

Funktionskrav för bentonitblock till ett djupförvar för använt kärnbränsle

Lennart Börgesson
Clay Technology AB

Pal Kalbantner, Rolf Sjöblom
ÅF-Energikonsult Stockholm

December 2001

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

Tel 08-459 84 00
+46 8 459 84 00

Fax 08-661 57 19
+46 8 661 57 19



Funktionskrav för bentonitblock till ett djupförvar för använt kärnbränsle

Lennart Börgesson
Clay Technology AB

Pal Kalbantner, Rolf Sjöblom
ÅF-Energikonsult Stockholm

December 2001

Nyckelord: funktionskrav på bentonit, buffert, pressning av bentonitblock.

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas egna och behöver nödvändigtvis inte sammanfalla med SKB:s.

Sammanfattning

Syftet med det arbete som redovisas i denna rapport är att ge Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) ett förslag till formulering av funktionskrav för block av kompakterad bentonit som ska ingå i det bentonithölje som efter upptag av vatten ska bilda bufferten mellan kapsel och berg.

Syftet är också att ge SKB underlag för beslut om inriktning av det fortsatta utvecklingsarbetet inför val av referensteknik för blocktillverkning samt inför utformning av ett kvalitetssystem för buffertmaterialet.

I rapporten görs dock inga försök till härledning av funktionskraven. I stället postuleras dessa utgående från realistiska scenarier avseende processkedjan från utvinning av bentoniten vid brytningsorten - transport - beredning av pressmassa - kompaktering - hantering och lagring av pressande bentonitblock samt inplacering i deponeringshålet.

Utgångspunkten är SKB:s strategi att använda ett naturmaterial som efter ovan nämnda processer bildar buffert med egenskaper som nära anknyter till det ursprungliga materialet. Detta innebär att samtliga processteg ska vara så utformade att bentonitens egenskaper inte ändras i betydande grad.

Rapportens huvudsakliga resultat är som följer:

- En uppsättning funktionskrav finns redovisade. Dessa stämmer överens med de olika beskrivningar som ges av processkedjan. De är också generella och bedöms vara relativt invarianta i förhållande till olika utförandekrav och processkontroller.
- I processkedjan redovisas hela processkedjan från utvinning av bentoniten - transport - beredning av pressmassa - kompaktering - hantering och lagring samt inplacering i deponeringshålet.
- Redovisningarna av funktionskrav och processer förutses kunna utgöra ett underlag för jämförelser mellan enaxlig och isostatisk kompaktering och de bör också kunna utgöra ett viktigt underlag för SKB:s kvalitetsarbete.
- Risken för sprickbildning i bentonitblocken har identifierats som en viktig aspekt i samband med jämförelserna mellan kompakteringsteknikerna.
- I rapporten har även identifierats och sammanställts ett antal frågor av betydelse för det fortsatta utvecklingsarbetet med process och hantering.

Abstract

The main purpose of the presented work is to provide The Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB) with a proposed set of requirements regarding the functioning of the blocks of compacted bentonite. These blocks are intended to constitute the bentonite envelope which after uptake of water will form the buffer between the canister and the rock.

The purpose is also to provide a basis for SKB for their directioning of the continued development work for the selection of a reference technology and for creating a quality system for the buffer material.

No attempts are made in the report to derive the functional requirements. Instead, such requirements are postulated based on realistic scenarios regarding the chain of processes from excavation - transport - preparation of press powder - compaction - handling and emplacement in the deposition hole.

It is the strategy of SKB to use a natural material which after the above-mentioned processes forms a buffer with properties which closely resemble those of the original material. This implies that all process steps must be designed in such a way that the properties of the bentonite do not change to any significant degree with respect to the disposal function.

The main results in the report are as follows:

- A set of functional requirements are compiled and presented. These concord with the different descriptions given on the process steps. The requirements are generic and are assessed to be relatively invariant for various operational requirements and process controls.
- The process chain comprising excavation of bentonite - transport - preparation of press powder - compaction - handling and emplacement are explained.
- The presentations of functional requirements and processes are foreseen to constitute a basis for a comparison between uniaxial and isostatic compaction and can be an important basis for SKB's quality work.
- The development of cracks in the bentonite blocks has been identified as an important aspect for the comparison between the two compaction techniques.
- In the report issues of significance for the continued development work on processes and handling have been identified.

Innehåll

1	Bakgrund	9
2	Förutsättningar, syfte och omfattning	11
2.1	Förutsättningar för arbetet	11
2.2	Syfte	11
2.3	Omfattning	12
3	Bentonitbuffertens roll och funktion i ett slutförvar	13
3.1	Bakgrund	13
3.2	Funktionskrav för bufferten	13
3.3	Buffertegenskaper som ger önskad funktion	14
4	Aktiviteter i bentonitbuffertens tillverkningskedja	15
4.1	Inledning	15
4.2	Pulverråvara, utvinning, transport och beredning	17
4.3	Kompaktering	19
4.3.1	Enaxlig kompaktering	19
4.3.2	Isostatisk kompaktering	21
4.4	Mellanlagring och transport till deponeringsområdet	23
4.4.1	Medelhöga block	23
4.4.2	Höga block	23
4.5	Deponering	23
4.5.1	Medelhöga block	24
4.5.2	Höga block	24
5	Funktionskrav för bentonitblock	25
5.1	Inledning	25
5.2	Råvara	25
5.3	Pressmassa	25
5.4	Block	26
6	Funktionskrav – utförandekrav	27
7	Diskussion och slutsatser	29
8	Referenser	31

1 Bakgrund

Denna rapport är ett resultat av insatser som utförts på uppdrag av Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). En av SKB:s uppgifter är att utveckla teknik /1–3/ för att på ett säkert sätt slutförvara det använda bränsle som genereras i det svenska kärnkraftprogrammet. Enligt KBS-3-metoden, som är SKB:s referenssystem, ska det använda kärnbränslet deponeras i kapslar av stål och koppar på cirka 500 meters djup i svenskt, kristallint urberg. Kapslarna placeras i borrhåll deponeringshål med en buffert bestående av kompakterad bentonit i utrymmet mellan kapseln och berget. Hålens diameter är cirka 1,75 meter, dess djup cirka 8 meter och bentonitbuffertens tjocklek cirka 0,35 meter.

Redan tidigt i SKB:s program tillverkades höga block med önskad densitet genom isostatisk kompaktering av bentonitpulver /4–5/. Under 1990-talet har insatserna huvudsakligen avsett enaxligt kompakterade block /6/, men förutsättningarna för isostatisk kompaktering har också studerats /7/. Arbetet har bland annat resulterat i att höga block med lovande egenskaper har framställts med såväl isostatisk som enaxlig teknik. Ett antal samband har också indikerats eller konstaterats mellan olika parametrar i de ingående processerna.

Behovet av fortsatta insatser har inventerats och utgångspunkten för dessa är en hög ambitionsnivå där den teknik som tas fram ska fungera väl. Onormala händelser ska vara ovanliga. De samband som föreligger och som bestämmer förloppen i de olika processerna ska vara väl kända, helst både empiriskt och teoretiskt. Driftsbetingelserna ska också vara väl kartlagda och kända, så att gränsen mellan acceptabla och oönskade betingelser kan definieras.

Ett bentonitblock som läggs på plats i ett deponeringshål ska uppfylla krav avseende dels funktionen efter det att bufferten vattenmättats, dels funktionen efter inplacering i deponeringshålet och fram tills vattenmättnad har inträtt. Kraven beträffande buffertens funktion efter vattenmättnad återges i kapitel 3. Ett block ska också kunna hanteras, lagras och transporteras. Egenskaperna hos ett block är ett resultat av ett stort antal processteg med delvis komplicerade inbördes beroenden.

Processerna och sambanden beror av vilka val som gjorts beträffande slutförvarets utformning. Detta avser såväl blocktillverkningen som anknytande processer. För blocktillverkningen kan valen avse källa för råvaran, val av pulverberedningsmetod samt val av kompakteringsmetod. Anknytande processer som påverkar är framförallt val av deponeringsmetod, det vill säga horisontell eller vertikal deponering, deponering i delar eller i paket samt därmed sammanhängande val av blockstorlek.

2 Förutsättningar, syfte och omfattning

2.1 Förutsättningar för arbetet

Utförandet av en färdig buffert som kan visas uppfylla uppställda krav förutsätter således ett "buffertsystem". Säkerhetsanalysen ger funktionskraven för bufferten. "Buffertsystemet" kan indelas i delsystemen råvara, pressmassa, block, bentonithölje, som avser blocken inplacerade i deponeringshålet, och buffert, som avser den vattenmättade bentoniten. Vart och ett av dessa delsystem kan sedan tillordnas en uppsättning funktionskrav.

I denna rapport görs skillnad mellan funktionskrav och utförandekrav. Med utförandekrav avses de krav som ställs på en tillverkning med avseende på insatsvaror, produktionsutrustning, produktionsprocess, drift, kunskapsunderlag med mera för att produkten ska visas uppfylla funktionskraven.

En viktig förutsättning för att dessa begrepp ska kunna användas i praktiken är att de kan tillämpas på kollektiv av objekt, det vill säga verifiering av egenskaper ska kunna göras på många exemplar. Detta förutsätter bland annat att variationerna mellan olika exemplar kan hanteras.

En av grundtankarna bakom SKB:s val av referensmaterial för bufferten är att man ska kunna använda sig av ett naturligt material, som har existerat i tiotals miljoner år, och som därför kan förutses uppträda likartat även under slutförvarsförhållanden.

Utförda försök har indikerat att torkning, malning, kompaktering och vattenupptagning inte leder till några större förändringar av bentonitens buffertegenskaper.

I huvudsak är det därmed de egenskaper som naturmaterialet har som eftersträvas också i slutförvaret. En huvudpunkt i kvalitetsarbetet avseende processtegen utvinning - pulverberedning - blocktillverkning - hantering är därför att undvika att påverka bentoniten på ett sådant sätt att de ursprungliga egenskaperna förändras i betydande grad för förvarsskedet.

2.2 Syfte

Syftet med den utredningen som redovisas i denna rapport är i första hand att ge SKB ett förslag till formulering av funktionskrav för block av kompakterad bentonit som ska ingå i bentonithöljet samt att sammanställa och strukturera förutsättningarna för formulering av sådana funktionskrav.

Kraven är således inte identiska med dem som ställs på bufferten men måste vara helt kompatibla med dessa.

Syftet med utredningen är också att ge SKB ett underlag inför beslut om inriktning av det fortsatta utvecklingsarbetet och inför valet mellan enaxlig eller isostatisk kompakteringsteknik för blocktillverkning samt inför utformning av ett kvalitetssystem.

2.3 Omfattning

Funktionskraven utgör en del i ett relativt komplicerat nätverk av begrepp vilka är länkade till och inbördes avhängiga av varandra. Arbetet med uppställning av funktionskrav – liksom uppställning av utförandekrav – behöver därför vara en iterativ process.

I denna rapport görs inga försök till härledning av utförandekrav eller funktionskrav. Struktureringen utgår i stället från utformningen av ”buffertsystemet” som innefattar processtegen: råvara - pressmassa - block - bentonithölje - buffert. Detta utgår i sin tur från kända processer som ett resultat från utfört utvecklingsarbete samt från tidigare redovisade funktionskrav avseende bufferten.

Med denna ansats är rapportens uppläggning som följer.

I kapitel 3 redovisas tidigare framtagna funktionskrav för bufferten.

I kapitel 4 presenteras de referensalternativ som studeras samt processerna från råvara till bentonithölje. I detta avsnitt presenteras också med produktionen sammanhängande utförandekrav.

I kapitel 5 redovisas tänkbara funktionskrav för råvara, pressmassa, block och bentonithölje.

I kapitel 6 redovisas och diskuteras sambanden mellan utförandekrav och funktionskrav. I avsnittet görs också en kvalitativ värdering samt genomgång beträffande möjligheterna till kvantifiering av utförandekraven.

Slutligen görs i kapitel 7 en diskussion och värdering av olika aktiviteter i tillverkningsprocessen med avseende på deras betydelse för uppfyllandet av funktionskraven.

I kapitel 7 görs också en kort analys av följande:

- betydelsen av ökad kunskap,
- förutsättningar för jämförelser mellan isostatisk och enaxlig kompaktering,
- utveckling av kvalitetsarbete för bentonitbuffertens framställning.

I rapporten redovisas hanteringsgång, utförandekrav och funktionskrav för bentonitblock med olika höjd. Samtliga studerade blocktyper har full diameter.

För den typ av buffert som används för ingenjörsexperimenten i Äspö, projekt Återtag och Prototyp, erfordras skiv- och rörformiga block till en höjd av 7 m. Varje block har en höjd av cirka 500 mm och är begränsat av existerande enaxliga pressutrustning som är tillgänglig i Sverige. Teoretiskt kan blocken höjd ökas så att endast två eller tre block erfordras. De senare antas ha formen av ett rör med botten i ena änden eller en sådan, ett rör och en skiva. De medelhöga blocken kan tillverkas med enaxlig eller isostatisk kompakteringsteknik, medan de riktigt höga blocken kan troligen endast tillverkas med isostatisk teknik. Processen fram till kompakteringen antas vara nära identisk för samtliga block.

Blocken förutsätts tillverkas av bentonit av kvalitet MX-80 som levereras av Volclay Limited. Blocken arrangeras kring en vertikalt deponerad kapsel.

3 Bentonitbuffertens roll och funktion i ett slutförvar

3.1 Bakgrund

Utgångspunkten för val av bentonitkvalitet samt utformning av tillverkningsprocesser och hanteringssystem för bentonitblock är buffertens roll och funktion i ett slutförvar utformat i enlighet med KBS-3-metoden. Denna metod samt de krav som ställs beträffande buffertens roll och funktion är också – tillsammans med val av bentonitkvalitet, tillverkningsprocess och hanteringssystem – utgångspunkten för utformning av funktionskraven avseende råvara, pressmassa, block och bentonithölje.

Ett antal krav ställs /1–3/ på bentonitbufferten utgående från säkerhetsanalysens behov, vilket till exempel innebär krav på geometri, densitet och hydraulisk konduktivitet. Bentonitens tilltänkta funktion i slutförvaret är avhängigt av dess fysikaliska och kemiska egenskaper, som ej nämnvärt får påverkas av processkedjan utvinning - pulverberedning - blocktillverkning - hantering. Dessa krav refereras nedan i avsnitt 3.2 men motiveras inte närmare i denna rapport.

Buffertens uppgift är att bidra till och skapa en god kemisk miljö för kopparkapseln så att korroderande ämnen kan nå den endast i mycket långsam takt. Buffertens uppgift är vidare att bidra till och skapa en god fysikalisk miljö för kopparkapseln så att mekaniska påkänningar den utsätts för ligger inom acceptabla gränser. Buffertens uppgift är också att hindra och fördröja utläckage av radionuklider om kapseln så småningom penetreras.

Bufferten ska fullgöra denna uppgift under mycket lång tid vilket bland annat innebär att dess förändringar med tiden ska kunna bedömas. Vidare ska tillverkning, transport och hantering kunna utföras med säkerställd erforderlig kvalitet hos bufferten.

För att dessa uppgifter ska kunna fullföljas förutsätts bufferten helt omsluta och skydda kapseln, hålla den centrerad i deponeringshålet samt hindra vattenströmning så att diffusion kan visas vara den dominerande transportmekanismen.

3.2 Funktionskrav för bufferten

Ingen analys av funktionskrav efter det att vattenmättnad inträtt har utförts inom ramen för föreliggande rapport. En sådan analys har gjorts /1–3/ och dessa krav har därefter vidareutvecklats och omformulerats vilket återges nedan i kort sammandrag.

Kraven nedan är kvalitativa medan de slutliga funktionskraven förutses vara kvantitativa.

1. Hydrauliska konduktiviteten ska vara så låg att eventuell transport av korrodanter och radionuklider sker enbart genom diffusion.
2. Gasgenomsläppligheten ska vara tillräcklig för gasflöde från en penetrerad kapsel, men gasgenomgången får inte leda till kanaler eller hålrum som medger vattenflöde genom bufferten.
3. Svälltrycket ska vara tillräckligt högt för att ge bufferten en god kontakt med omgivande berg och med kapseln men inte högre än vad kapseln och omgivande berg kan utstå.

4. Deformerbarheten ska inte vara större än att kapslarnas läge behålls men heller inte mindre än att berg rörelser kan tas upp utan att kapslarna skadas.
5. Kolloidala partiklar ska fångas av buffertens filterfunktion.
6. Den temperatur som kan uppstå delvis som följd av de termiska egenskaperna får inte bli så hög att den leder till betydelsefulla fysikaliska eller kemiska förändringar av bufferten.

3.3 Buffertegenskaper som ger önskad funktion

Utgående från de ovan kvalitativt specificerade kraven kan ett antal erforderliga buffertegenskaper preliminärt definieras.

1. Hydraulisk konduktivitet. En buffert bestående av MX-80 med en densitet av 2 000 kg/m³ har en transportkapacitet för diffusion som är minst 10 000 gånger högre än den för advektion.
2. Jondiffusionsegenskaper. Inga speciella krav bedöms behöva ställas på bentoniten i detta avseende.
3. Gaskonduktivitet. Vätgas som genereras i samband med korrosion av kapselinsatsen av järn sedan kopparkapseln penetrerats ska kunna ta sig ut till berget utan att oacceptabelt höga tryck bildas. Inga kvarstående kanaler ska uppstå i bufferten efter utsläpp av vätgasen.
4. Deformationsegenskaper. Deformation av bufferten kan uppkomma till följd av dennas expansion uppåt mot återfyllnaden i tunneln samt genom berg rörelser. Deformationer får inte ge upphov till oacceptabel sprickbildning och ökad hydraulisk konduktivitet eller oacceptabla mekaniska påkänningar på kapseln. Utförda försök med MX-80 indikerar att materialet har goda deformationsegenskaper.
5. Mikrobiella egenskaper. Möjligheter till överlevnad för mikrober saknas om densiteten för MX-80 överstiger 1 900 kg/m³.
6. Termiska egenskaper. Frågan om termiska egenskaper hänger samman med termisk dimensionering (värmeavgivningen från bränslet i kapseln). Högsta bufferttemperatur har satts till 100°C.
7. Densitet. MX-80 bör efter vattenmättnad ha en densitet av 1 900–2 100 kg/m³.

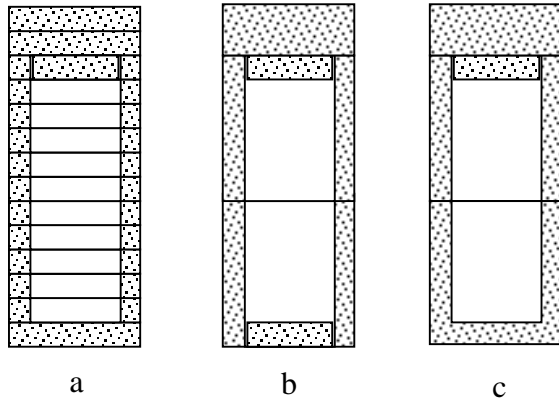
4 Aktiviteter i bentonitbuffertens tillverkningskedja

4.1 Inledning

Nedan redovisas en genomgång av aktiviteterna i bentonitbuffertens tillverkningskedja råvara - pressmassa - block - bentonithölje - buffert.

Genomgången baseras på bland annat följande förutsättningar och antaganden:

1. Råvaran är densamma som den som används för tillverkning av Volclays kvalitet MX-80. Den antas erhållas i Wyoming i det skick den har efter grovkrossning och torkning i ugn.
2. Beredning av pressmassa. Råvaran finkrossas och vindsiktas. Därutöver ingår befuktning i Forbergblandare eller Eirichblandare vilket dock inte antas påverka storleksfördelningen av agglomeratet i betydande grad.
3. Tillverkning av block genom kompaktering av pressmassa. De skilda arrangemangen av olika höga block i deponeringshåll visas i figur 1. Det lilla blocket i den övre delen placeras på kapseln med hjälp av deponeringsmaskinen i dess nuvarande utformning men dessa kan ändras i framtiden. Två blockutformningar ingår:
 - a) Medelhöga block eller ringar med ytterdiametern 1,65 m och nominella höjden 0,5 m. Innerdiametern på ringarna uppgår till 1,07 m vilket ger en vägg tjocklek 0,29 m.
 - b) Höga block vilka innefattar tre typer:
 - en rotationssymmetrisk kropp i form av ett rör med ändplugg ($D=1,65/1,07$ m, $H=$ cirka 2,5 m),
 - en rotationssymmetrisk kropp i form av ett rör ($D=1,65/1,07$ m, $H=$ cirka 2,5 m),
 - en rotationssymmetrisk kropp i form av en cylinder ($D=1,65$ m, $H=$ cirka 1 m).
4. Kompaktering med endera av två metoder:
 - a) Enaxlig teknik. Med denna teknik förutsätts medelhöga block tillverkas.
 - b) Isostatisk teknik. Med denna teknik förutsätts både medelhöga och höga block kunna tillverkas.
5. Hantering, transport och mellanlagring. För detta finns i dag inga färdiga system för normal drift. Blocken förutsätts dock vara sköra samt känsliga för bland annat förändringar i fuktinnehållet.
6. Deponering sker i ett vertikalt orienterat deponeringshåll.
7. Inplacering av block och kapsel sker i följande ordning:
 - a) block som ska befinna sig under kapseln,
 - b) block som ska omsluta kapseln,
 - c) kapseln,
 - d) block som ska befinna sig ovanför kapseln.
8. Mättnad och homogenisering efter inplacering.



Figur 1. Uppbyggnaden av buffertmaterial med olika typer av block och ringar.

Huvudindelningen av aktiviteterna för de olika alternativen redovisas i tabell 1.

Utgående från funktionskraven har en tillverkningskedja tagits fram. De skilda aktiviteterna i kedjan har brutits ner till en sådan detaljeringsgrad att processen kan beskrivas. Beskrivningen ligger till grund för formulering av kraven på kedjans olika delar. Detaljeringsgraden behöver också vara sådan att strukturerade bedömningar kan göras av relevansen av olika moment för olika frågeställningar, till exempel val av kompakteringsteknik.

Tabell 1. Sammanställning av aktiviteter samt alternativa blockutformningar och processer.

Medelhöga block, enaxlig kompakteringsteknik	Medelhöga block, isostatisk kompakteringsteknik	Höga block, isostatisk kompakteringsteknik
Utvinning av råbentonit		
Transport		
Beredning av pressmassa		
Tillverkning av block med enaxlig kompakteringsteknik	Tillverkning av block med isostatisk kompakteringsteknik	Tillverkning av block med isostatisk kompakteringsteknik
Transport och mellanlagring, medelhöga block		Transport och mellanlagring, höga block
Deponering, medelhöga block	Deponering, medelhöga block	Deponering, höga block
Mättnad och homogenisering		

Nedanstående beskrivningar av processer med redovisningar av ingående moment avser en möjlig metod för serieproduktion av bentonitblock för användning i samband med vertikal deponering.

Beskrivningarna utgår där så är möjligt från verkliga utrustningar, anläggningar och processer. Detta gäller inte minst information som erhållits från Volclay Limited, det vill säga leverantören av SKB:s referenskvalitet MX-80. När det gäller system för transport, mellanlagring och hantering av färdiga block finns nu praktiskt driftsmässig erfarenheter från ingenjörsexperimentet i Äspö där i storleksordningen 100 bentonitenheter pressats, mellanlagrats i storleksordningen ett år efter deponeringen. Det bör betonas att de i denna rapport beskrivna systemen inkluderas endast med syfte att ge underlag för formulering av funktionskrav med mera.

4.2 Pulverråvara, utvinning, transport och beredning

Beskrivningen av utvinningen följer i stora drag framställningen i /8/ samt de referenser som åberopas i denna rapport. Framställningen baseras också på information som erhållits direkt från företrädare för Volclay Limited.

Den fyndighet som utnyttjas finns i South Dakota, Wyoming eller Montana i nordvästra USA. Fyndigheten har valts med utgångspunkt från kraven på hög kvalitet och en hög halt utbytbar natrium i förhållande till halten utbytbar kalcium. Den bentonit som är av intresse förekommer i lager med en mäktighet som uppgår till mellan 0,5 och 3 meter.

Innan själva brytningen sker avlägsnas ett täckskikt. Bentoniten tas sedan upp med ”skrapmaskiner” och frontlastare.

Trots det torra klimatet uppgår fukthalten hos denna ”råbentonit” till mellan 25 och 30 viktsprocent. Tidigare sänkte man fukthalten före transport till anläggningen genom att låta bentoniten ligga utbredd på marken över sommarsäsongen för att torka. I samband med detta utfördes även bearbetning, ”farming” eller ”working”, av bentoniten som består i att man med jämna mellanrum kör över upplagen med ett slags tallriksharv.

Några säkra uppgifter om effekten av denna operation har inte påträffats. Tänkbara effekter är som följer:

- Effektivisering av torkningen så att den efterföljande torkningen i roterugn sker jämnare över aggregatens volym.
- Oxidation av tvåvärt järn till trevärt vilket kan tänkas påverka redoxförhållandet i bentoniten.
- Karbonatisering med hjälp av luftens innehåll av koldioxid vilket kan tänkas innebära bindning av utbytbar kalcium och förhöjning av effektiva förhållandet mellan utbytbar natrium och kalcium.

Processen med ”farming” kompletteras med en torkning i roterugn, vilket innebär att fukthalten reduceras ner till cirka 10–15 procent innan bentoniten levereras.

Vid fabriksanläggningen blandas råvaror till önskad sammansättning. I samband med denna förutses bentoniten kunna grovkrossas till klumpar mindre än cirka 20 mm. Det är en kvalitet som utvunnits på detta sätt som SKB förutses köpa i USA.

Tillverkningen utförs på ett kommersiellt sätt vilket bland annat innebär att detaljer kring framställningen normalt inte lämnas ut. Det finns emellertid ett produktblad i vilket ett fåtal uppgifter finns specificerade. För användning av bentonit för slutförvarsändamål kan ett särskilt kvalitetssäkringsprogram förutses. Ett sådant program bör innefatta såväl bentoniten ”fritt fabrik” som de efterföljande hanteringsstegen.

Bentoniten fraktas i bulk per järnväg till de stora sjöarna för sjötransport till Sverige. Transporten sker med bulkfartyg vars högsta lastkapacitet uppgår till 10 000 à 15 000 ton beroende på bland annat beroende på vilken hamn i Sverige som fartyget ska angöra. Lastning kan ske med transportband och avlastning med kran och skopa. På senare tid har det blivit vanligt att transporten företas med självlossande båt som töms direkt till bentonitlagret i omlastningshamnen.

Tänkbar påverkan på bentoniten från båttransport och lastning/lossning innefattar inläckage av havsvatten samt kontamination från tömningsutrustningen.

Vid full drift i slutförvaret kan SKB:s behov av bentonit uppskattas till en till två båtlaster av ovan angiven storlek per år. I anslutning till den svenska hamnen arrangeras ett upplag under tak med utrymme för cirka ett års förbrukning. Upplaget antas bestå av en betongplatta med en långsträckt byggnad över. Vid påfyllning antas bentoniten fyllas på högen från taknocken. Lagret ska vara torrt men inget krav på uppvärmning föreligger i mellanlagret i hamnen. Vid utlastning av bentonit från lagret antas detta ske med hjälp av en frontlastare som lastar direkt i containrar på järnvägsvagnar eller på lastbilar för transport till produktionsbyggnaden vid djupförvaret. Lasten ska vara skyddad mot regn under hantering och transport.

Tänkbar påverkan på bentoniten i samband med mellanlagring och transport innefattar frysning, segregering till följd av hantering, kontamination samt ofullständig åtskillnad mellan olika satser.

I produktionsbyggnaden vid djupförvaret töms containrarna successivt på en bandtransportör som för bentoniten till en kross och krossas till en största dimension av cirka 2 millimeter. Finfraktionen frånskiljs genom vindsiktning och återförs till det obehandlade materialet. Grovfraktionen förs till silo för mellanlagring inne i produktionsbyggnaden.

Valet av kornform, kornstorlek och kornstorleksfördelning med mera styrs sannolikt av flera faktorer. Underlag för gränssättning för produktion förutses kunna göras utgående från resultat från studier av dessa samband.

Någon dag före pressningen tas en lämplig mängd material ut från silon och doseras till en blandare i vilken slutjustering av fukthalten sker. Pulvret förs till den silo som finns i anslutning till pressen och materialet ska nu ha en temperatur som inte underskrider 15°C för att inte problem ska uppstå i samband med pressningen.

4.3 Kompaktering

4.3.1 Enaxlig kompaktering

Nedanstående beskrivningen avser enaxlig kompaktering av medelhöga block med en nominell höjd av 0,5 meter.

Den enaxliga kompaktering som beskrivs nedan utgår dels från kompaktering av block och ringar med full diameter som utförts hos Hydroweld i Ystad, dels från hur olika anläggningar för liknande hantering och produktion är utformade. Utseendet av pressformen från pressningen framgår av figur 2 nedan.

Pressverktyget smörjs med ett organiskt smörjmedel före påfyllningen av pulver. Denna operation kan utföras automatiskt med ett robotstyrt rollerverktyg vilket matas med smörjfett i proportion till rotationen av rollern. Detta innebär att ett jämntjockt skikt läggs på pressverktygets innerytan. På detta sätt erhålls en jämn smörjning över hela ytan vilket är en förutsättning för en likformig kompaktering och eliminerar risken för höga spänningar och utveckling av vissa typer av sprickor i samband med uttryckningen. Smörjningen är också nödvändig för att reducera verktygsslitage eftersom bentonit innehåller cirka 15 procent kvarts.

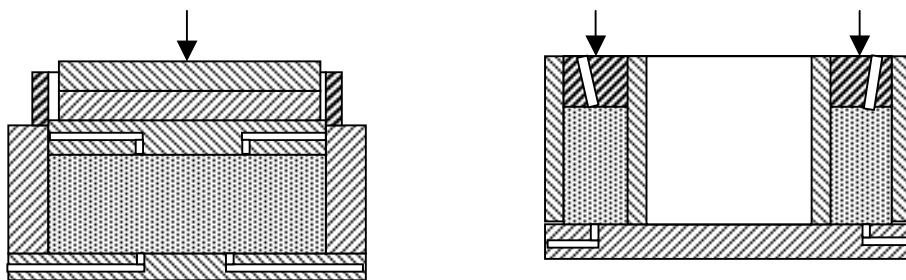
Pressverktyget fylls med en lämpligt avpassad mängd pulver från silon med hjälp av en särskild påfyllningsanordning. Denna är utformad på ett sådant sätt att en jämn fyllning över hela volymen säkerställs. I samband med att fyllningen avslutas justeras pulvrets övre nivå så att den blir jämn. Att nivån verkligen blir jämn säkerställs i första hand genom administrativ kontroll.

En komprimeringsring (eller skiva) läggs ovanpå pulvret. Denna, liksom botten hos verktyget tätar mot mantelytorna hos pressverktyget genom O-ringar.

Evakuering av luft görs genom ett antal filter vilka stöds av ett poröst material. Filtren har sådana positioner och en sådan fördelning att en god evakuering över hela pulvervolymen kan säkerställas.

Det evakuerade pressverktyget med sitt innehåll av bentonit, som befinner sig på en vagn, förs in i huvudpressens gap. När vagnen kommit på plats och centrerats i pressen sänks vagnen med pressverktyget ner mot pressbordet.

Pressningsoperationen är optimerad med hänsyn till dels materialegenskaper, dels pumpkapacitet. Sammantaget innebär detta att trycket stegras och sänks relativt snabbt vid låga tryck och långsamt vid höga tryck. Dessutom ingår en hålltid vid maximalt tryck samt eventuellt även pulserande tryckhållning. Tänkbara parametrar för presscykeln kan vara en hålltid på 30 minuter och en totaltid på 50 minuter.



Figur 2. Verktøy for enaxlig pressning av block respektive ring.

Efter pressningsoperationen lyfts pressverktyget upp från underlaget. Distanselement läggs under verktygets yttre sarg och en stötabsoberande kudde under verktygets botten läggs på plats. Pressen aktiveras åter varvid bentonitblocket trycks ut ur den yttre cylindriska delen av pressverktyget. (Den inre släpper lättare till följd av att bentoniten expanderar mer än stålet i samband med tryckavlastningen.) Uttryckningen underlättas av att pressverktyget är svagt koniskt, cirka 4 grader släppning, med den större diametern nedtill.

Vagnens cylindrar verkar åter så att pressverktygen bärs av hjulen varefter vagnen förs tillbaka till fyllnings- och tömningspositionen. Det finns en sådan position på vardera sidan av pressen.



Figur 3. Ovanstående foton visar pressning av bentonitblock för experimenten i Äspö. På det övre syns hur pulvret fylls i formen och på det undre syns det färdigpressade blocket lyftas.

Bentonitblocket friläggs genom att komprimeringsring (eller skiva) samt pressverktygets inre och yttre cylindrar lyfts bort.

Bentonitblocket placeras i en karusellsvarv där mantelytan befrias från rester av smörjfettet.

Bentonitblocket placeras därefter i en inspektionsposition. Där sker en visuell inspektion med avseende på sprickor och andra diskontinuiteter. Defekta block kan gå tillbaka till krossning och ny pressning eller utnyttjas för inblandning i återfyllnadsmaterialet.

Bentonitblocket placeras på en transportpall av stål med lufttät kåpa.

4.3.2 Isostatisk kompaktering

Medelhöga block

Den isostatiska kompaktering som beskrivs nedan utgår från den produktion av isolatorer som sker hos Ifö Ceramics i Bromölla.

Pressverktyget består av en perforerad behållare (kanister) som omsluter en gummisäck. När den tilltänkta produkten är ett rör ingår dessutom ett inre rör i gummisäcken.

Pressverktyget fylls med justering av volym och övre nivå på samma sätt som för enaxlig pressning.

Gummisäcken försluts med hjälp av spännringar samt ett lock av gummiduk. Förslutningen avser såväl den yttre delen av duken som ligger an mot kanistern som den eventuella inre delen som kommer till användning vid tillverkning av rörformade block.

Pressverktyget evakueras genom en nippel i locket som också innehåller ett ”inbyggt” luftfilter. Evakueringen pågår under så lång tid som erfordras för att en god evakuering ska erhållas över hela volymen. Efter evakueringen avlägsnas ett eventuellt innerrör.

Det evakuerade pressverktyget med sitt innehåll av bentonit förs in i pressens tryck-kammare med hjälp av en travers. Tryckkammaren innehåller vatten och den genom nedsänkningen undanträngda volymen sugs över i ett särskilt buffertkärl. Vattnet i tryckkammaren kommunicerar med hydrauloljesystemet genom ett gummimembran som täcker den inre mantelytan i tryckkammarcylindern.

Tryckkammarcylinderns lock läggs på med hjälp av hydraulik.

Det trådlindade oket för presscylinderns botten och lock rullas med hydraulik till komprimeringsposition (det vill säga position där lock och botten kan hållas på plats). Detta arrangemang medger användande av två tryckkammare per press.

Pressningsoperationen är optimerad med hänsyn till dels materialegenskaper, dels pumpkapacitet. Sammantaget innebär detta att trycket stegras och sänks relativt raskt vid låga tryck och långsamt vid höga tryck. Dessutom ingår en hålltid vid maximalt tryck. Tänkbara parametrar för presscykeln kan vara en hålltid på 30 minuter och en totaltid på 40 minuter.

Oket för presscylinderns botten och lock rullas bort. Presscylinderns lock öppnas.

Kanistern med gummisäck och det kompakterade bentonitblocket lyfts upp med hjälp av en travers och förs till en frilägningsposition.

I frilägningspositionen lyfts blocket hydrauliskt i förhållande till kanistern så att sidoytorna friläggs.

Gummidukslocket frigörs och tas av. Gummiduken på sidorna dras av.

Bentonitblocket placeras i en karusellsvav där ojämnheter i övre ändytor samt sidoytorna elimineras. Ett tänkbart avverkningsdjup är 10 mm.

Bentonitblocket placeras därefter i en inspektionsposition. Inspektionen och den efterföljande hanteringen går till på samma sätt som beskrivs i avsnitt 4.3.1.

Höga block

Isostatisk kompaktering för höga block är till väsentliga delar identisk med isostatisk kompaktering av skivor och rör. Följande skillnader föreligger:

Höga block är rotationssymmetriska och har formen av ett rör, eller ett rör med en ändplugg. De kräver därmed en annorlunda och något mera komplicerad utformning av gummisäcken.

Påfyllning av pulver behöver göras mera omsorgsfullt särskilt beträffande bottendelen. Att nivån verkligen blir jämn säkerställs i första hand genom administrativ kontroll.

Svarvning av innerytan kräver annorlunda utformning av svarven.



Figur 4. Isostatisk pressning av isolatorer vid företaget Ifö, Bromölla.

4.4 Mellanlagring och transport till deponeringsområdet

4.4.1 Medelhöga block

Lastpallen med pressade block och ringar lyfts med hjälp av en gaffeltruck och placeras i ett tempererat mellanlager i produktionsbyggnaden. Mellanlager planeras ha en begränsad kapacitet för att preliminärt klara en veckas deponering trots produktionsstopp. Normalt anpassas produktionen block och ringar till deponeringstakten. I detta lager belastas inget block med mer än sin egenvikt.

Lastpallen med block lyfts med hjälp av en gaffeltruck och placeras på en fordon för nerfärd till deponeringsområdet. Blockens huvudaxel har vertikal orientering på lastpallen.

För höga isostatiskt kompakterade block kommer höjden att beaktas så att den inte blir dimensionerande för höjden på transport och deponeringstunnlar.

Under transporten belastas inget block med mer än sin egenvikt (statiskt och dynamiskt).

Efter framkomsten till deponeringshålet lossas lasten med vagnens egna lyftdon, som sänker ner blocken ett och ett i deponeringshålet.

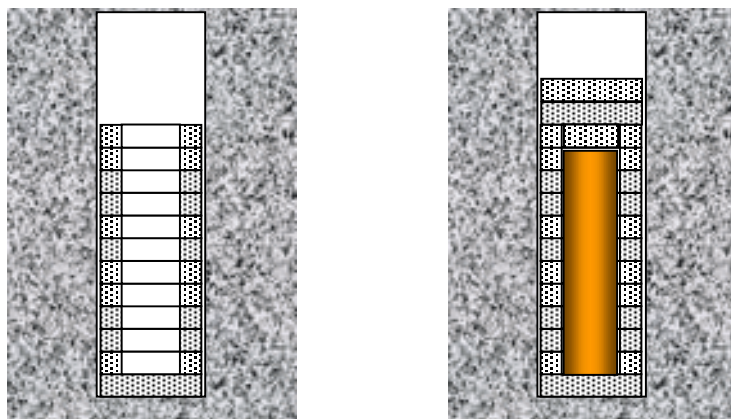
4.4.2 Höga block

Mycket höga block medför problem vid hantering på grund av den stora vikten och transport i tunnelsystemet. Teoretiskt skulle buffertenheter kunna transporteras liggande men det medför andra problem varför detta alternativ inte bedöms som realistiskt.

Även höga block lagras med vertikal axel i produktionsbyggnaden. Lagrets egenskaper, lagringstid och belastning är desamma som i avsnitt 4.4.1.

4.5 Deponering

I det följande beskrivs hanteringen i ett framtida slutförvar. Endast alternativet vertikal deponering beskrivs. Vidare antas att kapseln inplaceras efter det att bottenblocket samt huvuddelen av ringarna som omsluter kapseln inplacerats. I figur 5 visas dels uppbyggnaden av bufferten före inplaceringen av kapseln samt efter det att kapsel och samtliga bentonitenheter är på plats.



Figur 5. Inplacering av buffert före inplacering av kapsel respektive komplett deponering.

4.5.1 Medelhöga block

Deponeringshålets botten har utjämnats med betong så att en horisontell plan yta erhållits på vilken blocken placeras.

Därefter placeras ett block av botten typ samt 11 block av ringtyp i deponeringshålet med anpassad lyftutrustning. Bufferten täcker hela kapsellängden plus en extra ring ovanför kapseln.

Efter det att denna del av bufferten är på plats i deponeringshålet deponeras kapseln i mitten av bufferten.

Ett block med samma diameter som kapseln och med en höjd som ger en plan överyta i samma nivå som ringen placeras på kapseln av deponeringsmaskinen. Resterande två block som erfordras för att bygga upp den kompletta bufferten placeras med samma utrustning som placerat in de övriga bentonitenheterna. Därefter planeras fylls deponeringshålet upp till tunnelgolvet med en blandning av bentonit och bergkross.

4.5.2 Höga block

Deponeringen sker i stort sett likadant som med medelhöga block. Avvikelsen består av att bufferten utgörs antingen av en "burk" och ett rör eller ett block av botten typ och två rör och att en speciell lyftanordning krävs för nersänkningen.

5 Funktionskrav för bentonitblock

5.1 Inledning

En övergripande förutsättning för funktionskraven på bentonitblock är att den påverkan som bentoniten utsätts för i systemet utvinning - pulverberedning - kompaktering - hantering inte innebär någon betydande ändring av de egenskaper som bentoniten ursprungligen hade.

De nedan postulerade funktionskraven för råvara, pressmassa, block och bentonithölje anknyter till de funktionskrav som tidigare ställs på bufferten och som redovisas i kapitel 3.

Funktionskraven nedan anknyter också till den hanteringsgång som redovisas i kapitel 4.

5.2 Råvara

Råvaran ska:

- under givna betingelser ge en pressmassa som uppfyller funktionskraven,
- kunna hanteras utan att väsentliga förändringar inträffar,
- kunna mellanlagras utan att betydande förändringar inträffar,
- kunna torkas utan att avgörande förändringar inträffar utöver vad som förväntas med hänsyn till förlusten av vatten.

5.3 Pressmassa

Pressmassan ska:

- under givna betingelser ge block som uppfyller funktionskraven,
- kunna uppfordras i aktuell utrustning utan att förändras i betydande grad som till exempel bilda damm som försvårar evakuering av pressverktyget,
- kunna doseras tillräckligt noggrant och reproducerbart i aktuell utrustning,
- fylla ut pressformen på ett tillräckligt jämnt och homogent sätt,
- kunna evakueras,
- kunna kompakteras,
- kunna hanteras och mellanlagras i pressanläggningen utan väsentlig förändring av egenskaper.

5.4 Block

Blocken ska:

- under givna betingelser bilda ett bentonithölje som uppfyller funktionskraven,
- innehålla mått och vikt, det vill säga passa i hanteringsutrustningen,
- ha tillräcklig mekanisk integritet samt säkerhet mot brott under förekommande statiska och dynamiska laster samt andra påkänningar, t ex termiska och hydrologiska,
- ha tillräcklig mekanisk integritet i samband med inplaceringen i deponeringshålet.

Kraven ska vara uppfyllda under förekommande betingelser innefattande bland annat följande:

- tid,
- statisk belastning,
- dynamisk belastning,
- torr atmosfär,
- närvaro av syre,
- närvaro av koldioxid,
- temperatur,
- och temperaturändring.

6 Funktionskrav – utförandekrav

Som framgår av funktionskraven i kapitel 5 ingår alltid för varje steg att materialet i fråga ska fungera i nästa steg. Denna princip har en mycket stor betydelse i föreliggande fall. Den funktion och de egenskaper – eller potential till egenskaper – som krävs för den färdiga bufferten ska i stor utsträckning återfinnas i egenskaperna hos råbentoniten. I dessa avseenden blir kravet på de mellanliggande stegen att inte väsentligt försämra de ursprungliga egenskaperna.

För utförandekravens del innebär detta, att materialets ”oförstörda” potential att bilda en god buffert behöver verifieras efterhand som det genomgår de olika stegen.

Kraven på ”bibehållande” av egenskaper i kedjan råvara - buffert innebär bland annat att krav behöver ställas i hela kedjan på att undvika kontamination med annat material som kan påverka bentoniten. Detta kan naturligtvis inte undvikas helt varför även frågan om hur föroreningar kan tänkas fördela sig i bentoniten i olika fall kan vara av betydelse.

Liknande effekter kan uppstå i samband med temperaturförändringar och förändringar i fukthalt varvid olika termiska och hydrologiska förhållanden kan uppkomma i olika delar av materialet med påföljd att det uppvisar olikformiga egenskaper, t ex expanderar olikformigt, vilket kan tänkas innebära ökad risk för brott.

Olikformiga egenskaper kan också tänkas uppkomma om blandningen av de olika ursprungskvaliteter som ska ge upphov till MX-80 inte blir tillräckligt homogen.

Erfarenheter från keramindustrin pekar entydigt på att egenskaperna hos pressmassan kan förväntas vara kraftigt styrande beträffande relevanta egenskaper hos blocken. En pressmassa med höga halter finfraktion kan exempelvis förväntas ge upphov till ofullständig evakuering. Kvarvarande luft komprimeras under kompakteringen och kan leda till brott på grönkroppen när det externa trycket lättas. (Med grönkropp avses inom keramtekniken ett föremål efter formning men före sintring.)

En viss andel korn med måttlig storlek kan emellertid vara gynnsam för hållfastheten.

Krav på andelen finfraktion bör appliceras på den massa som evakueras. Ovarsam hantering av pressmassan t ex en ovarsam uppfordringsteknik kan ge upphov till stoftbildning. Önskemålet om en lämplig fördelning av kornstorleken för en god grönhållfasthet står i viss konflikt med andra önskade egenskaper. Pulver med jämnstor kornstorlek och en rund kornform har liten friktion och fyller därmed pressverktyget jämnt och utan att bilda ”öar” med lägre densitet (diskontinuiteter eller felställen).

Mot bakgrund av lerors – och även bentonitens – välkända egenskap att förändras under lagring förutses ett behov av att etablera betingelser under vilka funktionskraven uppfylls.

Även kompakteringsegenskaperna beror av pulvrets egenskaper inklusive kornform och kornstorleksfördelning.

Kompakteringsegenskaperna styr i viss mån egenskaperna vid uttag från formen vilka har betydelse vid enaxlig kompaktering. (Motsvarande fenomen har ej observerats vid isostatisk kompaktering.) I samband med att stämpelns tryck lättas sker en expansion. Huruvida denna leder till sprickbildning beror av eventuella återstående spänningar från

kompakteringen, bentonitens hållfasthet, duktilitet samt av friktionen mot pressverktygets väggar. Sprickor kan även uppkomma vid uttryckningen ur pressverktyget varvid samma egenskaper har betydelse.

Närvaro av sprickor kan tänkas reducera hanterbarheten hos bentonitblock avsevärt. Högre fuktkvot ger duktilare egenskaper men samtidigt en lägre hållfasthet. I praktiken kan stor skillnad uppstå mellan sprickor som penetrerar en yta och dem som inte gör det. De förra förefaller kunna identifieras med sprickindikerings teknik medan någon dokumenterad metod ännu ej föreligger för indikering av dolda sprickor.

Det kan ej uteslutas att närvaro av sprickor tillsammans med åldringseffekter kan leda till att mekanisk integritet förloras utan att någon särskild mekanisk belastning föreligger.

Att i ett kvalitetssystem fullständigt garantera att samtliga enheter uppfyller kraven kan ofta vara svårt. Ovanliga defekter följer oftast inte samma statistik som huvuddelen av komponenterna, och det kan vara svårt med hänsyn till ovanligheten att få en rimlig statistisk beskrivning.

Situationen förenklas avsevärt om ett litet antal enheter kan tillåtas ha avvikande egenskaper. I föreliggande fall bedöms detta vara relativt oproblematiskt eftersom konsekvensen av om enstaka block skulle förlora sin integritet innan de inplacerats i slutförvaret är måttlig.

I de tillverkningskedjor som beskrivits torde måttnoggrannheten bli utomordentligt god.

Bedömningen är också att kraven på blockens vikt kan innehållas relativt lätt.

Frågan om vätning har inte varit föremål för någon större insats inom ramen för detta uppdrag. Ett viktigt skäl härför är att denna rapport ska ge ett underlag för jämförelser mellan enaxlig och isostatisk kompaktering. Inga skillnader mellan de båda kompakteringsteknikerna som har betydelse för vätningen har kunnat identifieras.

7 Diskussion och slutsatser

Utgångspunkten för den eftersträvade överensstämmelsen mellan utförandekrav och funktionskrav är den i kapitel 1 angivna ambitionsnivån att gränsen mellan acceptabla och oönskade driftsbetingelser ska vara definierad helst både i ett empiriskt och förståelsemässigt perspektiv. Onormala händelser ska vara ovanliga i allmänhet och i samband med deponering i synnerhet.

Den bentonit som bryts är visserligen mycket gammal, cirka 120 miljoner år, och stabil i sin ursprungsmiljö. Under hanteringen sker emellertid kraftiga förändringar beträffande tillgång till vatten och kemiska betingelser. Vidare genomgår bentoniten kraftig mekanisk påverkan vid kompakteringen som sker vid ett högt tryck, cirka 100 MPa.

Det är väl känt inom keramindustrin att leror ändrar sina egenskaper under lagring. Även för bentonit och speciellt för bentonitblock har vissa sådana förändringar observerats, t ex beträffande hållfasthetsegenskaperna. Det kan ej utan vidare uteslutas att till synes oskyldiga krav kan erfordra ett ökat kunskapsunderlag samt hantering med speciella metoder.

Här bör emellertid jämförelserna /9/ i hög grad avse att söka identifiera potentiella diskriminerande faktorer mellan tekniker. I nästa steg får man sedan antingen söka reducera graden av "nedvärdering" genom ökad kunskap och ytterligare utveckling eller tills vidare dra konsekvensen i form av att man väljer bort alternativ som belastas med sådana faktorer.

I föreliggande genomgång har bildning av sprickor och andra defekter samt deras betydelse för blockens integritet framstått som en sådan potentiellt diskriminerande faktor.

Det förefaller vara en ofrånkomlig realitet att tillverkning av bentonitblock inte kan genomföras under industriella betingelser, utan att sprickor eller andra defekter i uppkommer i slutprodukten. Även om sprickor eller andra defekter inte skulle uppkomma bedöms det vara svårt att på ett statistiskt acceptabelt sätt klarställa huruvida en liten andel av blocken kan innehålla defekter. Denna realitet förutses gälla för såväl för den enaxliga som den isostatiska pressningstekniken.

Det är också givet att närvaron av defekter av olika slag för med sig en latent risk för att blocken kan förlora sin mekaniska integritet eller får hållfastheten minskad till en oacceptabel nivå.

Det viktiga i sammanhanget är om denna risk konverteras till en verklig destruktion under blockens livslängd eller förblir bara en latent risk.

Utifrån dagens kunskap om materialteknik, brottmekanik, etc för kompakterad bentonit går det inte att identifiera sådana egenskaper hos medfödda sprickor och defekter, som skulle kunna belysa risknivån avseende benägenhet för propagering och särskilja den avseende tillverkningstekniken.

I dagsläget kan inte dessa möjliga skillnader användas som adekvata selekteringskriterier vid jämförelsen av pressningstekniker. Det som idag står till buds är en statistisk ansats vilket innebär att ett större antal sprickor och defekter likställs med större risk för destruktion under blockens livslängd.

Frågan kan på det här viset reduceras till prognostiseringen av defektmängd: vilken av dessa två tekniker som, även under optimala produktionstekniska betingelser, har större potential för generering av större antal defekter än den andra.

De huvudsakliga konklusionerna av denna rapport är som följer. Realistiska och i långa stycken detaljerade beskrivningar av processkedjan utvinning - transport - beredning av pressmassa - kompaktering - hantering och lagring samt inplacering kan nu göras, och framställningen ovan kan ses som några exempel på detta. Beskrivningarna är också koherenta och integrerade, det vill säga hela kedjan hänger ihop och de olika delarna (i många fall även enskilda handgrepp) stämmer i förhållande till varandra.

Beskrivningen av processkedjan harmonierar vidare med de funktionskrav som uppställts. Dessa är också generella och förutses i allmänhet inte ändras om man ändrar utförandekraven eller sättet på vilket man följer upp processen.

Det framgår av diskussionen ovan att förutsättningarna för sprickbildning bör vara ett av de områden som SKB arbetar vidare med. Det framgår också att förutsättningar för bildning av sprickor bör ges en stor tyngd i samband med jämförelser mellan olika kompakteringsmetoder.

8 Referenser

- 1 **SKB FUD-program 98**
Kärnavfallens behandling och slutförvaring. Program för forskning samt utveckling och demonstration av inkapsling och geologisk slutförvaring. SKB September 1998.
- 2 **Underlagsrapport till SKB FUD-program 98**
Detaljerat program för forskning och utveckling 1999–2004. SKB September 1998.
- 3 **SKB FUD-program 2001**
Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. SKB September 2001.
- 4 **Pusch R, Börgesson L och Nilsson J, 1982**
Buffer mass test – Buffer materials. Stripa Project Technical Report TR 82-06, SKB.
- 5 **Sjöblom R och Pusch R, 1997**
Isostatic compaction of Bentonite Blocks. Present Status. SKB AR D-97-06, Stockholm.
- 6 **Johannesson L-E, Börgesson L och Sandén T, 1995**
Compaction of bentonite blocks. Development of technique for industrial production of blocks which are manageable by man. SKB Technical Report 95-19.
- 7 **Johannesson L-E, Nord S och Sjöblom R, 1999**
Isostatic compaction of beaker shaped bentonite blocks in the scale 1:4. SKB TR-00-14.
- 8 **Pusch R och Schlomburg J, 1999**
Impact of microstructure on the hydraulic conductivity and swelling pressure of undisturbed and artificially prepared smectitic clay. Engineering Geology 54.
- 9 **Börgesson L, Kalbantner P och Sjöblom R, 2001**
Jämförelser mellan enaxlig och isostatisk kompaktering av bentonit. SKB R-00-41.