



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

RAPPORT
REPORT No 14

Bentonittätning mot lakvatten

TOM LUNDGREN

LENNART KARLQVIST

ULF QVARFORT

LINKÖPING 1982



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

RAPPORT No. 14
REPORT

Bentonittätning mot lakvatten

E R R A T A

- p 9 Line 10: "... increase in permeability ...",
read: "... decrease in permeability ...".
- p 11 I rapportens sammanfattning har en av studiens sex
punkter (frågor) fallit bort:
- Frysningens effekt på permeabiliteten i jord-
bentonitblandade tätskikt.
- p 12 Näst sista raden står: "En ökning av genomsläppig-
heten med ...". Skall vara: "En minskning av ...".
- p 80 Tabell 14 och 15. Hänvisningen till tabell 12 respektive
p 81 14 skall vara till tabell 13 i båda tabellerna.
- p 94 1:a stycket, sista raden; står: "... av t ex betong-
blandade massor". Skall stå: "... av t ex bentonit-
blandade massor".



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

RAPPORT
REPORT No 14

Bentonittätning mot lakvatten

TOM LUNDGREN (Statens geotekniska institut)

LENNART KARLQVIST (Sveriges geologiska undersökning)

ULF QVARFORT (Uppsala universitet)

LINKÖPING 1982

Märket på omslaget
symboliserar SNV
projektområde
"Infiltration-
reningsprocesser
i mark och grund-
vattenskydd".

ISSN 0348-0755

TRYCK-CENTER AB Linköping 1982

FÖRORD

Huvuddelen av det projekt, som denna rapport utgör redovisning för, har genomförts med forskningsanslag från forskningsnämnden vid statens naturvårdsverk (SNV) och ingår som delprojekt i SNV's projektområde "Infiltrationsreningsprocesser i mark och grundvattenskydd" med Ulf von Brömsen som huvudprojektledare. Projektet omfattade ursprungligen två huvuduppgifter, dels studier av bentoniters beständighet mot lakvatten från kommunala avfallsupplag, dels en utredning av hur man vid upplag med kommunalt avfall bör utforma tätskikt på marken med jord-bentonitblandningar.

Utredningen om beständigheten mot lakvatten har genomförts i Uppsala av Ulf Qvarfort, Kvartärgeologiska avdelningen vid Uppsala Universitet (UU) och Lennart Karlqvist, Sveriges Geologiska Undersökning. Arbetet med hur tätskiktet bör utformas har genomförts i Linköping vid Statens geotekniska institut under ledning av Tom Lundgren.

Vid utvärderingen av resultaten från de två delutredningarna framkom misstankar om att sprickbildningar och därmed ökad genomsläpplighet kan uppkomma i jord/bentonitblandningar till följd av frost. Detta har senare studerats av Ulf Qvarfort inom ramen för Kol-Hälsa-Miljöprojektet (KHM). Han studerade därvid även möjligheterna att använda blandningar av kolaska och bentonit som tättningsmedel. Eftersom resultaten har betydelse för hur man bör utforma täthetsskikt för kommunala avfallsupplag har de sammanfattats i denna rapport och ingår som underlag för ett förslag till anvisningar.

I projektgruppen har som experter också ingått Per-Olof Seman, Kulturteknik, KTH (lakvatten) och Sven Snäll, Sveriges Geologiska Undersökning (lerkemiska frågor). Den förre har svarat för avsnitt 3.1 i rapporten. I de praktiska försöken har också Katarina Losjö och Ann-Christine Ahlberg (SGI) deltagit samt i laboratorie-

undersökningarna vid Uppsala Universitet Björn Gembert och Björn Wiberg.

De mineralkemiska analyserna av lakvattenexponerade bentonitprover har utförts av doc Hans Annersten, Mineralogiska avd, UU (Mössbauerspektrografi) och doc Bengt Lindqvist, Riksmuseet, Stockholm, samt fil kand Bert Törmä, Kemiska inst, UU (röntgenanalys). Värdefulla bidrag till projektet i form av erfarenheter från tätningsprojekt i full skala har erhållits från Allan Jerbo, Jerbo Geokonsult AB och Bertil Nordh, Biconsult AB. Råd om bentoniters användning som tätningsmedel har också erhållits av Hans Norin och Ingemar Ahlandsberg, båda Ahlsell IR samt Richard Flater, American Colloid Co. Ahlsell IR har bekostat det halvskaliga fältförsök som redovisas i bilaga 8.

Författarna riktar ett varmt tack till alla dem som bidragit till projektets genomförande.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sid
SUMMARY	7
SAMMANFATTNING	11
1 BAKGRUND	15
1.1 Bentonit som tätningsmedel	15
1.2 Problemställning	16
1.3 Tidigare och pågående forskning	18
1.4 Forskningsuppdraget	19
1.5 Undersökningens uppläggning	20
2 SYFTE	21
3 FÖRUTSÄTTNINGAR	22
3.1 Förekommande lakvattensammansättningar	22
3.2 Bentoniters sammansättning och egenskaper	24
3.3 Täthet och rent vatten	26
3.4 Lakvattens sannolika inverkan på bentonit	28
3.5 Karaktäristik över de undersökta materialen	29
4 GENOMFÖRDA FÖRSÖK	35
4.1 Inledning	35
4.2 Kemisk-fysikaliska försök	35
4.3 Genomsläpplighet för vatten	38
4.4 Blandningsförsök med bentonit och sand	44
4.5 Utläggings- och packningsförsök	47
4.6 Frys-försök	52
4.7 Andra studier över praktiskt viktiga förhållanden	53
5 RESULTAT OCH SLUTSATER	56
5.1 Bentonit/jordblandningars täthet mot vatten	56
5.2 Bentonit/jordblandningars beständighet	61
5.3 Obehandlade, naturliga, inhemska lerors täthet och beständighet	75
5.4 Anläggning av tätningsskikt	77
5.5 Bildning av frostsprickor	92
5.6 Praktiska frågor	94

	sid
6 FÖRSLAG TILL PROVISORISKA ANVISNINGAR OCH KONTROLLPROGRAM	95
6.1 Tätskikt av bentonit/jordblandningar - - utförande	95
6.2 Naturlig lera som kompletteringstättning - - utförande	98
6.3 Kontrollprogram vid bentonittätning	99
7 FÖRSLAG TILL FORTSATTA UNDERSÖKNINGAR	100
8 REFERENSER	102

BILAGOR:

1. Probleminventering
2. Uppsala Universitet - projektbeskrivning
3. Mössbauer - spektografisk undersökning av bentonit
4. Laboratorieundersökning av lera ("Leca-lera") från Gärstad
5. Röntgenografiska analyser av lakvattenexponerade prov
6. Permeabilitetsförsök vid SGI
7. Kostnadsberäkningar
8. Uppföljning av läckaget från en tätad lakvattenbassäng vid Hovgårdens avfallsstation under 12 månader

SUMMARY

BENTONITE SEALANTS IN THE POLLUTION CONTROL OF SANITARY LANDFILLS

Soil-bentonite mixed blankets are often suggested as manmade sealings when the natural ground is too pervious to allow a full landfill leachate control. The present study was initiated by the growing demand for bentonite sealing constructions under sanitary landfills in Sweden, Swedish designers and constructors as well as the National Environment Protection Board and local health authorities in Sweden need design criteria for soil-bentonite mixed blankets. The study deals mainly with six items.

- Bentonite application rate for different soils.
- Practical considerations on the application of soil-bentonite mixed blankets.
- Native (unprocessed) clay blankets as an alternative.
- Chemical resistance or durability of bentonites against leachate water.
- The effect of freezing on the permeability of the soil-bentonite blanket.
- The total cost per unit area of a sealing blanket and dependence on internal and external factors.

By means of a back-pressure oedometer (triaxial cell) and values from the literature the relation between hydraulic conductivity and bentonite percentage was established for some important soil grades. Field tests indicated that the conductivity values are significantly higher in the field than in the laboratory.

Soil and bentonite are usually mixed in two basic ways, either in a concrete mixer before application or after application by use of different agricultural machines. In the first case additional water should be introduced into the mixer. In the second case it is preferably spread after the mixing process. The mixing time in the

concrete mixer should exceed 10 minutes. Coarse, graded materials seem to show the best mixing results with bentonites. The use of a wheelless type of cultivator, which is common in small scale gardening, did not result in an efficient homogeneity, but the 6 time passages of a heavier cultivator with separate driving wheels did.

The compaction tests showed that a vibrating plate (6 passes) can be used. A vibrating roller (8 passes) should do the same work. The weight of the machines can be chosen according to the rules in Mark AMA 72 considering the appropriate soil grades and layer thicknesses.

Native clays which are transported and applicated as a 0.2-0.3 m thick blanket should be soft. Such a clay can be compacted between two gravel or morain layers (sandwich structure). However, the application work is delicate and time consuming and is therefore relatively expensive.

The native clay and the bentonites which were tested (including a polymer treated, pollution resistant sodium bentonite) were all affected by ion exchange at the exposition to leachate water in the laboratory. The conductivity of the polymer treated sand-bentonite mixture is expected to increase by a factor 2-3 in 25-50 years time. The corresponding calculated increase with a calciumbentonite is almost a factor of 20 in 50 years (4 in 25 years) and with the native clay a factor of 5 in 50 years.

Due to freezing frost cracks may form under certain conditions in sand-bentonite blankets. In some cases they even penetrate a 0,1 m thick layer. The resulting increase in permeability may correspond to three orders of magnitute. During thawing the cracks are closed and the initial low permeability is regained. A bad performance of the mixing and compaction is the most

important reason for the formation of penetration cracks. When there is a risk for formation of freeze cracks the grain size of the superimposed soil material should exceed 20 mm in order to avoid the formation of permanent drains in the blanket.

The total cost per unit area of a sealing blanket strongly depends on permeability specifications, raw material prices - especially that of bentonite - total size of the area treated and the equipment used. For example, an increase in permeability by one order of magnitude requires an additional bentonite rate of about 4 kg/m² corresponding to 3-20% increase in the total costs, depending on the other factors mentioned. The quality dependency in the bentonite prices makes a quality selection (calcium or sodium bentonite? polymertreated bentonite?) interesting. The native clay filling alternative is judged to be relatively expensive in most situations.

SAMMANFATTNING

Tätningsskikt av bentonitinblandad jord föreslås ofta som konstgjorda tätningar när den befintliga undergrunden är så genomsläpplig att man riskerar en okontrollerad spridning av lakvattnet. Denna studie initierades av det växande behovet av bentonittätskikt under kommunala avfallsupplag i Sverige. Svenska konsulter och entreprenörer liksom naturvårdsverket och hälsovårdsnämnderna har ett behov av råd och anvisningar för anläggning av tätskikt av jord-bentonitblandningar. Denna studie behandlar framför allt sex frågor:

- Bentonitinsats för olika jordarter
- Praktiska frågor vid utläggning av jord-bentonitblandade tätskikt.
- Utlagda skikt av naturliga leror såsom alternativ
- Kemisk motståndskraft eller beständighet hos jord-bentonit-skikt
- Den totala kostnaden per m^2 för ett tätskikt och dess beroende av inre och yttre faktorer.

Sambandet mellan genomsläpplighet och bentonithalt fastställdes för några viktiga jordarter med hjälp av en triaxialapparat med s k "back pressure".

Fältförsök visade att genomsläppligheten är betydligt högre i fält än i laboratorium.

Jord och bentonit blandas vanligen på två skilda sätt, antingen i en betongblandare före utläggning eller efter utläggning med hjälp av t ex någon jordbruksmaskin. I det första fallet tillförs vattnet under blandningen medan i det andra fallet det är fördelaktigt att vänta med vattnet till efter blandningen. Blandningstiden i betongblandaren bör överstiga 10 minuter. Grovkornigt, välgraderat material tycks ge det bästa blandningsresultatet tillsammans med bentonit. En vanlig villajordfräs visade sig ge ett dåligt blandningsresultat men en tyngre kultivator med separata drivhjul gav ett gott resultat efter 6 passager genom materialet.

Ett gott komprimeringsresultat uppnåddes för samtliga undersökta material efter 6 överfarter med en 145 kg tung vibratorplatta. Vid användning av vibrovält bör maskinvikt och antal överfarter väljas efter närmast motsvarande jordart och lagertjocklek enligt Mark-AMA 72 plus 2 överfarter.

Ett skikt med utlagd transporterad lera bör vara 0,2-0,3 m mäktigt och bestå av en lös lera. En sådan lera kan komprimeras mellan två grus- eller moränskikt. Ut-läggningsarbetet är emellertid besvärligt och tidskrävande och därför relativt dyrt.

De undersökta lerorna och bentoniterna (inklusive en polymerbehandlad, föroreningsresistent natriumbentonit) påverkades alla av jonbyte vid exponering för lakvatten i laboratorium. Genomsläppligheten i den polymerbehandlade sand-bentonitblandningen förväntas öka 2-3 gånger efter 25-50 års tid. Den motsvarande beräknade ökningen med en kalciumbentonit är nästan 20-50 gånger (4 gånger efter 25 år) och med en ren inhemska lera ca 5 gånger efter 50 år.

Frostsprickor kan under vissa omständigheter uppkomma i sand-bentonitskikt. I vissa fall kan de tränga igenom ett 0,1 m tjockt skikt och resultera i en 3-faldig ökning av genomsläppligheten. Vid tiningen stängs sprickorna och den ursprungliga tätheten återfås. En dåligt genomförd blandning och komprimering är den viktigaste anledningen till bildningen av genomgående sprickor. När det föreligger en risk för bildning av frostsprickor bör kornstorleken av eventuellt överlagrande material överstiga 20 mm för att inte permanenta dräner skall bildas i täcket.

Den totala kostnaden per ytenhet för ett tätskikt beror på täthetskraven, råmaterialpriset - särskilt vad gäller bentoniten - den behandlade ytans storlek och använd utrustning. En ökning av genomsläppligheten med en 10-potens kräver ett bentonittillskott på omkring 4 kg/m^2

motsvarande en ökning av de totala kostnaderna med 3-20% beroende av de övriga, ovan nämnda faktorerna. Bentonitprisernas kvalitetsberoende gör det intressant att jämföra bentonitkvaliteter (kalcium- eller natriumbentonit? polymerbehandlad bentonit?). Alternativet med en transporterad, ren lerfyllning bedöms bli relativt dyr i alla situationer.

1 BAKGRUND

1.1 Bentonit som tätningsmedel

Bentonit, som är ett handelsnamn för finkorniga, ofta torkade och malda, svällande leror, har länge använts som bl a tätningsmedel mot vatten i jord och i berggrund. Exempel på dess ofta utomordentliga egenskaper i detta avseende finns väl dokumenterade. På senare tid har bentonit även föreslagits och kommit till användning som tätningsmedel mot lakvatten från soptippar. Denna användning bedöms få en vidare spridning, allteftersom svårigheterna ökar att finna lämpliga, tillräckligt täta deponeringsplatser i torr terräng. Den största betydelsen torde medlet kunna få för kompletterande tätning i områden som till största delen uppfyller kravet på att vara naturligt täta.

Lerors tätande förmåga bygger i allmänhet på att lerpartiklarna är mycket små och därför bygger upp ett system med trånga porkanaler. Bentonitens tätande förmåga beror emellertid framför allt också på dess svällningsförmåga, dvs förmåga att binda vatten och därvid praktiskt taget helt stänga porerna. På grund av att partiklarna är små och att svällningsförmågan ofta är mycket hög, erfordras förhållandevis lite bentonit för att tätat ex sand, om den inblandas effektivt.

Bentonit har föreslagits som lämpligt material att tillsammans med en jord tjänstgöra som tätande material mot jonrika vatten, s k lakvatten (Hansbo & Olsson, 1973, Geswein 1975, Haxo 1975, Smith 1976, Alesii & Fuller 1976, Karlqvist et al 1977). De tekniska frågorna kring ett sådant tätande material berör förutom lämplig utformning av bentonit-tätskiktet, även de fysikaliska och kemiska förhållanden, som kan tänkas påverka tätskiktets egenskaper (Pask and Turner 1955, Hughes 1975, Smith 1976).

Det finns emellertid en väl grundad misstro mot bentonit som tätningsmedel mot just lakvatten. Denna misstro grundas på förhållandet att tätningen skall vara verksam under lång tid och att bentonitens tätande egenskaper

därvid kan påverkas kemiskt. Den kemiska påverkan kan resultera i att bentonitens svällningsförmåga reduceras och kanske t o m försvinner. Detta kan huvudsakligen ske på två sätt, dels på kort sikt genom en förhöjning av elektrolythalten i vattnet som nedsätter bentonitsvällningen, dels på lång sikt genom jonutbyte, vilket i de allra flesta fall leder till minskning av svällningsförmågan.

1.2 Problemställning

I bilaga 1 redovisas en probleminventering avseende bentonittätning vid soptippsdeponering.

Den täthet som uppnås genom inblandning av bentonit i jord beror framför allt på följande faktorer:

- Bentonitkvalitet
- Bentonithalt
- Jordart
- Inblandningsmetod
- Grad av kemisk påverkan

Vid dimensionering av ett tätningsskikt (bentonit/jord) erfordras ett beräkningsunderlag som tar hänsyn till ovanstående faktorer. Ofta kan bentonitfabrikanten presentera ett underlag som framtagits för tätning mot färskvatten eller för kortvarig exponering mot saltvatten (t ex vid oljeborrning). De underlag som finns i fabrikantens anvisningar är ofta svåra att använda. Underlag som tar hänsyn till långvarig kemisk påverkan av bentoniten finns sannolikt inte.

En fabrikant, American Colloid Co, påstår sig ha löst problemet genom att kemiskt stabilisera bentoniten. Deras bentonitprodukt ("Volclay") kan på konstgjord väg förses med en inre skyddsmekanism baserad på en polymerisationsprodukt, som speciellt utprovats för ändamålet. Man påstår sig ha en uppfattning om hur skyddsmekanismen fungerar och har ca 7 års god erfarenhet och ger 30 års funktionsgaranti i USA.

Av redan framkomna forskningsresultat att döma är bentonit i många fall ett lämpligt tätningsmedel mot förorenat vatten. Det är emellertid uppenbart att tätningsförmågan varierar med förutsättningarna. Troli- gen finns det också fall då bentonittätning ej är att rekommendera. Det kan också vara viktigt att välja rätt bentonit i varje enskilt fall. Av allt detta framgår att det föreligger ett klart behov av råd och anvisningar för dels konstruktion av bentonittätning mot lakvatten, dels kontroll av sådana konstruktioners effektivitet.

För att kunna upprätta sådana råd och anvisningar måste följande sex huvudfrågor besvaras (sommiga av dem har redan delvis besvarats):

- Hur påverkas bentoniters täthetsegenskaper av lakvattens elektrolytiska inverkan? Hur reagerar olika bentonittyper i detta avseende?
- Hur påverkas bentoniters täthetsegenskaper av jonbyte? Hur reagerar olika bentoniter för olika joner i detta avseende?
- Hur effektiv är skyddseffekten av "kemiskt skyddade" bentoniter av typ Volclay Saline Seal 100 på lång sikt?
- Mot vilka typer av lakvatten (eller förorenade vatten överhuvudtaget) kan man använda bentonit som tätningsmedel?
- Vilka mekaniska egenskaper har bentonittättningsmaterial som utsätts för inverkan från lakvatten? Finns det anledning att misstänka att materialet är känsligt för mekanisk påverkan? I så fall, under vilka förhållanden?
- Hur påverkas bentonit/jordblandning av frost? Under vilka omständigheter kan det bildas frostsprickor som verkar nedsättande på materialets täthet?

1.3 Tidigare och pågående forskning

Vid Chalmers tekniska högskola, institutionen för geoteknik med grundläggning, genomfördes 1973 en utredning angående de geotekniska egenskaperna hos en bentonit av Volclay-typ. I denna utredning behandlades även inverkan av förorenade ytvatten på täthetsegenskaperna hos en sand-bentonitblandning (Hansbo & Olsson, 1973).

Försöken visade att en inblandning av 15% bentonit i sand medför att permeabiliteten för rent vatten minskar från 10^{-6} m/s (ren sand) till 10^{-11} m/s. För förorenat ytvatten (Mölnålsåvatten) erhöles permeabiliteten 10^{-8} ä 10^{-9} m/s i 15%-ig bentonitsand. Mot havsvatten hade däremot 15% bentonit ingen nämnvärd tätande effekt i sand. Det förorenade vattnets salthalt motsvarade den elektriska ledningsförmågan 15-20 mS/m och saltvattnets 3620 mS/m.

Eftersom lakvattnets jonkoncentration generellt kan motsvara flera hundra mS/m och även i extremfall likna havsvattnets, måste man räkna med en avsevärd täthetsminskning när lakvatten perkolerar igenom sand-bentonitblandningar.

Vid Uppsala universitet, kvartärgeologiska avdelningen, har tätningsegenskaperna hos olika natriumbentoniter (ren sådan, respektive blandad med sand) av fabrikat Volclay undersökts mot olika vatten i laboratorium. Vissa av dessa bentoniter uppvisade goda tätningsegenskaper, andra sämre. Försöken visade också att man i vissa fall kan påräkna en försämring av den mekaniska hållfastheten i bentonittätningmaterialet. Hur stor denna försämring kan bli och vilken betydelse den kan få är ännu ej klarlagt. Man har också visat att jonbyte sker i de aktuella bentonittyperna. Detta tycks ej i nämnvärd grad påverka tätheten mot kalciumdominanta vatten, men väl mot kaliumdominanta vatten. Motsvarande fältförsök har påbörjats i Uppsala.

Utöver de nämnda erfarenheterna från laboratorieförsök har praktiska erfarenheter uppnåtts i några inhemska tättningsprojekt i full skala. Sådana projekt har rapporterats från Sundsvallstrakten (Allan Jerbo, Jerbo Geokonsult AB) samt från Teckomatorp (BINAB).

1.4 Forskningsuppdraget

Naturvårdsverket gav i juni 1978 Geotekniska institutet i uppdrag att genomföra en förstudie av problemet bentonittätning mot lakvatten. Studien skulle inriktas mot att klargöra den kvantitativa betydelsen av förhållanden som påverkar bentonitmaterialets tätande inverkan mot lakvatten. Jämförelser med ett tätningmaterial bestående av "vanlig" svensk lera skulle också göras. Studien avsågs, om möjligt, leda fram till förslag till (ev provisoriska) råd och anvisningar för utformning av bentonittätning mot lakvatten - eller, om så ej var möjligt, till ett program för fortsatta undersökningar i syfte att ta fram sådana anvisningar.

Arbetet avsågs omfatta en inventering och analys av redan framtagna resultat, en kontinuerlig uppföljning av Uppsalaförsöken, vissa kompletterande laboratorie- och halvskaleförsök (för att kunna generalisera Uppsalaresultaten), orienterande försök som belyser hur bentoniten bör användas, konsultation av externa experter i delfrågor samt sammanställning av resultaten och programskrivning.

I denna rapport redovisas även resultat från frysörsök med bentonit/jordblandningar, vilka genomförts av Ulf Qvarfort, UU. Dessa försök ingick ursprungligen inte i projektplanen, utan har utförts för projekt Kol-Hälsa-Miljö. Kompletteringen av rapporten har gjorts i samråd med SNV i syfte att bredda underlaget för förslaget till provisoriska anvisningar.

1.5 Undersökningens uppläggning

Undersökningen delades in i tre, väl skilda delar:

- Karaktäristik av lakvatten från avfallsupplag.
- Bentonitmateriallets beständighet mot lakvatten.
- Lämplig utformning av bentonittätningsskikt.

Den första delen utgör i sig en omfattande och i dagens läge kanske omöjlig uppgift, om anspråken på noggrannhet och allmängiltighet ställs högt. Kraven har emellertid inte ställts högre än att vissa grova uppskattningar skall kunna göras av vilka kemiska miljöer, som kan bli aktuella under avfallsupplag. Det ansågs lämpligt att engagera Per-Olof Seman, Kulturteknik, KTH, för denna uppgift.

Bentonitmaterials beständighet beslöts utredas i enlighet med en projektplan som Uppsalaforskarna upprättade 1977-12-08 (se bilaga 2). Planen utgör en fortsättning och utvidgning av en undersökning som pågått under 1977 vid Kvartärgeologiska avdelningen i Uppsala. Detta innebar fortsatta kolonnförsök med bentonitblandad sand som utsätts för lakvatten, jonbytesförsök och försök med uppvärmt vatten. De kemisk-fysikaliska undersökningarna av bentonitmaterial som exponerats för lakvatten skulle ske genom permeabilitetsmätningar, kemiska och röntgenografiska analyser.

Den sista delen av undersökningarna avsågs omfatta blandnings- och packningsförsök med bentonit och olika jordballastmaterial samt bestämning av sambandet mellan bentonithalt och permeabilitet.

De två senare delarna kompletterades med jämförande undersökningar i respektive moment med naturlig, obehandlad (inhemsk) lera. Som framgår av avsnitt 1.4 har förstudien i efterhand kompletterats med en studie över frostsprickor i jord/bentonitblandningar.

2 SYFTE

Avsikten med projektet är att studera några olika bentonit/jordblandningars täthetsegenskaper mot lakvatten samt att ta fram några enkla regler för deras användning. Med täthetsegenskaper avses inte enbart den momentana eller kortsiktiga täthet mot vatten som sådana blandningar har, utan även den täthet som erhålls när bentoniten under en längre tid påverkats av förorenade vatten av typ lakvatten. Avsikten är också att dessa resultat skall jämföras med motsvarande erhållna från studier av naturlig, obehandlad, inhemska lera.

Ur principiell synvinkel är problemställningarna omfattande och relativt komplexa. Ambitionen med projektet (förstudien) är emellertid endast att undersöka om det är sannolikt att bentonit framgångsrikt kan användas som tättningsmedel under soptippar och i så fall ta fram ett underlag för provisoriska anvisningar för dess användning.

Slutligen skall också eventuella förslag ges till fortsatta utredningar som kan vara nödvändiga i frågan.

3 FÖRUTSÄTTNINGAR

3.1 Förekommande lakvattensammansättningar

Lakvatten från hushållsavfall kan karakteriseras som ett saltrikt vatten med stort innehåll av organisk substans, vanligen producerat under anaeroba förhållanden och därför kraftigt syretärande. Ibland förekommer höga metallhalter i lakvattnet.

Malt avfall ger upphov till lakvatten med betydligt högre halter av flertalet element (Persson & Rylander, 1977). Aerob kompostering ger likaledes höga föroreningshalter i lakvattnet (Heinemo & Brink, 1978). Bägge dessa undersökningar har utförts i pilotskala under kontrollerade förhållanden där provtagning har skett på ett utspätt lakvatten. Lakvattenprover som tas i samband med kontrollprogram vid avfallsanläggningar i full skala kan i varierande grad vara utspädda med yt- eller grundvatten, varför dessa prover vanligen uppvisar lägre halter.

I tabell 1 har resultaten från kemiska analyser, som ingått i kontrollprogrammen för 26 olika upplag, sammanställts. Värdena avser haltintervall för pH, ledningsförmåga (γ), organisk substans (som KMnO_4 -förbrukning, COD eller BS_7), totalkväve, totalfosfor samt metallerna järn, koppar, zink, bly, kadmium, nickel, kobolt och krom. Dessa parametrar är vanligast förekommande vid yt- och grundvattenkontroll av lakvattenföroreningar vid avfallsupplag. Vattenproverna är oftast tagna i utjämningsmagasin för lakvatten under år 1977 och 1978 i samband med kontrollprogram för avfallsupplag i AB, C, D, E, F, G, H, I, K, N, O, P och R län. På grund av lakvattnens varierande förhållanden vid provtagningen har det ansetts meningslöst att beräkna medelkoncentrationer. I stället redovisas i tabellen vanligen förekommande halter.

Tabell 1. Lakvattensammansättning i mg/l. (Källa: Kontrollprogram ur SNV-handlingar, Persson & Rylander 1977 samt Heinemo & Brink 1978).

	Ø mS/m	pH	KMnO ₄	COD	BS ₇	Tot-N	Tot-P	Fe	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Co	Cr	
Lakvatten i utj. magasin	min	30	6.5	100	69	5	7	.04	.6	<.01	.01	.003	<.0005	<.032	.001	.004
	max	1620	8.3	3765	3750	2000	835	6.5	170	.19	7.3	.23	18	1.1	.04	1.6
Vanliga lakvattenhalter		300-400	7	500-800	300-500	100-200	50-100	0.5-1.0	20-50	.02-.05	.2-.5	.05-.10	.005	.03-.04	.01	.02-.03
Kompost ⁺	min	220	6.9	1400	--	--	105	1.8	3.6	1.2	.86	.07	.0025	--	--	--
	max	877	8.4	3500	--	--	540	4.0	13.5	3.6	2.1	.29	.006	--	--	--
Malt avfall ⁺⁺	min	1800	5.42	--	37330	3380	768	11.0	413	.05	13.4	.16	.012	.52	.34	.19
	max	2230	5.71	--	45110	16020	1198	41.6	687	.10	34.0	.26	.026	.99	.53	.31

⁺Lägsta resp högsta årsmedelvärde för siktad och osiktad kompost

⁺⁺Lägsta resp högsta medelvärde per två år för malt avfall, med eller utan slamblandning och returpumpning

Få lakvattenundersökningar redovisar lakvattnets innehåll av de katjoner som normalt dominerar vid jonbytesprocesser i mark, dvs natrium, kalium, kalcium och magnesium. I samband med bentonittätning är denna jonsammansättning av stort intresse. Två lakvattenundersökningar i Sverige och en i Norge redovisar dessa baskatjoner (Meijer, Seman resp Johansen). Bearbetningar av resultat från dessa undersökningar redovisas i tabell 2.

Tabell 2. Variationsbredden för årsmedelvärdena för baskatjonkoncentrationen i några lakvattenförorenade vatten samt jonkoncentrationernas inbördes relation.

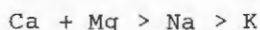
	Antal analyser	K mekv/l	Na mekv/l	Ca+Mg mekv/l	K/Na mekv/l	(Ca+Mg)/Na mekv/l
Lakvatten ¹	10	6.89-10.00	4.77-20.90	12.53-36.37	.48-1.22	1.22-2.66
Grundvatten ¹	75	1.45- 5.99	3.47- 9.64	6.83-15.02	.22- .83	1.24-3.21
tvatten ²	153	.44- 8.35	1.88-20.98	4.77-23.36	.24- .40	1.13-3.84
orska lakv ³	?	.54- 5.60	1.51-20.09	6.01-24.40	.25- .64	.74-3.98

Källa: Seman, opubl.

Källa: Meijer, opubl.

Källa: Johansen, 1976 (Från 5 olika upplag)

Av tabellen framgår att ekvivalenta mängder av baskationerna förekommer i ordningen



Endast två lakvattensammansättningar av 20 stycken refererade avviker från detta mönster. I ena fallet dominerar natrium över kalcium och magnesium, i andra fallet kalium över natrium.

Det förefaller som om kvoten $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{Na}$ blir lägre och kvoten K/Na högre vid ökande totalsalthalt i lakvattnet. Orsaken till detta har inte närmare undersökts.

Lakvattnets allmänna sammansättning kommer ytterligare att belysas av Jan Erik Meijer inom projektet "Infiltration - reningsprocesser i mark och grundvattenskydd".

3.2 Bentoniters sammansättning och egenskaper

3.2.1 Smektiters uppbyggnad

Smektit eller montmorillonit, som är det dominerande lermineralet i bentonit klassificeras som ett tre-skikts (eller 2:1-) skiktssilikat. Detta föranses av att smektitstrukturens enhetscell är sammansatt av två tetraederskikt och ett mellanliggande oktaederskikt. Den allmänt accepterade bilden av gitterstrukturen framgår av Fig 1.

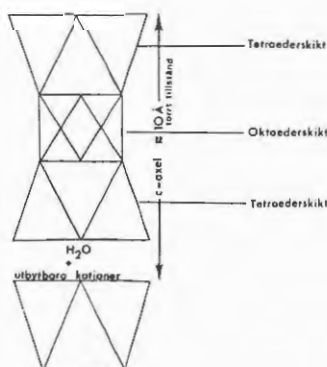
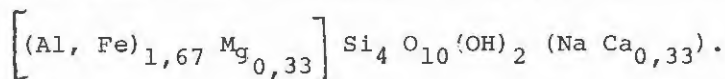


Fig 1. Den allmänna gitterstrukturen hos lermineral av smektittyp, dvs hos de lermineral som vanligen finns i bentoniter. Från Jacobsson & Pusch (1978).

Smektitens kemiska sammansättning kan allmänt skrivas:



Genom att vid mineralens uppbyggnad vissa Si^{4+} -joner ersatts med Al^{3+} och vissa Al^{3+} -joner med Mg^{2+} , s k isomorf jonersättning, har en negativ överskottsladdning uppstått. Dylika substitutioner är inte enbart knutna till Al^{3+} och Mg^{2+} utan andra katjoner kan också medverka. Denna överskottsladdning, s k permanent laddning, neutraliseras av ett motsvarande antal katjoner.

De neutraliserande jonerna består av exempelvis kalcium, magnesium, kalium, natrium och väte. De av dessa joner som sitter på ytan av partiklarna eller inuti partiklarna på sådant sätt att de är termiskt rörliga, dvs icke alltför hårt bundna, föreligger i utbytbar skick och kan ersättas med joner från den omgivande marklösningen. Härigenom förklaras en del av smektiternas katjonbindande och katjonbytande förmåga. I smektit varierar avstånden mellan elementarskikten, och avståndet mellan dessa är tillräckligt stort för att vattenmolekyler och joner skall kunna vandra till och från dessa inre ytor (Wiklander, 1963, Troedsson och Nykvist, 1973).

De ovan redovisade substitutionsprocesserna har givit jonbytesförmågan, som i sin tur medverkar till såväl positiva som negativa egenskaper för tätande ändamål. Det som i detta sammanhang har största betydelsen är i vilken huvudvariant bentoniten föreligger. Sålunda har i regel ett högt innehåll av Na^+ -joner en positiv effekt avseende svällning och permeabilitet, medan t ex bentonitens kalciumvariant har något lägre svällning och högre permeabilitet (jämför bl a Pask and Turner 1955 och Grim 1962).

3.2.2 Bentonittyper

Inte alla i naturen förekommande bentoniter är lämpliga i tätningsmaterial mot jonrika vatten. Detta beror på att jonbytesprocesser orsakar vissa förändringar i

tättningsmaterialalets egenskaper. Av betydelse är därvid att svällningen reduceras och att permeabiliteten ökar.

Man brukar benämna bentoniterna efter dominerande utbytbara jonslag. Om Na^+ -innehållet är stort i förhållande till Ca^{2+} har vi en bentonit av natriumtyp. Är förhållandet omvänt har vi en kalciumbentonit. Det anses allmänt att en bentonit med ett högt innehåll av Na^+ har högre svällning än motsvarande Ca-variant. (Mielenz and King 1955).

Baserat på tidigare undersökningar och preliminära överväganden valdes bentoniterna Black-Hill, Sabenil 650 och SLS-71 (Volclay), för projektets undersökningar. Black-Hill och SLS-71 beskrivs som naturliga smektitleror med ett högt Na^+ -innehåll. SLS-71 har vid tillverkningen dessutom tillsatts en vattenlöslig polymer samt ett vattenlösligt dispergeringsmedel (genom torrinblandning, svenskt patent 7407123-4, 401222). Detta anses motverka icke önskvärda utbytesprocesser vid kontakt med jonrika vatten (American Colloid Company). Sabenil 650 är en skgjuteribentonit med ett relativt högt järninnehåll. Som jämförelse har även en kvartär postglacial lera, Leca-lera, använts. Samma lera har även använts vid de praktiska fältförsöken, se avsnitt 5.4.4. Materialen beskrivs närmare i avsnitt 3.6.1.

3.3 Täthet mot rent vatten

Det man framför allt vill uppnå med bentonit/jordblandningen är en bestående täthet mot lakvatten. Hur hög genomsläpplighet man kan tolerera beror i princip av flera faktorer, bl a:

- Lakvattnets sammansättning (koncentration av oönskade ämnen)
- Undergrundens (inkl bergets) täthet
- Närhet till skyddsvärd (potentiell) grundvattenresurs
- Bentonit/jordblandningens och undergrundens förmåga och kapacitet att fastlägga i lakvattnet skadliga ämnen.

Frågeställningen är komplex och gäller även för undergrunden när konstgjort tätskikt ej användes. En fullständig kvantitativ förståelse av de nämnda faktorerna finns ej idag. Det är därför svårt att fastställa vilka krav på täthet man bör ställa på undergrund och/eller konstgjort tätskikt. För undergrund som ej kräver något extra tätskikt gäller idag rekommendationen att genomsläppligheten eller permeabiliteten (k) generellt bör vara mindre än 10^{-7} m/s (SNV 1974:24). Det anges också att det räcker att värdet på (den generella) genomsläppligheten beräknas (bedöms) med ledning av litteraturuppgifter eller genom laboratorieförsök (på enstaka prov?). Med kännedom om hur snabbt just genomsläppligheten brukar variera i verkligheten och med bristen på koppling till de aktuella jordlagrens mäktighet måste man betrakta dessa rekommendationer som mycket översiktliga.

Det är uppenbart att de i SNV-publikationen angivna värdena refererar till rent vatten, som man har någorlunda god kunskap om. Därför har också våra mätningar utförts med rent (destillerat) vatten och angivna värden på genomsläppligheten gäller oftast rent vatten. Eftersom tjockleken på ett tätskikt är mindre, än vad man får anta skulle gälla för motsvarande befintliga, tillräckligt täta jordlager, bör tätskiktets genomsläpplighet vara mindre än jordlagrets. Vi anser att den bör vara mindre än en tiondel av det maximivärde man rekommenderar för tillräckligt tät befintlig jord.

Man diskuterar numera allmänt att höja kraven på den befintliga jordens täthet. Vi har därför, för säkerhets skull antagit att man för ett "konstgjort" tätningsmaterial som är 150-300 mm tjockt bör ställa kravet $k \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s. I själva verket borde man ställa olika krav i olika situationer (olika tät eller mäktig undergrund t ex). Maximivärdet får därför ses som ett allmänt riktvärde och gäller som ett medelvärde för materialet. En viss spridning av värdet på grund av ofullständig homogenisering av dess komponenter måste tillåtas. Motsvarande spridning i befintligt jordtäckte är ju en realitet.

3.4 Lakvattens sannolika inverkan på bentonit

Bentonit/jordblandningars varaktighet som tätningsmaterial under en deponeringsplats för avfall är beroende av den kemisk-fysikaliska inverkan som lakvattnet har på materialet. Dels är det fråga om den elektrolytiska verkan lakvattnets joner får i systemet, vilket av allt att döma medför en reduktion av svällningsförmågan och tätningsegenskaperna. Denna förändring bör vara relativt snabb. Dels är det fråga om utbyte av katjoner som är relativt löst bundna till lerpartiklarnas ytor och som i sin tur (mer eller mindre effektivt beroende på typ av katjon) attraherar de polära vattenmolekylerna till partiklarna.

Av detta framgår att lakvattnets kemiska sammansättning är av väsentlig betydelse. All tidigare information tyder på att denna sammansättning varierar kraftigt, även inom samma soptipp. Detta beror sannolikt på en mängd svåridentifierbara förhållanden, t ex sopornas sammansättning, vilka inte kan utredas inom detta projekt. Det har dock ansetts väsentligt att få en vägledande uppfattning om inom vilka gränser lakvattnets kemi kan variera. I avsnitt 3.1 har Per-Olof Seman givit en allmän karaktäristik av några lakvatten från soptippar.

I uppgiften har ej ingått att undersöka hur bentoniten påverkas av alla förekommande typer av lakvatten. I tidigare undersökningar har man undersökt inverkan av havsvatten och förorenade ytvatten (Hansbo & Olsson, 1973) samt kalcium-, kalium och natrium-dominanta vatten inklusive gödselvatten (Karlqvist et al., 1977). För dessa undersökningar har ett naturligt lakvatten, som är representativt för så många avfallsupplag som möjligt, valts. Per-Olof Seman har svarat för urval och leverans av detta lakvatten, se avsnitt 3.5.4, tabell 4.

3.5 Karaktäristik över de undersökta materialen

3.5.1 Använda bentoniter

Tre bentoniter valdes för försöken. Alla tre är i dag lätt tillgängliga på den svenska marknaden. En av bentoniterna (Sabenil) representerar en gjuteribentonit av kalcium/natrium-typ. De övriga två är mera typiska tätningbentoniter, dvs högsvallande natriumbentoniter ("Black-Hill" och "Volclay SLS 71"). SLS 71-varianten är en sk polymerbehandlad bentonit. Syftet med behandlingen är att göra bentoniten motståndskraftig mot jonrika vattenlösningar. Följande data gäller för de tre bentoniterna:

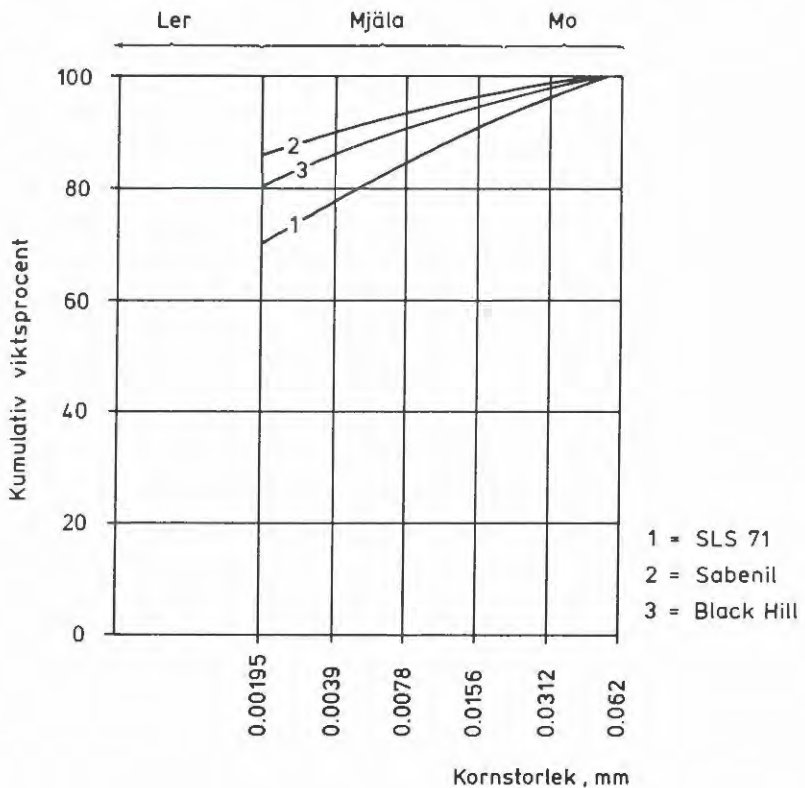
Benämning:	Tillverkare:	Leverantör:	Ca-pris* per ton:
Sabenil 650	Severoceske Bentonity (Tjeckoslovakien)	G&L Beijer AB (Malmö)	750 kronor
Black-Hill (Wyoming-bent)		Westin & Back- lund AB (Stockholm)	900 "
Volclay SLS 71 (Wyoming-bent)	Amer.Colloid Comp. (Skokie, Ill., USA)	Ahlsell IR AB (Stockholm)	1.600 "

Kornstorleksfördelningen för SLS 71, Black-Hill och Sabenil 650 har bestämts genom hydrometeranalys. Resultatet visar att Sabenil 650 innehåller $\approx 85\%$ material $< 2\mu\text{m}$, medan motsvarande värde för Black-Hill är 80% och för SLS 71 70% (se Figur 2). Påpekas bör att resultatet är något osäkert p g a materialets svällning, vilket orsakar svårigheter vid bestämningarna.

Mineralogiska undersökningar visar att det förutom huvudmineralet smektit framför allt förekommer kvarts och fältspat. Nedan redovisas en sammanställning över totalkemiska analyser av de undersökta bentoniterna.

* utan mängdrabatter, 1978 års priser

		Sabenil 650	Wyoming- bentoniter
SiO ₂	%	42.05	63.2
Al ₂ O ₃	%	13.14	16.1
TiO ₂	%	2.51	0.1
Fe ₂ O ₃	%	13.2	2.2
MgO	%	2.97	1.6
CaO	%	2.72	1.1
Na ₂ O	%	2.44	2.2
K ₂ O	%	0.42	0.5
Krist. vatten	%	8.2	5.5



Figur 2. Kornstorleksfördelning hos de undersökta bentoniterna.

Analyser av Sabenil 650 har erhållits från G & L Beijer AB, Stockholm, medan data för Wyoming-bentoniter har hämtats från Grim (1962), Jacobsson & Pusch (1978) och Williams et al (1953). "Wyoming-bentoniter" representeras i denna utredning av "Black-Hill" och "SLS 71".

Två bentonitprover har undersökts med hjälp av s k Mössbauer-spektrografi - Sabenil 650 (guldfärgad) respektive SLS 71 (gråvit Na-bentonit). Av leverantören uppgiven halt järn (som wt-% Fe_2O_3):

Sabenil	13,2
SLS 71	2,2

Ett Mössbauerspektra kan endast ge upplysning om järn, dess valens och koordination. Datorutvärderingen av de båda provernas spektra, som visas i bilaga 3, ger:

Sabenil 650	90.2%	av järnet föreligger i <u>trevärd</u> form
	9.8%	<u>tvåvärd</u> form
SLS 71	62.5%	<u>trevärd</u> form
	37.5%	<u>tvåvärd</u> form

Järnet i de båda proverna är helt bundet till silikater: järnoxider (magnetit och hämatit) är ej närvarande i proven. Övriga Mössbauer-parametrar indikerar att järnet i prov SLS 71 troligen är bundet i smektit medan järn troligen är bundet till mineralet vermikulit i prov Sabenil 650.

De nämnda bentonitsorterna har också analyserats med hjälp av röntgendiffraktion och röntgenfluorescens i en serie jämförande försök med obehandlade prover och lakvattenexponerade prover. Dessa analyser redovisas i bilaga 4.

3.5.2 Jordmaterial i bentonitblandningar

De jordmaterial, som använts tillsammans med bentonit vid försöken, är förtecknade i tabell 3, där det också framgår i vilka försök respektive material ingått.

"Silversand" är benämningen på en siktaad (0-2 mm) och tvättad kvartssand från södra delen av Östersjöbäckenet. Den har levererats av Ahlsell IR AB. De tre övriga jordmaterialen har hämtats i ett grus/sandtag vid Lambohovs gård utanför Linköping. Deras kornstorleksfördelningsskäraktäristika framgår av figur 3. I frys försöken har i bentonitblandningarna använts en sand som motsvarar den välgraderade sanden från Lambohov.

Tabell 3. Använda jordmaterial vid de olika försöken.

Benämning:	Välgraderad sand	Grovmo	Isälvs-material	Silver-sand
Blandnings-försök (SGI)	X	X		
Packnings-försök (SGI)	X	X	X	
Permeabili-tetsförsök SGI-lab	X	X		
Permeabili-tet SGI-fält-försök	X	X	X	
Permeabili-tetsförsök UU-lab		X		X
Jonutbyte UU-lab				X

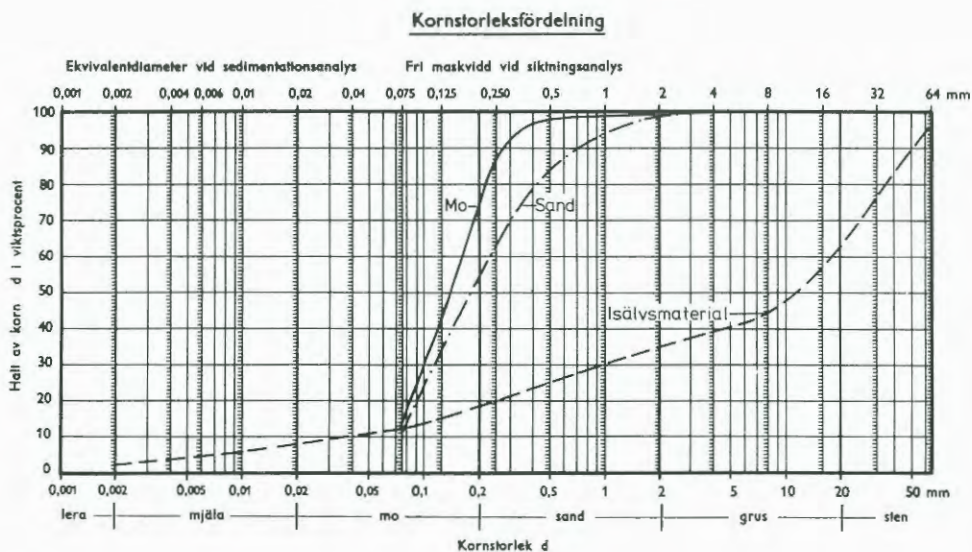


Fig 3. Kornstorleksfördelningen för de tre jordmaterial som använts i bentonit/jord-försöken.

3.5.3 Naturlig, obehandlad inhemsk lera

De två lerorna undersöktes vid SGI's (fysikaliskt) och SGU's (mineralogiskt) laboratorier. Resultaten är redovisade i bilaga 4. Här ges en kortfattad sammanställning i tabellform:

	Den fasta torrskorpeleran	Den lösa "såp-leran"
Vattenkvot	29-39%	72-74%
Finlekstal (ung=flytind)	59-65%	64-68%
Plasticitetstal	27-28%	28-30%
Mineralinnehåll (se bilaga 5)	Illit, svällande blandskikt av smektit typ (kaolinit)	Illit, klorit, svällande blandskiktmin. (kaolinit)
Permeabilitetskoeff.	$1 \cdot 10^{-10}$ m/s	$2 \cdot 10^{-10}$ m/s

3.5.4 Lakvattnet

Det lakvatten som använts vid de kemiska försöken där det gällt att studera bentonitens beständighet mot sådana vatten med avseende på svällnings- och täthetsförmåga, är ett naturligt lakvatten hämtat från Hall, Södertälje. Valet av lakvatten har gjorts med utgångspunkt ifrån att vi önskat ett referensmaterial som är så representativt som möjligt för våra soptippar och att det har en jämn men realistisk jonsammansättning med avseende på de utbytbara katjonerna. Extrema vatten bör - av tidigare utredningar att döma - behandlas individuellt och skulle sannolikt inte bidra till att ge generella resultat. Det använda lakvattnets kemiska sammansättning framgår av Tabell 4.

Tabell 4. Lakvatten, samtliga halter i mg/l. utom ledningsförmåga och pH.

Elektrisk ledningsförmåga	315 mS/m (25°C)
Permanganatförbrukning KMnO_4	170
Glödrest	1997
pH	7,0
Ammonium, NH_4	5,8
Järn, Fe	45,6
Mangan, Mn	0,98
Alkalitet, beräknat som HCO_3	1547
Klorid, Cl	325
Sulfat, SO_4	20
Nitrat, NO_3	2
Nitrit, NO_2	0,03
Natrium, Na	216
Kalcium, Ca	188
Kalium, K	140
Magnesium, Mg	69
Totalfosfor, P	0,28
Kemisk syreförbrukning, COD	211

4 GENOMFÖRDA FÖRSÖK

4.1 Inledning

Som redan nämnts i avsnitt 1.5 har de kemisk-fysikaliska försöken genomförts vid kvartärgeologiska avdelningen i Uppsala medan de praktiskt-tekniska försöken genomförts vid SGI i Linköping. Eftersom dessa två försöksserier haft skilda vetenskapliga syften, men samma praktiska mål - att ge ett underlag för hur bentonit bör användas - har vi valt att redovisa respektive försöks genomförande i särskilda delavsnitt medan resultaten från de två försöksserierna redovisas integrerat och efter en användar-praktisk indelning.

På grund av arbetets karaktär av förstudie med praktisk-teknisk inriktning har ej försöken genomförts i en så fullständig omfattning som en strängt vetenskaplig utredning skulle ha blivit utförd, jfr tabell 3.

4.2 Kemisk-fysikaliska försök

4.2.1 Utbytesförsök

För att få en uppfattning om det utbytbara joninnehållet i proven har en serie jonutbytesförsök genomförts. Den naturliga mängden utbytbara joner i proven har bestämts genom lakning med $\text{NH}_4\text{-Ac}$ vid pH 7 (Jacksson, 1962). Halten Na^+ , K^+ , Ca^{2+} och Mg^{2+} bestämdes i lakvattnet med hjälp av en Varian 1 200 atomabsorptionspektrofotometer. Erhållna analysresultat ger utbytbara joner, vilka redovisas som mekv/100g torkat prov (105°C). Summan av ingående joner ger också ett ungefärligt mått på basutbyteskapaciteten. (Bear 1964, Jacobsson & Pusch 1978).

4.2.2 "Åldringsförsök"

Jonbyte i lermineralen är beroende av mineralens kristallstruktur och den kemiska sammansättningen i omkringliggande lösning. För att studera om det sker några förändringar i jonsammansättningen hos de undersökta proven vid kontakt med ett lakvatten har en serie jonutbytesförsök genomförts. Genom dessa har även ett

förenklat tidsberoende studerats, därav benämningen "åldringsförsök".

Försöken har tillgått så att en viss mängd prov skakats i plastflaskor 96 timmar med de lakvattenmängder som motsvarar 10, 25, 50 och 100 års kontakttid. Lakvattenmängderna är framräknade för en permeabilitet av 10^{-9} m/s och en bentonit/jordblandning av 12,5:87,5. Jonsammansställningen i lakvattnet har efter skakningen bestämts med hjälp av atomabsorptionsspektrofotometri. Dessutom har "sodium adsorption ratio" (SAR) beräknats. Kemiska sammansättningen för det använda lakvattnet redovisas i tabell 4.

4.2.3 Försök med fri svällning

Försöken baseras på fri svällning i provrör med $\phi 10$ mm och provmängden motsvarande 10 mm:s pelare ($0,8 \text{ cm}^3$). Avsikten med försöken har varit att studera den fria svällningen och dess förändring i tiden hos lakvattenföreningade bentoniter.

För varje prov har två separata svällningsförsök gjorts, dels med hydratisering i lakvatten, dels i destillerat vatten.

4.2.4 Röntgenfotografisk bestämning av intrakristallin svällning

Med hjälp av röntgendiffraktometrisk analys har förändringarna i lermineralens intrakristallina vattenhalt studerats vid lufttorkning av vattendränkta prover, såväl obehandlade som lakade. Med undantag för Leca-leran som varken i obehandlat eller lakat tillstånd tycks uppvisa några påtagliga svällningsfenomen så är samtliga prover extremt svällda efter långtidsförvaring i vatten. Detta tixotropa eller osmotiska svällningstillstånd kan dock ej kvantifieras röntgenografiskt. När suspensionen utsätts för lufttorkning kommer så småningom (i allmänhet efter ca en halvtimme) svällningen att reduceras till en rent intrakristallin

svällning av lermineralen med uppvisande av mätbara, mer eller mindre distinkta och successivt avtagande hydratiseringsstadier.

Genom sådana mätningar studerar man givetvis i princip samma process som vid s k fri svällningstest fast i motsatt riktning och med den skillnaden att de fria svällningsförsöken inbegriper alla former av svällning och inte enbart intrakristallin svällning och att man där startar med prover som är torkade vid 105°C. Resultaten av de två analysmetoderna kan därför inte direkt jämföras. Röntgendifraktionsförsöken beskrives närmare i bilaga 5.

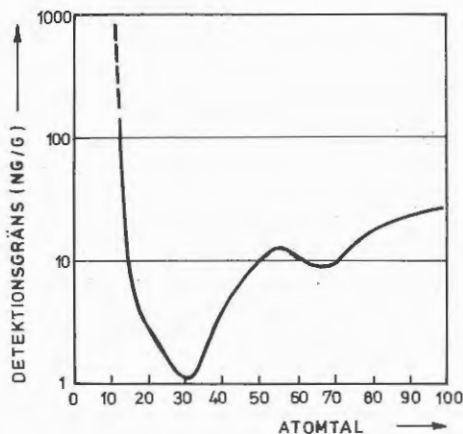
4.2.5 Röntgenfluorescens

Samtliga prover har analyserats på ingående grundämnen med hjälp av röntgenfluorescens.

Vid röntgenfluorescens utsätts provet för "vit" röntgenstrålning. Vissa våglängder absorberas av i provet ingående grundämnen. Dessa exciteras därvid och vid återgång till grundtillståndet utsänds för ämnet karakteristisk strålning. Med denna metod kan man dels bestämma ingående element, dels avgöra hur proportionerna av dessa har förändrats efter lakvattenexponering. Figur 4 visar variationen i detekteringsgräns med atomnumret för ett genomsnittligt prov. Som framgår av figuren måste lätta grundämnen förekomma i relativt höga halter för att kunna detekteras. Tabell 5 ger ett exempel på detektionsgränsen för Na (atomnummer 11) vid analys av Na i glas.

I denna undersökning har först de obehandlade proverna (0-proverna) analyserats på ingående element. De "åldersomvandlade" proverna (50 år) har sedan analyserats på sådana element som har största betydelsen för bentonitens/lerans tätande förmåga.

Resultaten redovisas i bilaga 5.



Figur 4. Variation i detektionsgränser för olika atomnummer (Jenkins & De Vries, 1967).

1. 0,3% Si (kisel) i stål har givit följande data:

a) W-anodror:

$$R = 100 \text{ imp/s}$$

$$R_b^p = 52 \text{ imp/s}$$

$$m = 160 \text{ imp/s per \%}$$

detektionsgräns 0,03%

b) Cr-anodror:

$$R = 86 \text{ imp/s}$$

$$R_b^p = 12 \text{ imp/s}$$

$$m = 247 \text{ imp/s per \%}$$

detektionsgräns 0,009%

2. 10,8% Na (natrium) i glas har givit följande data:

a) W-anodror:

$$R = 14,5 \text{ imp/s}$$

$$R_b^p = 4,5 \text{ imp/s}$$

$$m = 0,93 \text{ c/s per \%}$$

detektionsgräns 1,53%

b) Cr-anodror:

$$R = 63 \text{ imp/s}$$

$$R_b^p = 10 \text{ imp/s}$$

$$m = 4,9 \text{ imp/s per \%}$$

detektionsgräns 0,43%

Tabell 5. Detektionsgränser för kisel i stål och natrium i glas med Cr- och W-anodror (40 s analysid). Från Jenkins & De Vries (1967).

4.3 Genomsläplighet för vatten

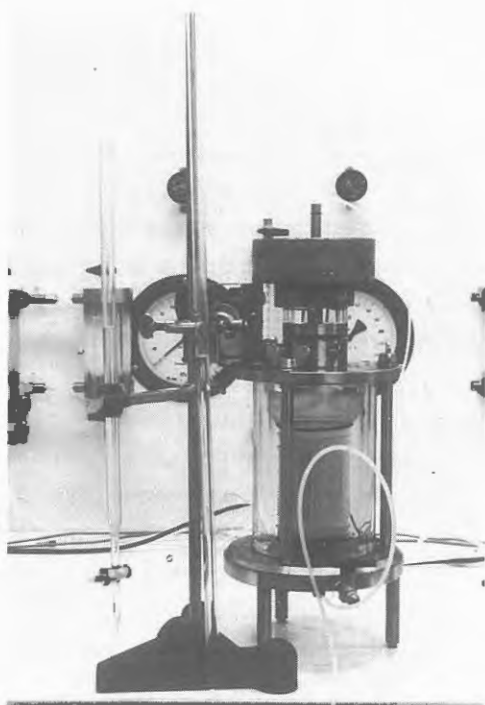
Den täthet mot en viss vätska (t ex lakvatten) som uppnås med ett visst material beror dels på vätskans

egenskaper och den strömningsgradient som är aktuell, dels på materialet och dess tjocklek. Materialets genomsläpplighet brukar benämnas permeabilitet (m^2/s). Om genomsläpplighet för just vatten avses, brukar man tala om hydraulisk konduktivitet (m/s). I SNV's anvisningar för lokalisering av avfallsupplag (SNV 1974:24) används benämningarna permeabilitetskoefficient, permeabilitet och k-värde i den senare betydelsen. I denna rapport frångår vi inte denna användning utan använder "permeabilitet" för att karaktärisera materialens genomsläpplighet för rent vatten.

Egentligen borde man för spridningsberäkningarnas skull hellre ange genomsläppligheten för lakvatten än för rent vatten. Uppenbarligen varierar emellertid de fysikaliska egenskaperna (viskositet, densitet, temperatur) kraftigt hos lakvatten. Den enda vettiga referensvätskan är därför rent vatten. Vid laboratorieförsöken använde vi destillerat vatten och vid fältförsöken "kranvatten".

Blandningar av bentonit och jord (exempelvis sand) uppvisar trånga porkanalsystem där luft lätt fångas när materialet befuktas. Detta medför en lägre genomsläpplighet för vatten i materialet jämfört med den i motsvarande vattenmättade material, jfr Hansbo & Olsson (1973). Vid anläggning av en bentonit/sand-tätning uppkommer inte ett helt vattenmättat system omedelbart. Så småningom torde dock gaserna förbrukas av omvandlingsprocesser eller lösa sig i vattnet.

Det har av ovanstående skäl ansetts lämpligt att mäta genomsläppligheten i helt vattenmättade system, vilket har uppnåtts i en sk triaxialapparat, där provet kan sättas under allsidigt tryck, figur 5. Ett förhöjt hydrostatiskt tryck medför att luften löser sig i porvattnet och att genomsläppligheten ökar tills all luft är löst. Genomsläppligheten ökar asymptotiskt mot ett maxvärde vid ökat hydrostatiskt tryck. Detta maxvärde motsvarar genomsläppligheten för ett vattenmättat system.

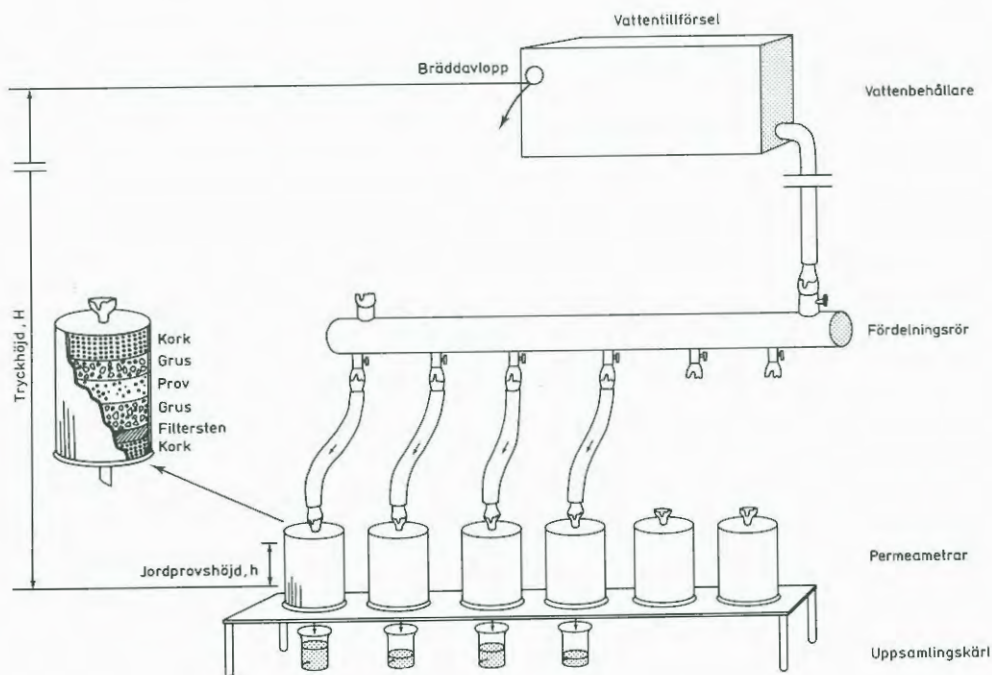


Figur 5. Triaxialapparat för bestämning av permeabilitet i finkorniga jordprover.

Den beskrivna metoden att mäta genomsläppligheten i triaxialapparat är omständlig och dyrbar och har därför inte kunnat utnyttjas i alla försök. Vid försöken med förorenade vatten i Uppsala har t ex en vanlig nippel-permeameter använts (jfr SGFs laboratoriekommittés förslag till anvisningar, 1972). Vissa "kalibrerande" försök har utförts med båda metoderna.

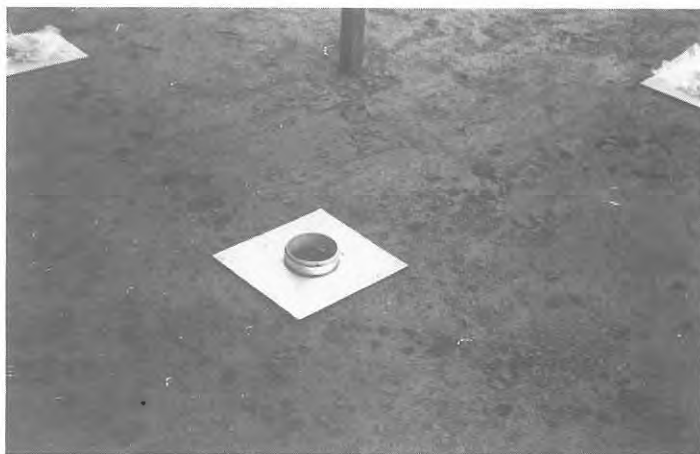
Provkropparna av bentonit/jordblandningar, som använts vid permeabilitetsbestämning i triaxialapparat, har packats för hand i 50 mm standardkolvborrhylsor till en packningsgrad som ungefär motsvarar den som erhålls i fält. Blandningen har dessförinnan fått "mogna" (hydratiseras) i ca 4 dygn. De olika vattentrycken har fått verka i omkring ett dygn innan mätning företagits.

Vid permeabilitetsbestämning i nippelpermeameter, figur 6, har proven packats i permeametrarna (lätt laboratoriestampning) och sedan hydratiserats i vatten i fyra dygn. Försök har även gjorts att hydratisera proven med natriumfosfat i stället för vatten. Vid efterföljande permeabilitetsförsök har ingen skillnad kunnat märkas vid ett sådant hydratiseringsförfarande. Vad gäller provens packning kan sägas att denna inte kommer att få stor betydelse, eftersom bentoniten under den fria svällningsfasen kommer att sträva efter ett jämviktsläge med en given packningsgrad. För att inte genomströmningskanaler skall bildas längs de glatta permeameterväggarna (piping) har ett tunt bentonitskikt "strötts" längs väggarna. Konstant tryckhöjd har utnyttjats vid genomströmningen.



Figur 6. Försöksuppställning för permeabilitetsförsöken med nippelpermeameter.

Permeabilitetsförsöken i fält har haft karaktären av enkla infiltrationsförsök på de färdigpackade provytorna. Direkt efter packning trycktes i sand och grovmoskikten en kort, öppen cylinder av PVC-plast ($\phi 75$ mm) igenom tätningsskiktet ned till ett dränerande sandskikt. Plastcylindern var avfasad i nederkanten och försedd med en fast krage av plåt som stabiliserade cylindern i marken och som förhindrade onödigt djup neddrivning, figur 7. Tätskiktet urgrävdes försiktigt i cylindern tills ca 40 mm av skiktet återstod. Materialets torrdensitet bestämdes på det urgrävda materialet. Vatten påfylldes till ett mätmärke i cylindern och olja droppades på vattenytan för att förhindra avdunstning. Övre öppningen på rören förseglades dessutom med en plastfilm och alla provytorna täcktes med pressenning för att förhindra nederbördsinfiltration.



Figur 7. Permeabilitetsbestämning i fält på provytor med blandad och packad bentonit/jordblandning.

I det packade isälvs materialet kunde ej några plaströr användas. I stället grävdes cirkulära gropar med motsvarande djup och med ca 0,3 m diameter.

Permeabiliteten kunde grovt beräknas med hjälp av vattenståndsobservationer och med antagande om vertikal, endimensionell strömning.

Följande försöksserier har ingått i permeabilitetsförsöken:

Med triaxialapparat:

- Välgraderad sand och bentonit (SLS 71) i olika blandningsförhållanden, 100/0, 92/8, 85/15, 80/20%.
- Grovmo och bentonit (SLS 71) i olika blandningsförhållanden, 100/0, 95/5, 90/10, 85/15%.

Med nippelpermeameter:

- Grovmo och bentonit (10% bentonit SLS 71) + 330 ml vatten.
- Silversand och olika bentoniter (10% SLS 71, Black-Hill resp Sabenil) + 450 ml vatten.
- Silversand och 15% bentonit SLS 71 + 345 ml vatten.
- Obehandlad, inhemsk lera ("Leca-lera").

Blandningen av bentonit/jordproven har utförts vid SGI.

Fältförsök:

- Sand/bentonitblandning (10% SLS 71) packat genom 2,4,6 respektive 8 gångers överfart med vibroplatta.
- Grovmo/bentonitblandning (10% SLS 71), 2, 4, 6 resp 8 överfarter med vibroplatta.
- Isälvsmaterial/bentonitblandning (10% SLS 71), 2, 4, 6, 8 överfarter med vibroplatta.

4.4 Blandningsförsök med bentonit och sand

Frågan om vilket blandningsförfarande som är lämpligt berör, förutom olika maskintyper, även blandningstider, blandningsordning för de ingående komponenterna, materialkvaliteter och koncentrationer. Det har ansetts omöjligt att undersöka alla de möjliga kombinationerna av dessa variabla faktorer. Vidare har det ansetts onödigt att genomföra alla intressanta blandningsförsök i fält. Blandningsförsök som gällt inverkan av blandningsordning, blandningstider, olika ballastmaterial, olika bentonittyper och olika bentonitkoncentrationer har därför utförts i laboratorium med hjälp av maskinblandare, typ "degblandare".

I fält har blandningsförsök med jordfräs, kultivator (separat drivning på hjul och rotorknivar) och betongblandare utförts, figur 8 och 9. Dessa försök har haft karaktären av "kontrollförsök" för att undersöka reproducerbarheten av laboratorieförsöken på fältförhållanden.

Följande försöksprogram har gällt för laboratorieblandningarna (försöksserierna nämns i den ordning de blivit utförda):

- Blandningsordning: "torrblandning", "våtblandning", "halvvåtblandning", blandning med naturfuktigt ballastmaterial.
- Blandningstider, 1, 2, 4, 8 minuter före och efter bentonitsättning, tillsättning av komponenterna under 1 minut.
- "Slarvig" blandning (kontrollförsök).
- Olika ballastmaterial (sand och grovmo)-skillnader?
- Olika bentonitkvaliteter - skillnader?
- Olika bentonithalter - skillnader?



Modell U 1200/1200 K

Figur 8. Den typ av jordfräs och kultivator som använts vid försöken.



Figur 9. Den betongblandare som använts vid försöken.

Homogeniseringsgraden för bentonit/jord-blandningarna har bestämts genom att 4-5 st delprov (stickprov) uttagits ur blandningssatsen. Dessa prov har analyserats med avseende på vattenkvot, halt av partiklar mindre än 0,006 mm och mindre än 0,003 mm. Delproven har uttagits på ett likartat sätt sedan blandningssatsen "kavlats ut" på en bricka. Graden av homogenisering har kunnat kvantifieras genom att stickprovets standardavvikelse beräknats. Medelvärdet för t ex halten partiklar mindre än 0,003 mm varierar från provserie till provserie, främst eftersom bentonithalten varierar från fall till fall. Därför har standardavvikelsen även beräknats som procent av medelvärdet. Värdet på standardavvikelsen har endast använts för att ge en grov, relativ bild av inhomogeniteten.

4.5 Utlägnings- och packningsförsök

4.5.1 Bentonit/jord-blandningar

Som tidigare framhållits kommer bentonitsand sannolikt att få den största användningen vid komplettering av områden som i stort sett redan är naturligt täta. Det lämpligaste packningsredskapet för sådana mindre och spridda ytor torde i de flesta fall vara en s k vibratorplatta, figur 10. Detta verifieras också av litteraturen (Fagerström & Lundahl, 1977). Fältförsöken som ingår i denna undersökning har utförts i liten skala. Därför var en vibroplatta självklar att använda i dessa försök.

Vid större ytor kan vibrationsvältar bli aktuella. S k stamp (exempelvis handstamp eller vibratorstamp) har ansetts olämplig för detta ändamål, då den lätt ger upphov till ojämna skikt. Den har provats för bentonitsand i samband med utprovning av buffertmaterial runt kapslar med radioaktivt avfall (Fagerström & Lundahl, 1977). Den befanns där vara mindre lämplig än motsvarande vibratorplatta.



Figur 10. Foto av den vibratorplatta - Dynapac CM 12/13 (145 kg) som använts vid försöken.

Packningsförsöken vid SGI utfördes med en 145 kg vibroplatta, typ Dynapac CM 12/13, figur 10. Enligt Mark AMA 72 (tabell 6) får den största tjockleken (efter packning) för ett lager grus, sand, grusig eller sandig morän eller krossmaterial (med motsvarande kornfördelning) och med en sådan vibratorplatta vara 0,20 m. Minsta antalet överfarter har angivits till 4. Vid försöken blandades de tre ballastmaterialen sand, grovmo respektive isälvsgrus (def enl figur 3) i en betongblandare (300 l), se figur 9, med 10% bentonit (Volclay SLS 71). Vattnet tillsattes i betongblandaren efter torrblandning av de fasta materialen (naturfuktiga dock) i de två fallen med sand respektive isälvsgrus. Grovmo-bentoniten visade tendens till kladdning vid tillsättning av vatten i blandaren, varvid klumpar uppkom. Detta antas bero på en för hög (naturlig) fuktkvot från början. Därför tillsattes extravattnet med hjälp av vattenkanna (med stril) på knappt 20 mm tjocka delskikt som utlades efter varje blandningssats. Vattnet fick därigenom god tid på sig att sugas in i skikten (15-20 min).

Packningen utfördes ca 1 dygn efter utläggningen. Under tiden var försöksytorna täckta med plastpresenningar för att undvika avdunstning. Var och en av de 3 ytorna med olika tätningsmaterial delades in i 4 lika stora delytor (ca 1 m² var) som kördes över 2, 4, 6 respektive 8 gånger med vibroplattan.

Packningsgraden undersöktes på var och en av de 12 delytorna, dels genom att torrdensiteten bestämdes, dels genom att ytskiktets bärighet bestämdes med hjälp av s k konpenetrometer ("Soil Assesment Penetrometer, Model 244).

Tabell 6. Riktvärden för största lagertjocklek i m efter packning och minsta antal överfarter per lager vid packning enligt klass 2. Från Mark AMA 72 (TAB C/3).

Packningsmaskin	Minsta antal överfarter	Material enligt tab C/1, största lagertjocklek (m)			
		1 Sprängsten Block, sten	2 Grus, sand eller sandig morän	3a Grusig, sandig eller normalmorän Krossmaterial med motsvarande kornfördelning	3b Silt, halvfast till mycket fast lera Övriga moräner
Handstamp, min 15 kg ¹	3	—	0,15	0,10	0,10
Jordstamp, min 80 kg ¹	3	—	0,30	0,25	0,20
Vibratorstamp, min 50 kg ¹	3	—	0,30	0,25	0,20
Vibratorplatta, min 50 kg ¹	4	—	0,15	—	—
Vibratorplatta, min 100 kg ¹	4	—	0,20	0,10	—
Vibratorplatta, min 400 kg	4	0,40	0,35	0,25	0,15
Traktordragen vibrationsvält, min 3 ton	6	0,70	0,40	0,30	0,20
Traktordragen vibrationsvält, min 5 ton	6	1,00	0,55	0,45	0,30
Vibr tandemvält, statisk linjelast min 5 kg/cm	6 ²	—	0,15	0,10	—
Vibr tandemvält, statisk linjelast min 10 kg/cm	6 ²	—	0,20	0,15	0,10
Vibr tandemvält, statisk linjelast min 20 kg/cm	6 ²	—	0,30	0,25	0,15
Vibr tandemvält, statisk linjelast min 30 kg/cm	6 ²	—	0,45	0,35	0,25
Statisk trevalsvält, statisk linjelast min 50 kg/cm	6	—	0,25	0,20	0,20
Gummihjulsvält, hjultryck min 1,5 ton	6	—	0,20	0,20	0,20
Gummihjulsvält, hjultryck min 2,5 ton	6	—	0,30	0,25	0,25
Bandtraktor, min 10 ton	6	—	0,25	0,20	0,20

¹ Används på små packningsytor, t ex vid packning av kringfyllning i ledningsgrav och som komplement till större packningsmaskiner.

² Vid vibrerung på båda valsarna kan antalet överfarter minskas till 4.

4.5.2 Naturlig, obehandlad lera

Projektet erhöill av SNV ett tilläggsanslag för att kunna göra jämförande studier med (färsk) obehandlad naturlig lera som tätningsmedel. Sådan lera ingår i programmet både i den praktiska delen och i den kemisk-fysikaliska laboratedelen. Försöken med lera blev dock begränsade till två olika material hämtade från AB Svensk Leca's lertäkt (för lättklinkerframställning) i Gärstad utanför Linköping - en brun torrskorpelera och en gråblå, lös, svagt varvig (glacial) lera, se figur 11.

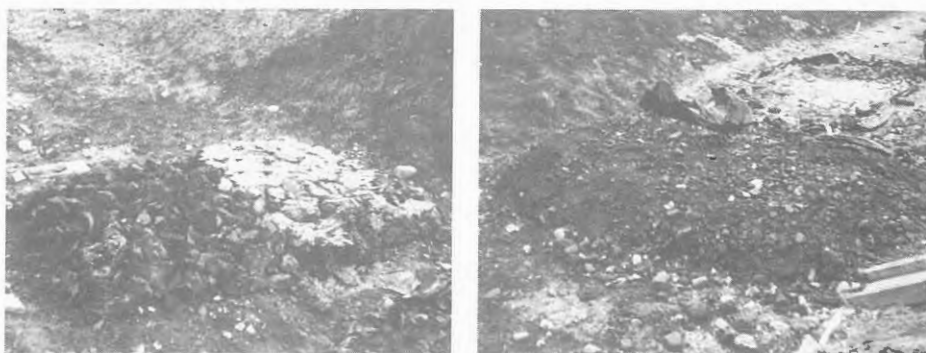


ca 3 m

Figur 11. Svenska Leca AB's lertäkt i Gärstad, Linköping. På den nedre bilden ses de leror som använts i försöken - torrskorpeleran överst i bild och den gråblå, lösa leran nederst.

De två utvalda lerorna representerar vad vi okulärt bedömde vara en för ändamålet olämplig respektive lämplig lera. Torrskorpeleran var delvis sprucken och allmänt hård men ändå plastisk. Den erhöles i större och mindre klumpar. Den lösa leran ("smäckleran") erhöles i sammanhängande partier ituskurna av grävskopor och lastmaskiner. Leran var så lös att utskurna klumpar (ca 50-100 l) vid ett fall på 2 m blev utplattade så att den undre hälften av klumparna bredde ut sig över varandra och borde kunna bygga upp ett någorlunda jämnt täcke. Det är dock tveksamt om de övre delarna av klumparna lätt kan planas ut till ett jämntjockt täcke. Det är också tveksamt om större klumpar än ca 100 l skulle plattas ut vid tippning från t ex lastbil.

Det praktiska försöket tillgick så att de två lerorna utlades med hjälp av skyffel på en stenig grusbädd (ca 10 cm tjock). Lerklump lades vid lerklump tills drygt 2 m² yta var täckt av vardera lertypen. Ovanpå detta, ganska ojämna skikt (figur 12) lades ett nytt skikt stenigt grus (ca 10 cm tjockt), så att överytan blev jämn. En ramp av grusmaterial lades runt hela tätskiktet så att leran var helt instängd. Därefter utfördes packning med samma vibroplatta (145 kg) som använts vid de övriga försöken. Antalet överfarter var 6 (figur 13).



Figur 12. De två utlagda lerskikten på grusbädd; den vänstra bilden visar skikten innan det täckande grusskiktet lagts på (torrskorpelera till vänster i bilden och lös lera till höger), den högra bilden visar utseendet när grusskiktet pålagts.



Figur 13. Packning av det grustäckta lerskiktet.

Efter packningen skars en tvärprofil upp genom de två "packade" lerskikten. Två 0,5 x 0,5 m stora ytor av lerskiktens ovansidor blottades för inspektion. Noteringar fördes under packningsarbetet och vid letandet efter sprickor och håligheter efter packningen. Inspektionen av lerytorna gjordes också några dagar efter det de blottlagts och de blivit utsatta för torka och regn.

4.6 Frysförsök

Frysförsöken har genomförts i laboratorium, i ett 65 l frysskåp av konventionell typ (Philips). Skåpets normala temperaturreglering var dock ersatt med en reglering med hjälp av temperaturgivare som monterades i provkropparna. En reglerenhet styrde frys-, respektive upptyningsperiodens längd. Temperaturamplituden kunde väljas godtyckligt mellan -15°C och $+15^{\circ}\text{C}$.

Två typer av provbehållare utnyttjades. De större behållarna bestod av ihåliga, cylindriska burkar av frigolit (ϕ ytter=0,4 m, ϕ inner=0,3 m) utan lock. I dessa packades bentonit/sandblandningen in (0,1 m skikt) ovan ett uppsamlingskärl med nätlock, se figur 14. De mindre behållarna av plast bestod av två delar, provkärl respektive uppsamlingskärl och var placerade i ett frigolitblock med utstansade hål, se figur 14.

Frys/uppsamlingsförloppet och de fysikaliska förändringarna under detta förlopp registrerades genom temperaturmätningar inuti proven, genom permeabilitetsmätningar samt genom fotografering. Permeabilitetsmätningarna fick genomföras med hjälp av en infiltrometer eftersom tjällningen medförde dålig kontakt mellan provet och kärlets väggar (risk för piping) och konventionell permeameterteknik ej kunde utnyttjas.

4.7 Andra studier över praktiskt viktiga förhållanden

Vi har ansett det viktigt att skaffa oss en bild av de praktiska problem som uppkommer i samband med bentonittättningsarbeten. Eftersom våra egna försök endast utförts i pilotskala, har vi valt att skaffa oss en indirekt sådan bild genom att intervjua några personer som projekterat och/eller deltagit i utförandet av sådana projekt.

Vi har t ex besökt Allan Jerbo (Jerbo, Geokonsult AB) i Sundsvall vilken har visat oss en större tätning för en barkdeponeringsanläggning vid Delånger mellan Bollsta och Graninge i Ångermanland. Bertil Nord (BINAB) har berättat om arbete med bentonitskärmar i Teckomatorp, Skåne.

I det fall man av principiella skäl kommer fram till att både bentonit/jordblandningar och naturliga leror kan användas som tätningsmedel under soptippar är det

av intresse att göra en kostnadsjämförelse mellan materialen och tillhörande anläggnings- och transportkostnader. Kostnaden måste ställas i relation till kostnaden för andra alternativa metoder (plastduk?) och till kostnaden att förlägga det aktuella deponeringsområdet någon annanstans.

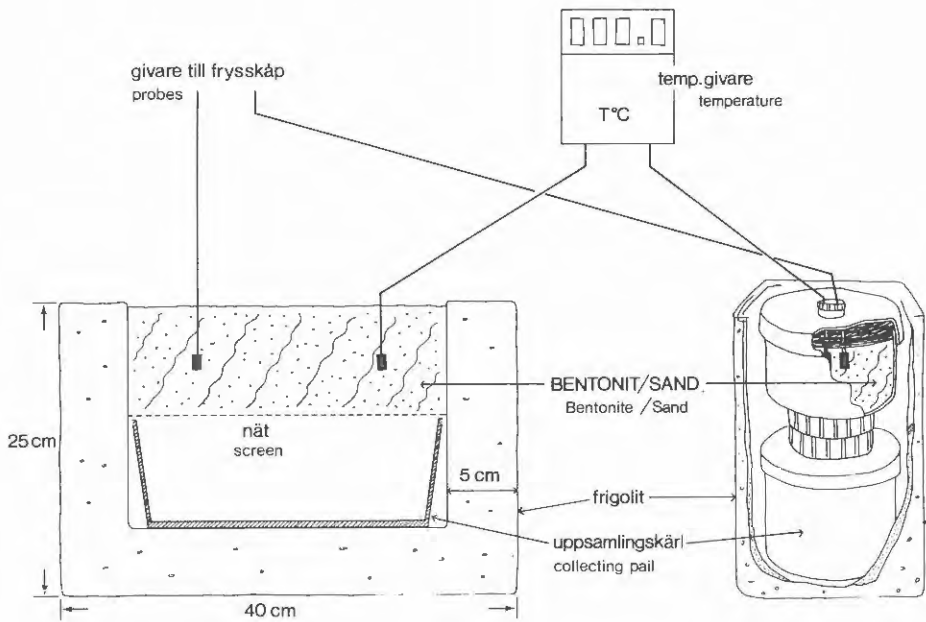
De ovan nämnda skälen föranledde SNV att ge forskningsgruppen i uppgift att översiktligt ta fram och jämföra kostnaderna för de tätningmaterial som av principiella skäl kan komma ifråga samt för motsvarande hanteringskostnader.

Redan av rapportens många rubriker framgår att det är en mängd olika delbedömningar som måste göras i projektet.

Därför har det ansetts värdefullt att också ge en sammanfattande analys av problem med tätningemedel. En analys som besvarar praktiska frågor såsom:

- När behövs kompletterande tätningemedel?
- Kan jag använda lera från en närliggande täkt eller schakt?
- När är den lämpligaste tidpunkten att utföra en kompletteringstätning?
- Behöver anläggningen kontrolleras?

Analysen bör visa en aktuell bild av problemställningarna. Vilka frågor som fått sin lösning - vilka som återstår och vilka av dessa som nödvändigtvis måste lösas.



Figur 14. De två använda provbehållarna för infrysning.

5 RESULTAT OCH SLUTSATSER

5.1 Bentonit/jordblandningars täthet mot vatten

5.1.1 Mätnoggrannhet

För att få ett mått på försöksuppställningens noggrannhet vad gäller nippelpermeametrarna sinsemellan och packning av cylindrarna har en försöksserie utförts för att klarlägga dessa faktorer. I tabell 7 visas permeabilitetsförsöken och dess varians. Resultaten från denna försöksserie får anses ha godtagbar noggrannhet för att en tillförlitlig utvärdering av bentonitförsöken skall kunna göras.

Tabell 7. Resultat av permeabilitetsmätningar med fyra olika nippelpermeametrar, utförda på 10% SLS-71 i silversand.

Permeameter nr	1	2	3	4
Mätvärden $\times 10^{-9}$	2,9	3,4	3,4	3,0
m/s	2,6	3,0	3,0	2,6
	2,1	2,8	2,8	2,3
	1,9	2,8	2,8	2,9
	3,2	2,7	2,7	3,5
	3,3	2,3	2,3	3,2
	3,1	2,3	2,3	3,0
	3,8	2,9	2,9	3,0
	3,2	3,1	3,1	3,0
	-	2,8	2,8	3,0
	-	-	-	2,9
Medelvärde	2,9	2,8	2,8	2,9
Varians	0,33	0,11	0,11	0,10
Standardavvikelse	0,57	0,34	0,34	0,32

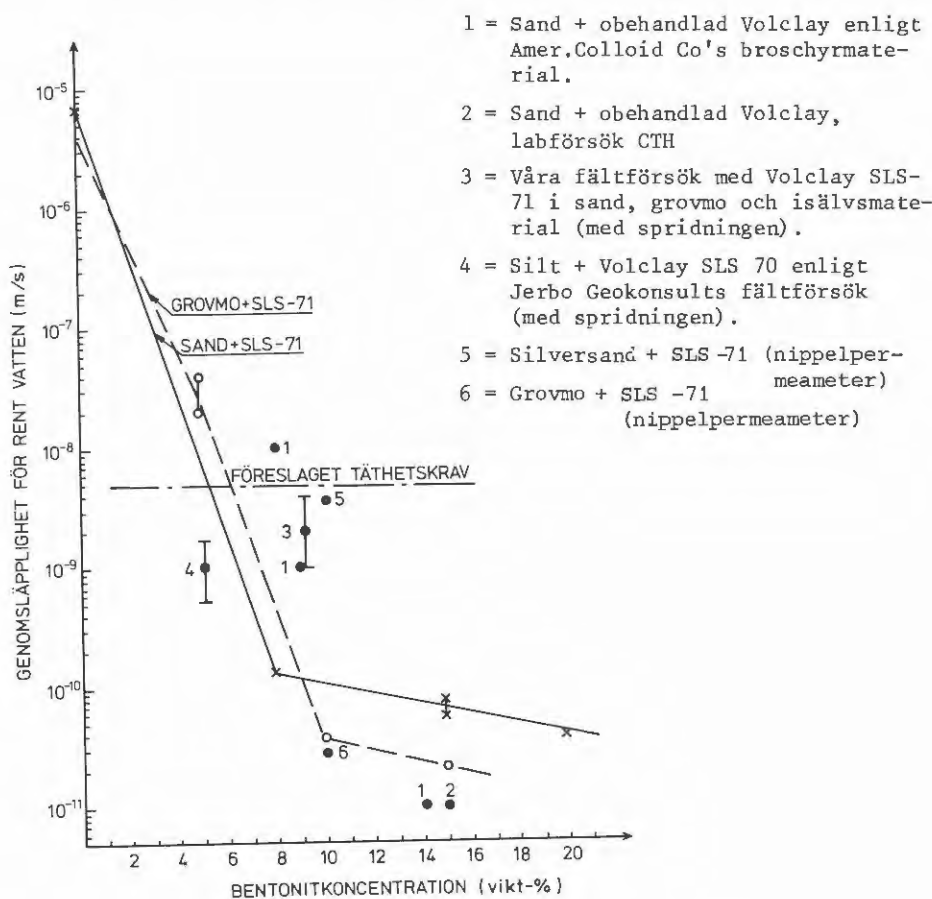
5.1.2 Inverkan av bentonittyp

Tre bentonittyper har undersökts på ett likvärdigt sätt med avseende på permeabiliteten, nämligen Volclay SLS-71, Black Hill och Sabenil. I blandning med silversand i proportionen 10% bentonit/90% sand, uppvisade Sabenil och

SLS-71 ungefär samma permeabilitet, dvs ca $3 \cdot 10^{-9}$ m/s, medan Black Hill-typen hade något högre genomsläpplighet (ca $6 \cdot 10^{-9}$ m/s).

5.1.3 Inverkan av bentonithalt

Permeabilitetsförsök i jord/bentonitblandningar med varierande bentonitkoncentration har endast utförts med grovmo/sand och SLS-71 (triaxialapparat). Resultaten av försöken redovisas detaljerat i bilaga 6 och sammanfattat i ett diagram, figur 15, där även resultaten från våra övriga permeabilitetsförsök och försök redovisade i litteraturen markerats.



Figur 15. Genomsläppligheten (permeabiliteten) för rent vatten som funktion av bentonitkoncentrationen i de grovmo och sandmaterial som använts i försöken samt motsvarande värden erhållna ur litteraturen.

Diagrammet visar att permeabiliteten minskar mycket snabbt med ökande bentonitkoncentration från 0 till 8-10%. Över detta "tröskelvärde", som tycks variera med jordarten, ökar tätheten mycket litet med ökad bentonitinsats. Med hänsyn till detta borde man alltid försöka uppnå detta "ekonomiska värde", vilket skulle ge en permeabilitet av omkring 10^{-10} m/s för de undersökta jordarterna vid inblandning av 7-10% bentonit SLS-71. Detta permeabilitetsvärde har vi ansett vara onödigt lågt. Med hänsyn till kraven på naturliga in situ-jordar (f n 10^{-7} m/s) och tätskiktens små mäktigheter anser vi täthetskravet $5 \cdot 10^{-9}$ m/s vara realistiskt för ett 0,15-0,20 m tjockt tätskikt. Detta värde har särskilt markerats i diagrammet, figur 15.

Kurvorna i diagrammet (figur 15), vilka sammanbinder resultaten från triaxial-försöken, representerar genomsläppligheter som erhållits under tämligen ideala betingelser. Homogeniseringsgraden i jord/bentonitblandningen är t ex betydligt högre i laboratorieblandningen än i motsvarande blandning utförd i fält. Homogeniseringsgraden kan kvantifieras genom spridningen för stickprovets bentonitkoncentration i respektive blandning. Standardavvikelsen för bentonitkoncentrationen har storleksordningen 0,5% av medelvärdet vid laboratorieblandning men hela 2% vid fältblandning. Av figur 15 framgår också att våra permeabilitetsvärden i fält generellt ligger högre vid samma bentonitkoncentration än motsvarande lab-värden, vilket antyder att det erfordras 2-3% högre bentonitkoncentration för att man i fält och med en viss blandning skall uppnå samma täthet som i lab-försök (triaxialförsök).

5.1.3 Inverkan av jordart

Genomsläpplighetsmätningarna i fält gav överraskande små skillnader i permeabilitetsvärden mellan de olika undersökta jordarterna (bentonitinsats 20 kg/m²) se figur 15. De två sorterade jordarternas finkornsdel är tämligen lika medan det relativt osorterade isälvs-materialets högre andel grova partiklar tydligen

kompenstras ur täthetssynpunkt av den jämna kornfördelningen och förekomsten av en påtaglig finjordsandel, se figur 3.

Även i triaxialförsöken uppvisade den undersökta sanden och grovmon små skillnader i permeabilitet (med och utan inblandning av bentonit). Med hänsyn till att de använda jordmaterialen är relativt finkorniga och/eller välgraderade bör de vara gynnsamma från tätningssynpunkt eftersom de kräver relativt mindre bentonitinsats för samma täthet. Detta verifieras vid en jämförelse med resultat från litteraturen (figur 14). Allan Jerbo rapporterar från ett fullskaleprojekt att permeabiliteten i silt, (som är en finkornigare jordart än den vi testat) blandat med endast ca 5% bentonit (Volclay SLS-71) är ungefär 10^{-9} m/s. Samma permeabilitet uppnådde vi i våra fältförsök med sand, grovmo och osorterat isälvsmaterial med ungefär den dubbla bentonitinsatsen.

De genomförda permeabilitetsförsöken är naturligtvis för få för att ligga till grund för en fullständig kvantifiering av bentonitblandningar med alla tänkbara jordblandningar. Försöksresultaten antyder emellertid att:

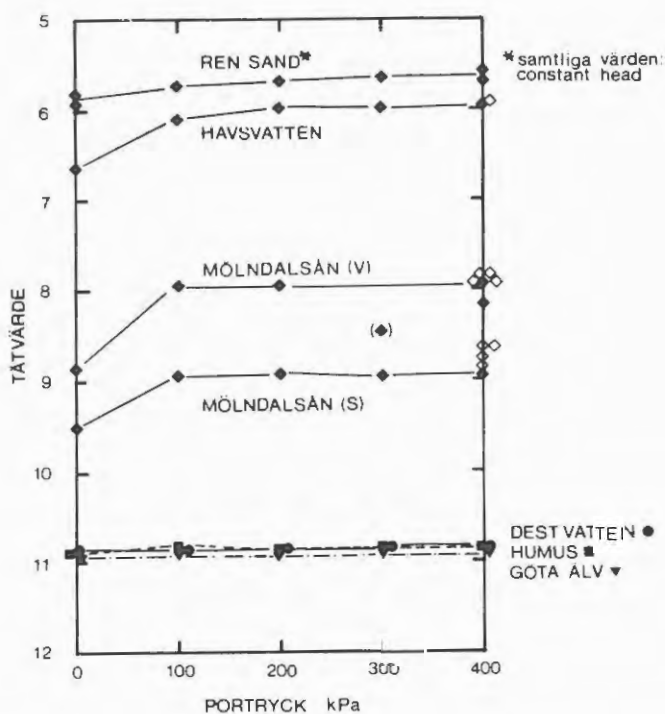
- Lab-försök ger lägre permeabilitetsvärden än fullskaleförsök, vilket motsvarar en skillnad i bentonitkoncentration av omkring 3%.
- Välsorterad sand och grovmo kräver i praktiken en inblandning av 9-10% bentonit för att ge en permeabilitet som säkert uppfyller det föreslagna täthetskravet $5 \cdot 10^{-9}$ m/s.
- Sannolikt kan man med silt uppnå det föreslagna täthetskravet med endast 5% bentonitinsats.
- Grövre jordar, t ex grus liksom ensorterade sand-, morän- och isälvsmaterial kräver en högre bentonitinsats. Bentonittillverkarens anvisningar om insatsens storlek bör kunna följas.

Resultaten från permeabilitetsförsöken redovisas mer detaljerat i bilaga 6.

5.1.4 Inverkan av föroreningar

Det är sedan länge känt att elektrolythaltiga lösningar avsevärt kan reducera bentoniternas svällningsförmåga och därmed deras tätande egenskaper. Exempel på detta ges av Hansbo & Olsson (1973), se figur 16.

Av figur 16 framgår vidare att genomsläppligheten för lakvatten sannolikt är många gånger högre än för rent vatten. Permeabilitetsförsöken med jord/bentonitblandning och lakvatten (nippelpermeameter) gav obetydligt högre värden än motsvarande försök med rent vatten, vilket pekar på en svag, omedelbar kemisk-fysikalisk påverkan av bentoniten, jfr tabell 9. Den bentonit som använts vid de flesta försöken med lakvatten är den kemiskt "skyddade" (polymerbehandlade) Volclay-kvaliten SLS-71, som skall förhydreras i rent vatten.



Figur 16. Samband mellan permeabilitet och portryck för en sand-bentonitblandning innehållande 15% bentonit (Volclay). Jämförelse av resultat erhållna med olika förorenade vatten. Från Hansbo & Olsson (1973).

Genom jonutbyte kan bentonitens egenskaper med tiden förändras i en jonrik lösning t ex ett lakvatten. Tätheten i en Na-bentonitjordblandning bör därvid minska. Detta behandlas närmare i avsnitt 5.2.2.

5.2 Bentonit/jordblandningars beständighet

5.2.1 Utbytbara joninnehåll och katjonutbyteskapacitet

De natriumrika bentoniterna ger generellt den högsta tätheten. Ju större dess innehåll är av utbytbara natriumjoner ju längre tid tar det innan den höga tätheten reduceras av joner som ersätter natriumjonerna. Basutbyteskapaciteten (CEC) är ett mått på den totala halten av utbytbara katjoner. Värdet på dessa parametrar för de undersökta proven redovisas i Tabell 8.

Tabell 8. Utbytbara joninnehåll och basutbyteskapacitet (CEC) för de undersökta proven, redovisat som mekv/100 g torokat prov.

Material	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC	SAR
Leca-lera	2,2	1,1	10,6	4,2	18,0	0,82
Sabenil 650	43,5	1,8	26,0	13,3	84,5	9,8
Black-Hill	67,3	2,5	20,5	15,9	106,2	15,8
SLS-71	85,2	1,2	16,0	7,1	109,5	25,1

Som framgår av ovanstående tabell så innehåller Leca-leran en relativt liten mängd utbytbara joner. Detta ger även en låg utbyteskapacitet.

Av de undersökta bentoniterna är det en klar gräns mellan å ena sidan Sabenil 650 och å den andra Black-Hill och SLS-71. Sabenil 650 innehåller visserligen en relativt stor mängd utbytbara joner (CEC \approx 85). Mängden utbytbara natrium är i jämförelse med de övriga emellertid betydligt lägre. Sabenil 650 har i stället ett betydligt högre innehåll av utbytbara Ca²⁺. Den klassificeras av försäljaren som en Ca-bentonit.

Olikheterna mellan Black-Hill och SLS-71 är främst den senares betydligt högre innehåll av Na^+ -joner. Denna bentonit är därför sannolikt den av de utvalda som bäst representerar en bentonit av renodlad natrium-typ.

För att karakterisera mängden utbytbara joner kan även förhållandet mellan de olika jonslagen beräknas. Detta redovisas i tabell 8 som "sodium adsorption ratio", vilket innebär att kvoten är beräknad enligt formeln:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

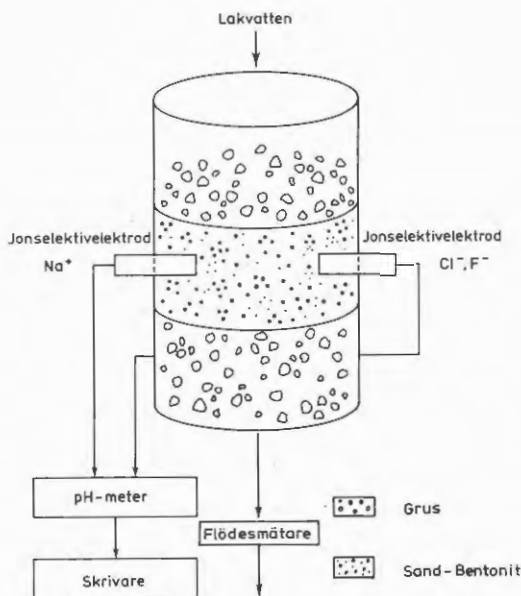
(jämför Bear, 1964, s 309).

Beräkningen av denna kvot visar att SAR-värdet ökar i ordningen Leca-lera→Sabenil→Black-Hill→SLS-71. Detta visar samma resultat som tidigare, nämligen att av de undersökta bentoniterna innehåller SLS-71 mest Na^+ -joner i förhållande till Ca^{2+} och Mg^{2+} .

5.2.2 Jonutbyte och lakvattenfrontens genomströmnings-hastighet i ett sand-bentonitlager

Genom att mäta Na^+ , Cl^- och F^- -halterna "inne i" ett bentonit/jordskikt har det varit möjligt att studera om jonutbytet sker innan eller samtidigt med att lakvattenfronten passerar. Detta ger även ett mått på lakvattenfrontens hastighet samt en anvisning om jonerna vandrar snabbare än fronten. Försöksapparaturl framgår av figur 16. Metodik vid mätning med jonselektiva elektroder finns beskriven av Durst, 1969.

Mätningarna har utförts så att dest-vatten fått passera tätskikten varvid "noll-halterna" av Na^+ , Cl^- och F^- bestämdes. Eftersom samtliga mätningar utfördes med konstant tryckhöjd erhöles också permeabiliteten. Där- efter fylldes apparaten med lakvatten varefter Na^+ , Cl^- och F^- -halterna mättes kontinuerligt. Den tidpunkt då lakvattenfronten passerar elektroderna kommer att registreras som förhöjda halter av respektive element. Detta ger även en uppfattning om frontens hastighet. Samtidigt mättes också genomströmmande lakvattenmängd varvid permeabiliteten kunde beräknas. Med kännedom om permeabilitet i dest vatten - lakvatten och lakvatten- frontens hastighet kan vissa jämförelser göras. Påpekas bör att tillgänglig tid endast har medgett två serier av mätningar, innefattande 10% SLS-71 + silversand samt 10% Sabenil + silversand. Resultatet av mätning- arna framgår av tabell 10.



Figur 16. Försöksuppställning för mätning av Na^+ , Cl^- och F^- i ett tätskikt.

Tabell 9. Permeabilitet för destillerat vatten, lakvatten, Na^+ och Cl^- , F^- vid passage genom tätskikt bestående av SKS-71 och Sabenil 650.

Material	Dest vatten m/s	Lakvatten m/s	Na^+ m/s	Cl^- F^- m/s
10% SLS-71 90% silversand	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$	$3,9 \cdot 10^{-9}$	$4,8 \cdot 10^{-9}$
10% Sabenil 650 90% silversand	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-9}$

Av ovanstående resultat framgår att det är små skillnader mellan de olika mätresultaten. Möjligen kan en viss tendens spåras till att de negativa jonerna Cl^- och F^- vandrar något snabbare. Detta är speciellt uttalat för Sabenil 650. Om så är fallet betyder det att några av de negativa jonerna vilka finns i lakvattnet kan vandra snabbare än "huvudfronten". Beträffande de positiva jonerna så indikerar resultatet att dessa rör sig ungefär med samma hastighet som fronten. Eftersom både K^+ , Ca^{2+} och Mg^{2+} resulterar i ett utbyte av Na^+ ger mätningarna av enbart Na^+ -halten även en uppfattning om dessa joners hastighet. I ovanstående försök har ej H^+ -jonernas vandringshastighet studerats. Resultatet av försöket kan till viss del jämföras med studier av Le Bell, 1978.

5.2.3 "Åldringsförsök" - jonutbyte

I de kemiska "åldringsförsöken" skakades proverna med en bestämd mängd lakvatten motsvarande den mängd som ett visst tätningsmaterial av en viss tjocklek kommer i kontakt med efter visst antal år med en viss, konstant genomsläpplighet. Därefter analyserades "skakvattnet" med avseende på utbytbara katjoner. Genom att jämföra dessa nya värden med de ursprungliga för lakvattnet har provernas förändrade utbytbara jonsammansättning beräknats. Resultaten redovisas i Tabell 11.

Tabell 10. Bestämning av dominerande katjoner och utbyteskapacitet (CEC) för bentonit och lera, uttryckt i mekv/100 g torrt prov. Lakningsförfarande $\text{NH}_4\text{-Ac}$ vid $\text{pH} = 7$. I tabellen redovisas även utbytbara joner samt "Sodium adsorption ratio" (SAR) efter 10, 25, 50 och 100 "års" kontakt med lakvatten.

Material	"Ålder" år	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	CEC	SAR
Leca lera	0	2,2	1,2	10,6	4,1	18,0	0,8
	10	1,1	2,7	21,9	6,5		0,3
	25	0(-2)	2,2	40,8	7,2		-
	50	0(-6)	2,2	53,5	6,2		-
	100	0(-10)	3,2	60,6	7,2		-
Sabeni1	0	43,5	1,8	26,0	13,3	84,5	9,8
	10	29,5	5,1	40,8	18,0		5,4
	25	12,5	3,8	59,8	19,3		2,0
	50	0,5	2,8	91,0	13,3		0,1
	100	0(-9,9)	2,8	114	0,3		-
Black-Hill	0	67,3	2,5	20,5	15,9	110,2	15,8
	10	32,3	4,6	39,4	22,7		5,8
	25	14,3	4,5	60,3	32,2		2,1
	50	5,8	3,5	89,1	34,9		0,7
	100	0	2,5	122	0		-
SLS-71	0	85,2	1,2	16,0	7,1	109,5	25,1
	10	36,2	3,6	29,7	19,6		7,3
	25	21,2	3,2	39,4	19,6		5,6
	50	17,2	1,2	41,0	21,1		3,1
	100	0	1,2	104,5	0		-

Försöken visar att bentoniterna och leran kommer att ändra sin jonsammansättning med tiden. Från att ha varit mer eller mindre Na^+ -dominant, sker genom ett fortlöpande utbyte, en övergång till en bentonit/lera av Ca^{2+} -typ.

Detta sker genom att kalciumjoner från lakvattnet byts in i lermineralen med ett motsvarande utbyte av natriumjoner. Även K^+ -joner och Mg^{2+} -joner deltar till viss del i utbytet. Av resultaten framgår även att utbytet av Na^+ -joner är "fullständigt" i Sabenil 650 efter 50-årskontakt medan Black-Hill innehåller 0,5 och SLS-71 17,2 mekv/100 g efter denna kontakttid. Förhållandet att ej ekvivalenta mängder bytts in eller ut kan förklaras av lakvattnets annorlunda joninnehåll, vilket resulterar i att bl a Na^+ -halterna kan uppvisa negativa värden jämfört med "förträngning" med NH_4^- -Ac. En förklaring kan också vara förekomsten av negativa joner i lakvattnet. Wiklander 1975/76 har visat att förekomsten av sulfat och/eller fosfat i ett vatten vilket står i kontakt med en lera orsakar förhöjd basutbyteskapacitet. Detta innebär att ingående positiva joner kan absorberas till exempelvis HPO_4^{2-} -grupper. Förklaringen kan också vara ökad ytadsorption om bentonit/leran minskar i kornstorlek vid extraktionsförfarandet. (Jämför Pask and Turner 1955).

Sammanfattningsvis visar dock resultatet att samtliga bentoniter kommer att omvandlas till kalciumvarianter. Tiden för detta har i fallen Sabenil 650 och Black-Hill uppskattats till 25-50 år medan SLS-71 omvandlats först efter 50-100 år. Påpekas bör att tidsangivelserna grundar sig på de tidigare redovisade premisserna nämligen en permeabilitet på 10^{-9} m/s och en bentonitkoncentration av 12,5% i silversand. Om exempelvis, som i försöken, hela lakvattenmängden, för ett visst tidsintervall tvingas i kontakt med bentoniten sker utbytet under en tid av ca 100 timmar (jämför Rose, 1974).

Sambandet mellan olika variabler kan också uttryckas i ett statistiskt mått, en korrelationskoefficient (r), vilken kan anta värden mellan 0-1. Generellt gäller att ett högt värde på r utvisar ett nära samband mellan variablerna (Vejde, 1962).

För att undersöka om det utbytbara joninnehållet i proven har något samband med svällning och permeabilitet

har en serie korrelationsberäkningar utförts. Korrelationskoefficienterna har beräknats med utbytbara joninnehållet efter 0, 10, 25 och 50 år som ena variabeln och svällning alternativt permeabilitet som den andra. Analysen omfattar ej resultaten från Leca-leran, därför att denna skiljer sig så markant från bentoniterna avseende joninnehåll och svällning. Resultatet framgår av nedanstående tabell.

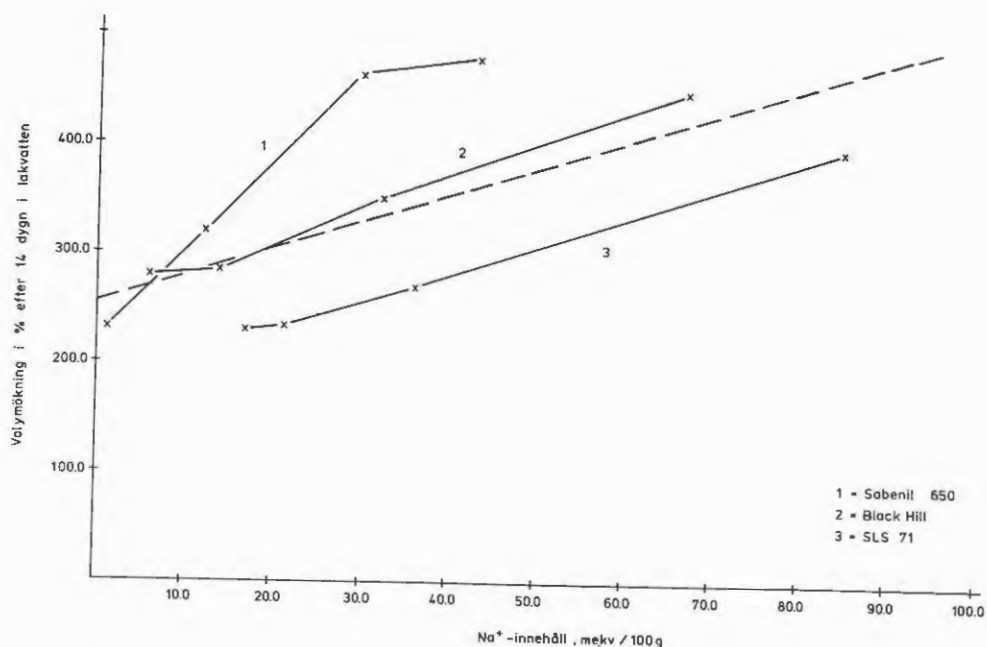
Tabell 11. Korrelationskoefficient för utbytbara joner, SAR (sodium adsorption ratio), svällningsökning och permeabilitet.
n = 12.

	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SAR	Perm
Svällning	0,66	-0,01	-0,55	-0,41	0,58	-0,35
Permeabilitet	-0,41	0,12	0,62	0,75	-0,41	-

I figur 18 redovisas natriuminnehållet i respektive bentonit avsatt mot volymökningen efter en viss tid i lakvatten.

Påpekas bör att nedanstående resultat är grundade på relativt få värden. Därför kommer endast de fall där korrelationskoefficienterna överstiger $\pm 0,58$ (signifikant vid 95%) att tas med i den fortsatta diskussionen.

Resultatet visar att svällningsbeloppet för respektive bentonit har ett visst samband med natriuminnehållet ($r = 0,66$). Detta gäller också till viss del förhållandet svällning/SAR ($r = 0,58$). Övriga joner kan inverka men ej i så hög grad som natrium. Förhållandet högt Na⁺-innehåll - kraftig svällning överensstämmer väl med tidigare undersökningar (ex Grim 1962), se även figur 18.



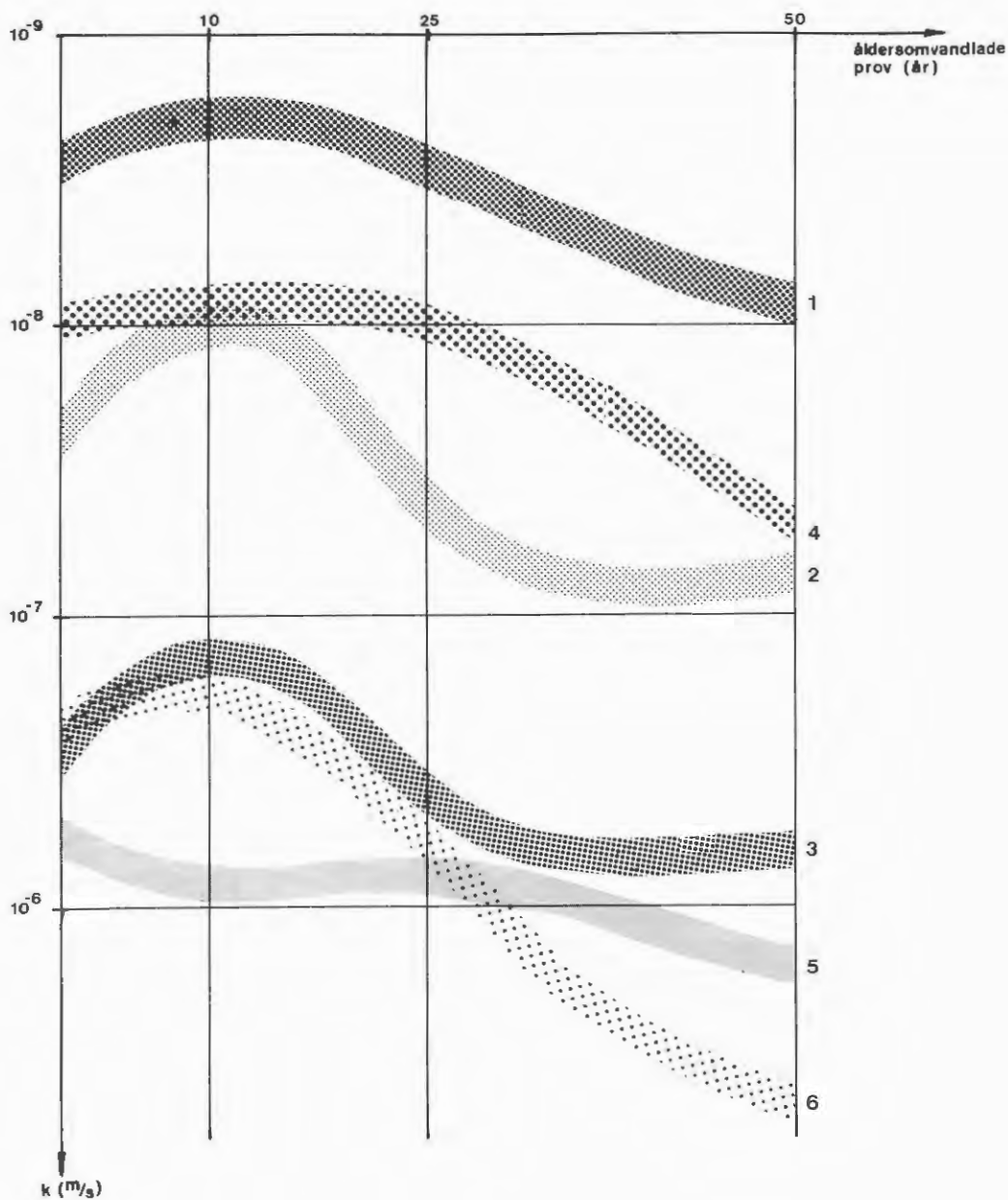
Figur 18. Svällning i % för olika Na⁺-halt i bentoniterna efter 14 dygn i lakvatten. Regressionsanalys har givit: $y=257+2,48 \cdot x$ ($r=0,66$).

Av de provade blandningarna uppvisar SLS-71 såväl de gynnsammaste absoluta permeabilitetsvärdena som den gynnsammaste långtidsstabiliteten.

5.2.4 "Åldringsförsök" - permeabilitet

Permeabilitetens förändring med tiden, beräknat efter skakförsöksresultaten ("åldersomvandlade" prov), visas i figur 19.

Figur 19 visar en markerad gruppering kring 10^{-10} m/s (10% SLS-71 + grovmo, Leca-lera, 15% SLS-71 + silversand) och 10^{-8} m/s (10% SLS-71 + silversand, Black-Hill Sabenil) och där 10% SLS-71 inblandad i grovmo visar den lägsta permeabiliteten och Sabenil tenderar till att ge de högsta permeabilitetsvärdena. Vid en ökning av koncentrationen SLS-71 i prover från 10% till 15% erhålls en permeabilitetsminskning med en tiopotens. Härtill kommer att blandningsmaterialet har mycket stor betydelse. Detta visas av att en 10%-ig inblandning av SLS-71 i grovmo ger en permeabilitetsminskning med ca två 10-potenser jämfört med motsvarande inblandning med silversand.



Figur 19. Permeabilitetens beroende av tiden för kontakt med lakvatten. Kurvorna representerar följande blandningar:

1. grovmo med 10% SLS-71
2. silversand med 15% SLS-71
3. silversand med 10% SLS-71
4. Leca-lera
5. silversand med 10% Black-Hill
6. silversand med 10% Sabenil

De olika testmaterialen uppvisar olika permeabilitetsförändringar med stigande exponeringstid ("ålder"). De slutsatser som kan dras är att de olika blandningarna med SLS-71 uppvisar en tämligen likartad trend, med en permeabilitetsökning av en tio-potens storleksordning under den simulerade mättiden (50 år). SLS-proverna tenderar att stabiliseras efter 25-30 år. De övriga proverna däremot uppvisar en mer konstant permeabilitetsökning med tiden och ingen stabilisering kan iakttas inom det testade tidsintervallet. Som ett exempel på detta kan nämnas Leca-lerans permeabilitetstrend, där man till och med kan märka en accelererande permeabilitetsökning med tiden.

Resultatet joninnehåll/permeabilitet visar att ett högt Ca^{2+} och Mg^{2+} -innehåll i bentoniten medför relativt hög permeabilitet ($r = 0,62$ resp $0,75$). Detta förhållande överensstämmer också väl med tidigare undersökningar i vilka visas att en kalciumbentonit har högre permeabilitet än motsvarande natriumvariant (Grim, 1962, Pusch 1978).

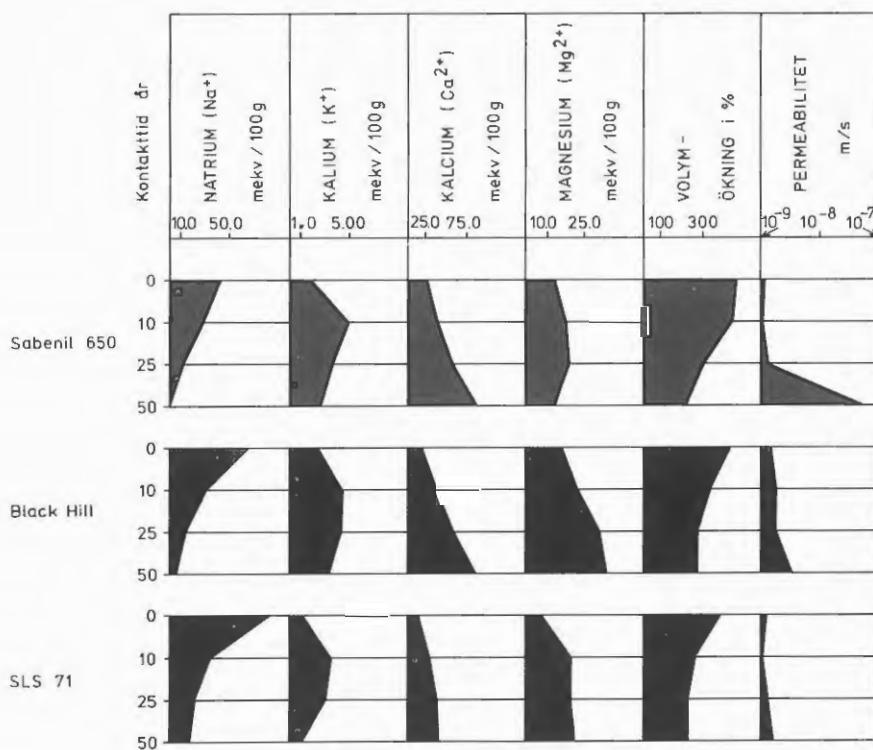
Korrelationsberäkningarna visar också att det ej föreligger ett klart samband mellan svällning och permeabilitet ($r = 0,35$).

Som tidigare påpekats kommer samtliga bentoniter att omvandlas till kalciumbentoniter vid kontakt med ett lakvatten. Hastigheten med vilken denna omvandling sker är beroende av bl a permeabilitet, utbyteskapacitet och kemisk sammansättning för det använda lakvattnet. Omvandlingen från natrium till kalciumbentonit kommer också som tidigare påpekats att resultera i en successivt reducerad svällning och ökning av permeabiliteten, se figur 20.

För att exemplifiera ovanstående förhållanden har en förenklad modell utarbetats. Denna grundar sig på att lakvatten får passera ett tätskikt av bentonit/sand. Vid transport genom skiktet kommer en viss mängd joner

i lakvattnet att bytas in varvid bentoniten långsamt kommer att omvandlas. Tiden för denna "omvandling" är beroende av tidigare redovisade faktorer som permeabilitet, lakvattenkemi, utbyteskapacitet m m. Genom kännedom om dessa faktorer blir det möjligt att kvantifiera tiden för "omvandlingen" (jämför Frissel och Poelstra 1964).

I figur 21 redovisas sambandet skiktjocklek (bentonit-sand) och "omvandlingstid" för en natriumbentonit till en kalciumbentonit. Följande förhållanden anses råda: Permeabilitet 10^{-9} m/s. För Ca^{2+} tillgänglig utbyteskapacitet: 90 mekv/100 g, bentonitkoncentration: 12,5% och ett kalciuminnehåll i lakvattnet av 9 mekv/l.

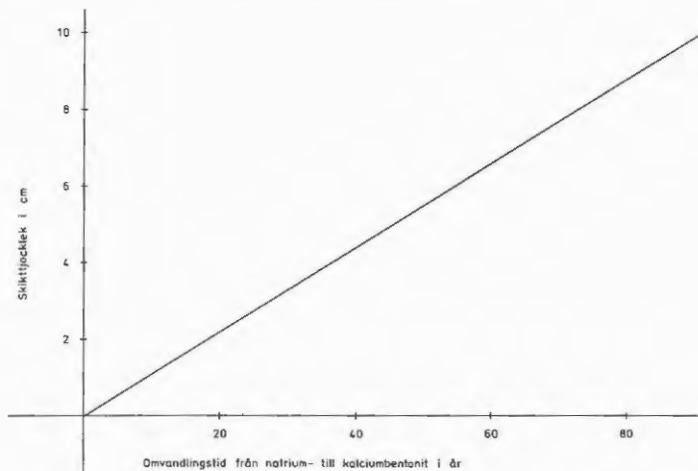


Figur 20. Joninnehåll, volymökning och permeabilitet för de olika bentoniterna efter olika kontaktider i lakvatten.

I takt med att bentoniten omvandlas ökar permeabiliteten vilket ej tagits hänsyn till i modellen. I princip medför detta i sin tur en ökad exposition av föroreningen och en lägre beständighet är vad som förutsågs av modellen. Av figur 20 framgår emellertid att ökningen av permeabiliteten med tiden är påtaglig först efter ca 25 års exponering. Efter 25 år i diagrammet, figur 21, bör således kurvan vika av uppåt - för Na^+ -bentoniter svagt uppåt - för $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$ -bentoniter kraftigt uppåt.

Resultatet visar att det kommer att ta ca 100 år innan ett 10 cm sand-bentonitskikt fullständigt har omvandlats. Påpekas bör att ovanstående beräkningar är gjorda under mycket förenklade antaganden. Således har ej någon hänsyn tagits till bl a tryck och temperatur. Ej heller till den sulfidbildning som sker i skiktet.

Resultaten av laboratorieförsöken vilka till viss del även grundar sig på fältförsök indikerar emellertid att SLS-71 (12,5% i sand) kommer att omvandlas till en kalciumvariant på 75-100 år. Detta stämmer som synes väl med ovanstående modell, se figur 21.



Figur 21. Omvandlingstid från natrium till kalciumbentonit i år för olika skiktjocklekar av sand/bentonitblandning (12,5 vikts-% bentonit).

5.2.5 Fri svällning

Resultaten av de fria svällningsförsöken redovisas i figur 22.

Generellt kan märkas att hydratisering med lakvatten ger en större volymökning jämfört med dest-vatten. Detta får anses bero på lakvattnets höga Na^+ -innehåll vilket befrämjar svällningen. Ett undantag härvidlag utgör dock Sabenil. För samtliga prover minskar svällningsförmågan med exponeringstiden. För SLS-71 och Black-Hill stabiliseras emellertid detta förlopp efter ca 25 års åldrande, varefter svällningen uppgår till ca 60% av den ursprungliga. Motsvarande stabilisering sker även med Sabenil, vad gäller hydratisering med dest-vatten. Lakvattenhydratisering ger däremot en successivt minskad svällning med tiden. Den lösa Leca-leran uppvisar ett liknande förlopp som SLS-71 och Black-Hill, men i betydligt mindre skala.

Av försöken med fri svällning kan konstateras att SLS-71 och Black-Hill i ett längre tidsperspektiv visar de stabilaste egenskaperna med en kvarvarande svällning i kontakt med lakvatten av storleksordningen 250%.

Av försöken med fri svällning kan konstateras att SLS-71 och Black-Hill i ett längre tidsperspektiv visar de stabilaste egenskaperna med en kvarvarande svällning i kontakt med lakvatten av storleksordningen 250%.

Mielenz och King (1955) har gjort försök med fri svällning på Wyoming-bentonit i olika vätskor, se tabell 12. Av försöken framgår bl a att Wyoming-bentoniter har en svällningsökning av 1.240% i vatten. I tabell 12 ges också värden på fri svällning av olika lermineral i vatten t ex Na-montmorillonit med en svällning av 1.400-1.600%.

Skillnader i svällningsvärden mellan de i Mielenz & King och de i föreliggande rapport får hänföras till bl a skillnader i metodik. Således är de förstnämnda svällningsmätningarna utförda efter betydligt längre

tid. Det viktiga är dock den relativa skillnaden mellan en natrium- och kalciumbentonit som går att utläsa (se tabell 13).

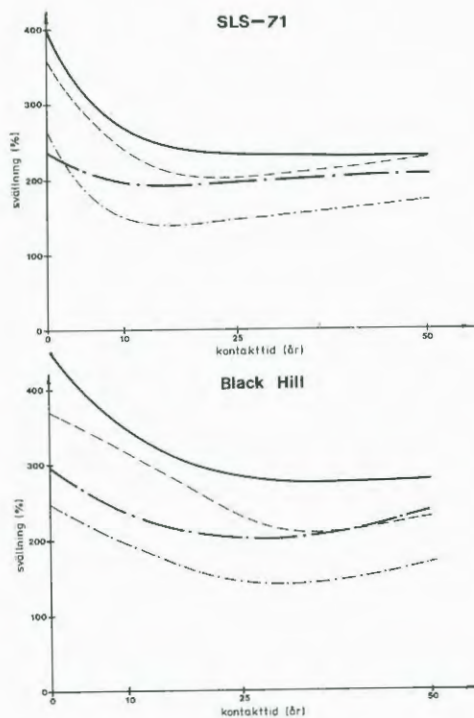


Fig. 6c: Svällning som funktion av tiden.

— · — prov hydratiserat i lakvatten 3 dygn
 - - - - - " " -" - destillerat vatten 3 dygn
 — — — — " " -" - lakvatten 14 dygn
 - - - - - " " -" - destillerat vatten 14 dygn

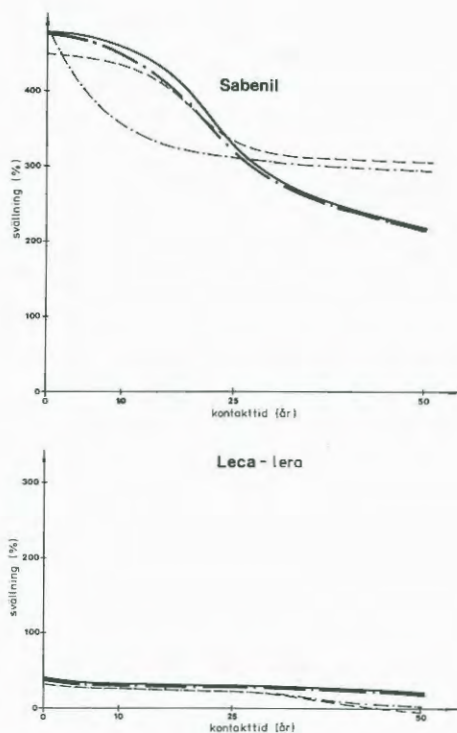


Fig. 6d: Svällning som funktion av tiden.

— · — prov hydratiserat i lakvatten 3 dygn
 - - - - - " " -" - destillerat vatten 3 dygn
 — — — — " " -" - lakvatten 14 dygn
 - - - - - " " -" - destillerat vatten 14 dygn

Figur 22. Svällning som funktion av tiden för kontakt med lakvatten.

— · — prov hydratiserat i lakvatten 3 dygn
 - - - - - " " -" - destillerat vatten 3 dygn
 — — — — " " -" - lakvatten 14 dygn
 - - - - - " " -" - destillerat vatten 14 dygn

Leca-lera avser den lösa varianten ("såpleran").

Tabell 12. Fri svällning för olika lermineral, från Mielenz & King (1955).

Lermineral	Lokal	Fri svällning i vatten (%)
Ca-Montmorillonit	Forest, Mississippi	145
	Osage, Wyoming	125
	Willow Creek Dam, Colorado	95
	Davis Dam, Arizona	45-85
Na-Montmorillonit	Osage, Wyoming	1400-1600
Na-Hectorit	Hector, California	1600-2000
Ca-Beidellit	Friant-Kern Canal, California	80
	Wellton-Mohawk Canal, Arizona	110
Na-Beidellit	Wellton-Mohawk Canal, Arizona	310
K-Illit	Fithian, Illinois	115-120
	Morris, Illinois	60
	Tazewell, Virginia	15
Blandade leror	Grand Coulee Dam, Washington	120-140
Kaolinit	Mesa Alta, New Mexico	5
	Macon, Georgia	60
	Langley, North Carolina	20
Halloysit	Santa Rita, New Mexico	70
Muscovit	North Carolina	25
Vermiculit	Libby, Montana	50
Pyrofyllit	Staley, North Carolina	40
Talk	Providence, Rhode Island	30
Serpentin	Warren County, New York	10

5.3 Obehandlade, naturliga, inhemska lerors täthet och beständighet

Resultaten av permeabilitets- och jonutbytesförsöken har för jämförelsemöjlighetens skull redan redovisats i tabeller och diagram för bentonitförsöken, se tabellerna 7, 8, 10 och 11 och figurerna 19 och 22. Eftersom resultaten är spridda och ej kommenterade, förtjänar de att sammanfattas.

Genomsläppligheten för rent vatten i den undersökta leran (Leca-leran) bestämdes med ödometer till $1 \cdot 10^{-10}$ m/s för torrskorpevarianten och $2 \cdot 10^{-10}$ m/s för den lösa varianten. Den senare lertypens permeabilitet bestämdes med nippelpermeameter till $1 \cdot 10^{-10}$ m/s. Permeabiliteten i svenska leror anses allmänt variera mellan 10^{-8} och 10^{-10} m/s, varför de erhållna värdena får anses vara relativt normala. De är utan tvekan också tillräckligt låga för att tillfredsställa kravet på ett tätningsmaterial. Dessa värden tar emellertid ej hänsyn till t ex sekundära sprickor i leran, varför man måste bedöma denna risk och inverkan för sig.

Lerans beständighet mot lakvatten har bedömts på samma sätt som för de bentonit/jordblandade materialen. Det utbytbara joninnehållet i den lösa Leca-leran är betydligt lägre än för bentoniterna (tabell 7). Men eftersom bentoniten blandas ut med mycket sand (som har mycket låg utbyteskapacitet) i ett tätningsmaterial, blir de olika tätningsmaterialens utbyteskapacitet ändå av samma storleksordning. Så mycket som 75% av Leca-lerans utbytbara joner utgörs av de tvåvärda jonerna Ca^{2+} och Mg^{2+} . Detta medför att dess SAR-värde ("Sodium adsorption ratio") blir betydligt mindre än motsvarande värde för de undersökta bentoniterna (tabell 8).

Jonutbytesförsöken, där Leca-lera skakades med lakvatten, visade (tabell 11) att även i denna byts Na^+ - och K^+ -jonerna ut mot Ca^{2+} (eller Mg^{2+}). Utbytet har beräknats ske med ungefär samma hastighet som för bentoniterna, men eftersom halten av Na^+ - och K^+ -joner ursprungligen är så låg, bedöms dessa joner praktiskt taget ha försvunnit redan efter ca 25 år (tabell 10 och 11).

Förändringen av Leca-lerans svällning med tiden framgår av figur 22. Av intresse är att notera att svällningsförmågan (som alltid är låg) försvinner efter 40 å 50 år om lerans förhydratiserats i rent vatten men bibehålls om leran endast hydratiserats i lakvatten.

"Åldersförsöken" antyder att Leca-leran behåller sin permeabilitet i ca 25 år. Därefter ökar den under de närmaste 25 åren med ca en tio-potens.

5.4 Anläggning av tätskikt

5.4.1 Lämpliga tätningsmaterial

Det täthetskrav som f n gäller för ett naturligt, befintligt underlag för en deponeringsplats för fast avfall motsvarar enligt SNV's publikation 1974:24 permeabiliteten 10^{-7} m/s. Som tidigare nämnts bör man ställa högre krav på ett anlagt tätnings-skikt, som ju oftast är tunnare än naturliga jordar. Vi föreslår att tätningsmaterialens permeabilitet - bestämd i laboratorium på prov vars tjocklek minst motsvarar halva tätskiktets mäktighet - skall vara mindre än eller lika med $5 \cdot 10^{-9}$ m/s. Därutöver bör också vissa krav fastställas om materialets beständighet.

Det föreslagna täthetskravet bör uppfyllas av de flesta naturliga, sprickfria leror och bentonit/jordblandningar där bentonithalten är tillräckligt hög för den aktuella jordarten. Om jordarten är grov och/eller ensartad kommer relativt mycket bentonit att erfordras varför kostnaderna för tätningsmaterialet blir höga. Därför kommer i praktiken endast finkorniga sand- och siltjordarter och osorterade (ev grövre) jordarter att bli aktuella. De praktiska försöken med anläggning av tätnings-skikt har därför genomförts med sådana material samt med Leca-lera.

5.4.2 Blandning av bentonit och jord

Vi utgick ifrån att "torrblandning" är den effektivaste blandningsmetoden, dvs då bentoniten tillsätts jordmaterialet (under omrörning) före vattnet. Dessa erfarenheter har man nämligen erhållit från liknande försök inom pelletiseringstekniken. De första försöken med olika blandningstider visade som väntat en ökad homogenitetsgrad med ökad blandningstid, tabell 14.

Tabell 13. Homogenitetsgraden i blandade bentonit/sandprover (3 kg) uttyckt som 5 stickprov (ca 25 g var) standardavvikelse med avseende på värden för vattenkvot (w_b) och halt av material $<0,003$ resp $<0,006$ mm. Blandningen har i samtliga fall genomförts med en "degblandare".

PROV Nr.	FÖRSÖKE				STANDARDAVVIKELSE						ANMÄRKNING	
	Bentonit	% Bal.	Syfte		ABSOLUT TAL			% AV MEDELV.				
					w_b	$<0,003$	$<0,006$	w_b	$<0,003$	$<0,006$		
BESTÄMNING AV BLANDNINGSTID												
1	SLS-71	10	Sa	Blandn	5 min	0,15	1,07	1,08	0,98	11,28	10,65	väljes för försök
2	-	-	-	Erd.	7 -	0,14	0,55	0,71	0,91	6,40	7,54	
3	-	-	-		11 -	0,06	0,74	0,63	0,4	7,3	5,7	
4	-	-	-		14 -	0,06	0,28	0,16	0,4	2,5	1,3	
BESTÄMNING AV BLANDNINGSDORDNING												
0	SLS-71	10	Sa	1, 2, 3, 4, 5		0,06	0,78	0,63	0,4	7,3	5,7	Båda kan utföras försöksmässigt
1	-	-	-	1, 4, 3, 2, 5		0,08	0,41	0,24	0,5	4,5	2,1	
2	-	-	-	4, 2, 3, 1, 5		0,04	0,76	0,77	0,3	7,5	6,9	Kan utföras i försöken
3	-	-	-	1, 4, $\frac{3}{2}$, 2, $\frac{3}{2}$, 4, 5		0,07	0,69	0,83	0,5	7,6	8,8	
4	-	-	-	1, 4, 3, 4, 5 naturfukt		0,08	0,48	0,29	0,4	3,8	2,2	
5	-	-	-	1, 4, 3, 2, 5 -		0,06	0,36	0,36	0,4	3,5	3,3	
6	-	-	-	1, 2, $\frac{3}{2}$, 4, $\frac{3}{2}$, 5 -		0,02	0,42	0,78	0,1	4,0	7,1	
7	-	-	-	stärvt utförd		0,13	0,35	0,95	0,8	3,9	4,6	Vattnet inhomogent fördelat

För de fortsatta laboratorieförsöken valdes 11 minuters total blandningstid. Denna tid fördelades på 1 min homogenisering av ballastmaterialet (torkat), 1 min inblandning av bentonit, 4 min homogenisering, 1 min inblandning av vatten (destillerat) och 4 min homogenisering. I försöken med kortare blandningstid varade de olika inblandningstillfällena också en minut. Endast homogeniseringstiden varierade. Som standardbentonit användes "Volclay SLS-71". Insatsen var 10 viktsprocent (räknat på ingående ballast). Vattenkvoten (w_b) uträknades efter en formel som fastställts empiriskt vid inpackning av provblandningar i standardkolvborrhylsor, nämligen:

$$w_b = (C_j \cdot M_j + 0,25 \cdot M_b) \cdot 100 \quad (w_b \text{ i } \%) \text{ där}$$

$$C_j = 0,135 \text{ för den sand och } C_j = 0,15 \text{ för den grov-} \\ \text{mo som användes}$$

M_j och M_b är mängden jord respektive bentonit som använts.

I den andra blandningsserien fixerades blandningstiden (11 min) men blandningsordningen varierades, tabell 14. Därvid bekräftades att "torrblandning" ger ett bra resultat, men också att "våtblandning", dvs när vattnet tillförs bentoniten, går att utföra med lika gott resultat. Man kunde dock notera en tendens till bildning av klumpar vid ojämn tillförsel av bentonit vid våtblandning. Klumpar visar sig alltid ha svårt att sönderdelas i blandare av typ "degblandare" och "betongblandare". Torrblandning synes därför vara att föredra i praktiska sammanhang.

Vid tillsättning av halva satsen vatten före och halva efter inblandning av bentonit uppkom lätt klumpar och materialet blev otillfredsställande homogeniserat. Så också i kontrollförsöket med "slarvigt utförd blandning", dvs vid ojämn tillförsel av vatten och bentonit samt förkortad homogeniseringstid (torrblandning). Däremot kunde jordmaterialet vara naturfuktigt från början om motsvarande mängd mindre vatten tillsattes efter bentonitinsatsen, utan att homogeniseringsgraden äventyrades. Detta bekräftades sedermera vid fältförsöken med betongblandare. Åtminstone om man väntat ett dygn efter regn. Särskilt grovmon behöll nämligen efter regn gärna mycket vatten, som medförde tendens till klumpbildning i betongblandaren. Det steniga, sandiga gruset var mindre känsligt för klumpbildning, eftersom stenarna lätt slog sönder klumparna, innan de hunnit växa sig stora.

Det tredje blandningsförsöket i laboratoriet omfattade olika bentonittyper. Tre Na-bentoniter provades varav en var granulerad. En Ca-bentonit provades också. Ingen påtaglig skillnad ur blandningssynpunkt kunde märkas (tabell 15).

Tabell 14. Homogenitetsgraden i blandade bentonit/jordprover bestämd på sätt som framgår av tabell 12. Olika bentonittyper och varierande bentonitinsatser.

PROV Nr.	FÖRSÖK				STANDARDAVVIKELSE						ANMÄRKNING
	Bentonit	%	Bal.	Blanda-ordning	ABSOLUT TAL			% AV MEDELV.			
					W _D	<0.003	<0.006	W _L	<0.003	<0.006	
OLIKA BENTONITTYPER I LAB-BLANDNING											
B	Black Hill	10	Sa	1. 4. 3. 2. 5	0.06	0.29	0.57	0.4	2.5	4.7	Bra!
H	—	—	—	1. 2. 3. 4. 5	0.15	0.11	0.11	1.0	1.0	0.9	Vattenkvot!
MK	MK-80	—	—	1. 4. 3. 2. 5	0.09	0.15	0.37	0.6	1.3	3.1	Bra!
S:10	Sabernil	—	—	1. 2. 3. 4. 5	0.21	0.57	0.59	1.4	5.4	5.1	Vattenkvot!
C:10	Colclay	—	—	1. 2. 3. 4. 5	0.07	0.36	0.39	0.4	3.4	3.4	Bra!
OLIKA BENTONITHALTER I LAB-BLANDNING											
S:5	Sabernil	5	Sa	1. 2. 3. 4. 5.	0.06	0.59	0.25	0.4	10.6	4.3	Vattenkvot!
S:10	—	10	—	—	0.07	1.89	1.94	0.4	14.8	14.4	
S:15	—	15	—	—	0.03	0.26	1.03	0.2	1.9	7.2	
S:5:M	—	5	M ₀	—	0.06	0.59	0.25	0.4	10.6	4.3	<0.003!?
C:5	Colclay A90	5	Sa	1. 2. 3. 4. 5.	0.04	0.37	0.37	0.3	5.7	5.1	Bra!
C:10	—	10	—	—	0.07	0.36	0.39	0.4	3.4	3.4	
C:15	—	15	—	—	0.04	0.42	0.56	0.2	3.0	3.7	
C:5:M	—	5	M ₀	—	0.07	0.54	0.29	0.5	9.2	4.7	O.K.
C:10:M	—	10	—	—	0.06	0.52	0.38	0.4	5.6	3.9	Bra!
C:15:M	—	15	—	—	0.04	0.70	0.52	0.2	5.3	3.8	Mkt bra!

Det fjärde blandningsförsöket omfattade olika bentonithalter och olika jordmaterial (sand och grovmo). Isälvsgrus var dock för grovt att blanda i laboratorieskala. Försöken utfördes med två olika bentonitsorter. Med undantag för den lägre halten (5%) bentonit blandat med grovmo (vilket var tveksamt), uppnåddes fullt acceptabla resultat (tabell 15).

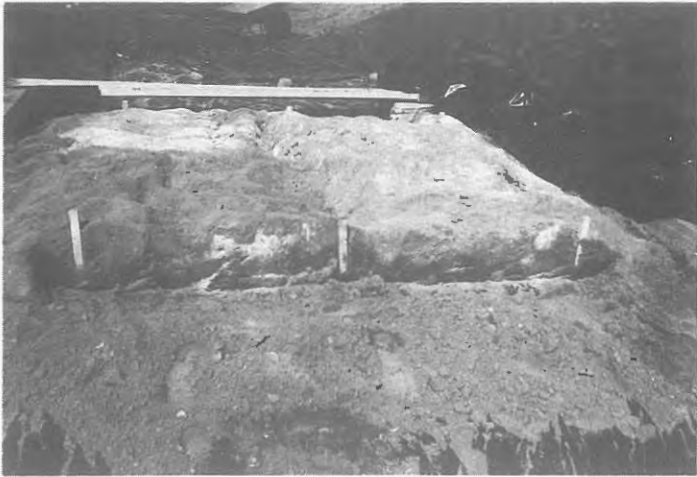
Resultaten av blandningsförsöken i fält framgår av tabell 16. De visar att det inte är möjligt att i fält uppnå samma homogeniseringsgrad som vid laboratorieblandning. Bästa blandningsresultatet uppnåddes med hjälp av vanlig betongblandare (11 min) men nästan lika väl inblandad blev bentoniten vid 6 överfarter med en kultivator (separat drivning på hjul och rotorblad).

Däremot är det tveksamt om tillräckligt god blandning kan uppnås vid ett rimligt antal överfarter med en vanlig "villajordfräs". Kultivator- och jordfräsblandningen utfördes före vattentillsättning.

Tabell 15. Homogenitetsgraden i fältblandade bentonit/jordprover bestämd på sätt som framgår av tabell 14.

PROV Nr.	FÖRSÖK				STANDARDAVVIKELSE					ANMÄRKNING
	Bentonit	%	Bel.	Blandning	ABSOLUT TAL			% AV MEDELV.		
					W _D	4.003-2.006	W _E	<0.003	<0.006	
FÖRSÖK MED BETONGBLANDARE										
S	SLS-71	~10	Sa	1.2.3.4.5	1.56	1.38	13.5	12.0		
M	-"-	-"-	Mo		1.00	0.88	8.4	7.4		
I	-"-	-"-	Isäms matr.		0.70	0.76	4.1	3.8		
JORDFRÄS - FÖRSÖK										
4:5:15	SLS-71	10	Sa	Jordfräs 4ppr	0.87	-	2.3	-		
8:5:15	-"-	-"-	-"-	-"- 8	0.48	3.59	3.68	4.0	22.2	22.0
10:1	-"-	-"-	-"-	-"- 10	0.22	3.98	4.05	2.1	44.7	42.1
10:2	-"-	-"-	-"-	-"- 10	0.35	1.28	0.99	3.7	12.2	9.3
} Ser homogent ut										
KULTIVATOR-FÖRSÖK										
K	SLS-71	~10	Sa	Kultivator 6 överfarter	0.53	1.60	1.48	4.6	21.1	17.3

Jordfräsförsöket genomfördes med olika antal överfarter. Det behövdes 8 överfarter för att materialet skulle se homogent ut på ytan, trots att framdrivningshastigheten hölls mycket låg, vilket var möjligt eftersom det var lätt att "styra" maskinen i det torra, lösa materialet. Även om materialet var homogent på ytan, påträffades "körtlar" av praktiskt taget ren bentonit vid uppgrävning av profiler genom de blandade materialen, fig.23, så även material som utsatts för 10 överfarter. Fler överfarter än 10 med den låga hastighet som användes bedömdes vara orealistiskt i praktiken.



Figur 23. Bentonitkörtlar i jordfräs-blandad bentonitsand efter 8 överfarter med jordfräsen.

Att tillsätta vatten före eller i samband med jordfräs- eller kultivatorblandning låter sig inte göras. Materialet "kladdar" väldigt och bildar klumpar. Det blir praktiskt taget omöjligt att gå eller köra på (i). Däremot kan man gå på bentonit/jord som lagts ut efter att ha blandats i en betongblandare - förutsatt att vattenkvoten ej vida överstiger den för optimal packning. Packning med vibroplatta är möjlig på sådant material. Fagerström & Lundahl (1977) anger att packning av bentonit/sand kan utföras vid vattenkvoten 17% vilket överstiger den optimala vattenkvoten för packning med ca 6 procentenheter.

5.4.3 Utläggning och packning av bentonit och jord

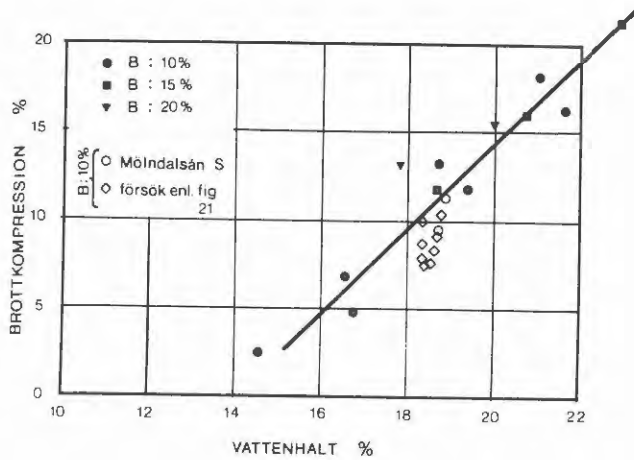
Vid blandning på plats (med t ex jordfräs eller kultivator) utläggs lämpligen först ballastmaterialet (t ex sand) och sedan bentoniten. Bentoniten kan antingen läggas ut i små portioner (t ex säckvis) som rakas ut till ett jämntjockt täcke eller sprids över ytan med t ex konstgödnings-spridare. Den senare möjligheten har använts vid tätning av barkdeponeringsplatsen i Delånger. Enligt Allan Jerbo varierade mängden bentonit per m² med högst ca 1%.

Sannolikt påverkas homogeniseringsgraden också av hur jämntjockt sandlagret läggs ut och hur jämnt bentoniten blir spridd. Hur mycket detta inverkar har dock ej undersökts. Vi har utgått ifrån att olikheter i detta avseende utjämnas vid blandning och att det är själva blandningsförfarandet som i huvudsak blir bestämmande för homogeniseringsgraden.

Packningen utförs dels för att höja tätheten i materialet dels för att göra det mer mekaniskt motståndskraftigt mot avfallet (t ex nedfallande, hårda föremål vid ändtippning) eventuellt också bärkraftigt nog att köra med fordon på utan skador. En viktig faktor för packningsresultatet är vattnets inblandning, vilket t o m kan bli avgörande för om packning kan utföras. Både mängden vatten och sättet för tillsättningen har betydelse.

Packningsresultatet brukar mätas som den torrdenstet materialet uppnår efter packning i relation till den torrdenstet man kan uppnå med ett standardiserat packningsförfarande i laboratorium. Högsta möjliga torrdenstet kan endast uppnås om vattenkvoten är optimal. Frågan är om optimal vattenkvot (och maximal torrdenstet) är önskvärd i detta fall. Visserligen uppnås då sannolikt också den högsta tätheten, men de plastiska egenskaperna, dvs segheten och förmågan att "självläka" är sämre vid lägre vattenkvot. Detta har verifierats av CTH-försöken (Hansbo & Olsson, 1973). Enligt CTH-försöken och KBS-undersökningarna med bentonit-buffertmaterial (Fagerström och Lundahl, 1977) är den optimala vattenkvoten för bentonit/sandblandningar (10% bentonit) av storleksordningen 9-12%. Den plastiska brottkompressionen för detta material ökar enligt CTH-försöken i stort sett linjärt med vattenkvoten, figur 24. Den tycks ha ett nollvärde omkring vattenkvoten 14%. Man anger att materialet börjar flyta vid en plastisk brottkompression av 15-20%, vilket motsvarar vattenkvoter över ca 20%. En vattenkvot mellan 15 och 20% tycks därför vara lämplig för bentonit/sand (10% bentonit) för

tättningsändamål. Vid dessa vattenkvoter får ett sådant material ändå en ganska god packning. I KBS-försöken t ex, uppnåddes torrdensiteter över $1,7 \text{ t/m}^3$, motsvarande ca 88% packningsgrad (tung laboratoriestampning) i 0,3 m tjocka lager, som packades vid dessa vattenkvoter med 450 kg vibroplatta, 4 överfarter (Fagerström & Lundahl (1977)).



Figur 24. Sambandet mellan brottkompression och vattenkvot erhållet vid enkla tryckförsök på prover av bentonit/sand. B; betyder provets halt av bentonit. Mölnålsån S utgör prov som utsatts för förorenat vatten (från Mölnålsån). Från Hansbo & Olsson (1973).

Den genomsläpplighet som erhålls i ett skikt med 88% packningsgrad bör inte vara särskilt mycket högre än i ett skikt med 95-100% packningsgrad. De packnings- och permeabilitetsförsök som genomförts i denna utredning har alla utförts vid vattenkvoter mellan 14 och 15%. Packningsresultaten föreligger som fyra värden på torrdensitet respektive konpenetrometertest för de tre olika materialtyperna och redovisas i tabell 17.

Tabell 16. Torrdensitetsvärden och konpenetrometervärden för de 4 utlagda och packade bentonit/jordytorna.

Material	Antal överfar- ter med vibroplatta	Torrden- sitet t/m ³	Konpenetrometervärde CI-tal (medelvärde av 8 mätpunkter)
Sand	2	1,5	43 (34-56)
	4	1,6	53 (35-70)
	6	1,6	71 (30-103)
	8	1,8	59 (35-87)
Grovmo	2	1,6	36 (30-44)
	4	1,6	49 (38-71)
	6	1,5	69 (53-83)
	8	1,7	66 (55-77)
Isälvs- material	2	1,8	84 (72-102)
	4	1,7	114 (100-132)
	6	2,1	143 (118-170)
	8	2,1	130 (97-180)

Av manualen för konpenetrometern framgår att det lägst erhållna CI-talet (sand, 2 överfar-
ter), se tabell 17, överstiger det minimivärde (40) som krävs för att en "Land Rover" skall kunna komma fram. Det be-
tyder emellertid inte att det sker helt utan skador (hjulspår) på en sådan yta.

Värdena för det packade isälvs materialet överstiger det minsta värdet som krävs för att vilket som helst av de i manualen angivna fordonen skall komma fram. Inte någon av packningsytorna var så lös att det t ex blev fotavtryck när man gick på dem. Konpenetrometervärdet ökar särskilt påtagligt när antalet överfar-
ter ökas från 4 till 6. Däremot ökar inte värdet mellan 6 och 8 överfar-
ter - tvärtom minskar det generellt något varför 6 har bedömts vara det lämpligaste antalet överfar-
ter vid packning med vibroplatta. Enligt Mark-AMA 72 är det minsta antalet överfar-
ter med vibratorplatta 4 för packning enligt klass 2. Motsvarande antal med vibrovält

är 6. Därför borde i vårt fall det lämpligaste antalet överfarter med vibrovält vara 8.

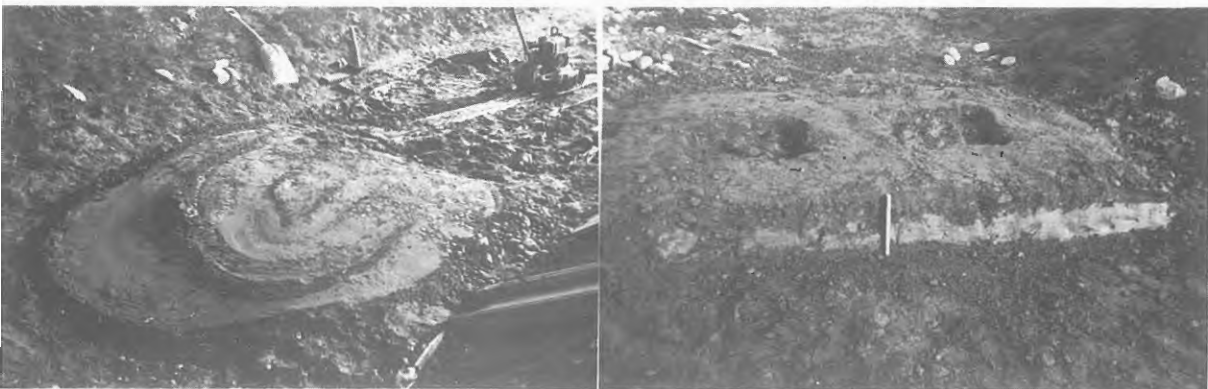
Eftersom packningen försvåras och kanske t o m omöjliggörs om vattenkvoten blir för hög är det viktigt att rätt beräkna vilken mängd vatten som skall tillsättas t ex i betongblandaren. Hänsyn måste tas till sandmaterialet (dock ej bentonitens) ursprungliga fuktighet. Lämplig vattenkvot har det blandade materialet när konsistensen liknar den hos en styv betong - eller putsbruk, dvs när en handfull av materialet inte börjar flyta ihop förrän man skakat handen kraftigt flera gånger, se figur 25.



Figur 25. Stenigt väl sorterat isälvs material som blandats med bentonit och vatten till lämplig vattenkvot för packning. Före respektive efter hopkramning av handen.

5.4.4 Utläggning och packning av obehandlad, "naturlig" lera

Vid packningen av den grustäckta lerpacken upplevdes denna som ett "gungfly" och det var precis att gruslagret (0,1 m) förmådde bära vibroplattan (145 kg), figur 26. Detta gällde speciellt den lösa leran. Trots detta förblev överytan relativt jämn under packningen.



Figur 26. Det grustäckta lerskiktet under (t v) och efter (t h) packning.

Bortgrävningen av en del av grusskiktet avslöjade att packningen plattat ut lerklumparna och i stort sett fyllt ut ojämnheterna i båda lermaterialen, figur 27. En profil, som grävdes ut genom materialen, visade dock att endast skiktet med lös lera blivit helt kontinuerligt. I skiktet med torrskorpelera förekom upp till decimeterbreda "hål" eller "sprickor", figur 28.



Figur 27. Närbilder av de två frilagda överytorna av torrskorpelera (t v) och den lösa lera (t h).



Figur 28. Uppgrävd profil genom det packade lerskiktet. Packad torrskorpelera överst och lös lera nederst. Lågg märke till den decimeterbreda diskontinuiteten till vänster i den övre profilen och sprickan mellan denna och tumstocken (0,2 m lång) till höger i samma bild.

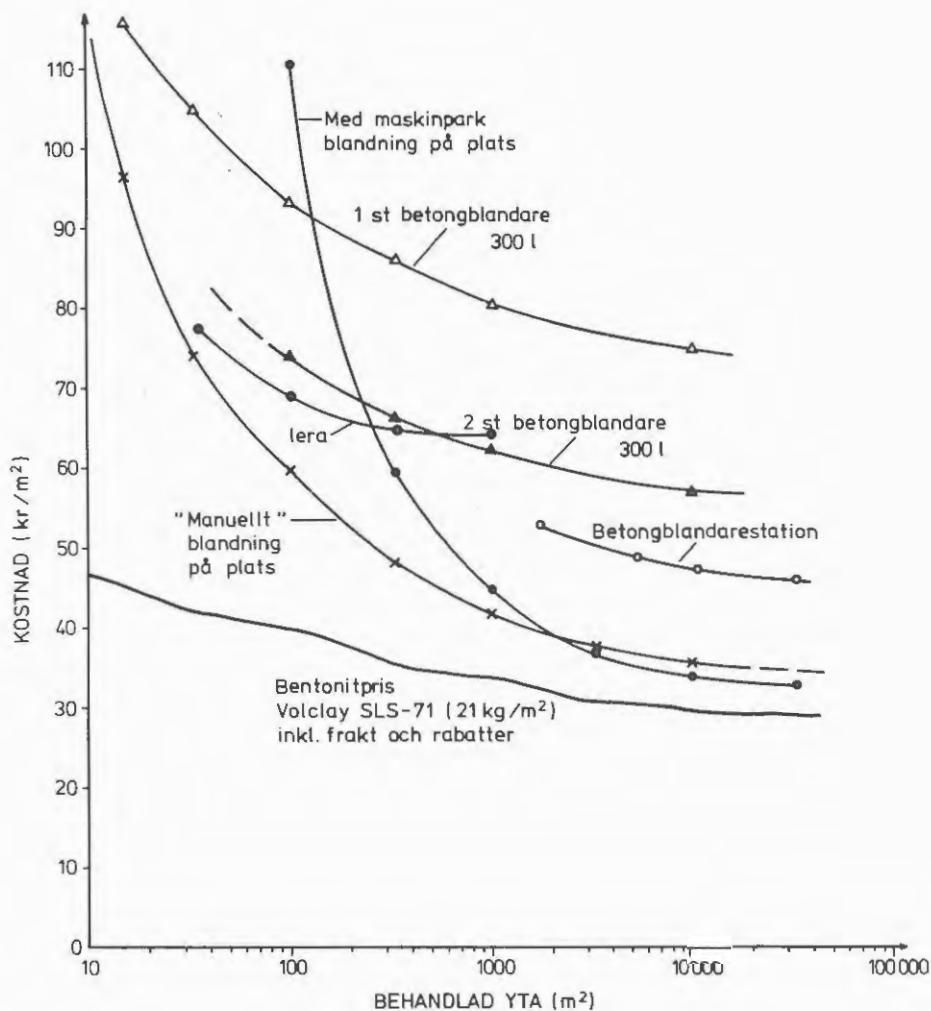
5.4.6 Kostnader

Resultatet av kostnadsanalysen (1978 års prisläge) redovisas i ett diagram, figur 29, medan underlaget för kostnadsanalysen och själva beräkningarna redovisas i bilaga 7. Det måste poängteras att analysen bygger på att tätningmaterialen utgörs av tämligen "ädla", inköpta material. Dels är det sand och specialbentonit, dels lera från lertäkt. Man kan med fördel i stället använda finkornig, välgraderad sand eller t o m ren silt eller s k bergmjöl, vilka i många fall kan erhållas till ett lägre pris än sand. I andra fall kanske man kan använda yt-skiktet av jorden på platsen. När det gäller lera, kan kanske den lämpliga leran hämtas till lägre kostnad i en närbelägen schakt. Kan man använda obehandlad bentonit kan kostnaderna för denna nedbringas till kanske hälften, vilket kraftigt påverkar totalkostnaden.

Andra viktiga förutsättningar för analysen är god tillgänglighet och gott väder. Själva bentonithanteringen bör, såsom nämns i avsnitt 5.5, nämligen ej försiggå i regnväder, vilket i praktiken kraftigt kan påverka kostnaderna och kostnadsjämförelsen. Analysen förutsätter en någorlunda jämn och horisontell markyta utan hinder i form av stenblock, vegetation eller liknande.

För att göra jämförelsen mellan lera och bentonit/sand rättvis med hänsyn till att tätheten av lertäkter är mindre än tätheten av sandtäkter, har transportavståndet för lera satts till 10 km och för sanden till 5 km. Även transportsträckan från betongstation har satts till 10 km.

Diagrammet i figur 29 visar att lerskiktstättning blir dyrare än bentonit/sandtättning för ytor som är större än ca 30 m². Vi har inte funnit något maskinellt system som skulle kunna ersätta den arbetskraftkrävande metod som vi själva använts oss av i undersökningarna av lertätningensalternativet.



Figur 29. Kvadratmeterkostnaden som funktion av behandlad yta vid olika tätningsalternativ. Alternativet blandning i betongblandare utgår ifrån ca 10 min blandningstid. Beräkningarna framgår av bilaga 7.

Det är uppenbart att betongblandare-alternativet är ett förhållandevis dyrt alternativ. Möjligen kan det förbilligas något om fler än två 300 liters betongblandare används. Sannolikt krävs det emellertid motsvarande ök-

ning på personalsidan, om inte transportfordon sätts in. Det är också möjligt att alternativet med mobila betongstationer kan bli ekonomiskt inom visst ytstorleksintervall. Detta har ej undersökts.

Det skall också framhållas att tillgängligheten hos betongstationer påverkar kostnaden. Normalt är betongstationer upptagna under dagtid med betongproduktion och kan då bara användas för bentonitblandningar om samkörning kan ske och tillfällena till detta ges. För att samkörning skall kunna ske krävs att lagringsbehållare för bentonit och den sand som skall användas (om man inte vill använda den ensartade grova betongsand som redan finns på stationen) finns och är lediga. Dessutom krävs att man inte behöver rengöra anläggningen före övergång till normal betongproduktion. Om rengöring i allmänhet krävs för betongstationer har ej särskilt undersökts. I den lilla betongblandare vi använde oss av i försöken fastnade en hel del material i blandaren, särskilt när jordmaterialet var finkornigt.

Exemplet i kostnadsberäkningen utgår ifrån att stationen körs ett 8-timmars skift efter en normal arbetsdag med betongproduktion och med efterföljande rengöring. Kapaciteten antas vara 250 m^3 under denna tid (6 m^3 blandare, 11 min blandning). Det är möjligt att blandningstiden kan reduceras. Detta har ej undersökts, men om det är möjligt så sjunker naturligtvis kostnaderna.

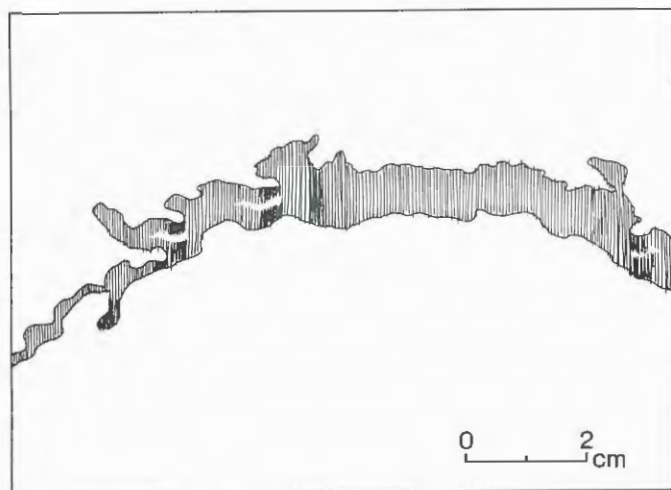
Alternativet "blandning på plats" är tydligen det klart billigaste av de undersökta alternativen, om bara ytan som skall tätas är större än ca 30 m^2 .

Den kritiska ytstorleken vid vilken stora maskininsatser (entreprenadmaskiner) börjar löna sig (med detta alternativ) ligger vid ca 2000 m^2 . Skillnaden i kvadratmeterkostnad mellan den "manuella" metoden och "maskinparksmetoden" är så liten att omständigheterna kan få en avgörande inverkan. Därför måste man göra ekonomiska beräkningar från fall till fall.

Genom att utnyttja en maskinpark borde man normalt kunna spara totalt ca 10.000:- om ytan är 5.000-6.000 m² stor. Underlaget för beräkningen av kostnaden för det "manuella" alternativet upptar hyreskostnad för kultivator och vibroplatta. Sådana maskiner torde kommunerna själva ha tillgång till, varför "egen regi"-arbeten bör kunna göras något billigare än här beräknats.

5.5 Bildning av frostsprickor

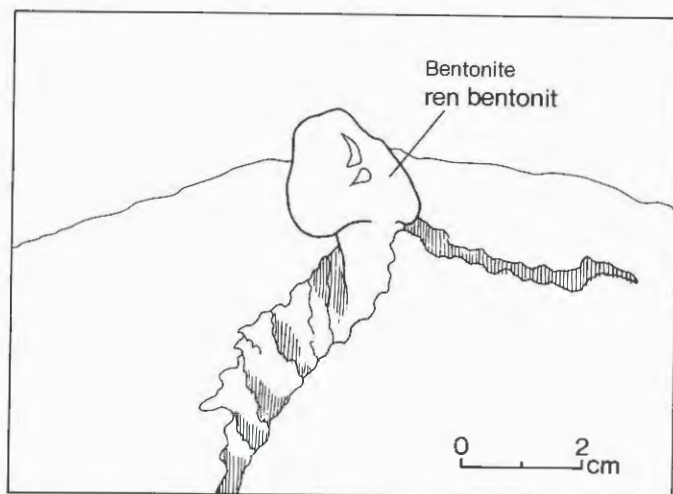
Genomförda försök visar att det under vissa omständigheter kan bildas frostsprickor vid tjälning i sand/bentonitbaserade tätskikt. Sprickorna kan i vissa fall vara genomgående, figur 30. Skiktets tätande förmåga är då reducerad främst under upptiningsperioden. Permeabilitetsökningen kan motsvara 3 tiopotenser. Vilken bildning av frostsprickor som erhålls i andra bentonitblandningar har ej undersökts - med undantag för kolaska-bentonit, där endast obetydliga sprickor uppträdde.



Sprickans djup: 10 cm Depth of crack: 10 cm

Figur 30. Teckning efter fotografi av en spricka som uppkommit i ett bentonit-sandblandat material vid tjälning.

Uppkomsten av frostsprickor bestäms i viss utsträckning av vattenkvot och tjälningstemperatur. Låg vattenkvot tycks medföra att det bildas torksprickor i ytskiktet. Detta inträffar emellertid mer eller mindre oberoende av tjälningförloppet. Störst betydelse för bildningen av frostsprickor i ett tätskikt har blandnings- och packningsgraden. I ett dåligt blandat och packat tätskikt uppstår genomgående sprickor vid frysning, figur 31. Dessa sluts emellertid vid upptining varvid tätskiktet återfår sin tätande förmåga, men vid nästa fryscykel uppstår nya sprickor osv. En bestående genomsläpplighet uppstår i de fall tätskiktet försetts med ett alltför finkornigt täckskikt. Detta material rasar nämligen ner och fyller igen sprickorna som blir permanenta dräner. Är täckmaterialen tillräckligt grovkorniga uppkommer inte dessa effekter. Försök med krossat bergmaterial (>20 mm) har bekräftat detta.



Figur 31. Teckning efter fotografi av en spricka som uppkommit vid tjälning av ett slarvigt blandat bentonit-sandmaterial. Körtlar av ren bentonit sväller upp i sprickan.

5.6 Praktiska frågor

För att kunna använda maskiner vid bentonittättningsarbeten måste underlaget uppfylla vissa förutsättningar. Naturligtvis måste det i första hand bära maskinerna men det måste också vara tämligen plant och rent från hinder. Detta framgår både av bentonitfabrikanternas råd och anvisningar och av "praktikers" erfarenhet (Allan Jerbo och Bertil Nord). Vegetationen måste t ex avlägsnas helt och markytan finplaneras. Vid uppstickande bergpartier eller vid stora block som det är för kostsamt att spränga sönder och frakta bort, kan man tänka sig "manuell" tätning med hjälp av t ex betongblandade massor.

Även om packade bentonit/jord-blandningar kan vara tämligen plastiska och har ganska hög skjuvhållfasthet, så tål ett skikt av sådant material inte hur stora deformationer som helst. Deformationernas storlek, beror, förutom på de egna egenskaperna, på lastens storlek och på underlagets egenskaper. Lasten kan t ex vara en extrem punktlast ifrån nedfallande, hårda föremål. Underlagets och sopornas karaktär och egenskaper blir betydelsefulla faktorer som entreprenören måste ta hänsyn till om han skall ge funktionsgaranti på tättningsarbetet. I känsliga fall kan täckskikt av packad sand eller grus bli erforderliga, speciellt då ständig körbarhet krävs.

Att packa bentonit/jord som blandats torrt på plats, (alternativt utlagts efter torrblandning) och sedan befuktats på plats, är svårt och i vissa fall ej möjligt utan särskilda åtgärder. Detta beror på att ytan vid bevattningen blir "kladdig" och alltför hal för redskapen. Man måste då vänta något dygn för att vattnet skall ha sugits upp i hela det utlagda skiktet och på att överytan skall ha torkat upp. Om vattnet har sugits upp, men ytan ändå är kladdig, t ex efter regn, kan den göras packningsbar genom att man anbringar ett täckskikt av sand, grus eller bentonit/jord (torr).

Vid tätningen för barkdeponeringsplatsen i Delånger packade man bentonit/silten i torrt tillstånd (Allan Jerbo). Någon packningskontroll utfördes ej men permeabilitetsförsöken visade goda resultat (se figur 14). Torrpackning kan - liksom i Delånger - bli en nödvändighet om torrperioderna mellan ideliga regn är kortvariga under arbetet.

Regn luckrar upp den packade ytan, där bentoniten sväller och lägger sig som ett sörjigt skikt som blir ofarbart. Vid långvariga regn kan en större del av det komprimerade skiktet häva sig och packningen förloras helt eller delvis. Detta kompenseras åtminstone delvis av den kompression som uppkommer när avfallet läggs på ytan. Man bör dock planera underlaget så att regnvatten ej blir stillastående på bentonittätningen utan leds bort mot ett eller flera uppsamlingsdiken.

6 FÖRSLAG TILL PROVISORISKA ANVISNINGAR OCH KONTROLLPROGRAM

6.1 Tättskikt av bentonit/jord-blandningar - utförande Allmänt

Underlaget för markytan som skall tätas måste vara välplanerat, dvs ytan måste vara jämn och fri från block och vegetation. Ytavrinningen måste vara ordnad genom att ytan ges en svag lutning (eventuellt flera) mot ett eller flera diken.

Tättskikten kan antingen läggas ut, samt blandas och packas i omgångar allteftersom deponeringsytan tas i anspråk eller läggas ut och blandas över hela ytan. I det sistnämnda fallet bör (skall) packningen göras i omgångar på delytor i takt med utfyllnaden. Detta minskar risken att tättskikten försämras genom sönderkörning, uttorkning och sönderfrysning. Risken kan också minskas genom att ett täckskikt anbringas ovanpå tättskiktet. Detta bör då göras så snart som möjligt. Täckskiktet bör vara minst 0,2 m mäktigt och bestå av material >20 mm. Om det kopplas till en pumpgrop, brunn eller dike kommer det att fungera som en god bottendränering.

Bentonit/jord-tätning kan utföras på i huvudsak tre olika sätt.

1. Bentoniten fräses in i det befintliga jordmaterialet ("på plats-blandning").
2. Ny jord transporteras till platsen, läggs ut och bentonit fräses in på plats.
3. Jord och bentonit blandas i betongblandare och läggs ut i färdigt skick för packning.

Material

Om jordarten på den aktuella markytan effektivt går att blanda med bentonit på platsen med kultivator, kan detta ske. Jorden får ej vara stenig och ej heller så finkörnig att blandningen blir ineffektiv. Naturligt hårdpackade jordar är olämpliga om de ej förbehandlats genom t ex rivning.

Jordmaterial som förs till platsen kan bestå av t ex mo, sand, grus eller lämplig morän. Maximal stenstorlek i materialet är 64 mm och maximal stenhalt (20-64 mm) är 40%. Måktigheten på det utlagda skiktet skall beräknas så att det i färdigpackat tillstånd blir minst 0,15 m tjockt. Bentonitinsatsen antas ej påverka skikttjockleken.

Vid avfallsupplag som skall innehålla industri-, hushålls- eller blandat avfall bör endast s k polymerbehandlade bentoniter användas. Vid avfallsupplag med byggavfall kan förutom polymerbehandlade bentoniter även andra högsvallande bentoniter användas. Den minsta bentonitkoncentration som får användas varierar med jordartstyp enligt följande, där koncentrationen uttrycks som antal kg bentonit per m² vid 0,15 m skikttjocklek:

Stenigt grus	30 kg/m ²
Stenigt välsorterat grus	25 --
Ensartat grus	25 --
Ensartad sand	20 --
Ensartad grovmo	15 --
Ensartad finmo	10 --
Välsorterat isälvsmaterial (mer än 15% större än 0,2 mm)	20 --
Svallad morän	20 --
Grusig morän	15 --
Sandig morän	10 --
Siltig morän	5 --

Inblandning

Inblandning av bentonit i jorden genom infräsning skall ske med s k kultivator (separat drivning på hjul och rotorblad). Minsta antal överfarter är 6. S k jordfräs (drivning endast på rotorbladen) kan i undantagsfall användas vid små arbeten och då tillgängligheten för större redskap är begränsad. Minsta antal överfarter med jordfräs är 10.

Inblandning av bentonit i jordmaterialet med hjälp av betongblandare (s k frifallsblandare) skall ske med s k torrblandning, dvs där bentoniten tillförs jorden i blandaren före det vattnet tillsätts. Jorden får vara "naturfuktig". Innan vattnet tillsätts skall blandningen ha homogeniserats under 5 minuter. Även efter vattentillsättningen, som bör ske finfördelat, skall blandningen homogeniseras under 5 minuter. Alternativt kan vattnet tillsättas genom bevattning först sedan materialet lagts ut.

Inblandning bör ej ske under eller genast efter regn, då materialet får en tendens att "klumpa sig", vilket ger en sämre blandning. Detta gäller även vid användning av betongblandare, om jordmaterialet ej hålls täckt eller avvattnas på annat sätt.

Vid blandning i betongblandare eller efter blandning på plats med kultivator skall vatten tillsättas så att vattenkvoten 14-17 procent uppnås. Därvid måste hänsyn tas till den vattenkvot jordmaterialet redan har, dock ej till bentonitens fukthalt. I betongblandare tillsätts vattnet (finfördelat) under blandning. På plats tillsätts det med vattenspridare.

Utläggning

Utläggning av jord, bentonit eller färdig bentonitblandning skall ske med största möjliga noggrannhet, så att skillnaderna i skiktjocklek och bentonitkoncentration hålls inom 10%. Utläggning av bentonit för infräsning kan antingen ske för hand med hjälp av rakor sedan bentoniten portionerats och lagts ut (ett rut-system är till stor hjälp) eller med hjälp av särskilda spridningsredskap, t ex konstgödningsspridare.

Packning

Packningsredskap skall väljas efter skiktjocklek. Vibratorpackning är att föredra. Vid 0,15 m skiktjocklek kan 150 kg vibroplatta eller 1 tons vibrovält användas. Vid större skiktjocklekar bör större maskiner väljas, se anvisningar i Mark AMA 72. Minsta antal överfarer med vibroplatta är 6 och med vibrovält 8.

6.2 Naturlig lera som kompletteringstätning - utförande

Materialet

Leran som skall användas måste vara lös och ha en vattenkvot som är högre än flyttalet (eller finlekstalet) eller ungefär lika med detta. Torrskorpelera kan ej användas. Leran får ej ligga utsatt för väder och vind, då den genast torkar upp och man riskerar krympsprickor och försvårad packning. I upplag måste eventuellt leran bevattnas. Så också om den får ligga utlagd för länge utan att bli täckt av annat material.

Utläggning

Leran måste delas upp i klumpar som har ungefär samma

storlek som den avsedda skiktjockleken (i regel ca 0,2 m). Detta arbete måste i regel utföras för hand. Klumparna måste läggas ut tätt intill varandra så att inga "genomslag" uppstår. Större håligheter måste fyllas igen med mindre klumpar. Överytan avjämnas grovt. Underlaget för leran bör vara stenigt och/eller grusigt. Över leran läggs ett täckskikt av stenigt grus (t ex bärlagergrus). Tjockleken av detta skikt avpassas efter packningsredskapet (0,1 m är lagom för 150 kg vibroplatta) så att skiktet kan bära redskapet samtidigt som hela grus- och lerskiktet blir välpackat.

Packning

Packning utförs med vibroplatta eller vibrovält. Minsta antalet överfarter är 6 med vibroplatta och 8 med vibrovält. Maskinens vikt avpassas till skiktjocklekar enligt Mark AMA 72, se ovan.

Kontroll

Underlaget besiktigas för godkännande. Prov tas på leran och analyseras med avseende på vattenkvot och finlekstal. Eventuellt besiktigas schakten där lermaterialet tas ifrån för bedömning av risk för att oönskat material kommer med. Packningskontroll och besiktning av täckskiktet (torrdensitetsbestämning för avgörande om fullgod packning uppnåtts).

6.3 Kontrollprogram vid bentonittätning

1. Underlaget för tätningen besiktigas (vissa villkor skall uppfyllas).
2. Det jordmaterial som skall användas analyseras. Lämplig bentonitkoncentration och bentonittyp fastställs.
3. Efter avslutad blandning och packning tas prov för bestämning av homogeniseringsgrad och packningsgrad samt vattenkvot.

Följande villkor bör vara uppfyllda:

- Underlaget skall vara finplanerat och fritt från block och vegetation. Uppstickande större block och bergpartier får behandlas särskilt.
- Tillåten bentonittyp och -koncentration samt jordmaterial framgår av anvisningarna.
- Homogeniseringsgraden (t ex bestämd genom slammingsanalys) skall vara mindre än (t ex) standardavvikelsen 3% av medelvärdet på 5 stickprov. Packningsgraden skall minst motsvara 85% packningsgrad enligt tung laboratoriestampning. Vattenkvoten skall vara mellan 14 och 17%.

7 FÖRSLAG TILL FORTSATTA UNDERSÖKNINGAR

Det har inte i denna förstudie varit möjligt att systematiskt och fullständigt utreda bentonit/jordblandningars täthet och beständighet vid användning som tätskikt under soptippar. Vi har ej undersökt alla bentonittyper som är tillgängliga inom landet. Inte heller har vi testat alla jordarter som kan tänkas förekomma. Våra resultat pekar emellertid på att de polymerbehandlade bentoniterna är de mest beständiga, varför vi bedömer det som mindre angeläget att testa fler obehandlade bentoniter. Där- emot kan det finnas skäl att genomföra en serie test med grövre och/eller mer ensgraderade jordar än dem vi undersökt. Man skulle då få ett säkrare dimensioneringsunderlag för bentonitinsatserna än vad vi haft i våra provisoriska rekommendationer.

I fråga om bentonitmaterialens täthet och beständighet kvarstår vissa frågetecken. Vid jonutbytesförsöken påträffades t.ex. en spontan finkornig sulfidbildning som också påträffats vid Uppsalagruppens fullskaleförsök i en soptipp, Bilaga 8. Det är inte känt hur denna sulfidblandning påverkar materialets täthet vilket borde utredas. Vidare har inte tiden tillåtit oss att ens resonera över resultatens giltighet när lakvattnets kemiska sammansättning avviker från den våra försök baseras på. Detta är en

komplikerad fråga som vi idag inte ens kan upprätta ett program för. Den behandlas på flera håll i USA. Man bör i första hand följa upp utvecklingen där.

Våra försök tyder på att även befintliga, naturliga lersors egenskaper påverkas av lakvatten. Eftersom de flesta av våra soptippar ligger på sådan lera finns det ett generellt behov av att undersöka förhållandena under våra soptippar.

När det gäller själva anläggningen av tätskikt så har vår undersökning endast omfattat mindre maskiner. Större maskiner av den typ som används inom jordbruket (t.ex. konstgödningsspredare och harvar) är enligt andras erfarenheter mycket lämpliga verktyg i denna hantering. Det borde provas.

Vid packning av utlagda lerskikt kan problem uppkomma med lerans förmåga att bära packningsredskapen. Vi har en känsla av att vi haft tur (gott omdöme?) när vi valde packningsredskap och skikttjocklek vid våra lersförsök. Om leran är lösare eller packningsredskapen tyngre än i vårt försök med den lösa Leca-leran, misstänker vi att en effektiv packning är omöjlig att genomföra. Man kan inte bara öka det ovanliggande grusskiktets mäktighet, eftersom man då inte erhåller en god packning i lerskiktets undre del. Detta borde undersökas närmare.

Vår rekommendation för blandningstider med betongblandare utgår ifrån resultaten av laboratorieblandning. Möjligen kan man sänka blandningstiden något för betongblandare. Detta skulle i så fall framförallt öka konkurrensförmågan för betongstationer. Möjligheten borde undersökas.

En praktisk fråga, som vi endast behandlat i begränsad utsträckning, är den om eventuella skyddsskikt (täcksikt) ovan bentonit/jordmaterial. Vi har konstaterat att ett täcksikt skyddar tätskiktet mot uttorkning och måste bestå av ett grovkornigt material om det ej skall fylla ut eventuella frostsprickor. Uppenbarligen skulle de också vara till stor fördel för bärigheten och motståndskraften mot hårda föremål, särskilt vid regn. Regler för dimensionering och kostnadsberäkningar saknas emellertid.

8. REFERENSER

- Alestii, B.A. & Fuller, W.H., 1976: The mobility of free cyanide forms in soils. (Environmental Protection Agency). sid 213-223. EPA Publication. Cincinnati, Ohio, U.S.
- Bear, F.E., 1964: Chemistry of the soil. (Reinhold Publishing Corp.). New York.
- Le Bell, J.C., 1978: Colloid chemical aspects of the "confined bentonite concept". (Kärnbränslesäkerhet). KBS-rapport 97. Stockholm.
- Durst, R.A., 1969: Ion-Selective Electrodes. Proceedings of a Symposium held at the National Bureau of Standards Gaithersbury, Maryland Jun 30-31, 1969. (National Bureau of Standards). Special Publication 314. Washington.
- Fagerström, H. & Lundahl, B., 1977: Hantering av buffertmaterial av bentonit och kvarts. (Kärnbränslesäkerhet). KBS teknisk rapport nr 37. Stockholm.
- Frissel, M.J. & Poelstra, P., 1964: A theoretical approach to the movement of Strontium through soils. Soil Science vol 98, sid 274-277.
- Geswein, A.J., 1975: Materials. In: Liners for land disposal sites: an assessment. (U.S. Environmental Protection Agency). sid 4-9. Cincinnati, Ohio.
- Grim, R.E., 1962: Applied Clay Mineralogy. (McGraw-Hill). New York.
- Hansbo, S. & Olsson, C., 1973: Geotekniska egenskaper hos natriumbentonit av typ Volclay. (Chalmers Tekniska Högskola, Inst. för geoteknik). Göteborg.
- Haxo, H.E., Jr., 1975: Assessing Synthetic and Admixed Materials for Lining Landfills. Proceedings, Research Symposium on Gas and Leachate from Landfills. (Rutgers University). New Brunswick, New Jersey.
- Heinemo, S.Å. & Brink, N., 1978: Utlakning ur kompost av sopor och slam. (Statens naturvårdsverk). SNV PM 1095. Solna.

- Hughes, H., 1975: Use of bentonite as a soil sealant for leachate control in sanitary landfills. (American Colloid Company). Engineering report.
- Jacobsson, A. & Pusch, R., 1978: Egenskaper hos bentonitbaserat buffertmaterial. (Kärnbränslesäkerhet). Teknisk rapport KBS 8. Stockholm.
- Jacksson, M.L., 1962: Soil Chemical Analysis. (T.G. Evans & Co. LTD). Watford.
- Jenkins & De Vries, 1967: Practical X-Ray spectrometry (N.V. Philips Gloeilampenfabrieken). Eindhoven.
- Johansen, O.J., 1976: Rensing av sigevann. (Prosjekt-komiteén for rensing av avløpsvann). PRA-rapport 16. Oslo.
- Karlqvist, L., Lindqvist, B. & Qvarfort, U., 1977: Bentonitens påverkan av olika joner. (Kvartärgeologiska avdelningen, Uppsala Universitet). Forskningsrapport nr 64.
- Mark AMA 72., 1972: (Byggandets samordning). Stockholm.
- Meijer, J.E.: Opublicerade resultat från projektet "Vattenförorening från avfallsupplag".
- Mielenz, R.C. & King, M.E., 1955: in: Clays and Clay Technology. (editors Pask, I. and Turner, M.). Proceedings of the first national conference on clays and clay technology. San Fransisco.
- Pask, I. & Turner, M., 1955: Clays and Clay Technology. Proceedings of the first national conference of clays and clay technology. San Fransisco.
- Persson, B.L. & Rylander, H., 1977: Recirkulation av lakvatten vid avfallsdeponering. (Inst. för teknisk vattenresurslära, Lunds tekniska högskola). Bulletin Serie VA nr 15.
- Pusch, R., 1978: Required physical and mechanical properties of buffer masses. (Kärnbränslesäkerhet). KBS, Teknisk rapport 33. Stockholm.

- Rose, A.W., 1974: The mode of occurrence of trace elements in soils and stream sediments applied to geotechnical exploration. Ur Geochemical exploration. sid 691-705. (ELSEVIER). New York.
- Seman, P.O.: Opublicerade resultat från projektet "Lakvattenspridning och lakvattenrening i mark och grund".
- Smith, R.H, 1976: Assessing clay as a landfill liner material. (Waste Age, 7:59-62).
- Statens Naturvårdsverk, 1974: Lokalisering av avfallsupplag - ur geologisk och hydrogeologisk synvinkel. SNV Publikationer 1974:24.
- Svenska Geotekniska Föreningens laboratoriekommitté, 1972: Permeabilitet och kapillaritet. (Statens Råd för Byggnadsforskning). Byggnadsforskningens informationsblad 37.
- Troedsson, T. & Nykvist, N., 1973: Marklära och markvård. (Almqvist & Wiksell). Stockholm.
- Vejde, O., 1962: Hur man räknar statistik. (Natur & Kultur). Stockholm.
- Wiklander, L., 1963: Den odlade markens kemiska egenskaper. Jord, gröda, djur. (LT:s förlag). Stockholm.
- Wiklander, L., 1975/76: The influence of Anions on Adsorption and Leaching of Cations in Soils. (Grundförbättring, 27, nr 4). sid 125-135. Uppsala.
- Williams, F.J., Neznyayko, M. & Weintritt, D.J., 1953: The effect of exchangeable bases on the colloidal properties of bentonite. (Journ. phys. chem.) 57.

Projektbeskrivning

BENTONITTÄTNING MOT LAKVATTEN - PROBLEMINVENTERINGTÄTNINGSMATERIALENS
TÄTHETSEGENSKAPER

- Bentonitkvalitet
- Inverkan av elektrolyt
- Jonbyteseffekter
- Metalladsorption
- Polymerbehandling - beständighet

TÄTNINGSMATERIALENS
GEOTEKNISKA EGENSKAPER

- Stabilitetskrav
- Kompressionsegenskaper
- Blandningsmetoder

DIMENSIONERINGSUNDERLAG
FÖR JORD-BENTONITBLANDN.

- Lämpliga jordarter
- Blandningsförhållanden
- Mäktighet-tjocklek

RUTINER FÖR FUNKTIONS-
KONTROLL

- Bentonitkvalitet
- Jordart
- Utförande
- Övervakning

BENTONITERSÄTTNINGS-
MATERIAL

- Inhemsk, glacial lera
- Inhemsk, svällande lera
- Aktiveringsmetoder



Forskningsprojekt "BENTONIT"

Bakgrund: I syfte att bedöma tätningsegenskaperna mot olika jonrika vatten hos natriumbentonit av fabrikat Volclay har en serie permeabilitetsmätningar kompletterade med kemiska analyser och röntgenstudier utförts. I undersökningen ingick även vissa studier i syfte att bedöma bentonitens åldringsegenskaper vid kontakt med jonrika vatten. Resultaten av denna undersökning finns redovisad i en forskningsrapport från Kvartärgeologiska avdelningen, Nr 64. Resultaten av ovan redovisade undersökning har också utgjort grunden för de fältförsök vilka påbörjats under hösten 1977. Detta innefattar byggandet av en lakvattenbassäng vid Hovgårdens avfallsverk i Uppsala (se bilaga).

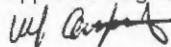
Projektplan: Studierna kommer att inriktas på fortsatta studier av olika joners påverkan på bentonit. Bland annat skall i testerna innefattas detaljstudier av olika förorenade vattens påverkan. Dessutom kommer temperaturens inverkan att studeras.

Studierna kan utföras enligt en nu utarbetad metodik innebärande en kombination av kemiska analyser, röntgenstudier och permeabilitetsmätningar. Dessa kommer eventuellt att kompletteras med vissa IR-undersökningar. Resultaten av undersökningarna kommer att ligga till grund för den bedömning som måste göras avseende bentonitens åldringseffekter, resulterande i ändrade egenskaper, vid kontakt med ett förorenat vatten.

I undersökningen kommer även att inrymmas vissa studier över de geologiska förutsättningar som måste vara uppfyllda för att bentonit skall tjäntgöra som ett fullgott tätande medium.

Kostnadsram: En ungefärlig kostnadsram för det ovan skisserade projektet kan uppskattas till cirka 30 000:-

Uppsala dag som ovan


Ulf Qvarfort


Lennart Karlqvist

MÖSSBAUER-SPEKTROGRAFISK UNDERSÖKNING AV BENTONIT

Två prover har undersökts med hjälp av s k Mössbauer spektrografi:

Gul Bentonit (Sabenil 650)
Na-bentonit (SLS-71)

Uppgiven halt järn (som wt-%Fe₂O₃) Sabenil 13,2
SLS-71 2,2

Mössbauerundersökningen kan endast ge upplysningar om järn, dess valens och koordination. Mössbauer spektra upptagna i rumstemperatur redovisas i figur 1. Absorptionslinjen vid ca +2,5 mm/s representerar Fe²⁺ (arean av denna absorptionslinje representerar halva arean för Fe²⁺). Den kraftiga absorptionen vid ca 0,0 mm/s representerar absorption från Fe³⁺ och är i stort sett proportionell mot halten av detta element.

Utvärdering av dessa spektra med dator ger:

Sabenil 650	90,2%	av järnet föreligger i <u>trevärd</u> form
	9,8%	<u>tvåvärd</u> form
SLS-71	62,5%	<u>trevärd</u> form
	37,5%	<u>tvåvärd</u> form

Järnet i de båda proverna är helt bundet till silikater: järnoxider (magnetit och hämatit) är ej närvarande i proven. Övriga Mössbauer parametrar indikerar att järnet i prov SLS-71 troligen är bundet i smektit medan järn troligen är bundet till mineralet vermeikulit i prov Sabenil 650.

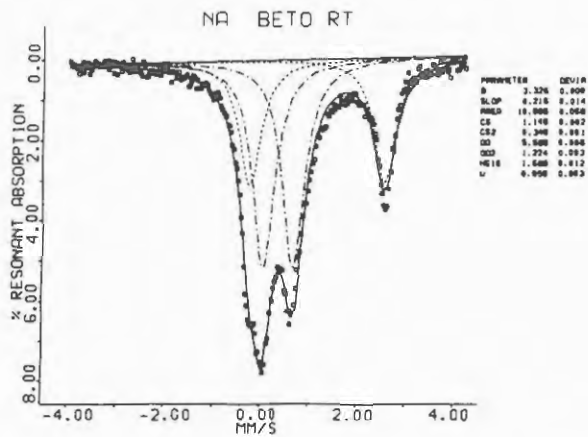
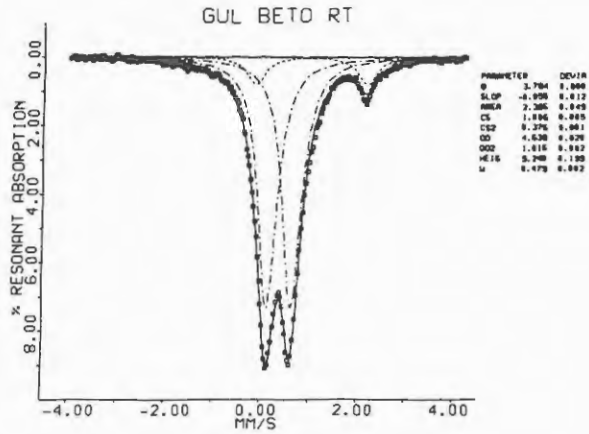


Fig 1. Mössbauer spektra för Sabenil 650 (GUL BETO RT) och SLS-71 (NA BETO RT).

LABORATORIEUNDERSÖKNING AV LERA ("LECA-LERA") FRÅN GÄRSTADLerproverna

De två lerorna som använts i fältförsöken och i permeabilitetstesten härrör från AB LECA's lertag i Gärstad utanför Linköping. Undersökningsmaterialet har hämtats med grävskopa och ur detta material har laboratorieproven tagits. Den ena leran är brun, ganska fast och kommer ifrån torrskorpeskiktet. Den andra leran är lös, gråblå och härrör ifrån djupare lager. Laboratorieproverna har genomgått följande analyser:

- Översiktlig lermineralanalys med hjälp av röntgendiffraktion - SGU, mineralkemiska avd.
- Vattenkvot, finlekstal och plasticitetsgräns - SGI laboratorium
- Ödometerförsök: kompressionsegenskaper och permeabilitet - SGI laboratorium.

Resultaten av lermineralanalysen redovisas i figur 1 och tabell 1.

Tabell 1. Resultat av utvärderingen av röntgendiffraktionsdiagram för torrskorpeleran och den lösa leran ("såpleran") med och utan elytenglykolbehandling. Provbehandlingen har omfattat uppslamning, sedimentering, filtrering över membranfilter och överföring på preparatglas. SGU, Ud 187.

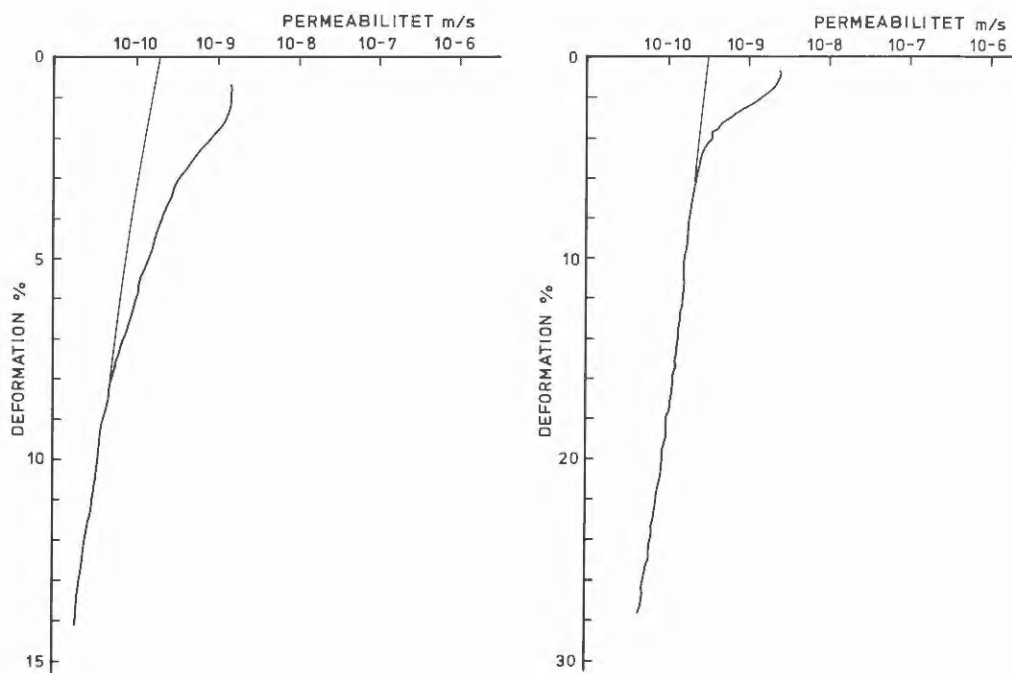
Såpleran består av illit, klorit och svällande blandskiktmineral. I blandskiktmineralen kan tillsammans med smektit såväl illit, klorit och vermikulit komponenter ingå. Halten blandskiktmineral bedöms vara mindre än illit- och klorithalten. Kaolinit ingår också, men i ännu mindre mängd.

Torrskorpeleran karakteriseras av ett svällande blandskiktmineral i vilket smektit är helt dominerande mineralkomponent. I naturligt lufttorrt tillstånd är mineralets skiktavstånd 14,6 Å som vidgas till 16,3 Å genom EG-behandling. Betydande mängd illit finns också i provet. I mindre mängd ingår kaolinit. Klorithalten är mycket låg, knappt detekterbar.

Resultaten av de fysikaliska undersökningarna framgår av figur 2 och tabell 2.

Tabell 2. Resultat av fysikaliska analyser av torrskorpelera och lös lera ("såplera").

Analys	Torrskorpelera				"Såplera"			
	Delprov 1	2	3	medel	Delprov 1	2	3	medel
Vattenkvot (%)	39	31	29	33	72	72	74	73
Finlekstal (%)	59	65	60	61	66	64	68	66
Plasticitetsgräns (%)	27	28	27	27	30	28	30	29
Permeabilitet (m/s) (se figur 2)	$3 \cdot 10^{-10}$				$2 \cdot 10^{-10}$			



Figur 2. Permeabiliteten för torrskorpelera och den lösa lera bestämd vid ödometerförsök.

RÖNTGENOGRAFISKA ANALYSER AV LAKVATTENEXPONERADE PROV

Röntgendiffraktion

För att konstatera en eventuell förändring av mineralkristallerna hos de olika proverna, dvs förändringar på atomär nivå, har diffraktionsmönstren för proverna före och efter lakvattenexponering tagits upp. Dessutom redovisas i tabell 1 prov från den bentonit (SLS-71) - sandblandning som legat i en lakvattenbassäng under 1 år.

Vid röntgendiffraktion bestrålas provet med monokromatisk strålning. Olika atomplan i kristaller ger därvid diffraktion i olika riktningar. Diffraktionsmönstret exponeras på film. Ur diffraktionslinjernas lägen på filmen kan avstånden mellan atomplanen i en viss kristalltyp beräknas. Dessa avstånd, d , och diffraktionslinjernas intensitet är karakteristiska för en viss kristallin struktur. Röntgendiffraktion används som "atomära fingeravtryck" bl a för att identifiera olika faser. Skillnaden mellan diffraktionsmönstren för de olika lakvattenbehandlade proverna jämfört med de obehandlade framgår av nedanstående sammanställning.

Obehandlade prov (noll-prov)	Lakvattenexponerade prov (förändring) (50 år)
SLS-71	något olika
Black-Hill	tydligt olika
Sabenil	ganska lika
Leca-lera	lika

Ett annorlunda diffraktionsmönster efter exponeringen kan innebära, att en ny kemisk förening har bildats av de anjoner och katjoner som anrikats vid omvandlingen. Jämför fluorescensspektren för SLS-71, Black-Hill och Sabenil (fig 1-4) före respektive efter exponering. En förändring av diffraktionsmönstret kan också uppkomma om de anrikade jonerna inlagras mellan skikten i de obehandlade proverna och bildar över-

strukturer. De preparatmängder som åtgår vid röntgen-diffraktion är obetydliga (mg/prov). Man kan därför ur ett större prov plocka ut och analysera en viss fas, även om den förekommer i obetydlig mängd.

Tabell 1 visar d-värdena för de tjugo starkaste diffraktionslinjerna av det mörka sulfidskiktet plockat ur sand-bentonitblandningen från Hovgårdens lakvattenbassäng. Intensiteten är ögonskattad. Betydligt fler svaga linjer förekommer. Diffraktionsmönstret tyder på att provet är flerfasigt. Dels förekommer starka linjer från sulfidfasen, dels svaga linjer som kan tyda på en omvandling av smektit till illit. Närmare utvärdering av diffraktionsmönstret är dock önskvärd för att klart kunna fastlägga vilka faser som ingår i provet. Av tid- och kostnadsskäl har dock ingen fullständig utvärdering kunnat göras.

Analysen visar att avvattningen av de lakade proverna följer samma mönster som för de obehandlade. Vissa smärre skillnader i skiktjockleken kan bero på en viss ändring av jonbesättningen mellan skikten efter lakningen. Skillnader i reaktionshastigheter kan också förekomma. På grund av resultatens överensstämmelse för obehandlade respektive lakade prover kan man dock dra den slutsatsen att några drastiska ändringar inte drabbat materialet vid lakningsprocessen.

En jämförelse mellan de olika material som studerats påvisar en stor likhet mellan SLS-71 och Black-Hill, även om den intrakristallina avvattningen tycks ske långsammare i det senaste fallet. I båda fallen sker avvattningen distinkt via en skiktjocklek av 19 Å (= tre vattenskikt) till ett 16 Å läge (= två vattenskikt) som tycks vara relativt stabilt (fortfarande kvar efter två timmars torkning).

Avvattningen av Sabenil-proverna sker däremot inte lika distinkt, vilket kan bero på att materialet har en mer komplex sammansättning, eventuellt med inslag

av "mixed-layer" komponenter (blandade skikt i kristallstrukturen).

Linje Nr	d (Å)	I
1	9.085	5
2	8.465	7
3	7.110	2
4	4.929	1
5	4.537	1
6	4.262	4
7	4.039	6
8	3.904	0
9	3.394	8
10	3.341	10
11	3.292	1
12	3.286	1
13	3.208	6
14	3.197	2
15	3.184	2
16	2.948	3
17	2.932	0
18	2.817	0
19	2.749	2
20	2.725	1

Tabell 1. Resultat av pulverröntgendiffraktion av sulfidskiktet i en sand-bentonitblandning som legat 1 år i en lakvattenbassäng.

d = skiktavstånd

I = intensitet (ögonskattad)

Kamera: G8 (CrK α_1)

Exponering: TXH 1,5 tim

Röntgenfluorescens

Av figurerna 1-5 kan man dra följande slutsatser:

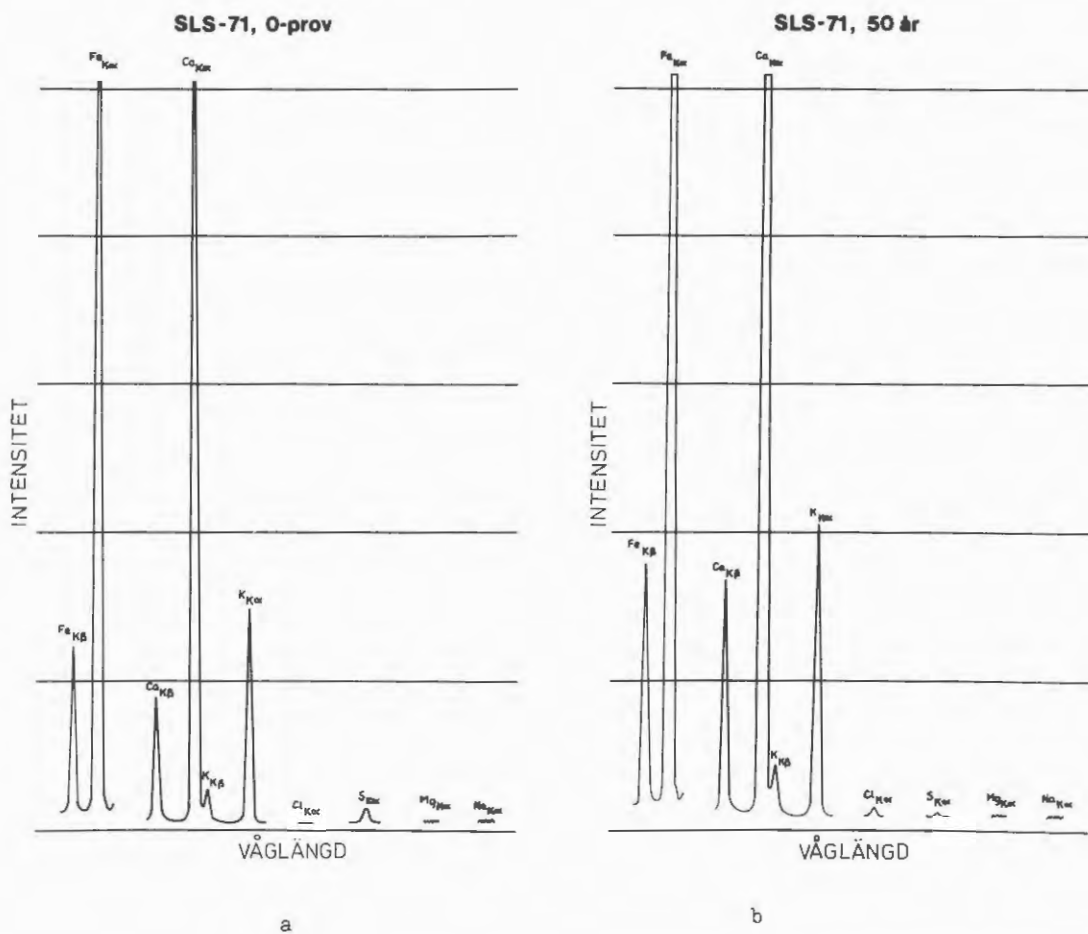
SLS-71: Tydlig ökning av Fe, Ca, K samt Cl i det lakvattenexponerade provet. Koncentrationen av S har däremot minskat vid behandlingen med lakvatten. För Mg och Na kan inga jämförelser göras, eftersom känsligheten avtar snabbt för lätta element (fig 1).

Black-Hill: Samma trend som för SLS-71 men betydligt större ökning av Ca, K och Cl i det behandlade provet (fig 2).

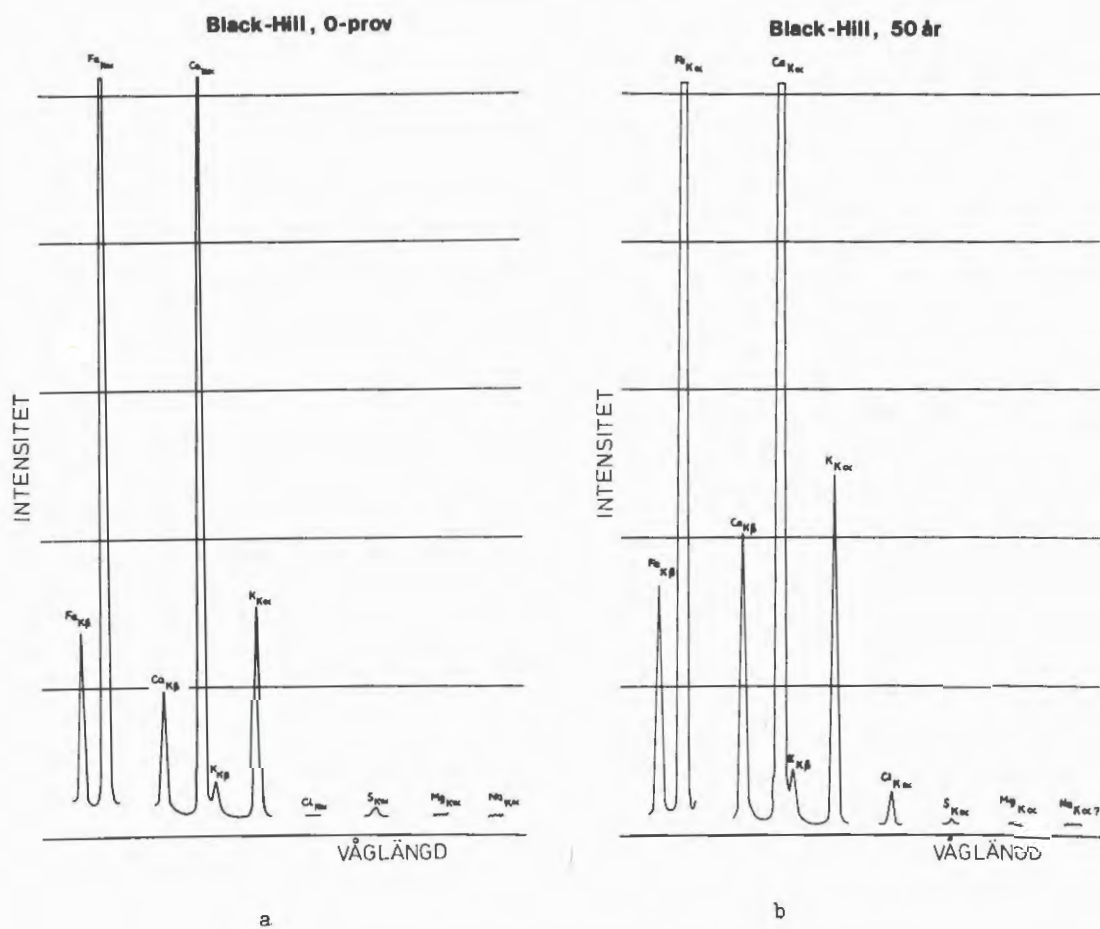
Sabenil: Samma trend som för SLS-71. Dock hög halt av Fe i både obehandlat och behandlat prov (fig 3).

Leca lera: Inga större förändringar mellan obehandlat och behandlat prov. Halten av K är dock mycket hög för båda proverna (fig 4).

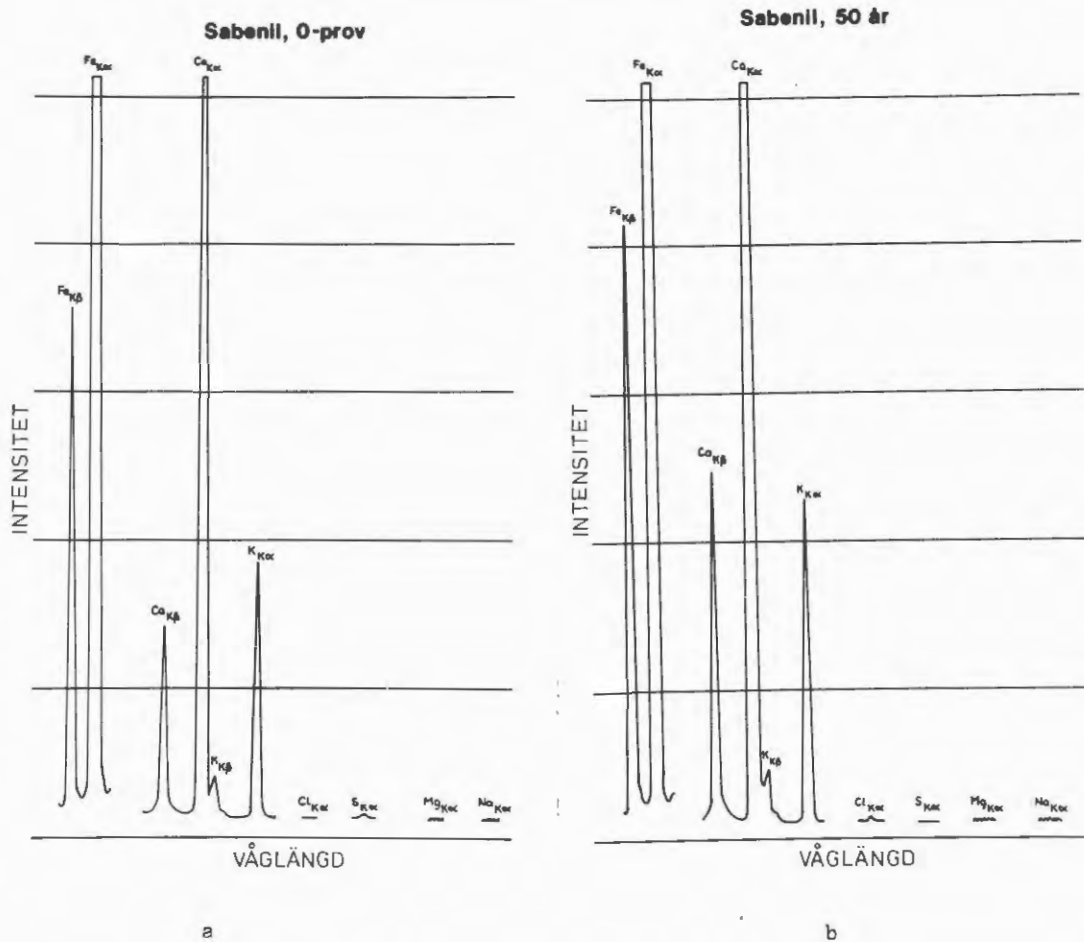
SLS-71 i full-skala (icke accelererat): Analys av SLS-71 efter att detta har exponerats för lakvatten i en damm i naturlig miljö under ett års tid visar ett liknande fluorescensspektrum som Leca lera. Detta kan dock vara orsakat av inblandad sand (fig 5).



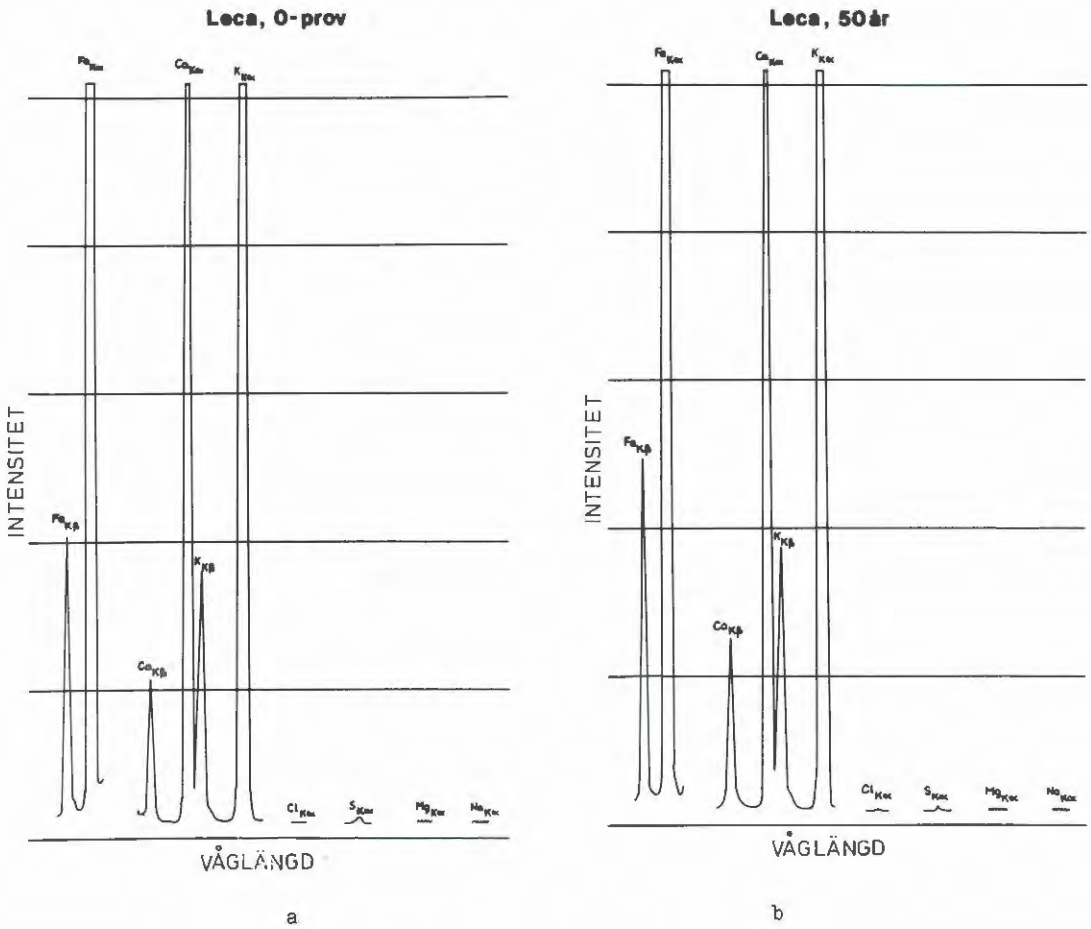
Figur 1. Jämförande analys av SLS-71. Röntgenfluorescens.
 a) 0-prov (obehandlat)
 b) 50 år (åldersomvandlat)



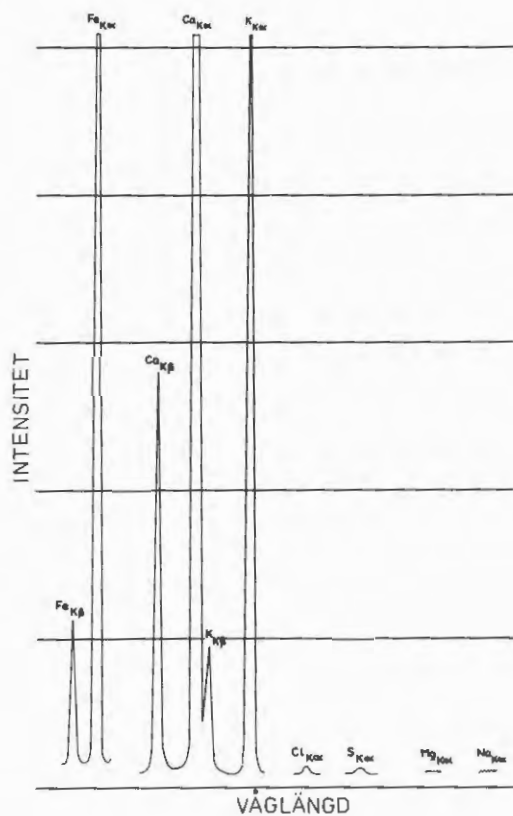
Figur 2. Jämförande analys av Black-Hill. Röntgenfluorescens.
 a) 0-prov (obehandlat)
 b) 50 år (åldersomvandlat)



Figur 3. Jämförande analys av Sabenil. Röntgenfluorescens.
 a) 0-prov (obehandlat)
 b) 50 år (åldersomvandlat)



Figur 4. Jämförande analys av Leca-lera. Röntgenfluorescens.
 a) 0-prov (obehandlat)
 b) 50 år (åldersomvandlat)



Figur 5. Analys av SLS-71 efter kontakt med lakvatten i naturlig miljö (1 år). Röntgenfluorescens.

PERMEABILITETSFÖRSÖK VID SGI

Triaxialapparat

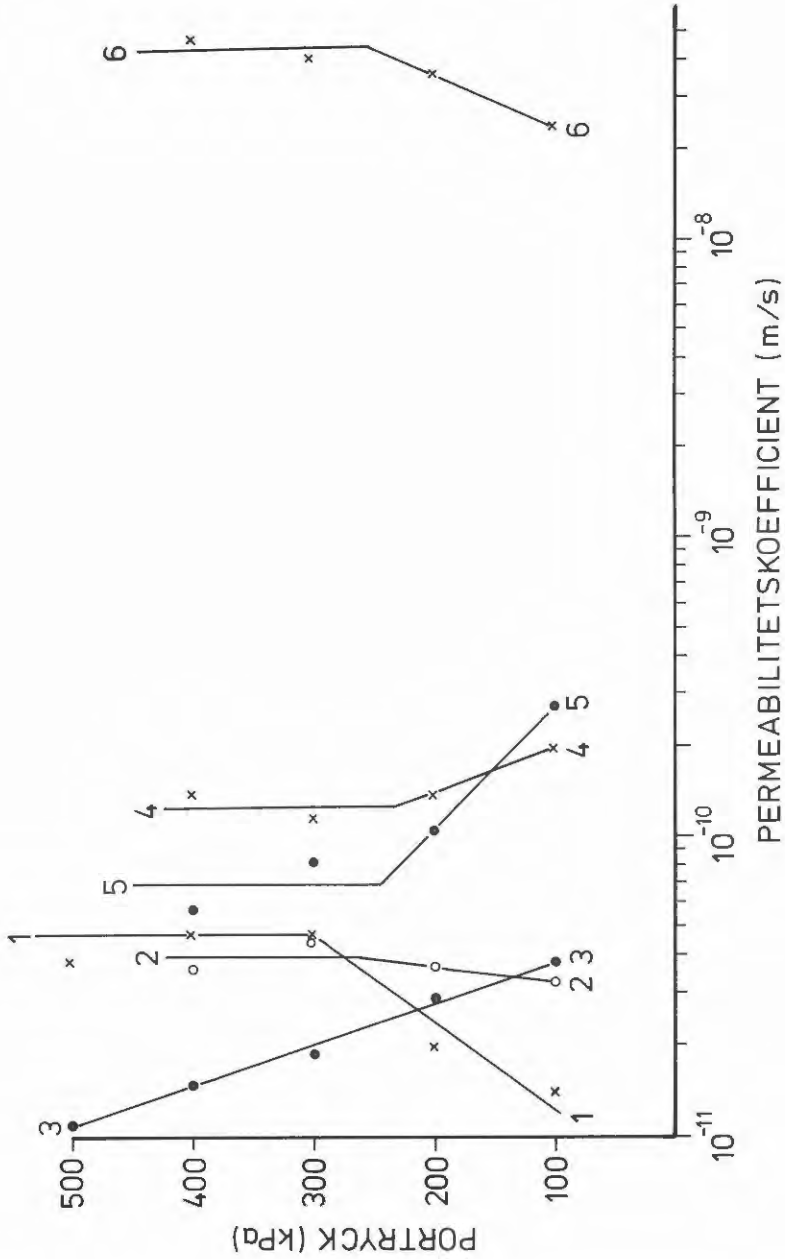
Fördelen med att använda en triaxialapparat vid permeabilitetsmätningar istället för t ex en konventionell permeameter är att inverkan av i provet infångad luft kan elimineras. Detta görs genom att porvattenstrycket ökas så mycket att tillgänglig luft i provet löses i porvätskan. Detta registreras genom att genomsläppligheten mäts under portrycksökningen. Permeabiliteten ökar nämligen i princip allteftersom luften löser sig i vattnet till dess att all luft är löst. Därefter bör genomsläppligheten vara konstant även om portrycket ökas. Genom ett samtidigt pålagt yttre tryck (celltrycket) förhindras volymförändringar i provet. Effektivspänningarna hålls hela tiden konstanta.

Av figur 1 framgår att det ovan skisserade förloppet inte alltid inträffar. I tre av de sex undersökta bentonitblandningarna tycks permeabiliteten öka med portrycket till omkring 250-300 kPa. I de tre övriga fallen minskar permeabiliteten istället. En antydning till stabilisering vid omkring 250 kPa finns dock i två av dessa fall. Permeabilitetsvärdena vid portrycket 300 kPa har därför använts i undersökningen. De stämmer väl överens med motsvarande värden erhållna vid mätningar i nippelpermeameter vid Uppsala Universitet.

Resultaten av permeabilitetsförsöken i de packade provytorna i fält redovisas i form av ett tid/avsänkingsdiagram i figur 2. Utvärderingen har skett med ekvationen:

$$K = \frac{\pi \cdot a^2}{A(t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

där a = rörradien och A representerar en formfaktor som valts till 5,5 efter Attewell & Farmer (1976).



Figur 1. Resultat av permeabilitetsbestämning i triaxial-apparat och den tolkade utvecklingen av permeabiliteten med ökat portryck.

1:	sand + 20%	bentonit SLS-71
2:	grovmo + 10%	" "
3:	grovmo + 15%	" "
4:	sand + 8%	" "
5:	sand + 15%	" "
6:	grovmo + 5%	" "

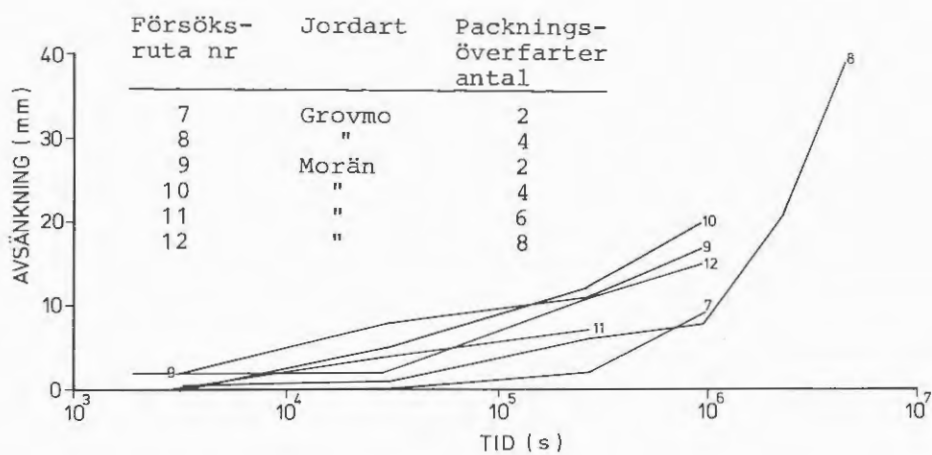
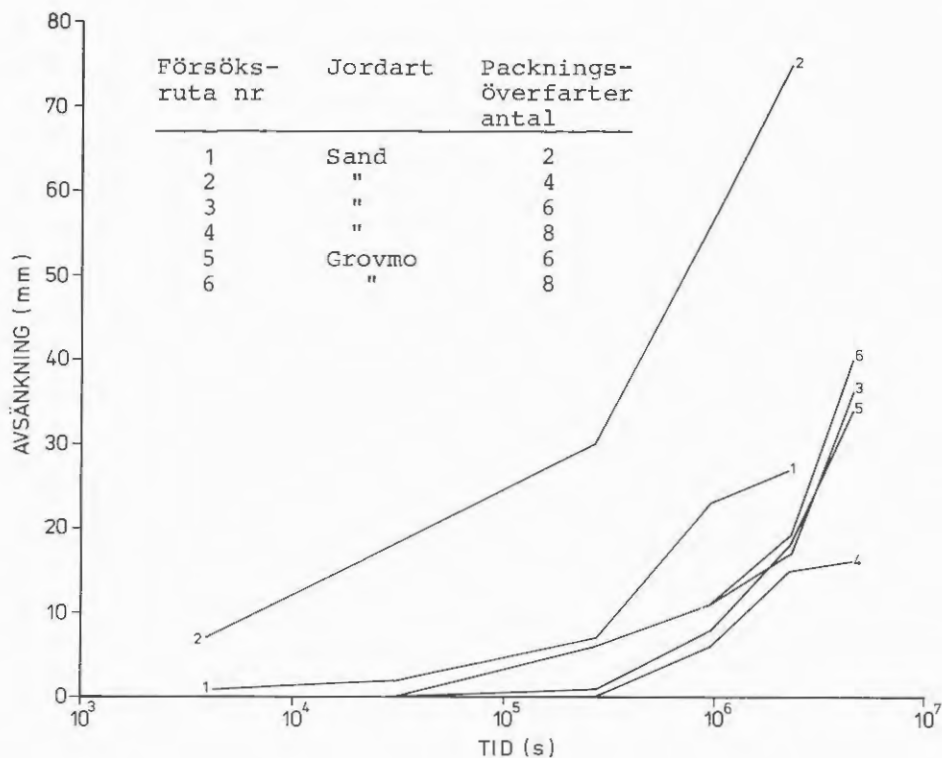


Fig 2. Resultat av permeabilitetsbestämning i packade provtytor i fält.

KOSTNADSBERÄKNINGAR

Tätningsskikt av blandad bentonit/jord

Kostnadsberäkningarna baseras på en å-prislista, tabell 1, som tagits fram efter konsultation av olika entreprenörs- och uthyrningsfirmor. Listan avser december månad 1978.

Tabell 1. Å-prislista för maskiner och arbetskraft som erfordras i samband med anläggning av tätningsskikt.

Arbetare		70:-/t		
Traktor m. förare		100:-/t		
Kultivator, liten		100:-/d		
Traktor-kultivator		200:-/d		
Lastbil 2-axlig		110:-/t		
Lastbil 3-axlig		130:-/t		
Bandtraktor m. förare		200:-/t		
Vibroplatta	100-150 kg		45:-/d ^x	
	300-350 kg		95:-/d ^x	
	450 kg		95:-/d	
	750 kg (fram & back)		120:-/d	
Vibro-vält	1,7 ton		190:-/d ^x	
	5-7 ton	6t =	650:-/d ^x	
	10 ton		880:-/d ^x	
	traktordriven		320:-/d ^x	
Betongblandare	90 l		20:-/d	
	120 l		30:-/d	
	140 l		15:-/d	
Sand osorterad			9-10:-/m ³	
sorterad	0-4		20-25:-/m ³	
	0-8		14-15:-/m ³	
Grovmo			8-9:-/m ³	
Grus Bärlager			16:-/m ³	
Lastning, transport & tippning	3:-	$\frac{\text{km}}{1,60}$		
Bentonit SLS-71	$\frac{15 \text{ m}^2}{45,60}$	$\frac{33 \text{ m}^2}{41,80}$	$\frac{100 \text{ m}^2}{39,70}$	$\frac{330 \text{ m}^2}{35,50}$
per m ² :	$\frac{1000 \text{ m}^2}{33,60}$	$\frac{3300 \text{ m}^2}{30,45}$	$\frac{10.000 \text{ m}^2}{29,40}$	
Vatten			0,05 kr/m ²	

^x = minst 3 dagar

Kvadratmeterkostnaden för ett tätningsskikt som anlagts med handhållna verktyg alternativt med en entreprenadmaskinpark och där blandning utförts på plats alternativt i betongblandare eller i en betongstation visas i tabell 2 och 3.

Tätningsskikt av obehandlad, inhemsk lera

Arbetsfördelning med 3 man:

1 man "hugger upp" leran i lagom stora klumpar

Kapacitet: $0,8 \text{ m}^3$ (= ca 4 m^2) per timme

1 man transporterar lera och grus till utläggningsplats med skottkärra.

Kapacitet: 2 m^3 per timme, t ex 1 m^3 av vardera lera och grus

1 man lägger ut lerklumpar och täpper till håligheter samt jämnar ut efter hand. Hjälper även till med "upphuggningen" och packningen.

Kapacitet: 8 m^2 per timme. 10-15 min av varje timme hjälper han till med upphuggningen utom de sista 1-2 timmarna av dagen då han sköter vibropackningen.

För alla tre åtgär ca 1 timme om dagen för rengöring.

Total kapacitet per arbetsdag: $7 \text{ tim} \times 5 \text{ m}^2 = 35 \text{ m}^2$.

Kostnader för lermaterialet:

Ca 18-20 kronor per m^3 inkl omlastning dumper-lastbil. Uppgiften har erhållits från en lertäkt i Skåne med särskilt finkornig (fet och tät) lera. Leran från schakter kan fås till betydligt lägre kostnader - priset varierar mycket. Dessutom tillkommer kostnad för rengöring av fordon efter avslutad körning motsvarande ca 2 timmars hyra.

Kostnadsberäkning:

(pris/m ²)	35 m ²	100 m ²	350 m ²	1000 m ²
Etablering	6,05	3,00	1,20	0,50
Lera inkl omlastn	4,00	4,00	4,00	4,00
Transp lera 10 km	2,00	2,00	2,00	2,00
Grus inkl 5 km trpt	5,40	5,40	5,40	5,40
Packningsredskap	1,50	0,50	0,30	0,20
Rengöring av fordon	6,95	2,30	0,70	0,45
Arbetskraft	50,90	50,90	50,90	50,90
Summa	76,95	68,10	64,50	63,45

Tabell 2. Kvadratmeterkostnaden för ett färdiganlagt tätningsskikt (0,15 m 21 kg bentonit SLS-71/m²)

KOSTNADSSLAG	BLANDNING PÅ PLATS "FÖR HAND"							MED ENTREPRENADMASKINPARK					
	15 m ²	33 m ²	100 m ²	330 m ²	1.000 m ²	3.300 m ²	10.000 m ²	100 m ²	330 m ²	1.000 m ²	3.300 m ²	10.000 m ²	33.000 m ²
Sand	5,35	3,20	3,20	3,20	3,15	3,10	3,00	3,20	3,20	3,15	3,10	3,00	3,00
Bentonit	45,60	41,80	39,70	35,50	33,60	30,45	29,40	39,70	35,50	33,60	30,45	29,40	28,35
Etablering	13,35	6,00	4,00	1,80	1,00	0,45	0,15	50,00	15,15	5,00	1,50	0,50	0,15
Kultivator (traktor)	10,00	4,55	1,50	0,50	0,15	0,10	0,10	2,00	0,60	0,50	0,40	0,30	0,30
Betongblandare	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vibro-platta	3,35	1,50	0,50	0,30	0,20	0,10	0,10	-	-	-	-	-	-
Vibro-vält	-	-	-	-	-	-	-	6,00	1,80	0,60	0,20	0,15	0,15
Vatten	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Bandtraktor med förare	-	-	-	-	-	-	-	2,00	0,60	0,40	0,25	0,20	0,20
Traktor med förare och gödningsspridare	-	-	-	-	-	-	-	^x 2,50	^x 0,60	0,40	0,20	0,15	0,15
Lastbil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Betongbil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arbetare 1 man	18,70	16,95						5,60	1,70				
2 man			11,20	6,80	1,10					1,10	0,60	0,35	0,35
3 man					3,35	3,05	2,85						
Extra trpt													
KOSTNAD, kr	96,40	74,05	59,65	48,15	42,60	37,45	35,65	110,55	59,50	44,80	36,75	34,10	32,70

^x egentligen ej genomförbart med maskiner

Tabell 3. Kvadratmeterkostnaden för ett färdiganlagt tätningsskikt (0,15 m 21 kg bentonit SLS-71/m²)

KOSTNADSSLAG	MED BETONGBLANDARE					BETONGSTATION 6 m ³			
	15 m ²	33 m ²	100 m ²	330 m ²	1.000 m ²	1.760 m ²	5.280 m ²	10.560 m ²	33.440 m ²
Sand	5,35	3,20	3,20	3,20	3,15	3,15	3,10	3,00	3,00
Bentonit	45,60	41,80	39,70	35,50	33,60	33,00	30,00	29,40	28,35
Etablering	13,35	6,05	4,00	1,80	1,00	1,70	0,95	0,75	0,65
Kultivator (traktor)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Betongblandare	2,00	1,35	1,05/ 1,40	1,05/ 1,40	1,05/ 1,40	9,00	9,00	9,00	9,00
Vibro-platta	3,35	1,50	0,50	0,30	0,20	-	-	-	-
Vibro-vält	-	-	-	-	-	0,35	0,15	0,05	0,05
Vatten	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Bandtraktor med förare	-	-	-	-	-	0,45	0,40	0,35	0,35
Traktor med förare	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lastbil	-	-	-	-	-	0,90	0,90	0,90	0,90
Betongbil	-	-	-	-	-	3,00	3,00	3,00	3,00
Arbetare 1 man	46,65		44,80/ 25,20						
2 man		50,90		44,10/ 23,75	41,40/ 22,95	1,40	0,95	0,85	0,80
3 man									
Extra trpt									
KOSTNAD, kr	116,35	104,85	93,30/ 74,00	86,00/ 66,00	80,45/ 62,35	53,00	48,50	47,35	46,15

Karlqvist, L., Sveriges Geologiska Undersökning
Qvarfort, U., Uppsala Universitet, Kvartärgeologiska
avdelningen

UPPFÖLJNING AV LÄCKAGET FRÅN EN TÄTAD LAKVATTENBASSÄNG
VID HOVGÅRDENS AVFALLSSTATION UNDER 12 MÅNADER.

En undersökning utförd på uppdrag av Ahlsell IR AB

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid.
REFERAT	1
MATERIAL OCH UTFÖRANDE	1
UNDERSÖKNINGAR	6
RESULTAT	7
SLUTSATSER	12

REFERAT

Bentonit (Volclay SLS 71) har under 12 månader testats som tätande material (20 kg/m^2 inblandat i sand), med avseende på förvaring av lakvatten. För att få ett mått på bentonitens genomsläpplighet (permeabilitet) har bassängen försetts med två tätskikt av bentonit med ett mellanliggande dränlager (fig.2). Genom ett dräneringsrör har det varit möjligt att få ett mått på det övre sand-bentonit-lagrets ("observationslagrets") permeabilitet samt att observera eventuella, större läckage.

I undersökningen har förutom permeabilitetsmätningar även innefattats studier av svällning, jonutbyte samt visuella observationer.

Resultatet av undersökningen visar att det använda sand-bentonit-lagret har mycket god täthet mot det använda lakvattnet. Inget har framkommit i undersökningen som visar, att det använda tätskiktet skulle förändras med avseende på tätande egenskaper vid kontakt med det använda lakvattnet. Vissa förhållanden tyder på att det kommer att ta cirka 20-25 år innan bentonit/lakvatten uppnått jonjämvikt.

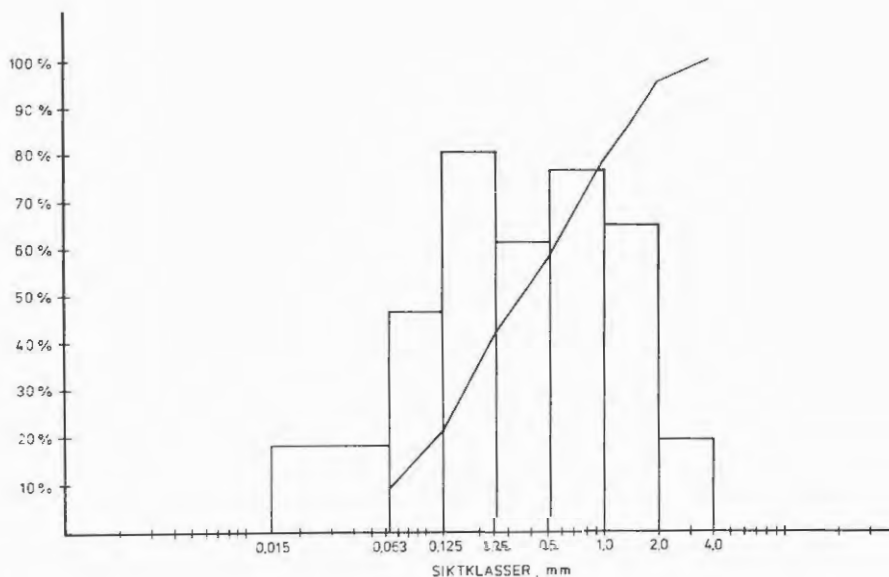
MATERIAL OCH UTFÖRANDE

Material

För projektet har en natrium-bentonit, Volclay SLS 71 använts. SLS 71 innehåller små mängder av ett vattenlösligt dispergeringsmedel, samt en vattenlöslig polymer. Laboratorieförsök har visat att detta tillsammans med bentonitens höga natriuminnehåll ger mycket goda tätande egenskaper och små förändringar vid kontakt med jonrika vatten. Vid fältförsöken har bentoniten blandats med en sand vars kornstorleksfördelning framgår av fig. 1.

Lakvatten för försöket har tagits från Hovgårdens deponeringsanläggning, Uppsala. En sammanställning över det vid Hovgården mottagna avfallet redovisas i

tabell 1. Ett årsmedelvärde av lakvattnets kemiska sammansättning redovisas i tabell 2. Lakvatten kan ha en mycket varierande sammansättning, beroende på bl a deponeringens form, exponering och områdets hydrometeorologi. Det är därför svårt att ange hur det lakvatten som använts är i förhållande till ett " normalt lakvatten ". Detta måste avgöras från fall till fall beroende på ingående joner av Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} m fl.



Figur 1. Kornstorleksfördelning för den använda sanden.

TABELL 1. Sammanställning över vid Hovgårdens deponeringsanläggning mottaget avfall år 1976.

<u>Kod</u>	<u>Avfallstyp</u>	<u>Mängd (ton)</u>
02	Industri- och byggnad	8062,64
03	Oljeblandad jord	1728,84
04	Plåt- och metallskrot	107,79
05	Ris, sädesavfall, salt, svinhår, sot och aska	651,69
06	Tegelskrot, stubbar, betong m m	13167,55
07	Rötslam	5193,50
08	Slam, övrigt	6715,50
09	Sten	1235,30
10	Täckmassor, jord och sopsand	12301,97
12	Övrigt	4150,41
	Summa	53315,19

TABELL 2. Hovgårdens årsprov 1977 (lakvatten)

Färg (eft.filtr.) Pt	mg/l	90
Spec.ledn.f. mS/m 25°C		455.0
Glödr.ber.av ledn.f.	mg/l	2855
pH		8.3
Kem.syref. COD	mg/l	176
Biok.syref.COD ₇	mg/l	8.7
Fosfatfosfor, P	mg/l	0.26
Total-fosfor, P	mg/l	0.42
Ammonium-kväve, N	mg/l	17.9
Nitrit-kväve, N	mg/l	0.08
Nitrat-kväve, N	mg/l	1.8
Kjeldahl-kväve, N	mg/l	22.2
Total-kväve	mg/l	24.1
Klorid, Cl	mg/l	1065
Sulfat, SO ₄	mg/l	270
Bikarbonat, HCO ₃	mg/l	355
Natrium, Na	mg/l	670
Kalium, K	mg/l	150
Magnesium, Mg	mg/l	41
Totalhårdh.ber.Ca	mg/l	194
Totalhårdh. tyska grader		27.2
Järn, Fe	mg/l	0.6
Mangan, Mn	mg/l	0.97

Utförande

En konisk grop med ca 1 m djup och ca 6 m i diameter urschaktades i befintliga tippmassor. Väggar och botten rensades för att få bort grovsoporna. Ett 15 cm tjockt sandlager lades ut varefter sanden blandades med bentonit (36 kg bentonit/m²) ned till ett djup om 5-10 cm. Över detta skikt lades ett singellager (ca 10 cm tjockt), vilket har fungerat som ett dränerande lager, figur 2.

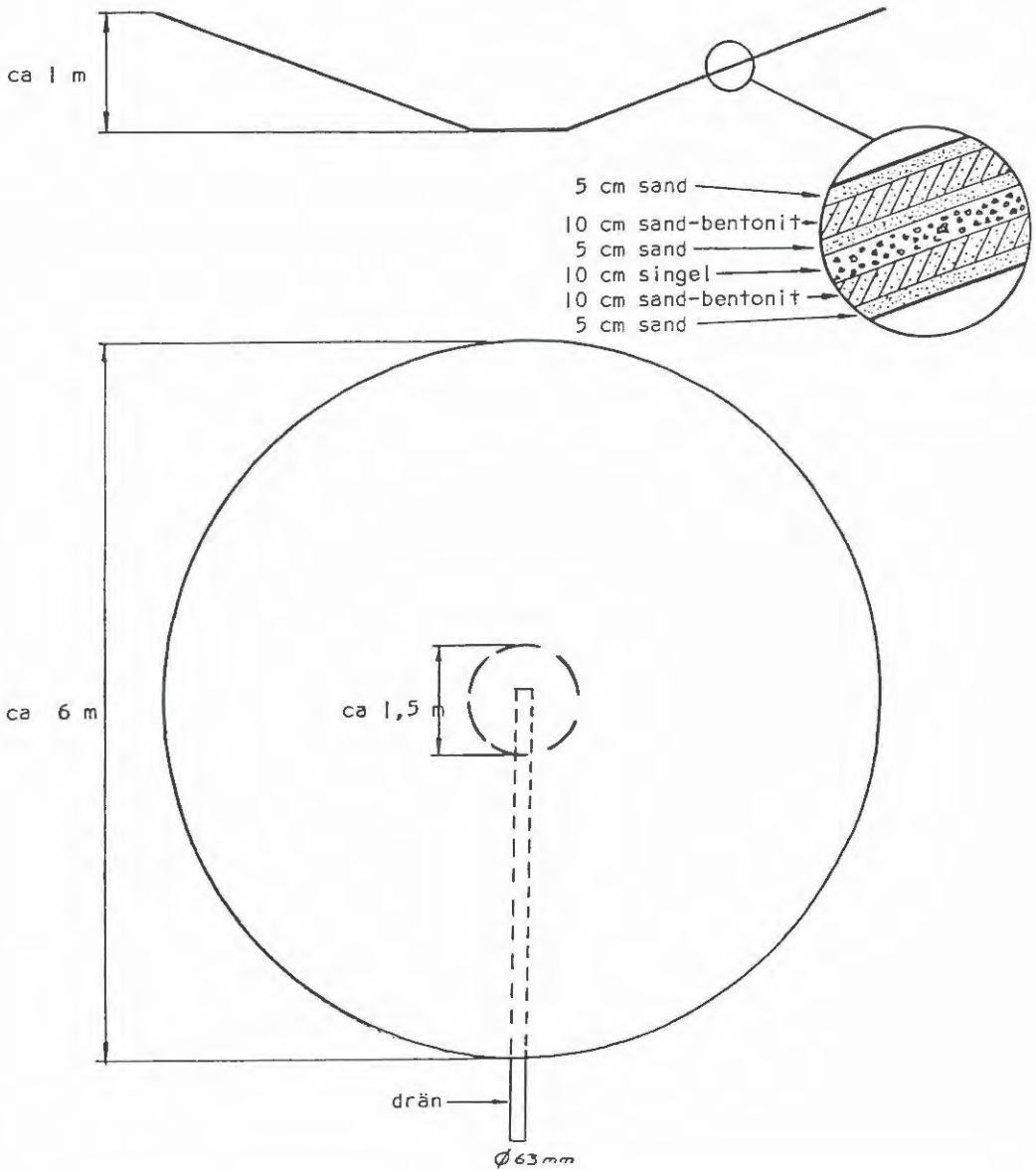
I singellagret placerades ett dräneringsrör (Ø 63). Med hjälp av en rund vibratorplatta packades sand-bentonitlagret. Denna packning utfördes således ovanpå singellagret, då slänterna ej kunde beträdas utan detta lager. Efter utförd packning kunde konstateras, att singellagret obetydligt trängt ner i sand-bentonitlagret.

Väggarna sprutades med färskvatten för att bentoniten skulle svälla. Vattenbegjutningen avbröts då vattenavrinning från väggarna visade att bentoniten var vattenmättad, därefter fick bentonitlagret hydratisera under två dagar för att dess stabilitet skulle öka. Ovanpå detta sand-bentonitlager utlades sedan ånyo ett ca 15 cm tjockt sandlager.

De översta 5-10 cm blandades med bentonit (ca 20 kg bentonit/m²) med hjälp av en liten jordfräs. Detta lager ("observationslagret") packades sedan med en vibratorplatta. Två typer av vibratorplattor provades - en med rektangulär platta (uppvikt bak- och framkant) och en med plan, cirkulär platta. Den med rektangulär platta visade sig vara den bästa. Med denna var det möjligt att arbeta från botten av bassängen, upp mot kanten. Detta innebar ett minimum av nedrasat material från väggarna. Efter utförd packning utlades ett sandlager (ca 5 cm) som erosionsskydd.

Bassängen fylldes sedan till bredden med färskvatten för att ge bentoniten goda hydratiseringsmöjligheter. Efter 5 dagar pumpades vattnet ur och bassängen fylldes med lakvatten.

Under året har vid fyra tillfällen halva lakvattenmängden i bassängen ersatts med "nytt lakvatten". Detta har gjorts för att undvika utspäningseffekter orsakade av nederbörden.



Figur 2. Lakvattenbassängens principiella uppbyggnad vid Hovgården.

UNDERSÖKNINGAR

Provtagning

Samtliga mätningar och provtagningar för analys av lakvattnet har utförts i dräneringsröret. Detta innebär att det provtagna lakvattnet passerat det övre sand-bentonitskiktet (se fig 2). Dessutom har provtagning utförts i sand-bentoniten dels före, dels efter att den varit i kontakt med lakvattnet. Denna provtagning har utförts med hjälp av plexiglasrör vilka trycks genom det övre sand-bentonitskiktet ned till dränlagret. Efter avslutad provtagning har "hålen" fyllts med en bentonitslurry. Ingen provtagning har utförts av det undre sand-bentonitskiktet. Orsaken till detta är att det mellanliggande dränlagret ej gick att penetrera med plexiglasrören. Eftersom bassängen fortsättningsvis skall användas har det ej ansetts nödvändigt att i detta skede utföra några mer omfattande borrhningar för att erhålla prov från det undre skiktet.

Analyser

Lakvattnets kemiska beskaffenhet studerades en gång per månad. Vattnet analyserades med konventionell metodik med avseende på pH, COD, $\text{PO}_4\text{-P}$, Total-P, Nitrit-N, Total-N, Kjellidal-N, Na^+ , K^+ och Ca^{2+} .

Permeabilitet

Vid provtagningstillfället för kemisk analys bestämdes även den vattenmängd som perkolerat genom tätskiktet. Denna mätning utfördes i dräneringsröret under ett dygn och anses ge ett ungefärligt mått på det övre sand-bentonitskiktets permeabilitet.

Svällningsförmåga

Bentoniten dels från bassängen, dels utanför denna har studerats med avseende på svällningsförmåga. Efter separering från sanden, torkning, har försöket utförts

som fri svällning i mätglas efter fyra dygn vid kontakt med dest. vatten. Svällningen anges som volymsförändring uttryckt i %.

Temperaturmätningar

Under försökets gång har vid några tillfällen temperaturmätningar utförts i deponeringsmassorna under bassängen.

Visuella observationer

De visuella observationerna har skett fortlöpande, varje vecka. I regel har de innefattat kontroll av eventuella förändringar i bassängen m m. Efter försökets slut fotograferades de upptagna sand-bentonitproven.

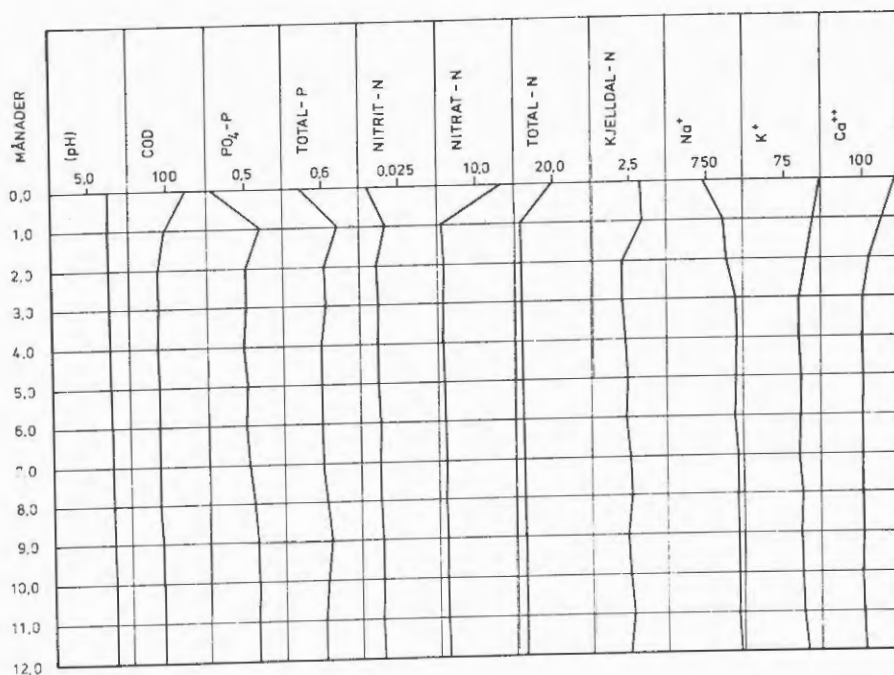
RESULTAT

Lakvattenkemi

Resultatet av analyserna finns redovisade i tabell 3 och figur 3. Av dessa framgår att ändringar i undersökta jonkoncentrationer inträffar i allmänhet under en tid av ca 2 månader. Beträffande natrium, kalium och kalcium sker dock ändringarna under ca 3 månader. Efter denna tidsperiod sker ingen påtaglig ökning eller minskning av respektive jonslag. Den minskning i halt COD, Nitrat-N, Total-N, Kjeldal-N, K^+ och Ca^{2+} som observerats härrör från filtrering och/eller jonutbyte i det övre bentonitlagret, medan den ökning som observerats i halt PO_4-P , Total-P, (Nitrit-N) och Na^+ dock härrör från bentoniten. De ändringar i nitrat och nitrithalt som observerats kan också indikera att det sker en nitrifikation i sand-bentonitskiktet vid lakvattnets perkolation genom detta.

TABELL 3. Resultat av lakvattenanalyser. Proven 1-12 har tagits i dräneringsröret, se fig. 1.
Samtliga halter i mg/l.

Prov	pH	COD	PO ₄ -P	Tot-P	Nitrit-N	Nitrat-N	Tot-N	Kjellidal-N	Na	K	Ca
0	7.6	150	0.07	0.22	0.005	16.9	20.1	3.2	690	145	185
1	7.5	95	0.69	0.70	0.016	1.1	3.1	3.3	1050	130	150
2	7.5	74	0.50	0.52	0.010	1.5	3.0	2.0	1110	115	114
3	7.5	75	0.50	0.53	0.011	1.4	2.9	1.9	1290	101	98
4	7.5	70	0.45	0.46	0.010	1.1	3.0	2.1	1300	100	95
5	7.6	73	0.50	0.45	0.010	1.3	3.0	2.2	1285	104	97
6	7.6	70	0.47	0.45	0.011	1.2	3.1	2.1	1255	102	95
7	7.5	70	0.50	0.45	0.010	1.4	3.4	2.3	1301	99	92
8	7.6	68	0.55	0.50	0.010	1.1	3.1	2.4	1284	104	95
9	7.5	75	0.60	0.55	0.011	1.3	3.4	2.1	1290	100	94
10	7.6	73	0.59	0.49	0.011	1.1	3.1	2.2	1280	102	90
11	7.6	74	0.58	0.45	0.010	1.2	2.9	2.4	1259	103	94
12	7.5	71	0.58	0.45	0.011	1.4	2.8	2.1	1300	110	97
Medel	7.5	79.8	0.51	0.48	0.010	2.46	4.3	2.3	1207	109	107
St.av.	0.052	22.1	0.15	0.10	0.002	4.3	4.7	0.4	174.1	13.8	28.2
Varians	0.68	27.7	28.9	21.8	21.9	176.3	108.0	18.6	14.4	12.7	26.3



Figur 3. Lakvattnets sammansättning efter passage genom "övre" bentonithorisonten".

Det är vidare troligt att ökningen av fotfathalten härrör från det dispergeringsmedel som tillsatts bentoniten (jfr kap Material och Utförande). Den ökningen av natriumhalten som observerats beror på det inbyte av kalium och kalcium som sker i bentoniten mot natrium vars koncentration således ökar i lakvattnet.

Påpekas bör, att den lakvattenmängd som passerar det övre sand-bentonitskiktet är cirka 2500 l/år. Om samma lakvattenmängd fortsättningsvis kommer att passera per år indikerar pågående laboratorieförsök att det kommer att ta 20-25 år innan bentonit-lakvatten är i jonjämvikt. Detta under förutsättning att bentonitens hela utbyteskapacitet utnyttjas och att lakvattnets jonsammansättning överensstämmer med det i försöket. Dvs i ett 0,1 m skikt av sand/bentonit (20 kg bentonit/ m²) med permeabiliteten 10⁻¹⁰ m/s kommer mängden vatten, som penetrerar 1 g bentonit under en 25-årsperiod samt vid en konstant vattenpelare av 1 m, att vara ca 40 ml.

Permeabilitet

Den vattenmängd som uppmätts i dräneringsröret motsvarar en permeabilitet för det övre sand-bentonitskiktet av $5-8 \times 10^{-10}$ m/sek. Detta innebär en passerad total lakvattenmängd av cirka $2.5 \text{ m}^3/\text{år}$. Inga markanta förändringar av flödet har noterats, utan permeabiliteten har under försökstiden varit inom det ovan redovisade intervallet.

TEMPERATURMÄTNINGAR

Under försöksperioden november 1977 till november 1978 har bassängen varit täckt av is ca 2 1/2 månad. Temperaturmätningar som utförts ca 40-50 cm ned i tippmassorna under bassängen visade på en temperatur av cirka $65-70^{\circ}\text{C}$ under försökets första månader. Denna temperatur var vid försökets slut cirka 45°C .

Svällning

Resultatet av svällningsförsöket redovisas i nedanstående tabell 4.

TABELL 4. Svällningsförsök utförda som fri svällning i mätglas med destillerat vatten.

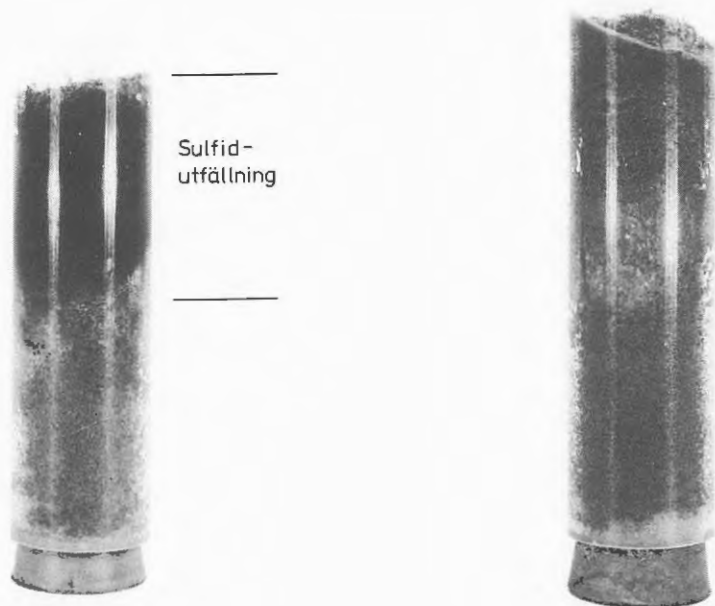
	<u>Svällningsökning i % efter 4 dygn</u>
"Obehandlad bentonit"	210
Bentonit från bassäng	207
Bentonit utanför bassäng	209

Av resultaten framgår att det inte föreligger några större skillnader. Svällningsegenskaperna hos de undersökta proven kan anses vara likvärdiga. De skillnader som redovisats ligger helt inom felmarginalen för använd försöksmetodik.

Visuella observationer

Under försökets slutskede har det observerats att det inom vissa partier i bassängen fläckvis förekommer bentonit "på botten". Detta kan indikera att bentoniten vandrar mot lakvattenfasen. En förklaring kan också vara att det med använd metodik ej gick att erhålla en fullständig blandning sand/bentonit. Det skulle i så fall finnas partier med högre bentonitkoncentration, vilket medför att bentoniten "sväller upp" genom det överliggande sandlagret. En annan orsak kan vara att bentoniten "ej svällt färdigt" när bassängen fylldes med lakvatten. Att ovan redovisade förhållande ej observerades tidigare beror på det obefintliga siktdjup som varit i bassängen. Vid kontroll av sand/bentonit i de upptagna plexiglasrören har det ej kunnat konstateras några skillnader i bentonitkoncentration. Vid förvaring av lakvatten i bassäng har ovan redovisade förhållande ej ansetts spela någon praktisk roll. Detta beror på att bentonitkoncentrationen alltid är konstant inom bassängen.

Vid försökets slut har det även observerats att det i det övre sand-bentonitskiktet bildats svarta utfällningar (se foto fig. 4). Dessa består troligen av sulfider och har orsakats av förekomsten av järn-, sulfatjoner och organiskt material i den reducerande miljö som råder i bassängen. Om dessa sulfidutfällningar har någon negativ effekt sett i ett längre tidsperspektiv har ej ännu utretts. En preliminär bedömning är att sulfiderna i sand-bentonitskiktet endast kan åstadkomma en negativ förändring om skiktet utsätts för oxidation, vilket innebär syrabildning. Om skiktet fortsättningsvis kommer att vara i en reducerande miljö, bör sulfiderna åstadkomma en permeabilitetsminskning.



Figur 4. Fotografi visande "sulfidutfällning" i sand-bentonitskiktet. Den vänstra cylindern innehåller sand/bentonit från bassängen och den högra sand/bentonit utanför bassängen.

SLUTSATSER

1. Bentonit, Volclay SLS 71, uppvisar goda tätande egenskaper vid kontakt med och förvaring av lakvatten, från Hovgårdens avfallsanläggning, Uppsala.
2. Under försökstiden, 12 månader, uppkom inga drastiska förändringar avseende permeabilitet, svällning och jonutbyte hos bentoniten.
3. Med hänsyn till bentonit-sandens låga permeabilitet, höga jonutbyteskapacitet (> 100 meq/100 g) och lakvattnets sammansättning beräknas jonjämvikten ej inträffa förrän efter 20-25 år. Detta förutsatt att bentonitens hela utbyteskapacitet utnyttjas.
4. Under försökets gång har ett svart "sulfidskikt" utbildats i sand-bentoniten. Dess effekt i ett längre tidsperspektiv är ej utrett.

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
Swedish Geotechnical Institute
S-581 01 Linköping
Tel: 013/11 51 00

Serien "Rapport" ersätter våra tidigare serier: "Proceedings (27 nr)", "Särtryck och Preliminära rapporter" (60 nr) samt "Meddelanden" (10 nr).

The series "Report" supersedes the previous series: "Proceedings" (27 Nos), "Reprints and Preliminary Reports" (60 Nos) and "Meddelanden" (10 Nos).

RAPPORT/REPORT

No.		År	Pris kr (Sw.crs)
1.	Grundvattensänkning till följd av tunnelsprängning. <i>P. Ahlberg, T. Lundgren</i>	1977	50:-
2.	Påhängskrafter på långa betongpålar. <i>L. Bjerin</i>	1977	50:-
3.	Methods for reducing undrained shear strength of soft clay. <i>K.V. Helenelund</i>	1977	30:-
4.	Basic behaviour of Scandinavian soft clays. <i>R. Larsson</i>	1977	40:-
5.	Snabba ödometerförsök. <i>R. Karlsson, L. Viberg</i>	1978	25:-
6.	Skredriskbedömningar med hjälp av elektromagnetisk fältstyrkemätning - provning av ny metod. <i>J. Inganäs</i>	1978	40:-
7.	Förebyggande av sättningar i ledningsgravar - en förstudie. <i>U. Bergdahl, R. Fogelström K.-G. Larsson, P. Liljekvist</i>	1979	40:-
8.	Grundläggningskostnadernas fördelning <i>B. Carlsson</i>	1979	25:-
9.	Horisontalarmerade fyllningar på lös jord. <i>J. Belfrage</i>	1981	50:-

RAPPORT/REPORT

No.		År	Pris kr (Sw.crs)
10.	Tuveskredet 1977-11-30. Inlägg om skredets orsaker.	1981	50:-
11a.	Tuveskredet geoteknik	1981	
11b.	Tuveskredet geologi	1981	50:-
11c.	Tuveskredet hydrogeologi	1981	40:-
12.	Drained behaviour of Swedish clays. <i>R. Larsson</i>	1981	50:-
13.	Long term consolidation beneath the test fills at Väsby, Sweden <i>Y.C.E. Chang</i>	1981	100:-
14.	Bentonittätning mot lakvatten. <i>T. Lundgren, L. Karlqvist, U. Qvarfort</i>	1982	60:-

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT

Besöksadr.: Olaus Magnus väg 35, LINKÖPING

Postadr.: 581 01 LINKÖPING, tel 013-115100