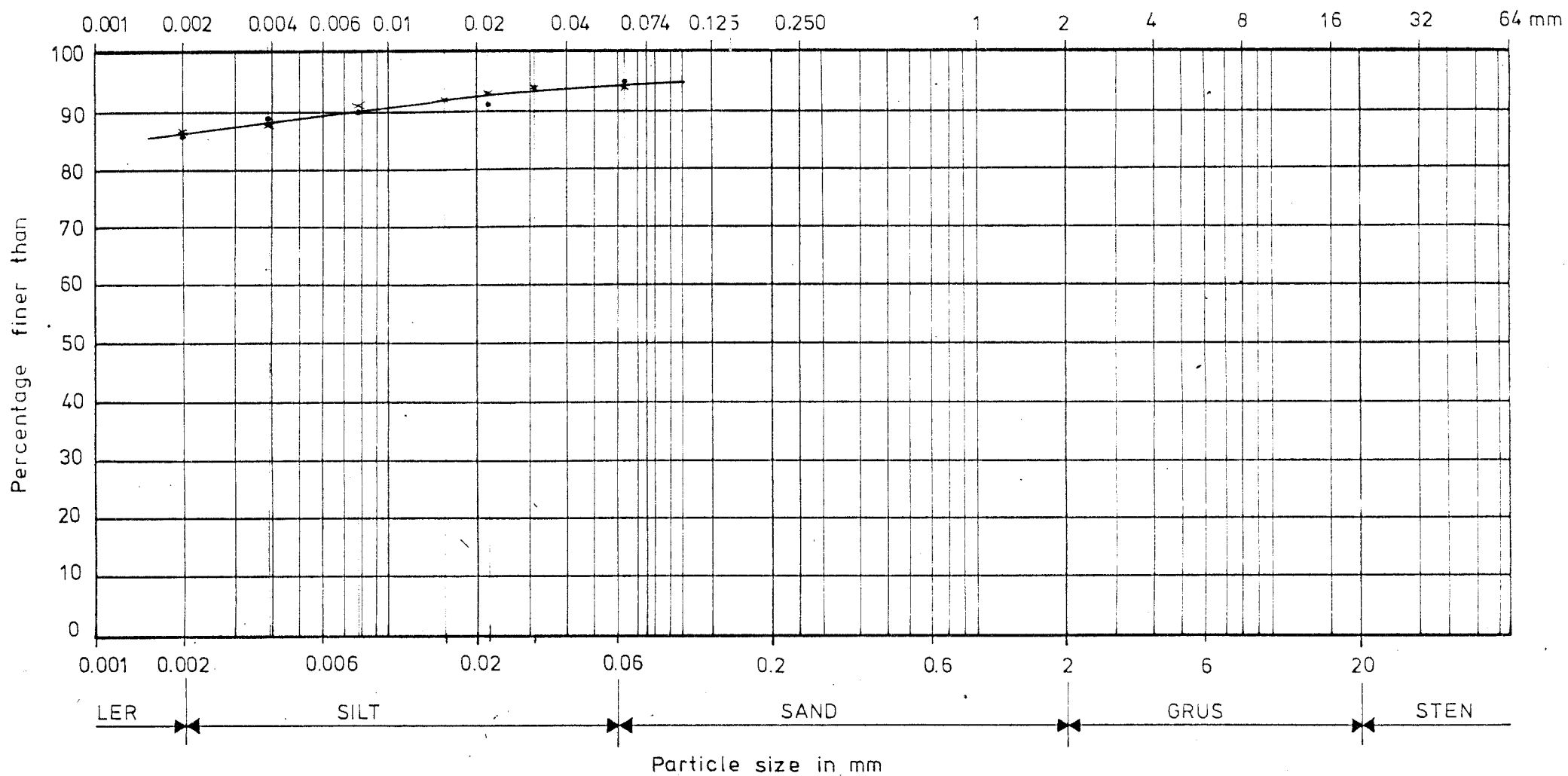


Fig 8. Kornfördelningen hos granulerad bentonit. Kurvan uppritad på basis av två analyser.

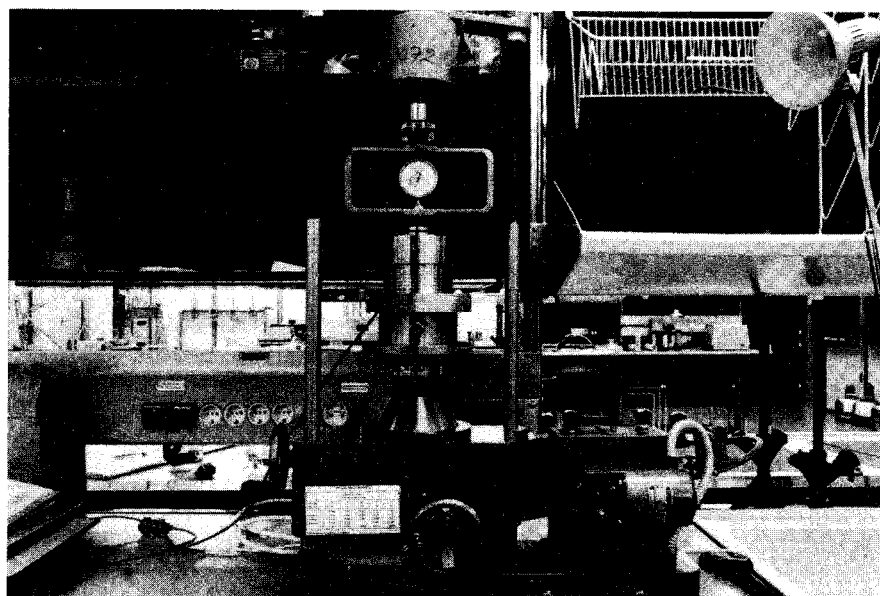


Fig 9. Inpressning av bentonit i ASEA-Atoms anordning.

hjälp av ett tunt metallbleck. Det visade sig härvid att relativt fast bentonit trängt ut ca 2.5 mm från hålrummet i 0.5 mm-"sprickan" och ca 1.5 mm i 0.3 mm-"sprickan". För att accelerera processen och få besked om i vilken utsträckning som utträngning sker vid de höga svällningstryck som uppkommer då vatten tas upp via filterstenarna vid bentonitkroppens ändytor, öppnades härefter röranlutningarna till filterstenarna. 7 dygn senare avbröts försöket, anordningen demonstrerades och utträngningen mättes direkt.

Fig 10 visar en vy av anordningen med den cylindriska "skivpacken" mellan basplattorna. Fig 11 visar att utträngningen i 0.5 mm-"sprickan" var ca 8 mm i den sprickan med vattentillträde och ca 4 mm i "återvändsgränden".

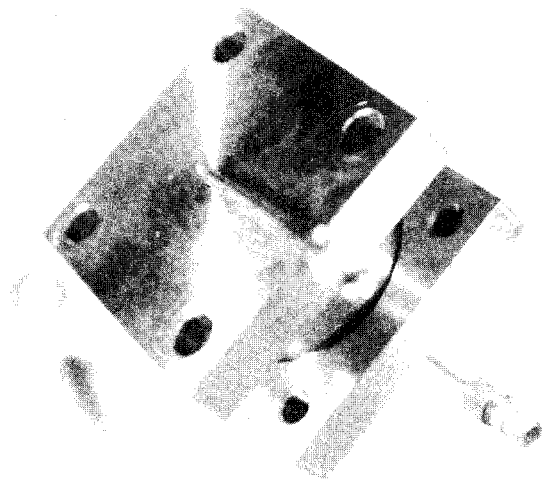


Fig 10. Vy av anordningen med bultarna för hopdragning av basplattorna borttagna.

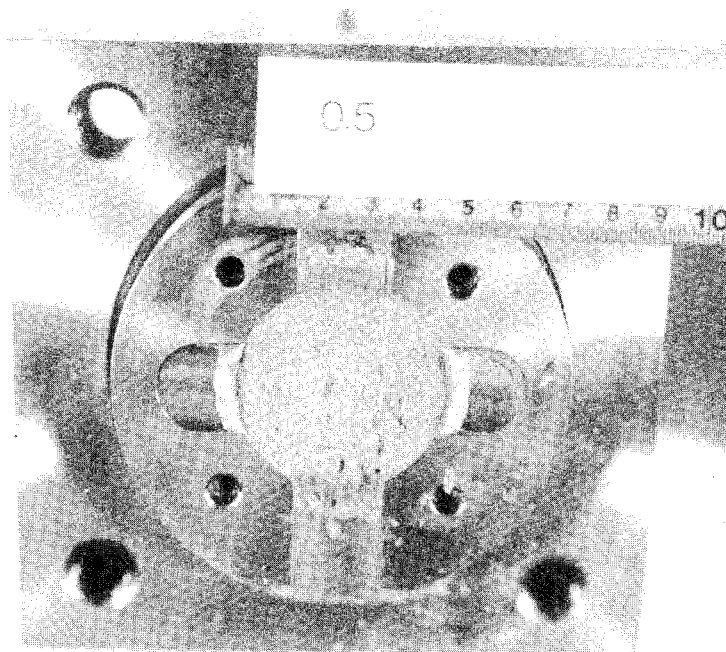


Fig 11. Utträngning av bentonit i 0.5 mm-"sprickan".
Den vertikala slitsen representerar den öppna sprickan genom vilken vatten trängt in.

Fig 12 visar att utträngningen var något mindre i 0.3 mm-"sprickan" än i 0.5 mm-"sprickan".

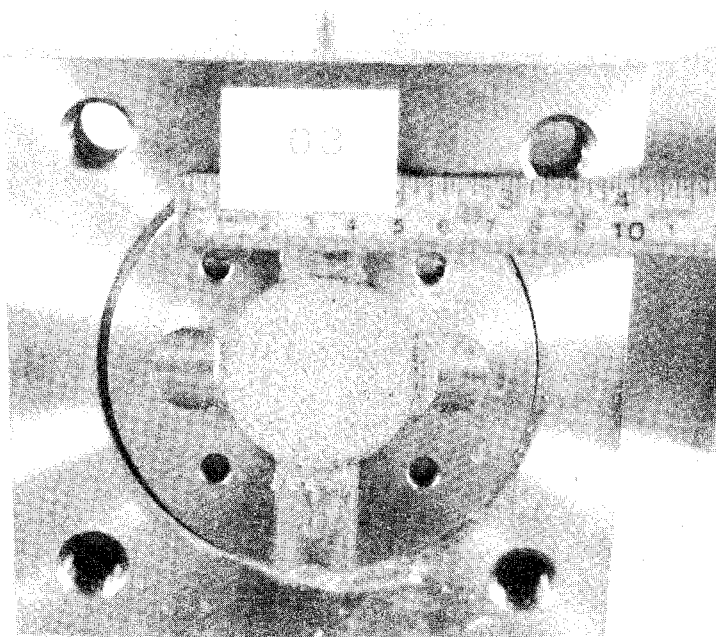


Fig 12. Utträngning av bentonit i 0.3 mm-"sprickan".

I 0.15 mm-"sprickan" var utträngningen ca 2 mm (Fig 13) men i alla finare slitsar var utträngningen praktiskt taget ingen. Detta antyder att tätningseffekten vid sprickor finare än ca 0.1 mm är obetydlig eller obefintlig på kort sikt. Det är emellertid inte omöjligt att utträngning med tiden kan ske också i sådana sprickor. Den fördröjande eller hejdande faktorn är friktionen mellan sprickväggarna och massan och inte förekomsten av en viss, obetydlig mängd av partiklar grövre än 0.1 mm (jfr Fig 8).

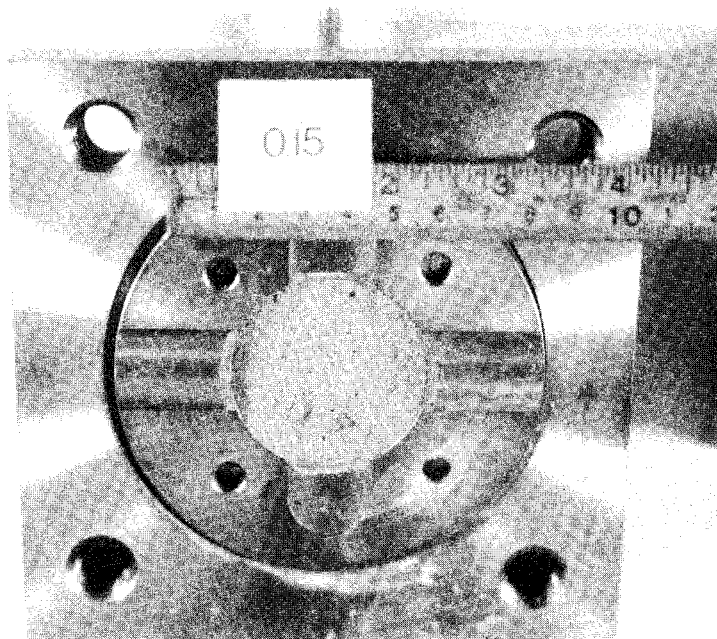


Fig 13. Utträngning av bentonit i 0.15 mm-"sprickan".

Slutsatsen av försöken är att den högkomprimerade bentoniten i princip beter sig i enlighet med Hannerz' hypotes. Det innebär alltså att sprickor som eventuellt kan nybildas eller öppnas efter deponeringen kommer att få en självtätning som är effektivare ju grövre sprickan är. Långtidsförsök erfordras för att utröna hur långt utträngningen kommer att fortskrida i bergsprickor.

I samband med demonteringen av anordningen kontrollerades vattenkvoten i massan och härvid gjordes en intressant iakttagelse. Prover togs från ändpartierna närmast filterstenarna (jfr Fig 14) och från den centrala delen, dvs ca 2.5 cm från vardera filterstenen. För båda proven var vattenkvoten ca 22% vilket beräkningsmässigt svarar mot ca 100% vattenmättningsgrad. Försöket har således visat att den högkomprimerade Na-bentoniten vattenmättas under samtidig fullständig utpressning av luftinnehållet. Processen kan ha varit snabbare men bevisligen har den skett på högst 7 dygn intill 2.5 cm från filterstenarna.

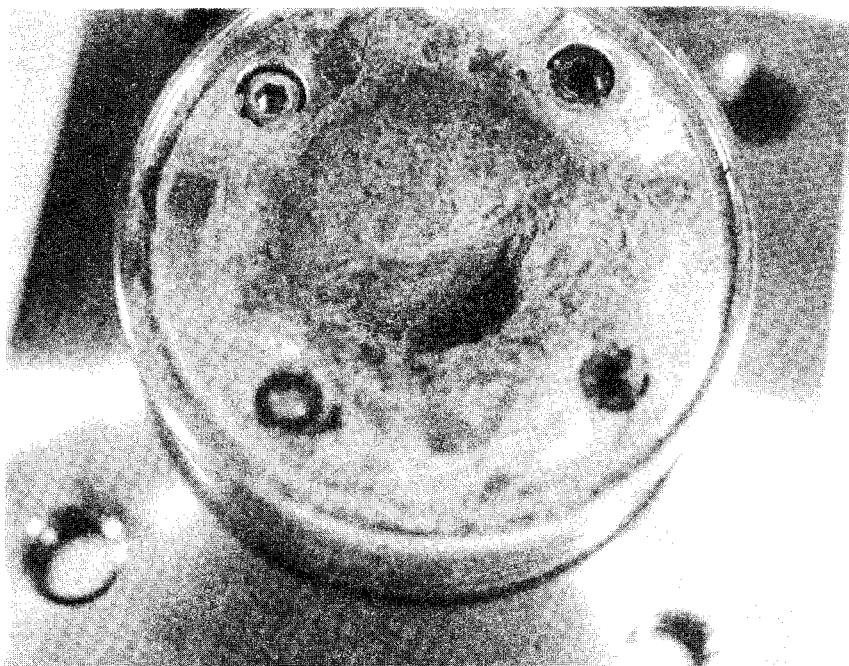


Fig 14. "Skivpacken" med det cylindriska hålrummet fylld med vattenmättad bentonit i vilken en fördjupning skurits ur med kniv för provtagning.

Luleå 1977-11-16
Avd för geoteknik, LuH


Roland Pusch

FÖRTECKNING ÖVER KBS TEKNISKA RAPPORTER

- 01 Källstyrkor i utbränt bränsle och högaktivt avfall från en PWR beräknade med ORIGEN
Nils Kjellbert
AB Atomenergi 77-04-05
- 02 PM angående värmeledningstal hos jordmaterial
Sven Knutsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-04-15
- 03 Deponering av högaktivt avfall i borrhål med buffertsubstans
Arvid Jacobsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-05-27
- 04 Deponering av högaktivt avfall i tunnlar med buffertsubstans
Arvid Jacobsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-06-01
- 05 Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall, Rapport 1
Roland Blomqvist
AB Atomenergi 77-03-17
- 06 Groundwater movements around a repository, Phase 1, State of the art and detailed study plan
Ulf Lindblom
Hagconsult AB 77-02-28
- 07 Resteffekt studier för KBS
Del 1 Litteraturgenomgång
Del 2 Beräkningar
Kim Ekberg
Nils Kjellbert
Göran Olsson
AB Atomenergi 77-04-19
- 08 Utlakning av franskt, engelskt och kanadensiskt glas med högaktivt avfall
Göran Blomqvist
AB Atomenergi 77-05-20

- 09 Diffusion of soluble materials in a fluid filling a porous medium
Hans Häggblom
AB Atomenergi 77-03-24
- 10 Translation and development of the BNWL-Geosphere Model
Bertil Grundfelt
Kemakta Konsult AB 77-02-05
- 11 Utredning rörande titans lämplighet som korrosionshärdig kapsling för kärnbränsleavfall
Sture Henriksson
AB Atomenergi 77-04-18
- 12 Bedömning av egenskaper och funktion hos betong i samband med slutlig förvaring av kärnbränsleavfall i berg
Sven G Bergström
Göran Fagerlund
Lars Rombén
Cement- och Betonginstitutet 77-06-22
- 13 Urlakning av använt kärnbränsle (bestrålad uranoxid) vid direktdeponering
Ragnar Gelin
AB Atomenergi 77-06-08
- 14 Influence of cementation on the deformation properties of bentonite/quartz buffer substance
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-06-20
- 15 Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall
Rapport 2
Roland Blomquist
AB Atomenergi 77-05-17
- 16 Översikt av utländska riskanalyser samt planer och projekt rörande slutförvaring
Åke Hultgren
AB Atomenergi augusti 1977
- 17 The gravity field in Fennoscandia and postglacial crustal movements
Arne Bjerhammar
Stockholm augusti 1977
- 18 Rörelser och instabilitet i den svenska berggrunden
Nils-Axel Mörner
Stockholms Universitet augusti 1977
- 19 Studier av neotektonisk aktivitet i mellersta och norra Sverige, flygbildsgenomgång och geofysisk tolkning av recenta förkastningar
Robert Lagerbäck
Herbert Henkel
Sveriges Geologiska Undersökning september 1977

- 20 Tektonisk analys av södra Sverige, Vättern - Norra Skåne
Kennert Röshoff
Erik Lagerlund
Lunds Universitet och Högskolan Luleå september 1977
- 21 Earthquakes of Sweden 1891 - 1957, 1963 - 1972
Ota Kulhánek
Rutger Wahlström
Uppsala Universitet september 1977
- 22 The influence of rock movement on the stress/strain situation in tunnels or bore holes with radioactive constituents embedded in a bentonite/quartz buffer mass
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-08-22
- 23 Water uptake in a bentonite buffer mass
A model study
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-08-22
- 24 Beräkning av utlakning av vissa fissionsprodukter och aktinider från en cylinder av franskt glas
Göran Blomqvist
AB Atomenergi 1977-07-27
- 25 Blekinge kustgnejs, Geologi och hydrogeologi
Ingemar Larsson KTH
Tom Lundgren SGI
Ulf Wiklander SGU
Stockholm, augusti 1977
- 26 Bedömning av risken för fördröjt brott i titan
Kjell Pettersson
AB Atomenergi 1977-08-25
- 27 A short review of the formation, stability and cementing properties of natural zeolites
Arvid Jacobsson
Högskolan i Luleå 1977-10-03
- 28 Värmeledningsförsök på buffertsubstans av bentonit/pitesilt
Sven Knutsson
Högskolan i Luleå 1977-09-20
- 29 Deformationer i sprickigt berg
Ove Stephansson
Högskolan i Luleå 1977-09-28
- 30 Retardation of escaping nuclides from a final depository
Ivars Neretnieks
Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm 1977-09-14
- 31 Bedömning av korrosionsbeständigheten hos material avsedda för kapsling av kärnbränsleavfall. Lägesrapport 1977-09-27 samt kompletterande yttranden.
Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp

- 32 Long term mineralogical properties of bentonite/quartz
buffer substance
Preliminär rapport november 1977
Slutrapport februari 1978
Roland Pusch
Arvid Jacobsson
Högskolan i Luleå
- 33 Required physical and mechanical properties of buffer masses
Roland Pusch
Högskolan Luleå 1977-10-19
- 34 Tillverkning av bly-titan kapsel
Folke Sandelin AB
VBB
ASEA-Kabel
Institutet för metallforskning
Stockholm november 1977
- 35 Project for the handling and storage of vitrified high-level
waste
Saint Gobain Techniques Nouvelles October, 1977
- 36 Sammansättning av grundvatten på större djup i granitisk
berggrund
Jan Rennerfelt
Orrje & Co, Stockholm 1977-11-07
- 37 Hantering av buffertmaterial av bentonit och kvarts
Hans Fagerström, VBB
Björn Lundahl, Stabilator
Stockholm oktober 1977
- 38 Utformning av bergrumsanläggningar
Arne Finné, KBS
Alf Engelbrektson, VBB
Stockholm december 1977
- 39 Konstruktionsstudier, direktdeponering
ASEA-ATOM
VBB
Västerås
- 40 Ekologisk transport och stråldoser från grundvattenburna
radioaktiva ämnen
Ronny Bergman
Ulla Bergström
Sverker Evans
AB Atomenergi
- 41 Säkerhet och strålskydd inom kärnkraftområdet.
Lagar, normer och bedömningsgrunder
Christina Gyllander
Siegfried F Johnson
Stig Rolandson
AB Atomenergi och ASEA-ATOM

- 42 Säkerhet vid hantering, lagring och transport av använt kärnbränsle och förglasat högaktivt avfall
Ann Margret Ericsson
Kemakta november 1977
- 43 Transport av radioaktiva ämnen med grundvatten från ett bergförvar
Bertil Grundfelt
Kemakta november 1977
- 44 Beständighet hos borsilikatglas
Tibor Lakatos
Glasteknisk Utveckling AB
- 45 Beräkning av temperaturer i ett envånings slutförvar i berg för förglasat radioaktivt avfall Rapport 3
Roland Blomquist
AB Atomenergi 1977-10-19
- 46 Temperaturberäkningar för använt bränsle
Taivo Tarandi
VBB
- 47 Teoretiska studier av grundvattenrörelser
Preliminär rapport oktober 1977
Slutrapport februari 1978
Lars Y Nilsson
John Stokes
Roger Thunvik
Inst för kulturteknik KTH
- 48 The mechanical properties of the rocks in Stripa, Kråkemåla, Finnsjön and Blekinge
Graham Swan
Högskolan i Luleå 1977-09-14
- 49 Bergspänningsmätningar i Stripa gruva
Hans Carlsson
Högskolan i Luleå 1977-08-29
- 50 Lagningsförsök med högaktivt franskt glas i Studsvik
Göran Blomqvist
AB Atomenergi november 1977
- 51 Seismotectonic risk modelling for nuclear waste disposal in the Swedish bedrock
F Ringdal
H Gjøystdal
E S Hysebye
Royal Norwegian Council for scientific and industrial research
- 52 Calculations of nuclide migration in rock and porous media, penetrated by water
H Häggblom
AB Atomenergi 1977-09-14

- 53 Mätning av diffusionshastighet för silver i lera-sand-blandning
Bert Allard
Heino Kipatsi
Chalmers tekniska högskola 1977-10-15
- 54 Groundwater movements around a repository
- 54:01 Geological and geotechnical conditions
Håkan Stille
Anthony Burgess
Ulf E Lindblom
Hagconsult AB september 1977
- 54:02 Thermal analyses
Part 1 Conduction heat transfer
Part 2 Advective heat transfer
Joe L Ratigan
Hagconsult AB september 1977
- 54:03 Regional groundwater flow analyses
Part 1 Initial conditions
Part 2 Long term residual conditions
Anthony Burgess
Hagconsult AB oktober 1977
- 54:04 Rock mechanics analyses
Joe L Ratigan
Hagconsult AB september 1977
- 54:05 Repository domain groundwater flow analyses
Part 1 Permeability perturbations
Part 2 Inflow to repository
Part 3 Thermally induced flow
Joe L Ratigan
Anthony S Burgess
Edward L Skiba
Robin Charlwood
- 54:06 Final report
Ulf Lindblom et al
Hagconsult AB oktober 1977
- 55 Sorption av långlivade radionuklider i lera och berg
Del 1 Bestämning av fördelningskoefficienter
Del 2 Litteraturgenomgång
Bert Allard
Heino Kipatsi
Jan Rydberg
Chalmers tekniska högskola 1977-10-10
- 56 Radiolys av utfyllnadsmaterial
Bert Allard
Heino Kipatsi
Jan Rydberg
Chalmers tekniska högskola 1977-10-15

- 57 Stråldoser vid haveri under sjötransport av kärnbränsle
Anders Appelgren
Ulla Bergström
Lennart Devell
AB Atomenergi 1978-01-09
- 58 Strålrisker och högsta tillåtliga stråldoser för människan
Gunnar Walinder
FOA 4 november 1977
- 59 Tectonic lineaments in the Baltic from Gävle to Simrishamn
Tom Flodén
Stockholms Universitet 1977-12-15
- 60 Förarbeten för platsval, berggrundsundersökningar
Sören Scherman
- Berggrundvattenförhållande i Finnsjöområdets nordöstra del
Carl-Erik Klockars
Ove Persson
Sveriges Geologiska Undersökning januari 1978
- 61 Permeabilitetsbestämningar
Anders Hult
Gunnar Gidlund
Ulf Thoregren
- Geofysisk borrhålsmätning
Kurt-Åke Magnusson
Oscar Duran
Sveriges Geologiska Undersökning januari 1978
- 62 Analyser och åldersbestämningar av grundvatten på stora djup
Gunnar Gidlund
Sveriges Geologiska Undersökning 1978-02-14
- 63 Geologisk och hydrogeologisk grunddokumentation av
Stripa försöksstation
Andrei Olkiewicz
Kenth Hansson
Karl-Erik Almén
Gunnar Gidlund
Sveriges Geologiska Undersökning februari 1978
- 64 Spänningsmätningar i Skandinavisk berggrund - förutsättningar,
resultat och tolkning
Sten G A Bergman
Stockholm november 1977
- 65 Säkerhetsanalys av inkapslingsprocesser
Göran Carleson
AB Atomenergi 1978-01-27
- 66 Några synpunkter på mekanisk säkerhet hos kapsel för
kärnbränsleavfall
Fred Nilsson
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm februari 1978

- 67 Mätning av galvanisk korrosion mellan titan och bly samt mätning av titans korrosionspotential under γ -bestrålning. 3 st tekniska PM.
Sture Henrikson
Stefan Poturaj
Maths Åsberg
Derek Lewis
AB Atomenergi januari-februari 1978
- 68 Degraderingsmekanismer vid bassänglagring och hantering av utbränt kraftreaktorbränsle
Gunnar Vesterlund
Torsten Olsson
ASEA-ATOM 1978-01-18
- 69 A three-dimensional method for calculating the hydraulic gradient in porous and cracked media
Hans Häggblom
AB Atomenergi 1978-01-26
- 70 Lakning av bestrålat UO_2 -bränsle
Ulla-Britt Eklund
Ronald Forsyth
AB Atomenergi 1978-02-24
- 71 Bergspricktätning med bentonit
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-11-16
- 72 Värmeledningsförsök på buffertsubstans av kompakterad bentonit
Sven Knutsson
Högskolan i Luleå 1977-11-18
- 73 Self-injection of highly compacted bentonite into rock joints
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1978-02-25
- 74 Highly compacted Na bentonite as buffer substance
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1978-02-25
- 75 Small-scale bentonite injection test on rock
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1978-03-02
- 76 Experimental determination of the stress/strain situation in a sheared tunnel model with canister
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1978-03-02
- 77 Nuklidvandring från ett bergförvar för utbränt bränsle
Bertil Grundfelt
Kemakta konsult AB, Stockholm
- 78 Bedömning av radiolys i grundvatten
Hilbert Christenssen
AB Atomenergi 1978-02-17