

**Deponering av högaktivt avfall i
borrhål med buffersubstans**

A Jacobsson, R Pusch

Högskolan i Luleå 1977-05-27

DEPONERING AV HÖGAKTIVT AVFALL
I BORRHÅL MED BUFFERTSUBSTANS

A Jacobsson, R Pusch

Högskolan i Luleå 1977-05-27

Objekt 12.33

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

DEPOSITION OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE PRODUCTS
IN BORE-HOLES WITH BUFFER SUBSTANCE

(English summary)

by R Pusch & A Jacobsson

Scope of investigation

The present investigation comprised a compilation of available literature data concerning the possible use of clayey masses as buffer substances in bore-holes (in rock) with canisters containing radioactive waste products. The aim was to find a suitable composition of the buffer mass and to recommend a suitable storing technique.

Main questions

The criteria concerning the function of the buffer substance were:

- Sufficient mechanical supporting power to prevent rock pieces from the bore-hole walls to enter the mass. Also, sufficient bearing capacity to carry the heavy canisters.
- Suitable mechanical properties to guarantee a homogeneous character of the buffer mass in case of small differential movements in the surrounding rock. This requires a plastic (non-brittle) behaviour of the buffer substance.
- Prevention of free circulation of ground water. This requires a homogeneous character and a very low permeability of the buffer substance.

- Ion-adsorption ability. This requires a sufficiently high base exchange capacity and a suitable originally adsorbed ion type.
- Sufficiently good heat conduction properties to prevent high temperatures to develop in the buffer mass.

Composition of the buffer substance

These criteria suggest that a buffer substance containing Na-montmorillonite (Na-saturated smectite) would be suitable. A close examination of the mechanical behaviour, especially with reference to the application of the mass, showed that homogeneous condition cannot be obtained unless the bentonite is in a liquid or semi-liquid state. This would require a water content of more than 150% which, however, reduces its bearing capacity to an unacceptable value. An air-dry condition at the application, on the other hand, would give the mass a homogeneous character and an acceptable bearing capacity (at least if the canisters are carried by some device until the mass is entirely embedded by the powder). There are, however, two important problems: 1) The water uptake, which will take place when ground water enters the mass, will create a very high swelling pressure. If free swelling is allowed, the water content will increase considerably and cause a rapidly decreasing shear strength of the mass. The bore-holes must therefore be sealed. 2) The heat conduction capacity will be very low even if the bentonite is fully water saturated.

It is concluded therefore that the mass should consist of a moderate amount of dry bentonite and a fairly high amount of silt/sand-sized quartz powder. A 10% (by weight) bentonite and 90% quartz fraction seems to fulfil the geotechnical and physical requirements.

The general idea is that the holes for deposition (5-10 m deep) should be bored from the tunnel base. Since the buffer mass in the holes, due to the fairly low content of active clay substance, will have a fairly low base exchange capacity it is necessary to create a second effective barrier. This is obtained by filling the tunnels with a buffer substance consisting of the same components but with a higher content of montmorillonite (20-50%). The buffer substance in the tunnels should also be applied in an air-dry condition. In the course of water uptake it will swell and exert a considerable pressure on the tunnel periphery, thereby tending to close open cracks and fissures.

Stability of the buffer substance

Since the canisters will have a temperature of about 100°C and the water pressure will be of the order of 5 MPa at 500 m depth (where the deposition tunnels will be located) it is necessary to consider any possible chemical or mechanical change of the mass with special reference to pH and salinity changes in the system and to the influence of strong radiation from the radioactive objects. Two possible changes were considered: 1) The risk of crystal distortion leading to mechanical destruction of individual particles and to a severe decrease in base exchange capacity and 2) the risk of precipitation of various components leading to cementation, i. e. a transfer from plastic to brittle behaviour of the buffer substance. Literature studies and own experience show that montmorillonite is permanently stable at 100°C temperature and 5 MPa pressure when pH is within the range of 6.5-10 while quartz is stable at pH <9. If the salinity is increased due to intrusion of salt water zeolites may form and if free K-ions occur mixed layer minerals (such as illite/montmorillonite) may be created. The only possible influence of radiation

would be a mechanical degradation which would in fact only have two (positive) effects: an increase of the base exchange capacity and a reduction of the permeability. Considering the moderate pressure and the very low water conversion in the system, the buffer substance in the bore-holes as well as in the tunnels will hardly be affected at all. This is in fact proved by the existence of many natural plastic bentonites consisting of montmorillonite and quartz which have been affected by high pressures and temperatures of the given order for geological periods of time. Preliminary tests also show that structural changes such as piping due to gas movements in sealed bore holes will not occur.

Conclusions

The authors conclude that the suggested principle of storing the canisters in sealed bore-holes filled with a 10% bentonite/90% quartz (silt, sand) mass is suitable provided that the tunnel system, from which the holes are bored, is sealed with a dense buffer mass consisting of quartz (silt, sand) and 20-50% bentonite powder.

Slutrapport över

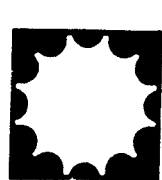
Deponering av högaktivt avfall i borrhål med buffertsubstans

Luleå 1977-05-27

Avd för geoteknik, Högskolan i Luleå

A JACOBSSON

R PUSCH



HÖGSKOLAN I LULEÅ
MASKINTEKNIK • GEOTEKNOLOGI • ARBETSVETENSKAP

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

		sid
1	BUFFERTMATERIALETS FUNKTION	1
1.1	Utformning av depositionsutrymmen	2
1.2	Val av depositionsteknik	6
2	HUVUDFRÅGAN - BUFFERTMATERIALETS KONSISTENS	8
2.1	Konsistens - funktion	8
2.2	Skjuvhållfasthet och bärighet	12
2.3	Deformationer	18
3	PROCESSER I BUFFERTMASSAN EFTER DEPONERINGEN	19
3.1	Allmänt	19
3.2	Svällning i samband med vattenupptagning	19
3.3	Temperaturinverkan	32
	Temperaturbetingad strömning	33
	Temperaturbetingad gasbildning	34
	Temperaturinverkan på buffertmassans spännings/deformations-egenskaper	44
	Kristallstrukturella förändringar som följd av temperaturförhöjning	53
3.4	Inverkan av radioaktiv strålning på buffertmaterialet	62
4	FÖRSLAG TILL UTFORMNING AV ANLÄGGNINGEN	70
	REFERENSER	74

Syftet med undersökningen är att sammanställa hittills kända uppgifter som har betydelse för bedömning av lermaterials användbarhet som buffertmaterial vid deponering av kapslat högaktivt avfall i berg samt att föreslå en praktisk utformning av deponeringsutrymmena och en praktiskt möjlig deponeringsteknik med användning av lera. Då utredningsuppdraget gavs förutsattes att avfallsdeponeringen skulle ske i borrhål. Andra givna förutsättningar har varit att kapslarna skall vara helt omgivna av buffertsubstans, att betong i möjligaste mån skall undvikas och att organisk substans (t ex asfalt) inte bör komma ifråga.

De viktigaste kriterierna som rör buffertmaterialets funktion är:

1. Mekaniskt skydd mot avspaltning av bergstycken från deponeringshålens väggar.
Krav: Tillräcklig mekanisk styrka hos buffertmaterialet.
2. Mekaniskt skydd vid eventuella mindre rörelser i berggrunden.
Krav: Plastiskt icke-sprött beteende hos buffertmaterialet.
3. Förhindrande av fri cirkulation av grundvatten.
Krav: Låg permeabilitet hos buffertmaterialet. Homogen buffertmassa.
4. Jonadsorptionsförmåga hos buffertmaterialet.
Önskemål: Hög jonbyteskapacitet och lämplig jonbeläggning.

5. God värmeledningsförmåga för förhindrande av höga temperaturers uppkomst i buffertzonen.

Det är lätt att ge förslag till den mineralogiska sammansättningen och de geotekniska egenskaperna hos den buffertsubstans som uppfyller de nämnda kraven vid normal temperatur och då något strålningsfält inte finns. Under dessa förutsättningar är en fast, homogen montmorillonitrik lera ett mycket lämpligt material. Tar man med en till 100 à 150°C förhöjd temperatur och strålning i bilden uppkommer dock naturligtvis frågan om hur stabila de mekaniska och fysikalisk/kemiska egenskaperna är hos en sådan lera. Det finns emellertid en ännu viktigare fråga och den är av praktisk geoteknisk karaktär: Vilken konsistens måste lermaterialet ha för att det skall kunna appliceras som buffertmaterial? Det visar sig att denna fråga har central betydelse och den innebär att lermaterialets sammansättning måste väljas med omsorg. För att kunna välja lämplig sammansättning och konsistens och utforma en i praktiken användbar teknik måste vi ta hela deponeringsproblematiken i betraktande.

1.1 Utformning av depositionsutrymmen

En viktig huvudprincip beträffande säkerheten mot risk för spridning av radioaktiva ämnen som emanerar från avfallet är att grundvattenströmning från depositionsutrymmena mot markytan inte bör äga rum. Ett villkor är att någon hydraulisk gradient inte verkar. Det förutsätter att hela deponeringsanläggningen i slutfasen fylls med vatten så att den ursprungliga grundvattensituationen återställs. Denna princip bör stå fast. Strömning orsakad av termiska gradienter och av densitetsskillnader kan emellertid uppkomma vilket måste beaktas i utredningsarbetet.

Önskvärt är också att lokala grundvattenrörelser i depositionsområdet är obetydliga eftersom vattenom-

sättning underhåller eventuellt uppkommande kemiska processer. Det förutsätter dels att bergmassan är sprickfattig dels att upptagningen av hålrummen för depositionen görs på sådant sätt att berget inte spräcks upp eller att slutna sprickor öppnas i någon nämnvärd grad. Det är därför lämpligt att hålen för deponering av avfallskapslarna borraras. Tekniken finns idag, man kan t ex utföra överlappande kärnborrhål i en krans.

Eftersom appliceringen av kapslar och lera blir utomordentligt svår att utföra vid djupa borrhål förutsätts en borrhålslängd av 5-10 m. Skall man nöja sig med så ringa längd måste emellertid tunneln, från vars sidor eller botten deponeringshålen borraras, drivas ytterst försiktigt. Bäst är fullortsborrning men mycket försiktig sprängning kan också tillämpas. Vad man eftersträvar är att inte spräcka upp berget och härmed öppna tidigare slutna sprickor som kan medföra onödig grundvattenrörelse. Här kan man fö tillämpa bergmekaniska resonemang på följande sätt.

I berggrunden råder före utförandet av schakt och tunnelsystem tryckspänningar. Detta s k primära spänningstillstånd kan beskrivas med hjälp av huvudspänningarna $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Vanligtvis är största huvudspänningen nästan vertikalt orienterad¹⁾. Vid drivning av en flackt orienterad tunnel kommer spänningarna i tunnelns omgivning att ändras väsentligt. Den intressantaste spänningskomponenten är tangentialspänningen σ_θ (Fig 1).

1) Här finns olika meningar men det ändrar inte resonemangets giltighet i princip.

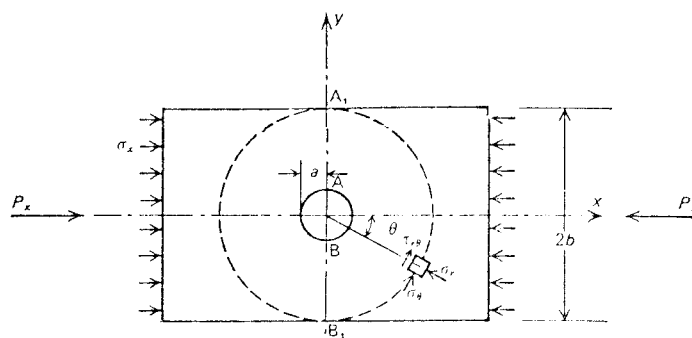


Fig 1. Spänningar i ett element utanför en cirkulär tunnel. Figuren avser ett enaxligt tryckt medium.

I det teoretiska fallet att tunneln har cirkulärt tvärsnitt och drivs i berg som har idealelastiska egenskaper kan tangentialspänningen tecknas:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (1)$$

där σ_x och σ_y = primärspänningar
 r = avstånd från tunnelcentrum
till elementet i fråga
 a och θ enligt Fig 1.

Om primärspänningarna är lika stora kommer σ_{θ} att anta värdet $2\sigma_x = 2\sigma_y$, dvs tangentialspänningen kommer att vara större än de ursprungliga spänningarna. Detta innebär att befintliga sprickor i tunnelns omgivning tenderar att slutas. Vid den nämnda huvudspänningskonstellationen är fullortsborrning av tunneln att föredra eftersom spänningarna då blir ungefär så som teorin anger. Om tunneln sprängs får man som följd av uppspräckningen en sänkning av tangentialspänningen närmast tunnelperiferin men på något avstånd från periferin uppkommer ett tangentialspänningsmaximum. I Fig 2 illustreras detta för fallet enaxligt primärt spänningstillstånd. Mätningar visar att i relativt sprickfritt berg råder ett obestämt spänningstillstånd från tunnelns inre begränsningsyta intill 0.5-1 m avstånd härifrån. I starkt sprucket berg gäller motsvarande förhållande inom avståndet 1.5-5 m från fria ytan. Vid borrhade tunnelsektioner där berget uppluckrats obetydligt visar mätningarna god överensstämmelse med de teoretiska beräkningarna.

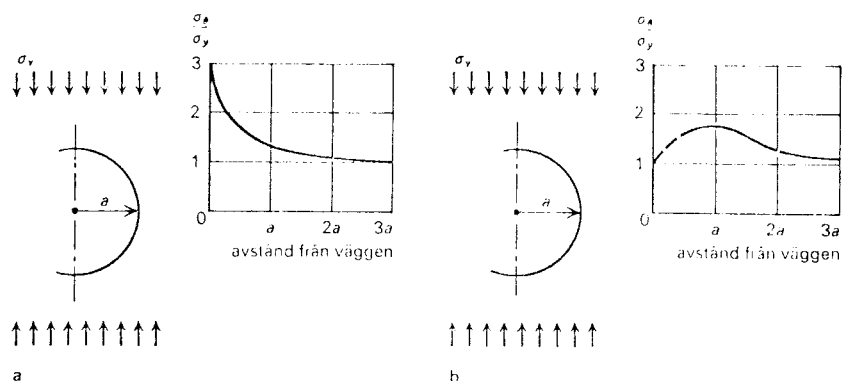


Fig 2. Teoretisk och verklig storlek på tangentialspänningen vid cirkulär tunnel i enaxligt spänningsfält. a) Teori. b) Mätningar.

En nackdel med fullortsborrning är att tangentialspänningarna kan bli så stora vid tunnelperiferin att tryckhållfastheten överskrids och smällbergfenomen - utslagning av bergskivor från tunnelväggen - uppkommer. Denna risk minskas om tunneln sprängs och detta förfarande kan därför vara lämpligt. Det kan vara fördelaktigt också av den anledningen att man, om skillnaden mellan vertikala och horisontella huvudspänningarna är stor, kan välja en sådan form (t ex elliptisk) på tunneltvärsnittet att tangentialspänningen blir ungefär densamma runt hela tunnelperiferin (Fig 3). Valet av tvärsnittsform bör baseras på spänningsmätning i en pilot tunnel.

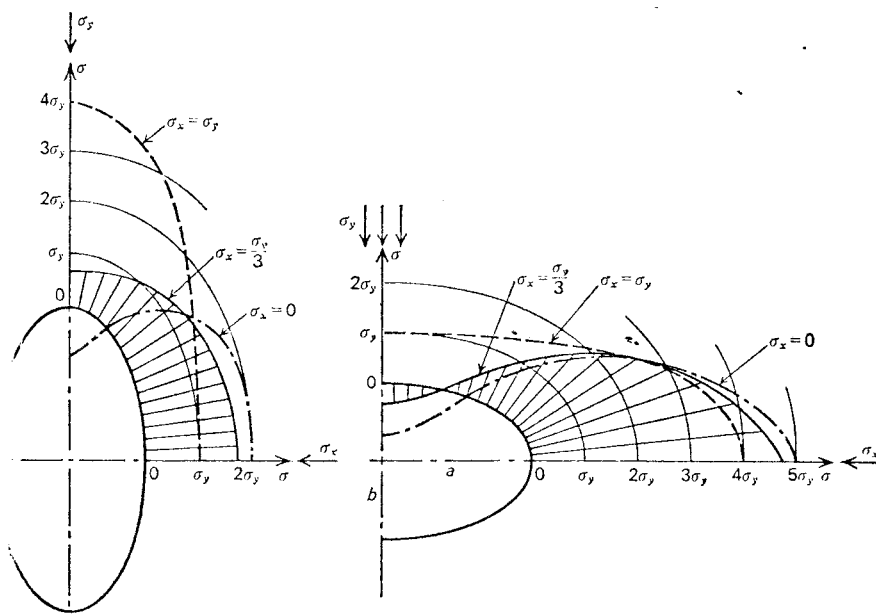


Fig 3. Tangentialspänningar i elliptiska hålrum som funktion av primärspänningskvoten.

1.2 Val av depositionsteknik

Från praktisk synpunkt måste man beakta de olika stadierna vid deponeringen. De första momenten är:

1. Deponeringstunneln är driven. Länspumpning pågår.
2. Tunnelinspektion är utförd och härav eventuellt föranledd tätning genom injektering är verkställd. Pumpning pågår.
3. Borrning av deponeringhålén skall ske.

I moment 3 förutsätts att grundvatteninflödet på tunnelnivån är mycket ringa eftersom ju detta förhållande är ett av de viktigaste kriterierna vid val av bergmassa för deponering. Tillskapandet av länspumpade hålrum på det aktuella djupet 500-1000 m ger emellertid upphov till mycket stora hydrauliska gradienter och ett visst grundvatteninflöde från tunnelns tak, väggar och golv kommer likväl att ske. Om deponeringshålen borraras från tunneln kommer därför en viss inläcking med tiden att ske. Det försvårar ett kontrollerat anbringande av buffertsubstansen och avfallskapslarna och kan kräva åtgärder. Man kan tänka sig att utföra dränerade kärnborrhål runt varje kommande deponeringshål. Hålen som orienteras parallellt med deponeringshålet tjänstgör som dräner genom att de hålls torra genom länspumpning (Fig 4). Denna länspumpning pågår så länge deponeringsarbetet pågår i tunneln. Hålen fylls här efter med samma substans som används i deponeringshålen. Vid ett speciellt utförande av deponeringen, nämligen med plomberade hål, är denna dränering sannolikt inte nödvändig. Man tömmer då respektive hål omedelbart före buffertmassans och kapselns anbringande och förseglar direkt det fyllda hålet med en betongplombering.

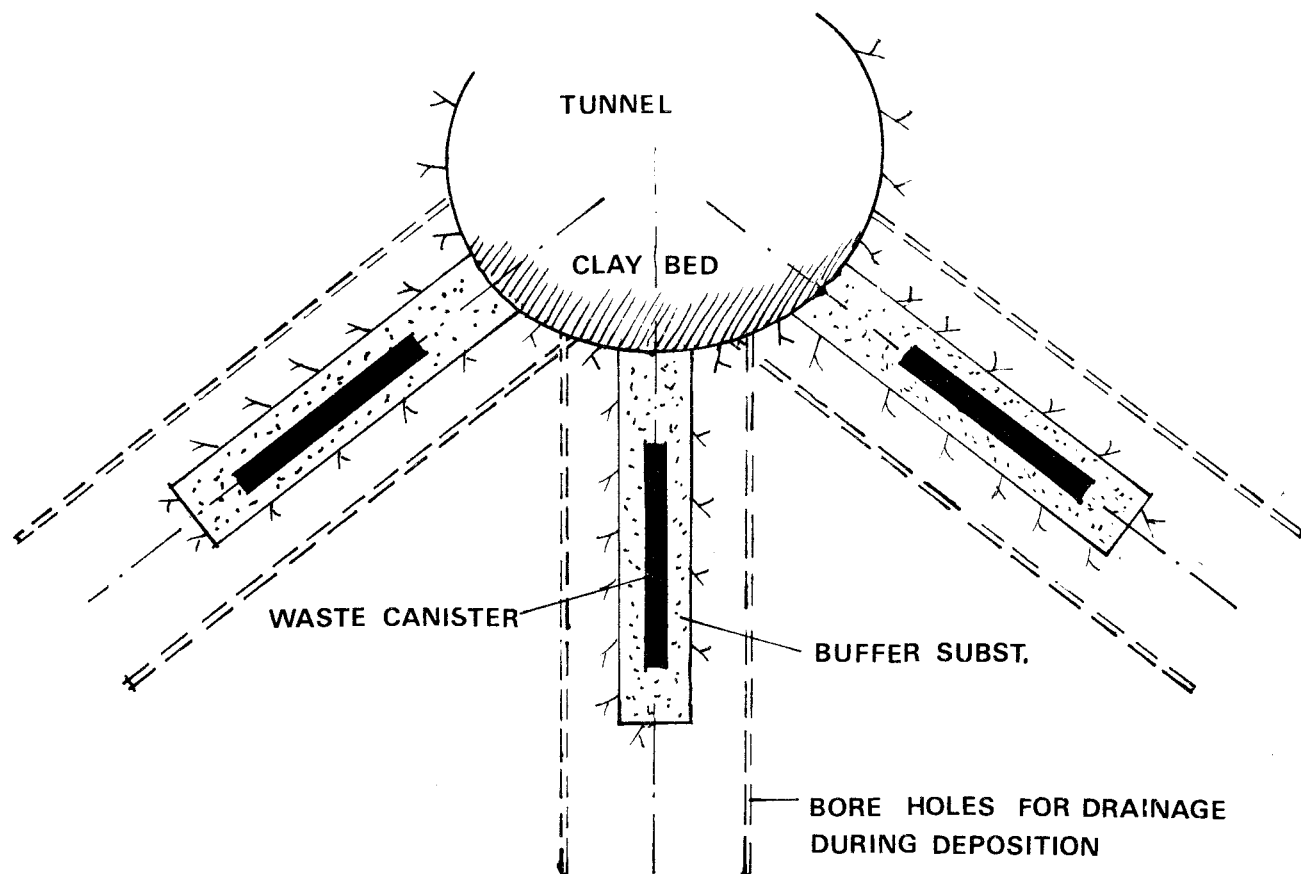


Fig 4. Principarrangemang av deponeringshål med dräner. Figuren visar ett tänkbart arrangemang med tre mindre kapslar. Blir det tal om stora dimensioner, t ex kapslar med 1 m diameter och 7.5 m längd gör man lämpligen endast 1 vertikalt deponeringshål.

Om man inte utför plombering bereds tillfälle att utan tidspress utföra deponeringsarbetet som karakteriseras av följande moment:

1. Borrning av deponeringhål.
2. Anbringande av buffertmaterial till några decimeter från borrhålsbotten.
3. Nedsänkning av avfallskapslar med en styranordning som medger centrering och upphängning av kapslarna parallellt med att buffertmaterialet anbringas.

4. Fyllning av deponeringshålet med buffertmaterial till i nivå med tunnelperiferin. Deponeringen börjar i de hål som upptagits längst in i tunneln och fortsätter i riktning mot det vertikala schakt varifrån tunneln drivits.

Sedan samtliga deponeringshål i tunneln utnyttjats utläggs en bädd av buffertmaterial i tunnelns hela längd. Arbetet fortsätts härefter i andra tunnelsystem i överliggande etager. När hela anläggningen tagits i anspråk fylls den med vatten och/eller "hydraulic fill" (finkornigt krossat berg eller sand som pumpas in).

2 HUVUDFRÅGAN - BUFFERTMATERIALETS KONSISTENS

2.1 Konsistens - funktion

Det är när man tar hela depositionstekniken i beaktande som man kan se vid vilka moment som buffertmaterialets egenskaper måste vara definierade. Ser vi på funktions-specifikationen under punkt 1 med avseende på de mekaniska egenskaperna, är det uppenbart att buffertmaterialet på plats i deponeringshålen skall vara fast, homogent och lågpermeabelt. Samtidigt innebär deponeringstekniken att buffertsubstansen (utom i första etappen vid fyllningen) måste kunna anbringas med hjälp av fjärrstyrning på grund av strålningsrisken. Naturligt vore att tänka sig att buffertsubstansen utgörs av lera som i suspensionsform pumpas ut genom rör som successivt höjs allteftersom kapslarna anbringas. På så vis kan man garantera en homogen utfyllnad. Frågan är då om leran övergår till gelform och får den hållfasthet som erfordras för att dels hålla kapslarna i ett permanent stabilt läge dels vara så fast att den lastökning som uppkommer av egentyngheten hos massan och av efter deponeringen påförd last av lerbädd m m i tunnelsystemet inte ger upphov till kompression (konsolidering). Här finns det idag endast begränsad kunskap. Utgår man från den realistiska bedömningen att lerma-

terialeet kommer att utgöras av bentonit (montmorillo-nitrikt lerpulver) finns emellertid en hel del vetande. Antar vi sålunda att buffertmaterialet utgörs av 100% Na-mättad Wyoming bentonite, som är handelsvara, visar erfarenheten att vattenkvoten (förhållandet mellan vattnets massa och mineralsubstansens massa) måste vara minst 150% för att massan skall kunna bringas till den halvflytande konsistens som krävs för att den skall kunna anbringas i deponeringshålen utan risk för uppkomst av hålrum och upphängning. Frågan är då om bentonitens¹⁾ thixotropa hållfasthetsåtervinning är tillräcklig för att ge gelen tillräcklig fasthet.

Det är på sin plats att här inledningsvis nämna något om thixotropiegenskaperna hos bentonit. ARNOLD (1967) har gjort en omfattande studie av Wyomingbentonit. Han undersökte särskilt den initiella thixotropa hållfasthetsåtervinningen och kunde visa att denna primära återvinning, som sker utomordentligt snabbt, inte är en funktion av porvattnets elektrolythalt eller arten av adsorberad katjon. Arnold postulerade att den orsakas av en nybildning av bindningar av van der Waalstyp och av typen vätebindning mellan närliggande, lättrörliga små lerpartiklar. Den härefter uppkommande sekundära hållfasthetsåtervinningen uppges vara orsakad av ökat effektivtryck ("korntryck") på grund av osmotiskt betingat och experimentellt verifierat undertryck i porvattnet. En annan faktor kan vara en ökande grad av kontinuitet och fasthet hos partikelskelettet som följd av små lättrörliga partiklars successiva inkoppling i systemet (Fig 5). Den sekundära hållfasthetsåtervinningens hastighet visade sig vara starkt beroende av porvattnets elektrolythalt och av arten av adsorberad katjon.

¹⁾ I den fortsatta texten avses med bentonit den nämnda Wyomingbentoniten.

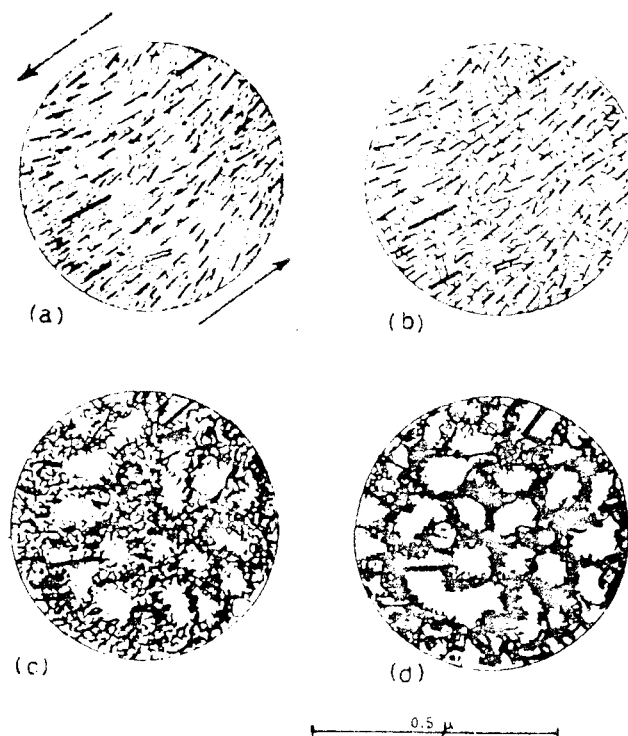


Fig 5. Principiell bild av den successiva aggregeringen av små partiklar efter omrörning av en thixotrop lera (Arnold, 1967). a) anger omrörningsstadiet med fullständig dispergering som följd. d) anger slutstadiet då den thixotropa hållfasthetsåtervinningen har skett.

Erfarenheten från ARNOLDS och egna preliminära försök visar att 100% Na-bentonit med vattenkvoten 150% får en mycket snabb primär thixotrop hållfasthetsåtervinning som emellertid endast ger en skjuvhållfasthet av storleksordningen 0.1-1 kPa. Som jämförelse kan nämnas att de lösaste i naturen förekommande oorganiska lersedimenten i vårt land (kvartär illitisk lera i Mälardalen) har en skjuvhållfasthet av storleksordningen 5-7 kPa. Om bentonitgelen får vila vid rumstemperatur kommer hållfastheten som nämnts att öka sekundärt med tiden men den slutgiltiga skjuvhållfastheten kommer ändå inte att nå ett högre värde än ungefär 2 kPa. Denna skjuvhållfasthet är inte tillräcklig för att garantera ett tillräckligt stöd i sidled för avfallskapslarna. Vidare kommer den lösa konsistensen att medföra att massan under inverkan av egentyngd och tyngden av kapslar konsoliderar med utpressning av fritt vatten som följd. Om sådant vatten ansamlas

har man naturligtvis ingen glädje av att permeabiliteten i övrigt i massan är låg.

Det är inte uteslutet att lergeler som utgörs av andra lermineral än montmorillonit kan ha bättre egenskaper vad gäller den sekundära thixotropa hållfasthetstillväxten. Det kan eventuellt vara fallet (jfr Fig 6 och Tabell 1) med de s k kvicklerorna som man finner på svenska västkusten (kvartära, marina, illitiska leror som urlakats genom grundvattenperkolation). Dessa leror har flytande tillstånd vid mekanisk bearbetning och uppfyller därför kravet på lämplig konsistens vid deponeringen. Man måste emellertid ha klart för sig att tillräcklig fasthet skall finnas hos buffertmaterialet redan kort tid efter deponeringen, vilket diskvalificerar kvicklerorna och säkert också andra liknande substanser. Det är också viktigt att observera att hållfasthetsökande substanser som används inom oljeborrnings- och byggnadsentreprenadverksamheten inte kan förutsättas komma till användning om inte deras kemiska sammansättning kan specificeras och bevisas vara ofarlig när det gäller processer av typen cementering.

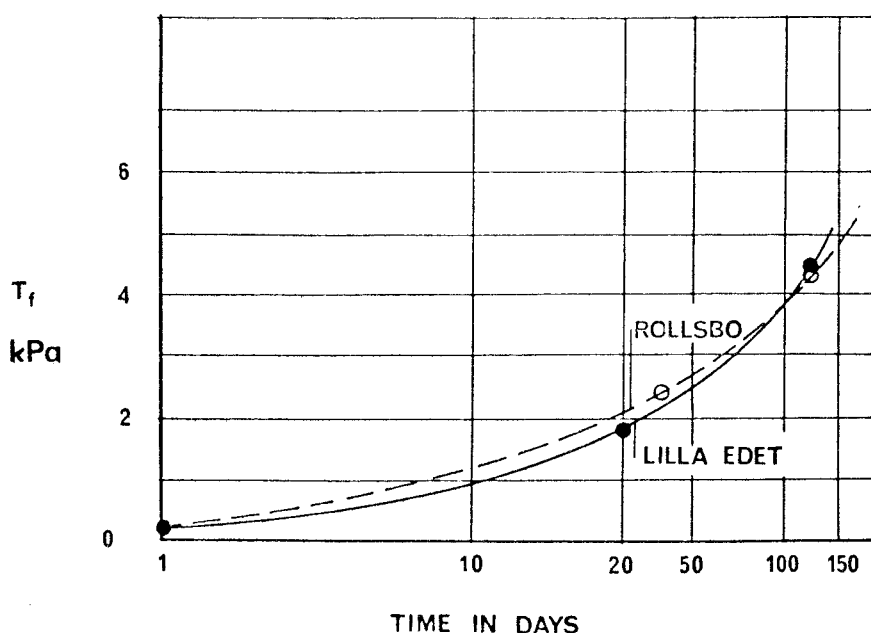


Fig 6. Odränerade skjuvhållfasthetens ökning med tiden hos kvicklera vid konstant volym (Jacobsson & Pusch, 1972).

Tabell 1. Exempel på kvicklerors geotekniska data

Lokal "	ρ t/m ³	τ_{fu} kPa	S_t	ω %	ω_P %	ω_L %	Beskrivning
Lilla Edet	1.73	14	81	48	18	31	Grå, lerig silt
Rollsbo	1.71	24	106	58	25	46	Grå lera

Vilken skjuvhållfasthet och vilka kompressionsegenskaper krävs då hos det deponerade buffertmaterialet? Enligt vår bedömning krävs en skjuvhållfasthet och en kompressibilitet av det slag som karakteriserar moränlera. Dessa egenskaper har 100% bentonitlera med en vattenkvot av ca 30-50%. Eftersom en så torr bentonitmassa inte kan deponeras med önskad grad av homogenitet kan man istället tänka sig att anbringa det torra bentonitpulvret i deponeringshålet och sedan räkna med att så småningom framträngande grundvatten tas upp i bentonitpulvret så att vattenkvoten får ett värde inom det angivna intervallet. Tekniken att deponera torrt pulver är i och för sig tilltalande eftersom den sannolikt är enkel att tillämpa och det är också denna teknik som vi i det följande förutsätter skall komma till användning. Som senare skall visas måste man emellertid använda en pulvermassa med betydligt lägre bentonithält än 100%.

2.2 Skjuvhållfasthet och bärighet

Det är alltså risken för förskjutningar hos kapslarna i buffertmassan som främst måste beaktas. För att garantera att sådana förskjutningar blir försumbara måste fastheten hos buffertmassan vara tillräckligt stor. Samtidigt bör massan vara plastisk för att kunna skydda kapseln mot eventuella förskjutningar i berggrunden ¹⁾.

¹⁾ Det är dock författarnas uppfattning att risken för förskjutningar helt kan elimineras genom att man vid borrhålsplaceringen undviker potentiella rörelse-zoner.

Det konventionella måttet på finkorniga massors fasthet är skjuvhållfastheten som skall kommenteras inledningsvis.

Generellt kan man för praktiskt bruk teckna skjuvhållfastheten τ_f :

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2)$$

där parametrarna framgår av Fig 7

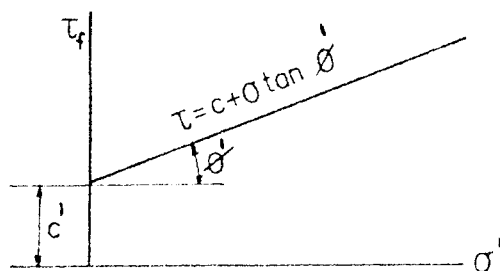


Fig 7. Definition av hållfasthetsparametrarna c' och ϕ' .

och där primbeteckningarna hänför sig till effektivtryck ("kornttryck") eftersom vattentrycket inte bidrar till hållfastheten. För material med hög lerhalt ("kohesionsmaterial") kan c' uppgå till flera tiotal kPa medan ϕ' är av storleksordningen $15-20^\circ$. För material med mycket låg lerhalt ("friktionsmaterial") är $c' \sim 0$ medan ϕ' uppgår till $30-40^\circ$.

För att förstå vad som kan hända om skjuvhållfastheten är för låg i det aktuella fallet kan vi konkretisera resonemanget genom att se på fallen i Fig 8.

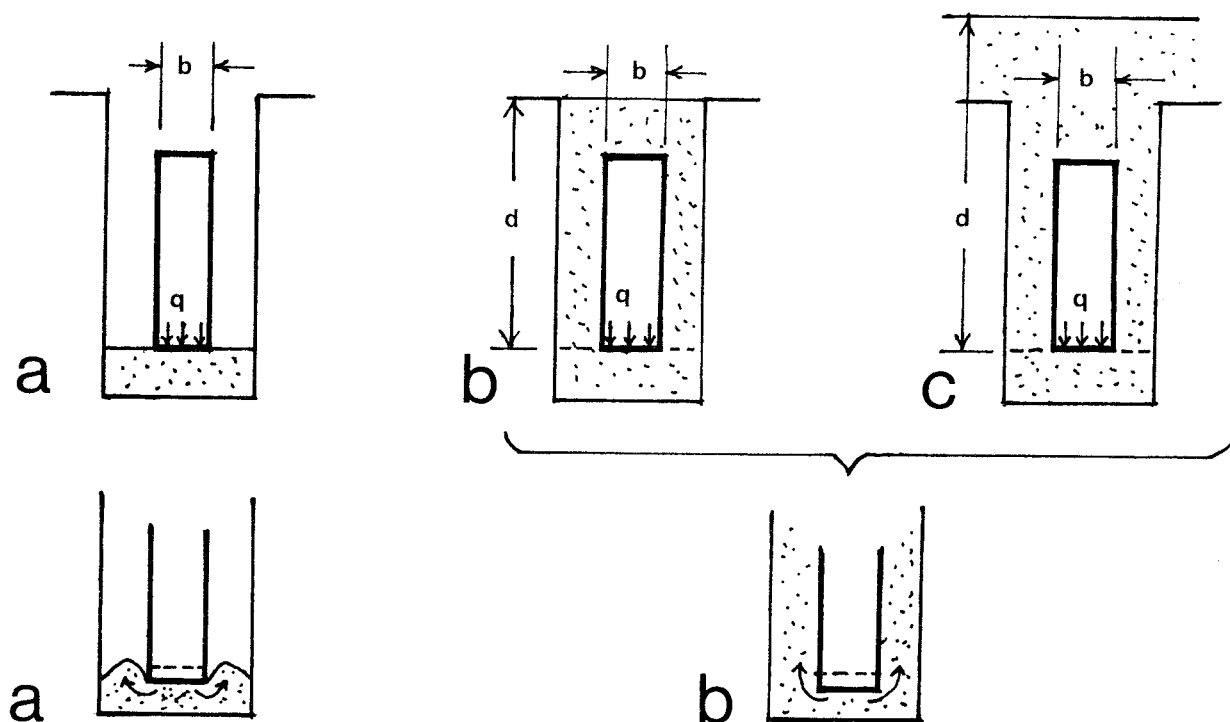


Fig 8. Stadier vid vilka skjuvhållfastheten bestämmer bärigheten hos buffertmassan. Övre raden:
 a) buffertmassa är anbringad till den nivå där kapseln placeras, b) Buffertmassan ifylld, c) Belastning uppkommer som följd av fyllning av tunneln.

För fallet a) gäller vid långsträckt lastyta enligt den allmänna bärighetsekvationen:

$$q_{\text{brott}} = c' N_c + \frac{1}{2} g \rho' b N_\rho \quad (3)$$

där N_c och N_ρ är funktioner av ϕ' enl Fig 9. ρ' är effektiva skrymdensiteten och g är jordaccelerationen.

För fallen b) och c) gäller, om massan fungerar som kohesionsmaterial (t ex vattenmättad lera):

$$q_{\text{brott}} = c' N_{cq} + g \rho' d \quad (4)$$

respektive

$$q_{\text{brott}} = \lambda g \rho' \frac{b}{2} N_\rho q \quad (5)$$

om massan fungerar som frikionsmaterial (t ex torr

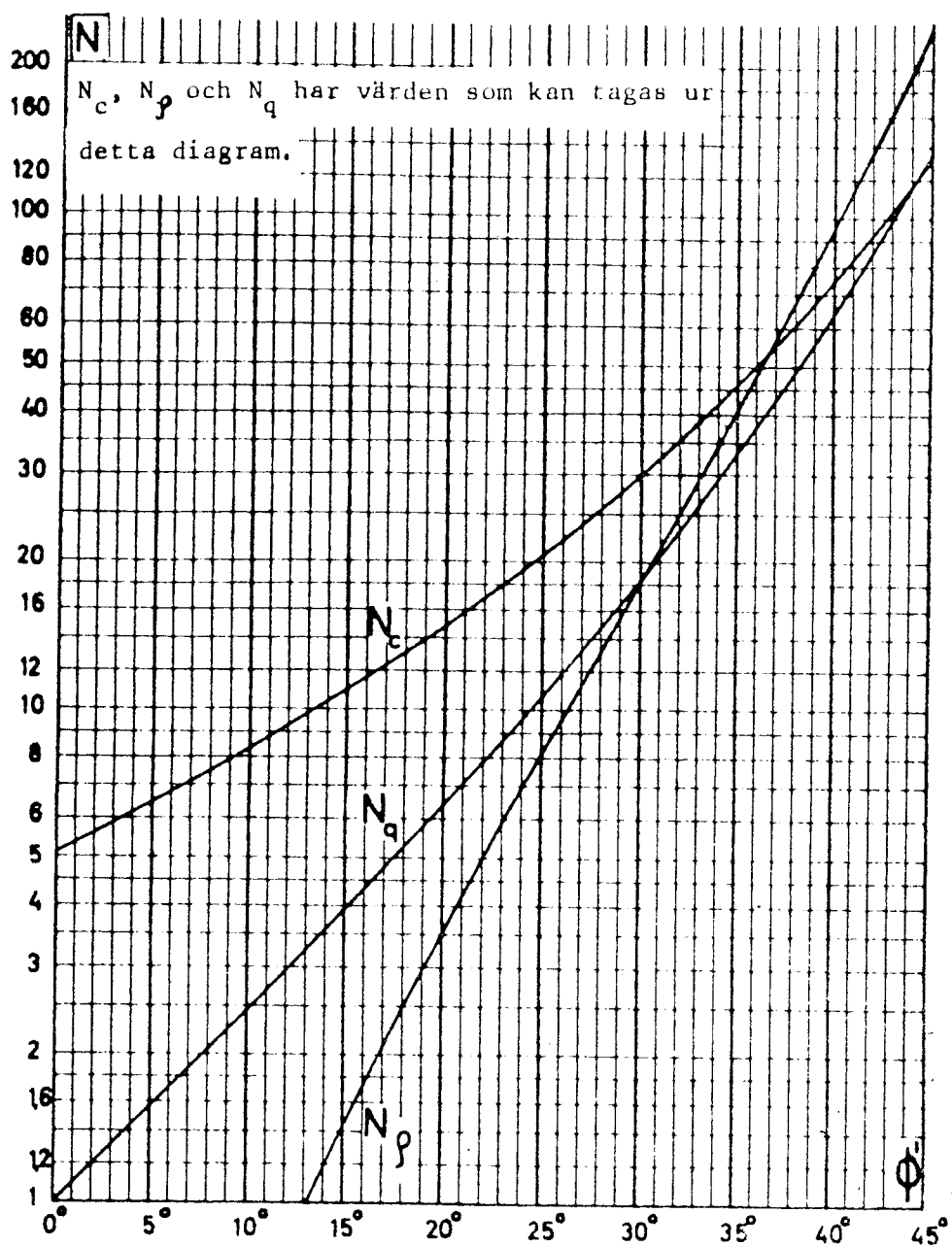


Fig 9. Bärighetsparametrarna N_c , N_q och N_ρ

pulvermassa eller vattenmättad silt). λ , N_{cq} och N_{ρ} är parametrar som väljs enligt MEYERHOF (se t ex PUSCH, 1974).

Ekv (3) och (5) innebär att belastningsytans storlek (kapselns ändyta) har betydelse.

Känner man trycket q som kapseln utövar på buffertmassan kan man beräkna erforderlig skjuvhållfasthet. Naturligtvis fordras en viss säkerhet därför att $q=1_{brott}$ ju ger brott med åtföljande snabb sjunkning och lokal uppluckring som följd.

Av de givna fallen är a) aktuellt för den lufttorra pulvermassan medan b) och c) är aktuella för det stadium då vatten upptagits i massan. För fallet a) kan vi räkna med $c'=0$ och $\phi'=35^{\circ}$ samt $\rho'=1500 \text{ kg/m}^3$ i princip oberoende av pulvermassans sammansättning. Använder vi Ekv (3) och korrigerar för cirkulär lastyta får vi för 0.3 m kapseldiameter $q_{brott}=120 \text{ kPa}$. Eftersom en momentan mindre sjunkning i samband med eventuellt begynnande brott inte har någon praktisk betydelse kan vi nöja oss med en mycket låg säkerhet som ger tillåtet tryck $q=100 \text{ kPa}$. En diameter av 0.3 m och en kapsellängd av 3 m bedömer vi som rimliga mått vid deponering i borrhål. Just dessa mått har valts också vid andra utredningar (se t ex ANGINO, DRESCHHOFF & ZELLER, 1976).

För fallet b) -c) behöver inte beaktas eftersom det svarar mot en högre bärighet än b) - finns det erfarenhetsvärden. Sålunda visar tidigare undersökningar av bentonit/sandblandningar (CTH-utredning för Ahlsell & Ågren AB, 1973) att parametrarna c' och ϕ' är funktioner av både vattenhalten och bentonithalten enligt Tabell 2. Värdena gäller material som packats vid en viss vattenhalt, ca 21%.

Tabell 2. Hållfasthetsparametrar vid odränerade skjuvförsök (enl CTH-undersökning)

Bentonithalt %	c' kPa	ϕ'
10	16	37°
15	16	36°
20	25	31°

Använder vi medelvärdena $c'=19$ kPa och $\phi'=34^\circ$ får vi för fallet b) med $d=2$ m och $\rho'=500$ kg/m³ samt $N_{cq}=9.3$ enligt Ekv (4) $q_{brott} \approx 190$ kPa. Tillåtet tryck kan för detta fall sättas ungefär lika med ca 120 kPa. Vi ser alltså att vi trots den låga vattenkvoten (21%) har en mycket måttlig hållfasthet och därmed bärighet.

För högre bentonithalt än 10%¹⁾ och full vattenmättnad kan man för skjuvning under konstanta volymsförhållanden (snabb skjuvning) använda den s k odränerade skjuvhållfastheten τ_{fu} . Detta värde illustreras av Fig 10 ur den ovan citerade CTH-undersökningen.

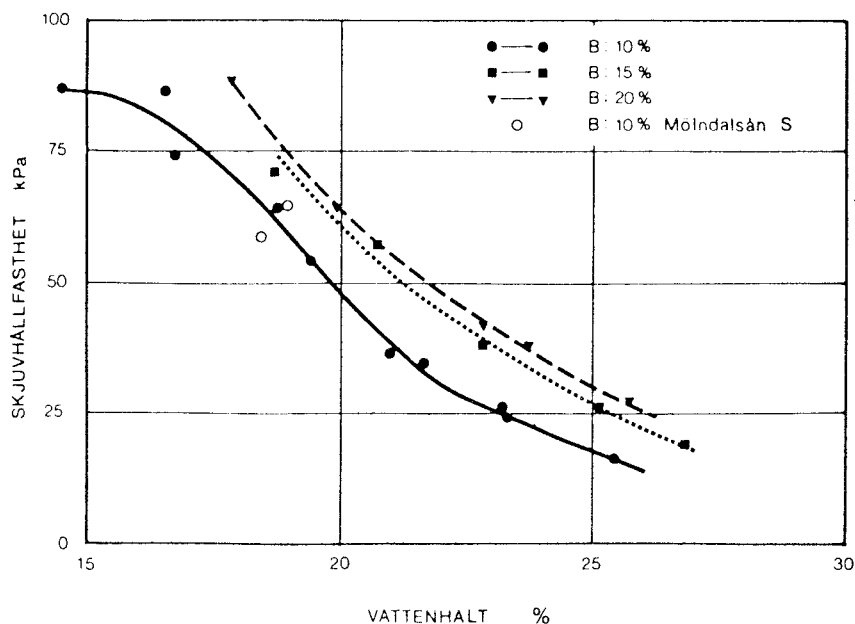


Fig 10. Den odränerade skjuvhållfasthetens beroende av vattenhalt vid olika procenthalt bentonit (B)

¹⁾ Som visas senare i texten är denna testteknik inte relevant vid så låg lerhalt som 10%.

Det är intressant att se hur starkt vattenkvoten (vattenhalten) påverkar skjuvhållfastheten. Använder vi Ekv (4) och sätter $c' = \tau_{fu}$ finner vi att bärigheten q_{brott} vid t ex 20% bentonithalt är nästan 600 kPa då vattenkvoten är knappt 20%. Då vattenkvoten ökar till 25% blir q_{brott} ca 300 kPa. Ökas vattenkvoten för denna bentonithalt till 30% eller mer minskar q_{brott} till mindre än 100 kPa. Om vi nu valt $q = 100$ kPa för stadiet a) så betyder detta att då vattenupptagning sker så får denna inte leda till så hög vattenkvot att det tillåtna trycket blir mindre än 100 kPa i det vattenmättade stadiet.

Ett viktigt fall b) som visar sig ha särskild betydelse är det då endast bergartsbildande mineral av typen kvarts, fältspat och tungmineral tillhörande grovsiltfraktionen (kornstorlek 0.02-0.06 mm) utgör buffertmassa. För detta fall gäller $\rho' = 700$ kg/m³, $c' = 0$ och $\phi' = 35^\circ$. Med rimlig säkerhet får vi med hjälp av Ekv (5) ett tillåtet värde på q av storleksordningen 120-150 kPa.

Det bör nämnas att de här angivna värdena på brottlaster och tillåtna tryck är konservativt uppskattade.

2.3 Deformationer

När den deponerade massan i stadium a) i Fig 8 belastas kommer en viss sjunkning att inträffa även om bärigheten inte tas i anspråk. För stadium a) - torr pulvermassa - gäller erfarenhetsmässigt att sjunkningen är försumbar om belastningen inte ger upphov till brott. För fallen b) och c) uppkommer en sjunkning vars storlek beror på hur hög vattenkvoten är. Dessa fall diskuteras senare i texten.

3 PROCESSER I BUFFERTMASSAN EFTER DEPONERINGEN

3.1 Allmänt

Pulverformigt buffertmaterial kommer primärt att påverkas på tre sätt:

1. Sedan deponeringshålet fyllts och läns-pumpningen av den aktuella tunneldelen upphört kommer grundvatten så småningom att tränga in i buffertmassan. Beroende på arten av buffertsubstans kommer härvid större eller mindre svällning att ske i samband med en ökning av vattenkvoten.
2. Buffertmateriallets temperatur kommer att öka som följd av värmeavgivningen från kapslarna.
3. Buffertmateriallet kommer att utsättas för radioaktiv strålning från kapslarna. I händelse av brott på kapslarna uppstår direkt kontakt mellan buffertsubstansen och det radioaktiva avfallet.

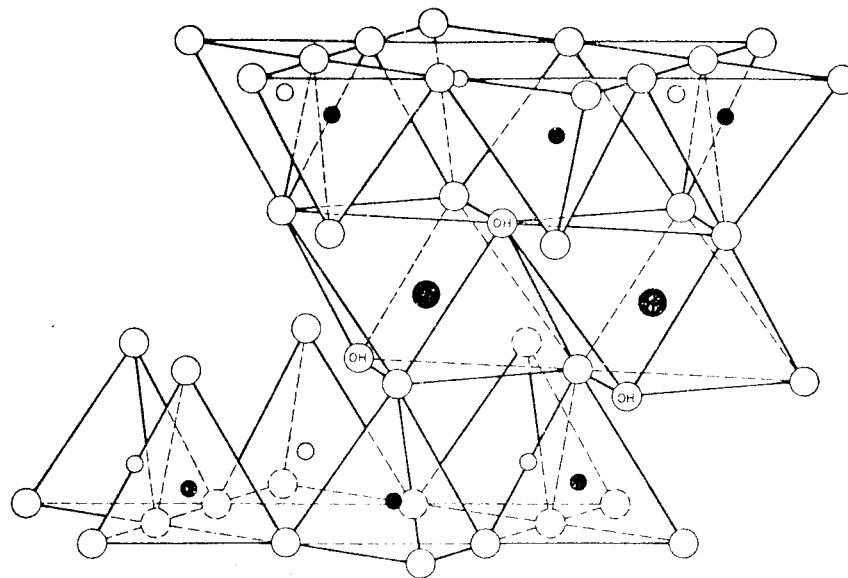
På nuvarande stadium är det svårt att förutsäga hur dessa processer kommer att inträffa i tiden och vilken integrerad effekt de kommer att ha. Vi har här valt att betrakta dem var för sig.

3.2 Svällning i samband med vattenupptagning

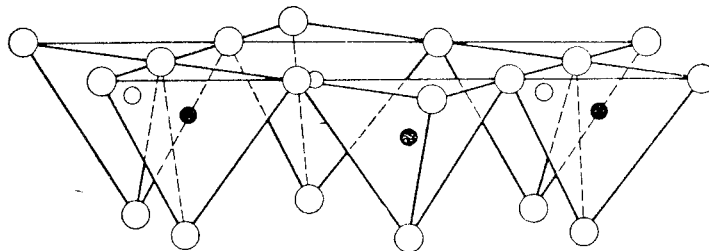
Den viktigaste aspekten gäller hållfastheten. Ökar vattenkvoten från det mycket låga värde som den "torra" pulvermassan har (ca 15% för 100% bentonit och ca 3-5% för pulver av kvarts, fältspat och tungmineral tillhörande siltfraktionen) så uppkommer först en hållfasthetsökning på grund av kapilläreffekter men sedan minskar hållfastheten påtagligt. Om det inte finns något hinder för vattenupptagningen kommer den

att fortskrida i samband med en svällning tills en jämvikt uppkommer som för 100% Na-bentonit kan motsvara en vattenkvot som överstiger 150%. Som angetts i föregående text kommer hållfastheten härigenom att reduceras till ett oacceptabelt värde. Detta bekräftas av färskas sovjetiska undersökningar (VOLKOV, SCHLATCHEVSKAJA & VORONKJEVITCH, 1976) som för fritt svällande Na-bentonit anger en vattenkvot av 250%. Motsvarande värde på τ_{fu} anges vara ca 5 kPa. Kapslarna kommer inte längre att ha ett effektivt stöd utan kan lägesändras i buffertmassan. Det kan man motverka genom att plombera deponeringshålet med t ex bly eller betong. En sådan åtgärd innebär att volymen i det närmaste hålls konstant men då uppkommer i stället ett svällningstryck som för 100% bentonit kan uppgå till 300-500 kPa. Det finns ingenting som säger att ett sådant tryck är oacceptabelt men som antytts tidigare har 100% bentonit ogynnsamma värmeledningsegenskaper. Det är därför lämpligare att låta buffertsubstansen utgöras av en bentonit)kvartsblandning där kvartsmaterialet lämpligen utgörs av pulver tillhörande siltfraktionen. Kvartsen har, med hänsyn till temperatursituationen i buffertsubstansen, gynnsammare värmeledningsegenskaper än fältspat. Vi återkommer till denna fråga.

Vad är det som orsakar svällningen respektive svällningstrycket? I princip kan man beskriva vattenupptagningen dels som en osmotisk process dels som en kristallisationsprocess. Vattenmolekylerna, som har mycket stark affinitet till de inre och yttre basplanen hos montmorillonitens kristallgitter, byggs upp skiktvis i samband med c-dimensionens ökning (Fig 11 a och b). Antalet vattenmolekylskikt och vattenmolekylernas gruppering är starkt beroende av arten och mängden av katjoner i mellanskiktpositioner. Na-montmorillonit sväller t ex betydligt mer än Ca-montmorillonit. I och för sig borde detta innebära att Ca-montmorillonit (dvs Ca-bentonit) vore att föredra som buffertkomponent. Na-montmorillonit har emellertid lägre permeabilitet och större specifik yta än Ca-montmorillonit och bör



Exchangeable Cations
 nH_2O



○ Oxygens ⊕ Hydroxyls ● Aluminum, iron, magnesium
 ○ and ● Silicon, occasionally aluminum

Fig 11a. Schematisk uppbyggnad hos montmorillonit enligt HOFMANN, ENDELL och WILM, MARSHALL och HENDRICKS

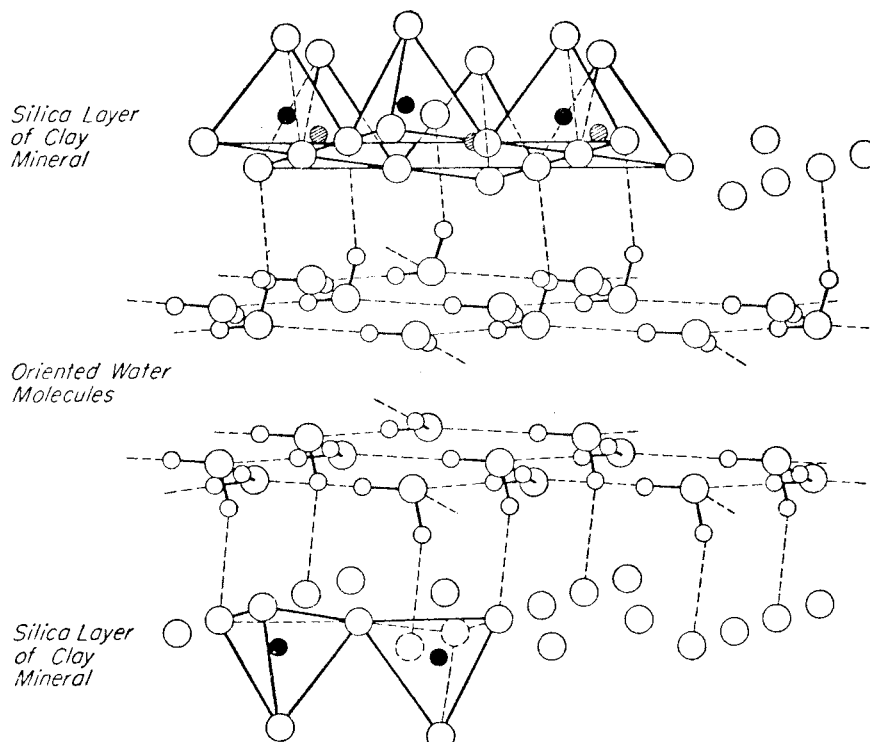


Fig 11b. Exempel på strukturell uppbyggnad hos inlagrat vatten i t ex montmorillonit enligt HENDRICKS och JEFFERSON. Bindningen sker genom vätebryggor.



1

1
μm1
μm

2

Fig 12. Elektronmikroskopbilder av ultratunna snitt av naturlig Na-montmorillonit (överst) och Ca-montmorillonit (underst). Vattenkvot ca 34% för båda leror.

därför likväl komma till användning. Den mikrostrukturella (texturella) skillnaden framgår av Fig 12.

Den vitala frågan är naturligtvis vilken bentonit/kvartskomposition som bör väljas. Preliminära svällningsförsök har utförts med Na-bentonit och naturlig silt från Piteå. Materialens kornfördelningskurvor redovisas i Fig 13 och deras mineralsammansättning illustreras av röntgendiffraktogrammen i Fig 14.

Komponenterna blandades i lufttorrt tillstånd och packades med ett obetydligt packningsarbete i en ödometer, som utgörs av en ϕ 50 mm cylinder som i sin undre del innehåller en filtersten. Det 20 mm tjocka packade provet täcktes av en i axiell led rörlig filterstenförsedd stämpel (Fig 15).

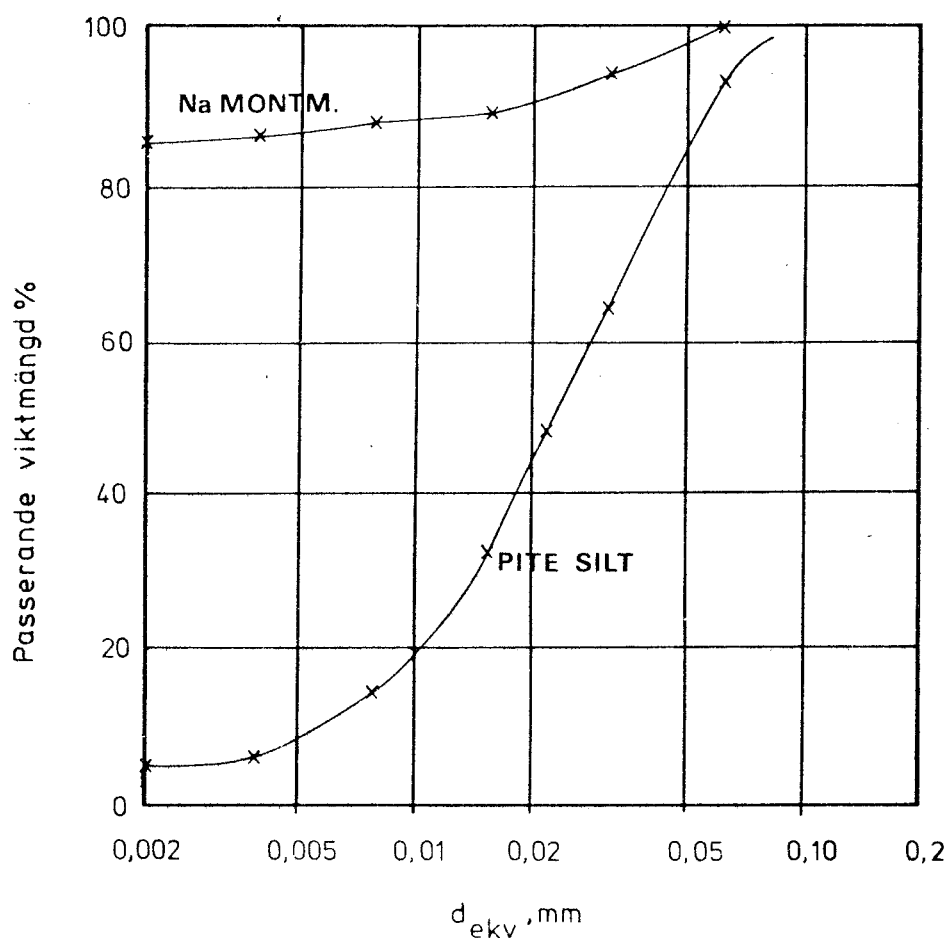


Fig 13. Kornfördelningskurvor för Na-bentonit (Volclay) och Pitesilt

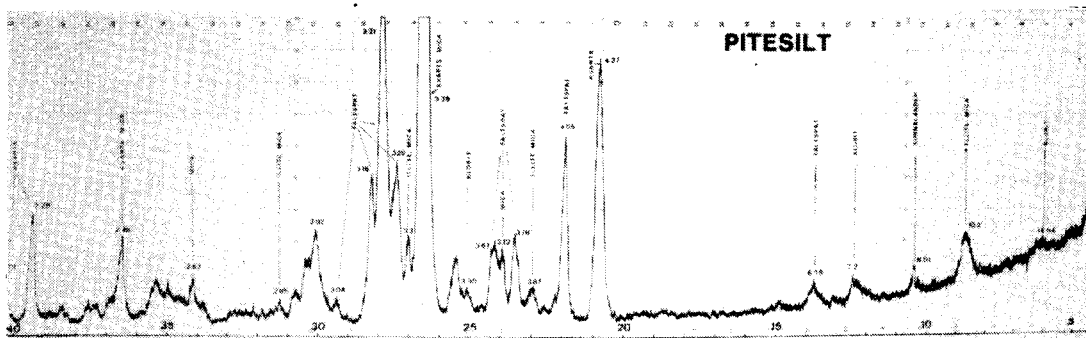
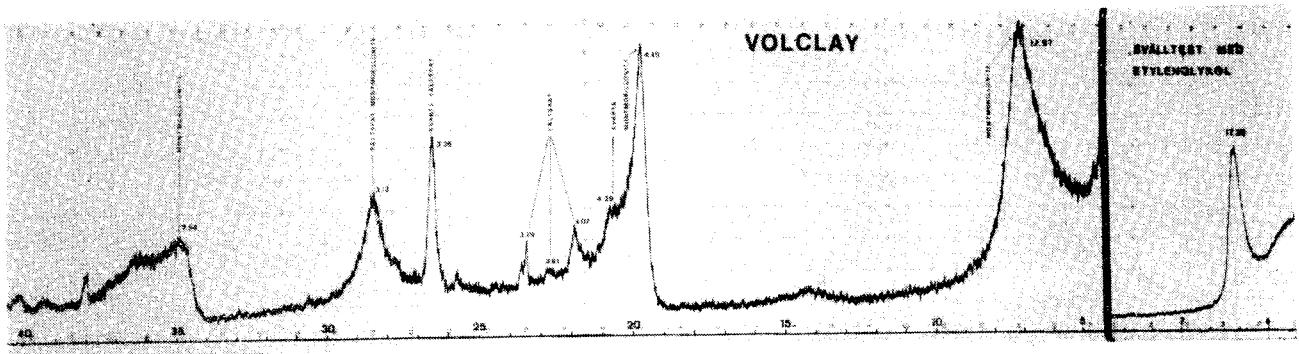


Fig 14. Röntgendiffraktogram, överst Na-bentonit, underst Pitesilt. Na-bentoniten domineras helt av montmorillonit men innehåller även något kvarts och fältspat. Pitesilten domineras av kvarts och fältspat men innehåller även något klorit, mica/illit och hornblände.

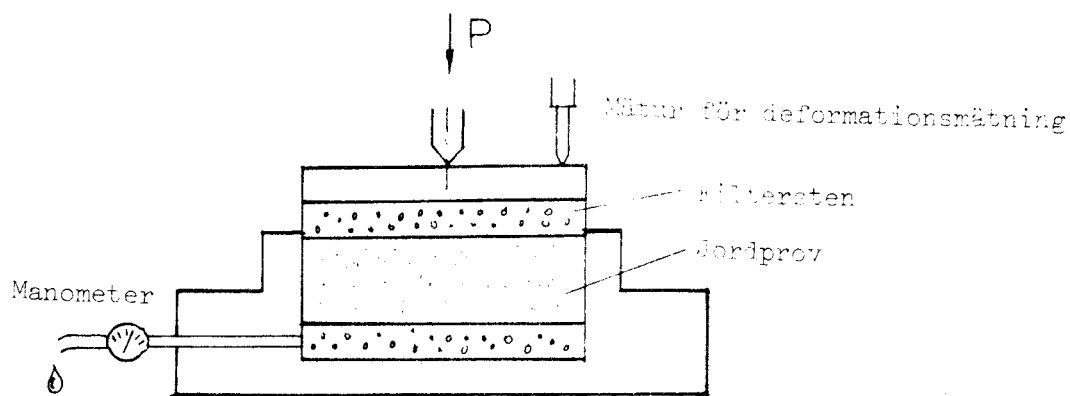
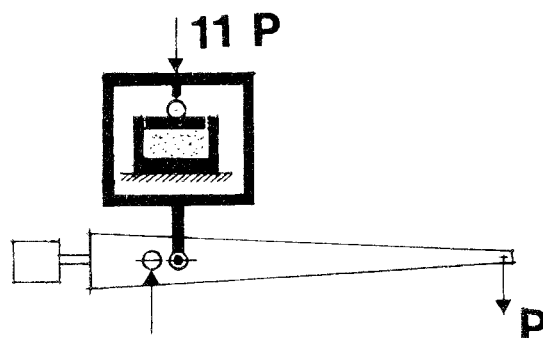
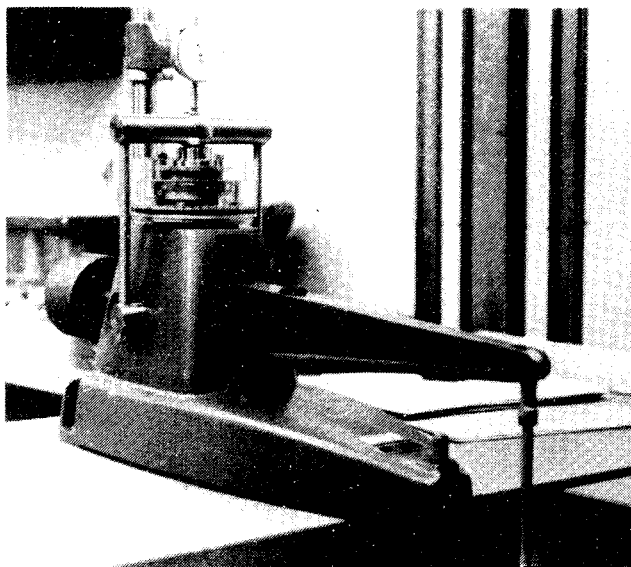


Fig 15. Ödometer

Vid försökets igångsättning tillsattes vatten till den undre filterstenen. Den övre stämpeln belastades så att provet under hela försöket var utsatt för det yttre trycket 10 kPa. Anordningen, som illustreras av Fig 16, hade alltså en utformning som simulerar fallet med buffertsubstans i ett icke plomberat deponeringshål. Trycket 10 kPa illustrerar inverkan av buffertsubstansens och kapselns egentyngd. Vattnet, benämnt "normalvatten" med följande sammansättning: Na HCO₃ 0.621 g, KHCO₃ 0.161 g, Ca SO₄·2 H₂O 1.255 g, Mg Cl₂·6 H₂O 0.970 g och Ca CO₃ 1.068 g, allt per 10 liter, framställdes på geoteknikavdelningen.

Resultatet av undersökningen, som illustreras i Fig 17, visar att svällningen är obetydlig hos materialet med 10% bentonit och 90% Pitesilt. Ökar bentonithalten till 20% blir svällningsegenskaperna påtagliga och man ser att svällningen inte är färdigutbildad ens på flera dagar. Den klara skillnaden mellan de två blandningarna illustrerar det i geotekniken kända förhållandet att partiklar tillhörande lerfraktionen inte utgör ett kontinuum och därför inte heller bestämmer de mekaniska egenskaperna förrän lerhalten överstiger ca 15%. I materialet med 10% bentonit ligger sannolikt montmorillonitpartiklarna (lerpartiklarna) i porutrymmena

mellan siltpartiklarna som utgör ett kontinuerligt nätverk (Fig 18).



UPPER: VIEW OF OEDOMETER

LOWER: PRINCIPLE OF OPERATION. SWELLING CAN BE DETERMINED AT ANY LOAD. ALSO, THE SWELLING PRESSURE CAN BE DETERMINED BY LOADING THE PISTON TO KEEP SAMPLE VOLUME CONSTANT.

Fig 16. Ödometeranordning för svällningsmätning

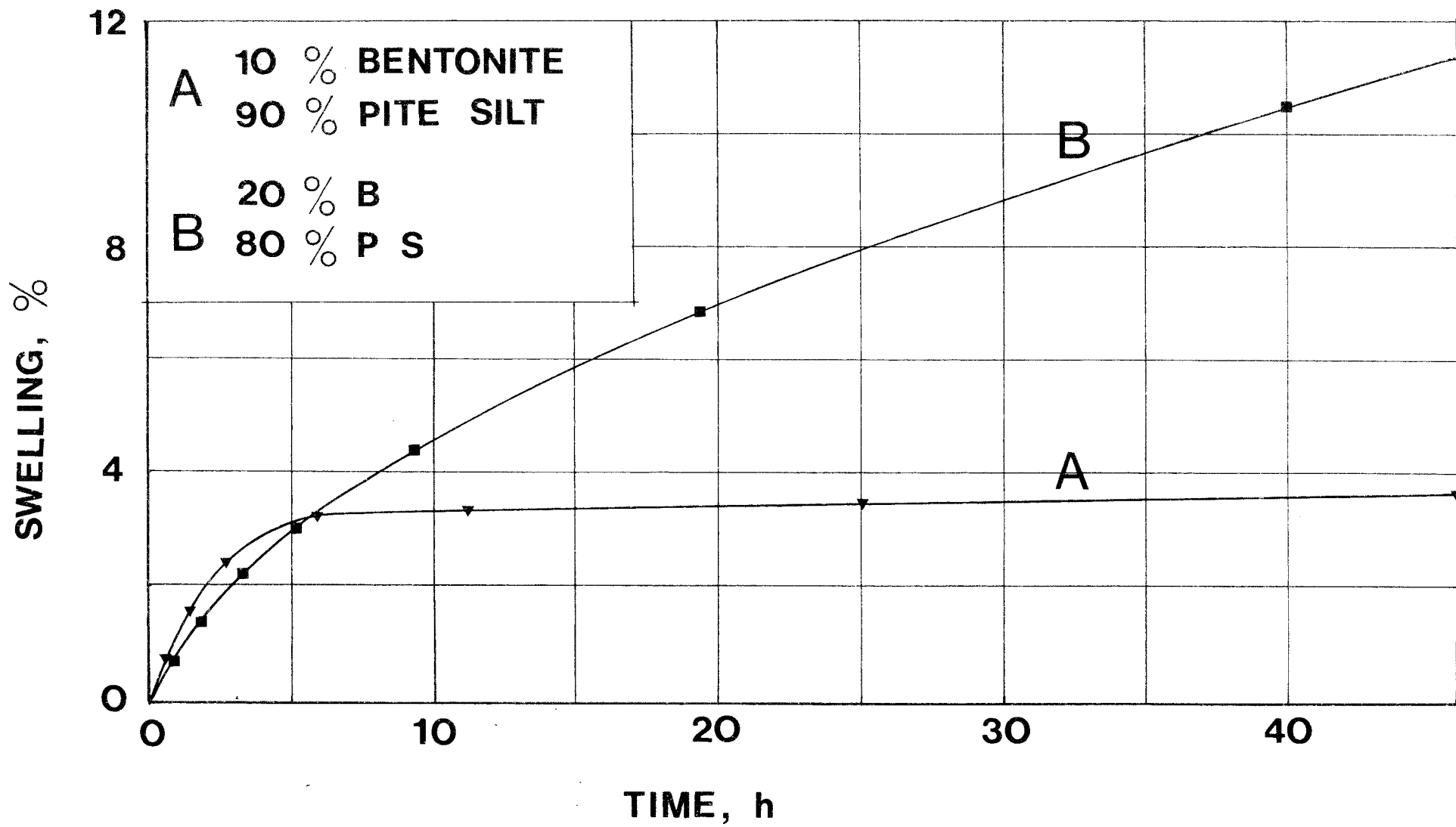
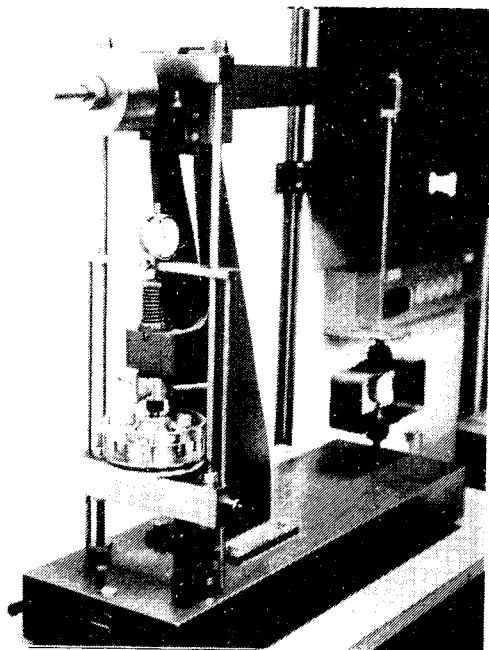


Fig 17. Resultat av svällningsmätning vid trycket 10 kPa



Fig 18. Scanningmikrofotografi av 10% Na-bentonit och 90% Pitesilt. Siltkornen (huvudsakligen kvarts) utgör en nästan kontinuerlig grundmassa medan bentonitens montmorillonitpartiklar (små tunna flak) i huvudsak återfinns som aggregat i porerna. Förstoring ca 1000 x.

Preliminära försök har också utförts med bestämning av svällningstryck. För dessa försök har dels NGI:s svälltrycködometer (Fig 19) dels de ovannämnda ödometrarna använts.



VIEW OF NGI OEDOMETER USED FOR DETERMINING THE SWELLING PRESSURE

Fig 19. NGI:s svälltrycködometer

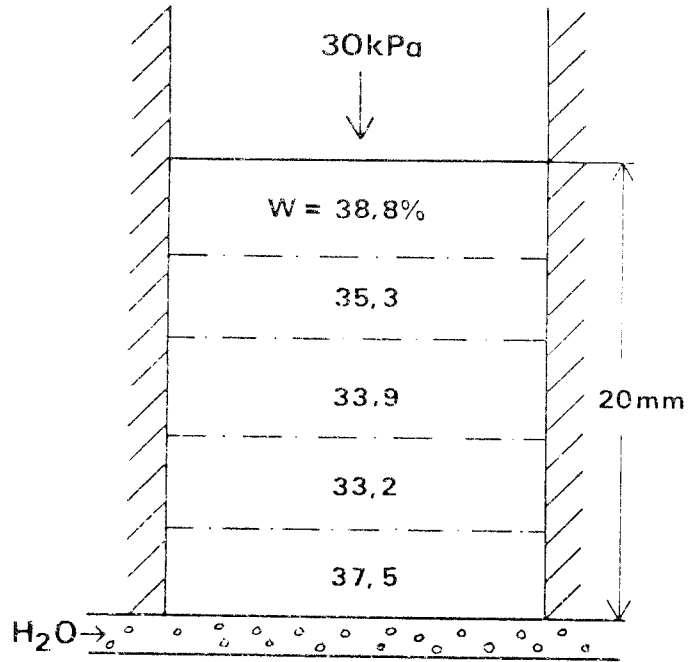
Provets belastning (svällningstrycket) har härvid hela tiden anpassats så att provvolymen hållits konstant. Jämvikt uppkom efter högst 3 dygn och härvid mätta tryck blev de som anges i Tabell 3.

Tabell 3. Svällningstryck hos bentonit/pitesilt vid rumstemperatur (förhindrad volymutvidgning)

Bentonithalt, %	Svällningstryck, kPa
10	30
20	110
50	190

**SWELLING
PRESS. MEASURED**

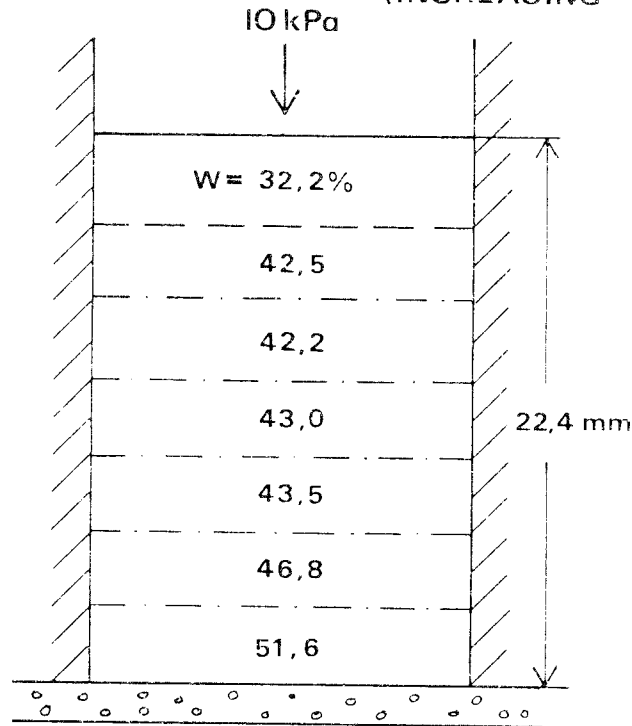
(CONSTANT VOLUME)



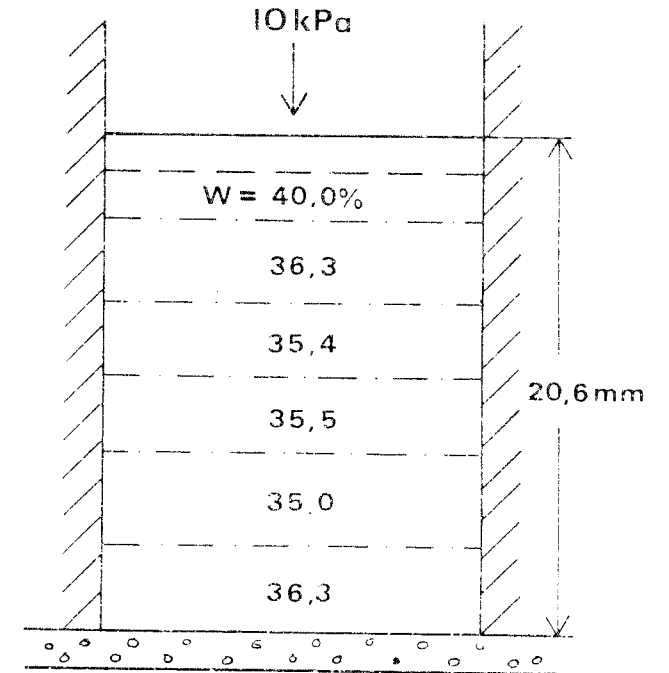
10% BENTONITE
90% PITE SILT

SWELLING MEASURED

(INCREASING VOLUME)



20% BENTONITE
80% PITE SILT



10% BENTONITE
90% PITE SILT

Fig 20. Vattenkvoten bestämd efter svällning- och svällningstryckförsök

Efter försöken med mätning av svällning och ett av försöken med mätning av svällningstryck togs proven ut och snittades för bestämning av vattenkvoten. Härvid bekräftades en tidigare erfarenhet (CTH 1973) att porvattenfördelningen blir mycket jämn (se Fig 20). I ett deponeringshål blir naturligtvis inte hela buffertmassans mantel- och basytor likformigt exponerade för tillströmmande grundvatten och det är därför inte möjligt att med rimlig noggrannhet beräkna tiden som erfordras för uppkomst av jämvikt med avseende på vattenupptagning. Det är emellertid rimligt att anta att sedan läns-pumpning av respektive tunneldel upphört kommer vattenupptagningen att ha utbildats på några veckor vid plomberade deponeringshål. Förloppet bör testas i laboratorium. Vid öppna hål däremot kan processen säkerligen pågå under betydligt längre tid utom vid så låg bentonithalt som 10%.

Man ser av Fig 20 att vattenkvoten blir relativt betydande. Också vid svällningstryckförsöken, dvs vid de förhållanden som kommer att råda vid plomberade deponeringshål, kommer vattenkvoten att bli ganska betydande. För att få en uppfattning om hållfasthetens storlek vid de vattenkvotvärden som kan uppkomma vid plomberade deponeringshål har den odränerade skjuvhållfastheten bestämts medelst konprov. Resultatet av undersökningen illustreras av Tabell 4.

Tabell 4. Odränerad skjuvhållfasthet bestämd med konprov på bentonit/Pitesilt. Rumstemperatur.

Bentonithalt %	Vattenkvot %	τ_{fu} kPa
10	35	16
20	45	15
33	55	15

Tillämpar vid Ekv (4) ser vi att dessa hållfasthetsvärden svarar mot ett tillåtet tryck av kapselns egen tyngd på buffertmassan av minst ca 100 kPa. Vid icke plomberade hål kommer emellertid vattenkvoten att öka vilket, som även CTH-undersökningen visar, kommer att ge lägre bärighet utom då bentonithalten understiger 10%. Man kan alltså dra slutsatsen att det också vid så låg bentonithalt som 20% är nödvändigt att tillämpa principen med plomberade deponeringshål för att begränsa vattenkvoten och därmed nå en acceptabel hållfasthet. Det faktum att kvartspartiklarna utgör ett kontinuerligt nätverk vid en bentonithalt lägre än ca 10% innebär emellertid att τ_{fu} (den odränerade skjuvhållfastheten) inte är ett relevant mått på hållfastheten. Så bentonitfattiga blandningar fungerar som friktionsmaterial vars hållfasthet uteslutande bestäms av inre friktionsvinkeln ϕ' , som är av storleksordningen 35° . Det innebär, som förut visats, att det tillåtna trycket ur bärighetssynpunkt kommer att bli ca 120-150 kPa (fall b) oavsett om deponeringshålen plomberas eller inte. Vi har därför uppfattningen att det ur svällnings- och hållfasthetssynpunkt är lämpligt att begränsa bentonithalten till 10-20%. Svällningstrycket kommer då att uppgå till 30 kPa för 10% bentonithalt och för 20% bentonithalt till ca 110 kPa. Det förtjänar att påpekas att vattentrycket (porvattentrycket) i buffertmassan sedan hela deponeringsanläggningen tagit i bruk kommer att uppgå till 5 à 10 MPa om djupet är 500 à 1000 m. Detta kommer emellertid inte att påverka hållfastheten eftersom den är en funktion endast av effektivtrycket ("korntrycket"), dvs skillnaden mellan totaltrycket och porvattentrycket. Totaltrycket är just summan av effektivtrycket och porvattentrycket. Däremot är det troligt att dylika höga vattentryck leder till en mycket hög grad av vattenmättnad, dvs luft löser sig i vattnet.

3.3 Temperaturinverkan

Fyra viktiga primära effekter uppstår:

1. Förhöjd temperatur orsakar temperaturgradienter som ger upphov till vattenströmning.
2. Förhöjd temperatur kan orsaka bildning av vatten i gasfas.
3. Förhöjd temperatur påverkar buffertmaterialets spännings/deformationsegenskaper och permeabilitet.
4. Förhöjd temperatur kan orsaka kristallstrukturella förändringar.

Temperaturbetingad strömning

En lokal uppvärmning av grundvattnet föranleder en strömning mot markytan. Grundvatten strömmar till underifrån och från sidorna och det uppstår en cirkulerande vattenrörelse i en till en början mycket liten influensvolym. Denna volym kommer att öka med ökande temperatur. Omfattningen av vattenströmningen kan uppskattas när temperaturfördelningen beräknats för hela systemet. Strömningshastigheten är utomordentligt låg på grund av den mycket låga permeabiliteten i buffertmaterialet. Man kan emellertid se att det finns behov av att minimera hela systemets permeabilitet. Det sker bäst genom att anbringa en bädd av buffertmaterial i tunnlarna. Bädden kan med fördel bestå av samma komponenter som buffertmaterialet men med högre halt av bentonit (ca 50%). Om bädden inte fyller tunneln kommer den vid vattenupptagning att få mycket lös konsistens men det har ingen negativ praktisk betydelse eftersom ingen trafik kommer att ske i tunnlarna. Tvärtom vinner man att öppna spalter i berget som teoretiskt sett skulle kunna uppkomma som

följd av tektoniska rörelser omgående fylls av den halvflytande massan. Det bör tilläggas att sådana rörelser på så stora djup som det är fråga om skulle ha helt förödande effekt vid markytan inom mycket stora områden. Om massan anbringas så att den fyller eller nästan helt fyller tunneln kan svällningen inte ske fritt. Den kommer att utöva ett svällningstryck mot tunnelperiferin som troligen ger ännu bättre in-trängning och tätning av ytliga sprickor.

Temperaturbetingad gasbildning

Bliir vattentemperaturen tillräckligt hög går allt större del av vattnet i ångform. Ser man på slutstadiet med deponering på 500 m djup och med en helt vattenfylld anläggning är vattnets kokpunkt ca 280°C och vid 1000 m djup ca 333°C. Ångbildningen bör därför bli begränsad också vid hög temperatur. Av andra skäl (t ex inverkan på stabiliteten hos kristallstrukturen hos komponenterna) är det dock lämpligt att begränsa den högsta tillåtna temperaturen (dvs vid kapslarnas yta) till ca 100°C oberoende av deponeringsdjupet.

Det är i detta sammanhang som man tydligt ser vikten av att buffertsubstansen har tillräckligt goda värmeledningsegenskaper. Med ett acceptabelt fel ($\pm 20\%$) kan värmeledningstalet λ för torrt pulver beräknas om man känner kompaktdensiteten ρ_s och torrdensiteten ρ_D . För torrt pulver spelar inte mineralpartiklarnas värmeledningstal någon större roll medan däremot de luftfyllda porernas andel av totala volymen har avgörande betydelse. För både bentonit- och kvarts/fältspatpulver ligger λ inom området 0.2-0.5 W/mK då ρ_D varierar mellan 1.4 och 2.0 t/m³. I vattenmättat material har däremot de olika mineralkomponenternas λ -värden större betydelse. Vi kan skriva:

$$\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{vatten}}^n \cdot \lambda_{\text{partiklar}}^{1-n} \quad (6)$$

där n =porositeten

För 10% bentonit/90% (viktprocent) kvartspulver blir $\lambda \sim 3$ ä 3.5 W/mK, för 20% bentonit/80% kvartspulver blir $\lambda \sim 2.5-3$ W/mK och för 30% bentonit/70% kvartspulver blir $\lambda \sim 2-2.5$ W/mK. Motsvarande värden är endast ungefär hälften så höga om kvartsen ersätts av fältspat.

Här är det viktigt att peka på en tänkbar svårighet vid deponeringen. Kapslarnas yttemperatur måste förväntas vara hög redan i det stadium då de anbringas och är buffertmassan vattenmättad kan man inte utesluta att strömmande vattenånga kan skapa gaskanaler (kokning). I den torra pulvermassan sker den eventuellt uppkommande, obetydliga ångtransporten i det kontinuerliga porsystemet utan att ge upphov till strukturella effekter. Då vatten börjar tränga in i massan sker förångning som sannolikt lämnar en relativt torr zon närmast kapslarna. Denna zon kan vid icke plomberade hål nå upp till tunnelbotten. Inte förrän i deponeringens slutstadium då mycket höga vattentryck kommer att verka kommer vatten att tränga in i denna zon och ge fullständig eller nästan fullständig vattenmättnad. Man måste alltså ta hänsyn till att λ är lägre i en zon närmast kapslarna. Om det blir tal om kapselyttemperaturer högre än ca 80 ä 100°C är det därför fördelaktigt att plombera borrhålen eftersom fri strömning av vattenånga med ytlig uppluckring av buffertmassan då inte kan ske. För att få en uppfattning om de nämnda processernas omfattning och karaktär bör tekniken prövas i åtminstone halvstor skala i laboratoriet.

Ett pilotförsök i liten skala har utförts med 10% Na-bentonit och 90% Pitesilt. Bakgrunden till försöket är i princip:

Så länge buffertmassan är torr är den homogen och har i alla sina delar konstanta värmeledningsegenskaper och homogen strukturell uppbyggnad. Då vatten kommer

i kontakt med massan kommer vatten att inlagras och porsystemet att bli delvis fyllt med vatten. Härigenom ökas värmeledningstalet. Om temperaturen i massan vore densamma i alla punkter skulle vattenkvoten (enligt vad förberedande experiment visar) bli jämnt fördelad. Eftersom en temperaturgradient råder måste man emellertid förvänta att vattenkvoten och vattenmättnadsgraden, sedan jämvikt utbildats, blir högst i massans perifera delar och lägst i kapselns omgivning. Betydelsen härav är:

- Värmeledningstalet varierar i massan. Det betyder att en säker beräkning av detta tal endast kan göras om man känner vattenmättnadsgradens fördelning. Detta är av vital betydelse för beräkningen av temperaturfördelningen i hela systemet.
- Inlagringen av vatten innebär att vattenånga bildas i de inre varmaste delarna av massan. I det slutna systemet kommer ångan att stå under tryck och det kan finnas risk för att den strömmar och bildar kaviteter eller kanaler i massan. Det skulle äventyra den låga permeabilitet som man eftersträvar.

Vid försöket simulerades förhållandena in situ genom att packa in torr buffertmassa i en permeabel behållare ("borrhålet"). "Kapseln" utgjordes av en elektriskt uppvärmd metallkropp med längden 15 cm och diametern 5 cm. Dess yttemperatur kunde hållas konstant inom intervallet rumstemperatur till 150°C. "Behållaren" utgjordes av en finmaskig perforerad stålcylander med höjden 20 cm och diametern 25 cm. Den hade på insidan ett 1 cm tjockt filter av aralditstabiliserad sand och ett lock av stålplåt med täta genomföringar av elledningar för uppvärmningen av "kapseln" och för mätning av temperaturen i tre punkter (motståndsmätning). Kapselns temperatur hölls automatiskt vid 100°C. Behållaren var fastskruvad på botten av ett

upptill öppet plåtkärl. Anordningens komponenter illustreras av Fig 21.

Torr pulvermassa packades in i behållaren med lock och kapsel på plats. Härfter monterades bottendelen varvid tillsågs att massan helt fyllde behållaren. Kapselns temperatur ökades till 100°C och hölls under hela försöket vid denna temperatur. Rumstemperaturen hölls konstant genom temperaturreglering av lokalen. Temperaturutvecklingen i massan följdes och jämvikt inväntades. Härfter fylldes den yttre behållaren med vatten och temperaturjämvikt inväntades. Denna jämvikt förutsätts motsvara också det stadium då vattenupptagningen nått jämvikt vid det aktuella vattentrycket. Härfter slogs värmen av, plåtkärlet tömdes på vatten, behållaren öppnades och provtagning i väl specificerade punkter verkställdes. Arbetet illustreras av bildserien i Fig 22. De upptagna proven undersöktes med avseende på vattenkvot och strukturell uppbyggnad.

Fig 23 visar temperaturutvecklingen. Man ser att temperaturjämvikt i den torra massan uppnåddes redan efter ca 12 timmar. Då vatten (30°C) började tas upp i massan sjönk temperaturen temporärt ca 15°C i kapselns omgivning men ökade sedan efterhand till den ursprungliga temperaturen (ca 75°C). Jämvikt uppnåddes efter ca 4 dygn. Fig 24 visar vattenkvotfördelningen efter denna tid. I behållarens lock hade en manometer monterats för mätning av gastrycket. Denna visade atmosfärtryck under hela försöket vilket visar att gas (luft och vattenånga) inte strömmade och ansamlades vid behållarens övre del. Den "torra" pulvermassan, vars vattenkvot är ca 5%, anbringades med mycket ringa packningsarbete och fick skrymdensiteten $\rho=1.41 \text{ t/m}^3$. Kompaktdensiteten är ca 2.65 t/m^3 . Med ledning av vattenkvotvärdena har vattenmättningsgraden beräknats och givits i Fig 24.

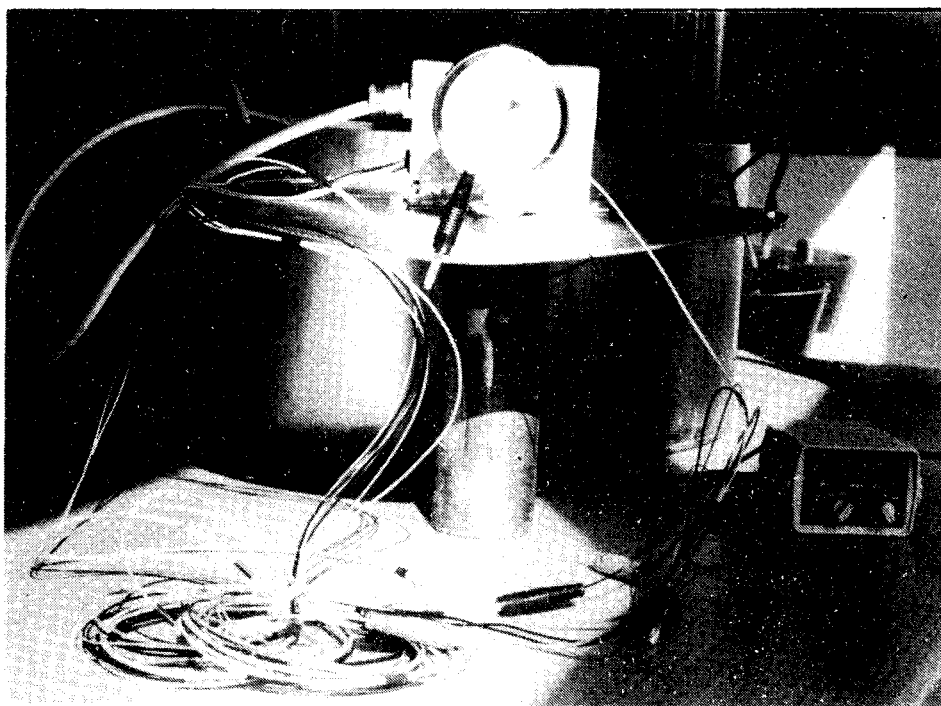
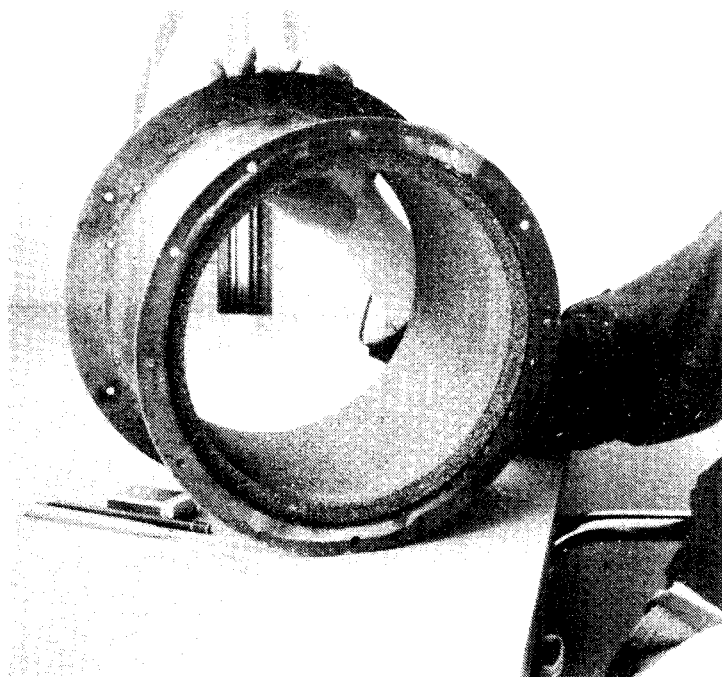


Fig 21. Överst: Stålcylindern med sandfilter.
Underst: Stålcylinderns lock med "kapsel".
I bakgrunden den yttre plåtbehållaren.

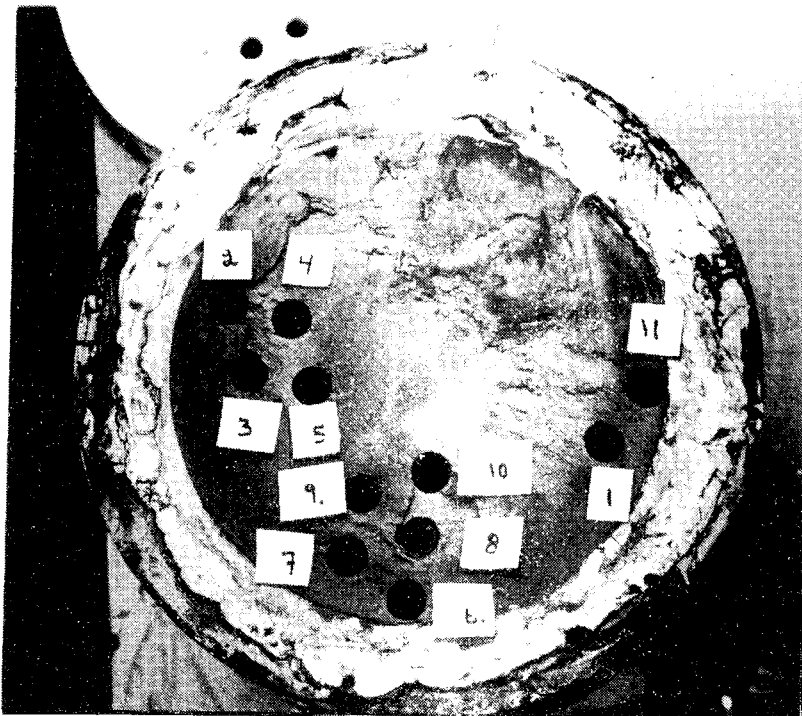
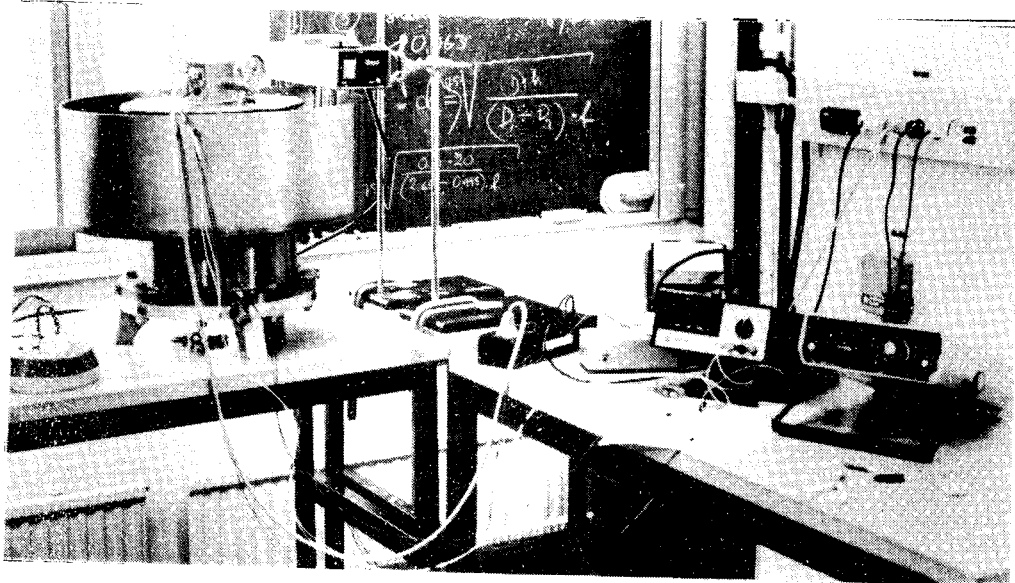


Fig 22. Överst: Anordningen monterad. Temperaturmätning pågår.
 Underst: Cylindern öppnad och provtagning verkställd. Ojämnheterna i ytan beror på att material häftat vid plåtbotten och följt med denna.

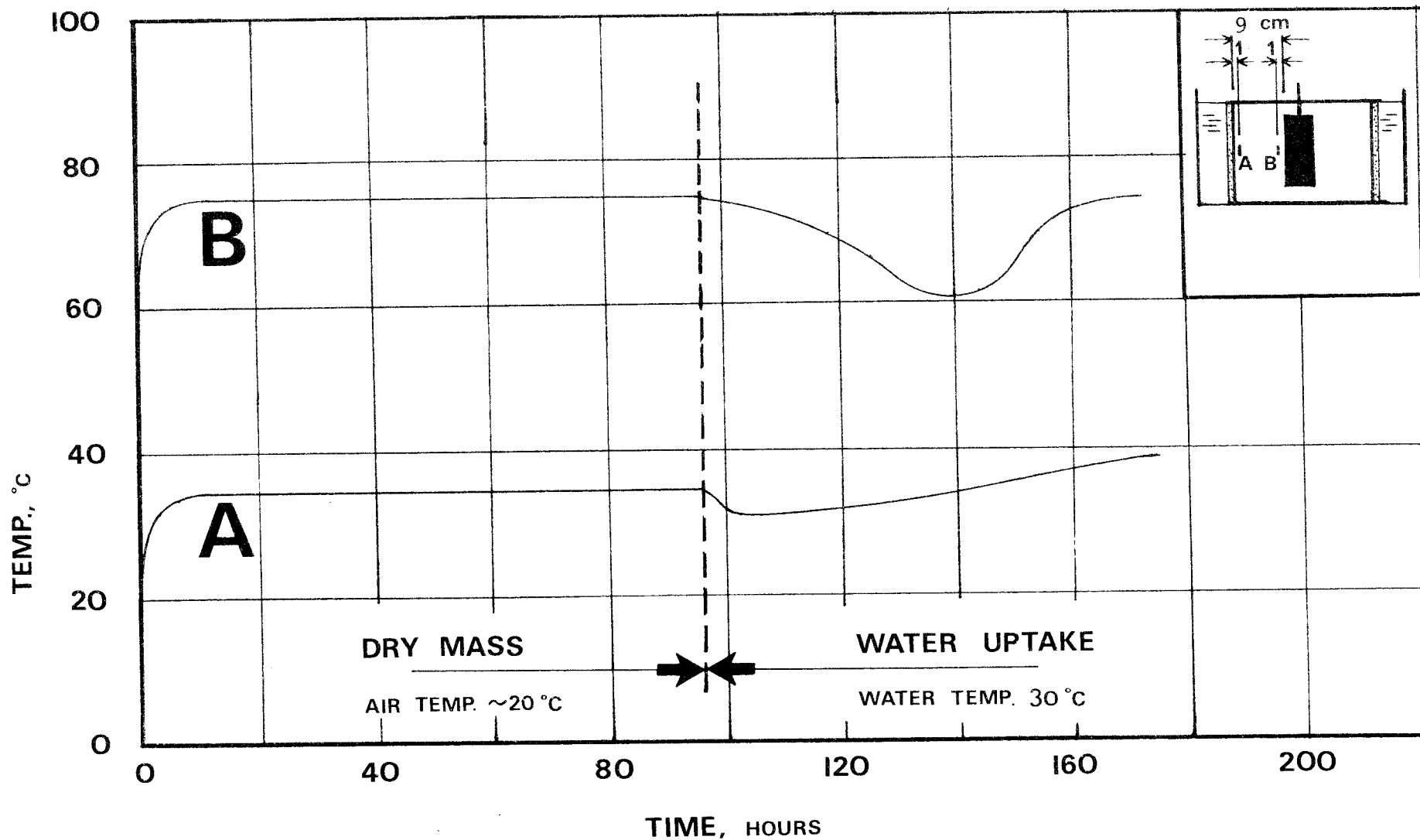


Fig 23. Temperaturutvecklingen i pulvermassan som funktion av tiden.

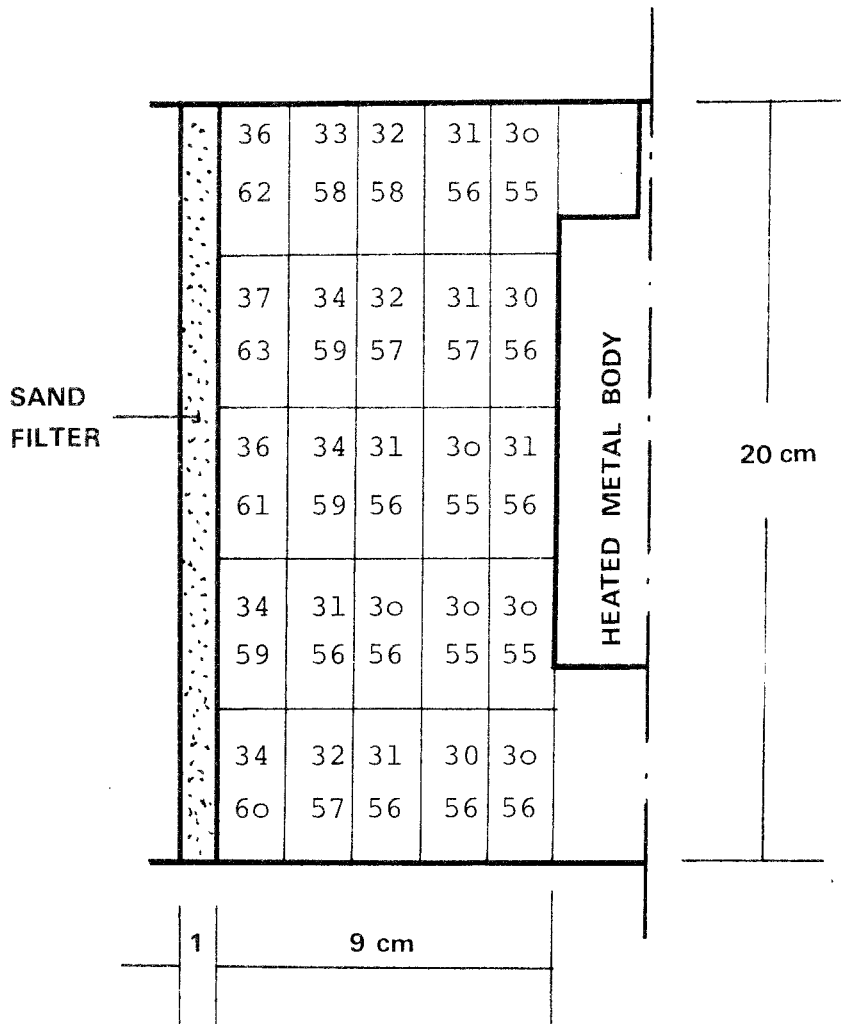


Fig 24. Fördelning av vattenkvoten (övre värde för respektive element) och vattenmättningsgraden i % (undre värde för respektive deelement) sedan temperaturjämvikt uppkommit. En överraskande jämn vattenfördelning har erhållits. Likaså är vattenmättningsgraden nära den varma kapseln överraskande hög.

För att få en uppfattning om ev strukturell påverkan vid vattenupptagningen och ångbildningen användes en teknik som visat sig mycket lämplig för att identifiera inhomogeniteter (sprickor, håligheter, gaskanaler m m) i naturliga jordprover. Den innebär att cylindriska "ostörda" prover tagna med en rörformig provtagare "genomlyses" med röntgenstrålning i olika riktningar. Resultatet av denna testning visade att massan var nästan helt homogen (Fig 25). Uppluckrade zoner eller kanaler saknades helt och det är uppenbart att någon ansamling av gas (luft, vattenånga) eller någon annan strukturell förändring i massan inte uppkommit.

Resultatet av pilotförsöket visar att vattenmättningsgraden är förvånansvärt hög i kapselns närmaste omgivning. Man bör också kunna räkna med att den blir ännu högre i det stadium då vattentrycket ökar kraftigt, dvs då hela deponeringsanläggningen tagits i bruk.

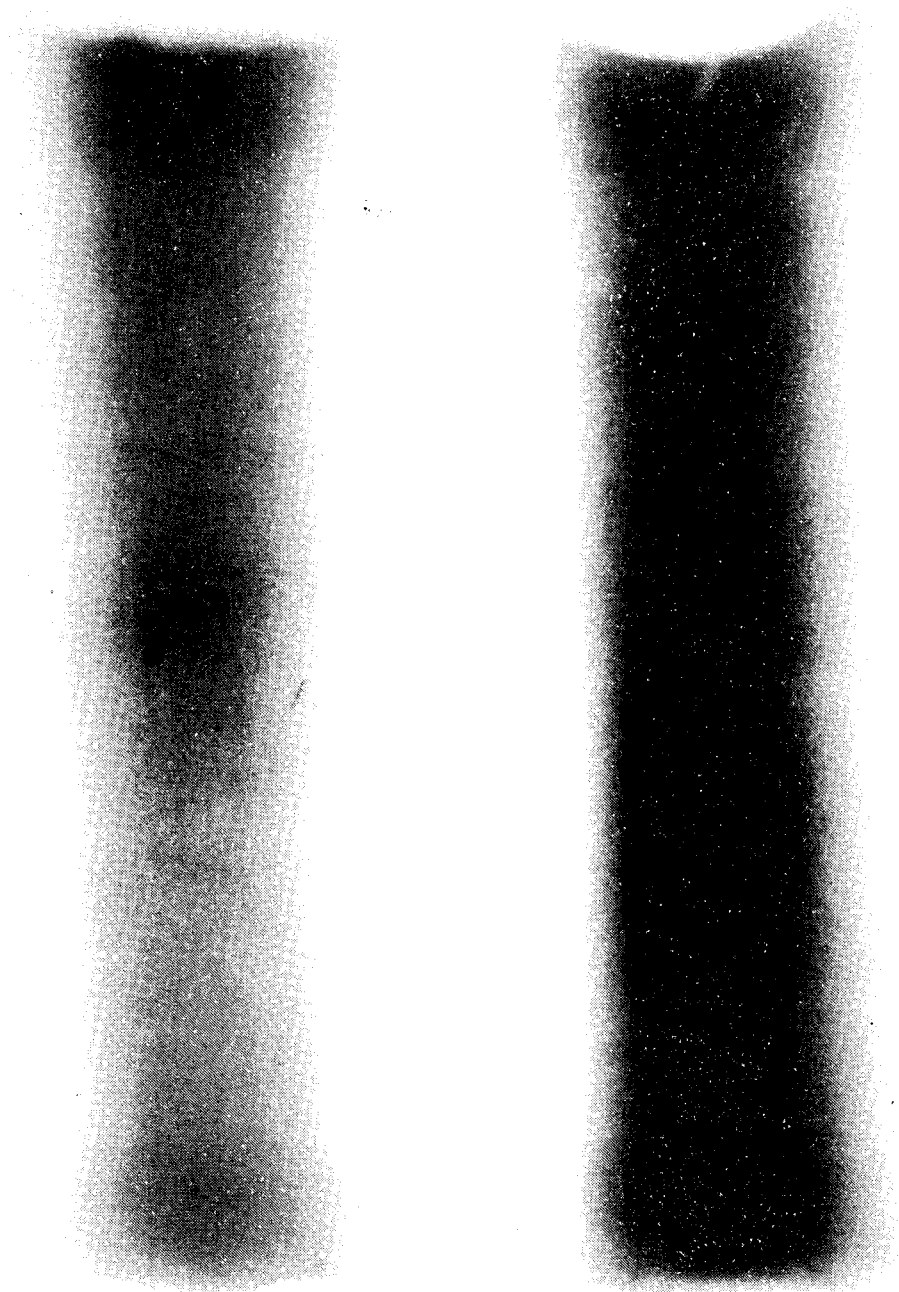


Fig 25. Röntgenbilder av prover ur buffertmassan efter vattenupptagning. De små, nätt och jämnt iakttagbara heterogeniteterna beror på störningar vid provtagningen. De två små svarta kropparna är skrapskador på röntgenfilmen.

Temperaturinverkan på buffertmassans spän-
nings/deformationsegenskaper-----

Denna fråga har återigen den största betydelse för valet av buffertmassans sammansättning. Grundläggande för förståelsen av temperaturens inverkan är den moderna uppfattningen rörande skjuvhållfasthetens "kohesionsandel" (c') hos finkornig jord. Vid de vattenkvoter och effektivtryck som det är tal om i det aktuella fallet är lerpartiklarna åtskilda av tunna vattenfilmer som har en betydande fasthet. Dessa måste emellertid uppfattas inte som plastiska med ett bestämt gränsvärde då flytning börjar äga rum, utan som högviskösa. Redan på denna grund kan man postulera att lerans fasthet bör vara temperaturberoende. Det har också visats (HOUWINK, 1958) att viskositeten η hos lera kan tecknas:

$$\log \eta = \log A + \frac{B}{T} \log e \quad (7)$$

A = konstant

B kan sättas till 10^3

C = absoluta temperaturen

Detta samband innebär att viskositeten minskar med ca 50% då temperaturen ökas från 20°C och 100°C .

Man vet också från ödometerförsök att kompressibiliteten är en funktion av temperaturen (Fig 26). Det är därför uppenbart att man måste räkna med en reduktion av hållfastheten och viskositeten hos buffertmassan. Det bör emellertid också leda till en reduktion av svällningstrycket. Båda effekter har undersökts vid några pilotförsök i Luleå.

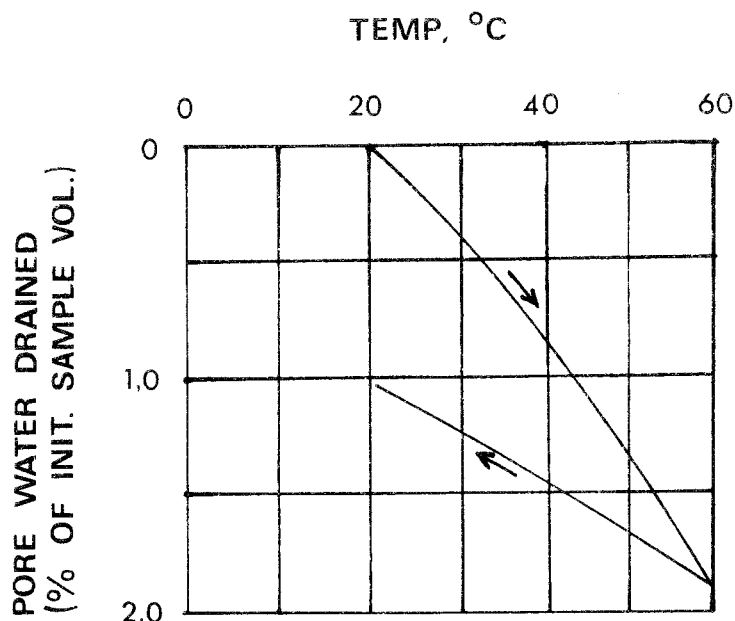


Fig 26. Exempel på delvis reversibel konsolidering av lera som följd av temperaturökning (MITCHELL).

1. Inverkan på skjuvhållfastheten

Temperaturens inverkan på skjuvhållfastheten bestämdes på en blandning av 10 viktprocent bentonit och 90% Pitesilt som packades med ett obetydligt packningsarbete i en skjuvbox av SGI-typ (Fig 27).

Konsolidering med vattenupptagning skedde under ett pålagt tryck av ca 50 kPa. Härefter skjuvades provet vid rumstemperatur vid dränerade förhållanden och vid ett normaltryck av 53 respektive 105 kPa. I en andra serie skjuvades provet vid ca 80°C temperatur genom att vattnet i behållaren hölls uppvärmt med hjälp av för ändamålet tillverkade termoelement. Också här valdes normaltrycken 53 och 105 kPa. I båda serierna var skjuvningshastigheten konstant och lika med 0.013 mm/min. Brott tolkades konventionellt som skjuvspänningen vid en vinkeländring av 0.15 radianer. Vid samtliga försök svarade detta också mot maximal skjuvspänning. Resultatet framgår av Fig 28.

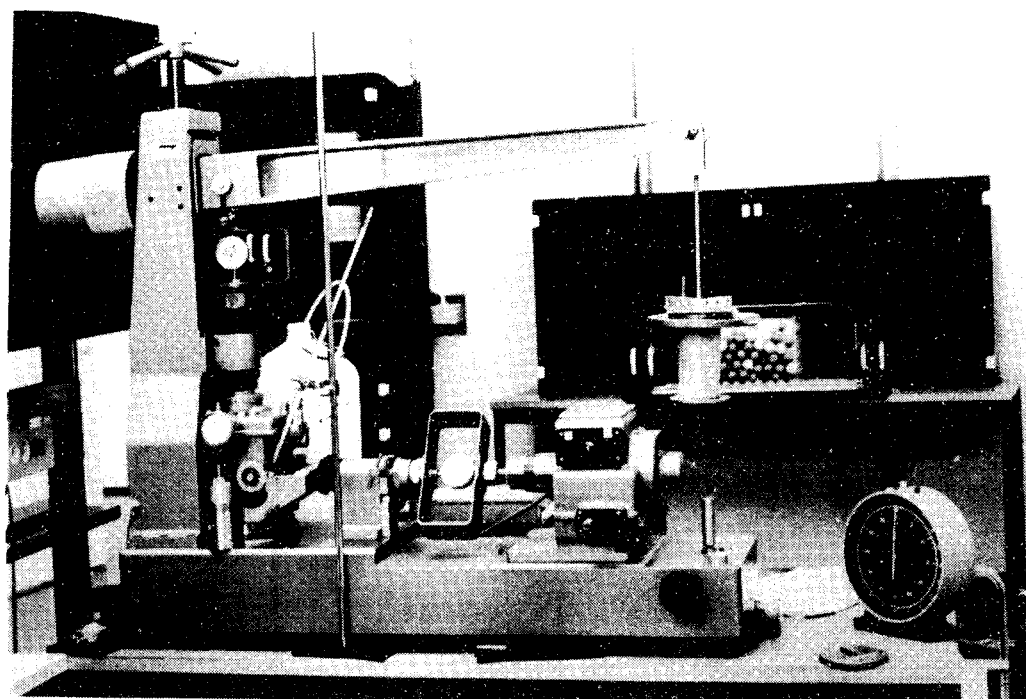


Fig 27. Skjuvapparat med vattenbad för undersökning av temperaturens inverkan på skjuvhållfastheten. Den lutande termometern sticker ned i badet som omger själva skjuvboxen. Normalkraften mot provet påförs via hävarmen medan skjuvkraften åstadkoms av drivaggregatet (motor + växellåda till höger på stativet) via kraftmätaren.

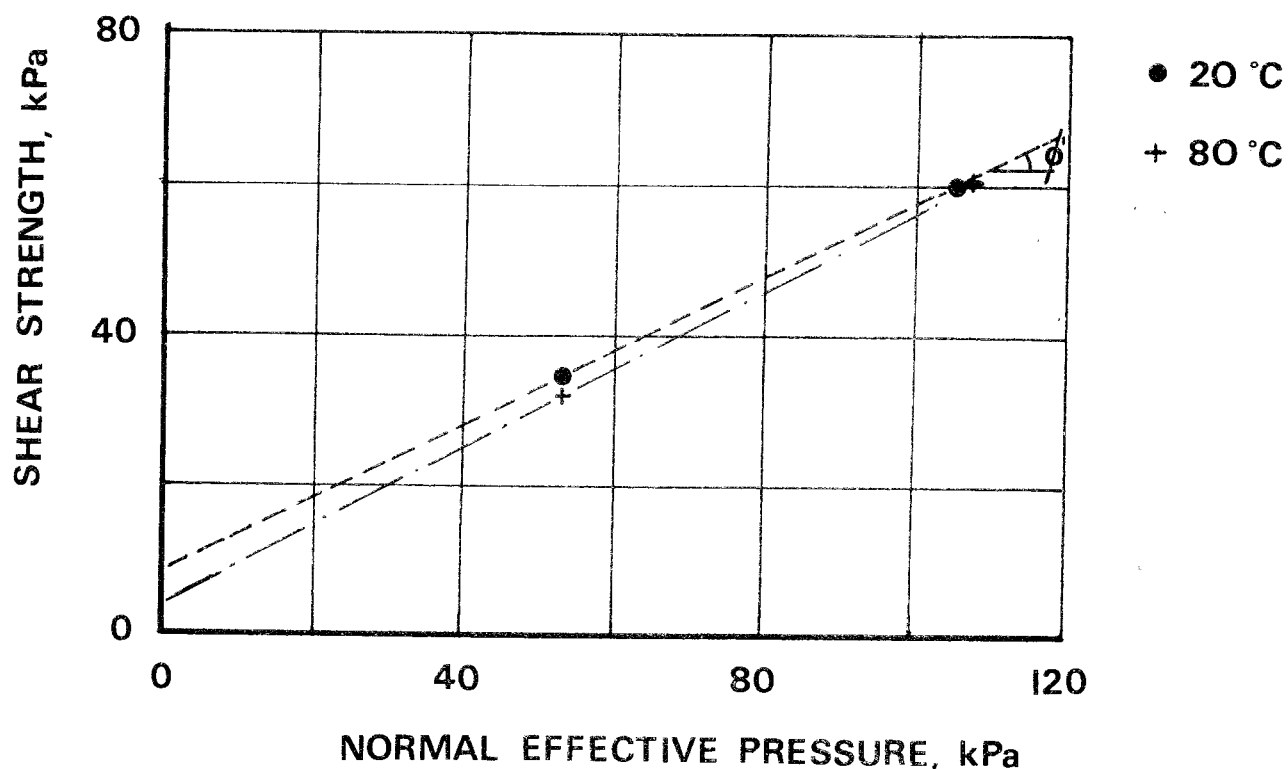


Fig 28. Resultat av skjuvförsök på 10% Na-bentonit och 90% Pitesilt. Vattenkvoten efter skjuvning vid det högre normaltrycket var ca 29%.

Man ser att brottenveloppens lutning endast obetydligt ändras vid temperaturförhöjning från rumstemperatur till ca 80°C . Ändringen hos inre friktionsvinkeln ϕ' är således endast några få procent. Brottenvelopperna har i båda fall intercept på τ -axeln vilket ger intrycket att materialet har kohesion. Av volymmätningen under skjuvningens gång framgår emellertid att värdena för det lägre normaltrycket påverkas kraftigt av dilatans. Kohesionen kan därför, som tidigare påpekats, för denna materialkomposition sättas lika med noll. Friktionsvinkeln ϕ' blir då ca 31.5° vid 20°C och ca 31° vid 80°C . Det är att märka att lagringstätheten vid anbringande av det torra pulvret var låg. Vid praktisk tillämpning av tekniken bör, särskilt om korngraderingen ändras så att en mera moränlik fördelning erhålls, friktionsvinkeln utan vidare kunna ökas till ca 35° .

Slutsatsen av undersökningen är att en temperaturförhöjning till ca 100°C endast påverkar hållfasthetsegenskaperna marginellt.

Skjuvhållfastheten bestämmer, som nämnts tidigare, bärigheten hos massan, dvs den maximala last som denna kan bära utan att ett tillstånd med utbildning av brottplan och snabb sjunkning av kapslarna äger rum. Man måste emellertid också beakta risken för en tidsberoende sjunkning av kapslarna som följd av en långsam deformation hos massan.

Som tidigare påpekats innebär upptagningen av vatten i den från början "torra" pulvermassan att vattenmolekylerna binds mycket fast till mineralsubstansen. Begränsas vattenupptagningen till de värden som ger tillåten bärighet, vilket förutsätter plombering av deponeringshålen utom vid bentonithalter lägre än ca 10%, kommer därför ingen nämnvärd kompression genom konsolidering (vattenutpressning) att äga rum. Där emot kan man tänka sig en långsam sjunkning av kapseln om buffertmassan uppfattas som en viskös substans.

För att få en uppfattning om sjunkningens art och tidsberoende kan man göra följande övervägande som är ytterligt konservativt. Antag att kapseln bärs av en cylindrisk jordpelare som inte har något sidostöd. Om jordpelaren utgörs av lera gäller följande halvempiriska relation:

$$\log \dot{\epsilon} = C - m \log \frac{t}{t_1} \quad (8)$$

där $\dot{\epsilon}$ = axiella kompressionshastigheten (krypningshastigheten)
 C = konstant
 m = materialparameter
 t = tiden i min
 t_1 = tiden 1 min

För en typisk kvartär lera med $\tau_{fu} \sim 20$ kPa gäller experimentellt $m = 0.8$ och $C = \log 0.03$ för en skjuvspänning som svarar mot 70% av skjuvhållfastheten.

Det ger:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \log \dot{\epsilon} = \log [0.03 \left(\frac{t}{t_1}\right)^{-0.8}] \quad (9)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} d\epsilon = \int_{t_1}^{t_2} 0.03 \left(\frac{t}{t_1}\right)^{-0.8} dt$$

$$\epsilon = 0.15 (t^{0.2} - 1) \text{ i procent} \quad (10)$$

Om lerpelarens höjd är 1 m ger detta sjunkningen 3 cm för $t = 10$ år, 5 cm för $t = 100$ år, 8 cm för $t = 1000$ år, 13 cm för $t = 10\,000$ år och 33 cm för $t = 10^6$ år. Teoretiskt krävs $1.9 \cdot 10^8$ år för att lerpelaren helt skall plattas ut.

I verkligheten medverkar inte bara jordpelaren under kapseln utan naturligtvis hela buffertmassan. Det betyder att sjunkningen endast blir en bråkdel, 1/5 eller 1/10, av de angivna värdena. Eftersom buffertmassan kommer att fungera som en friktionsmaterial-

massa som erfarenhetsmässigt uppvisar betydligt mindre krypning än rena leror kommer sjunkningen därför att bli försumbar i praktiken.

Temperaturens inverkan på sjunkningshastigheten måste också beaktas. Här har vi ledning av de tidigare redovisade resonemangen angående skjuvhållfasthetens temperaturberoende. Det är logiskt och riktigt att betrakta detta beroende som en följd av krypningsprocessernas avhängighet av ökad temperatur och vi kan därför räkna med att också sjunkningshastigheten har samma temperaturberoende. Det betyder att en till ca 100°C ökad temperatur inte kan antas ge mer än en obetydlig ökning av kapselns rörelsehastighet. En mycket konservativ uppskattning skulle vara att denna hastighet fördubblas vilket likväl innebär att temperatureffekten i praktiken kan försummas.

2. Inverkan på svällningstrycket

Frågan om svällningstryck har naturligtvis bara betydelse vid plomberade hål. För att bedöma temperaturens inverkan på svällningstrycket har några pilotförsök utförts på geoteknikavdelningen i Luleå. Försöken utfördes i samband med de tidigare nämnda svällningstryckbestämningarna och tillgick så att vattnet i behållarna vari ödometrarna var placerade (jfr Fig 16) värmdes upp med hjälp av termoelement. Uppvärmningen igångsattes sedan svällningstrycket utbildats helt vid rumstemperatur. Med beaktande av volymutvidgningen hos ödometerringen, porvattnet och mineralsubstansen finner man att en temperaturökning från rumstemperatur till ca 80°C resulterar i en minskning av svällningstrycket. Den vid försöken observerade minskningen var ca 40 kPa för blandningarna med 20 och 50% bentonit (fig 29). Minskningen förefaller att vara permanent vilket sannolikt beror på förskjutningar av partiklar till nya stabila lägen eller grupperingar. Försöken bör dock följas upp med direkt tryckmätning i simulerade deponeringshål i laboratoriet.

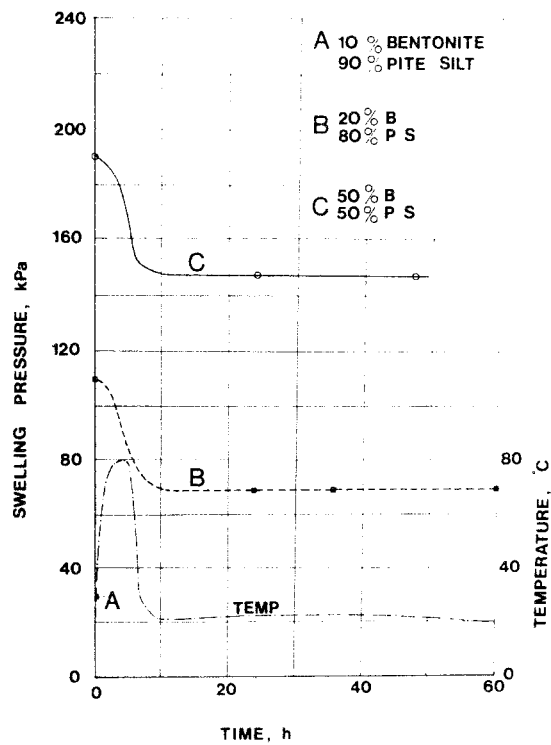


Fig 29. Inverkan av temperaturändringar på svällningstrycket.

Det är nu som vi kan se de stora fördelarna med en så låg bentonithalt som 10%. Eftersom siltpartiklarna då utgör ett kontinuerligt system är bärigheten minst den som svarar mot 100% silt. En fördel är också att temperaturinverkan på buffertmassans spännings/deformationsegenskaper är mycket obetydlig. Förklaringen till temperaturökänsligheten är som nämnts tidigare att montmorillonitpartiklarna är belägna i porutrymmena mellan siltpartiklarna vid denna låga bentonithalt. I kontakterna mellan siltpartiklarna har förskjutningarna, som ju bestämmer spännings/deformationsegenskaperna i detta fall, samma karaktär inom ett stort temperaturområde. Om plombering kommer till användning, vilket är rimligt speciellt med hänsyn till den praktiska arbetstekniken, blir svällningstrycket mycket måttligt. Det innebär att förankringen av plomberingen kan klaras utan problem, t ex så att 2 st i förväg injekterade, förspända dragstag gjuts in i varje plombering. En begränsad livslängd hos betongen och dragstagen spelar ingen roll eftersom de har en funktion endast under den tid då anläggningen inte fyllts helt.

Ytterligare en fördel är att en eventuell ökning av salthalten genom inträngning av saltvatten inte kommer att ha någon betydelse. Vid högre bentonithalter kommer en ökande salthalt att påverka hållfastheten och viskositeten. För 100% Na-bentonit illustreras detta av Fig 30 som presenterats av VOLKOV, SLATCHEVSKAJA & VORONKJEVITICH, 1976. Observera att hållfastheten sjunker då normaliteten ökar från nära noll till låga värden. Vid högre värden ökar hållfastheten ånyo vilket uppges bero på utfällningar och cementeringseffekter.

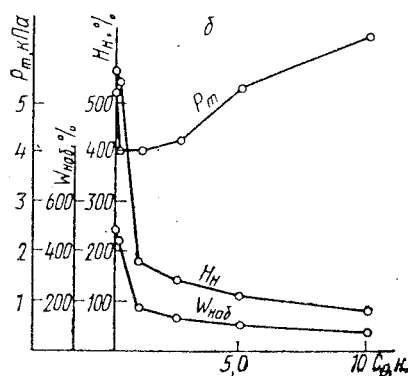


Fig 30. P_m = odränerad skjuvhållfasthet (konprov) i kPa. W_{Had} = vattenkvot i färdigsvällt tillstånd. På horisontella axeln normaliteten hos porvattnet.

3. Inverkan på permeabiliteten

I litteraturen finns inga entydiga uppgifter om temperaturens inverkan på lerors permeabilitet. Eftersom permeabiliteten teoretiskt sett är starkt beroende av vattnets viskositet kan man anta att k-värdet i Darcys lag:

$$v = k \cdot i \quad (9)$$

där v = vattenhastigheten (m/s)

k = permeabilitetskoeff (m/s)

i = hydrauliska gradienten

är omvänt proportionellt mot viskositeten. Man kan därför räkna med att permeabiliteten ökar med ca 100% då temperaturen ökar från rumstemperatur till 100°C oberoende av buffertmassans sammansättning. Vid rumstemperatur kan man räkna med att en 10%-ig bentonit har ett k-värde av 10^{-9} ä $5 \cdot 10^{-10}$ m/s. Ökar bentonithalten till 20-30% blir motsvarande k-värde av storleksordningen 10^{-10} ä 10^{-11} m/s. ENDELL, LOOS & BERG (1942) har visat att vattenmättad Na-bentonit/kvarts med 10% bentonit har ett k-värde av ca $3 \cdot 10^{-11}$ m/s och med 33% bentonit ett k-värde av ca 10^{-11} m/s. I detta arbete redovisas

också motsvarande värden för Ca-bentonit, nämligen 10^{-9} m/s respektive $5 \cdot 10^{-10}$ m/s. Dessa värden är intressanta eftersom de illustrerar den förändring av permeabiliteten som det kan bli tal om vid jonbyte till kalcium. Förmodligen svarar detta också mot den förändring som åstadkoms vid inträngning av havsvatten (med oceanernas salinitet) i buffertmassan. Vi kan se att permeabiliteten under alla förhållanden är betydligt lägre än den är för stora bergvolymer. För sådana är det vanligen tal om k-värden av storleksordningen 10^{-5} ä 10^{-6} m/s, undantagsvis 10^{-7} ä 10^{-8} m/s.

Kristallstrukturella förändringar som följd av temperaturförhöjning

Tre huvudfrågor beaktas:

- Strukturstabilitet
- Jonbyteskapacitet
- Cementering (mineralnybildning)

När det gäller strukturstabilitet har vi koncentrerat oss på komponenterna bentonit och kvarts. Båda kan inom vida gränser anses som slutprodukter efter hydrotermal påverkan eller kemisk vittring. Omvandlingar av dessa komponenter kan emellertid äga rum som följd av ändrad miljö.

Bentonit

Med bentonit menas vanligtvis en vittringsprodukt av vulkanisk aska. Det svällande lermineralet montmorillonit¹⁾ är en av komponenterna (ibland huvudkomponent) och i övrigt kan bentoniten bestå av bl a Na-plagioklas, kvarts, ortoklas, kalцит, limonit och olivin. Ofta förekommer inte montmorilloniten

¹⁾ Smektit är ett numera rekommenderat namn för montmorillonit. Vi har dock valt att i rapporten använda den äldre beteckningen

som rent lermineral utan som s k blandskiktmineral med växellagrade montmorillonitskikt och illitskikt. Volclay (den naturliga Na-bentoniten från Wyoming som föreslås som aktiv komponent i buffertmassan) består övervägande av montmorillonit. De gotländska bentoniterna och Kinnekullebentoniten består dock övervägande av blandskiktmineral. Jonbytesförmågan är därför olika. För Volclay kan man räkna med en katjonbyteskapacitet av 80-100 m ekv/100 g torrt material medan motsvarande värde för de gotländska bentoniterna och Kinnekullebentoniten är ca 30-40.

De faktorer som kan förändra kristallstrukturen och därmed jonbyteskapaciteten är tryck, temperatur, pH och elektrolytsammansättningen hos vattenfasen. Här spelar vattenomsättningen (perkolation resp statiskt tillstånd) stor roll. Som inledning till en diskussion av hithörande frågor är det värt att nämna att de gotländska bentoniterna, som är av ordovicisk/silurisk ålder, har påträffats i borrhål ned till ca 400 m djup enligt en färsk doktorsavhandling (SNÄLL, 1977). Det faktum att belastningen på detta djup inte bara orsakats av sedimentens egentygnd utan också av ca 1.5 km inlandsis under lång tid, visar att höga tryck inte har orsakat ett försvinnande av montmorilloniten. När det gäller Kinnekullebentoniten, som är likåldrig, visar beräkningar av AB Atomenergi att det förutom höga tryck (av inlandsisarna) också rått åtminstone 80 ä 100°C temperatur. Det är dessa indikationer som vi bedömt som särdeles viktiga när det gäller att finna en substans med strukturell stabilitet vid höga tryck och en temperatur av ca 100°C.

Om vi ser på den aktuella problemställningen har vi i ett skede att göra med torrt lerpulver. Egna erfarenheter (JACOBSSON, 1974) visar entydigt att torrt montmorillonitpulver är strukturstabilt till minst 200°C oberoende av om jonbeläggningen är Na, Ca eller H. Fig 31 visar resultatet av NMR-tester av torra

prover. Linjebreddens ändring inom temperaturintervallet rumstemperatur till ca 150°C beror endast på avgången av löst bundet vatten. Röntgendiffraktometrisk analys (inkl svällningstester) av de upphettade proverna visar även att ingen strukturomvandling ägt rum.

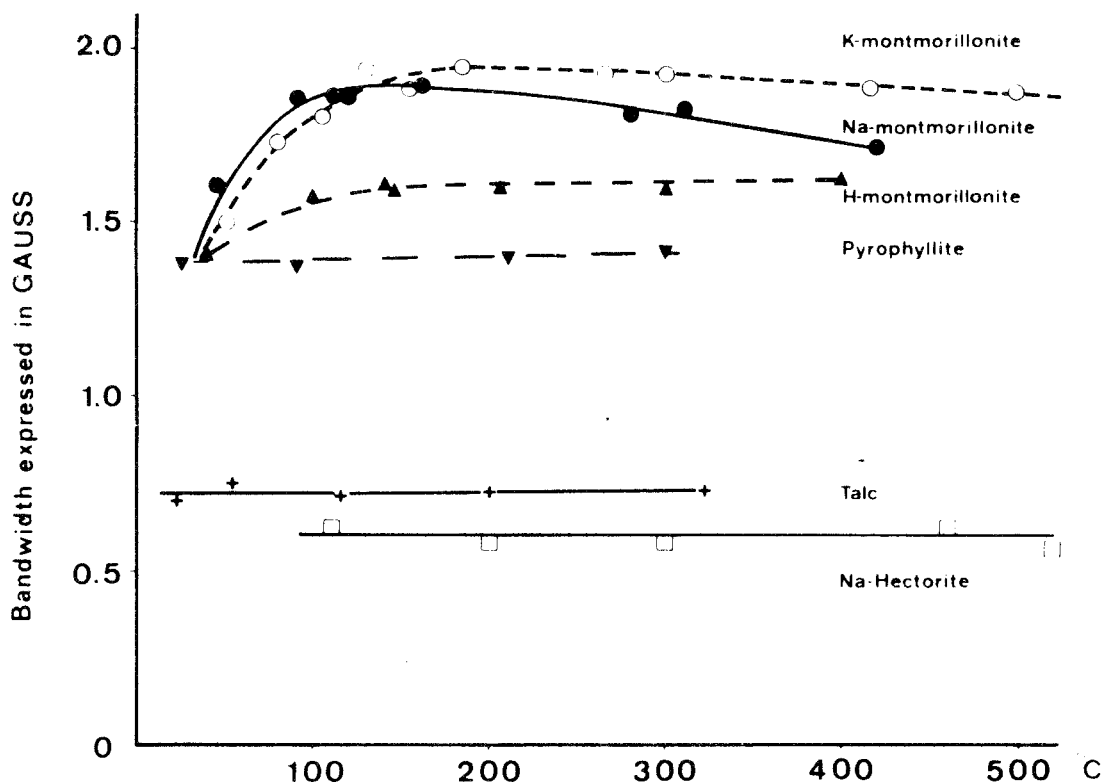


Fig 31. Linjebreddens som funktion av temperaturen vid NMR-försök på montmorillonit (JACOBSSON, 1974)

I ett senare skede i deponeringen kommer buffertsubstanten att vara helt eller delvis vattenmättad. För detta stadium visar åtskilliga litteraturundersökningar att miljön är avgörande. Sålunda har man visat att om saliniteten ökar (stort Na-innehåll) minskar montmorillonit-innehållet i ett sediment medan innehåll av illit och zeoliter (t ex analcit) ökar. Man har visat att fullt expanderbara dioktaedriska

montmorilloniter (varpå Volclay-montmorilloniten kan tas som exempel) inte är stabila vid en temperatur högre än 100-120°C på 2000 m djup i sedimentmassor. På mindre djup (500-1000 m) är motsvarande temperatur något högre. Om fria K-joner endast finns i låg koncentration är Na/Ca montmorillonit stabil under 100°C vid dessa mindre djup. Om k-jonkoncentrationen är hög uppkommer blandskiktmineral av typen montmorillonit/illit som är stabila till minst 200°C. Tabell 5 visar temperaturerna till vilka stabilitet råder vid ett tryck av 100 till 200 MPa.

Tabell 5 (enl VELDE, 1977)

Thermal Stabilities of Fully Expandable Phases

Type	Elements in 2:1 lattice	Reference	1-2Kb pressure temp, °C
K dioct	(AlSi)	Velde, 1969	230
K dioct	(MgAlSi)	Velde, 1973	400
Na dioct	(AlSi)	Sand, et al., 1957 Koizumi and Roy, 1958	350-450
Ca dioct	(AlSi)	Clatterjee, 1969 Hemley, et al., 1971	300-500
Mg trioct	(MgSi)	Esquevin, 1960 Velde, 1973	<250
Mg trioct	(MgAlSi)	Velde, 1973	430
Na trioct beidellite	(MgAlSi)	Iiyama and Roy, 1963	550
Na trioct hectorite	(MgAlSiNa)	Iiyama and Roy, 1963	800

Thermal Stabilities of Mixed Layered Phases

K dioct	(AlSi)	Velde, 1969	400
K dioct	(AlSiMg)	Velde, 1972	430
Na trioct beidellite	(MgAlSi)	Iiyama and Roy, 1963	780
Na trioct hectorite	(MgAlSiNa)	Iiyama and Roy, 1963	800

När det gäller pH vet man att strukturstabiliteten inte äventyras inom intervallet pH 6.5-8.5. Men man vet också att montmorillonit bildas vid höga pH-värden. Sålunda kan hydrolys av fältspat med bildning

av montmorillonit som följd ske vid pH lika med 10, som alltså bör vara ett säkert övre värde på tillåtet pH. Här är det emellertid viktigt att poängtera betydelsen av vattenomsättningen. Är denna obetydlig får t ex hydrolys och andra typer av kemisk omvandling mycket ringa omfattning. Vi bedömer detta vara fallet i deponeringsutrymmena när grundvattensituationen är återställd i slutfasen.

Slutsatserna av vad som nämnts är för det aktuella projektet:

1. Fullständig omvandling av montmorilloniten i buffertmassan kommer inte att äga rum.
2. Saliniteten kan inte bli så hög att omfattande zeolitbildning sker.
3. Eventuell omvandling av montmorilloniten kommer att gå i riktning mot blandskiktmineral i kalirik miljö. Om Cs läcker ut får man den gynnsamma effekten av fixering av denna jon ("Cs-illit") i kaliumfattig miljö. Omvandlingen till blandskiktmineral innebär att jonbyteskapaciteten hos massan inte kan försvinna.
4. pH kan tillåtas öka till minst 10 utan att montmorillonitens kristallstrukturella stabilitet äventyras.

Kvarts

Den kristallstrukturella stabiliteten hos kvarts är mycket god. Som framgår av Fig 32 är lösligheten utomordentligt liten upp till pH 8.5 å 9. Som tidigare antytts spelar vattenomsättningen en mycket stor roll i sammanhanget. Om det är frågan om stark grundvattenströmning vid dessa (eller högre) pH-värden kan kvartsen gå i lösning i en med tiden betydande

omfattning. Då vattenomsättningen är obetydlig, som i fallet plomberade borrhål, uppnås snabbt jämvikt redan då en mycket obetydlig mängd SiO_2 gått i lösning. En ökning av temperaturen från rumstemperatur till ca 100°C ger visserligen en ca 5-faldig ökning av lösligheten (Fig 33) men det är likväl fråga om mycket små mängder som går i lösning.

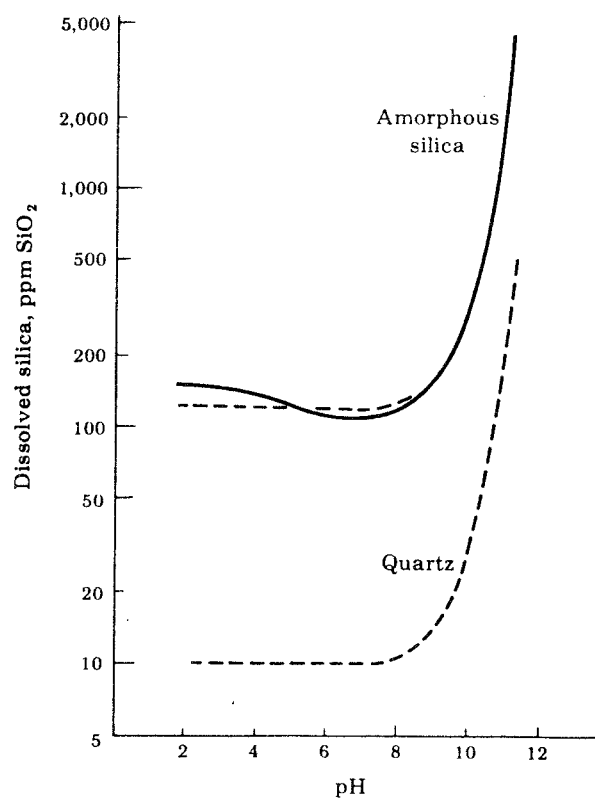


Fig 32. Lösligheten hos kvarts vid 25°C som funktion av pH (enl KRAUSKOPF, 1967)

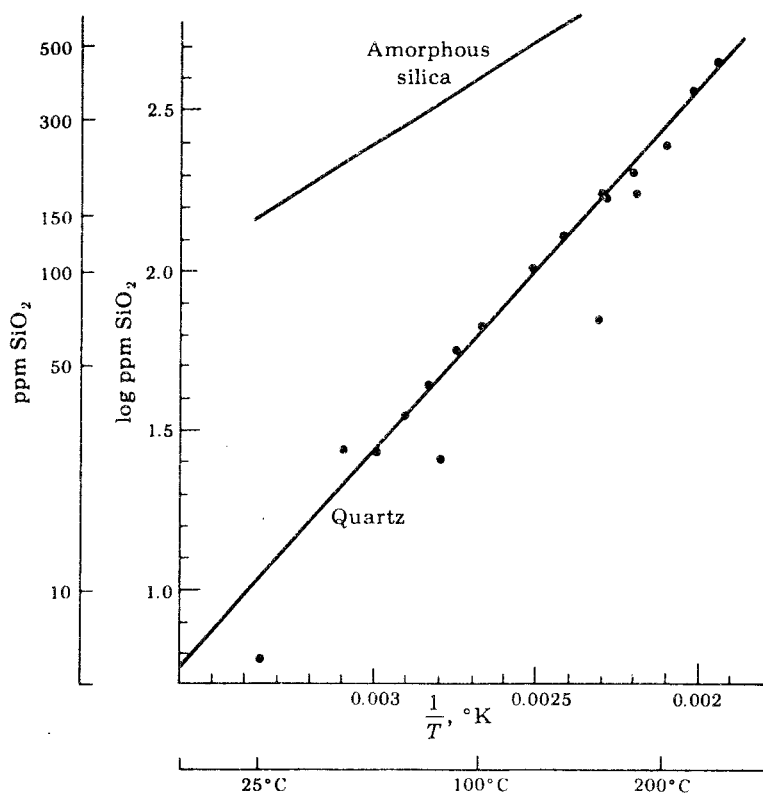


Fig 33. Lösligheten hos kvarts som funktion av temperaturen (enl KRAUSKOPF, 1967)

Montmorillonit/kvarts

Man kan alltså med fog hävda att montmorillonit (vid pH 6.5-10 eller högre) och kvarts (vid pH < 9) var för sig är stabila vid lägre temperatur än ca 100°C. En blandning av mineralen i vattenfas skulle emellertid kunna tänkas vara instabil om montmorilloniten ger upphov till så höga pH-värden att kvarts går i lösning. Emellertid har kvartsen en pH-sänkande effekt. Pilotförsök visar t ex att en blandning av 10 viktprocent bentonit och 90% rent kvartsmjöl i aqua dest ger pH ~8.5. En temperaturhöjning till 100°C visade sig ge en sänkning till pH ~8.

Att dessa två mineral kan existera tillsammans vid tryck av den storleksordning som kommer att råda i deponeringsutrymmena bevisas också av kompositionen hos ett antal plastiska naturliga leror. Färska undersökningar från oljeborrningarna i Nordsjön visar t ex

riklig förekomst av (troligen tertiära) leror med dominerande innehåll av kvarts och andra bergartsbildande mineral och 5-20% montmorillonit. Andra exempel (se PUSCH, 1971) är den ordoviciska bentoniten från Kinnekulle (som varit upphettad till 80-100°C) och den tertiära Londonleran:

Ordovician clay

Earlier investigations of unfractionated material (SUNDIUS in THORSLUND, 1948) have shown that it mainly consists of montmorillonite (poor in iron), minerals of the chlorite group, sericite, calcite, biotite, quartz and potassium feldspar. Quartz-porphry fragments with concave boundaries were said to indicate that volcanic ash was the source material. Detailed chemical and X-ray diffraction tests of clay material from the presently investigated bentonite outcrop have shown that the dominant minerals are of the mixed-layer type with an illite/montmorillonite ratio of 1:4, Ca being the major exchangeable ion (BYSTRÖM, 1956). This is in agreement with the author's analyses which showed the presence of certain sharp higher order reflections indicating randomly interstratified minerals. The analyses showed a c-axis spacing of natural air-dry swelling material of about 12 Å which is characteristic of Na montmorillonite and an increase to about 17 Å with ethylene glycol treatment. The characteristic 15 Å spacing of Ca montmorillonite was not observed, the discrepancy probably being due to the presence of potassium which prevented swelling. It cannot be excluded that Na may have been the original cation in the freshly deposited sediment which was later subjected to partial ion exchange through percolation of Ca-rich ground water from adjacent calcareous sediments leading to the present Ca adsorption without complete swelling to the 15 Å c-axis spacing. It is known that a certain proportion of Na can be replaced by Ca and yet the mineral will behave like Na clay (MERING and GLAESER, 1954). According to BYSTRÖM, biotite and kaolinite are also present, the last-mentioned mineral being interpreted as a weathering product of feldspar. These minerals are also present in the clay fraction of the author's samples, chlorite, quartz and feldspar being present as well. The chlorite may have resulted from the weathering of biotite.

Tertiary London clay

Unpublished X-ray diffractometer analyses made by the Division of Engineering Geology, Imperial College, London, have shown that the unfractionated material consists of quartz, feldspars, carbonates, pyrite, illite, montmorillonite, kaolinite and chlorite, in that order. The present investigation of the clay fraction shows that illite is dominant and that montmorillonitic minerals and kaolinite are moderately abundant. Small amounts of chlorite, quartz and feldspar are also present. A narrow and relatively strong reflection corresponding to $d = 2.82 \text{ \AA}$ indicates the probable presence of unweathered siderite as well. The presence of siderite in the silt fraction was confirmed by investigation of the optical properties of dispersed material. By ethylene glycol treatment the c-axis spacing of the swelling minerals increased from the 12 Å region to about 17 Å which means that Na is the exchangeable ion. The marked asymmetry of the 10 Å peak and of the 3.3 Å peak indicates that the illite is degraded.

Dessa leror är plastiska med vattenkvoten $w=28\%$ för den ordoviciska och $w=35\%$ för den tertiära Londonleran.

Beträffande risken för cementering vill vi framhålla följande. Cementering genom utfällning av mineralsubstans kan liksom kemiska reaktioner mellan mineralkomponenter inträffa först då vatten eller vattenånga tränger in i buffertmassan. Den negativa effekten av cementering är att buffertmassan förlorar sin karaktär av friktionsjord och får (verklig) kohesion. Kohesionen ökar hållfastheten men innebär samtidigt att materialet blir sprött. Det betyder att sprickbildning kan uppkomma som följd av mekaniska spänningar, termiska gradienter och deformationer.

Cementering av kvartspartiklarna kan bli aktuell då dessa partiklar ligger i direkt kontakt med varandra och utgör ett kontinuum eller om de är åtskilda av tunna lerfilmer. Det är alltså vid låga bentonithalter som problemet kan uppstå.

En tryck- och temperaturbetingad process som leder till cementering sker på grund av korntrycket mellan kvartspartiklarna. SiO_2 går i lösning i kontaktpunkterna och fälls ut i kontakternas omgivning. Beräkningar (se t ex v ENGELHARDT, 1973) visar att lösligheten hos kvarts vid 40°C ökar med någon procent då korntrycket ökar från 10^2 kPa (ordinärt lufttryck) till 10^4 kPa och med ca 10% då korntrycket ökar till 10^5 kPa. Så höga korntryck uppkommer först på ca 1000 m djup och ENGELHARDT nämner följdriktigt: "Nach den vorliegenden Beobachtungen beginnt bei etwa 1000 bis 1500 m Versenkungstiefe die Drucklösung von Quarz zu einem wesentlichen Faktor der chemischen Diagenese zu werden". Temperaturer på 100 à 200°C tycks inte ha någon nämnvärd inverkan. Det framgår bl a av amerikanska undersökningar av artificiellt komprimerad sand vid förhöjd temperatur. Då icke strömmande des-

tillerat vatten fyller porerna är cementeringseffekt-erna försumbara och det gäller också vid genomströmmande saltvatten (och mättade saltlösningar) utom då temperaturen överstiger 270°C då cementering sker med ökad intensitet. Man kan alltså dra slutsatsen att om temperaturen understiger ca 100°C kommer cementering inte att ske i buffertmassan eftersom dess korstryck aldrig kan överstiga det som motsvarar något eller några tiotal meter sedimentmassa.

SNÄLL (1977) har i sin avhandling visat att de gotländska bentoniterna, som också innehåller både kvarts och blandskiktmineral, är plastiska då fältspatinnehållet är litet men spröda (cementerade) då fältspatinnehållet ökar.

Vi anser därför att tillräckliga belägg finns för att anta att blandningar av bentonit och kvarts kommer att vara tillräckligt kemiskt stabila för att kunna fungera som en permanent plastisk buffertsubstans därest vattenomsättningen är så obetydlig som den kommer att bli i systemet plomberade borrhål/buffertmassefyllda tunnlar.

3.4 Inverkan av radioaktiv strålning på buffert- materialet

Två huvudeffekter kan uppkomma:

- Radiolys
- Kristallstrukturella förändringar

Radiolys (uppkomst av syrgas och vätgas i porvattnet) har inte studerats i vår undersökning. Vi har emellertid uppfattningen att gasblåsor kommer att lösa sig i vattnet vid de höga vattentryck som kommer att råda i slutstadiet och att gasmängden därför blir mycket obetydlig. Möjligen kan vattenmättnadsgraden i buffertsubstansen närmast kapslarna reduceras

något om strålning kommer att påverka massan.

När det gäller kristallstrukturella förändringar har, trots en systematisk litteratursökning, endast få relevanta informationer erhållits. Litteratursökningen har gällt Chemical Abstract för åren 1960-76.

Uppgifter finns rörande lermineralen kaolinit och montmorillonit samt mineralet kvarts och vissa andra ämnen som kan vara av intresse i sammanhanget, t ex aluminiumhydroxid.

Strålningskällan har vanligtvis varit ^{60}Co men också ^{137}Cs gammastrålning och neutronstrålning har utnyttjats (se Tabell 6).

Tabell 6

Nuklid	Stråln och energi i MeV	Halverings- tid i år	Övriga sön- derfallsegen- skaper
^{60}Co	γ , 1.3; 1.17	5.27	100% $\beta \leq 0.31$ MeV 100% vardera γ
^{137}Cs	γ , 0.66 (86%)	30	92% $\beta \leq 0.52$ MeV (åtföljd av γ) 8% $\beta \leq 1.2$ MeV

Vid β -strålning avser tecknet \leq β -spektrum med angiven maximal β -energi.

Kaolinit

Några av undersökningarna av kaolinit ger belägg för att kristallstrukturella förändringar kan åstadkommas genom bestrålning medan andra inte visat några sådana effekter. YAMAMOTO (1962) t ex använde välkristalliserad kaolinit som under 700 timmar bestrålades av ^{60}Co med intensiteten $1.5 \cdot 10^6$ r/tim och

kunde inte med röntgendiffraktionsteknik påvisa någon entydig förändring. Däremot ökade surhetsgraden ("surface acidity") kraftigt (radiolys). CORBETT, BURSON & YOUNG samt CORBETT & BURSON (1961) och HEAD, MOODY, MITCHELL & YOUNG har emellertid redovisat påtagliga förändringar. Syftet med deras undersökningar var att studera hur strålningsdosen påverkar graden av kristallinitet uttryckt som " $nb/3$ " vilket är uttytt som kvoten mellan de integrerade diffraktionsreflexerna $02\bar{1}$ och 060 . $02\bar{1}$ påverkas av $nb/3$ -translationer medan 060 inte påverkas av sådana translationer. Kvoten går mot noll vid mycket låg kristallisationsgrad och mot 1 för mycket hög kristallisationsgrad. Fig 33 visar $nb/3$ -förändringen som funktion av strålningsdosen medan Fig 34 illustrerar skillnaden i diffraktogramform.

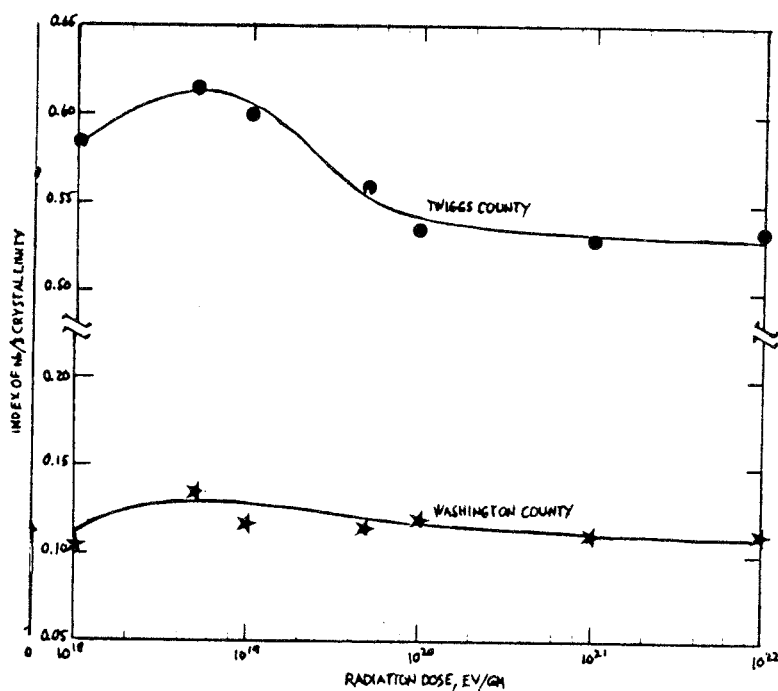
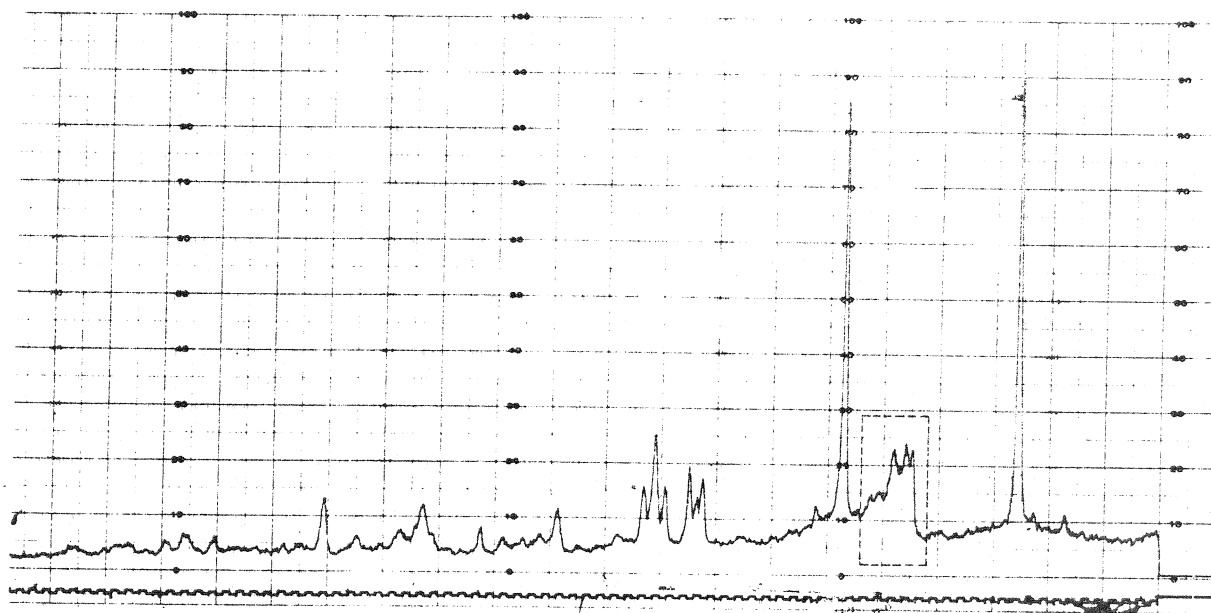


Fig 33. " $nb/3$ " som funktion av strålningsdosen för två kaolinites.

Final Report, Project No. A-446-5

A. UNIRRADIATED KAOLIN

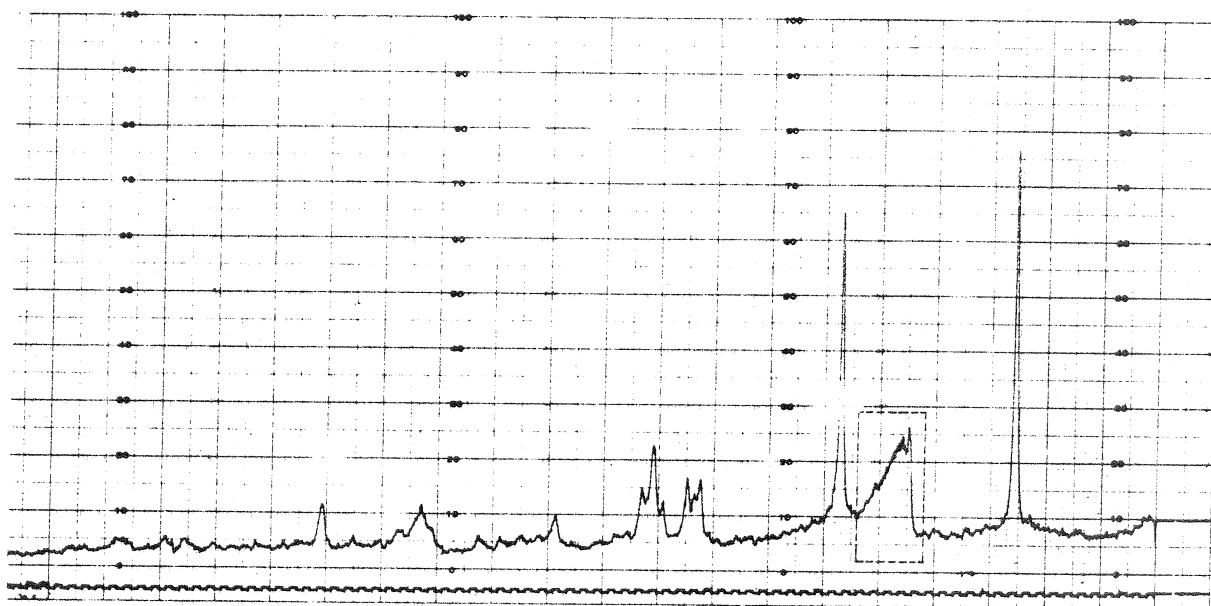
B. IRRADIATED KAOLIN
 1×10^{22} EV/GM

Fig 34. Diffraktometerdiagram för obestrålad och bestrålad kaolinit.

Det är alltså fråga om en klart dokumenterad men dock obetydlig förändring av kristallisationsgraden. Det rör sig om en störning av Al-arrangemanget. Ett sätt att kvantitativt beskriva atomförskjutningarna som funktion av strålningsdosen för kaolinitvarianterna i Fig 33 och 34 ges av Fig 35. Distortionen uttrycks som kvadraten på atomernas förskjutning i c-axelriktningen.

Undersökningarna av dessa kaolinitter avsåg också en bestämning av strålningsdosens inverkan på specifika ytan efter våtmalning. Tabell 7 illustrerar effekten:

Tabell 7

Dos eV/g	Specifik yta m ² /g
obestrålat mat	26.7
10 ²⁰	27.8
10 ²¹	28.8
10 ²²	31.1

Ökningen av specifika ytan är samhörig med en reduktion av medelkornstorleken. De boklika packarna av enhetsskikten hos kaolinit hålls samman av van der Waalska krafter och vätebindningar och när den strålningsinducerade strukturdistortionen utvecklas kommer de interlamellära bindningskrafterna att minska. Hållfastheten hos partiklarna reduceras och våtmalningen ger upphov till en reduktion av medelkornstorleken. En ökning av jonbyteskapaciteten bör också ske som följd härav.

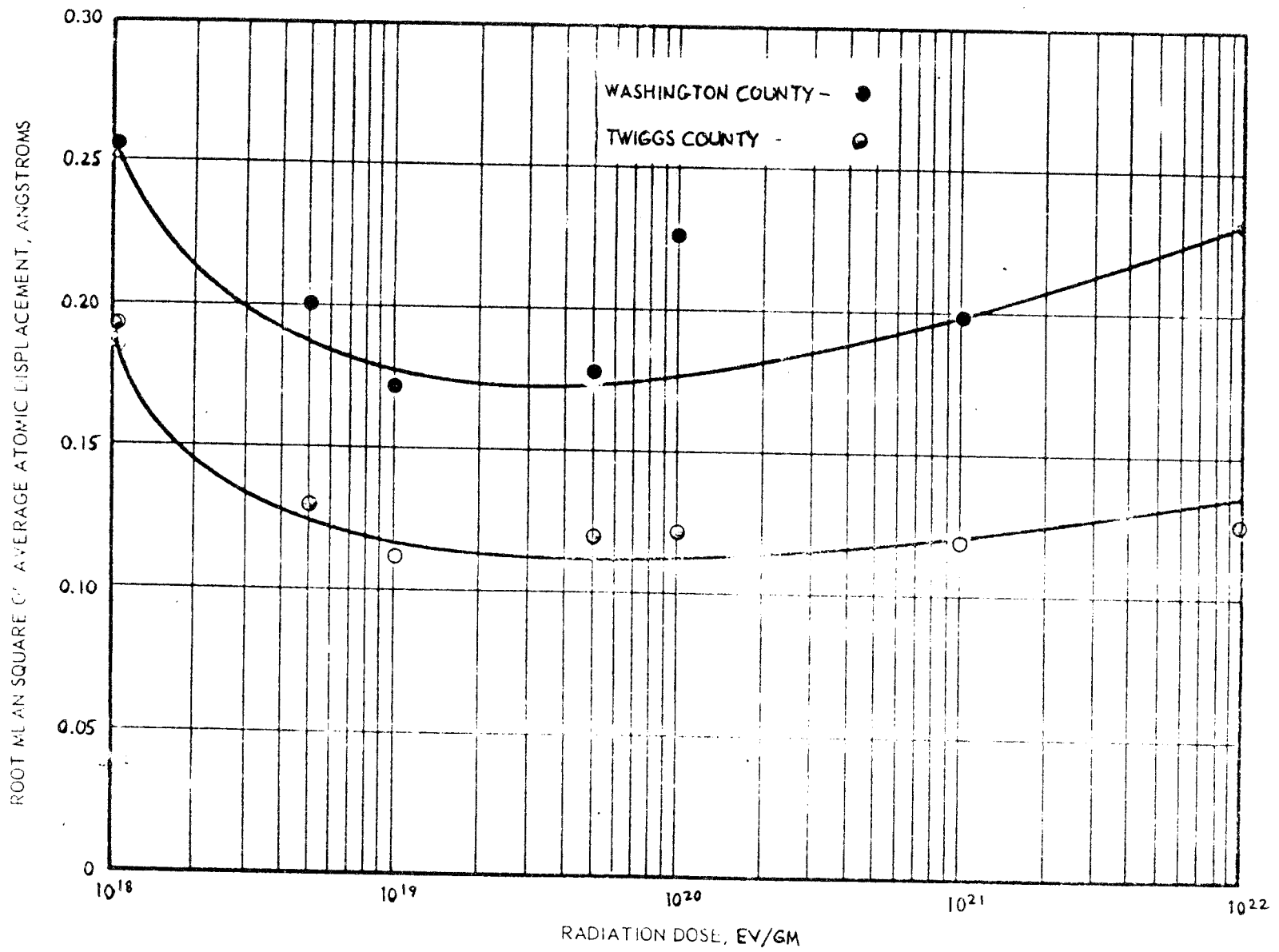


Fig 35. Strukturdistortionen hos två kaoliniter som funktion av strålningsdosen.

Montmorillonit

Redogörelser för entydiga försök med montmorillonit har inte påträffats vid litteratursökningen. BOWEN & CAWSE (1964) fann en ökning av innehållet av C, N och oorganiska element i en med 5 megarad (γ) bestrålad naturlig montmorillonitisk lera. Denna ökning måste emellertid tillskrivas det organiska innehållet i leran. En undersökning visar att bestrålad bentonit liksom kaolinit får en ökning av "ytsurheten".

Enligt vår uppfattning är de tidigare nämnda ingående studierna av kaolinit vägledande för vad som kan inträffa i alla typer av phyllosilikat. Den viktigaste konklusionen är därför att hållfastheten hos de enskilda partiklarna kommer att reduceras. Mekanisk nedbrytning ger upphov både till en ökning av jonbyteskapaciteten och till en minskning av permeabiliteten. Båda effekter är gynnsamma när det gäller buffertmassans långtidfunktion. Ökningen av "ytsurheten" genom radiolys tenderar att reducera pH men eftersom pH i den obestrålade massan förväntas bli relativt hög har strålningen också i detta hänseende en gynnsam effekt.

Kvarts

Inte heller när det gäller kvarts har helt relevanta försöksresultat påträffats vid litteratursökningen. CUMMINS (1962) studier av två naturliga sandjordar (γ -strålning och neutronstrålning) visade ingen som helst förändring av jonbyteskapaciteten. Sovjetiska undersökningar (TAGIEVA & KIESELEV) har dock visat att sorptionskapaciteten för kvarts minskar vid bestrålning. Effekten antogs bero på bildningen av fria radikaler.

En undersökning av en siltig lera (silten sannolikt huvudsakligen bestående av kvarts) gav inga påvisbara d-värdesförändringar efter neutronbestrålning (TUMAY, LAREW & MEEM, 1962).

Strålningens inverkan på kvarts kan med ledning av dessa erfarenheter antas vara obetydlig.

Andra substanser

Cement i pulverform i obestrålat tillstånd och utsatt för ^{60}Co -strålning visade sig inte ge någon klar skillnad vid röntgendiffraktometrisk analys (CHERKINSKII, KOBALOVA & VERESHCHINSKII, 1970).

Hydrargillit och boehmit har däremot enligt KORYUKOV, KUZNETSOV, DEREVYANKIN & SHKLYAR (1971) uppvisat smärre förändringar. Den förstnämnda visar tecken på partiell dehydrering.

Det kan i detta sammanhang vara intressant att se effekterna av strålning på organisk substans i jord. BOWEN & CAWSE (1964) nämner t ex att växtligheten förbättras i jord som steriliserats genom gammastrålning. Detta uppges bero på de frigjorda kvävemängderna då humus och mikroorganismer förstörs.

Slutsatser

Våra slutsatser av litteraturinventeringen är att inverkan av hård strålning på en buffertmassa av 10 viktprocent bentonit och 90% kvarts är ringa. Den viktigaste effekten är den mekaniska degraderingen som troligen leder till en viss hållfasthetsminskning hos montmorillonitpartiklarna. Vid höga bentonithalter kommer denna påverkan att leda till en reduktion av bärigheten och viskositeten hos buffertmassan vilket är ett starkt skäl till att begränsa bentonithalten till 10%. Som visats tidigare utgör nämligen kvartskornsystemet då ett kontinuum som bestämmer

massans mekaniska egenskaper. Om bentoniten tenderar att degraderas uppkommer bara den positiva effekten av minskad permeabilitet och ökad jonbytesförmåga.

4 FÖRSLAG TILL UTFORMNING AV ANLÄGGNINGEN

Från praktisk synpunkt är det ett primärt krav att massan skall kunna deponeras på ett enkelt och reproducerbart sätt och dessutom ha de mekaniska och fysikaliska egenskaper under alla stadier - från deponeringen till åtminstone några tusen år framöver - som krävs. Som följd av bedömningarna i denna rapport föreslås följande utförande:

1. Depositionsanläggningen utförs med ett centralt vertikalt schakt till ett djup av minst 500 m och ett etagevis anordnat system av tunnlar med ca 5-7 m höjd och en form som så anpassas till det primära spänningstillståndet att tangentialspänningen blir ungefär densamma utmed tunnelperiferin. Drivningen förutsätts ske genom mycket försiktig sprängning. Tunnelarna, som ges en svag lutning från det centrala schaktet, kan ha en längd av flera hundra meter. Längden och orienteringen i plan bestäms av bergpartiets karaktär med avseende på bergart, sprickfrekvens och förekomst av svaghetszoner.
2. I varje tunnel i systemet borrar deponeringshål och eventuellt dräneringshål. Deponeringshålen placeras i sektioner vars inbördes avstånd bestäms av den beräknade temperaturutvecklingen, förslagsvis tre hål per 10 m tunnellängd. Ett hål ansätts vertikalt från centrum tunnelgolv och övriga två från tunnelväggarna i ca 45° lutning nedåt. Deponeringshålen borrar

(t ex genom överlappande kärnbörning) till djupet 5 m och diametern 1 m å 1.5 m. Gäller det större avfallskapslar kan man eventuellt tänka sig fullortsbörning eller mycket försiktig sprängning av hål med flera meters diameter. I detta fall måste större tunnelhöjd troligen väljas.

3. Hela anläggningen sprängs resp borras helst i en följd så att deponeringen kan ske utan samtidigt ingrepp i berget. Detta förfarande ger fördelen att de spänningsomlagringar och härav föranledda (obetydliga) rörelser i bergmassan som orsakas av utsprängningen är utbildade före deponeringen.
4. Med hjälp av ett blandningsverk framställs en buffertmassa av lufttorr pulverformig blandning av 10% bentonit och 90% kvarts (av silt/sandtyp) som med hjälp av en särskilt utvecklad spridarordning med packningsverktyg anbringas till en nivå i hålen som kapslarna skall vila på. Här- efter anbringas kapslarna med hjälp av en fjärrmanövrerad styranordning så att kapslarna hålls i önskat läge medan buffertmassa fylls i deponeringshålet. Över buffertmassan gjuts en betongplombering i hålet och denna plombering förankras med hjälp av förspända dragstag som borrats och fastinjekterats i berget. Betongen bör vara mycket Ca-fattig. Deponeringen börjar på understa nivån och drivs samtidigt i alla tunnlarna på denna nivå, från tunnlarnas ändar till det vertikala schaktet.

5. Sedan deponeringen är klar på understa nivån fylls respektive tunneldel med en lufttorr buffertmassa bestående av 20-50% bentonit och resten silt/sand (bergkross). Härefter påbörjas deponeringen på närmast högre nivå enligt samma mönster. Sedan samtliga tunnelsystem fyllts pumpas vatten in i det vertikala schaktet så att den ursprungliga grundvattensituationen återställs. Då bädden i tunneln tar upp vatten sväller den kraftigt och utövar ett tryck på tunnelperiferin. Buffertsubstans tränger härvid in i de sprickor i tunnels omgivning som skapats eller öppnats i samband med drivningen. På så sätt reduceras permeabiliteten hos hela tunnelsystemet som i stället för att ge öppna strömningsvägar blir en tät kropp i berget med mycket långa strömnings- och diffusionsvägar. Om man anordnar 20 tunnlar à 200 m per nivå och 4 nivåer utnyttjas svarar detta mot 4800 deponeringshål, dvs ca 2000-4000 ton avfallsmaterial. Genom ökning av tunnelantalet och tunnellängden kan denna mängd ökas.

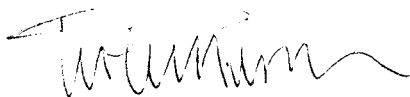
6. Sedan anläggningen fyllts fordras varken underhåll eller kontroll. Det kan dock vara rimligt att man genom provtagning av vattnet nära markytan i det vertikala schaktet regelbundet kontrollerar temperatur och radioaktivitet. Om det för eventuell framtida upparbetning skulle finnas skäl till upptagning av kapslarna kan det lätt ske genom etappvis läns-pumpning till tunnelsystemets översta del. Den lösa buffertmassan i tunnlar kan härefter tas ut med hjälp av mammutpump. I de läns-pumpade tunnlar kan man efter brytning av plomberingarna föra in en fjärrmanöv-

rerad mekanisk gripkloförsedd anordning
som tar upp kapslarna ur deponeringshålen.

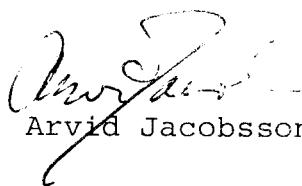
KOMMENTARER

Avsikten med att ge denna preciserade bild av deponeringen av högaktivt avfall är att visa att det i dagens läge finns teknik för att med rimliga kostnader säkert lösa deponeringsproblemen. Det är emellertid sannolikt att det kan finnas bättre metodik och material än som föreslagits här. Detta gäller särskilt buffertsubstansens sammansättning. Det är mycket möjligt att (i kombination med kvartspulver) vermikulit, halloysit eller någon zeolit kan ha bättre mekaniska egenskaper och bättre jonbytesegenskaper. Vi vill t ex fästa uppmärksamheten på att naturlig norrländsk silt med visst lerinnehåll och viss organisk halt uppvisar mycket gynnsamma K_d -värden enligt tidigare undersökningar av JACOBSSON och CARLSSON (1977). Då dessa undersökningar bör ha intresse med särskild hänsyn till de på KBS-anslag pågående undersökningarna på andra institutioner biläggs den som appendix. Det är emellertid absolut nödvändigt att för dagen räkna med det buffertmaterial som man bäst känner egenskaperna hos.

Luleå 1977-05-27



Roland Pusch



Arvid Jacobsson

REFERENSER

- ANGINO, E.E., DRESCHOFF, G & ZELLER, E.J., 1976: Antarctica - a potential international burial area for high-level radioactive wastes. Bull. Eng. Geol. No. 14.
- ARNOLD, M., 1968: A study of thixotropic action in bentonite clay. Diss. Univ. Adelaide, Austral.
- BOWEN, H.J.M. & CAWSE, P.A., 1964: Some effects of gamma radiation on the composition of the soil solution and soil organic matter. Soil Sci. 98(6).
- CHERKINSKII, Y.S., KORALEVA, A.T. & VERESHCHINSKII, I.V., 1970: Effect of ionizing radiation on cements. Zh. Prikl. Khim. 43(12).
- CORBETT, W.J. & BURSON, J.H., 1961: Delamination of kaolin by high-energy ionizing radiation. U.S. At. Energy Comm. SRO-57.
- CORBETT, W.J, BURSON, J.H. & YOUNG, R.A.: Gamma-irradiation of kaolinite. Clays and Clay Minerals, 10th Conf.
- CUMMINS, D.G., 1962: The effect of gamma and neutron radiation on some chemical and physical properties of soil. Diss. Abstr. 23, 1843-4.
- CTH-utredn. (Inst. för geoteknik), 1973: Geotekniska egenskaper hos natriumbentonit av typ Volclay.

- ENDELL, K., LOOS, W. & BERG, V., 1942: Relations between the behaviour of clay minerals with respect to water and the physical properties of cohesive soils. Publ. Soil Mech. Res. Center, U.S. Waterways Exp. Station, Bull. No. 14.
- HEAD, C.M., MOODY, W.E., MITCHELL, L. & YOUNG, R.A.: Effect of radiation damage on mullite formation in kaolinite. Clays and Clay Minerals, 10th Conf.
- HOUWINK, R., 1958: Elastizität/Plastizität und Struktur der Materie. Verl. v. Theodor Steinkopft, Dresden & Leipzig.
- JACOBSSON, A., 1974: Clay-water interaction. Diss. Sthlm. Univ.
- JACOBSSON, A. & Carlsson, T., 1977: Kontaminering av jord vid hantering av radioaktivt avfall. Tekn. rapp. till AB Atomenergi.
- JACOBSSON, A. & PUSCH, R., 1972: Thixotropic action in remoulded quick clay. Bull. Eng. Geol. No. 5.
- KRAUSKOPF, K.B., 1967: Introduction to geochemistry. Mc Graw-Hill Book Co.
- PUSCH, R., 1971: Microstructural features of pre-Quaternary clays. Acta Universitatis Stockholmiensis. Sthlm Contr. Geol., Vol. XXIV.
- PUSCH, R., 1974: Kompendium i geoteknik. Högskolan i Luleå.
- SNÄLL, S., 1977: Diss. Stockh. Univ.

- TAGIEVA & KIESELEV: Effect of γ -radiation on the properties of the surface of silica. Zh. Fiz. Khim., 35.
- TUMAY, M.T., LAREW, H.G. & MEEM, J.L., 1962: Effects of neutron- γ irradiation on physicochemical properties of fine-grained soils. Nat. Acad. Sci. - Nat. Res. Council, Publ. No. 1044.
- v ENGELHARDT, W., 1973: Die Bildung von Sedimenten und Sedimentgesteinen. E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart (Teil III).
- VELDE, B., 1977: Clays and clay minerals in natural and synthetic systems. Elsevier Sci. Publ. Co.
- VOLKOV, F.E., SCHLATCHEVSKAJA, R.I. & VORONKJEVITCH, C.D., 1976: О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ С РАСТВОРАМИ ЩЕЛОЧИ. ВЕСТН. МОСК. УНИВ., №3.
- YAMAMOTO, D., 1962: Catalytic combustion of piperine adsorbed on γ -ray irradiated bentonite. Nippon Kagaku Zasshi, 83.

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