

ELFORSK



DAMMSÄKERHET

Bentonit i fyllningsdammar

Rapport 01:15

Bentonit i fyllningsdammar

Allmän beskrivning av bentonit, tidigare användning av bentonit i Sverige samt några synpunkter på blandningar av bentonit och jordar

Elforsk rapport 01:15

Bentonit i fyllningsdammar

Allmän beskrivning av bentonit, tidigare användning av bentonit i Sverige samt några synpunkter på blandningar av bentonit och jordar

Elforsk rapport 01:15

**Tomas Ekström, Sycon Energikonsult AB
Roland Pusch, Geodevelopment AB**

Sammanfattning

Bentonit, uppkallad efter fyndorten Fort Benton i Montana i USA, är en mjuk, plastisk och ljus färgad lera. Leran består huvudsakligen av kristallin lermineral hörande till smektitgruppen, vilken består av aluminiumsilikater med järn, magnesium och antingen kalk eller natrium. Det finns två olika typer av bentonit, Natriumbentonit och kalciumbentonit. Natriumbentonit utmärks framförallt genom att den under upptagande av vatten sväller till många gånger sin ursprungliga volym. Den hydrauliska konduktiviteten beror liksom svälltrycket på bentonitens densitet och på porvattenkemi. Högre densitet och elektrolytfattigt, genomströmmande vatten ger en tätare bentonit med högre svälltryck. Vid användning av bentonit ihop med cementbruk eller stål, så sker en kemisk interaktion, vilket kan försämrade blandningens egenskaper.

I Sverige har bentonit använts i slitsmurar och tätskärmar, varvid en slurry av bentonit och vatten eller en slurry av cement, bentonit och vatten har utgjort en stödvätska under grävandet av en slits i marken. Vid låg cementinblandning har denna slurryvägg enbart haft en tätande funktion, varvid slurryn bildat en tätande, plastisk kropp som förmår följa markens eventuella rörelser. Vid stor cementinblandning har slurryväggen fått både en tätande och en bärande funktion, men väggen är i detta fall också sprödare.

Bentonit har även använts i injekteringsbruk för tätning av sprickor eller hålrum i jord eller berg, t.ex. i dammar eller runt tunnlar. Bentoniten förbättrar sammanhållningen i bruket under tillverkning, transport och applicering. Bentonitinblandning i cementbruk används mest för tätning av större sprickor och håligheter.

För återfyllning av schakt vid djupförvaring av kärnkraftavfall planeras att användas bentonit för att tillsammans med utsprängda bergmassor utgöra en tätning mot grundvatten och att utgöra ett stöd för schaktväggarna. Konceptet att blanda bentonit och andra jordar eller krossat berg kan vara en möjlig användning även för dammar. Nya bestämmelser eller nya önskade högre säkerhetsmarginaler kan föra med sig att tätkärnor i fyllningsdammarna kan behöva höjas eller förstärkas. Tätkärnor kan också behöva repareras på grund av beständighetsskada eller olycksskada. Ibland kan det vara svårt att finna lämpligt tätkärnematerial till fyllningsdammarna inom rimliga avstånd. Ett alternativ kan då vara att använda ett mer lättillgängligt, men kanske mer vattengenomsläppligt, jordmaterial och blanda in en viss mängd bentonit i detta. Om en sådan blandning av bentonit och annat material skall användas i tätkärnor är det viktigt att (i) bentonit och det andra jordmaterialet blandas, appliceras och packas innan vatten tillförs och (ii) blandningen skall inte packas så att ett för stort svälltryck uppstår med avseende på effektivtrycket på aktuell nivå i dammen.

Summary

Bentonite, named for Fort Benton in Montana in USA, is a soft, plastic and light coloured clay. Bentonite consists chiefly of crystalline clay minerals belonging to the smectite group, which are hydrous aluminum silicates containing iron and magnesium as well as either sodium or calcium. Two types of bentonite are recognized, and the uses of each depend on specific physical properties.

Sodium bentonites absorb large quantities of water, swelling to many times their original volume, and give rise to permanent suspensions of gellike masses. These have been used to seal dams; as drilling muds; in portland cements and concrete, ceramics, emulsions, insecticides, soaps, pharmaceuticals, and paints; in the manufacture of paper; for clarifying water, juices, and liquors; and as a water softener to remove calcium from hard water. Calcium bentonites are nonswelling and break down to a finely granular aggregate that is widely used as an absorbent clay sometimes called fuller's [55].

In Sweden bentonite has been used in slurry-trenches, where the slurry of bentonite and water, or bentonite, cement and water, has stabilized the walls of the trench during excavation. At low content of cement, the trench has only a tightening function, but with higher content of cement, the trench has also a load-bearing function. With a low content of cement, the trench is weak and follows the movements of the ground. With higher content of cement, the trench becomes more brittle.

Bentonite has also been used in Sweden in grouts of cement and bentonite, for injection in larger cracks or cavities in earth or rock, e.g. fill dams and around tunnels. Bentonite prevents separation of the grout during the mixing and injection.

Bentonite is also planned to be used in mixes with crushed rocks in deposits of nuclear waste in the rock ground. This mix of bentonite and crushed rocks shall prevent leakage of ground water and it shall also stabilize the walls of the shafts in the deposit. The same idea of mixing bentonite with earth or crushed rocks, could be useful also for fill dams. When the core of a fill dam shall be built, repaired or raised, and when it is hard to find natural core material, such a mix of bentonite and a less suitable material can perhaps be used. If mixes of bentonite and another earth material shall be used, it is important that (i) the bentonite and the earth material is mixed, placed and packed before any water is added and (ii) the swelling pressure must not be larger than the effective stresses.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	1
1.1	BAKGRUND.....	1
1.2	MÅL	1
1.3	AVGRÄNSNINGAR.....	1
2	BENTONIT	2
2.1	ALLMÄNT.....	2
2.2	FYSIKALISKA EGENSKAPER HOS KOMMERSELT TILLGÄNGLIG BENTONIT	2
2.3	BESTÄNDIGHET	5
3	FYLLNINGSDAMMAR	8
3.1	UPPBYGGNAD	8
3.2	VANLIGA SKADOR.....	11
4	TIDIGARE ANVÄNDNING AV BENTONIT I SVERIGE	13
4.1	SLURRYVÄGGAR AV BENTONIT OCH CEMENT	13
4.2	INJEKTERING MED BENTONIT OCH CEMENT I FYLLNINGSDAMMAR	16
4.3	INJEKTERING MED BENTONIT OCH CEMENT I BETONGDAMMAR	22
4.4	BENTONITMATTOR	24
4.5	KÄRNKRAFTAVFALL I BERGGRUNDEN	25
5	SYNPUNKTER PÅ BLANDNINGAR AV BENTONIT OCH JORD AVSEDDA FÖR ANVÄNDNING I TÄTKÄRNOR I FYLLNINGSDAMMAR	35
5.1	INLEDNING	35
5.2	ANVÄNDNINGSSOMRÅDEN.....	35
5.3	KRAV PÅ EN FYLLNINGSDAMM.....	36
5.4	DELMATERIAL	36
5.5	UTFÖRANDE AV JORD-BENTONITBLANDNINGAR I FYLLNINGSDAMM	39
6	BEHOV AV FORSKNING OCH KOMPLETTERANDE UTREDNINGAR.....	46
7	EKONOMI.....	47
8	REFERENSER.....	48

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Bentonit har genom sin förmåga att svälla och täta samt att förbättra sammanhållningen i cementbruk (kapitel 2) använts i en rad tillämpningar inom byggnadsområdet, t.ex. i slitsmurar och tätskärmar samt i injekteringsbruk i t.ex. fyllnings- och betongdammar (kapitel 4).

Ett annat användningsområde inom dammområdet kan eventuellt vara att blanda in bentonit med annat material för användning i tätkärnor (kapitel 5). Nya bestämmelser eller nya önskade högre säkerhetsmarginaler kan föra med sig att tätkärnor i fyllningsdammar kan behöva höjas. Tätkärnor kan också behöva repareras på grund av beständighetsskada eller olycksskada. Ibland kan det vara svårt att finna lämpligt tätkärnematerial till fyllningsdammar inom rimliga avstånd. Ett alternativ kan då vara att använda ett mer lättillgängligt, men kanske mer vattengenomsläppligt, jordmaterial och blanda in en viss mängd bentonit i detta. Vid akut skada i fyllningsdamm kan man få snabbt accelererande vattenläckage och porvattentryck. Att använda bentonit kan då vara ett sätt att snabbt applicera och få in ett tätande material i tätkärnan eller strax framför.

1.2 Mål

Syftet med rapporten är att sammanställa vad som gjorts i Sverige rörande bentonitanvändning i geotekniska konstruktioner samt att titta på möjligheten att använda bentonitinblandning i fyllningsdammar vid tätkärnehöjning, vid reparation av tätkärnor eller för tillfällig tätning vid skada i fyllningsdammar.

1.3 Avgränsningar

De reparationer av svenska fyllningsdammar som beskrivs är från de senaste 20 åren.

2 Bentonit

2.1 Allmänt

Bentonit är samlingsnamnet för expanderande leror av vulkaniskt ursprung och vittringsprodukter av fältspat- eller tungmineralrik berggrund. Den svällande komponenten är smektit, en grupp av glimmerlika skiktgittermineral med stark förmåga att binda positivt laddade joner och vatten mellan de lameller som bygger upp partiklarna [34]. Bentoniter förekommer rikligt över hela jorden och exploateras i stor skala i bl a nordamerika, sydeuropa och Japan. Den huvudsakliga användningen är inom gjutindustrin och oljeindustrin samt inom industrimineralområdet där pelletisering av djurfoder och järnmalm är särskilt viktiga i Sverige. I byggnadssammanhang används bentonit t.ex. i fogband, i slitsmurar och tätskärmar, i injekteringsbruk och i bentonitmattor.

De egentliga bentoniterna, dvs de smektitrika leror som bildats genom spontan omvandling av glaskomponenten i vulkanisk aska som sedimenterat i havet, har vanligen natrium som adsorberad katjon och det är fallet med de nordamerikanska bentoniterna. Natriumbentonit utmärks framförallt genom att den under upptagande av vatten sväller till många gånger sin ursprungliga volym. De flesta europeiska bentoniterna, såsom de italienska, spanska och grekiska, har avsatts i kalkrik miljö och har därför kalcium som dominerande adsorberad jon. Eftersom natriumbentonit binder mer vatten än kalciumvarianten vid en och samma densitet och därför har större svällnings- och gelbildningsförmåga och därmed lägre genomsläpplighet är den förstnämnda mest efterfrågad och det har inneburit att de amerikanska bentoniterna dominerat marknaden. Deras stigande priser har gjort de europeiska mer attraktiva men de kräver sodabehandling för att övergå till natriumtillstånd. Behandlingen ger lermaterialet praktiskt taget lika goda egenskaper som naturliga natriumbentoniter men ett visst överskott av kalciumkarbonat kvarstår som innebär att natriumövergången inte blir höggradig. I Sverige förekommer bentonit på flera ställen som tunna lager i kambrosiluriska bergarter. Den mäktigaste kända fyndet är ett ca 1.8 m tjockt lager i Kinnekulle i Västergötland.

2.2 Fysikaliska egenskaper hos kommersiellt tillgänglig bentonit

2.2.1 *Hydrauliska egenskaper*

Hydraulisk konduktivitet

De egenskaper som bestämmer bentonitbaserade materials hydrauliska egenskaper, dvs genomsläpplighet och erosionsresistens är:

- Densitet
- Densitetsvariationer
- Porvattenkemi

När det gäller genomsläpplighet finner man av tabell 2-1 att den är mycket låg vid genomströmning av lera med elektrolytfattigt vatten också vid mycket låg densitet, medan genomströmning med vatten med hög elektrolythalt eller med dominerande innehåll av flervärda katjoner ($> E4 \text{ ppm} = 1\%$) kan ge en million gånger högre genomsläpplighet. Skillnaden beror på att lerstrukturen är mycket homogen vid låg salthalt medan den koagulerar och får stora kontinuerliga porer med hög genomsläpplighet som följd vid hög salthalt.

Tabell 2-1 Hydraulisk konduktivitet (K) hos smektitisk lera (MX-80) med 70-80 % montmorillonit [34]. Det första värdet representerar porvatten med lågt elektrolytinnehåll (sött eller svagt bräckt vatten) medan det andra svarar mot vatten med en salthalt motsvarande oceanvatten (Na resp Ca).

Lermaterial	Densitet, kg/m^3	K, m/s
Na bentonit	1400	2E-11/E-5
Na bentonit	1600	3E-12/5E-10
Na bentonit	1800	4E-13/4E-12
Na bentonit	2000	4E-14/E-13
Ca bentonit	1400	E-6/ $>E-5$
Ca bentonit	1600	5E-10/E-7
Ca bentonit	1800	4E-13/4E-12
Ca bentonit	2000	2E-13/4E-13

pH och organiska ämnen kan ha en konduktivitetshöjande inverkan. Lågt pH, som t ex kan vara orsakat av myrvatten eller genom att vattnet strömmat genom sulfidhaltigt berg, ger upphov till gitternedbrytning genom frigörelse av aluminium och därmed förhöjd genomsläpplighet och vissa organiska ämnen kan ge kollaps hos smektitgelen i jordarten med samma resultat.

Erosionsresistens

Genomströmning av bentonitbaserade tätningar kan ge erosion och uttransport av frigjorda partiklar. I fullständigt dispergerat skick är den enskilda partiklens storlek mindre än ungefär 0.3 mikrometer men i praktiken är partiklarna aggregerade och det är därför större enheter som kan lossna och transporteras bort. Enligt nyligen genomförda studier för SKB av typiskt smektitrikt lermaterial har de en storlek av ca 20-50 mikrometer i elektrolytfattigt vatten [35].

Erosionsrisken bestäms av vattenströmningshastigheten, som är en funktion av den hydrauliska gradienten och av hydrauliska konduktiviteten hos lerkomponenten. Den kritiska strömningshastigheten för att lösgöra lerpartiklar med storleken 20-50 mikrometer kan uppskattas till ca E-5 m/s medan mindre aggregat möjligen kan lösgöras vid hastigheter ned till E-6 m/s. Den sistnämnda hastigheten uppnås enligt Darcys lag om den hydrauliska gradienten som verkar över ett lerlager med medelkonduktiviteten E-8 m/s är lika med 100. Det motsvarar i en dammkärna med 10 m tjocklek ett tryckfall av 100 meter. Med krav på erforderlig säkerhetsmarginal måste man alltså för höga

dammar beakta filterkriterier vid granulometrisk sammansättning hos bentonitbaserade tät kärnor.

2.2.2 Svällningstryck

Svällningstrycket är liktydigt med effektivtrycket hos bentonitmaterial och det måste alltid, med erforderlig säkerhetsmarginal, underskrida det av överlast, sidostöd mm utövade effektivtrycket. Det betyder t ex att en dammkärna inte kan bestå av ren bentonit med hög densitet.

Svällningstrycket bestäms liksom den hydrauliska konduktiviteten av:

- Densitet
- Densitetsvariationer
- Porvattenkemi

Svällningstrycket är enligt Tabell 2-2 lågt men klart mätbart vid mättnad med elektrolytfattigt vatten också vid mycket låg densitet, medan mättnad med vatten med hög elektrolythalt (> E4 ppm) eller vatten dominerat av flervärda katjoner kan ge total förlust av svällningstrycket. Skillnaden beror på att lerstrukturen är mycket homogen vid låg salthalt medan den koagulerar och krymper med uppkomst av stora porer vid hög salthalt. Mättnad med kalciumrikt vatten ger den kraftigaste minskningen av svällningstrycket och det har betydelse då bentonit är i kontakt med betong vars innehåll av lösligt portlandit ger tillgång till kalciumjoner.

Betydelsen av svällningstrycket illustreras av att de övre delarna av en tät kärna kan ha ett effektivtryck orsakat av överliggande jord av ca 200 kPa vilket underskrider svällningstrycket redan vid en densitet i vattenmättat tillstånd hos bentonitkomponenten av ca 1500 kg/m³ då den genomströmmas av älvvatten. Packar man in ren bentonit till högre densitet sker svällning tills tryckjämvikt utbildas och det kan ge stora och ojämna deformationer (jfr Tabell 2-2).

Tabell 2-2 Svällningstrycket hos smektitisk lera med med 70-80 % montmorillonit [34]. Det första värdet representerar porvatten med lågt elektrolytnehåll (sött och svagt bräckt vatten) medan det andra svarar mot vatten med en salthalt motsvarande oceanvatten (Na resp Ca).

Dominerande katjon	Densitet, kg/m ³	Svälltryck, p_s , kPa	
		sött vatten	salt vatten
Na	1400	100	0
Na	1600	300	40
Na	1800	800	300
Na	2000	4000	4000
Ca	1400	0	0
Ca	1600	20	0
Ca	1800	500	200
Ca	2000	4000	4000

2.3 Beständighet

2.3.1 Bentonits kemiska stabilitet

Kemiskt betingade förändringar hos de smektitmineral som utgör den fysikaliskt aktiva tätningskomponenten i bentonit är främst temperaturberoende. Nedbrytande processer är spontan lösning och omvandling till icke-expanderande mineral. Kemisk reaktion mellan smektitmineral och cement leder också till nedbrytning och reaktion mellan mineral och stål skapar reaktionsprodukter som ändrar de fysikaliska egenskaperna genom att åstadkomma cementering.

Medan älv- och reservoarvatten har låg temperatur kommer grundvattnet i hetvattenmagasin eller slutförvar för högaktivt avfall i berg att ha en temperatur som kan gå upp till 100°C, vilket innebär att bentonittätningar får begränsad livslängd vid de sistnämnda tillämpningarna men inte i dammar.

Man kan använda en termodynamisk modell för beräkning av degraderingsförloppet från 100 % smektit (S) till icke-svällande illit (I) enligt följande :

$$-dS/dt = [Ae^{-U/RT(t)}] [(K^+/Na^+)mS^n] \quad (1)$$

där:

S = Mol-andelen av smektit i omvandlingsprodukten I/S

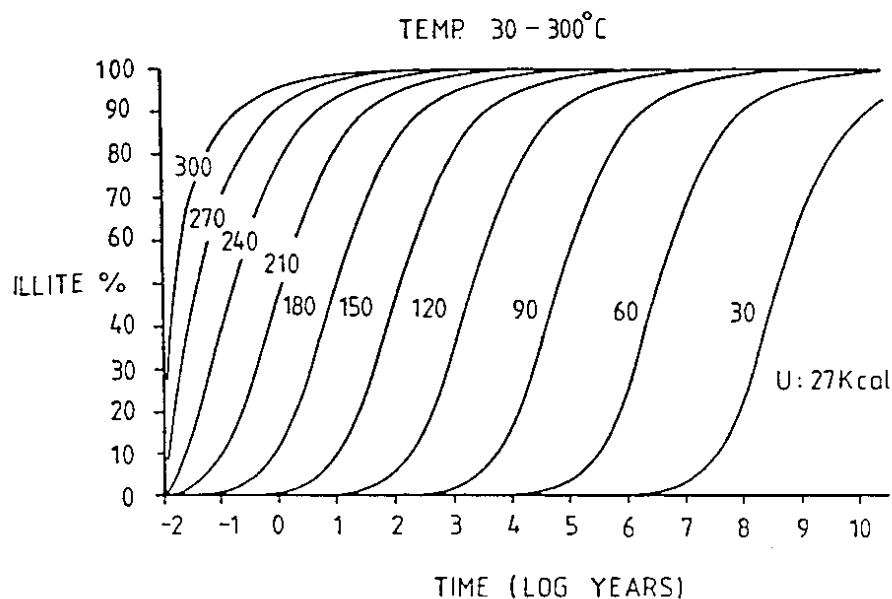
R = Allmänna gaskonstanten

T = Absoluttemperaturen

t = Tid

m, n = Koefficienter

Problemet med denna modell är att aktiveringsenergin för reaktionen inte är känd med någon noggrannhet; den antas vanligen ligga mellan 26 och 28 kcal/mol baserat på laboratorieförsök och geologiska evidenser. Kaliuminnehållet är den viktigaste parametern och det är ca 70 ppm för Östersjövatten och 400 ppm för oceanvatten. Figur 2-1 visar temperaturberoendet vid illitisering för aktiveringsenergin 27 kcal/mol och ett högt kaliinnehåll i porvattnet. Diagrammet illustrerar betydelsen av temperaturen genom att endast ca 20 % av smektitinnehållet finns kvar efter 10 år vid 200°C medan nästan 100 % återstår vid rumstemperatur efter en miljon år.



Figur 2-1 Tidsförloppet vid omvandling av smektit (montmorillonit) till illit för aktiveringsenergin 27 kcal/mol [36]

2.3.2 Fysikalisk/kemisk interaktion mellan bentonit och portlandcement

Både bentonit och cement går i lösning och ger reaktionsprodukterna zeoliter och amorfa silikater som är genomsläppliga och saknar svällnings- och självläkningsegenskaper.

Antar man sammansättningen hos det viktigaste smektitmineralet, montmorillonit, vara av pyrofyllittyp med formeln $\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ förväntas reaktionen med portlanditen $[(\text{Ca}(\text{OH})_2)]$ i cementmaterialet bli:



som motsvarar zeolitmineralet chabasit. Andra zeoliter kan också bildas såsom scolecit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}, 3\text{H}_2\text{O}$) eller gismondit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8, 4\text{H}_2\text{O}$). Eftersom Na är tillgängligt om bentoniten är i natriumform kan också analcim ($\text{NaSi}_2\text{O}_6, \text{H}_2\text{O}$) vara en sannolik reaktionsprodukt. OH^- -attack på lermineralen kan teoretiskt sett ge upphov till utfällning av $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ och $\text{SiO}(\text{OH})_2$. Man kan också förvänta sig viss illitisering genom nybildning av illitkristaller eftersom kalium frigörs från cementen.

Laboratorieundersökning av blandningar med bentonit/cement har inte visat tydliga reflektioner i röntgenspektra, sannolikt beroende på att bildade zeoliter är röntgenamorfa som följd av sin ringa kristallstorlek. Sådana undersökningar har visat att illitisering ger påtaglig minskning av svällningstrycket vid hydrotermaltester med 40°C under 4

månader. Denna minskning är samhörig med en ökning i hydraulisk konduktivitet och med en ökning i hållfasthet genom att reaktionsprodukterna har cementsande effekt.

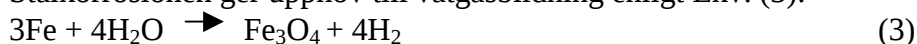
En enkel konservativ kemireaktionsmodell föreslagen i R&D-arbete för SKB innebär att portlanditen löses skiktvis från ler/cementkontakten och att de frigjorda komponenterna diffunderar ut [37]. Det skapar en gradient i Ca-koncentrationen som driver processen. Vid kontakt mellan smektitlera och betong skall enligt denna modell avsevärd degradering av både lera och betong ske till några decimeters avstånd från kontakten på 50-100 år.

I en blandning av cement och bentonit bör degraderingsprocessen ha utbildats på några timmar eller dagar. Innehåller blandningen 3-5 viktsprocent bentonit är denna då helt omvandlad medan den stora cementmängden har degraderat obetydligt. Dock ger en sådan inblandning av bentonit tydlig ändring av de fysikaliska egenskaperna hos t.ex. cementgrout genom att konkurrens om vatteninnehållet uppstår i samband med blandningen. Lerkomponenten binder vatten från cementgrouten och ger högre viskositet och mindre risk för separation av fast fas och vatten (bleeding) under injekteringsförloppet. Numera används vanligen flytmedel i cementgrout i stället för bentonit eftersom man vinner att låg viskositet kan uppnås också vid så låga vct-tal som 0.3 till 0.4.

2.3.3 Kemisk interaktion mellan bentonit och stål

Kemisk interaktion mellan bentonit och stål äger rum då stålsponslagits i slurryväggar. Stål i kontakt med smektitrik lera ger magnetit, hydromagnetit, oxyhydroxider och andra hydroxider beroende på systemets pH och syrehalt. Sådana reaktionsprodukter ger minskning av svällbarheten men ökning av hållfastheten och sprödhet genom cementseringsprocesser. Järnjoner frigörs också och deltar i jonbytesprocesser, dvs byter ut ursprungligt Na mot Fe, vilket sänker svällningstrycket.

Stålkorrosionen ger upphov till vätegasbildning enligt Ekv. (3):



Gasen bildar kanaler i leran och ökar genomsläpligheten för vatten hos leran och speciellt i kontakten mellan lera och stål.

3 Fyllningsdammar

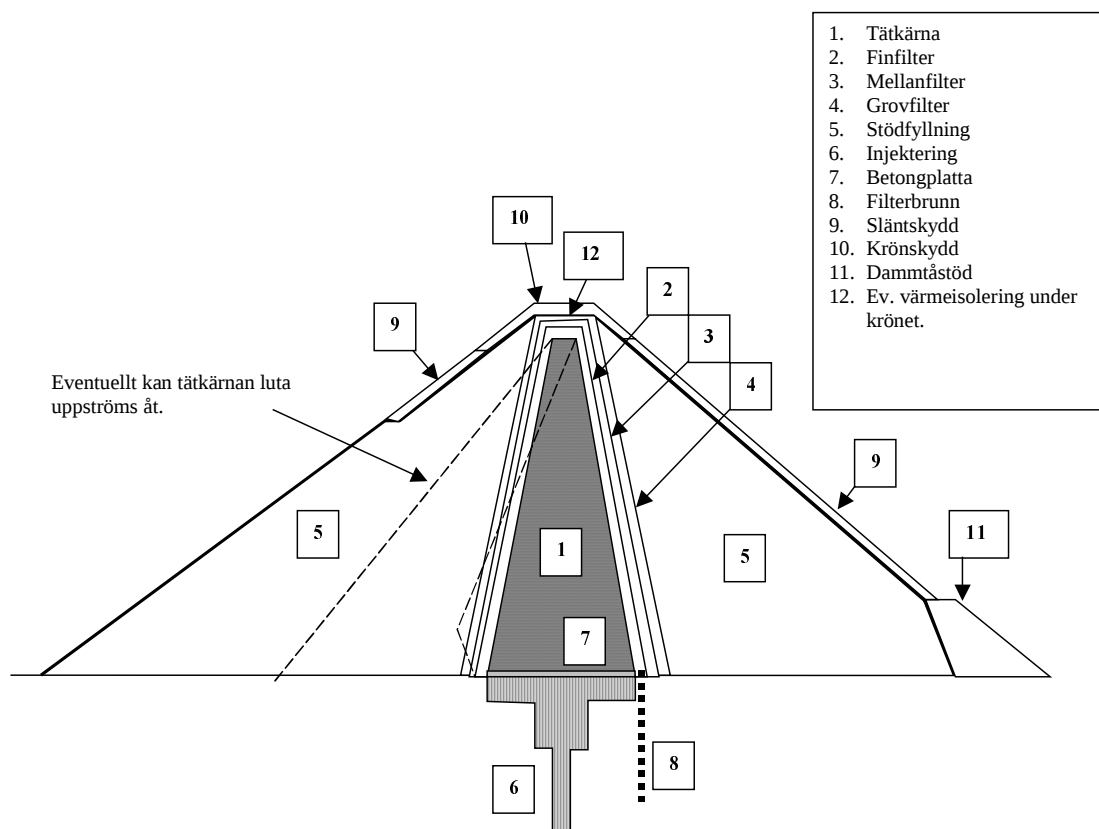
Då de flesta av exemplen på tidigare användning av bentonit i Sverige i kapitel 5 samt förslagen på blandningar av bentonit och jord i kapitel 5 handlar om fyllningsdammar, så ges i detta kapitel en kort beskrivning av uppbyggnad av fyllningsdammar och några vanliga skador i sådana dammar nämns.

3.1 Uppbyggnad

3.1.1 Introduktion

Endast mineraljordar används i svenska fyllningsdammar [16]. Det är främst fyllningens vattengenomsläpplighet, hållfasthet och kompressabilitet som avgör en damms kvalitet. Fyllningsdammar är vanligen uppdelad i zoner med skilda funktioner (Figur 3-1) [16]:

- En tätande zon som begränsar vattenflödet genom dammen
- Filterzoner som hindrar transport av finmaterial från den tätande zonen
- Stödjande zoner som ger dammen stabilitet
- Erosionsskydd ytterst på slänterna skyddar mot angrepp från vågor, is, nederbörd och i begränsad omfattning översvämning.



Figur 3-1 Typsektion av fyllningsdamm Gustafsson [16]

3.1.2 Tätkärna

Tätkärnan i svenska fyllningsdammar utgörs vanligen av månggraderad morän. En tätkärna skall ha tillräcklig hållfasthet, ge endast begränsade sättningar vid belastning och första dämning, låg vattengenomsläpplighet och materialet skall ha hög plasticitet [20]. På ömse sidor om kärnan placeras filter och därutöver stödfyllning. Moränjordars lämplighet som tätjordar avgörs huvudsakligen av deras kornfördelning och vattengenomsläpplighet. Om halten finjord är för låg i förhållande till andelen grövre korn finns risk för erosion och snabbt ökande vattengenomsläpplighet. Strävan är att uppnå så hög densitet som möjligt eftersom vattengenomsläpplighet och sättningsbenägenhet blir obetydliga och stabiliteten god. Det innebär att kornfördelningen skall vara lämplig, dvs av den nämnda typen med små partiklar passande i hålrummen mellan grövre partiklar. Finkorniga, något leriga moräner är väl användbara medan ensgraderad finsand och silt måste undvikas i tätkärnor.

Tätkärnans kapillaritet har betydelse framförallt vid krönet och nedströmsfiltret, där risk finns för tjälskador.

Kärnans utformning bestäms i första hand på tillgången av lämpligt material på rimligt avstånd från dammläget. En bred kärna anses enligt Gustafsson [16] vara säkrare om

erosion inträffar i samband med sprickbildning i själva kärnan eller i underliggande berg. En bred kärna anses också som säkrare vid sprickig eller uppkrossad berggrund. En bred kärna anses dock som mindre lämplig än en smal kärna vid låg vattengenomsläpplighet och hög vattenkvot hos kärnan pga packningssvårigheter och därvid uppkommande höga porttryck.

En brant lutande tätkärna (profil ”lutande” i Figur 3-1) ger jämnare tryckfördelning och högre glidsäkerhet under nedströmsdelen än en vertikal tätkärna. Vid tunn, vertikal tätkärna finns risk för att kärnan hänger upp sig på sidomaterialet med risk för hydraulisk uppspräckning. Vid sprickig undergrund bör en tätplatta av betong gjutas [19].

Idealvillkor för tätjord av morän är enligt [16], [20]:

- Siltig, sandig typ med finjordhalt (<0.06 mm) 15-40 % av material <20 mm
- Högst 85 % korn passerande 2 mm och minst 70 % passerande 20 mm av material mindre än 64 mm.
- Hydraulisk konduktivitet $3 \cdot 10^{-7}$ - $3 \cdot 10^{-9}$ m/s
- Vattenkvot i fält omkring den optimala, högst 3 % över, vid tung laboratoriestampning.
- God packbarhet enligt provpackning
- Måttlig stenhalt
- Blockfattig
- Närbelägen

Packningskurvan för finkornig jord har i regel två maxima, ett vid ”optimal” vattenkvot och ett vid mycket låg vattenkvot (jfr. Figur 5-6). Det är grunden för att man kan använda såväl den konventionella metoden med tillsats av vatten till ”optimalt” värde, likaväl som torrblandning och torrpäckning. I [20] har Nilsson angett lämpliga förhållanden mellan använd vattenkvot och vattenmättnadsgrad och erhållen torrdensitet vid *torrpäckning*. Nilsson anger också att *våtpäckning* kan användas, men att sättningarna vid första dämning blir mindre med torrpäckning.

3.1.3 Filter

Filter bör ha:

- en gradering avvägd så att en successiv övergång fås mellan tätkärnans och stödfyllningens kornstorlekar. Filtrets porer måste vara tillräckligt små för att hindra finmaterialtransport från tätkärnan.
- avsevärt högre vattengenomsläpplighet än tätkärnan, minst 10 gånger högre.
- begränsad stenstorlek för att inte separera under utläggningen. Detta krav är av vital betydelse.

Filterregler som används för olika basmaterial (tätkärnor) visas i Tabell 3-1.

Tabell 3-1 Filterregler för olika basmaterial [16], [20].

Basmaterial med finsjordshalt < 30 %	Basmaterial med finsjordshalt 30 – 80 %
$4 < D_{15}/d_{15} < 40$ ¹⁾	$4 < D_{15}/d_{15}$
$D_{15}/d_{85} < 4$ ²⁾	$D_{15} < 0.7 \text{ mm}$ ³⁾
$D_{50}/d_{50} < 25$	$D_{50}/d_{50} < 25$

1) Månggraderat basmaterial

2) Ensgraderat basmaterial

3) Ofta dimensionerade för svenska fyllningsdammar då dessa oftast innehåller en finsjordshalt på ca 30 %.

Nedströmsfiltret är viktigast då detta skall fånga upp eventuell finmaterialtransport från det tätande skiktet (tät kärnan).

Ytterligare kommentarer runt upp- och nedströmsfilter, övergångszoner och dränage ges av Nilsson i [20].

3.2 Vanliga skador

3.2.1 Sprickor

Sprickor kan finnas naturligt i undergrunden eller bildas efter hand i dammkroppen. Sprickor i tät kärnan uppstår huvudsakligen på grund av sättningar eller av hydraulisk uppspräckning. Sättningar kan bero på t.ex. (i) sättningar i torrpäckad tät kärna vid första uppfyllning av magasinet då kärnan hänger upp sig på omgivande filter eller stödfyllning, (ii) sättningar i våtpäckad mycket tät tät kärna som först efter lång tid dräneras och därmed sätter sig och hänger upp sig på omgivande material, (iii) upphängning på anslutande konstruktioner, (iv) valvbildning mellan ojämnheter i bergytan.

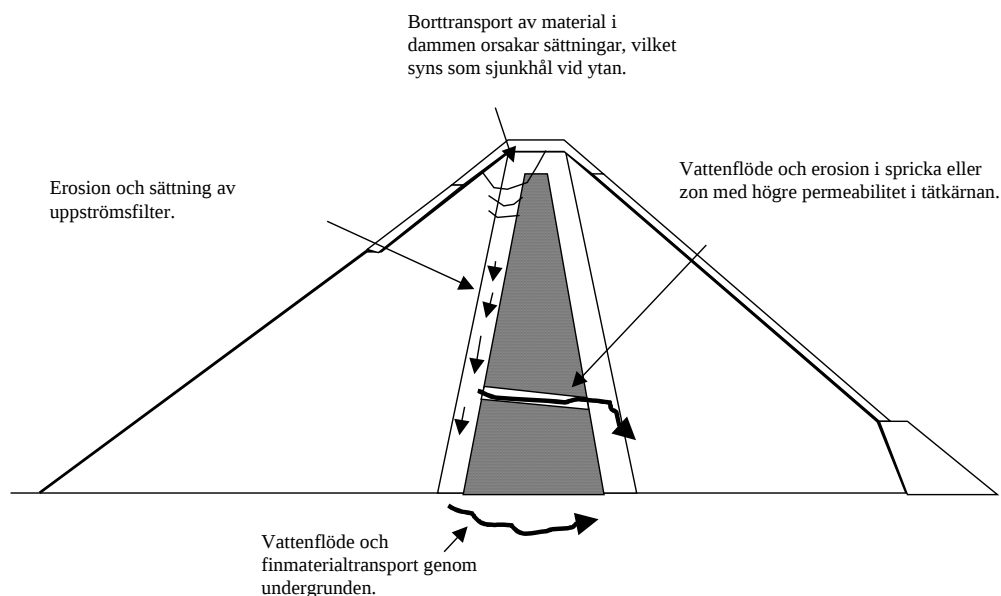
3.2.2 Hydraulisk uppspräckning

Hydraulisk uppspräckning kan inträffa om det finns sprickor eller zoner med väsentligt högre vattengenomsläpplighet än omgivningen och där inträngande vatten håller ett så mycket högre tryck än omgivande totaltryck att kornen separerar från varann och en uppspräckning sker. En följd av hydraulisk uppspräckning är ökad inre erosion från sprickväggar på grund av ökat vattenflöde, samt ändrat effektivtryck vilket innebär sämre stabilitet.

3.2.3 Inre erosion

Inre erosion inträffar när hastigheten på vattenflödet genom jordmaterialet är för hög. Det kan inträffa i sprickor i tät kärna, filter eller undergrund. Klarar inte filtret att hålla kvar finmaterialet i kärnan, accelererar erosionen med början från nedströmssidan och uppströms i läckvägarna (piping). När finmaterial försvinner uppstår sättningar, vanligtvis i filter uppströms om kärnan, varvid sättningar inträffar (sjunkhål). Från internationell statistik framgår att grovt räknat ca 1/3 av inträffade dammbrott har

orsakats av inre erosion [2]. En trolig orsak till inre erosion är ett otillräckligt filter nedströms tättkärnan. Det kan vara en för stor skillnad i kornstorlek mellan filter och tättkärna, D_{50}/d_{50} är för stor. Filtret kan innehålla en okänd mängd sten vilket medför risk för separation av filtermaterialet vid utläggning. Filtret har då inte innehållit en tillräcklig stor mängd finmaterial.



Figur 3-2 Inre erosion i fyllningsdamm. Inre erosion kan orsaka "piping", sättningar, hållfasthetsmässiga svaghetszoner och ändrade porvattentryck.

4 Tidigare användning av bentonit i Sverige

4.1 Slurryväggar av bentonit och cement

4.1.1 Introduktion

Användning

Syftet med att använda slurryväggar är att få en bärande och/eller vattentätande förmåga hos konstruktionen. Principen för utförande av slurryväggar (slurry-trenches) är att ett dike (slits) grävs till fast och tät botten under samtidig utfyllnad av en stödvätska, oftast en bentonitslurry. Finnhammar och Säfström har gjort en inventering av sådana väggar med beskrivningar av teori och utförande i [27]. Även Bredenberg H., Hestner K., Magnusson E har gjort en sådan studie i [28]. Slurryväggar har en mängd olika användningsområden, t.ex. runt avfallsdepåer, runt byggande av tunnlar, vägar o.d., vid kanaler, vid dammbyggnad. Enligt Finnhammar och Säfström har inte denna typ av vägg använts så mycket i Sverige, men desto mera i USA, England, Frankrike och Tyskland. På senare tid har dock vattenkraftsbranschen använt denna metod för tätning i dammar. En slurryvägg kan göras både vattentät och bärande och ersätta temporär spont eller permanenta sponter eller murar. Inga vibrationer eller massförträngningar förekommer under byggtiden och muren kan utföras intill befintliga konstruktioner. Vid användning i dammar används ofta en kombination av slurryvägg och spont i mitten av diket. Konstruktionen har enbart en tätande funktion. Sponten bedöms ge en extra säkerhet mot läckage vid de speciella förhållanden som råder i en damm.

Stödvätskan (slurryn) skall vanligen uppfylla en mängd olika funktionskrav; (i) ge erforderligt sidotryck mot schaktväggarna, (ii) förbli i slitsen utan att läcka ut i omgivande jord, (iii) kunna hålla finkorniga material (t.ex. sand eller cement) i suspension, (iv) vara lättpumpad och (v) vara rensningsbar. Om dessutom betong gjuts ner i slurryn, måste stödvätskan kunna undanträngas av betongen.

Slurryväggen kan vara av två huvudtyper:

- Slitsmur
- Tätskärm

Slitsmur

För slitsmurar grävs en smal och djup slits i marken där schakten hela tiden hålls fylld av en stödvätska, i allmänhet bentonitsuspension. När en viss längd är färdiggrävd till önskat djup, gjuts betong med undervattensteknik ner i slitsen genom ett rör varvid slurryn successivt förträngs. Väggen kan göras bärande genom hög betongkvalitet och armeringskorgar som lyfts ner före gjutning. Då enbart tätande funktion önskas kan en mjukare, plastisk betong användas. Se vidare i [28].

Tätskärm

Då man enbart kräver en tätande funktion av väggen, grävs en slits som fylls med en slurry liksom ovan för slitsmurar, men istället för gjutning av betong ner i slurryn, kan slurryn genom lämplig sammansättning, i sig själv till viss del hårdna och fungera som tätskärm. Tätskärmen kan göras mer eller mindre plastisk genom avvägning av förhållandet mellan cement och bentonit för att därigenom kunna följa omkringliggande jordlagars deformation utan att förlora sin tätande förmåga. Ibland används sand, silt eller lera istället för cement, man får då en svagare skärm med högre vattengenomsläpplighet. Ju mer cement som används, desto hårdare och sprödare blir skärmen.

Egenskaper hos bentonitslurry

Genom att variera typ och mängdförhållandena hos de inblandande komponenterna bentonit, cement, jord, tillsatsmedel och vatten kan man variera slurrys egenskaper avsevärt.

Vid användning av bentonit av god kvalitet kan en andel på 40 kg bentonit/m³ vara tillräcklig, medan det kan behövas 100 kg/m³ av en bentonit med lägre smektithalt [27].

Om standard Porland cement används är andelen cement betydelsefull; under 100 kg cement/m³ inträffar knappast någon härdning och över 350 kg/m³ kan slurryn bli svår att använda, den blir för stel och hårdar för snabbt för att kunna pumpas. Skall slurryväggen vara plastisk med en följsamhet gentemot omgivande jord, ger förmodligen hög cementhalt en för styv konstruktion. En viss del av cementen byts ibland ut mot slagg eller flygaska.

Enligt Finnhammar och Sävström [27] är uttorkningskrympningen kritisk för cement-bentonitslurryer. Om slurryn inte skyddas eller tillförs vatten kommer den att krympa. Cementpastan i en cement-bentonitslurry kan brytas ner genom urlakning orsakat av grundvatten, speciellt om grundvattnet är fattigt på calcium (mjukt vatten) och om vattenflöde förekommer genom slurryn. Däremot har mjukt vatten en god inverkan på bentonitens egenskaper, se ovan i kapitel 2. Som nämnts i kapitel 2 kan kemisk interaktion mellan cement/bentonit och stål/bentonit förekomma, som kan försämra egenskaperna.

Nedan ges några exempel på anläggningar som har tätats med slurryväggar. Från praktikfallen erhöles ingen information om egenskaper efter lång tid (diket fylldes på med jord igen). Troligen fortsätter slurryn att härda, och möjligen också hårdna, under en lång tid, beroende på cementhalt, cementtyp, etc.

4.1.2 Juktan kraftverk

Dammen vid Juktans kraftverk beläget i ett biflöde till Umeälven, ägd av Vattenfall, reparerades 1982. Ganska snart efter drifttagningen år 1977 observerades grumligt läckagevatten, vilket tydde på erosion av tätkärnan. Totalt sex större läckage uppträdde fram till 1982.

Dammarna lagades genom att dammkrönet schaktades av för att få en tillräckligt arbetsbredd för arbetsfordon, en slits grävdes i omgångar längs hela dammarnas längd vari en cement/bentonit slurry fylldes i samma takt som slitsen grävdes. Innan slurryn hann hårdna nedsattes en stålspons däri och slogs ner ca 0.5 m under den befintliga tät kärnans grundläggningsnivå. I de dammdelar där tät kärnans grundläggning låg över sänkingsgränsen slogs spanten ner i undergrunden ytterligare en sträcka. Sedan lades de tidigare bortschaktade massorna av den övre delen av dammen tillbaka och kompakterades. Receptet på slurryn var; standard Portland cement Slite 270 kg/m³ slurry, bentonit 30 kg/m³, retarder 2 kg/m³ och resten vatten. Resultatet har beskrivits som plastisk betong med en följsamhet mot jordrörelser samtidigt som den var tätande. Sammanlagt 19 000 m² stålspons, 5 000 ton cement och 600 ton bentonit användes under reparationen. Entreprenör var Stabilator. [2], [5], [29].

4.1.3 Lövön kraftverk

Anläggningen är belägen i Faxälven och färdigställdes 1973. Den tillhör Graningevarken Kraft AB. 1983 och 1986 uppstod sättningar (sjunkhål) på ca 15 m³, troligen på grund av inre erosion, i fyllningsdammens uppströmsslänt, ca 20 m från en anslutning till betongkonstruktioner. Finmaterial hade förts bort ur tät kärnan. Porvattentrycket var högt i tät kärnan och nedströms stödfyllning. Vidare bedömdes att nedströmsfiltret var igensatt. Injektering av berggrunden planerades 1993 men ersattes av en tryckbank längs dammens nedströmstå 1994 för att öka stabiliteten [2]. De troliga orsakerna till den inre erosionen är utförligt beskrivna i [18].

År 1998 schaktades en ca 60 m lång del av fyllningsdammen närmast till vänster om kraftstationen ner till en nivå +274 m.ö.h. Ett 1 m brett och mellan 7 och 10 m djupt dike schaktades från denna nivå ner till bergytan. Samtidigt med schaktningen fylldes diket med en cement-bentonitslurry. Metoden med tätning med hjälp av ett slurry-dike valdes med tanke på vissa fördelar som (i) slurryn stelnar till en plastisk och tät kropp som påminner om den omgivande materialet (ii) det tränger inte undan eller spränger upp befintlig tät kärna så att den skadas.

Arbetsmetoden var följande: Bentonit blandades med vatten i en höghastighetsblandare (ca 1500 rpm) i ca 1.5 minuter. Bentonit/vattenblandningen mellanlagrades i 2 st 4 m³ behållare under 12 timmar under samtidig omrörning av en paddelblandare. Så gott som all svällning av bentoniten inträffade i blandaren. I detta mellanlager kunde slurryn befinna sig ganska lång tid utan att fördenskull ta skada. Slurryn gick sedan vidare till en annan höghastighetsblandare (ca 1500 rpm) där cement och ytterligare vatten tillfördes och blandades under ca 1.5 minuter. Från kvarnen transporterades cement-bentonitmassan till ett slutlager varifrån den pumpades ner till det schaktade diket. Efterhand som schaktningen fortskred, slogs en stålspons i dikets mitt. Schaktning och spontslagning avpassades så att avståndet vid markytan hela tiden var ca 8-10 meter mellan släntkrön och sista spontplanka och ca 3 m mellan släntfot och sista spontplanka. Receptet för cement-bentonitslurryn var: 30-45 kg bentonit/m³, 250-300 kg standard Portland cement/m³, en liten mängd retarder samt vatten. Sprickor i överytan på slurryn uppkom vid varmare utetemperatur. Innan ny slurry lades på rensades ytan och vattenbegjöts.

Slurryn provades m.a.p. tryckhållfasthet (enaxligt tryckprov SS137533A och SS27128), E-modul och brottöjning (SS137533A och SGF:s rek.), vattengenomsläpplighet (constant head test i triaxcell) och separation (mätkolonn). Tryckhållfastheten var efter 7 dygn ca 0.3 MPa och efter 28 dygn ca 0.4-0.6 MPa. Vattengenomsläppligheten bedömdes vara mindre än 10^{-7} m/s för slurryväggen [18], [29]. Stabilator var entreprenör och VBB Anläggning var konsulter.

Enligt Wångenbergs [6] blev resultatet av reparationen 1998 det önskade. Kontroll kan idag ske med tryckgivare. Hela dammreparationen kostade 12 Mkr. På grund av bristande erfarenheter hos konsulter, beställare och entreprenörer när det gällde material design, utförande, kapacitet, m.m., var arbetet tämligen besvärlig.

4.1.4 Tätskärm vid Öresundsförbindelsen

Runt portalen, där Öresundsförbindelsens motorväg och järnväg leds ned i tunneln under Drogden, har en skärmvägg av cement-bentonitslurry utförts för att stoppa inläckage av vatten från Öresund. Slitsen för väggen har grävts under samtidig påfyllnad av slurry ner till fast kalkberg. Bentonit och vatten blandades en viss tid innan cementtillförsel så att full svällning av bentoniten hann erhållas innan cementen tillfördes. Mellan 35 och 45 kg bentonit/m³ slurry 120 kg cement/m³ användes. Ett medel, Bentocryl 86, tillsattes för att förhindra flockning när cementen tillfördes [27].

4.2 Injektering med bentonit och cement i fyllningsdammar

4.2.1 Introduktion

Injektering kan användas vid tätning, förstärkning och stabilisering av berg och jord [3]. När det gäller tätning av dammar, så är ändamålet enligt Widing [21] huvudsakligen att (i) reducera grundvattnets läckning och tryckgradient genom och under dammen för att förhindra jorderosion där, (ii) reducera upptrycket under gravitationsdammar och (iii) reducera läckning från vattenmagasin. Injekteringsmedel pressas under tryck in i hålrum i berg och jord. Vanliga injekteringsmedel är (i) suspensioner av fasta partiklar i vatten, (ii) emulsioner och (iii) kemiska medel eller lösningar.

Sjöström [4] anser att vissa frågeställningar bör besvaras i samband med reparationer av dammar; (i) cementbruket har ofta en hög vct tal. Detta medför en hög porositet och en känslighet för urlakning, (ii) vilka är läckvägarna i jord, i kontakten jord/berg och i berg, (iii) var och hur har injekteringsmedlet fyllt upp i håligheter, i tätjord, i filter, i stödjord, m.m och (iv) cementbrukets beständighet.

Troligen är läckvägar alltid kanalformiga. I berg utgörs de viktigaste läckvägarna av skärningslinjen mellan vattenförande sprickor. I kontakten jord/berg är det ytligaste berget ofta finsprickigt och fungerar som ett poröst medium; finsprickigheten gör det svårt att genom cementinjektering åstadkomma effektiv tätning. I jord förekommer ofta genomsläppliga skikt där huvuddelen av strömningen sker. Även i skenbart homogen jord förekommer variationer i densitet som ger upphov till kanalströmning.

För att ett injekteringsmedel skall fylla upp håligheter i tätjord, filter, stödjord, m.m måste vatten och luft i håligheterna pressas ut innan grouten kan fylla upp hålrum effektivt. Det kräver injekteringstryck som överskrider porvattentrycket men här är risken att alltför höga injekteringstryck kan åstadkomma hydraulisk spjälkning, erosion och piping. Grout kan inte fylla upp de finaste delarna av t ex sprickor om de har mindre vidd än ca dubbla groutkornstorleken.

Ett flertal faktorer påverkar enligt Brantberger [30] oftast injekteringsresultatet:

- Injekteringsskärm: hålavstånd, stickning, hållängd, borrhutrustning, hålspolning
- Injekteringsbruket: inträngningsförmåga, härdning, sprickutfyllnad, beständighet
- Injekteringsutrustning: blandare, omrörare, pumpar, doserings- och registreringsutrustning.
- Injekteringsutförande: tryck, stopp- och brukskriterier, injekteringsordning, en- eller flerhålsinjektering, injekteringsintervall.

Primärt är det inträngningsegenskaperna som påverkar injekteringsresultatet, medan egenskaperna relaterade till beständighet avgör på längre sikt. Det finns i princip två olika metoder för att nå en bra inträngning genom att variera cementbrukets egenskaper:

- Användning av ett bruk med högt vct-tal (1-3). Det är vanligt vid fina sprickor.
- Användning av ett bruk med lågt vct-tal (0.5-1.0). Det är vanligt vid grova sprickor och håligheter.

Även om vct-talet är högt, dvs hög kvot mellan vatten och cement, så blir det verkliga vct-talet på plats inuti sprickan lägre på grund av att överskottsvatten strömmar iväg och en filterkaka av tätare bruk bildas. Sådana filterkakor kan tyvärr också hindra vidare transport av bruk ut i spricksystemet.

Generellt kan sägas att det råder ett motsatsförhållande mellan inträngningsförmåga och täthet och beständighet. Ju lägre vct-tal hos bruket på plats inuti sprickorna, desto större täthet och beständighet. Å andra sidan minskar inträngningsförmågan med lägre vct-tal, bruket blir stelare och härdar snabbare.

För att underlätta inträngningen av bruket och för att öka inträngningslängden är det önskvärt att arbeta med så höga injekteringstryck som möjligt. Gränsen sätts av risken för uppspräckning och lyftning av marken. Vid injektering i känsliga skikt, som t.ex. i tätkärnor i fyllningsdammar används vanligen inte högre tryck än hydrauliskt självtryck eller maximalt ca 0.1 MPa. Däremot kan för sprickor i hårt berg användas mycket högre tryck, se [30] och [31]. För varje projekt bör utredas om hydraulisk uppspräckning eller utvidgning av sprickor skall förordas eller undvikas, vilket kräver bestämning av vilka jord- eller bergspänningar och vattentryck som råder. Provinjekteringar vid olika tryck kan utföras och utvärderas.

Injekteringsordningen kan ibland vara att (i) samtliga hål injekteras samtidigt, (ii) hålen injekteras nedifrån och upp, (iii) hålen injekteras uppfifrån och ned i etapper, (iv) hålen

injekteras i omgångar med successivt halverade hålavstånd, (v) hål med störst vattenförlust injekteras först och (vi) hålen injekteras utan någon speciell turordning mellan hålen. Oftast framhålls att de större sprickorna/håligheterna som oftast svarar för det dominerande vattenflödet skall injekteras först med tjockare bruk. Därefter kan de små sprickorna tätas successivt med tunnare bruk (alternativt högre tryck) [31].

De mest omfattande publicerade resultaten från injektering av cement och bentonitgrouts härrör från bergtätning [38]. Erfarenheterna är många och de för dammtätning viktigaste kan sammanfattas på följande sätt:

- Härdningstiden för cementgrouter med flytmedel är så lång vid temperaturer i området 8-15°C att packers och injekteringstryck måste finnas kvar minst 1 eller flera dygn. För dammändamål och normala bruk bibehålls trycket dock normalt mellan 8-15 timmar [29].
- Systematisk injektering radvis med små hålavstånd och med avlastningshål måste ske. Vid dammreparationer utgör nästa hål avlastningshål och hålavstånden styrs av hur injekteringen når avlastningshålet och strömmar upp ur detta [28].
- Dynamisk injektering, dvs injektering med konstant pumptryck och överlagrad oscillering, ökar inträngningsdjupet i och fyllnadsgraden av spricksystem väsentligt genom att viskositeten sätts ned [34]. Å andra sidan hävdas ibland att det finns risk för separation vid dynamisk injektering, tyngre korn skakas ner och fastnar i trånga passager [29], [30].

Stor erfarenhet finns från berginjekteringsforskning i SKB:s Stripaprojekt med avseende på materialval, preparering och injektering (se ref. [35] och [38]).

En tillsats med bentonit i en cementsuspension förbättrar sammanhållningen av cementkornen radikalt, bruket separerar inte under tillverkning och applicering. En tillsats av bentonit medför ett mer tixotropt beteende hos emulsionen vilket hjälper till att hålla emulsionen på plats tills den hårdnat [3]. Ett tixotropt material är geléaktigt vid stillastående och flytande under omrörning. Bentoniten gör bruket mer trögflytande och därför tillsätts vanligen flytmedel för inträngningens skull [29]. Bentonit anses försämra inträngningsförmågan i små sprickor då dess enskilda lermineral kan, likt enskilda kort i en kortlek, ställa sig på högkant och bilda proppar [29]. Det gör att bentonit mest används vid utfyllnad i större hålrum och sprickor och inte i mindre. Sjöström [4] anser att man hellre skall använda flytmedel än bentonit för att få låg viskositet hos cementbruk.

Bentonit i bruk förtar till viss del cementens inverkan och sätter ned hållfastheten på slutprodukten och gör den hårdnade suspensionen mer plastisk. Vid bentonitinblandning i cementbruk tillsätts vanligen ca 2 % bentonit vid vattencementtal (vct) 0.5 och ca 5-7 % vid högre vct enligt Widing [21].

Ett cement-bentonitbruk påstås i [21] kunna tränga in i mellansand som har en vattengenomsläpplighet på ca $2 \cdot 10^{-3}$ m/s. Jansson [32] hävdar att cement/bentonitbruk inte penetrerar jordlager med ett k-värde lägre än $5 \cdot 10^{-4}$ (m/s). Däremot silikatbruk hävdas tränga in i jordlager med k högre än $3 \cdot 10^{-6}$ (m/s).

Injektering med bentonitgrouter eller blandningar av bentonit och mycket finmalt bergmaterial kan vara framgångsrik särskilt vid relativt uppsprucket berg. Densiteten hos sådana grouter måste vara relativt låg, dvs 1050 to 1200 kg/m³ för att ge inträngning i sprickor med 100 µm vidd. Dynamisk injektering av sådana grouter i sprickor ökar inträngningen från 0.25 m vid ordinär injektering till 2 m vid dynamisk injektering med lämpligt vald dynamisk injektering med avseende på amplitud och frekvens. För 25 µm sprickvidd ökar inträngningen på motsvarande sätt från 0.05 to 0.5 m och för 500 µm vidd från 1 m to 10 m. Grova sprickor eller hålrum ger möjlighet att använda bentonitgrout med betydligt högre densitet. Inte ens de mest finkorniga cement och bentonitgrouterna kan tränga in i hålrum med mindre diameter än ca 20 µm, vilket betyder att effektiv inträngning inte kan ske i sandig/siltig morän och lera.

Tätningseffekten vid användning av bentonitgrout med densiteten 1100 kg/m³ är avsevärd om grundvattnet, dvs älv- eller reservoarvattnet i fallet dammar, är elektrolytfattigt. Det illustreras av Tabell 4-1, som ger teoretiska, av praktiska tillämpningar verifierade, värden på vattengenomsläppligheten hos normalberg före och efter bentonittätning med användning av grout med densiteten 1080 kg/m³.

Tabell 4-1 Teoretisk hydraulisk konduktivitet K i m/s hos berg före och efter bentonitinjektering. d= avstånd hos parallella (planparallella) sprickor, a= sprickvidd [34].

d, m	a, mm	Före tätning	Efter tätning	Bergtyp
0.1	50	1.3E-9	1.7E-9	Sprickzon
0.1	100	1.0E-7	8.3E-10	Sprickzon
0.1	200	8.2E-7	4.1E-10	Sprickzon
0.5	50	5.1E-10	6.6E-11	Sprickfattigt
0.5	100	4.1E-9	3.3E-11	Normalt
0.5	200	3.3E-8	1.7E-11	Sprickrikt

Lämpliga bentoniter skall alltid ha montmorillonit som svällande komponent därför att andra svällande mineral, som t ex beidellit lättare omvandlas till illit. Bentoniter innehållande de svällande mineralen nontronit eller saponit kan ha något bättre kemisk stabilitet men har inte så goda vattenbindande egenskaper som montmorillonit.

Cementpastadelen i ett cement-bentonitbruk kan brytas ner genom urlakning orsakat av grundvatten, speciellt om grundvattnet är mjukt och om det förekommer ett vattenflöde genom slurrin. Däremot har mjuka vatten en god inverkan på bentonitens egenskaper, se ovan i kapitel 2. Som nämnts i kapitel 2 förekommer det även kemisk interaktion mellan cement/bentonit som försämrar egenskaperna.

Vid tillverkning av cement-bentonitbruk, blandas i första skedet bentonit och vatten. Bentonit-vattenslurryn sväller sedan under ca 12 – 24 timmar. Därefter tillsätts cement och ytterligare vatten för cementens hydrering. I princip är det samma arbetsgång som för slits- och tätskärmar. Cement-bentonitslurryn injekteras sedan i marken. Ett sulfatresistent cement bör användas.

Vid reparation med injekterat material i tatkärnan i fyllningsdammar har urspolat material ersatts och läckaget har oftast reducerats. Nilsson et al [2] har dock observerat nya sjunkgröpar i anslutning till reparerade sjunkgröpar. Författarna uppger att den otillfredsställande filterfunktionen kvarstår även efter reparationen då det endast är tatkärnan som tillförs nytt injekterat material.

Nedan ges några exempel på anläggningar som har reparerats med cement/bentonitinjektering.

4.2.2 Bastusel kraftverk

Bastusels kraftstation är belägen i Skellefteälven och togs i drift 1972. Den har reparerats under åren 1973 till 1975 med en moränfyllning och en ny injekteringsridå. 1993 upptäcktes ett nytt läckage. 1994 injekterades tatkärnan, underliggande morän och berg på en del av intagsdammen. Injekteringen i jord utfördes nedifrån och upp med självtryck motsvarande bruket i nivå med dammkrönet. Injektering i berg utfördes med ett maximalt tryck på 0.1 MPa. Vid jordinjekteringen användes två cementbruk; ett med vattenglas och ett med bentonit. Bruket med bentonit hade ett vct-tal på 1.0 och utgjordes av injekteringscement Std P Degerhamn, flytmedel 1% av cementvikten och bentonit 2 % av cementvikten. Vid framställningen blandades bentonit och vatten ett

dygn innan cementen tillsattes. Impumpad mängd jordinjekteringsbruk var 76 m³. Entreprenör var Stabilator och beställare var Vattenfall AB [29]. Se även [2].

4.2.3 Hällby kraftverk

Hällby kraftverk är beläget i Ångermanälven. Läckageökning och sjunkhål noterades i september 1985 och dammen reparerades 1986. I den vänstra jorddammen injekterades i sju rader och i den högra jorddammen i fyra rader. I de yttersta raderna injekterades med cement/bentonit för att tätare större hålrum och urspolningsstråk. I de inre raderna injekterades silikatbruk. Sammanlagt injekterades 42 m³ cement/bentonit 164 m³ silikatbruk och 46 m³ för berginjektering i vänster jorddamm, samt 14 m³ cement/bentonitbruk, 124 m³ silikatbruk och 17 m³ bruk för berginjektering i höger jorddamm [2], [4], [22], [23].

Avsikten med injekteringen var att med cement/bentonitinjekteringen i ytterrader täta eventuella större hålrum och utspolade stråk och därigenom få en barriär som förhindrade alltför stor utflytning av det mer penetrerande silikatbruket. I cement/bentonitbruket användes en mängd bentonit motsvarande 14% av cementvikten. Bentoniten förblandades med vatten innan cementen tillsattes. Vid injektering i berg var det maximala injekteringstrycket 0.4 MPa för 0-4 m djup i berg och 0.6 MPa för 4-12 m djup i berg. Maximala tryck för injektering i tåtkärnan var lägsta möjliga för djup mindre än 4 m, 0.2 MPa för 4-15 m djup och 0.3 MPa för 15-25 m djup [32]. Där injektering skett med silikatbruk och den maximala injekteringsvolymen pressats in utan att trycket stigit, injekterades efter några dagar med en större tillsats med aluminiumhårdare. Om injekteringstrycket trots detta inte ökade, tillsattes bentonit i silikatbruket och i extrema fall ökades halten av aluminiumhårdare till 2.5 volym %.

4.2.4 Näs kraftverk

Byggt 1978. Sjunkgropar uppstod från 1985 och 1986 intill utskovspartiet och en urspolning av finmaterial från tåtkärnan konstaterades. 1989 injekterades med cement/bentonitbruk och med kemisk injektering. Efterföljande mätningar visade ingen eller mycket litet vattenläckage i området. Mindre sättningar uppstod dock igen under 1990-talet vilket tyder på att skadeförloppet fortgår [2].

4.2.5 Porjus kraftverk

Dammen färdigställdes 1975. Sjunkhål uppstod 1976, 1979, 1985 och 1993. Skada i sektionerna 0/380-0/400 samt 0/595-0/605 reparerades 1993 med Ultrafin cement vct 0.8 [4]. Enligt [2] bestod injekteringsmaterialet av en slurry med sand/bentonit/cement. Enligt [29] användes en bentonithalt på 2 % av cementvikten. Injekteringen utfördes nerifrån och upp under självtryck motsvarande trycket i bruket vid dammkrön. Bentoniten blandades med vatten minst ett dygn innan användandet. Läckaget minskade uppskattningsvis med 90% i de skadade delarna och med 75% i anslutande delar. Enligt [29] injekterades sand och bentonit i nedströmsfiltret 1993.

4.2.6 Rengård kraftverk

1980 uppstod ett par sjunkhål i tåtkärnans kant i dammens anslutning till naturmark. Det skadade området injekterades varefter läckaget genom upphörde. 1983 uppkom ett nytt sjunkhål i samma område. Det konstaterades att urspolning av material från tåtkärnan hade ägt rum på grund av inre erosion. Den inre erosionen bedömdes ha uppkommit genom hydraulisk uppspräckning, en lokal defekt i nedströmsfiltret och på grund av tjälskador. Berg, kontakzon och det skadade området i tåtkärnan injekterades. Även höger damm vid anslutningen till betongkonstruktionerna hade liknande skador av samma orsak. Även dessa delar injekterades samtidigt som den vänstra dammen injekterades. [2]

Tåtkärnan reparerades med en slurry av mikrocement, bentonit, m.m. Vattencementtalet (vct) sänktes från initieilt 2. Sjunkhål indikerade brister och pågående erosion. Läckaget upphörde nästan och tåtkärnan blev homogen. Projektet kostade ca 3 Mkr. VBB Viak och VBB Anläggning var konsulter och Stabilator var entreprenör. [7]

4.2.7 Ringdalsdammen

År 1999 reparerades dammen med bl.a. bentonit. Läckagevägarna var mycket omfattande. [33]

4.2.8 Rätan kraftverk

Injektering 1994 i en stenfyllningsdamm tillhörande Rätans kraftverk. En blandning av cement, bentonit och flytmedel injekterades. Orsaken till reparationen var ett alltför stort, plötsligt uppkommet läckage genom och under dammen. Resultatet av reparationen blev att läckaget minskade kraftigt men att en viss del kvarstår. Projektet kostade ca 1.5 Mkr. Huvudkonsult var VBB och entreprenör var Stabilator. Borrning och injekteringsrapporter finns [33]. Även 1968 tätades delen mellan monolit 3 och 4 med cementbruk [4].

4.2.9 Suorva östra kraftverk

1983 noterades grumligt läckagevatten, ca 100 l/s, från dammen och ett sjunkhål i dammens krön. Sjunkgropen och tåtkärnan ända ner till berget tätades med cement/bentonitbruk och läckaget sjönk då till 10% av flödet innan injekteringen. Totalt ca 40 ton cement användes. Under sommaren 1984 injekterades ytterligare 9 ton cement och 38 m³ silikatbruk i kärnan och 9 ton cement och 2 m³ silikatbruk i berget. 1987 injekterades ytterligare cement/bentonitbruk med totalt ca 60 ton cement. Bruket hade en vatten/cementtal på 1.0, använd cement var av typ Degerhamns injekteringscement, 4% flyttillsats och bentonithalten var 2% [4]. Förnyade sjunkgropar uppträdde 1993 [2].

4.3 Injektering med bentonit och cement i betongdammar

4.3.1 Allmänt

Det som anförts under Kapitel 4.2 är tillämpligt för tätning också av betongdammar. Efter lokalisering av större sprickor och hålrum med geofysiska metoder och kärnborrning för säkerställande av den preliminära sprickmodellen borrar rader för

injektering med utelämnande av vissa hål för avlastning. Injektering sker lämpligen i etapper med flera packerlägen i hålen beroende på hur sprickor och hålrum är belägna och orienterade. Utarbetande av en sprickmodell är angeläget.

En betongdamm har stor stelhet och massa och det ger möjlighet att arbeta med höga injekteringstryck. Det finns inte skäl att använda blandningar av cement och bentonit med syftet att förhindra "bleeding"; det sker bäst genom att använda lågt vct och tillsätta flytmedel. För att få en duktil ("viskoplastisk") tätning kan bentonitgrout användas enligt de principer som getts i kapitlet om injektering av fyllningsdammar.

När det gäller injektering finns ett antal frågeställningar som fått svar enligt nedan:

1. *Påverkar bentonit som tillsats till cementgrout dess inträngningsförmåga i fina sprickor?* Svaret är ja eftersom bentonitkomponenten tar upp en del av vattnet i suspensionen och sänker "effektiva" vct för cementkomponenten vilket ökar viskositeten. Detta kan till viss del motverkas genom att bentonit får svälla med vatten innan cement tillförs. Dessutom innebär bentonitens tixotropi att den tenderar att hårdna då groutrörelsen in i sprickorna börjar avta. Inträngningen börjar alltså stagnera tidigare än om bentonit inte tillförts cementen. Som angetts tidigare i rapporten är det fördelaktigare att använda flytmedel än bentonit för att hindra bleeding hos cementgrouten därför att man då kan använda låga vct som har fördelen att inte ge någon separationseffekt och som kan ge en svällningspotential. Ren bentonitgrout kan tränga in effektivare i finsprickor än grout beredd med finmald cement men får inte den mekaniska styrka som cementen får och blir därför känsligare för piping och erosion. Observera dock resonemanget i kapitel 4.2.1 angående "kortspelseffekten" där bentonintlaminaten kan ställa sig på högkant och försämra inträngningsförmågan.
2. *Vilket injekteringsförfarande är lämpligast för bentonitbaserade och rena cementgrouter?* Svaret är att konventionell groutpumpning kan ge dåligt resultat om hålligheterna är små och risken blir stor för hydraulisk spjälkning om man försöker förbättra inträngningen genom att öka trycket. Ett sätt att förbättra inträngningen av både bentonit- och cementgrouter är att använda "dynamisk injektering" [35], som innebär att ett statiskt "baktryck" läggs på via pumpen och att en svängningsrörelse överlagras. Då kan inträngningsdjupet ökas med flera hundra procent eftersom vibrationerna ger höga men mycket kortvariga tryck- och skjuvpulser som sänker viskositeten hos grouterna. Observera dock resonemanget i kapitel 4.2.1 angående separationsrisker.
3. *Vilka processer äger rum i bentonit- och grouter under och efter blandning och sedan grouten trängt in i konstruktionen?* Svaret är att det finns en halvempirisk teori för de fysikalisk/kemiska processerna i cementgrout [42] med och utan flytmedeltillsatser och en motsvarande konceptuell fysikalisk/kemisk modell för hur grouter av bentonit fungerar [38]. För cement/bentonitblandningar under och efter blandningen är det ett starkt transient förlopp med en mängd kemiska reaktioner som

inkluderar vattenbindning. Det finns behov av en sådan utredning som kan vara av samma typ som har gjorts i SKB:s R&D för cement/flytmedel.

4. *Finns det ideer om hur en idealisk grout kan vara sammansatt?* Svaret är att lämplig komposition av lermineral och cement av alkalityp kan vara ett sådant material och det finns behov av omfattande R&D inom området.

4.4 Bentonitmattor

På marknaden finns bentonitmattor som används som tätspärre för att hindra vatten att komma in eller ut från en konstruktion. Som grundvattenskydd kan bentonitmatta ingå i den tekniska lösningen för att hindra att miljöfarliga ämnen som transporteras i läckagevatten når grundvattnet och detta kan fungera som tätskikt under väg och järnväg. Bentonitmattor används också som tätskivor utanpå konstruktioner såsom källare, grunder, kulvertar och tunnlar för att förhindra grundvatteninträngning. Bentonit används också i ingjutna fogband i betongkonstruktioner. Mattorna kan bestå av två lager av hopsydd geotextilmembran som innesluter ett lager av bentonit.

Ingen känd användning i fyllningsdammar. Kan tänkas användas som mer eller mindre varaktigt skydd framför otät damm eller vid tätkärnehöjningar istället för annat tät material och med stödfyllning bakom. Idén är bra därför att den anbringade bentoniten har jämn fördelning och densitet men den ringa tjockleken gör att den mekaniska beständigheten, dvs risken för punktering eller bristning som följd av rörelser i anslutande jord, är betydande. Risken kan minimeras genom att använda dubbla eller tredubbla membran med förskjutna skarvar. För att eliminera risken för uttvättning av lermaterialet som följd av höga gradienter vid första dämningen, måste filter anbringas i kontakten med omgivande fyllning. Som vid alla andra tillämpningar av bentonit måste svällning och densitetsminskning förhindras eftersom hydraulisk konduktivitet och erosionsmotstånd annars försämras. Det kräver att ett yttre effektivtryck måste finnas som svarar mot bentonitens svällningstryck.

När det gäller utförande finns ett antal vanliga frågeställningar som har fått svar enligt nedan:

1. *Är det viktigt att det finns ett överlagringstryck mot mattorna när de uppfuktas och att de inte torkar ut efter uppfuktning?* Svaret är att det måste finnas ett yttre stöd i form av överlagringstryck eller stödkonstruktion eftersom mattorna annars kan svälla okontrollerat så att den sammanhållande nålfiltningen går sönder. Uttorkning till lägre vattenkvot än vid utläggning kan ge sprickbildning men risken är i praktiken mycket liten.
2. *Finns det risk för att sammanhållande trådar i mattan går av?* Svaret är ja om svällningen blir mycket stor. Det mest kritiska fallet är dock skjuvpåkänningar hos mattor i slänter eftersom bentonitkomponentens inre friktionsvinkel endast är 10-15° och därför inte är mekaniskt stabil vid större släntlutning. Är lutningen större, vilket normalt är nödvändigt av praktiska skäl, tas skjuvspänningarna upp av trådarna och

bristning kan ske vid stor lutning ($>30-40^\circ$). Efter lång tid är risken stor eftersom trådarna undergår kemisk nedbrytning och krypdeformationer kan ge fördröjt brott.

3. *Kan växelvis uppfuktning – uttorkning och därav föranledd funktionsförsämring ske av mattor ske om de läggs högt upp i dammen?* Svaret är att variationerna i vattenkvot som kan tänkas i en dammkonstruktion knappast kan åstadkomma bestående försämring; om mattorna befinner sig i en miljö med hög relativ fuktighet såsom i en damm hålls huvuddelen av vattnet bundet i mattorna. Svällning och krympning som följd av bevätning/uttorkning är obegränsat reversibel under förutsättning att torkningen inte drivs för långt, att frysning inte sker, samt att inga kemiskt betingade förändringar äger rum.
4. *Kan frysning/upptining ge funktionsförsämring av mattor belägna högt i en damm?* Svaret är att temperaturen kan få sjunka till några få grader Celsius under nollpunkten utan att frysning äger rum i ren bentonit därför att en betydande del av porvattnet är hårt bundet till mineralsubstansen [43]. Det är emellertid ändå angeläget att skapa sådant frostskydd att temperaturen i mattorna inte underskrider nollpunkten därför att den islinsbildning som frysning ger upphov till åstadkommer permanent variation i densitet och risk för läckage efter upptining.
5. *Erfordras filter mot mattorna?* Svaret är ja därför att uttransport av dispergerade finpartiklar annars kan ske vid de låga elektrolythalter i vattnet som är aktuella för dammar i svenska älvar. Filtren skall i sin tur ha sådant stöd av yttre fyllning att släntstabiliteten hos hela dammen är tillräcklig för ge så obetydliga rörelser att inte mattorna deformeras.

4.5 Kärnkraftavfall i berggrunden

4.5.1 Introduktion

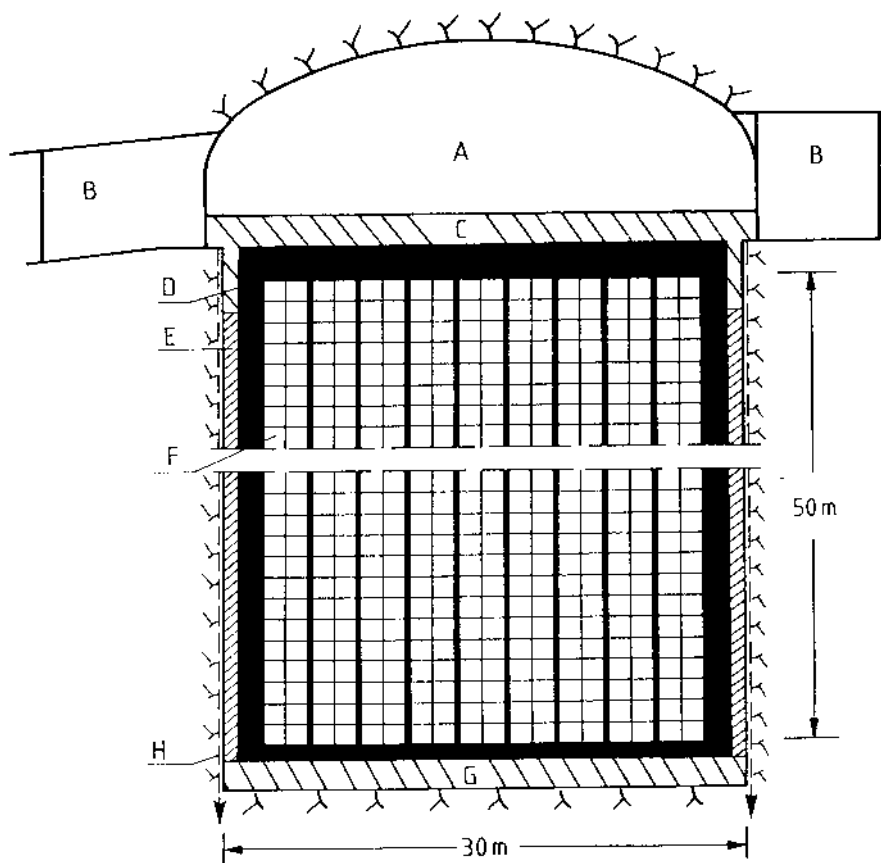
Ett slutförvar för radioaktivt avfall måste ha sådan isoleringseffekt att den radioaktiva dosen för enskilda individer och grupper av individer inte överskrider fastställda gränsvärden. När det gäller låg- och medelaktivt reaktoravfall, som betraktas som ofarligt efter 300 år, sker inkapsling i betongkokiller och fat som placeras i en platsgjuten betongsilo i Forsmark. För högaktivt avfall har ännu ingen plats för slutförvaret bestämts men den tekniska lösningen, det s.k. KBS3-konceptet, är definierad.

4.5.2 SFR, Forsmark

Slutförvaret består av tunnlar för lågaktivt avfall och en silo för medelaktivt och visst långlivat avfall (Figur 4.1) [34]. Silon, som har en ytterdiameter av 25 m är belägen i ett cylindriskt bergrum med diametern 29 m och höjden 65 m. Silons bottenplatta är 2 m tjock och dess väggjocklek 1 m. Den glidformsgjöts med bikakeform för att åstadkomma ett stort antal från varandra isolerade vertikala celler för anbringande av avfallskollin. För att säkerställa förhindrande av genomströmning av vatten vid den låga regionala hydrauliska gradient som råder i området byggdes silon på en väl packad

bottenbädd av 10 % Na-bentonit och 90 % betongballast och den omgavs av en fyllning av bentonitgranulat med horisontell tjocklek av ca 2 m och en höjd av ca 50 m.

Kravet på bottenbädden är att dess genomsläpplighet inte får överskrida E-10 m/s, vilket uppfylls enligt laboratorieanalyser, och att silons sättning under tiden fram till förslutningen inte bör överstiga 5 cm. Sättningen mäts årligen och har på 11 år då fyllnadsgraden nått ca 50 % blivit ca 3 cm.



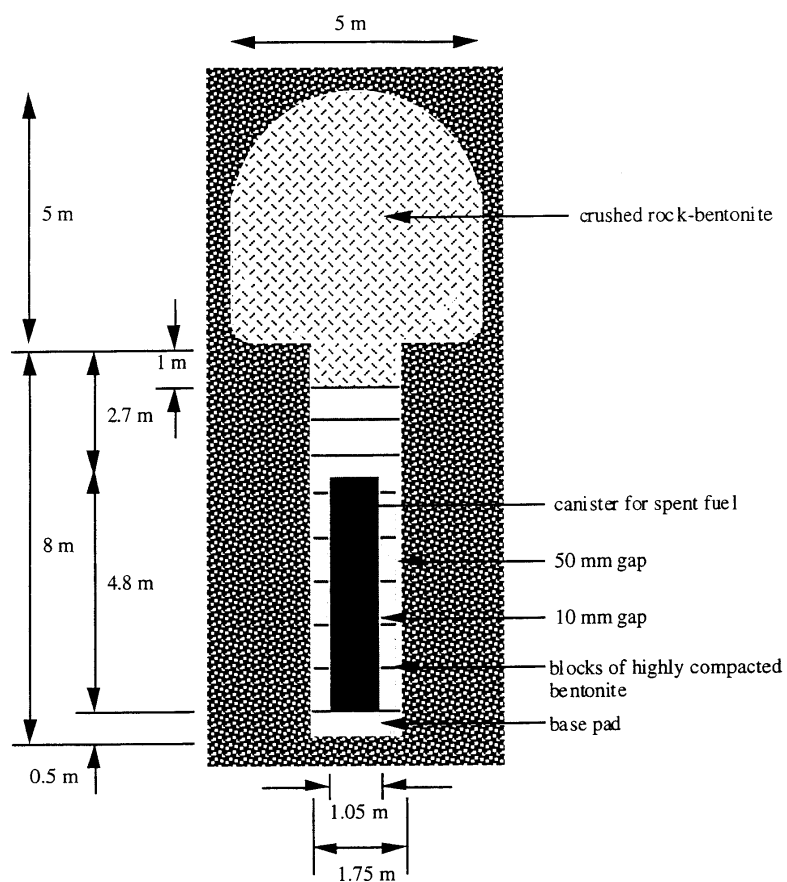
Figur 4-1 Schematisk sektion genom SFR-silon. A) Cementstabiliserad sand, B) Betongpluggar, C) Topptäckning av bentonit/sand, D) Betongsilo, E) Fyllning av bentonitgranulat, F) Avfallkollin, G) Bottenbädd av bentonit/sand, H) Dräner mellan sprutbetong och berg anknutna till ett undre tunnelsystem [34].

4.5.3 KBS3-konceptet

För svenskt vidkommande är det självklara geologiska mediet urberg av granittyp, som ger mekanisk stabilitet och låg genomsläpplighet vid det stipulerade minimidjupet 500 m. Här skall, enligt KBS3-konceptet [34], förvaret byggas i form av system av sprängda eller TBM-borrade tunnlar från vilkas golv deponeringshål för avfallskapslar borraras med 1.75 m diameter och 8 m djup (Figur 4.2). Sådan berggrund genomsetts av genomsläppliga sprickzoner och system av hydrauliskt och mekaniskt aktiva sprickor

och det är därför nödvändigt att isolera kapslarna från berget för vilket bentonitlera kommer att användas. Kravet på leran, som betecknas buffert, är dels att dess genomsläpplighet måste vara så låg att jontransport inte sker genom strömning utan via diffusion, dels att densitet och fasthet är tillräckliga för att hindra den 20 ton tunga koppar/stålkapseln att sjunka annat än marginellt samtidigt som eftergivligheten måste vara tillräcklig för att tektoniskt åstadkomna förskjutningar inte skall skada kapseln. Dessa villkor uppfylls av bentonitlera med hög smektithalt och en densitet i vattenmättat tillstånd av 1900-2100 kg/m³.

Bufferten måste vara homogen vilket åstadkoms genom att framställa den i form av kompakterade block med relativt god passning i deponeringshålen. En teknik för enaxlig kompression av lufttorrt eller något befuktat bentonitpulver har utvecklats för framställning av ringformiga och ostformiga block med 0.5 m tjocklek och 10 cm mindre diameter än hålen (jfr Figur 4.3). I spalten mellan buffertblock och bergvägg anbringas en fyllning av högkompakterade bentonitpellets som vattenmätas via perforerade rör som dras upp parallellt med vattenfyllningen. Kapseln förs sedan ned i hålrummet som skapats av de ringformiga blocken och täcks med ostformiga block. Häröver anbringas en massa av 30 % Na-bentonit och 70 % krossberg eller av naturlig lera av typ Friedland Ton. Sådan återfyllning anbringas också i tunnlar och ventilationsschakt. I tunnarna skjuts massan framåt-uppåt med bandtraktor i 30 cm tjocka lager så att en slänt med ca 30° lutning åstadkoms och lagren packas med hjälp av en grävmaskinburen vibroplatta till en torrdensitet av minst 1600 kg/m³. Denna densitet kan lätt åstadkommas i huvuddelen av fyllningen medan kompletterande packning med tryckluftdrivna verktyg måste användas för att uppnå tillräcklig densitet vid tunnelväggarna. Vattenmättnad av buffert och tunnelåterfyllning sker genom det undertryck som de starkt vattenabsorberande bentonitmaterialen har i kombination med det rådande vattentrycket på den aktuella nivån. Processen kan kräva flera tiotal år om berget är sprickfattigt.



Figur 4-2 Schematisk sektion av deponeringshål enligt KBS3-konceptet för förvaring av utbränt kärnbränsle [44].



Figur 4-3 Block av bentonitpulver pressat under 100 MPa tryck [45].

Kraven på fysikalisk funktion och kemisk beständighet hos bufferten, dvs kapslarnas lerinbäddning, är inte exakt definierade i alla avseenden och det gör att dess sammansättning inte heller är fullständigt specificerad. Kravet att jontransport genom bufferten inte skall bestämmas av genomströmning utan av diffusion innebär att något maximivärde för hydrauliska konduktiviteten inte är specificerat men den svarar i praktiken mot ett värde motsvarande E-11 m/s. Däremot måste svälltrycket ligga inom definierat område, preliminärt 1-7 MPa, eftersom ett lägsta värde av 1 MPa ses som erforderligt för att garantera tät kontakt mellan berg, buffert och kapsel, som inte tål högre tryck än ca 7 MPa med erforderlig säkerhetsfaktor.

Bärigheten hos bufferten måste vara tillräcklig för att grundbrott och momentan förskjutning av buffert och kapsel inte skall äga rum och för att långsam, krypbetingad sjunkning inte skall bli betydande. En sättning av några få centimeter är acceptabel men reologiska analyser har visat att den inte kommer att överstiga 1 cm då buffertens har en densitet i vattenmättat tillstånd av 1900-2100 kg/m³. FEM-beräkningar har demonstrerat att en snabb seismiskt genererad förskjutning utmed en flack bergspricka på halva kapselhöjden inte ger bristning eller plasticering av kapseln vid denna buffertdensitet om förskjutningen inte överstiger 10 cm. En sådan förskjutning kan beräkningsmässigt lösas ut vid jordbävningar med en magnitud av ca 6.

De stipulerade egenskaperna hos bufferten måste gälla under minst 100 000 år. Följande processer kan påverka långtidfunktionen:

- Under bevättningsfasen sker intransport av vatten i riktning mot den varma kapseln och förångning äger rum där med utfällning av salter som följd. Ångan påverkar smektitmineralen med viss lösning och frigörelse av kisel samt cementering som följd
- Kemisk omvandling (lösning och utfällning, jfr Kapitel 2). Den viktigaste omvandlingen sker genom att smektitkomponenten konverterar till icke-svällande mineral, i första hand illit
- Under flera hundra år råder en termisk gradient över bufferten som innebär att mineral löses och ger högre kiselhalt i porvattnet vid den varma kapseln än vid det kallare berget. Det ger transport av löst kisel i riktning mot berget och tendens till cementering och försprödning av bufferten i dess kallare del där kiselutfällning sker. Mineral med omvänd löslighet, t ex vissa sulfater och karbonater, fälls ut vid den varma kapseln och ger cementering och försprödning i denna del av bufferten

De kemiska modeller som används i SKB:s arbete visar att smektitomvandling och cementering har betydelse men att dessa processer inte ger någon omfattande påverkan på bufferten under den ca 2000 år långa hydrotermalperioden enligt termodynamiska beräkningar av det slag som nämnts i Kapitel 2.

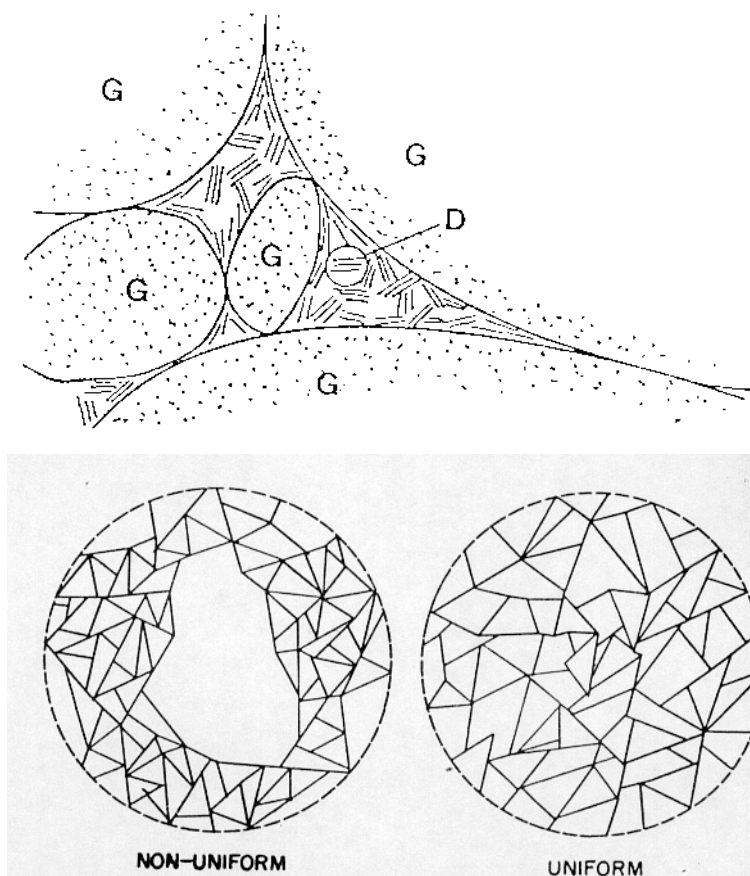
När det gäller **återfyllningen** ("backfillen") i tunnlar och schakt är kraven lägre än på bufferten som är kapslarnas närmaste omgivning. I andra länder har man sett det som en

möjlighet att inte återfylla tunnlar eller anbringa bergmassor men för svenskt vidkommande bedöms återfyllning vara nödvändig av följande skäl:

- Det är nödvändigt att skapa stöd till omgivande berg för att minimera uppluckring av tak och väggar i tunnarna eftersom det ger upphov till starkt ökad genomsläpplighet i tunnelns axiella riktning
- Det är viktigt att minimera uppsvällningen hos bufferten, som belastar återfyllningen med en kraft av upp till 800 ton per deponeringshål. Överstiger den ca 25 cm minskar densiteten hos buffertens översta del på ett sätt som kan ha betydelse för dess isoleringsverkan
- Om inte återfyllning sker med material som har högst samma hydrauliska konduktivitet som det omgivande berget utgör tunnarna genomsläppliga zoner i förvaret

Eftersom medelkonduktiviteten hos berget på ca 500 m djup normalt är av storleksordningen E-10 m/s måste återfyllningen ha denna eller något lägre genomsläpplighet. Det i förhållande till bufferten lägre ställda kravet innebär att mindre kvalificerat material kan användas för återfyllning. En princip som prövats är att blanda bentonit med ballastmaterial såsom krossberg. Det kan ge tillräckligt låg vattengenomsläpplighet samtidigt som kompressibiliteten blir låg, vilket är önskvärt. Svällningstrycket blir också betydligt lägre än för bufferten men tillräckligt högt för att det erforderliga bergstödet motsvarande 100 kPa skall skapas. Principen för sådana blandningars uppbyggnad och funktion illustreras av Figur 4-4, som visar mikrostrukturen med en smektitgel mellan ballastkornen och inverkan av saltvatten på smektitgelens struktur.

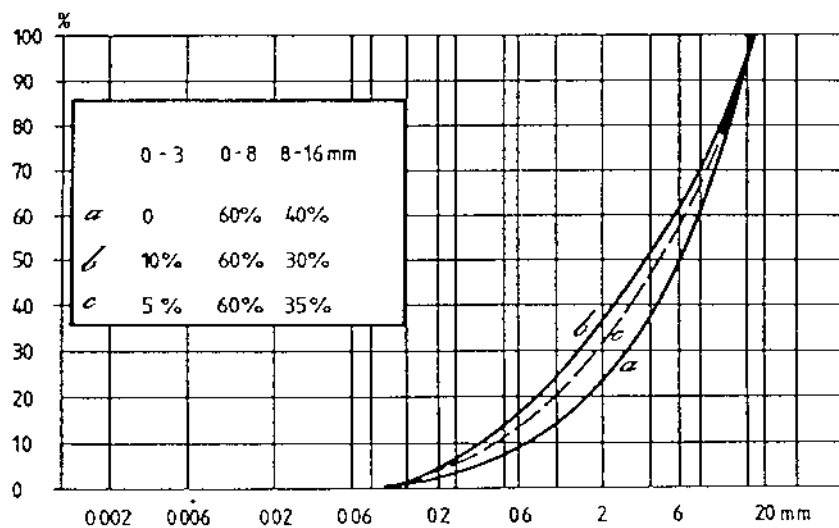
Blandningar av bentonit och ballastmaterial med lämplig sammansättning kan vara lämpliga också i tätkärnor för dammar därför att materialets uppbyggnad har filterkaraktär om ballastkornens storleksfördelning är lämplig ("Fullertyp") och friktionsvinkeln är relativt hög (25-30°), [39].



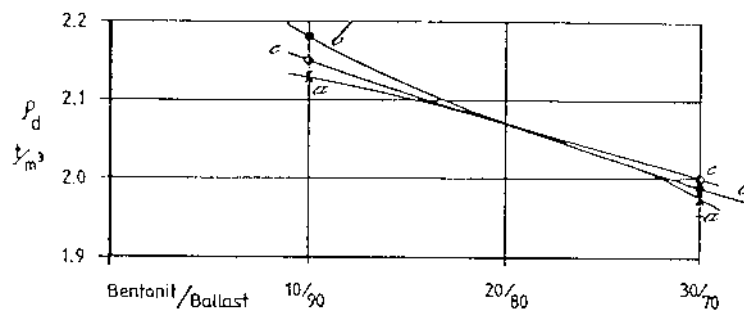
Figur 4-4 Blandning av bentonit och ballast. Överst: Smektitaggregat (D) ger en tätande lergel i ballastens porer. Underst: Sötvatten ger jämn struktur hos lergelen (uniform) medan saltvatten ger koagulering och ökad genomsläpplighet [34], [39].

Principen för sammansättningen är att välja en kornstorleksfördelning hos ballasten av Fullertyp, som innebär att finare korn passar in i mellanrummet mellan grövre korn, och att tillsätta smektitlera till minst den mängd som fordras för att täta porerna i ballastmassan. För det ändamålet kan en halt av endast ca 5 viktsprocent av Na-bentonit med en kvalitet motsvarande MX-80 vara tillfyllest men den får inte någon svällningskapacitet och utövar inte något svällningstryck och vid genomströmning med elektrolytrikt vatten blir genomsläppligheten relativt hög. För att få erforderliga marginaler när det gäller förmågan hos lermaterialet att fylla ut porer och ha viss svällningskapacitet måste halten av bentonit vara minst 10 viktsprocent och om svällningstrycket skall bli 100 kPa vid mättnad med elektrolytrikt vatten kan halten behöva vara så hög som 30 %.

För SFR-bottenbädden undersöktes de tre ballastgraderingar som redovisas i Figur 4-5, medan Figur 4-6 visar torrdensiteten vid Proctorpackning med olika bentonithalt. För bädden valdes ballast *b* och 10 viktsprocent GEKO/QI-bentonit från det tyska företaget IBECO och prepareringen innebar torrblandning och torrpäckning. Torrdensiteten hos den packade bädden var 2150 kg/m³ med liten spridning.



Figur 4-5 Graderingskurvor för SFR-bottenbädden. Vertikala axeln anger passerande viktandel vid sikting medan den horisontella axeln visar korndiametern [34].



Figur 4-6 Resultat av packningsförsök med betongballast och olika bentonithalter. Blandning och packning av lufttorra komponenter, dvs tillämpning av torrpäckningsförfarandet [34]

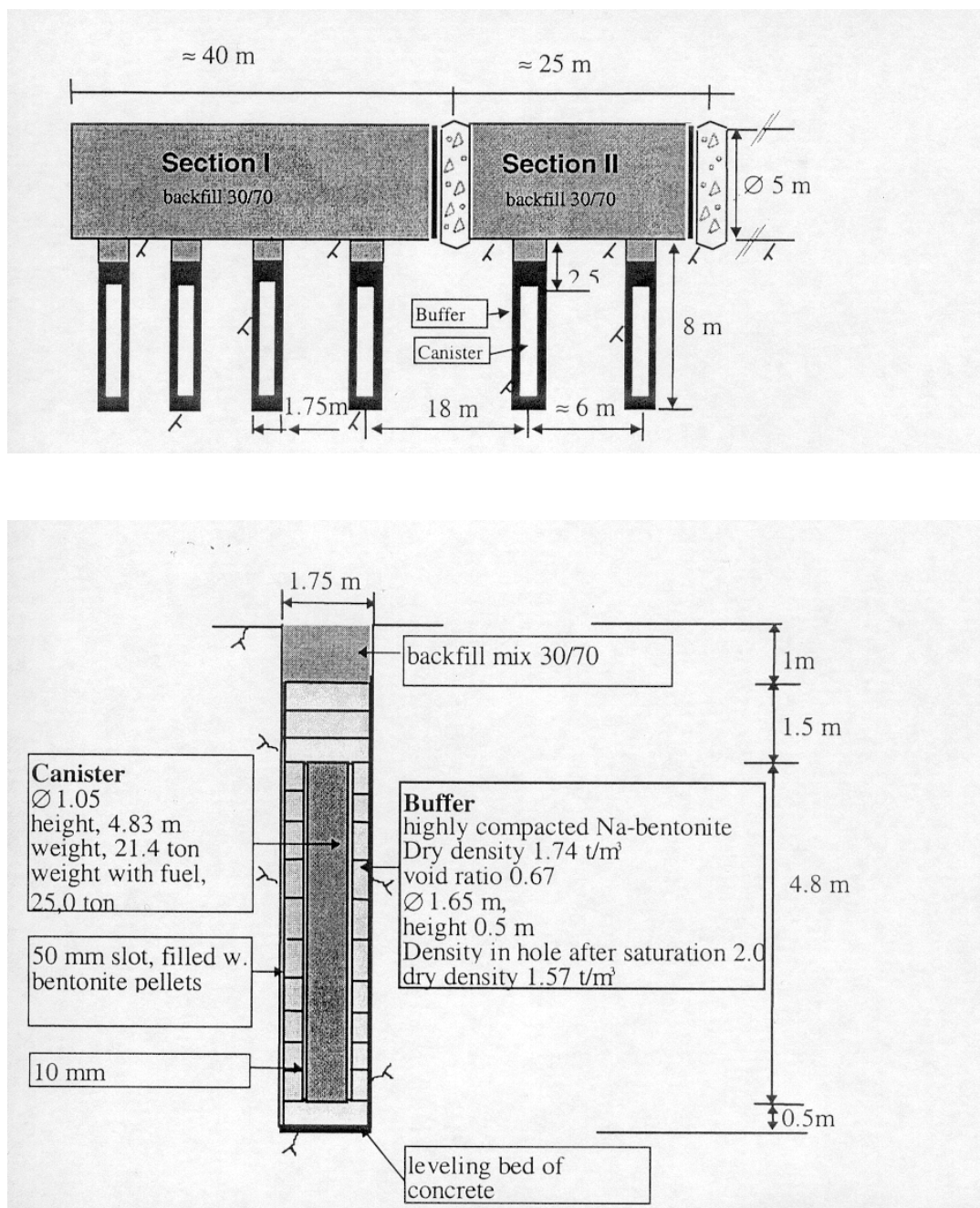
Typiska värden på hydraulisk konduktivitet och svällningstryck ges i Tabell 4.2.

Tabell 4-2 Typiska värden på bentonitblandningars vattengenomsläpplighet (K) och svälltryck (p_s) vid lågt elektrolytinhåll (L) och högt elektrolytinhåll (H), L/H-kvoter visade i tabellen [A]

Material	Densitet kg/m ³	vid	vattenmättnad, K, m/s	p _s , kPa
Na-bentonit	1400		E-11/E-9	100/0
Na-bentonit	1800		E-12/E-11	800/300
Na-bentonit	2100		E-14/E-14	10000/10000
Ca-bentonit	1400		>E-6	0
Ca-bentonit	1800		E-11/-10	500/50
Ca-bentonit	2100		E-13/E-13	10000/10000
10/90 bentonit/ballast	Na- 2100		E-9/E-7	100/20
30/70 bentonit/ballast	Na- 2100		E-10/E-9	500/200
50/50 bentonit/ballast	Na- 2100		E-12/E-10	2000/1000

Ökar man densiteten hos återfyllning bestående av 30/70 Na-bentonit/ballast till ca 2200 kg/m³ ökar svälltrycket till mer än 2 MPa, vilket innebär att tryckjämvikt uppkommer mellan den uppåt expanderande bufferten och den överliggande, sammanpressade återfyllningen. Den häremot svarande förskjutningen uppåt av gränsytan mellan buffert och återfyllning är av storleksordningen 0.25 m, vilket är acceptabelt.

Svensk Kärnbränslehantering AB driver f.n ett fullskaligt försök, Prototype Repository, i underjordslaboratoriet i Äspö, nära Oskarshamns kärnkraftverk, för att pröva teoretiska modeller för funktionen hos viktiga komponenter, främst bufferten och återfyllningen under realistiska förhållanden. Värmeavgivningen från det utbrända bränslet som kommer att finnas i kapslarna i ett verkligt slutförvar simuleras med hjälp av elektriska värmare. Figur 4-7 illustrerar försöksupställningen.



Figur 4-7 Preliminärt utförande av SKB's planerade experiment Prototype Repository Project i underjordslaboratoriet i Äspö, Oskarshamn [40].

5 Synpunkter på blandningar av bentonit och jord avsedda för användning i tätkärnor i fyllningsdammar

5.1 Inledning

En fyllningsdamm skall vara tillräckligt vattentät, tåla låga temperaturer, inre- och yttre erosion samt kunna ta upp och föra över de laster som uppkommer till undergrunden. Bentonit är extremt finkorning och har även en svällande förmåga vid upptagande av vatten, som gör att jorden kan få en låg vattengenomsläpplighet. Det kan eventuellt vara lämpligt att blanda in bentonit i material avsett för användning i tätkärnor i fyllningsdammar. Fältförsök med blandning av morän med gradering enligt Tabell 5-1 och låga bentonithalter har gett höga densiteter och låg hydraulisk konduktivitet som framgår av Tabell 5-2. De mycket låga värdena är erhållna vid laboratorieförsök och det är sannolikt att man kommer att få stor spridning och någon tiopotens högre medelvärde vid storskalig blandning och packning vid dammbyggen, bl a beroende på väderleksförhållandena.

Tabell 5-1 Exempel på lämplig gradering hos morän för blandning med finkornig bentonit [48].

Korndiameter, mm	Viktsprocent
<0.002	2
<0.006	5
<0.02	13
<0.06	26
<0.20	43
<0.60	57
<2.00	74
<6.00	86
<20.00	100

Tabell 5-2 Hydraulisk konduktivitet (K m/s) hos prover tagna ur fältpackad blandning av morän (Tabell 5.1) och finmald Na-bentonit. Genomströmning med destillerat vatten [48].

Bentonithalt	Torrdensitet kg/m ³	Densitet vid vattenmättnad, K, m/s
		kg/m ³
3 viktsprocent	1960	2235 E-11 - 2.5E-11
5 viktsprocent	2050	2290 E-12 - 3E-12

5.2 Användningsområden

Eventuella användningsområden för bentonitinblandad jord i fyllningsdammar kan vara vid (i) höjning av tätkärnor, (ii) reparation av tätkärnor, (iii) anslutningar till andra konstruktioner och vid svåråtkomliga ställen i dammen samt vid (iv) nya tätkärnor. Inverkande faktorer är naturligtvis kostnaden, tillgängligheten för lämpliga, naturliga täta jordar och att utförandet av en bentonitjord sker på lämpligt sätt.

5.3 Krav på en fyllningsdamm

5.3.1 Vattentäthet

Den övre gränsen för det totala tillåtna vattenläckaget genom en damm ger oftast en mycket högre vattenhastighet genom erosionskänsliga partier (tät kärnan) än vad som är tillåtet. Den dimensionerande vattenströmningshastigheten begränsas därför av sådana partier. Tillåten vattengenomsläpplighet för svenska moräner med tillräcklig finjordshalt ges ovan i avsnitt 3.1.2 och för filter i avsnitt 3.1.3.

5.3.2 Inre erosion och hydrauliskt brott

En tät och stabil tät kärna med väl designade filter på ömse sidor minskar risken för erosion. Den zon som skall förhindra inre erosion är huvudsakligen nedströmsfiltret. Kraven är enligt avsnitt 3.1.2 och 3.1.3 ovan. En känslig punkt är fasgränsen mellan tät kärna och undergrund, här kan ett vattenflöde och inre erosion lätt uppkomma.

5.3.3 Deformationer och Hållfasthet under last

Deformationerna under byggstadiet, efter första uppdämningen och under driftstadiet hos de olika zonerna får inte vara sådana att sprickor bildas i tät kärnan. Vid dålig packad tät kärna kan tät kärnan komma att hänga upp sig på omgivande material och därmed spricka, speciellt om plasticiteten är låg. Även valvbildning vid ojämn undergrund kan ge sprickor.

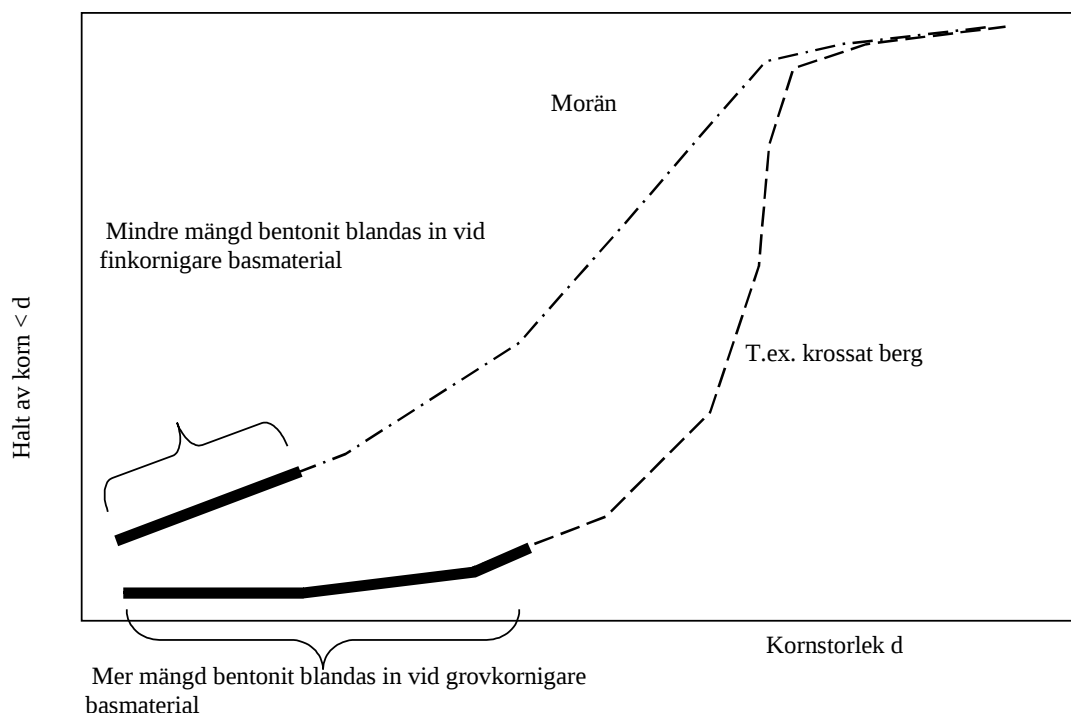
Uppströmsslänten skall vara stabil vid snabb avsänkning av magasinet. Tät kärnan och nedströmsslänten skall kunna ta upp och till undergrunden föra över jordlast och vattenlast. Slänterna får inte glida ut. Undergrunden skall kunna ta upp jordlast och vattenlast. Tät kärnan skall tåla aktuella porvattentryck utan att spräckas upp.

5.4 Delmaterial

5.4.1 Jordar

Lämpliga naturliga jordar för blandning med bentonit är morän, vilket illustreras av Tabell 5-1 och Tabell 5-2.

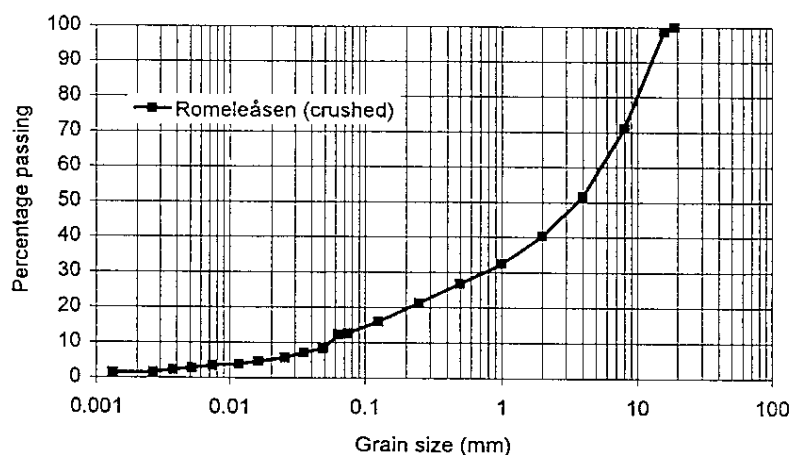
En jords siktkurva bestämmer i hög utsträckning hur hög porositeten och konduktiviteten för vatten blir. Både teoretiska och experimentella analyser har visat att en lämplig siktkurva är en så kallad Fullerkurva, som har parabelform. Åtminstone den finare delen av graderingskurvan bör ha denna form, jfr. Tabell 5-1 [26]. Speciellt andelen finmaterial måste vara tillräcklig för att få låghydraulisk konduktivitet. I Figur 5-1 påpekas att bentonitinblandningen anpassas till den typ av basmaterial som bentoniten blandas in i. Är basmaterialet av en månggraderat sort, t.ex. morän, så krävs en mindre mängd inblandad bentonit än när basmaterialet har en grövre kornfördelning för att tomrummen mellanrummen mellan kornen skall fyllas ut med bentonit (jfr Figur 4-4).



Figur 5-1 Principskiss över att mängden inblandat bentonit anpassas till typ av grundmaterial.

Om vatten skall tillsättas blandningen för att nå optimal vattenkvot måste man först blanda bentoniten med moränmaterialet och tillsätta vatten sist eftersom man annars får klumpbildning och fenomenet att bentoniten bildar en tunn beläggning på moränpartiklarna och inte fyller hålrummen mellan de grövre partiklarna. Materialen måste ha lågt vatteninnehåll, bentoniten högst 10 % vattenkvot och moränmaterialet högst 3-4 % vattenkvot. Blandningen måste ske i tvångsblandare. Tillsättning av vatten i sista steget kan vid låga bentonithalter ge separation och det innebär att torrblandning och torrpäckning kan vara lämplig. Blandning av lagervis utlagd morän och bentonit genom harvning eller annan fältteknik ger erfarenhetsmässigt stor variation i bentonithalt och därmed konduktivitet.

Andra månggraderade ballastmaterial som genom tillsats av bentonit kan bli lämpliga för användning i tätkärnor, är siktade fraktioner av sand och grus av glacialt ursprung, ev. med tillsats av kvartsbergmjöl (jfr.Figur 5-4). Också bergkrossmaterial har visat sig väl användbart som ballastmaterial för framställning av täta tunnelåterfyllningar därför att krossning i ett steg ofta ger en kornstorleksfördelning av Fullertyp (Figur 5-2). Blandningar av bergkross framtaget i ett eller två steg och bentonit kan vara mycket lämpliga som material i tätkärnor därför att inre friktionsvinkeln är högre än då ballastmaterialet har glacialt ursprung.



Figur 5-2 Exempel på kornstorleksfördelning vid krossning av berg av granittyp (Romeleåsen) [49].

5.4.2 Bentonit

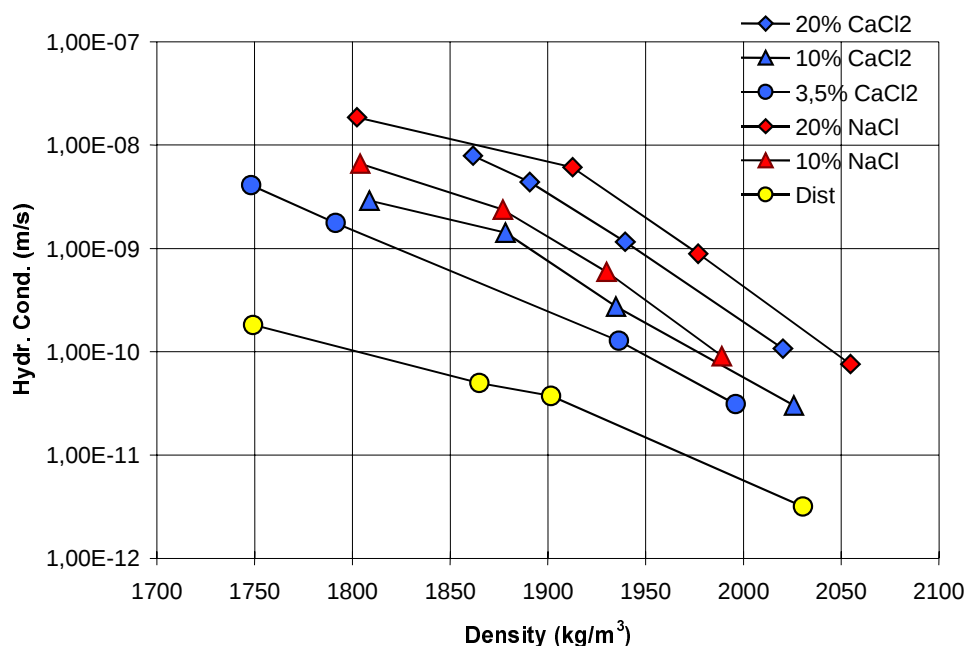
Lämpliga sorter av bentonit för framställning av blandningar med ballastmaterial såsom morän är kommersiella Na-bentoniter med hög smektithalt. Wyomingbentonit har i naturform Na som dominerande adsorberad katjon, vilket är eftersträvarsvärt (se Kap. 2), men kostnaden är normalt för hög för att den skall användas i så stor skala som jorddammbyggnad innebär. Medelhavs-bentoniterna utgörs av sodabehandlad Ca-bentonit och har praktiskt taget lika goda egenskaper. Kostnaden är ca en tredjedel av den som Wyomingbentonit betingar och det är sådana europeiska bentoniter som bör komma ifråga när det gäller blandning med ballastmaterial.

Na-bentonit alltid är att föredra men däremot är det inte säkert att hög smektithalt alltid är önskvärd eftersom svälltrycket kan vara för högt då överlagringstrycket är lågt. I övre delen av en tätkärna kan det därför vara möjligt att en måttligt smektithaltig lera kan vara lämpligare. Lämpliga bentoniter skall alltid ha montmorillonit som svällande komponent därför att andra svällande mineral, som t ex beidellit lättare omvandlas till illit. Bentoniter innehållande de svällande mineralen nontronit eller saponit kan ha något bättre kemisk stabilitet men har inte så goda vattenbindande egenskaper som montmorillonit.

Olämpliga sorter för användning vid blandning med ballastmaterial är sådana som har lägre smektithalt än 50-60 % och vars smektitmineral är beidellit, som omvandlas till icke svällande illit vid upptagning av kalium från t ex betongvatten.

Ett alternativ till att blanda bentonit med ballastmaterial är att använda naturliga leror med en smektithalt av 20-40 %. En sådan lera är den tertiära Friedland Ton (Frieton, Neubrandenburg, Tyskland) som vid de omfattande laboratorieundersökningar som gjorts visar sig ha mycket goda packningsegenskaper. Figur 5-3 ger exempel på den hydrauliska konduktiviteten vid olika densitet och porvattenkemi. Kostnaden för denna lera, som kan fås med önskad granulstorleksfördelning, är lägre än för

medelhavs Bentoniterna. Materialet kan packas till en torrdensitet av minst 1600 kg/m^3 (2000 kg/m^3 efter vattenmättnad) praktiskt taget oberoende av vattenkvoten.



Figur 5-3 Hydraulisk konduktivitet vid ödometerprovning av Friedland Ton. Materialet packades in i ödometern med Proctorteknik. Densitetsvärdena avser vattenmättat material. För t ex densiteten 2000 kg/m^3 (torrdensitet 1590 kg/m^3) är hydrauliska konduktiviteten vid genomströmning med elektrolytfattigt vatten ca $3 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ [50].

5.4.3 Vatten

Om bentonit ingår i tätkärnan och vatten skall användas för att uppnå optimal vattenkvot bör elektrolytfattigt vatten, t ex tillgängligt älvvatten, användas medan bräckt eller salt vatten inte bör komma ifråga. Bentonit har låg löslighet när pH ligger mellan 6 och 11, vilket innebär att vatten med lågt pH (myrvatten) och vatten som genomströmmat betong ($\text{pH} > 11$) ger upphov till lösning av bentoniten såsom beskrivits i Kapitel 2.3.2. Om bentonitmängden är stor är den kemiska buffringskapaciteten betydande och nedbrytningsprocessen mycket långsam.

En fyllningsdamm med bentonitinblandning tål under driftskedet utmärkt väl älvvatten och sjövattnet. Kalciumrikt vatten ger jonbyte och koagulering hos lerkomponenten men vid hög densitet är sådan inverkan relativt liten.

5.5 Utförande av jord-bentonitblandningar i fyllningsdamm

5.5.1 Förarbeten

Lämpliga förstudier är de vanliga för en fyllningsdamm. Den jord som bentoniten skall blandas med undersöks med avseende på kornstorlek och mineralinnehåll. Lämplig jord för blandning med bentonit är morän med litet innehåll av pH-sänkande mineral, t ex

pyrit, och med ringa karbonatinnehåll. Också bergkross kan komma ifråga med förbehållet att nämnda mineraltyper inte bör finnas i bergmaterialet.

5.5.2 Tillverkning och transport

Blandning med bentonit bör ske i blandningsstationer utrustade med tvångsblandare. Det är nödvändigt vid låga bentonithalter medan lagervis utläggning och upprepad bearbetning med lämpliga maskiner möjligen kan användas vid högre bentonithalter men . Harvning av lagervis utlagt ballast- och bentonitmaterial ger stor variation i bentonithalt. Tekniken måste i så fall prövas på plats.

5.5.3 Blandningsproportioner

Blandningsproportionerna beror på typ, gradering och ytstruktur hos den naturliga jorden, och på bentonittyp, mängd blandningsvatten, packningssätt samt på vilken densitet, hållfasthet och vattentäthet som man vill uppnå.

Frågan behandlas i Kapitel 3.1 och 4.5.

5.5.4 Arbetbarhet

Blandningen bör kunna hanteras med vanliga entreprenadmaskiner och vid temperaturer över ca +5 C. Det skall gå att justera blandningen så att den väl kan packas runt anslutningar eller svåråtkomliga ställen i en damm. Det kan kräva att tryckluftdrivna packningsverktyg används lokalt.

5.5.5 Konsistens

Konsistensen hos effektivt packningsbara blandningar styrs av vattenkvoten. Om materialet skall ha optimal vattenkvot ligger den normalt nära Atterbergs plasticitetsgräns, medan torrblandat och torrpackat material är lägre än denna gräns.

5.5.6 Stabilitet

Blandningen skall vara stabil och inte separera under utläggningen. Det innebär att ballastmaterialet inte skall innehålla större korn än ca 10-20 mm. Om blandningar av ballast och bentonit skall framställas vid optimal vattenkvot måste man göra klart att packningsarbetet i fält inte får vara effektivare än den laboratoriepackning som gjorts för att bestämma denna vattenkvot. Det kan annars uppkomma flyttillstånd genom att ett porvattenövertäck skapas och det kan också bli fallet om vatteninnehållet är ojämnt fördelat och lokalt är högre än optimal vattenkvot.

5.5.7 Utläggning och packning

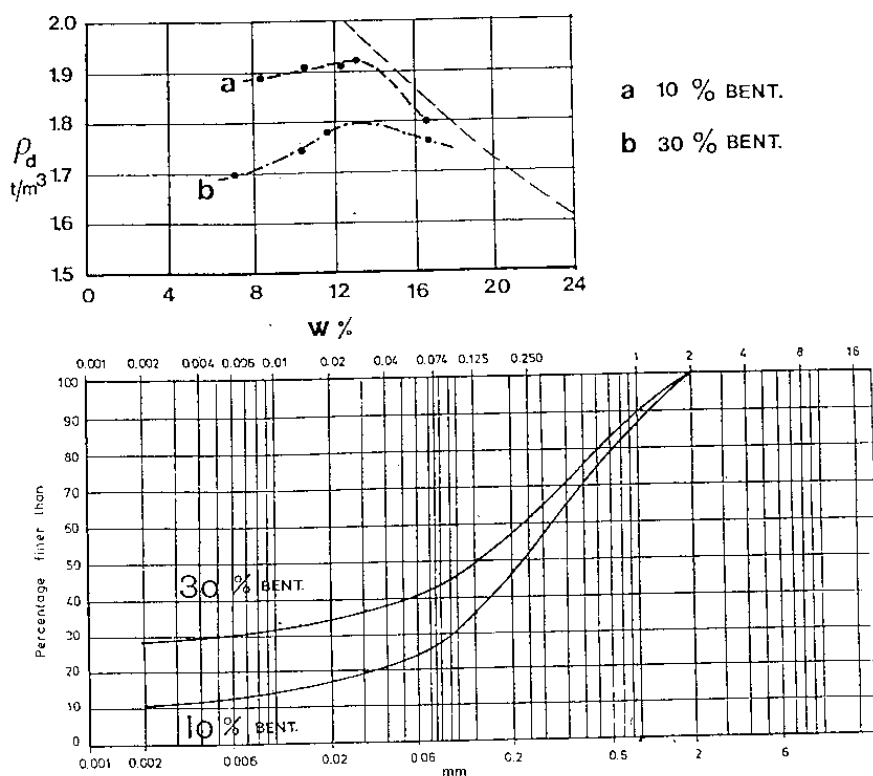
Blandning av lerfattig morän eller krossberg med bentonit kan ge en idealisk gradering och om blandningen sker i torrhet och torrpackas kan densiteten bli lika hög eller högre än vid packning vid optimal vattenkvot. Därmed undviks risken för uppkomst av höga portryck under packningsarbetet.

För att uppnå homogent tillstånd och hög torrdensitet skall utläggning av blandat material ske i relativt tunna lager och minst 10 överfarter göras med vibrovält eller oscillerande vält. Vid packning med 3.5 tons vibrovält (slätvält) blir torrdensiteten

mycket hög om bentonithalten vid 10 viktprocent och lagertjockleken är högst 0.3 m. Vid utnyttjande av effektivare vältar, t ex 12 tons vibrationsvältar eller tunga padfotvältar kan lagertjockleken ökas upp till ca 1 m men provpackning bör göras för att välja optimal tjocklek.

Erfarenheten visar att användning av lätta verktyg, t ex vibroplatta (padda) med 400 kg vikt, inte ger effektiv packning vid större lagertjocklek än ca 20 cm om bentonithalten är 10-20 viktprocent. För att säkerställa att erforderlig densitet uppnåts vid packningen i fält kan man använda neutronmätare, som ger tillförlitliga värden och rationella mätoperationer, men kalibrering av mätarna måste göras genom regelbunden bestämning av densiteten med vattenvolymeter [49].

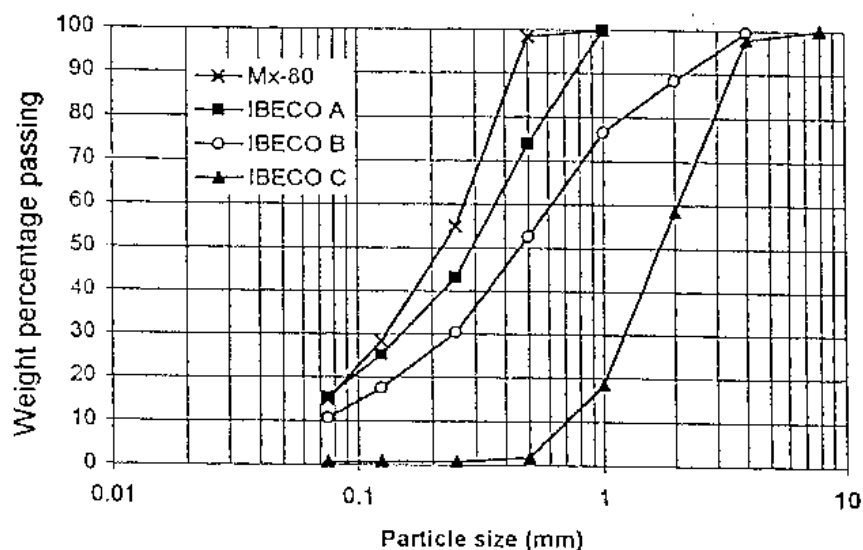
Figur 5-4 visar exempel på packningskurvor för blandningar av friktionsmaterial av glacialt ursprung med olika bentonithalter varav framgår att en högre densitet uppnås vid låg bentonithalt. Vattengenomsläppligheten vid respektive högsta densitet är emellertid betydligt lägre för blandningen med högre bentonithalt.



Figur 5-4 Resultat av packningsförsök med blandning av siktade fraktioner och MX-80-bentonit. Undre diagrammet visar kornfördelningen hos blandningarna som visar att minsta kornstorleken hos ballasten var ca 0.1 mm [34].

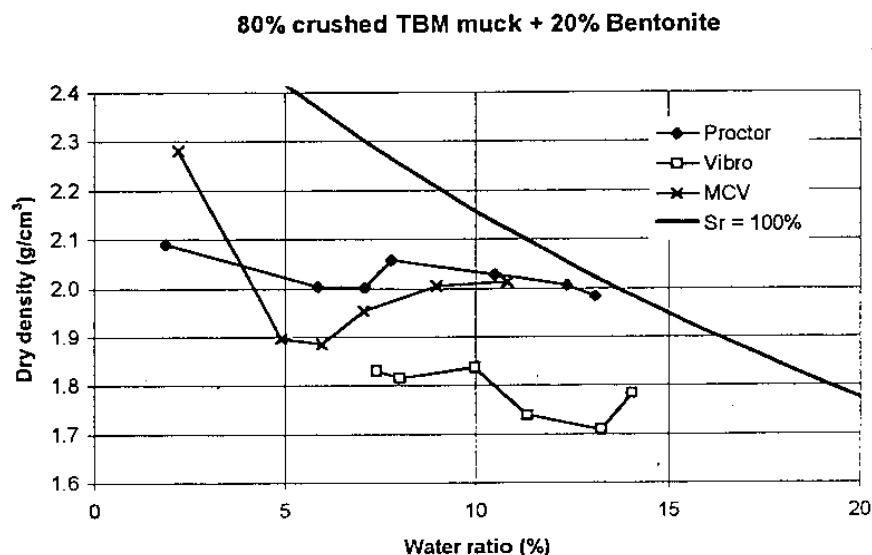
Inpackad mängd bentonit får inte vara så stor eller erhållen densitet så hög att svälltrycket orsakat av bentonitens uppfuktning överstiger effektivtryckte på någon nivå i dammen (kap. 2.2.2 och 4.5.3).

Bentonitmaterialet MX-80 har en kornstorleksfördelning enligt diagrammet i Figur 5.5, som också visar motsvarande fördelning hos kommersiella bentoniter från grekiska bentonitbrott. För blandning med ballastmaterial bör finkornigt bentonitmaterial användas och MX-80 har en lämplig gradering.



Figur 5-5 Kornstorleksfördelning hos kommersiella bentoniter [46].

Figur 5-6 visar exempel på försök med olika packningsmetoder på blandningar av 20 % MX-80 och 80 % krossberg av granittyp. Densitetsvärdena vid de lägsta vattenkvoterna som svarar mot torrblandning/torrrpackning överskrider dem vid "optimal" vattenkvot som ligger mellan 5 och 10 %.



Figur 5-6 Resultat av packningsförsök med blandning av 20 % MX-80 och 80 % krossberg [52].

Ett exempel på ett kvalificerat torrpäckningsprojekt är utförandet av den 1.5 m tjocka bottenbädden för betongsilon för medelaktivt avfall i Forsmark (jfr. Kapitel 4.5). Bädden består av en torrblandad och torrpäckad massa av 10 % Na-bentonit och 90 % lämpligt graderad ballast med torrdensiteten 2100 kg/m³. Utläggning skedde i lager om ca 30 cm och packning utfördes genom 10 överfarter med 5 tons vibrationsvält.

Hos naturligt lagrade jordar varierar porositeten med kornform, kornfördelning och sedimentationsförlopp. Den högsta porositeten fås hos ensorterade och finkorniga jordar [17]. Vid packning pressas luft och vatten ut ur jorden till omgivningen, men på grund av kvarvarande luft kan vattenmättnad i fält aldrig bli 100 %. Ju tätare jordmaterial är, desto svårare har luft och vatten att ta sig ut vid packning. Om inte uppbyggnaden och packning sker tillräckligt långsamt kan porvattentrycket bli så högt att stabiliteten äventyras. Högt porvattentryck kan däremot vara fördelaktigt när materialet vattenmättas vid den första uppdämningen och sättningen kan då bli mindre.

5.5.8 Lagertjocklekar

Tjockleken hos lager bestående av blandningar av bentonit och ballast som skall läggas ut för packning med vibrovält bestäms av vältens tyngd och antalet överfarter. Vid användning av 3.5 tons vibrovält har lämplig lagertjocklek visat sig vara ca 30 cm då bentonithalten varit 10-20 %. Vid tjockare lager krävs betydligt tyngre vältar eftersom bentonitmaterial har en starkt vibrationsdämpande effekt [51], [52], [53]. Padfot- och fårfotvältar har inte prövats vid utförande av de tunnelfyllningar av bentonitblandningar som utgör grunden för erfarenheten när det gäller sådana materials packbarhet.

5.5.9 Densitet och porositet i färdig konstruktion

Densiteten hos packade blandningar av ballast och bentonit vid packningsförsök i laboratoriet och i fält har diskuterats i detta kapitel och i Kapitel 4.5.

5.5.10 Uppfuktning och uttorkning i färdig konstruktion

Vattenmättnaden av packade blandningar av ballast och bentonit som utsätts för låga vattentryck, t ex nära dammkrönet, är mycket långsam och har karaktären av diffusion som styrs av bentonitkomponentens förmåga att absorbera vatten genom att skapa ett undertryck. Vid vattenövertryck av minst något hundratal kPa påskyndas bevätningen genom att vatten pressas in i massan.

Uttorkning kan knappast ske i en tätkärna eftersom en relativ fuktighet av 100 %, som kan antas råda i dammens närmaste omgivning under större delen av året, är tillräcklig för att bevara ett sådant vatteninnehåll i bentonitkomponenten att torksprickor inte uppstår.

5.5.11 Vattengenomsläpplighet och kapillaritet i färdig konstruktion

För ren bentonit har den hydrauliska konduktiviteten behandlats i kapitel 2.2.1 och för blandningar av bentonit och krossat berg i kapitel 4.5.

Kapillariteten hos bentonit är ganska litet känd.

5.5.12 Hållfasthet och deformationsegenskaper i färdig konstruktion

Den avgörande hållfasthetsparametern är inre friktionsvinkeln hos bentonit/ballastblandningar eftersom den bestämmer släntstabiliteten. Ren bentonit har en friktionsvinkel av 10-15° medan blandningar med 10-20 % bentonit har en inre friktionsvinkel av 25-30°. Eftersom lutningen hos tätkärnans slänter är betydligt högre måste ett tryck, orsakat av omgivande filter och stödjande fyllning finnas som garanterar stabiliteten.

Den odränerade skjuvhållfastheten kan antas vara lika med tangens för friktionsvinkeln multiplicerat med effektivtrycket på aktuell nivå.

Elasticitetsmodulen kan antas till cirka 150 ggr den odränerade skjuvhållfastheten.

5.5.13 Beständighet mot vattentryck och vattenflöde

Det finns en kritisk gradient för piping och erosion (jfr. Kap.2.2.1).

5.5.14 Beständighet mot aggressiva ämnen

Vattenkemin har viss betydelse för bentonitmaterialets beständighet men desto större inverkan på de fysikaliska egenskaperna påverkas. Sålunda har porvatten med Na som huvudkatjon och låg jonkoncentration goda svällnings- och gelbildningsegenskaper

medan Ca-rikt vatten och också hög salthalt med Na som dominerande jon ger koagulering och högre konduktivitet vid en och samma densitet. Se vidare i kapitel 2.3.

5.5.15 *Beständighet mot frost*

Bentonit med hög densitet fryser inte förrän temperaturen sjunkit till -20 a -30°C eftersom praktiskt taget hela vatteninnehållet är adsorberat till mineralfasen. Vid lägre densitet är den kritiska temperaturen högre men en viss nedsatt fryspunkt existerar.

De termiska egenskaperna hos bentonitmaterial bestäms av vatteninnehållet och densiteten [54]. För MX-80 bentonit är värmeledningstalet 0.6 till 1.2 W/m,K då portalet är 0.8 och vattenmättnadsgraden ökar från 40 till 100% . För blandningar av ballast och bentonit med bentonithalten 30% är värmeledningstalet vid höggradig vattenmättnad (93%) ca 2.5 W/m,K . För vattenmättad MX-80 bentonit med en densitet av 2170 kg/m^3 är värmekapaciteten ca 1100 Ws/kg,K och motsvarande värde är ca 1400 Ws/kg,K för vattenmättade blandningar av 20% bentonit och 80% ballast med densiteten 2150 kg/m^3 i vattenmättat tillstånd.

5.5.16 *Självläkande förmåga*

Bentonitmaterial är svällande och har därmed självläkande förmåga. Kompakterad Na bentonit har sålunda fortfarande gelform efter svällning till $3-5$ gånger ursprunglig volym i elektrolytfattigt vatten. För cement gäller att det stökiometriskt erforderliga vattencementtalet för fullständig hydratisering är ca 0.35 . Med användning av ca 10% flytmedel fås låg viskositet vid vct 0.30 , vilket alltså innebär att injekterad cementgrout av det slaget tar upp vatten och sväller med utfyllnad av ofullständig kontakt med omgivningen och självläkning av inre defekter som följd.

6 Behov av forskning och kompletterande utredningar

En angelägen uppgift är att utveckla bättre tätningsmedel och metoder för injektering av fyllningsdammar och betongdammar. Medlen bör kombinera de bästa egenskaperna hos både cement och bentonit, dvs ha mycket låg hydraulisk konduktivitet, svällningspotential, snabb härdning och stort motstånd mot piping och erosion. Injekteringstekniken bör också utvecklas och ”dynamisk” injektering är en utvecklingsbar ide.

En annan uppgift kan vara att genomföra studier av bentonitinblandning i jordmaterial för användning i tätkärnor enligt kapitel 5, kanske i ett praktikfall för en reell damm.

7 Ekonomi

Amerikansk bentonit kostar cirka 3000 SEK per ton. Europeisk bentonit kostar cirka 1000 – 1500 SEK per ton. Ett attraktivt bentonitmaterial är en naturlig lera med benämningen Friedland (kapitel 4.5.3 och 5.4.2), vilken kostar ca 1000 SEK/ton.

8 Referenser

- [1] Johansson, B, Johansson, S., Nilsson, R.; "Investigation and Repair of the Embankment Dam at Porjus Powerstation", Proceedings from the symposium "Repair and Upgrading of Dams", Stockholm 5-7 juni 1996
- [2] Nilsson Å., Ekström I., Söder C-O; "Inre erosion i svenska dammar, beskrivning och utvärdering av rapporterade sjungkropar", Elforskrapport 99:34, Elforsk AB, Stockholm december 1999.
- [3] Sjöström Ö., "Injektering av berg och jord", Betonghandbok Arbetsutförande utgåva 2, AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Örebro 1992.
- [4] Sjöström Ö., "Förstudie Reparation av jorddammar genom injektering", Elforskrapport 99:48, Elforsk AB, Stockholm 1999.
- [5] Kjellberg R., Norstedt U., Fagerström H., "Leakage in and reconstruction of the Juktan earth and rock fill dams", Q59-R36, 15:th congress on large dams, Lausanne 1985.
- [6] Wångeberg B., Personligt korrespondens, 2000.
- [7] Johansson M., Personlig korrespondens, 2000.
- [8] Dahlin O., Fagerström H ; "Hällby kraftverk, reparation av jorddamarna 1985-1986", VBB rapport nr 49155.
- [9] Jansson B., "Tätning av höger och vänster jorddamm vid Hällby kraftverk i Ångermanälven sept 1985-juni 1986", Stabilator-rapport
- [10] Pålsson S-O, Loman J-O; "Rapport från kontroll av injekteringsarbeten hösten 1993", VBB 1994.
- [11] Pålsson S-O, Loman J-O; "Rapport från kontroll av injekteringsarbeten hösten 1994", VBB 1995.
- [12] Ericsson J., Jender M.; "Examensarbete – Dokumentaion och undersökningar av skador i Lövödammen", Luleå Tekniska Universitet, 1998.
- [13] Push R., "Backfilling with mixtures of bentonite/ballast materials or natural smectitic clay?", TR-98-16, Svensk Kärnbränslehantering AB, 1998.
- [14] Savage D., Lind A., Arthur R. C., "Review of the properties and uses of bentonite as a buffer and backfill material", SKI Rapport 99:9, 1999.
- [15] Nationalencyklopedin
- [16] Gustafsson L., "Jord- och stenfyllningsdammar", Vattenfall, 1988
- [17] Andersson S., Rytters K., Sundquist K. J., kapitel "dammar" i Handboken Bygg Väg och Vattenbyggnader, 1985.
- [18] Ericsson J., Jender M., "Dokumentation och undersökning av skador i Lövödammen", Examensarbete 1998:335 CIV, 1998.
- [19] Eurenus J., Norstedt U., "Fyllningsdammar, dagens standard och utvecklingslinjer", Seminarium om dammar 1986 KTH, 1987.
- [20] Nilsson Å., "Fyllningsdammar", kap. 3.2 ingående i RIDAS, 1998
- [21] Widding S., "Några allmänna synpunkter på damminjektering", Seminarium om dammar 1986 KTH, 1987.

-
- [22] Dahlin O., Fagerström H., "Injektering av sättningsskada i Hällbydammen", Seminarium om dammar 1986 KTH, 1987.
 - [23] PM 2000-03-30 ingående i offertförfrågan för FDU för Hällbydammen, VBB Anläggning.
 - [24] Börgesson L., Johannesson L-E., "Thermo-hydro-mechanical modelling of water unsaturated buffer material", SKB working report 95-32. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm 1995.
 - [25] Börgesson L., Pusch R., "Rheological properties of a calcium smectite", Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm 1987.
 - [26] Pusch R., "Consequences of using crushed crystalline rock as ballast in KBS-3 tunnels instead of rounded quartz particles", Technical Report 95-14, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm 1995.
 - [27] Finnhammar P., Säfström T., "Performance of a cement-bentonite slurry cut-off wall – applied on the Öresund tunnel project", examensarbete 96/17, avd för Jord- och Bergmekanik, Inst. för Anläggning och Miljö, KTH, Stockholm 1996.
 - [28] Bredenberg H., Hestner K., Magnusson E., "Stödkonstruktioner", Handboken Bygg Geoteknik, LiberFörlag, Stockholm 1984.
 - [29] Anteckningar från möte med Bernt Olsson (BerO Konsult), Martine Brantberger (SKANSKA) och Tomas Ekström, Sycon Energikonsult AB, 2000-12-04, Solna.
 - [30] Brantberger M., "Metodik för förinjektering i uppsprucket hårt berg", licentiate avhandling 2056, avd för Jord- och Bergmekanik, Inst. för Anläggning och Miljö, KTH, Stockholm 2000.
 - [31] Alberts, Assarsson, Broms, Eriksson, Hansbo, Hartlén, Holm, Knutsson, Pramborg, "Jordförstärkning", Handboken Bygg Geoteknik, LiberFörlag, Stockholm 1984.
 - [32] Jansson B., "Tätning av höger och vänster jorrdamm vid Hällby kraftverk i Ångermanälven sept. 1985 – juni 1986", Stabilatorrapport.
 - [33] Buhrstedt K., Personlig kommunikation 2000.
 - [34] Pusch R, 1994. Waste Disposal in Rock, Developments in Geotechnical Engineering, 76. Elsevier Publ. Co (ISBN: 0-444-B89449-7).
 - [35] Pusch R, Karnland O, Hökmark H, Sanden T, Börgesson L, 1991. Final Report of the Stripa Project – Sealing properties and longevity of smectitic clay grouts, Technical Report TR 01-30, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden.
 - [36] Pusch R, Madsen F T, 1993. Aspects on the illitization of the Kinnekulle bentonites. Clays and Clay Minerals, Vol.43 (pp.261-270).
 - [37] Pusch R (1982). Chemical Interaction of clay buffer materials and concrete. SKB Technical Report SFR 82-01. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm.
 - [38] Pusch R, Börgesson L, Karnland O, Hökmark H, 1991. Final Report on Test 4 – Sealing of natural fine-fracture zone. Stripa Project Technical Report 91-26, SKB, Stockholm.

- [39] Pusch R, 1998. Backfilling with mixtures of bentonite/ballast materials or natural smectitic clay? SKB Technical Report TR 98-16, SKB, Stockholm.
- [40] Dahlström L-O, 1998. Test plan for the Prototype Repository, Progress Report HRL-98-24, SKB, Stockholm.
- [41] Pusch R, Karnland O, 1988. Hydrothermal effects on montmorillonite. A preliminary study. SKB Technical Report TR 88-15, SKB, Stockholm.
- [42] Pusch R, 1992. Executive summary and general conclusions of the Rock Sealing Project. Stripa Project, Technical Report 92-27, SKB, Stockholm.
- [43] Pusch R, 1978. Clay microstructure and ice nucleation. Research Report TULEA 1978:6, University of Luleå.
- [44] SKB, 2000. Äspö Hard Rock Laboratory, Annual Report 1999. SKB Technical Report TR-00-10, SKB, Stockholm.
- [45] Pusch R, 1999. Is montmorillonite-rich clay of MX-80 type the ideal buffer for isolation of HLW? SKB Technical Report TR-99-13, SKB, Stockholm.
- [46] Pusch R, 1996. Microstructural modeling of smectitic buffers and backfills. SKB Progress Report U-96-28, SKB, Stockholm.
- [47] Börgesson L, Johannesson L-E, Sanden T, 1996. Backfilled materials based on crushed rock – geotechnical properties determined in laboratory. SKB Progress Report HRL-96-15.
- [48] Pusch R, Alsterlind G, 1985. Experience from preparation and application of till/bentonite mixtures. Eng. Geol., Vol.21 (pp.377-382).
- [49] Pusch R, et al, 1997. The buffer and backfill handbook, Part 2: Materials and techniques. Under färdigställande.
- [50] Pågående laboratoriestudie.
- [51] Pusch R, Börgesson L, Ramqvist G, 1985. Buffer Mass Test – Volume II. Stripa Project, Technical Report TR 85-12, SKB, Stockholm.
- [52] Gunnarsson D, Johannesson L-E, Sanden T, Börgesson L, 1996. Field test of tunnel backfilling. Äspö Hard Rock Laboratory, Progress Report HRL-96-28, SKB, Stockholm.
- [53] Forssblad L, 2000. Packning. Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- [54] Börgesson L, Fredrikson A, Johannesson L-E, 1994. Heat conductivity of buffer materials. SKB Technical Report 94-29, SKB, Stockholm.
- [55] ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30. Telefax 08-677 25 35
www.elforsk.se