

**R-00-41**

# **Jämförelser mellan enaxlig och isostatisk kompaktering av bentonit**

Kalbantner Pal, Sjöblom Rolf  
ÅF-Energikonsult Stockholm AB

Börgesson Lennart  
Clay Technology AB

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



# Jämförelser mellan enaxlig och isostatisk kompaktering av bentonit

Kalbantner Pal, Sjöblom Rolf  
ÅF-Energikonsult Stockholm AB

Börgesson Lennart  
Clay Technology AB

December 2001

*Sökord:* Bentonitbuffert, pressning av bentonit, enaxlig pressning av bentonit, isostatisk pressning av bentonit.

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 denna rapport är att ge Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) ett underlag för val av referensmetod för blocktillverkning inför beslut om den fortsatta inriktningen av utvecklingsarbetet.

Tre typer av block jämförs:

- enaxligt kompakterade medelhöga block,
- isostatiskt kompakterade medelhöga block,
- isostatiskt kompakterade höga block.

Analysen bygger på en processkedja med utvinning av bentonit-transport-pulverberedning-kompaktering-hantering och inplacering av de pressade bentonit-blocken.

I samband med dessa analyser har behov av ytterligare kunskap identifierats och redovisats.

Jämförelsen utförs i första hand med avseende på kriterierna säkerhet/risk, kvalitet/teknik och ekonomi. Den utförs dels genom identifiering av viktigare frågeställningar och analys och utvärdering av dessa dels mera formellt i en förenklad AHP-process (AHP = Analytisk Hierarkisk Process).

Resultatet av analyserna är att den isostatiska tekniken är tillämplig för framställning av såväl medelhöga som höga block. De pressade blocken bedöms uppfylla grundkraven med mycket god marginal. Resultatet är också att den enaxliga tekniken är väl tillämplig för framställning av medelhöga block vilka bedöms uppfylla grundkraven med god marginal.

Behovet av utveckling och processkontroll bedöms vara något högre för den enaxliga tekniken, främst på grund av friktionen mot pressverktygets väggar samt dennas betydelse för uppkomst av spänningar och diskontinuiteter i blocket.

Dessa resultat stödjer valet av den isostatiska tekniken som referensteknik, vilket ger stor flexibilitet i valet av blockens höjd. Den enaxliga tekniken kan dock utgöra reservteknik om medelhöga block väljs i framtiden.

Dessa slutsatser har i en enkel analys även testats mot några övriga kriterier, nämligen enkelhet, produktionserfarenhet och flexibilitet. Resultatet av dessa analyser ger stöd åt de slutsatser som dragits ovan.

Val av isostatisk teknik som referensteknik innebär flexibilitet i förhållande till ett antal olika deponeringsalternativ vilka studerats av SKB. Det finns en direkt koppling mellan å ena sidan val av deponeringsalternativ och å andra sidan val av storlek för den press som ska användas för tillverkning av block för slutförvaret.

En liknande koppling finns beträffande pressens kapacitet. Den press som kommer att användas bedöms erhålla en betydande överkapacitet. Denna överkapacitet ökar med ökad blockstorlek. Möjligheten att utnyttja denna överkapacitet är dock osäker varför vi har antagit att den saknar betydelse för jämförelsen.

# Executive summary

The purpose of the present report is to provide the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB) with the knowledge base needed for their selection of reference method for manufacturing of bentonite blocks. The purpose is also to provide support for the directioning of the further development work.

Three types of blocks are compared in the present report:

- uniaxially compacted medium high blocks,
- isostatically compacted medium high blocks,
- isostatically compacted high blocks.

The analyses is based on three process systems relating to the sequence of excavation of bentonite-transport-powder preparation-compaction-handling and emplacement of bentonite blocks.

The need for further knowledge has been identified and documented in conjunction with these analyses. The comparison is primarily made with regard to the criteria safety/risk, quality/ technique and economy. It is carried out through identification of issues of significance and subsequent analysis and evaluation as well as more formally in a simplified AHP (AHP = Analytical Hierarchic Process).

The result of the analyses is that the isostatic technique is applicable for the production of high as well as medium size blocks. The pressed blocks are assessed to fulfil the basic requirements with a very large margin. The result of the analyses is also that the uniaxial technique is applicable for the preparation of medium size blocks, which are assessed to fulfil the basic requirements with a large margin.

The need for development and process control is assessed to be somewhat higher for the uniaxial technique. One example is the friction against the walls of the die during the compaction, including the significance of this friction for the development of stresses and discontinuities in the block.

These results support a selection of the isostatic technique as the reference technique as it provides flexibility in the choice of block height. The uniaxial technique can form a second alternative if medium high blocks are selected in the future. In a simple analysis, these conclusions have also been tested against a few other criteria, namely simplicity, production experience, and flexibility. The results of this analysis support the above conclusions.

A selection of the isostatic technique as the reference technique implies that there will exist flexibility with regard to a number of different disposal alternatives, which have been studied by SKB. There is a direct relationship between on one hand the selection of disposal alternative, and on the other hand the selection of the size of the press to be used for the manufacturing of the blocks for the final repository.

The press to be used is foreseen to have an excessive capacity. The possibility of using this excessive capacity is uncertain, why we have presumed that it has no importance on the comparison.

# Innehåll

	<b>Sida</b>
<b>1 Bakgrund</b>	<b>9</b>
<b>2 Syfte, omfattning och utförande</b>	<b>11</b>
<b>3 Förutsättningar och referensalternativ</b>	<b>13</b>
<b>4 Underlag, analys och strukturering</b>	<b>15</b>
4.1 Inledning	15
4.2 Utvinning och pulverberedning – kompaktering	15
4.3 Buffertens egenskaper	19
4.4 Kompaktering – hantering, mellanlagring och inplacering	20
4.5 Dimension, måttnoggrannhet och ytfinitet	20
4.6 Blockstorlek	20
4.7 Ekonomi	21
<b>5 Jämförelse mellan enaxlig och isostatisk kompaktering</b>	<b>23</b>
5.1 Allmänt	23
5.2 Jämförelseprocess för kompakteringstekniker	23
5.2.1 Avvikelser från konventionell AHP	23
5.2.2 Den hierarkiska strukturen	23
5.2.3 Jämförelseprocessens genomförande	24
5.3 Jämförelser av faktorer som påverkar valet av kompakteringsmetod	26
5.3.1 Aktivitet kompaktering (D)	26
5.3.2 Sammanställning av aktivitet kompaktering (D)	29
5.4 Jämförelser beträffande kostnad	30
<b>6 Jämförelse ur kvalitets- och grundkravsperspektiv</b>	<b>33</b>
6.1 Krav på bentonitblock	33
6.2 Jämförelse	33
<b>7 Diskussion och slutsatser</b>	<b>37</b>
7.1 Jämförelser mellan medelhöga och höga block	37
7.2 Jämförelser mellan enaxligt och isostatiskt kompakterade medelhöga block	38
7.3 Övriga slutsatser	38
<b>8 Referenser</b>	<b>41</b>
<b>Bilaga A</b>	<b>43</b>

# 1 Bakgrund

Denna rapport avser 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 kopparkapslar med stålinsats på cirka 500 meters djup i svenskt, kristallint urberg. Kapslarna placeras i särskilt borrarade deponeringshål med en buffert bestående av kompakterad bentonit i utrymmet mellan kapseln och berget. Hålens diameter är cirka 1,75 meter och bentonitlagrets tjocklek cirka 0,35 meter.

Redan tidigt i SKB:s program tillverkades block med önskad densitet genom isostatisk kompaktering av bentonitpulver /4–5/. Under 1990-talet har insatserna huvudsakligen avsett enaxligt kompakterade block /6–7/, men förutsättningarna för isostatisk kompaktering har också studerats /8/. Arbetet har bland annat resulterat i att medelhöga 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.

De för detta erforderliga fördjupade kunskaperna behöver identifieras och specificeras. Detta kräver:

1. att målet med utvecklingsarbetet kan identifieras och formuleras, och
2. att inriktningen sker mot sådana lösningar som har goda förutsättningar att åstadkomma den säkerhet, teknik och ekonomi som eftersträvas.

Föreliggande rapport redovisar studier av kompakteringsmetoder och ska ge underlag inför val av referensmetod för tillverkning av bentonitblock.

Funktionskraven på bentonitblocken redovisas i en annan rapport /13/ och inkluderar studium av hela kedjan utvinning, pulverberedning, kompaktering och inplacering i slutförvaret. Detta underlag utgör grunden även för arbetet i föreliggande rapport och upprepas inte här.



## 2 Syfte, omfattning och utförande

Syftet med denna rapport är att ge SKB ett underlag för val av referensmetod för kompaktering av bentonitblock och för ett beslut om fortsatt utvecklingsarbete för metoden. Rapporten ska vidare ge ett bidrag till utformningen av ett kvalitetsprogram för produktionen av blocken.

Underlaget sammanställs utgående från i dag kända fakta och omständigheter vilka är tillgängliga för de olika författarna. Syftet är således inte att ta fram nytt bakgrunds-material. Under arbetets gång har dock tillgänglig kunskap ökats genom pågående utvecklingsarbete samt genom kontakter med Volclay Ltd som är leverantören av SKB:s referens kvalitet, MX-80.

Det kunskapsunderlag som föreligger är mycket skiftande till sin karaktär vad gäller graden av fullständighet. I vissa fall är betydelsen av olika aspekter relativt givna medan det i andra fall handlar om bästa bedömningar från initierade personer.

Värdering av alternativen görs inom följande områden:

- Säkerhet/risk
- Kvalitet/teknik
- Ekonomi

Inför jämförelsen ska följande aspekter analyseras och beaktas:

- Dimension, måttnoggrannhet och ytfinhet:
  - smörjning och möjliga diameter / längd – förhållanden (enaxlig kompaktering),
  - behovet av och möjligheterna till avverkning till slutdimension (isostatisk kompaktering).
- Densitet och draghållfasthet som funktion av presscykel för isostatisk kompaktering (med hänsyn tagen till yteffekter) och enaxlig kompaktering (med hänsyn tagen till friktion mot verktygets väggar).
- Homogenitet.
- Förutsättningarna för bildning av olika typer av defekter som kan ha betydelse för hållfastheten.
- Mekanismer för brott i samband med olika belastningar.
- Mekanismer för brott utan belastning.
- Komparativa fördelar och nackdelar för olika blockstorlekar.
- Pressningsprocesserna inklusive utrustning.
- Kostnader.

För att en adekvat jämförelse ska erhållas behöver bland annat följande omständigheter kunna hanteras:

- Komplexiteten hos systemet utvinning – pulverberedning – kompaktering – hantering, transport och mellanlagring – inplacering – funktion efter förslutning av förvaret.
- Existensen av ett stort antal alternativa utformningar av nyss nämnda system.
- Ofullständigheter i kunskapsunderlaget.
- Existensen av många möjligheter till strukturering av frågeställningarna.
- Existensen av många alternativa metoder för utvärdering.
- Önskvärdheten av att så långt möjligt och rimligt arbeta enligt ett slags försiktighetsprincip. Denna innebär att man inte opåkallat tar ut positiva undersökningsresultat i förskott. En annan försiktighetsprincip innebär att alternativa vägar hålls öppna till dess att underlaget är tillräckligt solitt för att ge stöd för en reducering.

Som framgår av dessa frågors karaktär behöver en förberedande strukturering göras innan den egentliga jämförelsen görs.

Denna rapport har därför givits följande uppläggning.

I kapitel 3 redovisas val av referensalternativ samt strategi och ordningsföljd för jämförelserna.

I kapitel 4 görs en komplettering av det sakunderlag som redovisas i rapporten om funktionskrav /13/. Kompletteringen gäller frågor som är avgörande för valet mellan isostatisk och enaxlig kompaktering.

I kapitel 5 presenteras metodiken för de formella jämförelserna samt redovisas själva värderingarna. Värderingarna utgör ett medelvärde av de värderingar som gjorts av var och en av författarna. Förfarandet bedöms innebära följande:

- Skillnader som hänger samman med de olika stegen i hanteringen fångas upp på ett systematiskt och fullständigt sätt.
- Värderingarna görs på ett systematiskt sätt och på samma sätt för alla deltagande.

Den detaljerade strukturen och värderingen redovisas i bilaga A. Endast de punkter där skillnad i värdering uppvisas i valet av kompakteringsmetod visas i kapitel 5.

I kapitel 6 görs ytterligare en jämförelse som kompletterar den som gjorts i kapitel 5. Här läggs tonvikten på diskriminerande faktorer, det vill säga omständigheter som skulle kunna innebära att vissa grundkrav som uppställts inte kan innehållas. Utöver uppfyllande av grundkrav tillgodoräknas även förhållanden som bedöms leda till en hög kvalitet.

I kapitel 7 diskuteras de resultat som erhållits tidigare i rapporten samt dras slutsatser. Här sker också en kompletterande belysning av vissa frågeställningar.

### 3 Förutsättningar och referensalternativ

De block som användes i samband med försöken i Stripa /4/ tillverkades med isostatisk teknik. För att en tillräckligt stor diameter skulle erhållas sågades halvcirkelformade ringar ur tillgängliga block. Inför slutförvaringen, liksom inför prototyp- och återtagsförsöken i Äspölaboratoriet, är det emellertid endast block som från början kompakteras till full diameter (cirka 1,7 meter) som övervägs. Detta är också förutsättningen för denna studie.

Försök med mindre block (enaxlig kompaktering) har indikerat att förhållandet mellan blockens höjd och deras diameter ej bör överstiga cirka 2/5 om fast botten används i verktyget eller 4/5 om flytande botten används. Försök med isostatisk kompaktering har däremot visat att förhållandet mellan blockens höjd och deras diameter kan varieras inom vida gränser. Även block i form av en ”burk” det vill säga ett rör med endast ena ändytan öppen har tillverkats i skala 1:4 med gott resultat /8/.

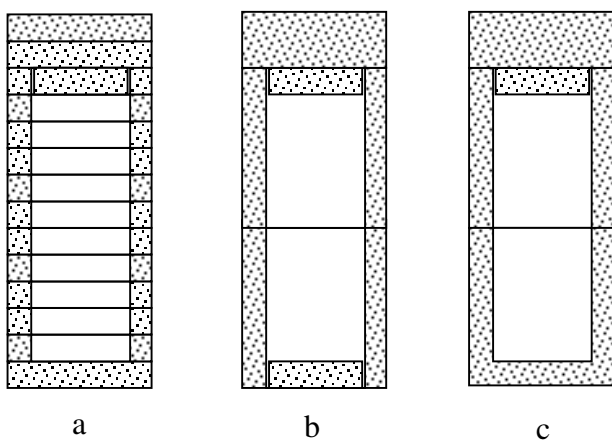
Mot denna bakgrund har följande tre alternativa utformningar studerats, se figur 3-1. Det övre lilla blocket placeras på kapseln med hjälp av deponeringsmaskinen i dess nuvarande utformning men dessa kan ändras i framtiden.

Som närmare framgår av /13/ har de olika blockformerna inte bara intresse ur kompakteringsteknisk synvinkel, utan de hänger även samman med förutsättningarna för hantering och inplacering.

Av de tre exemplen i figur 3-1 avser ett enaxlig kompaktering och två isostatisk kompaktering.

Syftet med studien är att jämföra isostatisk och enaxlig kompaktering varför det är naturligt att börja med de alternativ som är så lika som möjligt. Av detta skäl har isostatiskt kompakterade ”burkar” utgått från den första jämförelseomgången.

Uppläggningsen av eventuella kompletterande jämförelser bör styras av vad som kommer fram ur den första.



**Figur 3-1.** a) Medelhöga block (ringar och skivor), b) Höga (ringar) och medelhöga (skivor) block samt c) Höga (”burk” och ring) och medelhöga (skivor) block. Medelhöga block kan tillverkas med såväl enaxlig som isostatisk teknik och höga block tillverkas endast med isostatisk teknik.

## 4 Underlag, analys och strukturering

### 4.1 Inledning

Jämförelserna i kapitel 5 och bilaga A utförs utgående från en metod benämnd ”Analytisk Hierarkisk Process”, AHP som också redovisas i bilaga A. Enligt denna metod jämförs de två kompakteringsprocesserna parallellt, steg för steg.

Inför denna jämförelse erfordras dels de beskrivningar av hanteringssekvensen, dels kompletterande beskrivningar och analyser i vilka särskild tyngd läggs på företeelser för vilka skillnader kan föreligga mellan isostatisk och enaxlig kompaktering.

Kunskapsbasen är dock till stora delar ofullständig och kvantitativa värden på olika omständigheters betydelse är i många fall svåra att ange. Att i ett sådant läge endast ange de variabler som kan bestämmas – och försumma betydelsen av de övriga – innebär sannolikt att systematiska fel introduceras. I stället tillämpas i denna rapport ”expert judgement” (det vill säga någonting i stil med ”kvalificerad gissning”) i sådana fall. Den verbala och kvalitativa analys som redovisas nedan utgår från den typ av analys som skisserats ovan, medan den kvantitativa analys som redovisas i bilaga A utgår från processtegen.

Själva jämförelsen processteg mot processteg redovisas emellertid inte i det följande utan endast resultatet. Vidare är resultatredovisningen fokuserad på sådana omständigheter (features, events and processes, ”FEPpar”) för vilka skillnader kan förväntas mellan enaxlig och isostatisk kompaktering. Detta struktureras emellertid inte strikt efter de olika processtegskombinationerna utan efter de olika typer av frågor som identifierats.

I viss mening har val redan gjorts beträffande betydelsen av olika samband mellan delar av processkedjan. Exempelvis är utvinning och pulverberedning identiska för de två alternativen.

### 4.2 Utvinning och pulverberedning – kompaktering

#### *Friktion i pressmassan*

I en idealisk enaxlig kompaktering är friktionen mellan pressmassan och pressverktygets väggar noll. Även om vissa utjämnande förskjutningar kan antas äga rum under kompakteringen är det rimligt att förutsätta att deformationen av de ingående kornen i detta fall blir olikformig. Ett hypotetiskt sfäriskt korn skulle med detta synsätt bli linsformat efter kompakteringen.

Under en ideal isostatisk kompaktering blir motsvarande hypotetiska sfäriska korn fortfarande i stort sett sfäriska även efter kompakteringen.

Bentonitmaterialets form kan möjligen påverkas av valet av pressmetod. Närmare undersökning kan visa att man får bättre resultat med större eller mindre korn och olika kornfördelning. Eftersom detta inte är närmare undersökt och eftersom man fått acceptabla resultat med befintligt material, kan man här helt bortse från materialformens inverkan på processvalet.

### ***Friktion mellan pressmassa och pressverktyg***

I en verklig enaxlig kompaktering föreligger friktion mellan pressmassan och pressverktygets inneryta. Vid ensidig enaxlig kompaktering mot stumt underlag innebär detta att den pressade kroppen får en lägre densitet nära kanten vid den sida som vetter mot underlaget. Den lägre densiteten svarar i någon mening mot ett lägre presstryck, även om påkänningen på ett hypotetiskt pressmasseelement i själva verket är olika i olika riktningar (och i olika faser av kompakteringen) samt består av såväl tryck- som skjuvkomponenter.

Friktionens storlek beror på dels ytfinheten i pressverktygets väggar, dels smörjningen.

Friktionen mot pressverktygets väggar innebär att vissa interna relativa förskjutningar av material sannolikt förekommer i samband med enaxlig kompaktering. Någon drivkraft för liknande skjuvningar i material som kompakteras isostatiskt har inte kunnat identifieras.

Skjuvningar kan tänkas bidra till kompakteringen, och kan också tänkas inverka på förutsättningarna för bildning av glidplan. Några sådana har emellertid inte observerats.

Friktion mellan pressmassa och verktyg kan också ha betydelse i samband med utpressning av bentonitblocket från formen. När stämpeln lättar, återfjädrar vanligen materialet i mitten mer än det gör vid kanterna till följd av friktionen mot pressverktygets väggar. Detta leder inte sällan till dragspänningar och utveckling av sprickor från kanten och mot mitten av blocket.

Under utpressningen från formen kan friktionen på ett likartat sätt ge upphov till dragspänningar i axiell led nära pressverktygets väggar och nära dess övre yta. Om sprickor utvecklas löper de parallellt med överytan. Denna typ av sprickor kan motverkas något genom att man gör pressverktyget svagt koniskt.

### ***Inhomogeniteter i pressmassan***

Inhomogeniteter i pressmassan kan ge upphov till spänningar i godset samt sprickbildningar. Sådana inhomogeniteter kan ge upphov till skillnader i fukthalt och/eller torrdensitet i ett block vilka inte förutses utjämnas under pressningsoperationen. Med torrdensitet avses den fasta substansens massa per volymsenhet vid aktuell porositet. Utjämning av fukthalt kan emellertid förutses komma till stånd under den efterföljande mellanlagringen. Denna innebär att fukt vandrar mellan olika delar av blocket med den påföljden att vissa delar strävar efter att expandera medan andra söker minska sin volym. Om effekten blir tillräckligt stor kan sprickor uppkomma med disintegrering som följd.

Detta bedöms innebära att höga krav kommer att ställas på pressmassans homogenitet, i första hand beträffande fuktkvot och skrymdensitet.

Disintegrering som orsakats av inhomogeniteter i pulvret kan förväntas förekomma i samband med enaxlig såväl som isostatisk kompaktering. Effekten bedöms vara relativt oberoende av valet av kompakteringsteknik.

### ***Påfyllning av pressverktyget***

Densitetsvariationer i blocken kan uppkomma till följd av ojämn påfyllning av pressverktyget (enaxlig kompaktering) respektive gummisäcken (isostatisk kompaktering).

I samband med enaxlig kompaktering kan ojämn påfyllning innebära ojämn återfjädring när stämpeln lättar, vilket kan ge upphov till spänningar och eventuellt även utveckling av sprickor.

Ojämn påfyllning av gummisäcken i samband med isostatisk kompaktering förväntas påverka densitetsfördelningen mera marginellt. Däremot uppkommer extra arbete genom att mer material kan komma att behöva avverkas i den efterföljande mekaniska bearbetningen.

### ***Abrasiva mineral i bentoniten och deras betydelse***

Uppgifter i litteraturen indikerar att SKB:s referenskvalitet, MX-80 från Volclay Ltd, kan innehålla cirka 16 % kvarts /9,10/. Detta är ett så kallat accessoriskt mineral som förekommer vid sidan av huvudkomponenten i bentonit som utgörs av mineralet montmorillonit som är en smektit /11/. Kvarts kan kemiskt sett enkelt beskrivas som hydratiserad kiseldioxid ( $\text{SiO}_2$ ). Kvarts är nära släkt med flinta, onyx, jade och agat som används i stenyxor, smycken, mortlar och malkulor till stor del på grund av hög mekaniska beständighet, det vill säga reptålighet.

Det finns därför anledning att förmoda att innehållet av kvarts kan ha betydelse för pressverktygets kondition efter upprepade användning i samband med enaxlig kompaktering. Friktionen mellan pressmassa och pressverktyg kan antas vara relativt starkt beroende av ytfinheten hos pressverktyget.

Någon motsvarande frågeställning har inte identifierats för isostatisk kompaktering.

### ***Evakuering***

Under kompakteringen reduceras volymen innesluten luft avsevärt samtidigt som porositeten sluts. Om den inneslutna luften har ett högre tryck efter kompakteringen än den omgivande luften uppkommer dragkrafter i materialet vilket i ogynnsamma fall kan leda till sprickbildning och disintegrering, det vill säga sönderfall av blocket.

För att undvika problem av detta slag görs för större kroppar alltid en evakuering före kompakteringen i den isostatiska processen. För att denna evakuering ska göra avsedd nytta fordras att hela volymen pressmassa omfattas. Om kanalerna i pressmassan är trånga kan emellertid flödet genom bädden bli ganska långsamt. I anläggningar som kompakterar höga kroppar ställs därför krav på kornstorleksfördelning och framförallt ställs kravet att andelen finfraktion ska vara liten. (Exempelvis kan krävas att andelen material under cirka 0,07 mm ska vara mycket lägre än 1 %).

Ofta är det pulver som används inom keramindustrin framställt genom spraytorkning som kan utföras så att lätt deformbara (eventuellt ihåliga) runda korn med snäv fördelning erhålls. Detta är inte någon realistisk metod för pulverberedning av bentonit.

I stället används krossat material (MX-80). Krossat material uppvisar vanligen en sned kornstorleksfördelning med övervikt för fina fraktioner. Det material som ingår i MX-80 har emellertid genomgått såväl frifallssiktning som vindsiktning. Särskilt den senare processdelen innebär att andelen finfraktion reduceras.

Å andra sidan är det inte invändningsfritt att hålla nere halten finfraktion. Det är väl känt från litteraturen /12/ att grönhållfastheten (det vill säga i föreliggande fall hållfastheten hos den kompakterade kroppen) ökar med ökad andel finfraktion. Finfraktionen fungerar således som ett slags bindemedel.

De försök som utförts pekar på att en tillräckligt god evakuering kan erhållas även för höga block, det vill säga block med cirka en meters höjd. Vidare visar mångåriga erfarenheter vid Ifö Ceramics AB, erhållna från en annan typ av pressmassa, att en god evakuering kan erhållas även för bäddar av pressmassa som är cirka fyra meter höga.

Från detta kan man dra slutsatsen att evakuering av fyra meter höga ämnen innehållande MX-80 är möjlig, men tiden för evakuering kan behöva förlängas.

Frågan om pulvrets kornstorleksfördelning och andel finfraktion samt dess evakuering kopplar till frågan om höga block får samma goda egenskaper som låga.

### **Diskussion**

Sammanfattningsvis kan sägas att ett antal mekanismer kan leda till spänningar i blocken vilket kan ge upphov till relaxation och sprickbildning. Det bör kanske särskilt nämnas att inbyggda spänningar inte bara kan leda till sprickor som utvecklas omgående, utan även med viss fördröjning (till exempel i samband med fuktvandring). Inbyggda spänningar som inte är tillräckligt stora för att leda till sprickor kan göra det i samverkan med någon annan mekanism, till exempel dynamiska laster under en transport.

Mot bakgrund av de olika mekanismer som identifierats och som kan ha betydelse för blockets mekaniska integritet kan vissa skillnader förutses beträffande val av processparametrar för pulverberedningen för de olika alternativen (eventuellt även utvinning). Exempelvis kan vattenhalten väljas olika. Ökning av vattenhalten i pressmassan innebär att den motsvarande skjuvdeformationen av ingående granuler kan ske vid lägre tryck, det vill säga kompakteringsprocessen underlättas. Samtidigt tar vatten plats i strukturen vilket i praktiken innebär att den erhållna torrdensiteten sjunker med ökad vattenhalt.

Optimala pulveregenskaper är sannolikt något olika för de båda kompakteringsteknikerna. I dag föreligger emellertid inte något tillräckligt underlag för en kvantitativ bedömning av sådana skillnader.

Det är emellertid författarnas bedömning att ingen del av processtegen utvinning fram till kompaktering ger någon skillnad i jämförelsen av kompakteringsteknik. Stegen kan lätt anpassas till den valda tekniken.

### 4.3 Buffertens egenskaper

Den uppsvällda bufferten förväntas bli relativt homogen och bedöms inte påverkas i någon högre grad av närvaro av skarvar, sprickor eller andra diskontinuiteter i tidigare skeden.

Om bentonitens innehåll av kvarts skulle visa sig besvärande kan ett minskat slitage uppnås om en bentonitkvalitet med ett lågt innehåll av kvarts väljs, alternativt en kvalitet som är raffinerad på ett sådant sätt att halten kvarts reducerats.

Inga kontaminationer som skulle vara olika för de två processerna har kunnat identifieras. Det kanske kan tilläggas att kemiska förändringar till följd av reaktion med luftens innehåll av syre och koldioxid kan förutses. Det har emellertid inte framkommit något skäl till varför skillnader i dessa skulle uppstå mellan de två processerna.

Ett liknande resonemang kan föras beträffande strukturella processer och förändringar i bentoniten. Bentonitens – liksom övriga lerors – egenskaper beror av dess historia. Som exempel kan nämnas att inom keramindustrin tillämpas ibland långtidslagring av leror för att de ska erhålla önskade reologiska egenskaper. Sannolikt påverkas bentonit av torkning, befuktning och kompaktering. Inom ramen för andra SKB-aktiviteter undersöks hur bentonitens egenskaper förändras beroende på sammansättningen hos mättnadsvattnet och det grundvatten som har kontakt med ett deponeringshål i slutförvaret. Denna senare fråga faller emellertid utanför ramen för föreliggande uppdrag.

Frysning kan komma upp som en onormal händelse i samband med transport och mellanlagring. Frysning kan tänkas påverka bentonitens strukturella egenskaper vid högre vattenhalter. Inte heller här kan några skillnader identifieras mellan isostatisk och enaxlig kompaktering.

En påtaglig skillnad kan tänkas föreligga mellan å ena sidan ”burkar” och å andra sidan ringar och skivor. (Skiljelinjen går här inte mellan kompakteringsteknikerna utan hänger samman med bentonitkropparnas geometriska form). Beroende på att spaltvolymens andel av den totala volymen buffert varierar mellan området runt kapseln jämfört med områdena över och under, kan det bli aktuellt att tillverka blocken till lägre torrdensitet än ringarna. Någon möjlighet att integrera sådana densitetsskillnader i ”burkar” som tillverkas genom isostatisk kompaktering kan inte förutses för närvarande. Det skulle i så fall kräva ett särskilt utvecklingsarbete.

Slutsatsen av denna genomgång beträffande buffertens egenskaper är att även om vissa påverkande faktorer identifierats, så saknas det för närvarande grund för att ange någondera metoden som fördelaktigare än den andra ur perspektivet långsiktig säkerhet.



## 4.4 Kompaktering – hantering, mellanlagring och inplacering

Processtegen hantering, mellanlagring och inplacering är beroende av blockens strukturella integritet och förmåga att tåla mekaniska påkänningar. Förutsättningarna för uppkomst av sprickor och andra diskontinuiteter i samband med kompakteringen beskrivs i avsnitt 4.2. Det handlar i första hand om följande faktorer:

1. Skillnad i radiell och axiell expansion i samband med tryckavlastning.
2. Skillnad i radiell och axiell expansion under utpressningen.
3. Fyllningen av pressverktyget.

Dessutom kan sprickor uppkomma om blocken tillåts torka vilket är en onormal händelse för vilken ingen skillnad kan identifieras mellan de olika alternativen.

Eventuell förekomst av defekta block förutses inte vålla några tekniska problem av betydelse annat än om andelen defekta block är hög eller att defekterna uppstår först i samband med inplaceringen i deponeringshålet.

Resultaten av utvecklingsarbetet avseende hanteringsutrustning indikerar att även block med mycket allvarliga defekter kan hanteras.

Slutsatsen av det anförda är att det kanske snarast är graden av kassation och därmed sammanhängande ekonomi som skulle ha störst betydelse i valet av kompakteringsteknik. Med dagens kunskaper kan dock ingen skillnad mellan teknikerna noteras.

Endast en typ av sprickor har observerats visuellt på block tillverkade enligt nuvarande teknik. Dessa sprickor löper från överkanten (kompakteringen antas ha skett uppifrån) och mot en punkt på den rotationssymmetriska axeln hos enaxligt kompakterade fullstora block. Inga sprickor har observerats visuellt hos isostatiskt kompakterade block i skala 1:4 (linjärt). Några bestämda slutsatser bör dock inte dras från dessa observationer eftersom blocken haft olika storlek och geometri.

## 4.5 Dimension, måttnoggrannhet och ytfinhet

I dagsläget kan inga särskilda skillnader identifieras mellan de olika alternativen med avseende på dimension, måttnoggrannhet och ytfinhet.

## 4.6 Blockstorlek

Det har nämnts tidigare att endast block med ett höjd/diameterförhållande på högst cirka 2/5 (för verktyg med fast botten) eller cirka 4/5 (för verktyg med flytande botten) förutses kunna tillverkas med enaxlig teknik. Med isostatisk teknik förutses blocket kunna tillverkas till godtycklig höjd ur teknisk synpunkt.

Som framgår av /13/ förutses inga särskilda svårigheter med att tillverka block med hög höjd jämfört med låg. Inga särskilda svårigheter förutses heller beträffande konstruktionen av en press som skulle medge hög höjd beträffande ekonomi.

Hantering och transport av höga block blir mer komplicerade än av medelhöga block vilket måste beaktas vid utformningen av djupförvarsanläggningen. I JADE-projektet föredrogs generellt sett lösningar med stora ingående enheter.

## 4.7 Ekonomi

Som framgår av kapitel 2 ingår det inte i föreliggande studie att ta fram nya uppgifter inför de värderingar som ska göras. Parallellt med detta arbete har emellertid vissa jämförande kostnadskalkyler utförts vilka utgör en viktig grund för de överväganden som följer.

I kalkylerna enligt avsnitt 5.4 uppgår den rörliga produktionskostnaden per deponeringshål till cirka 44 000 SEK varav 33 000 SEK avser bentonit för de alternativ som studerats.

Enkla överslagsberäkningar indikerar att om SKB ska deponera en kapsel per dag under lång tid så kommer sannolikt den lösning som SKB väljer – oberoende av vilken av flera rimliga som det i själva verket blir – att ha eller med måttlig ansträngning kunna ges en hög eller mycket hög överkapacitet.

Överkapaciteten blir större ju större blocken är eftersom cykeltiden ökar endast måttligt med ökad kapacitet. Cykeltid har bedömts till cirka 45 minuter oberoende av blockens storlek. Denna tid avser huvudsakligen hålltid. Utförda försök har nämligen indikerat att korta hålltider ( $\leq 10$  minuter) kan ge otillräcklig hållfasthet. Något underlag för en närmare angivelse av lämplig hålltid föreligger emellertid inte.

Utgångspunkten för uppskattningen är det faktiska utförandet av produktionen vid Ifö Ceramics AB, vilken avser isostatisk kompaktering. Evakuering och pressning samt tillhörande hantering sköts av två personer. Hanteringen drivs på ett sådant sätt att pressen arbetar nästan hela tiden. Eftersom hålltiden är kort åtgår den mesta tiden till tryckstegring och trycksänkning samt i mindre mån till in- och utförsel av hanteringsenheterna, ”kanistrarna”, ur tryckkammaren. Presscykeltiden är i stort oberoende av storleken hos den kropp som ska pressas. Största måtten på en pressad kropp är i storleksordningen tre – fyra meter i höjd och en meter i diameter.

Kanistrarna innehåller gummisäckarna med evakuerat pulver. (Kanistrarna har hål på sidorna för att släppa igenom tryckmediet som gummidukarna känner av. Tryckmediet utgörs av vatten. Pumparna arbetar emellertid med hydraulolja som växlas mot vatten via gummimembran inuti tryckkammaren). Evakueringen sker i en separat position och oberoende av pressningen. Den är dock anpassad så i tid att evakueringen görs under den tid som det tar för en presscykel. Därför används normalt endast en evakueringsposition. Priset för en evakueringsposition eller en kanister är närmast försumbart i jämförelse med priset på pressen.

I fallet enaxlig kompaktering föreligger inte lika goda möjligheter till jämförelse. Här har i stället utnyttjats att en "rationaliseringspotential" torde föreligga. När en så stor del av totalkostnaden ligger på själva pressanläggningen förutses det vara lönsamt att utnyttja utvecklade system för mekanik och hantering samt bestrykning av smörjmedel, vilket antas genomföras. Därför har bedömningen gjorts att cykeltiden kan bli ungefär densamma även i detta fall. Det bör dock observeras att detta innebär att två pressverktyg behöver införskaffas. Under pågående produktion befinner sig det ena i pressen och det andra används för utpressning av bentonitblocket från verktyget, smörjning, påfyllnad och hantering av de olika delarna som ingår i verktyget.

Om cykeltiden är lika kommer det något mer omfattande kringarbetet i den enaxliga processen att förskjuta värderingen till förmån för isostatisk kompaktering. Slutresultatet skulle i så fall innebära att isostatisk kompaktering kan vara något billigare.

Denna fördel skulle emellertid kunna vändas till sin motsats under vissa förutsättningar. Ett skäl skulle kunna vara den ovan nämnda aspekten avseende överkapacitet. Ett annat skäl kan vara hålltiden. I det föregående har antagits att behovet av hålltid är detsamma för isostatisk kompaktering jämfört med enaxlig. Som närmare diskuteras i avsnitt 4.2 är inte förloppen identiska. Om i stället behovet av hålltid i samband med isostatisk kompaktering skulle antas uppgå till det dubbla jämfört med enaxlig skulle "prispendeln" kanske kunna svänga över till den enaxliga kompakteringens fördel. I dag föreligger inte något tillräckligt underlag för bedömning av behovet av hålltid för de två metoderna.

## **5 Jämförelse mellan enaxlig och isostatisk kompaktering**

### **5.1 Allmänt**

Den modell som har använts för jämförelsen är AHP-metoden, där AHP står för ”Analytisk Hierarkisk Process” /14/. Den baseras på logisk/vetenskaplig grund samtidigt som den innehåller förutsättningar för en kreativ jämförelseprocess.

Modellen bygger upp en hierarkisk struktur som närmare beskrivs i bilaga A. Överst i strukturen finns det mål som ska uppnås och under denna de kriterier som påverkar det angivna målet. Varje kriterium kan sedan delas upp i en eller flera underliggande nivåer, subkriterier, beroende på önskad detaljeringsgrad.

I AHP-analysen jämförs varje subkriterium parvis med avseende på kriteriet på nivå ovanför och rangordnas efter en förutbestämd flergradig skala där det högsta värdet är uttryck för den mest positiva (befrämjande) värderingen.

I föregående kapitel har visats att endast ett fåtal av aktiviteterna i processkedjan för bentonit och block påverkar jämförelsen mellan kompakteringsmetoderna. I detta kapitel tas endast de aktiviteter och moment upp där en sådan påverkan har registrerats. Den fullständiga strukturen och värderingen av de i den kompletta kedjan ingående aktiviteterna och momenten redovisas i bilaga A.

### **5.2 Jämförelseprocess för kompakteringstekniker**

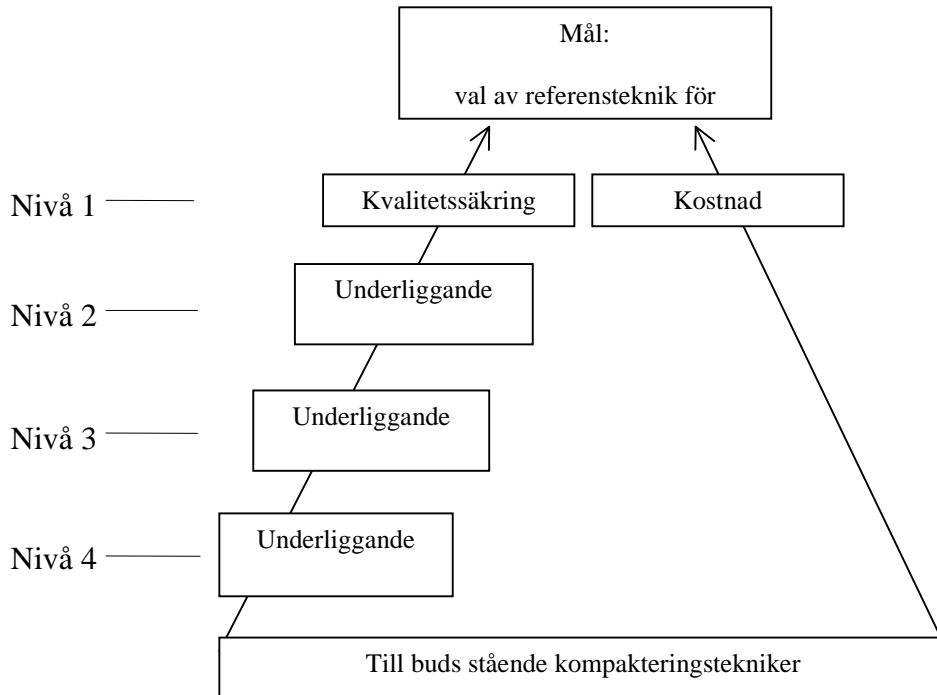
#### **5.2.1 Avvikelser från konventionell AHP**

Den grundläggande avvikelser från konventionell AHP består i att den jämförelse som görs i den föreliggande rapporten är kvalitativ (egentligen halv-quantitativ) och inte kvantitativ. Motivet för valet av ett kvalitativt tillvägagångssätt är att en kvantitativ analys skulle bli mera resurskrävande men ändå inte medföra någon stor ökning av skärpan i jämförelsen mellan de alternativ som studeras (det vill säga enaxlig och isostatisk kompaktering). Ett huvudskäl för detta är att underlaget för bedömning av olika aspekter i många fall är ofullständigt, som beskrivits i kapitel 4.

Under arbetets gång betraktas alla kriterier som ett mål, oavsett vilken nivå de befinner sig på.

#### **5.2.2 Den hierarkiska strukturen**

Jämförelseprocessen är strukturerad i fyra nivåer. Den högsta nivån (nr 1) är närmast målet medan den lägsta nivån (nr 4) är närmast den konkreta teknik som tillämpas enligt de två kompakteringsalternativ (variabler) som jämförs.



**Figur 5-1.** Schematisk hierarki för jämförelse indelade i fyra nivåer.

Den hierarkiska strukturen framgår översiktligt av figur 5-1. Bilagan innehåller också en detaljerad beskrivning av jämförelseprocessens genomförande och den numeriska analysen.

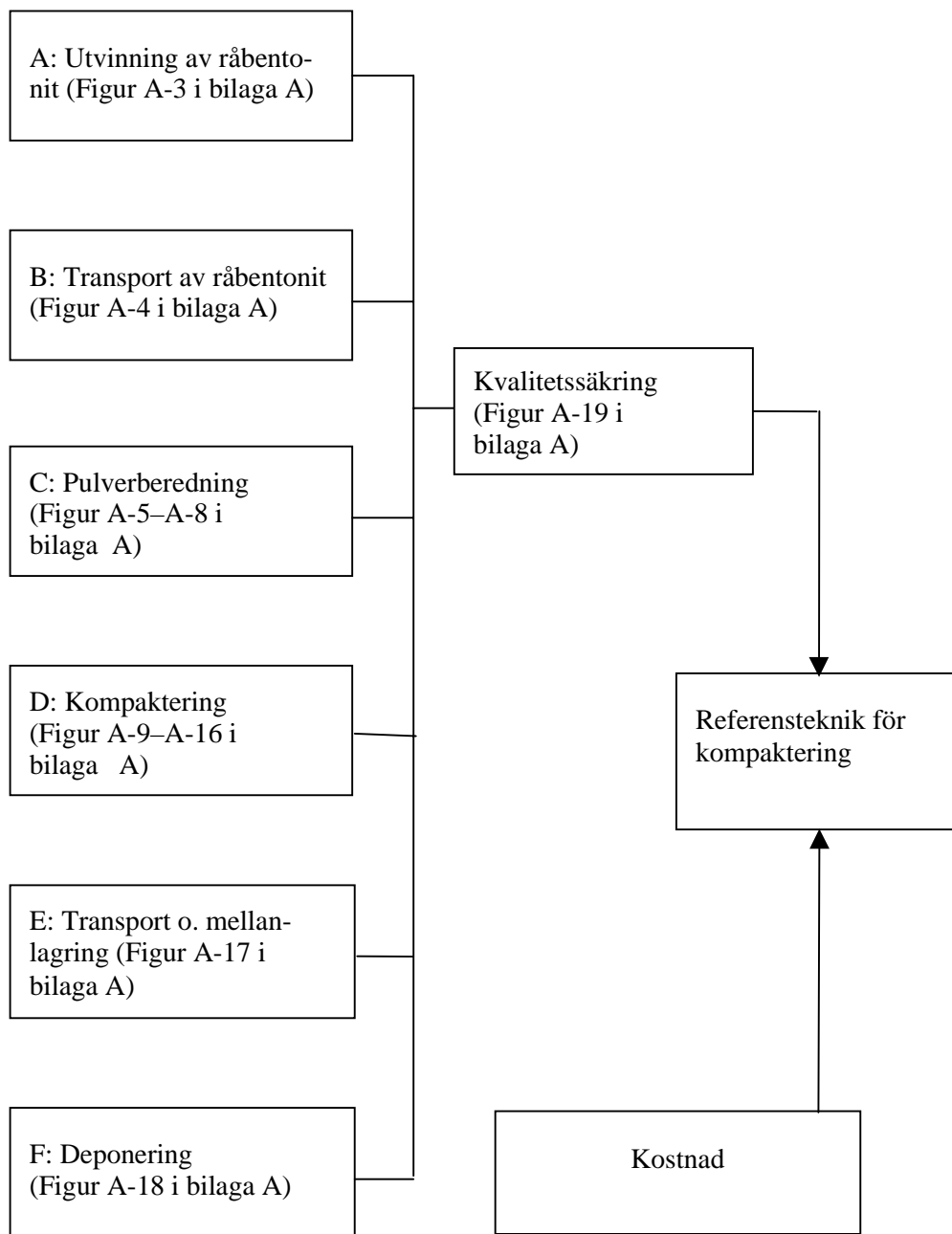
Nivån närmast målet innehåller allmängiltiga karakteristika för föreliggande typ av industriell process. Generellt sett brukar dessa vara *teknik*, *säkerhet* och *kostnad*.

Det är dessa aspekter som ska bedömas för de två teknikerna som ska jämföras. Jämförelsen utgår från postulerade utförandeformer för alternativen, se kapitel 3 ovan, och avser således inte hur respektive teknik ska förverkligas. Mot denna bakgrund görs en integrering mellan *teknik* och *säkerhet* till *kvalitetssäkring*. Utvärderingen med avseende på kvalitetssäkring innebär att de båda alternativen ska bedömas utifrån den tillförlitlighet med vilken avsedd kvalitet kan förverkligas.

Övriga nivåer innehåller arbetsinnehållet för hela ”bentonitkedjan” fördelade på *aktivitet*, *arbetsmoment* och *handgrepp*.

### 5.2.3 Jämförelseprocessens genomförande

Det konkreta jämförelsearbetet utfördes på följande sätt. Först ställdes det ovan nämnda schemat upp, figur 5-2. Därefter utförde rapportens författare, var för sig, bedömningar av vilken kompakteringsprocess som var att föredra för vart och ett av processtegen samt vilka vikter som de olika stegen skulle ha.



**Figur 5-2.** Jämförelsehierarkin för kompakteringsteknik.

När “betygen” satts av författarna var för sig gjordes en genomgång i vilken gemensamma “betyg” etablerades. De olika författarna är på delvis olika sätt förtrogna med den aktuella kunskapsbasen och därmed också förutsättningarna för de olika kompakteringsteknikerna. Ett viktigt syfte med det använda arbets sättet är att söka fånga in dessa olika aspekter till en syntes.

Värdetilldelningen, det vill säga värderingen av ett visst kriteriums (i vårt fall process-steps) betydelse görs med siffror från 1 uppåt. Antalet värden i respektive jämförelse motsvarar antalet kompakteringstekniker eller handgrepp eller arbetsmoment eller aktivitet som ingår i den aktuella värderingen.

Detta innebär att den ände på skalan som avser ”bäst/viktigast” är konstant och värdet uttrycks alltid med siffran 1. Skalans andra ände representeras däremot av varierande siffervärden. En etta (1) betyder ”viktigast” eller ”mest befrämjande” eller “större sannolikhet för resultat med önskad kvalitet” medan den högsta siffran i den aktuella jämförelsen betyder ”minst viktigt” eller ”minst befrämjande” eller “mindre sannolikhet för resultat med önskad kvalitet”. Vid ”lika” bedömning kan samma siffervärde tilldelas flera komponenter i aktuell jämförelse.

För slutresultatet innebär denna sifferanvändning att den kompakteringsteknik **som bäst uppfyller** i den aktuella hierarkin samlade kriterier får **lägst totalpoäng**. Som framgår av tabellerna nedan beräknas först produkterna av betyg och ranking för de skilda stegen. Produkternas inverterade (reciproka) värden summeras och summan inverteras åter, vilket ger nämnda slutresultat. Detta normeras sedan så att summan för enaxlig och isostatisk metod blir 1.

### 5.3 Jämförelser av faktorer som påverkar valet av kompakteringsmetod

Under aktiviteterna kompaktering är det momenten evakuering, själva kompakteringen och bearbetningen som fått olika värderingar och som kan påverka valet av kompakteringsmetod. Därför visas värderingen av dessa moment nedan. Detaljerade värderingar av alla ingående arbetsmoment presenteras i bilaga A. Figur 5-2 visar endast huvudstrukturen.

De frågor som ska värderas i varje steg i analysen och som betygsatts i tabellerna är:

1. Med vilken kompakteringsteknik bedöms resultatet av handgrepp/arbetsmoment/aktivitet bli mest fördelaktigt (tabellernas vänstra kolumner)?
2. Vilken betydelse bedöms handgrepp/arbetsmoment/aktivitet ha för det kvalitativa resultatet hos arbetsmoment, aktivitet respektive delmål ”kvalitetssäkring” (tabellernas mittkolumner)?

#### 5.3.1 Aktivitet kompaktering (D)

##### **Arbetsmoment evakuering av pressverktyg (De)**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *evakuering av pressverktyg* sammanställs i tabell 5-1.

I tabellen används de beteckningar för de skilda handgreppen, som finns i bilaga A. Beteckningarna betyder:

- De1 Ventil till vakuumsystemet öppnas.
- De2 Flöde/tryck registreras.
- De3 Efter evakueringen stängs ventilen.
- De4/i Eventuellt inre rör lyfts bort.

**Tabell 5-1. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "evakuering av pressverktyg".**

Kompakteringsteknik		Handgrepp		Ranking avseende arbetsmomentet evakuering av pressverktyg	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	De1	2/2/4=3	1/3	1/3
1	1	De2	2/1/2=2	1/2	1/2
1	1	De3	2/2/4=3	1/3	1/3
1	2/2/1=2	De4/i	1/2/5=3	1/3	1/6
			Summa:	1,5	1,33
			Reciprok av summan:	0,66	0,75
			Normerat vägt värde	0,47	0,53

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms inte vara lika med avseende på arbetsmomentet *evakuering av pressverktyg*.

### **Arbetsmoment kompaktering (Df)**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *kompaktering* sammanställs i tabell 5-2.

I denna tabell används följande beteckningar för handgreppen

Df1	Pressverktyg/gummibag förs in i pressen.
Df2/e+f2+f3/i	Pressverktyget positioneras/Cylinderns lock läggs på, oket placeras.
Df3/e+f4/i	Pressning enligt förutbestämd presscykel.
Df4/e+f5/i	Införande av distansring/ Oket förs bort.
Df5/e	Pressning enligt förutbestämd presscykel.
Df6/e+6+7/i	Pressverktyg lyfts upp/Cylinderlock öppnas, Kanistern lyfts upp.
Df7/e+f8/i	Dist.element och stötabs. kudde läggs under/Kanister till frilägningsposition.
Df8/e	Bentonitblock trycks ut.
Df9/e	Pressverktyget till sidoläge.
Df10/e+f9-11/i	Bentonitblock friläggs.
Df11/e+f12/i	Bentonitblock placeras på pall eller förs till bearbetning.



**Tabell 5-2. Vägt värde för enaxlig- respektive isostatisk kompaktering med avseende på "kompaktering".**

Kompakterings- teknik		Handgrepp		Ranking avseende arbetsmomentet kompaktering	
Enaxlig	Isosta- tisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Df1	3/3/3=3	1/3	1/3
1/1/2=1	1	Df2e+2+3/i	2/2/2=2	1/2	1/2
2/1/1=1	1	Df3/e+4/i	1/1/1=1	1/1	1/1
2	1	Df4/e+5/i	1/5/3=4	1/8	1/4
2/1/1=1	1	Df5/e	1/1/1=1	1/1	1/1
1/1/2=1	1	Df6/e+6-7/i	3/3/2=3	1/3	1/3
2	1	Df7/e+8/i	2/5/2=3	1/6	1/3
1/2/2=2	1	Df8/e	3/2/1=2	1/4	1/2
1	1	Df9/e	4/4/3=4	1/4	1/4
1/1/2=1	1	Df10/e+9-11/i	4/4/3=4	1/4	1/4
1	1	Df11/e+12/i	5/5/4=5	1/5	1/5
Summa:				4,41	4,95
Reciprok av summan:				0,23	0,20
Normerat vägt värde				0,53	0,47

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms inte vara lika med avseende på arbetsmomentet *kompaktering*.

### **Arbetsmoment bearbetning (Di)**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *bearbetning* sammanställs i tabell 5-3.

I denna tabell används följande beteckningar för handgreppen:

- Di1 Eventuell förflyttning från lager till bearbetning.
- Di2 Eventuell beräkning av avverkningsdjup.
- Di3 Centrerung och låsning i svarv.
- Di4 Bearbetning (svarvning).
- Di5 Dammsugning av block.
- Di6/i Byte av bearbetningsposition (vändning).
- Di7/i Bearbetning i ny position (svarvning).
- Di8/i Dammsugning av block.
- Di6 Förflyttning till lager eller till inspektion.

**Tabell 5-3. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "bearbetning".**

Kompakteringsteknik		Handgrepp		Ranking avseende arbetsmomentet bearbetning	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Di1	2/2/1=2	1/2	1/2
1	1	Di2	3/3/2=3	1/3	1/3
1	1	Di3	3/3/3=3	1/3	1/3
1	1	Di4	2/2/1=2	1/2	1/2
1	1	Di5	3/3/3=3	1/3	1/3
1	2/2/1=2	Di6/i	1/1/2=1	1/1	1/2
1	2/2/1=2	Di7/i	4/4/4=4	1/4	1/8
1	2/2/1=2	Di8/i	4/4/4=4	1/4	1/8
1	1	Di6	4/4/4=4	1/4	1/4
Summa:				3,75	3
Reciprok av summan:				0,27	0,33
Normerat vägt värde				0,45	0,55

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms inte vara lika med avseende på arbetsmomentet *bearbetning*.

### 5.3.2 Sammanställning av aktivitet kompaktering (D)

Rankingen mellan enaxlig- och isostatisk kompaktering med avseende på aktiviteten *kompaktering* sammanställs i tabell 5-4.

I denna tabell används följande beteckningar för arbetsmomenten:

- Da Påföring av smörjmedel.
- Db Uträkning av önskad volym.
- Dc Överföring av bentonit från mellanlager till dos.silo.
- Dd Fyllning av pressverktyget.
- De Evakuering av pressverktyget.
- Df Kompaktering
- Di Bearbetning
- Dj Paketering

Värden för de arbetsmoment som inte skiljer sig mellan de två processerna har hämtats från bilaga A.

**Tabell 5-4. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på ”kompaktering”.**

Kompakteringsteknik		Arbetsmoment		Ranking avseende arbetsinsatsen kompaktering	
Enaxlig (vägt värde)	Isostatisk (vägt värde)	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
[2] 0,66	[1] 0,33	Da	1/5/1=3	1/1,98	1/0,99
[1] 0,50	[1] 0,50	Db	3/3/3=3	1/1,5	1/1,5
0,50	0,50	Dc	5/5/3=4	1/2	1/2
0,50	0,50	Dd	1/1/1=1	1/0,50	1/0,50
0,47	0,53	De	1/1/1=1	1/0,47	1/0,53
0,53	0,47	Df	1/1/1=1	1/0,53	1/0,47
0,45	0,55	Di	3/3/4=3	1/1,35	1/1,65
0,50	0,50	Dj	4/4/4=4	1/2	1/2
			Summa:	9,93	10,3
			Reciprok av summan:	0,101	0,097
			Normerat vägt värde	0,51	0,49

Inom [ ] visas det för respektive teknik tilldelat värde.

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på arbetsinsatsen *kompaktering*. Trots att de ingående momenten fått olika värdering blir alltså slutresultatet att de båda metoderna är likvärda.

## 5.4 Jämförelser beträffande kostnad

I detta avsnitt rangordnas de två kompakteringsteknikerna enbart med avseende på de uppskattade **kostnader** som kan kopplas till respektive kompakteringsteknik.

Den kompakteringsteknik som tilldelats en etta (1) har bedömts vara bättre än den andra som har tilldelats en tvåa (2). Innebörden i ”bättre” betyder generellt sett lägre kostnader. Bedömningen ska göras utifrån kriterierna investering samt drift och underhåll.

Resultat från nyligen utförda kostnads kalkyler/kostnadsuppskattningar diskuterades i avsnitt 4.7, vilket kan utgöra en grund för bedömningarna i detta avsnitt. Stöd för bedömningarna kan även återfinnas i de siffervärden som erhöles för nya anläggningar. Några av dessa redovisas i tabell 5-5.

Värdena i tabellen utgår från följande antaganden. I båda pressanläggningarna produceras medelhöga block i tvåskift. Anläggningarna producerar block för ett hål per dag med en visst tillägg för kassationer. Det finns överkapacitet hos anläggningarna men den bedöms inte kunna nyttjas för annan produktion.

**Tabell 5-5. Uppskattade kostnader för bentonitblock som produceras i nya anläggningar.**

Kostnader	Enaxlig kompaktering	Isostatisk kompaktering
<b>Totala anläggningskostnader MSEK</b>		
Byggnader och ombyggnader	10	10
Press	45	35
Övrigt	7	9
Summa totala anläggningskostnader	<b>62</b>	<b>54</b>
<b>Kapital &amp; avskrivningskostnader per hål<sup>1</sup>, SEK</b>		
Räntekostnad (4 %)	12 400	10 800
Avskrivning byggnader (20 år)	2 500	2 500
Avskrivningar maskiner (10 år)	26 000	22 000
Summa kapital & avskrivning	<b>40 900</b>	<b>35 300</b>
<b>Övrig fast produktionskostnad per hål<sup>2</sup>, SEK</b>	<b>33 000</b>	<b>32 000</b>
<b>Rörlig produktionskostnad per hål<sup>3</sup>, SEK</b>	<b>44 000</b>	<b>44 000</b>
<b>Total kostnad per hål, SEK</b>	<b>117 900</b>	<b>111 300</b>

<sup>1</sup> I anläggningen tillverkas block för 200 deponeringshål per år för båda typerna av kompaktering.

<sup>2</sup> Driftskostnad exklusive reservdelar och förbrukningsmaterial. Personalkostnad ingår med 3 MSEK/år, ventilation etc med 2 MSEK/år och underhåll och reinvesteringar med 2,5 % av anläggningskostnaden/år.

<sup>3</sup> Avser huvudsakligen bentonit 33 000 SEK/hål, övriga driftskostnader 8 000 SEK/hål samt reservdelar och förbrukningsmaterial (cirka 3 000 SEK/hål).

Den totala anläggningskostnaden är något lägre för isostatisk kompaktering.

Kostnaden för en isostatisk pressanläggning som tillverkar höga block ingår inte i jämförelsen men antyds i tabell 5-6.

Den lägre driftskostnaden för isostatanläggningen hänger samman med den högre effektiviteten.

En bedömning enligt det ovan beskrivna förenklade AHP-förfarandet kan nu göras. Bedömningarna är gjorda per deponeringshål. På grund av ofullkomligheter i underlaget samt osäkerheter i allmänhet görs dock inte någon ranking av kriterierna. Resultatet redovisas i tabell 5-6.

**Tabell 5-6. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "ekonomi".**

Blocktyp		
Enaxlig	Isostatisk	
Medelhöga	Medelhöga	Höga
3	2	1
3	2	1
3	2	1

Resultatet i tabell 5-6 kan tänkas modifieras om antagandet om tillgång till alternativ produktion ändras. Sannolikt kommer kalkyler att göras utgående från olika antaganden om bärkraft hos alternativ produktion. För sådana överväganden erfordras bland annat underlag beträffande anläggningskostnader för olika blockstorlekar (isostatisk kompaktering), vilket inte föreligger för närvarande.

Ett antagande om att anläggningen kan nyttjas för alternativ produktion bedöms innebära att isostatisk kompaktering av medelhöga block ännu tydligare framstår som det mest attraktiva alternativet ur ekonomisk synpunkt.

## 6 Jämförelse ur kvalitets- och grundkravsperspektiv

### 6.1 Krav på bentonitblock

För jämförelsen har följande krav på bentonitblocken sammanställts:

1. Blocken ska ha specificerade dimensioner med en noggrannhet av:

Ytterdiameter	+/- 2.5 mm
Innerdiameter (ringar)	+/- 1 mm
Höjd	+/- 5 mm
2. Parallelliteten mellan blockets över- och underyta ska vara inom 2 mm.
3. Blocken ska ha specificerad medeldensitet med en noggrannhet av +/- 0.01 g/cm<sup>3</sup>.
4. Blocken ska ha en homogenitet i densitet:
  - I axiell led får medeldensiteten (på hela radien) inte avvika mer än +/- 0.01 g/cm<sup>3</sup>.
  - I radiell led ställs inga krav.
5. Blocken ska ha en specificerad vattenkvot som inte avviker med mer än:
  - i medelvärde +/- 1%
  - i homogenitet +/- 1%
6. Blocken får ej ha tillsatser i bentoniten (för att underlätta kompakteringen) som påverkar buffertens funktion negativt efter deponering.
7. Blocken bör tillåta lagring under erforderlig tid i rumstemperatur.
8. Blocken ska ha tillräcklig hållfasthet för att tillåta transport och hantering före och under deponering, vilket innebär följande delkrav:
  - Medelskjuvhållfastheten ska vara minst 500 kPa.
  - Sprickor eller andra svagheter med sådan utsträckning att hanterbarheten påverkas får inte finnas efter pressning eller utbildas under lagring.

### 6.2 Jämförelse

Jämförelsen av block från enaxlig och isostatisk kompaktering kan göras på två sätt. I den första och viktigaste utvärderingen bedöms om grundkraven 1–8 uppfylls (OK / ej OK). I den andra utvärderingen jämförs kvaliteten (betyg 1–5, där 5 är högsta betyg).

- 1, 2. Dimensionskraven förväntas inte innebära problem för någon metod. Enaxlig pressning innebär att blocken får radiella mått efter formen och efter en liten svällning som är lika stor för alla block. Axiellt kan höjden variera något men toleransen har satts högre för höjden eftersom en avvikelse där har liten betydelse. Isostatisk pressning innebär att blocken svarvas efter önskad mått. Kvalitetsmässigt anses metoderna vara likvärdiga under förutsättning att den önskade form

som idag fås vid enaxlig pressning går att få bort genom att konan istället tas med en inre delbar form. Den lägre poängen 4 inom parantes avser befintlig teknik.

3. Densitetskraven kan uppfyllas utan problem med båda metoderna efter en test- och inköringsserie.
4. Homogenitet i densitet förväntas inte vara något problem vid isostatisk pressning. Vid enaxlig pressning har en inhomogenitet observerats med något lägre densitet i överdelen närmast randen (på grund av friktion). Den är dock så liten att kraven uppfylls. Kvaliteten är således något bättre för isostatisk pressning, men det är tveksamt om denna skillnad (som inte syns och inte påverkar någon funktion märkbart) ska vara utslagsgivande.
5. Vattenkvot påverkas inte av pressningstekniken utan av blandning och förvaring.
6. Den enda teknik som använder tillsatser är enaxlig. Smörjmedlet som tillsätts fastnar på blockens mantelytor, men ger enligt dagens kunskap ingen påverkan på funktionen. Den kan avlägsnas antingen genom slipning eller svarvning om denna bedömning skulle ändras.
7. Lagringstiden kan vara en kritisk faktor om mycket lång tid krävs. I ett djupförvar ska dock produktionen ske i samma takt som deponeringen varför några långa lagringstider inte förväntas. Någon skillnad mellan metoderna har inte observerats.
8. Mätningar av hållfastheten hos block visar att den är mycket god i förhållande till vad som krävs vid hantering och transport. De problem som uppstått kan härledas till misstag vid pressning, såsom dålig avluftning som kan ge upphov till stora horisontella sprickor. För enaxligt pressade block har, speciellt för bentonit med naturlig vattenkvot (c:a 10%), ibland en spricka som startar i översta ytterkanten och sträcker sig några cm in i blocket observerats. Vid förhöjd vattenkvot (cirka 17 %) är den mycket liten eller finns inte alls. Sprickan bedöms inte påverka hanterbarheten utan kan ses som en ”skönhetsfläck”. Eftersom den beror på axiell svällning vid avlastning går den förmodligen inte att undvika vid låga vattenkvoter. Vid förhöjd vattenkvot, som preliminärt ska användas i djupförvaret, synes sprickan vara obetydlig.

Resultatet av denna jämförelse redovisas i tabell 6-1.

**Tabell 6-1. Resultat av Jämförelsen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering utgående från grundkrav samt kvalitet.**

Punkt nummer	Grundkrav Enaxlig	Grundkrav Isostatisk	Kvalitet Enaxlig	Kvalitet Isostatisk
1	OK	OK	5 (4)	5
2	OK	OK	5	5
3	OK	OK	5	5
4	OK	OK	4–5	5
5	OK	OK	5	5
6	OK	OK	5 (4)	5
7	OK	OK	5	5
8	OK	OK	4–5	5

Båda metoderna klarar alltså grundkraven. Isostatisk pressning får högsta betyg på kvalitet. Enaxlig pressning har två fyror inom parentes som alltså kan undvikas med teknikutveckling. Den har också fått två tveksamma femmor (4–5) där det lägre betyget avser icke mätbara fenomen som saknar betydelse men kan vara en ”psykologisk” faktor.

Aspekter som inte tagits med är kanske utslagsgivande. Dessa aspekter är t ex hur flexibel tekniken är och om den har testats i full skala. Isostatisk pressning ger större valfrihet vad gäller blockens höjd, medan enaxlig teknik är den enda som testats i full skala.

Slutsatsen är att båda metoderna klarar grundkraven, men att ”psykiskt betingad” kvalitet förmodligen är något bättre för isostatiskt pressade block. Flexibiliteten hos isostattekniken är förmodligen ett starkare motiv att förorda denna teknik, medan erfarenheterna som finns med att pressa i full skala kan vara ett motiv att förorda enaxlig.



## 7 Diskussion och slutsatser

### 7.1 Jämförelser mellan medelhöga och höga block

Som närmare beskrivs och motiveras i kapitel 3 görs jämförelserna mellan enaxlig och isostatisk kompaktering i denna rapport i huvudsak för *medelhöga block*. Uppdraget avsåg emellertid även höga block som kompakteras med isostatisk teknik. I detta avsnitt görs därför jämförelser i första hand mellan *isostatiskt kompakterade medelhöga block* och *isostatiskt kompakterade höga block*.

Olika kompakteringsmetoder och blockstorlekar medför något olika processsystem men utvinning, transport och pulverberedning relativt oberoende av blockstorleken. Höga block kan komma att kräva en delvis annorlunda hantering. Kvalitets- och kostnads- mässigt bedöms detta ändå vara av mindre betydelse jämfört med pressning och deponering.

Principen för isostatisk kompaktering innebär att processen är praktiskt taget oberoende av den pressade kroppens storlek. Erfarenheten från Ifö Ceramics AB är också att försök i liten skala (laboratorieskala) väl reproducerar full skala. Försök med isostatisk kompaktering av bentonit i skala 1:4 har indikerat att metoden fungerar väl även för bentonitenheter med komplicerad form ("burk"). Det finns således en god grund för bedömningen att det rent presstekniskt föreligger en obetydlig skillnad mellan höga och medelhöga block.

Den enda aspekt som identifierats som skiljande är evakuering, där ju transport-avståndet för luften är väsentligt större i höga block. De försök som utförts har dock indikerat att evakuering inte behöver vara något problem under förutsättning av att lämplig kornstorleksfördelning valts och att MX-80 fungerar väl. Evakueringsprocessen görs lämpligen "självkontrollerande" på så sätt att minskningen av undertrycket som funktion av tiden kontrolleras efter avslutad evakuering.

Enligt genomförda kostnadsbedömningar är kostnaden för pressning betydligt lägre per deponeringshål räknat för höga jämfört med medelhöga block.

Överkapaciteten ökar med ökad blockstorlek. I kalkylerna har förutsatts att överkapaciteten inte kan utnyttjas för alternativ produktion.

För deponeringen har ett sådant alternativ valts i studien som inte förefaller särskilt känsligt med avseende på blockens storlek.

Sammanfattningsvis kan sägas att storleken på block kan bero på vilket deponeringsalternativ som väljs. Inga tekniska skillnader som bedöms ha någon större betydelse har kunnat identifieras mellan medelhöga och höga isostatiskt kompakterade block. Under förutsättning av att alternativ produktion med jämförbar bärkraft kan utnyttjas bedöms höga block vara betydligt gynnsammare än små ur ekonomisk synpunkt. Om överkapaciteten inte kan nyttjas, vilket har förutsatts i denna jämförelse, blir det gynnsammare med medelhöga block.

## 7.2 Jämförelser mellan enaxligt och isostatiskt kompakterade medelhöga block

Som framgår tidigare i denna rapport är det främst i själva kompakteringsprocessen som skillnader kan visas mellan enaxlig och isostatisk kompaktering.

Inga förhållanden som diskriminerar någondera metoden har identifierats. Däremot har ett antal faktorer påvisats som påverkar kvaliteten.

Den viktigaste skillnaden bedöms hänga samman med den friktion mot pressverktygets väggar som med nödvändighet uppkommer i samband med enaxlig kompaktering men som inte har någon egentlig motsvarighet när det gäller isostatisk kompaktering. Den erforderliga smörjningen som tillkommer för enaxlig kompaktering motsvaras i viss mån av en större avverkning vid bearbetningen av isostatiskt framställda block.

Friktion mot pressverktygets väggar kan leda till spänningar i materialet samt sprickbildning, vilket kan försvåra hanteringen.

Det är tänkbart att de spänningar samt sprickor och andra defekter som bildas i en väl utvecklad process i huvudsak är skönhetsfel. Samtidigt kan tendensen till sådana fel innebära ökad komplexitet hos processen (inklusive ökade krav på kvalitetssäkring) samt medföra utvecklingsinsatser för att klarställa att inte en del av blocken kan ge problem (vilket kan vara besvärligt att visa). En annan nackdel kan vara om begränsningar behöver göras beträffande kvartsinnehållet i bentoniten.

I övrigt har endast skillnader som bedömts ha mindre betydelse framkommit.

Det bör också påpekas att utvecklingsarbetet inte befinner sig på samma nivå för de båda alternativen. Inget fullstort block har ännu framställts med isostatisk teknik. Viktiga erfarenheter kan komma att göras när sådan uppskalning kommer till stånd. Exempelvis kan man inte utan vidare ta för givet att gummiduken fungerar på samma sätt i full skala som i skala 1:4.

Kostnadsberäkningar visar att kostnaden för isostatiskt kompakterade medelhöga block är något lägre än för enaxligt kompakterade medelhöga block.

Sammanfattningsvis bedöms isostatisk kompaktering vara mest gynnsam ur teknisk synvinkel. Denna bedömning kan dock komma att modifieras eller justeras när resultat av kommande utvecklingsarbete föreligger. Ur ekonomisk synvinkel är isostatisk kompaktering fördelaktigast.

## 7.3 Övriga slutsatser

Alla de tre alternativa blocktyperna i figur 3-1 kan rekommenderas som referensalternativ. De bedöms uppfylla grundkraven beträffande kvalitet med god (enaxlig kompaktering) eller mycket god (isostatisk kompaktering) marginal. Inga stora skillnader kan identifieras beträffande teknik eller ekonomi.

Om referensmetod ska väljas utgående från kriterierna säkerhet/kvalitet, teknik och ekonomi bedöms underlaget stödja valet av isostatisk kompaktering. Däremot medger inte underlaget någon diskriminering i dessa avseenden beträffande blockstorleken.

Detta val innebär att SKB fokuserar sitt fortsatta utvecklingsarbete mot isostatisk kompaktering.

SKB har tillverkat cirka 100 block för prototypförvaret samt för återtagsförsöken med enaxlig teknik, eftersom det är den för dagen praktiskt tillgängliga tekniken.

I samband med frågan om inriktningen av SKB:s fortsatta utvecklingsarbete bör även nämnas att behov av ytterligare kunskap identifierats i många sammanhang i denna rapport. En hel del kunskap föreligger och har i stor utsträckning tagits fram inför tillverkning av block för fullskaleförsöken i Äspölaboratoriet.

De frågor som eventuellt behöver belysas ytterligare är främst följande:

- Presscykeln för olika fukthalt, trycköknings- och trycksänkingshastigheter, hålltid, kompakteringsförfarande med mera.
- Hålltidens beroende av maximitrycket.
- Evakuerbarhet, höga block.
- Smörjning och applicering av smörjning.
- Bentonitens innehåll av kvarts och eventuell påverkan på pressverktygets yta.
- Reproducerbarhet, isostatpressning med avseende på mått.
- Sprickor och deras bildningssätt.
- Hur hantera block med tendens till sprickor.
- Kopplingar till slutförvaringen, kopplingar till bentonitens egenskaper från de olika hanteringsstegen, skillnader mellan mikrostrukturerna från enaxlig respektive isostatisk kompaktering.
- Höga/låga block i slutförvaret.

Även om den studie som redovisas i denna rapport avsåg kriterierna kvalitet, teknik och ekonomi kan ändå några ord nämnas om övriga kriterier och huruvida sådana skulle eller borde föranleda en omprövning av ovan gjorda identifieringar av referensteknik och reservteknik.

En tänkbar sådan faktor kan vara enkelhet. Här görs bedömningen att en process för blocktillverkning som innefattar isostatisk kompaktering är enklare.

Avgörande för bedömningen av relevansen för försök i reducerad skala är vilka effekter man är ute efter och vilka erfarenheter som finns beträffande dessa effekters skalberoende. Erfarenheten vid Ifö Ceramics AB indikerar att i samband med isostatisk teknik är försök i reducerad skala generellt sett mycket representativa.

Det kan emellertid inte uteslutas att viktiga erfarenheter kan komma att göras när isostatiska kompakteringar i full skala kommer till stånd.

Slutsatsen är att relevant erfarenhet från produktion föreligger för båda metoderna.

Det är också värdefullt om en metod är flexibel i förhållande till nya omständigheter som kan uppkomma som resultat av det fortsatta utvecklingsarbetet samt i förhållande till alternativa utformningar av andra delar av slutförvarssystemet. Mot bakgrund av det underlag som redovisas i denna rapport görs bedömningen att den isostatiska tekniken är mera flexibel i förhållande till nya omständigheter som kan uppkomma som resultat av det fortsatta utvecklingsarbetet än den enaxliga.

Den isostatiska tekniken ger en hög grad av flexibilitet i blockens höjd medan enaxlig teknik sannolikt innebär påtagliga begränsningar beträffande högsta höjd/diameterförhållande för blocken.

Det har också nämnts tidigare att en press – enaxlig eller isostatisk – sannolikt får en överkapacitet och att kostnaden för kompaktering är starkt beroende av om kompletterande användning kan finnas. Överkapaciteten ökar med ökad blockstorlek. Val av isostatisk teknik som referensteknik innebär emellertid inte att man binder sig beträffande hur stor press som sedan införskaffas.

Ovanstående analys av övriga kriterier ger ingen anledning att ifrågasätta ovan angivna val utan stöder i stället slutsatsen att isostatisk kompaktering kan vara referensteknik och enaxlig kompaktering kan vara reservteknik. Den isostatiska tekniken innebär en sådan flexibilitet att såväl medelhöga som höga block kan tillverkas.

## 8 Referenser

- /1/ **SKB, 1998.** FUD-Program 98. Kärnavfallets behandling och slutförvaring. Program för forskning samt utveckling och demonstration av inkapsling och geologisk slutförvaring. Svensk Kärnbränslehantering AB
- /2/ **SKB, 1998.** FUD-Program 98. Detaljerat program för forskning och utveckling 1999–2004. Svensk Kärnbränslehantering AB
- /3/ **SKB, 2001.** FUD-Program 2001. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB
- /4/ **Pusch R, Börgesson L, Nilsson J, 1982.** Buffer mass test – Buffer materials. Stripa Project Technical Report TR-82-06, Svensk Kärnbränslehantering AB
- /5/ **Sjöblom R, Pusch R, 1997.** Isostatic compaction of Bentonite Blocks. Present Status. SKB AR D-97-06, Svensk Kärnbränslehantering AB
- /6/ **Börgesson L, Johannesson L-E, Fredriksson A, 1993.** Laboratory investigations of highly compacted bentonite blocks for buffer material, Compaction technique and material composition. SKB Djupförvar, Projektrapport PR 44-93-009, Svensk Kärnbränslehantering AB
- /7/ **Johannesson L-E, Börgesson L, Sandén T, 1995.** Compaction of bentonite blocks. Development of technique for industrial production of blocks which are manageable by man. SKB TR-95-19, Svensk Kärnbränslehantering AB
- /8/ **Johannesson L-E, Nord S, Rolf Sjöblom, 1999.** Isostatic compaction of beaker shaped bentonite blocks in the scale 1:4. SKB TR-00-14, Svensk Kärnbränslehantering AB
- /9/ **Müller-Vonmoos M, Kahr G, 1983.** Mineralogische Untersuchungen von Wyoming bentonit MX-80 und Montigel. NTB 83-12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle, Baden
- /10/ **Wiborgh M (editor), 1955.** Prestudy of final disposal of long-lived low and intermediate waste. SKB TR 95-03, Svensk Kärnbränslehantering AB
- /11/ **Bailey (editor), 1991.** Hydrous phyllosilicates. Reviews in mineralogy. Volume 19. Mineralogical Society of America

- /12/ **Pietsch W, 1990.** Size enlargement by agglomeration.  
John Wiley & Sons, Chichester. ISBN 0 471 92991 3
- /13/ **Kalbantner P, Sjöblom R, Börgesson L, 2001.** Funktionskrav för bentonitblock.  
SKB R-01-58, Svensk Kärnbränslehantering AB
- /14/ **Golden B L, Wasil E A, Harker P T, editors, 1989.** The analytic hierarchy  
process. Application and studies.  
Springer Verlag, London. ISBN 3-540-51440-6

### 1 Allmänt

Vid en jämförelse mellan olika alternativ står man ofta inför problemet att de ingående variablerna är många och har olika stor betydelse för valet av alternativ.

Beslutsfattandet underlättas genom användning av olika beslutsmodeller. En modell som har befunnits ge effektiv vägledning mot målet är AHP-metoden, där AHP står för ”Analytisk Hierarkisk Process” (/14/ i huvudrapporten). Den baseras på logisk/vetenskaplig grund samtidigt som den innehåller förutsättningar för en kreativ jämförelseprocess.

Modellen bygger upp en hierarkisk struktur som är en bild av den verklighet för vilken valet gäller. Överst i strukturen finns det mål som ska uppnås och under denna de kriterier som påverkar det angivna målet. Varje kriterium kan sedan delas upp i en eller flera underliggande nivåer, subkriterier, beroende på önskad detaljeringsgrad.

I AHP-analysen jämförs varje subkriterium parvis med avseende på kriteriet på nivå ovanför och rangordnas efter en förutbestämd flergradig skala där det högsta värdet är uttryck för den mest positiva (befrämjande) värderingen.

De tilldelade värdena förs vidare i hierarkin uppåt genom en i förväg bestämd algoritm. Uträkning enligt algoritmen sker på följande sätt. Vart och ett av kriterierna på en viss nivå ges en viss vikt. Bedömningen görs utgående från kriterier (alternativt mål) i en högre nivå.

Utifrån varje sådant kriterium sätts ett ”betyg” för vart och ett av de alternativ, som studeras (spalt 1 respektive 2 i tabellerna). Samma *kriterium* viktas sedan med avseende på kriterium (eller mål) ett steg högre upp i hierarkin (spalt 4 i samma tabell). Sedan bildas reciproka (inverterade) värdet för produkterna av ”betyg” och motsvarande ”vikt”. Dessa inverterade produkter summeras därefter för vart och ett av de alternativ som studeras. Summan inverteras åter och det ger ett värde för respektive alternativ, som sedan normeras så, att summan av de två värdena blir 1. Tillämpningen av algoritmen sker på principiellt samma sätt på alla nivåer.

### 2 Jämförelseprocess för kompakteringstekniker

#### 2.1 Avvikelser från konventionell AHP

Den grundläggande avvikelsen från konventionell AHP består i att den jämförelse som görs i den föreliggande rapporten är kvalitativ (egentligen halv-kvantitativ) och inte kvantitativ. Motivet för valet av ett kvalitativt tillvägagångssätt är att en kvantitativ analys skulle bli mera resurskrävande men ändå inte medföra någon stor ökning av skärpan i diskrimineringen mellan de alternativ som jämförs (det vill säga enaxlig och isostatisk kompaktering). Ett huvudskäl för detta är att underlaget för bedömning av olika aspekter i många fall är ofullständigt.

Under arbetets gång betraktas alla kriterier som ett mål, oavsett vilken nivå de befinner sig på.

## 2.2 Den hierarkiska strukturen

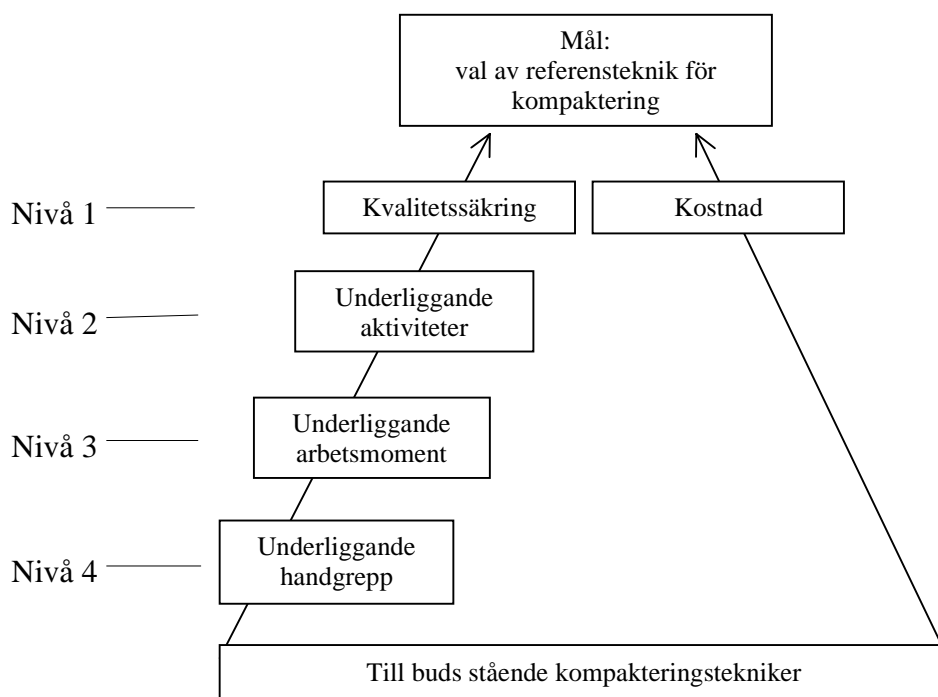
Jämförelseprocessen är strukturerad i fyra nivåer. Den högsta nivån (nr 1) är närmast målet medan den lägsta nivån (nr 4) är närmast den konkreta teknik som tillämpas enligt de två kompakteringsalternativ (variabler) som jämförs.

Den hierarkiska strukturen framgår översiktligt av figur A-1.

Nivån närmast målet (nivå 1) innehåller allmängiltiga karakteristika för föreliggande typ av industriell process. Generellt sett brukar dessa vara *teknik*, *säkerhet* och *kostnad*.

Det är dessa aspekter som ska bedömas för de två teknikerna som ska jämföras. Jämförelsen utgår från postulerade utförandeformer för alternativen, se kapitel 3 i R-00-41, och avser således inte hur respektive teknik ska förverkligas. Mot denna bakgrund görs en integrering mellan *teknik* och *säkerhet* till *kvalitetssäkring*. Utvärderingen med avseende på kvalitetssäkring innebär att de båda alternativen ska bedömas utifrån den tillförlitlighet med vilken avsedd kvalitet kan förverkligas.

Övriga nivåer innehåller arbetsinnehållet för hela "bentonitkedjan" fördelade på *aktivitet*, *arbetsmoment* och *handgrepp*.



Figur A-1. Schematisk hierarki för jämförelse indelade i fyra nivåer.

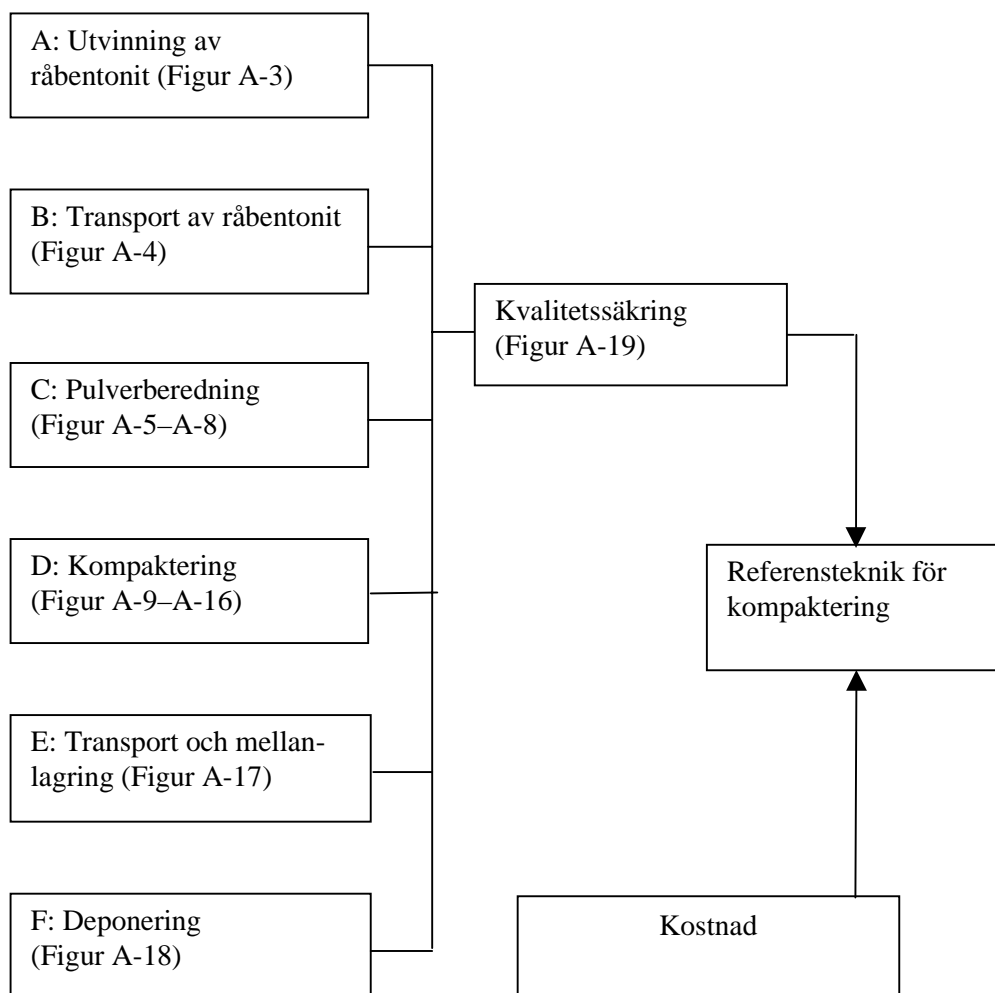


Valet av kriterier för en jämförelse kan alltid diskuteras. Den viktigaste fördelen med föreliggande val av kriterier är att alla processtegen blir beaktade. En nackdel kan vara att företeelser som kopplar till två eller flera processteg, eller till processteg som ligger utanför det system som studerats inte nödvändigtvis kommer med på ett naturligt sätt.

Sådana kopplingar har redovisats i kapitel 4 i R-00-41.

Hur hierarkin har applicerats på jämförelsen mellan kompakteringsprocesserna visas i figur A-2. Detta är en förenklad bild av strukturen. Den detaljerade strukturen för de aktiviteter som här anges med rutorna A, B osv utvecklas i kapitel 3.

I de konkreta jämförelserna som beskrivs nedan har en genomgång gjorts av samtliga processteg. Därefter har en ny genomgång gjorts med avseende på de aspekter som beskrivs i kapitel 4 i R-00-41 och nya överväganden har gjorts beträffande värdesättningarna och bedömningarna.



*Figur A-2. Jämförelsehierarkin för kompakteringsteknik.*

## 2.3 Jämförelseprocessens genomförande

Det konkreta jämförelsearbetet utfördes på följande sätt. Först ställdes det ovan nämnda schemat upp. Därefter utförde rapportens författare – var för sig – bedömningar av vilken kompakteringsprocess som var att föredra för vart och ett av processtegen samt vilka vikter som de olika stegen skulle ha.

När “betygen” satts av författarna var för sig gjordes en genomgång i vilken gemensamma “betyg” etablerades. De olika författarna är på delvis olika sätt förtrogna med den aktuella kunskapsbasen och därmed också förutsättningarna för de olika kompakteringsteknikerna. Ett viktigt syfte med det använda arbets sättet är att söka fånga in dessa olika aspekter till en syntes.

## 2.4 Den numeriska analysen

I avsnitt 2.1 poängterades att den jämförelse som skulle utföras inte är kvantitativ utan kvalitativ. Därav skulle kunna följa, som en logisk konsekvens, att någon numerisk analys inte utförs utan utvärderingen görs på ett mera beskrivande och verbalt sätt.

I stället för att utarbeta någon speciell form av språklig konvention har användning av siffror ändå valts av praktiska skäl. Dessa får emellertid inte övertolkas eftersom jämförelsen är kvalitativ (eller möjligen halv-kvantitativ).

Värdetilldelningen, det vill säga värderingen av ett visst kriteriums (i vårt fall processstegs) betydelse görs med siffror från 1 uppåt. Antalet värden i respektive jämförelse motsvarar antalet *kompakteringstekniker* eller *handgrepp* eller *arbetsmoment* eller *aktivitet* som ingår i den aktuella värderingen.

Detta innebär att den ände på skalan som avser ”bäst/viktigast” är konstant och värdet uttrycks alltid med siffran 1. Skalans andra ände representeras däremot av varierande siffervärden. En etta (1) betyder ”viktigast” eller ”mest befrämjande” eller “större sannolikhet för resultat med önskad kvalitet” medan den högsta siffran i den aktuella jämförelsen betyder ”minst viktigt” eller ”minst befrämjande” eller “mindre sannolikhet för resultat med önskad kvalitet”. Vid ”lika” bedömning kan samma siffervärde tilldelas flera komponenter i aktuell jämförelse.

För slutresultatet innebär denna sifferanvändning att den kompakteringsteknik som **bäst uppfyller** i den aktuella hierarkin samlade kriterier får **lägst totalpoäng**.

De frågor som ska värderas i varje steg i analysen och som betygsatts i tabellerna är:

1. Med vilken kompakteringsteknik bedöms resultatet av handgrepp/arbetsmoment/aktivitet bli mest fördelaktigt (figurernas vänstra fält och tabellernas vänstra kolumner)? Om båda anses likvärda sätts samma siffra.
2. Vilken betydelse bedöms handgrepp/arbetsmoment ha för det kvalitativa resultatet hos arbetsmoment, aktivitet respektive delmål ”kvalitetssäkring” (figurernas högra fält och tabellernas mittkolumner)?

Trots att jämförelseprocessens resultat presenteras med siffror och trots att detta resultat nås via användning av en matematisk algoritm är jämförelsen kvalitativ. Den kvalitativa

karaktären bottenar i att jämförelseprocessen – i motsats till konventionell AHP – inte använder sig av en sifferskala med ett konstant antal nivåer där varje nivå representerar ett fast och genom processen oföränderligt sorteringsbegrepp.

Följden av denna kvalitativa karaktär är att resultatet snarare återger en *ordning* än någon *gradering*. Den gradering som ändå kan utläsas av resultatet ska tolkas som mycket approximativ.

### 3 Jämförelser beträffande kvalitetssäkring

I den första delen av den framställning som följer rangordnas de två kompakteringsteknikerna enbart med avseende på den relativa nivån av kvalitetssäkring, det vill säga den tillförlitlighet beträffande avsedd kvalitet som bedöms vara möjlig att uppnå för respektive kompakteringsteknik.

Den kompakteringsteknik som tilldelats en etta (1) har bedömts vara bättre än den andra som har tilldelats en tvåa (2). Innebörden i ”bättre” varierar naturligtvis beroende på vilket *handgrepp* som jämförelsen avser. ”Bättre” kan exempelvis innebära att *handgreppet* inte existerar i samband med den ena tekniken, eller att *handgreppet* med de identifierade utförandekriterierna bedöms kunna utföras enklare, med större säkerhet, etc.

I samband med arbetsmoment och aktivitet kan ”bättre” jämföras med ”viktigare” eller med ”potentiellt högre sannolikhet för önskad kvalitet”.

I figurerna visas vikterna för de olika hanteringsstegen och siffrorna i figurernas rutor visar respektive bedömares värdering.

#### 3.1 Aktivitet: Utvinning av råbentonit (A)

Schemat för jämförelser beträffande arbetsinsatsen *utvinning av råbentonit* redovisas i figur A-3.

Teknik	Arbetsmoment	Ranking
Enaxl. komp. 1	Projektering, provtagning och analys (Aa)	2/2/2
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Borttagning av täckskikt (Ab)	3/3/2
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Upptagning, provning och analys (Ac)	3/3/2
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Transport till deponering på upplag (Ad)	3/5/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	”Farming” (Ae)	3/4/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Blandning, grovkrossning (Af)	1/1/2
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Torkning i gaseldad roterugn (Ag)	4/4/3
Isost. komp. 1		

Figur A-3. Utvinning av råbentonit.

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på aktiviteten *utvinning av råbentonit* sammanställs i tabell A-1.

**Tabell A-1. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "utvinning av råbentonit".**

Kompakteringsteknik		Arbetsmoment		Ranking avseende aktivitet utvinning av råbentonit	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Aa	$2/2/2=2$	1/2	1/2
1	1	Ab	$3/3/2=3$	1/3	1/3
1	1	Ac	$3/3/2=3$	1/3	1/3
1	1	Ad	$3/5/5=5$	1/5	1/5
1	1	Ae	$3/4/5=4$	1/4	1/4
1	1	Af	$1/1/2=1$	1/1	1/1
1	1	Ag	$4/4/3=4$	1/4	1/4
			Summa:	2,87	2,87
			Reciprok av summan:	0,35	0,35
			Normerat vägt värde	0,5	0,5

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på arbetsinsatsen *utvinning av råbentonit*.

### 3.2 Aktivitet: Transport av råbentonit (B)

Schemat för jämförelser beträffande aktiviteten *transport av råbentonit* redovisas i figur A-4.

Teknik	Arbetsmoment	Ranking
Enaxl. komp. 1	Lastning av transportfordon med bandtransportör (Ba)	5/5/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Transport till hamn (Bb)	4/4/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Överföring till upplag (Bc)	3/4/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Korttidslagring under tak (Bd)	1/1/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Lastning i fartyg (Be)	5/5/3
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Sjötransport (Bf)	2/2/3
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Lossning (Bg)	5/5/2
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Överföring till upplag (Bi)	5/5/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Lagring under högst ett år under tak (Bj)	1/1/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Överföring till fordon (Bk)	3/4/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Transport (Bl)	4/4/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Tömning av fordon till mindre upplag (Bm)	5/5/5
Isost. komp. 1		

Transport av bentonit (B)

Figur A-4. Transport av råbentonit.

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på aktiviteten *transport av råbentonit* sammanställs i tabell A-2.

**Tabell A-2. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "transport av råbentonit".**

Kompakteringsteknik		Arbetsmoment		Ranking avseende aktiviteten transport av råbentonit	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Ba	5/5/5=5	1/5	1/5
1	1	Bb	4/4/5=4	1/4	1/4
1	1	Bc	3/4/5=4	1/4	1/4
1	1	Bd	1/1/5=2	1/2	1/2
1	1	Be	5/5/3=4	1/4	1/4
1	1	Bf	2/2/3=2	1/2	1/2
1	1	Bg	5/5/2=3	1/3	1/3
1	1	Bi	5/5/5=5	1/5	1/5
1	1	Bj	1/1/5=2	1/2	1/2
1	1	Bk	3/4/5=4	1/4	1/4
1	1	Bl	4/4/5=4	1/4	1/4
1	1	Bm	5/5/5=5	1/5	1/5
Summa:				3,68	3,68
Reciprok av summan:				0,27	0,27
Normerat vägt värde				0,5	0,5

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på aktiviteten transport av råbentonit.

### 3.3 Aktivitet pulverberedning (C)

I detta avsnitt behandlas dels arbetsmomenten *överföring till blandare (Cf)*, *befuktning av bentonit i blandare (Cg)* och *karakterisering av pressmassa samt kvalitetskontroll (Ch)*, dels aktiviteten *Pulverberedning (C)*.

#### **Arbetsmoment Överföring till blandare (Cf)**

Schemat för jämförelser beträffande arbetsmomentet *överföring till blandare* redovisas i figur A-5.

Teknik	Handgrepp	Ranking
Enaxl. komp. 1	Överföring till doseringskärlet (Cf1)	3/3/5
Isost. komp. 1		1/1/3
Enaxl. komp. 1	Uttag av prov för bestämning av fukthalt (Cf2)	1/1/3
Isost. komp. 1		3/3/5
Enaxl. komp. 1	Kontinuerlig vägning till stopp (Cf3)	1/1/3
Isost. komp. 1		3/3/5
Enaxl. komp. 1	Tömning av doseringskärlet till blandare (Cf4)	1/1/3
Isost. komp. 1		3/3/5

Överföring till blandare (Cf)

**Figur A-5. Överföring till blandare.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *överföring till blandare* sammanställs nedan i tabell A-3.

**Tabell A-3. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "överföring till blandare".**

Kompakteringsteknik		Handgrepp		Ranking avseende arbetsmomentet överföring till blandare	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Cf1	$3/3/5=4$	1/4	1/4
1	1	Cf2	$1/1/3=2$	1/2	1/2
1	1	Cf3	$1/1/3=2$	1/2	1/2
1	1	Cf4	$3/3/5=4$	1/4	1/4
			Summa:	1,5	1,5
			Reciprok av summan:	0,66	0,66
			Normerat vägt värde	0,5	0,5

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på arbetsmomentet *överföring till blandare*.

## Arbetsmoment befuktning av bentonit i blandare (Cg)

Schemat för jämförelser beträffande arbetsmomentet *befuktning av bentonit i blandare* redovisas i figur A-6.

Teknik	Handgrepp	Ranking
Enaxl. komp. 1	Bestämning av fukthalt (Cf2) uträkn. av mängd H <sub>2</sub> O (Cg1)	1/1/4
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Uppvägning av önskad mängd H <sub>2</sub> O (Cg2)	1/1/4
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Påslag av blandare (Cg3)	6/5/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Blandning utan H <sub>2</sub> O (Cg4)	3/3/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Blandning under tillsättning av H <sub>2</sub> O (Cg5)	3/3/2
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Eventuell blandning efter tillsättning av H <sub>2</sub> O (Cg6)	3/3/3
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Stopp av blandare (Cg7)	6/5/4
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Tömning av blandare till uppsamlingskärl (Cg8)	5/5/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Överföring till sikt med uppföring (Cg9)	5/5/4
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Siktning till < 10 mm, återföring av grovfraktion (Cg10)	2/2/3
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Fyllning från sikt till fordon (Cg11)	5/5/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Karakterisering av pressmassa (Cg12)	2/2/3
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Transport av bentonit till mellanlager (Cg13)	5/5/4
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Lagring av bentonit (Cg14)	4/4/4
Isost. komp. 1		

Befuktning av bentonit i blandare (Cg)

**Figur A-6.** Befuktning av bentonit i blandare.

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *befuktning i blandare* sammanställs i tabell A-4.



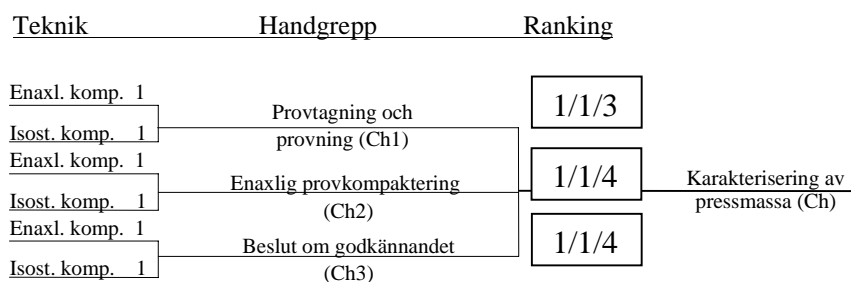
**Tabell A-4. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "befuktning av bentonit i blandare".**

Kompakteringsteknik		Handgrepp		Ranking avseende arbetsmomentet befuktning av bentonit i blandare	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Cg1	1/1/4=2	1/2	1/2
1	1	Cg2	1/1/4=2	1/2	1/2
1	1	Cg3	6/5/5=5	1/5	1/5
1	1	Cg4	3/3/5=4	1/4	1/4
1	1	Cg5	3/3/2=3	1/3	1/3
1	1	Cg6	3/3/3=3	1/3	1/3
1	1	Cg7	6/5/4=5	1/5	1/5
1	1	Cg8	5/5/5=5	1/5	1/5
1	1	Cg9	5/5/4=5	1/5	1/5
1	1	Cg10	2/2/3=2	1/2	1/2
1	1	Cg11	5/5/5=5	1/5	1/5
1	1	Cg12	2/2/3=2	1/2	1/2
1	1	Cg13	5/5/4=5	1/5	1/5
1	1	Cg14	4/4/4=4	1/4	1/4
Summa:				4,36	4,36
Reciprok av summan:				0,23	0,23
Normerat vägt värde				0,5	0,5

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på arbetsmomentet befuktning av bentonit i blandare.

### **Arbetsmoment karakterisering av pressmassa samt kvalitetskontroll (Ch)**

Schemat för jämförelser beträffande arbetsmomentet *karakterisering av pressmassa samt kvalitetskontroll* redovisas i figur A-7.



**Figur A-7. Karakterisering av pressmassa samt kvalitetskontroll.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *karakterisering av pressmassa* sammanställs i tabell A-5.

**Tabell A-5. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "karakterisering av pressmassa".**

Kompakteringsteknik		Handgrepp		Ranking avseende arbetsmomentet karakterisering av pressmassa	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Ch1	1/1/3=1	1/1	1/1
1	1	Ch2	1/1/4=2	1/2	1/2
1	1	Ch3	1/1/4=2	1/2	1/2
			Summa:	2	2
			Reciprok av summan:	0,5	0,5
			Normerat vägt värde	0,5	0,5

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på arbetsmomentet *karakterisering av pressmassa*.

### Aktivitet *pulverberedning (C)*

Schemat för jämförelser beträffande aktiviteten *pulverberedning* redovisas i figur A-8.

Teknik	Arbetsmoment	Ranking
Enaxl. komp. 1	Överföring från upplag till kross (Ca)	5/5/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Krossning till < 2 mm, frifalls- och vindsiktning (Cc)	3/3/2
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Överföring till silo (Cd)	5/5/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Mellanlagring i silo (Ce)	4/4/5
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 0,5	Överföring till blandare (Cf)	5/5/
Isost. komp. 0,5		
Enaxl. komp. 0,5	Befuktning av bentonit i blandare (Cg)	2/2/
Isost. komp. 0,5		
Enaxl. komp. 0,5	Karakterisering och kontroll av pressmassa (Ch)	1/1/
Isost. komp. 0,5		

**Pulverberedning (C)**

**Figur A-8. Pulverberedning.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på aktiviteten *pulverberedning* sammanställs i tabell A-6.

**Tabell A-6. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "pulverberedning".**

Kompakteringsteknik		Arbetsmoment		Ranking avseende aktiviteten pulverberedning	
Enaxlig (vägt värde)	Isostatisk (vägt värde)	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
[1] 0,5	[1] 0,5	Ca	5/5/5=5	1/2,5	1/2,5
[1] 0,5	[1] 0,5	Cc	3/3/2=3	1/1,5	1/1,5
[1] 0,5	[1] 0,5	Cd	5/5/5=5	1/2,5	1/2,5
[1] 0,5	[1] 0,5	Ce	4/4/5=4	1/2	1/2
0,5	0,5	Cf	5/5/ =5	1/2,5	1/2,5
0,5	0,5	Cg	2/2/ =2	1/1	1/1
0,5	0,5	Ch	1/1/ =1	1/0,5	1/0,5
			Summa:	5,37	5,37
			Reciprok av summan:	0,19	0,19
			Normerat vägt värde	0,5	0,5

Inom [ ] visas det för respektive teknik tilldelade värdet.

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på arbetsinsatsen *pulverberedning*.

### 3.4 Aktivitet kompaktering (D)

#### **Arbetsmoment överföring av bentonit från mellanlager till doseringssilo (Dc)**

Schemat för jämförelser beträffande arbetsmomentet *överföring av bentonit från mellanlager till doseringssilo* redovisas i figur A-9.

Teknik	Handgrepp	Ranking
Enaxl. komp. 1	Förflyttning av pressmassa fr. mellanlager till press (Dc1)	3/3/3
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Tömning i mätsilo (Dc2)	3/3/3
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Avrakning till jämn överyta, vägning (Dc3)	1/1/1
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Eventuell justering av mängd (Dc4)	2/2/2
Isost. komp. 1		

Överföring av bentonit från Mellanlager till doseringssilo (Dc)

**Figur A-9. Överföring av bentonit från mellanlager till doseringssilo.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *överföring av bentonit från mellanlager till doseringssilo* sammanställs i tabell A-7.

**Tabell A-7. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på ”överföring av bentonit från mellanlager till doseringssilo”.**

Kompakteringsteknik		Handgrepp	Ranking avseende arbetsmomentet överföring av bentonit		
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Dc1	3/3/3=3	1/3	1/3
1	1	Dc2	3/3/3=3	1/3	1/3
1	1	Dc3	1/1/1=1	1/1	1/1
1	1	Dc4	2/2/2=2	1/2	1/2
			Summa:	2,16	2,16
			Reciprok av summan:	0,46	0,46
			Normerat vägt värde	0,5	0,5

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på arbetsmomentet *överföring av bentonit från mellanlager till doseringssilo*.

### Arbetsmoment fyllning av pressverktyg (Dd)

Schemat för jämförelser beträffande arbetsmomentet *fyllning av pressverktyg* redovisas i figur A-10.

Ranking	Teknik	Handgrepp	Ranking
	Enaxl. komp. 1	Kanister med gummibag förs in i doseringsutr. (Dd1/i)	3/3/5
	Isost. komp. 2		
2/1/2	Enaxl. komp.	Påförande av doseringsutr. över pressverktyg (Dd1/e)	4/4/4
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Start av motorn för påfyllningsutr.(Dd2)	5/5/5
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Öppning av ventil under mätsilo (Dd3)	5/5/5
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Fyllning (Dd4)	1/1/4
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Stängning av mätsilons ventil undanflyttning (Dd5)	5/5/3
	Isost. komp. 1		
1/1/2	Enaxl. komp.	Pressmassans överyta jämnas (Dd6)	1/1/2
2/1/1	Isost. komp.		
	Enaxl. komp. 2	Tätningrings, pressvtg:s stämpel sätts på plats (Dd7/e)	2/2/2
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Gummiduk läggs tillbaka, spännringar sätts i funk. (Dd7/i)	2/2/5
	Isost. komp. 2		
	Enaxl. komp. 1	Kanister med sitt innehåll förs till evakuering (Dd8/i)	3/3/5
2/1/1	Isost. komp.		

**Figur A-10. Fyllning av pressverktyg.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *yllning av pressverktyg* sammanställs i tabell A-8.

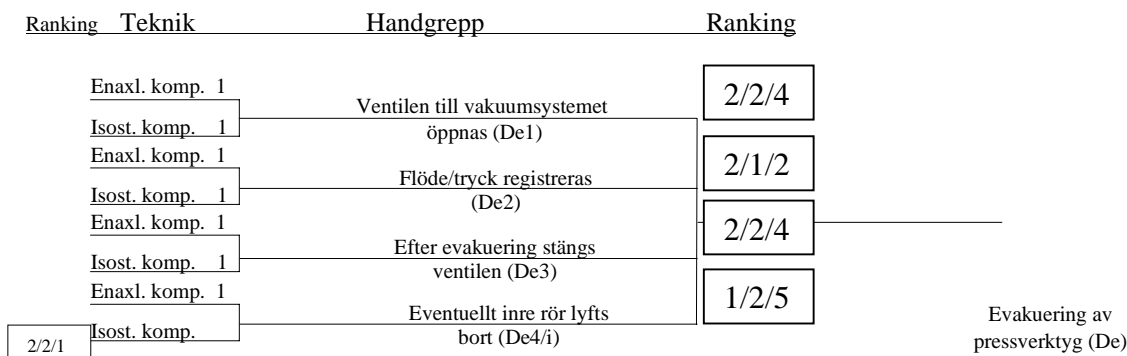
**Tabell A-8. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "yllning av pressverktyg".**

Kompakteringsteknik		Handgrepp		Ranking avseende arbetsmomentet yllning av pressverktyg	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	2	Dd1/i	3/3/5=4	1/4	1/8
2/1/2=2	1	Dd1/e	4/4/4=4	1/8	1/4
1	1	Dd2	5/5/5=5	1/5	1/5
1	1	Dd3	5/5/5=5	1/5	1/5
1	1	Dd4	1/1/4=2	1/2	1/2
1	1	Dd5	5/5/3=4	1/4	1/4
1/1/2=1	2/1/1=1	Dd6	1/1/2=1	1/1	1/1
2	1	Dd7/e	2/2/2=2	1/4	1/2
1	2	Dd7/i	2/2/5=3	1/3	1/6
1	2/2/1=2	Dd8/i	3/3/5=4	1/4	1/8
Summa:				3,36	3,32
Reciprok av summan:				0,30	0,30
Normerat vägt värde				0,5	0,5

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på arbetsmomentet *yllning av pressverktyg*.

### Arbetsmoment evakuering av pressverktyg (De)

Schemat för jämförelser beträffande arbetsmomentet *evakuering av pressverktyg* redovisas i figur A-11.



**Figur A-11. Evakuering av pressverktyg.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *evakuering av pressverktyg* sammanställs i tabell A-9.

**Tabell A-9. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "evakuering av pressverktyg".**

Kompakteringsteknik		Handgrepp	Ranking avseende arbetsmomentet evakuering av pressverktyg		
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	De1	2/2/4=3	1/3	1/3
1	1	De2	2/1/2=2	1/2	1/2
1	1	De3	2/2/4=3	1/3	1/3
1	2/2/1=2	De4/i	1/2/5=3	1/3	1/6
			Summa:	1,5	1,33
			Reciprok av summan:	0,66	0,75
			Normerat vägt värde	0,47	0,53

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms inte vara lika med avseende på arbetsmomentet *evakuering av pressverktyg*.

### Arbetsmoment kompaktering (Df)

Schemat för jämförelser beträffande arbetsmomentet *kompaktering* redovisas i figur A-12.

Ranking	Teknik	Handgrepp	Ranking
	Enaxl. komp. 1	Pressverktyg/gummibag förs in i pressen (Df1)	3/3/3
	Isost. komp. 1		
1/1/2	Enaxl. komp.	Pressverktyget positioneras(Df2e) Cyl.lock och ok placeras(Df3i)	2/2/2
	Isost. komp. 1		
2/1/1	Enaxl. komp.	Pressning enl. förutbestämd presscykel (Df3e, 4i)	1/1/1
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 2	Införande av distansring (Df4e) Ok förs bort (Df5i)	1/5/3
	Isost. komp. 1		
2/1/1	Enaxl. komp.	Pressning enl. förutbestämd presscykel (Df5e)	1/1/1
	Isost. komp. 1		
1/1/2	Enaxl. komp.	Pressverktyg lyfts upp(Df6e) Cyl.lock öppnas, kanister upp(Df6,7i)	3/3/2
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 2	Dist.elem.+stötabs.kudde in (Df7e) Kanister till frilägg (Df8i)	2/5/2
	Isost. komp. 1		
1/2/2	Enaxl. komp.	Bentonitblock trycks ut (Df8/e)	3/2/1
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Pressverktyg förs ut till sidoläge (Df9e)	4/4/3
	Isost. komp. 1		
1/1/2	Enaxl. komp.	Bentonitblock friläggs(Df10e, 9-11i)	4/4/3
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Bent.block till pall eller förs till bearb. (Df11e+12i)	5/5/4
	Isost. komp. 1		

**Figur A-12. Kompaktering.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *kompaktering* sammanställs i tabell A-10.

**Tabell A-10. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "kompaktering".**

Kompakterings- teknik		Handgrepp		Ranking avseende arbetsmomentet kompaktering	
Enaxlig	Isosta- tisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Df1	3/3/3=3	1/3	1/3
1/1/2=1	1	Df2/e, 3/i	2/2/2=2	1/2	1/2
2/1/1=1	1	Df3e, 4i	1/1/1=1	1/1	1/1
2	1	Df4/e, 5/i	1/5/3=4	1/8	1/4
2/1/1=1	1	Df5/e	1/1/1=1	1/1	1/1
1/1/2=1	1	Df6+7/i	3/3/2=3	1/3	1/3
2	1	Df7/e, 8/i	2/5/2=3	1/6	1/3
1/2/2=2	1	Df8/e	3/2/1=2	1/4	1/2
1	1	Df9/e	4/4/3=4	1/4	1/4
1/1/2=1	1	Df10e+9-11/i	4/4/3=4	1/4	1/4
1	1	Df11/e+12/i	5/5/4=5	1/5	1/5
Summa:				4,41	4,95
Reciprok av summan:				0,23	0,20
Normerat vägt värde				0,53	0,47

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms inte vara lika med avseende på arbetsmomentet *kompaktering*.

## Arbetsmoment bearbetning (Di)

Schemat för jämförelser beträffande arbetsmomentet *bearbetning* redovisas i figur A-13.

Ranking	Teknik	Handgrepp	Ranking
	Enaxl. komp. 1	Eventuell förflyttning från lager till bearb. (Di1)	2/2/1
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Eventuell beräkning av avverkningsdjup (Di2)	3/3/2
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Centrering och läsning i svarv (Di3)	3/3/3
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Bearbetning (svarvning) (Di4)	2/2/1
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Damsugning av block (Di5)	3/3/3
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Byte av bearbetningsposition (vändning) (Di6/i)	1/1/2
	Isost. komp. 1		
2/2/1	Enaxl. komp. 1	Bearbetning av ny position (svarv) (Di7/i)	4/4/4
	Isost. komp. 1		
2/2/1	Enaxl. komp. 1	Damsugning av block (Di8/i)	4/4/4
	Isost. komp. 1		
2/2/1	Enaxl. komp. 1	Förflyttning till lager eller till inspektion (Di6)	4/4/4
	Isost. komp. 1		

Figur A-13. Bearbetning.

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *slutbearbetning* sammanställs i tabell A-11.



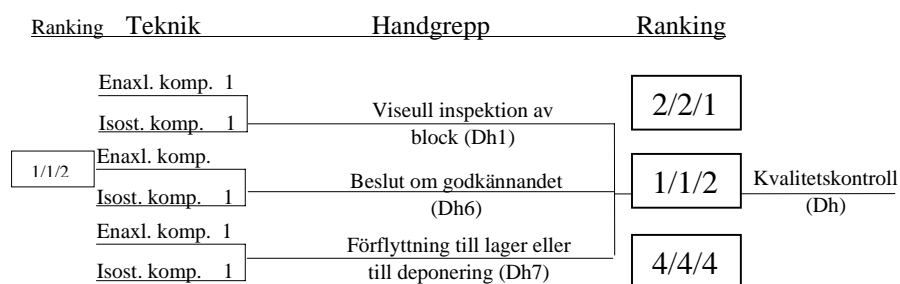
**Tabell A-11. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "bearbetning".**

Kompakteringsteknik		Handgrepp		Ranking avseende arbetsmomentet bearbetning	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Di1	2/2/1=2	1/2	1/2
1	1	Di2	3/3/2=3	1/3	1/3
1	1	Di3	3/3/3=3	1/3	1/3
1	1	Di4	2/2/1=2	1/2	1/2
1	1	Di5	3/3/3=3	1/3	1/3
1	2/2/1=2	Di6/i	1/1/2=1	1/1	1/2
1	2/2/1=2	Di7/i	4/4/4=4	1/4	1/8
1	2/2/1=2	Di8/i	4/4/4=4	1/4	1/8
1	1	Di6	4/4/4=4	1/4	1/4
Summa:				3,75	3
Reciprok av summan:				0,27	0,33
Normerat vägt värde				0,45	0,55

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms inte vara lika med avseende på arbetsmomentet *bearbetning*.

### Arbetsmoment kvalitetskontroll (Dh)

Schemat för jämförelser beträffande arbetsmomentet *kvalitetskontroll* redovisas i figur A-14.



**Figur A-14. Kvalitetskontroll.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *kvalitetskontroll* sammanställs i tabell A-12.

**Tabell A-12. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "kvalitetskontroll".**

Kompakteringsteknik		Handgrepp		Ranking avseende arbetsmomentet kvalitetskontroll	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Dh1	2/2/1=2	1/2	1/2
1/1/2=1	1	Dh6	1/1/2=1	1/1	1/1
1	1	Dh7	4/4/4=4	1/4	1/4
			Summa:	1,75	1,75
			Reciprok av summan:	0,57	0,57
			Normerat vägt värde	0,50	0,50

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på arbetsmomentet *kvalitetskontroll*.

### Arbetsmoment paketering (Dj)

Schemat för jämförelser beträffande arbetsmomentet *paketering* redovisas i figur A-15.

Ranking	Teknik	Handgrepp	Ranking
	Enaxl. komp. 1	Inslag i plast, placering på lastpall (Dj1)	3/3/3
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Förslutning av plastskydd (Dj2)	1/1/3
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Placering av skyddskåpa över blocket (Dj3)	2/2/4
	Isost. komp. 1		
	Enaxl. komp. 1	Förflyttning av lastpall med block till lager (Dj4)	4/4/4
2/1/1	Isost. komp.		

Paketering (Dj)

**Figur A-15. Paketering.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsmomentet *paketering* sammanställs i tabell A-13.

**Tabell A-13. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "paketering".**

Kompakteringsteknik		Handgrepp	Ranking avseende arbetsmomentet paketering		
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Dj1	3/3/3=3	1/3	1/3
1	1	Dj2	1/1/3=2	1/2	1/2
1	1	Dj3	2/2/4=3	1/3	1/3
1	2/1/1=1	Dj4	4/4/4=4	1/4	1/4
			Summa:	1,42	1,42
			Reciprok av summan:	0,70	0,70
			Normerat vägt värde	0,50	0,50

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på arbetsmomentet *paketering*.

### Aktivitet kompaktering (D)

Schemat för jämförelser beträffande aktiviteten *kompaktering* redovisas i figur A-16.

Teknik	Arbetsmoment	Ranking
Enaxl. komp. 2	Påföring av smörjmedel (Da)	1/5/1
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Uträkning av önskad volym (Db)	3/3/3
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 0,5	Överföring av bentonit från mellanlager till dos.silo (Dc)	5/5/3
Isost. komp. 0,5		
Enaxl. komp. 0,5	Fyllning av pressverktyg (Dd)	1/1/1
Isost. komp. 0,5		
Enaxl. komp. 0,47	Evakuering av pressverktyg (De)	1/1/1
Isost. komp. 0,53		
Enaxl. komp. 0,53	Kompaktering (Df)	1/1/1
Isost. komp. 0,47		
Enaxl. komp. 0,45	Bearbetning (Di)	3/3/4
Isost. komp. 0,55		
Enaxl. komp. 0,5	Kvalitetskontroll (Dh)	2/2/1
Isost. komp. 0,5		
Enaxl. komp. 0,5	Paketering (Dj)	4/4/4
Isost. komp. 0,5		

Kompaktering (D)

**Figur A-16. Kompaktering, sammanställning.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på aktiviteten *kompaktering* sammanställs i tabell A-14.

**Tabell A-14. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "kompaktering".**

Kompakteringsteknik		Arbetsmoment		Ranking avseende arbetsinsatsen kompaktering	
Enaxlig (vägt värde)	Isostatisk (vägt värde)	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
[2] 0,66	[1] 0,33	Da	1/5/1=3	1/1,98	1/0,99
[1] 0,50	[1] 0,50	Db	3/3/3=3	1/1,5	1/1,5
0,50	0,50	Dc	5/5/3=4	1/2	1/2
0,50	0,50	Dd	1/1/1=1	1/0,50	1/0,50
0,47	0,53	De	1/1/1=1	1/0,47	1/0,53
0,53	0,47	Df	1/1/1=1	1/0,53	1/0,47
0,45	0,55	Di	3/3/4=3	1/1,35	1/1,65
0,50	0,50	Dh	2/2/1=2	1/1	1/1
0,50	0,50	Dj	4/4/4=4	1/2	1/2
		Summa:		9,93	10,3
		Reciprok av summan:		0,101	0,097
		Normerat vägt värde		0,51	0,49

Inom [ ] visas det för respektive teknik tilldelade värdet.

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på arbetsinsatsen *kompaktering*. Trots att några av de ingående momenten fått olika värdering blir alltså slutresultatet att de båda metoderna är likvärda.

### 3.5 Aktivitet transport och mellanlagring av block (E)

Schemat för jämförelser beträffande aktivitet *transport och mellanlagring av block* redovisas i figur A-17.

Teknik	Arbetsmoment	Ranking
Enaxl. komp. 1	Transport till mellanlager (Ea)	1/1/4
Isost. komp. 1		1/1/4
Enaxl. komp. 1	Mellanlagring (Eb)	1/1/4
Isost. komp. 1		1/1/3
Enaxl. komp. 1	Transport till slutförvar (Ec)	1/1/3
Isost. komp. 1		1/1/4
Enaxl. komp. 1	Upplägg i slutförvar (Ed)	1/1/4
Isost. komp. 1		1/1/4

Transport och mellanlagring av block (E)

**Figur A-17. Transport och mellanlagring av block.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på aktiviteten *transport och mellanlagring av block* sammanställs i tabell A-15.

**Tabell A-15. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "transport och mellanlagring av block".**

Kompakteringsteknik		Arbetsmoment		Ranking avseende aktiviteten transport och mellanlagring	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Ea	1/1/4=2	1/2	1/2
1	1	Eb	1/1/4=2	1/2	1/2
1	1	Ec	1/1/3=2	1/2	1/2
1	1	Ed	1/1/4=2	1/2	1/2
Summa:				2	2
Reciprok av summan:				0,50	0,50
Normerat vägt värde				0,5	0,5

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på aktiviteten *transport och mellanlagring av block*.

### 3.6 Aktivitet deponering (F)

Schemat för jämförelser beträffande arbetsinsatsen *deponering* redovisas i figur A-18.

Teknik	Arbetsmoment	Ranking
Enaxl. komp. 1	Intertransport till aktuellt deponeringshål (Fa)	3/ /3
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Inplacering av buffert (Fc)	1/ /1
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Överlämna området till deponeringsutr. (Fd)	1/ /1
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Deponering av kapsel (Fe)	2/ /1
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Montering av förseglingsdel (Ff)	1/ /1
Isost. komp. 1		
Enaxl. komp. 1	Inplacering av monterad förseglingsdel eller stora block (Fg)	1/ /1
Isost. komp. 1		

**Figur A-18. Deponering.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på arbetsinsatsen *deponering* sammanställs i tabell A-16.

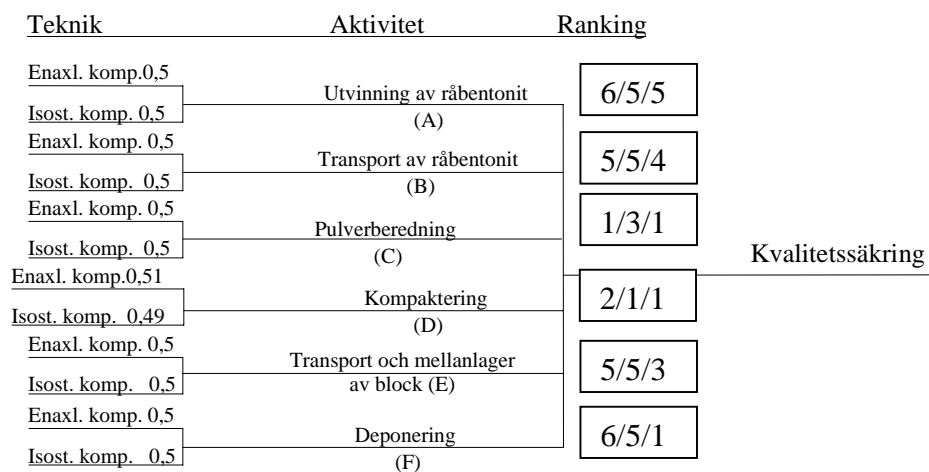
**Tabell A-16. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på "deponering".**

Kompakteringsteknik		Arbetsmoment		Ranking avseende arbetsinsatsen deponering	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
1	1	Fa	3/ /3=3	1/3	1/3
1	1	Fc	1/ /1=1	1/1	1/1
1	1	Fd	–	–	–
1	1	Fe	1/ /1=1	1/1	1/1
1	1	Ff	2/ /1=2	½	1/2
1	1	Fg	1/ /1=1	1/1	1/1
Summa:				3,833	3,833
Reciprok av summan:				0,26	0,26
Normerat vägt värde				0,50	0,50

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på aktiviteten *deponering*.

### 3.7 Kvalitetssäkring

Schemat för jämförelser beträffande *kvalitetssäkring* redovisas i figur A-19.



**Figur A-19. Kvalitetssäkring.**

Rankingen mellan enaxlig och isostatisk kompaktering med avseende på **Kvalitetssäkring** sammanställs i tabell A-17.

Frågan som beaktas vid värderingen är: Vilken arbetsinsats är ”viktigare” avseende önskad nivå av **Kvalitetssäkring**?

**Tabell A-17. Vägt värde för enaxlig respektive isostatisk kompaktering med avseende på ”Kvalitetssäkring”.**

Kompakteringsteknik		Arbetsinsats		Ranking avseende på <i>Kvalitetssäkring</i>	
Enaxlig	Isostatisk	Benämning	Ranking	Enaxlig (reciprokt värde)	Isostatisk (reciprokt värde)
0,50	0,50	A	6/5/5=5	1/2,5	1/2,5
0,50	0,50	B	5/5/4=5	1/2,5	1/2,5
0,50	0,50	C	1/3/1=2	1/1	1/1
0,50	0,50	D	2/1/1=1	1/0,51	1/0,49
0,50	0,50	E	5/5/3=4	1/2	1/2
0,50	0,50	F	6/5/1=3	1/1,5	1/1,5
Summa:				4,93	5,01
Reciprok av summan:				0,20	0,20
Normerat vägt värde				0,50	0,50

**Tolkning:** Enaxlig och isostatisk kompaktering bedöms vara lika med avseende på **Kvalitetssäkring**.