

**P-06-316**

# **Strategier och metoder för omhändertagande av använt kärnbränsle**

## **Studier gjorda efter år 2000**

Bertil Grundfelt, Marie Wiborgh  
Kemakta Konsult AB

December 2006

### **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



ISSN 1651-4416

SKB P-06-316

# **Strategier och metoder för omhändertagande av använt kärnbränsle**

## **Studier gjorda efter år 2000**

Bertil Grundfelt, Marie Wiborgh  
Kemakta Konsult AB

December 2006

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.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från [www.skb.se](http://www.skb.se)

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	5
<b>2</b>	<b>Övergripande studier</b>	7
2.1	Compas	7
2.2	Konferens i Stockholm 2003	7
2.3	CoRWM	8
2.4	MIT	9
2.5	EDRAM	9
2.6	Lind	9
2.7	Posiva	9
<b>3</b>	<b>Upparbetning, separation och transmutation</b>	11
3.1	Bedömning i den tidigare analysen	11
3.2	Nyttillkommen information efter år 2000	11
<b>4</b>	<b>Övervakad lagring</b>	13
<b>5</b>	<b>Geologisk deponering</b>	15
5.1	Översikt	15
5.2	KBS-3	15
5.3	Djupa borrhål	15
	5.3.1 Geovetenskapligt kunskapsläge	15
	5.3.2 Borrnings- och deponerings-/återtagsteknik	16
	5.3.3 Utvärderingar av konceptet djupa borrhål	17
<b>6</b>	<b>Frysning</b>	21
<b>7</b>	<b>Referenser</b>	23

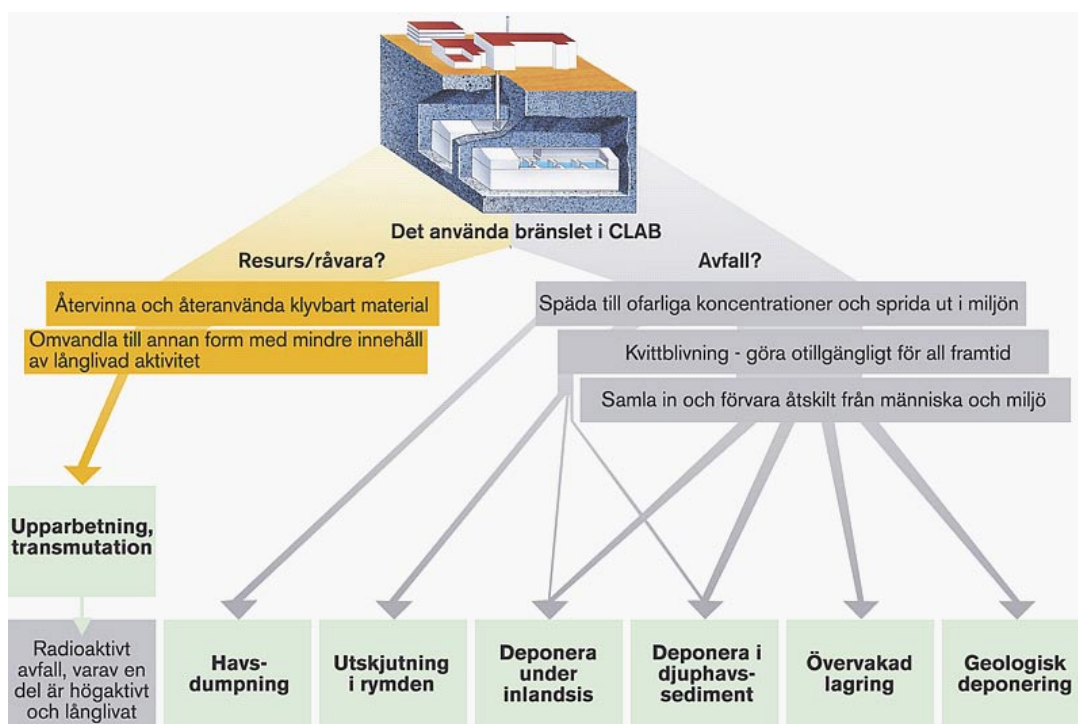
# 1 Inledning

SKB avser att ansöka om att omhänderta använt kärnbränsle enligt KBS-3-metoden.

SKB har under lång tid arbetat med strategier och metoder till omhändertagande av använt kärnbränsle. I arbetet har vi jämfört olika metoder med KBS-3-metoden och följt det arbete som pågår internationellt. SKB:s arbete har bedrivits enligt de krav som finns i kärntekniklagen på allsidig forsknings- och utvecklingsverksamhet. SKB:s arbete har redovisats i Fud-programmen, som skickas till regeringen var tredje år. Regeringsbesluten angående Fud-programmen har stärkt inriktningen mot KBS-3-metoden.

SKB kommer att redovisa det arbete som bedrivits av avseende andra metoder och strategier för omhändertagande av använt kärnbränsle som utretts inom ramen för Fud-processen i anslutning till ansökningarna enligt kärntekniklagen och miljöbalken år 2009.

SKB genomförde under år 2000 en analys avseende val av strategi och metod för omhändertagande av använt kärnbränsle /SKB 2000a/. I figur 1-1 redovisas en överblick av de olika strategier som behandlades. Denna PM syftar till att redovisa information om andra metoder för omhändertagande av använt kärnbränsle som tillkommit efter publiceringen av den tidigare analysen. Redovisningen ger sig inte ut för att vara fullständig men torde täcka de väsentligaste rörelseriktningarna.



*Figur 1-1. Strategier och metoder för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och högaktivt avfall, från /SKB 2000a/.*

## 2 Övergripande studier

### 2.1 Compas

En jämförelse av valda strategier för hantering av radioaktivt avfall inom ett antal Europeiska länder har genomförts i projektet Compas (Comparison of alternative waste management strategies for long-lived radioactive wastes) /EC 2004/. Jämförelsen baseras på status den 1 september 2003 i de olika länderna (till exempel England, Finland, Frankrike, Tyskland, Holland, Tjeckiska republiken, Spanien, Schweiz och Sverige). I samtliga av dessa länder är den valda strategin geologisk deponering av använt kärnbränsle och/eller högaktivt förglasat avfall efter kortare eller längre tids mellanlagring. I tabellen nedan redovisas diverse metoder för slutligt omhändertagande som har diskuterats men, av en eller annan orsak, inte längre är aktuella.

Inaktuella metoder	Anledning
Havsdumpning	I strid med internationella konventioner (LDC 72 <sup>1</sup> och OSPAR <sup>2</sup> )
Deponering i djuphavs-sediment	I strid med internationella konventioner (LDC 72 och OSPAR) Allmän acceptans, ekonomiska orsaker, tekniska begränsningar
Utskjutning i rymden	Strider mot nationella lagar t ex export av avfall. Svårt att klara säkerheten
Marknära förvar	Klarar inte uppsatta riskkriterier för långa tider
Förvaring på obestämd tid	Inte säker lösning för framtiden
Deponering i subduktionszon i djuphavsgravar	Strider mot internationella konventioner (LDC 72 och OSPAR)
Deponering under inlandsis	Strider mot Antarktiskfördraget

<sup>1</sup> Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, 1972, London Dumping Convention

<sup>2</sup> The Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic, Oslo-Paris, OSPAR, Convention

### 2.2 Konferens i Stockholm 2003

Under 2003 hölls en internationell konferens i Stockholm ”Geological repositories Political and Technical Progress”. Konferensen samlade delegater från mer än 25 länder men även internationella organisationer. Temat för konferensen var politiska och tekniska framsteg i olika länder avseende geologisk deponering. I ett anförande av IAEA:s generalsekreterare El Baradei framkom att den Europeiska Kommissionen har föreslagit ett direktiv med en tvingande tidsplan avseende platsval och i drifttagande av förvar för radioaktivt avfall /OECD/NEA 2003/. På grund av motstånd från bland annat Sverige har dock dessa krav modifierats, se nedan för nuvarande förslag /Euratom 2004/.

#### **Article 5 Timetable for the management of radioactive waste**

1. The national management programme shall include the timetable chosen for the long-term management of radioactive waste, covering low and intermediate level waste as well as high level waste.
2. Where a Member State considers that there is no suitable alternative to disposal, and where such a disposal option is not yet available, this Member State shall include, as a minimum, the dates for the following points into its programme:
  - (a) licence for development of one (or more) disposal site(s).
  - (b) licence for operation of the disposal facility(ies).
  - (c) Member States may decide to deposit more than one category of radioactive waste at the same site.
3. Member States may subsequently supplement the timetable in order to, *inter alia*, cover further disposal sites and facilities.

## 2.3 CoRWM

CoRWM (The Committee on Radioactive Waste Management) blev tillfrågade av den brittiska regeringen år 2003 att ta fram rekommendationer för hur den framtida hanteringen av högaktivt avfall skulle hanteras både med avseende på skydd av människor och miljön samt även för att skapa allmänhetens förtroende. En teknisk utvärdering av olika metoder har genomförts bland annat med hänsyn till etiska aspekter. En lång lista med metoder ingick i utvärderingen, se nedan.

### Box 10.1 CoRWM's long list of options

The options on CoRWM's long list were:

1. interim or indefinite storage on or below the surface
2. near surface disposal, a few metres or tens of metres down
3. deep disposal, with the surrounding geology providing a further barrier
4. phased deep disposal, with storage and monitoring for a period
5. direct injection of liquid wastes into rock strata
6. disposal at sea
7. sub-seabed disposal
8. disposal in ice sheets
9. disposal in subduction zones
10. disposal in space, into high orbit, or propelled into the Sun
11. dilution and dispersal of radioactivity in the environment
12. partitioning of wastes and transmutation of radionuclides
13. burning of plutonium and uranium in reactors
14. incineration to reduce waste volumes
15. melting of metals in furnaces to reduce waste volumes

I juli 2006 lämnade CoRWM sina rekommendationer till den brittiska regeringen /CoRWM 2006/. Rekommendationerna sammanfattades i 15 punkter varav två som har särskild relevans för frågan om andra metoder för omhändertagande av använt bränsle citeras nedan.

**Recommendation 1: Within the present state of knowledge, CoRWM considers geological disposal to be the best available approach for the long-term management of all the material categorised as waste in the CoRWM inventory when compared with the risks associated with other methods of management. The aim should be to progress to disposal as soon as practicable, consistent with developing and maintaining public and stakeholder confidence.**

A large majority of CoRWM members have sufficient confidence in the long-term safety of geological disposal, and its ability to reduce the burden on future generations, to recommend it as the preferred end-point. This view took into account various factors, including specialist judgements during Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), the strong consensus that exists in the earth sciences community, and estimates of public exposure to radiation in the far future after repository closure. Most members considered that the risks from geological disposal were substantially smaller than those from longterm storage, which they considered to be vulnerable to terrorist actions, war, loss of institutional control, and severe environmental change. It was stressed, however, that absolute confidence in the long-term safety of geological disposal could not be assumed. One member challenged whether a judgement of sufficient confidence could be reached in the light of the uncertainties associated with repository performance and argued that the risks associated with storage could be mitigated in part by the type of storage regime adopted (siting away from the coast, underground, etc).

**Recommendation 5: The commitment to ensuring flexibility in decision making should leave open the possibility that other long-term management options (for example, borehole disposal) could emerge as practical alternatives. Developments in alternative management options should be actively pursued through monitoring of and/or participation in national or international R and D programmes.**

CoRWM recognises that there are rapid developments in science and technology so practicable alternatives may become available in the period up to the closure of a repository. CoRWM therefore recommends a flexible approach; it would be wrong to deny future generations the opportunity to avail themselves of alternative methods because of too rigid a focus on the end-point of geological disposal. An example is boreholes where there could be benefits from the enhanced isolation and security offered for some wastes, but there is not sufficient knowledge to put the option forward at this stage. CoRWM is therefore recommending that appropriate research and development should be undertaken into alternative management options.

## 2.4 MIT

I USA har MIT (Massachusetts Institute of Technology) genomfört en studie om kärnkraftens framtid /MIT 2003/. I studien görs en genomgång av vad som krävs för utveckling av kärnkraften för att den ska vara ett alternativ som medför att utsläppen av växthusgaser kan minska. Aspekter som tas upp är bland annat ekonomi, reaktorsäkerhet, avfallshantering och icke spridning. När det gäller avfallshantering konstateras att den teknologiska lösning som har mest anhängare är deponering i geologiska formationer även om alla länder verkar ha problem med att genomdriva sina program.

## 2.5 EDRAM

EDRAM (International Association for Environmentally Safe Disposal of Radioactive Materials) är en organisation som skapades med målsättningen att främja nationella forskningsprogram och internationellt samarbete avseende radioaktivt avfall. EDRAM består av företag och regeringsorgan ansvariga för hanteringen av radioaktivt avfall i elva länder (Belgien, Canada, England, Finland, Frankrike, Japan, Schweiz, Spanien, Sverige, USA och Tyskland). Inom ramen för EDRAM:s arbete har en beskrivning av hanteringen av radioaktivt avfall i tio av medlemsländerna tagits fram /Lidskog och Andersson 2001/.

## 2.6 Lind

En genomgång av kärnkraftsprogrammen, med fokus på använt kärnbränsle, i några utvalda industriländer i Västeuropa och Nordamerika med egna kärnkraftprogram av betydelse har genomförts av /Lind 2006/ med inriktning på de politiska och samhällsliga frågorna. I de fall som forskningsläge och geologi omnämns, så är det som bakgrund i de centrala beslutsfrågorna.

## 2.7 Posiva

Posiva, i Finland, har inför uppförandet av slutdeponeringsanläggningen och ansökan om principbeslut hos statsrådet (regeringen) tagit fram en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) /Posiva 1999/. Denna process startade officiellt när Posiva i februari 1998 inlämnade programmet för miljökonsekvensbedömningen till kontaktmyndigheten handels- och industriministeriet. Utvärderingen har gått i flera steg med början av en utvärdering av olika strategier för hanteringen av använt kärnbränsle, med en fortsättning i en utvärdering av olika koncept för geologisk slutförvaring och slutligen en jämförelse av huvudalternativet KBS-3 med nollalternativet, som har definierats som fortsatt kontrollerad lagring.

Slutsatsen från det första utvärderingssteget är att man för närvarande bara har geologisk deponering och nollalternativet att välja på. Andra metoder såsom separation och transmutation är idag inte tillgängliga och bedöms inte eliminera behovet av geologisk slutförvaring.

Även andra koncept för geologisk slutförvaring som utvecklats under de senaste 20 åren utvärderades. Listan över koncept inkluderade djupa borrhål, WP-Cave och medellånga hål. Det senare bedömdes vara så lika KBS-3 att det betraktades som en variant av denna metod. Slutsatsen från detta steg av utvärderingen var att ingen av dessa metoder hade några väsentliga fördelar att erbjuda jämfört med KBS-3 och att de dessutom kräver betydande forsknings- och teknikutvecklingsinsatser utan att detta med säkerhet leder fram till en bättre lösning. Man uttrycker dock att medellånga hål kan vara ett potentiellt intressant koncept.

## 3 Upparbetning, separation och transmutation

### 3.1 Bedömning i den tidigare analysen

Nedanstående text har hämtats från den tidigare analysen /SKB 2000a/:

*Upparbetning och återföring av uran och plutonium i MOX-bränsle innebär ett effektivare utnyttjande av brutet uran. Det radioaktiva avfall som uppstår vid upparbetning och plutonium-återföring skiljer sig visserligen från använt uranbränsle, men jämför man aktivitetsinnehållet är skillnaderna inte väsentliga vad gäller kraven på hantering och slutförvaring. Att återföra uran och plutonium är förvisso ett möjligt sätt att omhänderta det använda kärnbränslet. Det kan dock snarare betraktas som en strategi för bränsleförsörjning än som en strategi att lösa avfallsfrågan.*

*Vid transmutation av övriga aktinider i använt kärnbränsle förändras aktivitetsinnehållet i avfallet radikalt. Innehållet av aktinider och några övriga långlivade ämnen minskar medan mängden kortlivade klyvningsprodukter ökar. Restinnehållet av långlivade isotoper är dock så stort att avfallet måste hanteras och slutförvaras som långlivat. Hanteringen vid upparbetning, bränsletillverkning och transmutation förväntas ge högre stråldoser till personalen än övriga beskrivna system för omhändertagande av det använda kärnbränslet. Vid utvärderingen av detta måste även nyttan med den producerade energin vägas in.*

*Upparbetning och transmutation innebär renframställning av plutonium, eller utveckling av teknik som kan användas för framställning av plutonium. Plutonium kan användas för vapentillverkning. Det ställer extra krav på safeguards så länge systemen är i drift. Transmuteras allt plutonium innebär det å andra sidan att inget finns kvar för vapentillverkning. Den amerikanska vetenskapsakademien gjorde 1991–1995 en studie av separation och transmutation. Några av slutsatserna från studien var att inget system för separation och transmutation är tillräckligt löftrikt för att överge direkt slutförvaring av använt kärnbränsle i USA. Vidare konstaterades att ett slutförvar i en geologisk bergformation behövs även för det avfall som uppstår vid separation och transmutation. Denna uppfattning har också uttalats av flera internationella expertgrupper bland annat inom OECD/NEA.*

### 3.2 Nyttillkommen information efter år 2000

Separation och transmutation är idag ett aktivt forskningsområde där forskningens tyngdpunkt, på grund av det stora resursbehovet, ligger hos de stora länderna och hos internationella organisationer. Således bedrivs huvuddelen av forskningen i USA, Ryssland, Japan och Korea samt inom EU:s ramprogram. Under de senaste åren har forskningsinsatserna ökat något och då starkast inom EU där omfattningen från det tredje till det sjätte ramprogrammet har ökat från fem miljoner Euro till 37 miljoner Euro. Den information som idag finns tillgänglig från denna forskning motsäger inte den av SKB tidigare gjorda bedömningen av metoden separation och transmutation, se föregående avsnitt.

I Sverige bedrivs transmutationsforskning främst vid Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg (CTH), Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm (KTH) och Uppsala Universitet (UU). En viktig finansiär för denna forskning är SKB som årligen satsar cirka fem miljoner kronor. Genom att delta i olika EU-finansierade projekt får de aktuella institutionerna ett tillskott på ytterligare cirka tre miljoner kronor/år. Med det stöd som fås från Svenskt Kärntekniskt Centrum vid KTH som stöds av kärnkraftverken och SKI fås en total svensk forskningsbudget på cirka nio miljoner kronor per år. SKB har tillsatt en referensgrupp som leds av Per-Eric Ahlström för att på nära håll följa forskningen i Sverige och internationellt. Gruppen och forskningsinstitutionerna publicerar med jämna mellanrum rapporter i SKB:s rapportserier, se till exempel /Ahlström 2004, Gudowski et al. 2004, Andersson et al. 2005/.



Inom ramen för MKB-arbetet har SKB låtit ta fram en studie som belyser tillämpningen av separation och transmutation i ett svenskt perspektiv /Grundfelt och Lindgren 2006/. Denna studie bygger i stor utsträckning på beräkningar utförda vid KTH av hur effektiv transmutation av transuraner som kan åstadkommas i ett svenskt scenario, i vilket använt bränsle motsvarande cirka 9 350 ton uran från 40 års drift av de svenska reaktorerna ska transmunderas /Dufek et al. 2006/. Dessa studier visar sammantaget att man även vid en mycket effektiv transmutation får radioaktivt avfall som måste tas om hand i ett kvalificerat slutförvar. Studierna visar även att det i det svenska scenariot, förutom utveckling av transmutationsteknik, även krävs vidareutveckling av separationstekniken för att man ska kunna uppnå en effektiv transmutationscykel. Speciellt är det viktigt att få ner avklingningstiderna för det bestrålade bränslet mellan cyklerna, vilket sannolikt kräver utveckling av pyrokemiska separationsmetoder. Det är idag osäkert om man lyckas uppnå erforderlig separationsgrad i sådana processer.

Transmutation berörs även i en studie av /MIT 2003/. I slutsatskapitlet skriver man bland annat:

*We do not believe that a convincing case can be made on the basis of waste management considerations alone that the benefits of partitioning and transmutation will outweigh the attendant safety, environment, and security risks and economic costs.*

Separation och transmutation tilldrar sig även de internationella organisationernas intresse. /IAEA 2004/ konstaterar att fullt utbyggd transmutation skulle kunna reducera innehållet av transuraner i det högaktiva avfallet med en faktor 100–200 och reducera den tid som krävs för att få ner avfallets radiotoxicitet till samma nivå som naturligt uran, från storleksordningen 100 000 år till mellan 1 000 och 5 000 år.

IAEA ser ett behov av internationellt samarbete runt uppbyggnaden av ett transmutationssystem eftersom det inte är sannolikt att alla stater kan bygga upp centra för upparbetning och separation. Tidsperspektivet för utveckling av separationsteknik bedöms vara 5–10 år för våtkemisk separation och 10–15 år för pyrokemisk separation. En återintroduktion av snabba reaktorer bedöms kunna ske inom 20–25 år och ADS-system antas kunna utvecklas på 25–40 år. Som ett mellansteg ser man separation och konditionering som innebär att transuranerna avskiljs från det högaktiva avfallet för att solidifieras i mycket resistent material. Tidsskalan för utvecklingen av ett sådant system antas varar 5–10 år.

OECD/NEA har publicerat flera studier av avancerade bränslecykler där snabba reaktorer och ADS-system ingår, se till exempel /OECD/NEA 2002, 2006/. Även OECD/NEA konstaterar att behovet av en slutförvaring av högaktivt avfall kvarstår även i avancerade slutna bränslecykler. Vid användning av snabba reaktorer och/eller ADS för bränning av transuraner minskar den långsiktiga radiotoxiciteten och värmeutvecklingen i avfallet. De beräknade radiologiska konsekvenserna av slutförvaringen minskar dock inte lika mycket eftersom de domineras av <sup>129</sup>I. Det noteras också att en ökad upparbetning och separation leder till en ökning av mängden långlivat låg- och medelaktivt avfall liksom att mängden kortlivat låg- och medelaktivt avfall domineras av avfallet från reaktorerna.

I de avancerade bränslecyklerna utnyttjas uranet mycket effektivare än i en bränslecykel med direktdeponering av använt bränsle, det vill säga som den nuvarande svenska bränslecykeln. Denna resurseffektivitet ökar ju större andel snabba reaktorer som ingår i bränslecykeln. Med enbart snabba reaktorer kan i bästa fall en minskning av användningen av uran med en faktor 100 uppnås.

## 4 Övervakad lagring

Internationella erfarenheter finns från mångårig drift av både våta och torra lager. Runt om i världen finns ett ökat behov av lagring av använt kärnbränsle. Den befintliga lagringskapaciteten i bränslebassänger vid kärnkraftverken är begränsad och fler länder bestämmer sig för att inte upparbeta det använda bränslet. En fördröjning av programmen för slutligt omhändertagande av det radioaktiva avfallet medför även det ett större behov av lagringskapacitet. Vid en internationell konferens i IAEA:s regi om förvaring av använt kärnbränsle konstaterades att trenden i många länder går mot torr lagring av använt kärnbränsle i centrala mellanlager /IAEA 2003a/.

IAEA initierade år 1997 ett koordinerat projekt kallat SPAR (Spent Fuel Performance Assessment and Research) för att samla och utbyta erfarenheter avseende hantering av använt kärnbränsle i de deltagande länderna. En av anledningarna var att man såg framför sig ett behov av förlängd lagring (> 50 år) av använt bränsle i många länder innan slutligt omhändertagande. Det sista koordinationsmötet hölls 2001 och dokumentation publicerades 2003 /IAEA 2003b/.

## 5 Geologisk deponering

### 5.1 Översikt

Olika metoder för geologisk deponering har utvärderats och jämförts vid flera tillfällen. Den metod som utöver förvar av KBS-3-typ oftast nämns är djupa borrhål. WP-Cave omnämns endast sporadiskt och inget nytt arbete förefaller ha gjorts sedan SKB:s och SKN:s utvärderingar på 1980-talet. Posiva omnämner WP-Cave i sin redovisning av alternativ i miljökonsekvensbeskrivningen som bilade underlaget för ansökan om principbeslut /Posiva 1999/ där det konstaterades att ingen av de undersökta metoderna bedömdes ge några fördelar i förhållande till KBS-3-konceptet.

### 5.2 KBS-3

År 1996 initierades det så kallade JADE-projektet, som syftade till en jämförande analys av huvudalternativet KBS-3V med bland annat KBS-3H /Sandstedt et al. 2001/.

I JADE-projektet genomfördes en rankning av koncepten med avseende på långsiktig säkerhet, teknisk genomförbarhet och kostnader. Denna rankning placerade KBS-3V som det mest attraktiva konceptet. KBS-3H bedömdes lida av osäkerheter beträffande deponeringstekniken samt av att potentiellt flera kapslar skulle kunna hamna under påverkan av dåligt berg och vatteninflöden. Den främsta fördelen med konceptet bedömdes vara att en mindre bergvolym behöver tas ut.

JADE-projektets rekommendation var att behålla KBS-3V som referenskoncept och att utreda KBS-3H ytterligare för att få ett bättre underlag för att bedöma deponeringstekniken.

### 5.3 Djupa borrhål

#### 5.3.1 Geovetenskapligt kunskapsläge

SKB har tidigare tagit fram flera sammanställningar och utvärderingar av tillgänglig geovetenskaplig information från stora djupa /Juhlin och Sandstedt 1989, NEDRA 1992, Juhlin et al. 1998/. Informationen har senare uppdaterats av /Smellie 2004/ med nyare information. Smellie konstaterar att många av de djupa hål som borrar och utvärderas vetenskapligt syftar till att undersöka seismiska och vulkaniska processer nära gränserna för de tektoniska plattorna, förståelse av genesis för mycket gamla metmoriska bergarter och undersöka kratrar från meteornedfall. Djupa borrhål anläggs annars inom såväl oljeindustrin som prospektering och utvinning av termisk energi. Dessa borrhål finns ofta i geologiska situationer som är av liten relevans för slutförvaring i Sverige. I många fall är dessutom informationen från borrhålen konfidentiell av kommersiella skäl.

Smellie har strukturerat sin sammanställning efter områdena hydrauliska betingelser, geotermiska betingelser, hydrogeokemiska betingelser, bakteriell aktivitet och bergmekaniska egenskaper. Slutsatserna av studien kan sammanfattas i följande punkter:

- Den geotermiska gradienten på djupet kan inte med säkerhet extrapoleras från ytligare mätningar.
- Bergets värmeledningsförmåga minskar mot djupet på grund av lägre sprickfrekvens/porositet. Granit har lägre värmeledningsförmåga än mafiska bergarter (med högt järn- och magnesiuminnehåll) och kan därför vara mer problematisk.

- Förekomsten av gaser i grundvattnet kan potentiellt innebära större problem än de termiska gradienterna.
- Meteoriskt vatten kan penetrera ner till cirka 2 kilometers djup i flacka områden medan data tyder på penetration ner till 4–5 kilometer i mer topografiska områden.
- Permeabiliteten minskar mot djupet. Minskningen åtföljs av en minskning av porositeten.
- Relativt snabba rörelser av salt vatten i djupt liggande högkonduktiva sprickzoner har observerats. Det har bland annat föreslagits att tidvatteneffekter liksom postglacial landhöjning kan leda till att grundvattenrörelser uppstår. Förekomsten av saltvatten ses annars som en indikation på mycket låg vattenomsättning.
- De hydrogeokemiska förhållandena förefaller stabila på förvaringsdjup när övriga förhållanden är gynnsamma (flack topografi, små hydrauliska gradienter och låg permeabilitet). Denna slutsats stöds av förekomsten av starkt salthaltiga vatten av brinekaraktär och utan synbart utbyte med meteoriskt vatten liksom av studier av sprickfyllnadsmineral.
- Under de för svensk slutförvaring aktuella förhållandena kan mikrobiell aktivitet inte uteslutas på förvaringsdjup eftersom temperaturen inte kommer att överstiga den temperatur som biologiskt liv kan uthärda, 115 °C.

### 5.3.2 Borrnings- och deponerings-/återtagsteknik

/Tim Harrison 2000/ utredde på uppdrag av SKB hur 4 kilometer djupa deponeringshål med en diameter i deponeringszonen av 80 cm skulle kunna framställas samt hur inkapslat kärnbränsle skulle kunna deponeras och återtas i sådana hål. En konceptuell utformning har föreslagits. Alla aspekter på hålets utformning har beaktats inklusive borrarutrustning, utformning av borrhög, typ av borrhögsvätska, utformning av infodring och material för tätning av spalt mellan berg och foderrör.

Det föreslagna borrhålet har en diameter på 1 168,4 mm med en infodring på 1 066,8 mm (yttermått) ner till 500 meters djup, därunder en håldiameter på 1 016 mm med en infodring på 914,4 mm (yttermått) till 2 000 meters djup. Spalten mellan foderrör och berg tätas med bentonitslurry hela vägen utom de nedersta 100 metrarna där cement används. De nedersta 2 000 metrarna, ner till 4 000 meters djup, borrar med en diameter på 838,2 mm och förses med en 762 mm (yttermått) infodring. Alla hålsektioner borrar med en hammarbormaskin av typen ”down-the-hole” med användande av skum som borrhögsvätska. Innan infodringen installeras byts borrhögsvätskan ut mot en bentonitslurry för att underlätta nersänkning av infodringen och cementarbeten.

Kapslarna med det använda kärnbränslet sänks ner med ett enkelt J-slitsverktyg med backupsystem ifall J-slitsen fallerar. Alla kapslar placeras i centrum av hålet. Centreringsföreslås säkras genom att fenor av Kevlar eller HDPE monteras på kapslarnas mantelytor. Kapslarna sägs kunna återtas med samma verktyg som används för nersänkning.

Undersökning och mätning rekommenderas ske endast i hål med en största diameter av 311,1 mm. Detta betyder att pilothål måste borraras om mätning ska kunna göras i läge för ett deponeringshål.

Varje deponeringshål beräknas ta 137 dagar att borra och infodra. Kostnaden har uppskattats till 4,65 miljoner Euro per hål. Dessa siffror inkluderar ej pilothålsborring, loggning, testning i hål eller deponering av kapslar. Ny teknisk utveckling för att förbättra bormetoden erfordras beträffande system för recirkulerbart skum, kronor för hammarborring samt robusta upprymmare av igensatta hål.

Harrison bedömer det som möjligt att borra deponeringshålen med dagens teknik även om arbetet utgör en av de största utmaningarna för borrarindustrin.

/Åhäll 2006/ har på uppdrag av MKG (Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning) gjort en genomgång av konceptet djupa borrhål. Han menar med referens till /Chapman och Gibb 2003/ att dagens borroperatörer klarar mer precisa borrhåll som till exempel att utgående från ett borrhål på ytan kunna grena hålet längre ner till en ”fanned array” av borrhål. Syftet med detta skulle vara att reducera behovet av utrymme på markytan då en borrhålls plats kan utnyttjas till flera borrhål. Vid telefonkontakt har Fergus Gibb uppgett att det i oljeindustrin numera är standard att borra sig runt utrustning som fastnat i ett hål. Detta har dock aldrig gjorts med så stora hål som deponeringshål utan snarare med 15–20 cm vida hål.

/Nirex 2006/ har inlett en upphandling av en studie för uppdatering av kunskapsläget vad beträffar det tekniska genomförandet av konceptet djupa borrhål. Enligt upphandlingsunderlaget beräknas studien vara slutförd sent i mars 2007.

### 5.3.3 Utvärderingar av konceptet djupa borrhål

SKB har låtit Kemakta göra en genomgång av konceptet djupa borrhål med avseende på dess potential att uppfylla rimliga krav på säker drift och slutförvaring /Grundfelt och Wiborgh 2006, Marsic et al. 2006/. Studien baseras på en förvarsutformning som ursprungligen togs fram inom PASS-studien /SKB 1992/. Inom studien genomfördes bland annat modellberäkningar av grundvattenströmningen baserat på en generisk geometri. Dessa visade att värmeutvecklingen från det deponerade använda bränslet är otillräcklig för att under de givna betingelserna i väsentlig grad påverka den stabila skiktning av grundvattnet som fås på grund av den höga salthalten i grundvattnet på stora djup. Denna slutsats står väl i överensstämmelse med slutsatser från tidigare studier.

I övrigt konstateras att kunskapen om förhållandena på stora djup, liksom om den för deponering och förslutning nödvändiga tekniken, är för ofullständig för att en meningsfull säkerhetsvärdering av konceptet ska kunna genomföras. SKB har tidigare dragit slutsatsen att det skulle krävas ett 30 årigt FoU program till en kostnad på mer än 4 000 miljoner kronor för att bringa kunskapsnivån om djupa borrhål i jämnhöjd med dagens kunskapsnivå om KBS-3.

/Nirex 2004/ har publicerat en bred genomgång av olika koncept för slutförvaring i djupa borrhål. I rapportens abstract skrivs:

*A substantial part of the report is based on the work which has been carried out by SKB over many years, starting from a review of the geological, hydrogeological and hydrochemical conditions at great depth to an examination of the methods that could be used to emplace the waste canisters. This review also includes the comparisons that were carried out by SKB between the deep borehole disposal concept and other disposal concepts.*

*The use of the deep borehole concept for the disposal of excess weapons grade Plutonium is reviewed. The majority of this work was carried out in the USA, however much of it was essentially based on the work that had been carried out by SKB.*

I rapporten jämförs följande alternativa utformningar av konceptet djupa borrhål:

Deep borehole disposal scheme (option)	Description and comments
In situ melting	In situ melting is similar to Deep Underground Melting (DUMP), initially suggested in the USA in the 1970s and 1980s. Involves encapsulation of the waste. Multiple small metal containers are placed at the bottom of a borehole (or in an excavated cavity) and sealed in with host rock rubble. In time, the heat from the HLW fuses the waste, containers, and rubble together.
Deep self-burial	Concept involving heavy, possibly cooled or refrigerated, metal containers filled with heat-generating waste being lowered to the bottom of a cased borehole up to 2 km deep in a crystalline host rock. After any cooling is stopped, the waste packages heat and melt the enclosing rock through which they then sink under the influence of gravity, coming to rest only when the heat budget of the waste is used up.
Low temperature (encapsulated) borehole disposal	As proposed by SKB, etc.
Disposal in former hydrocarbon boreholes	The re-use of depleted oil reservoirs accessed by deep boreholes.
High temperature (encapsulated) borehole disposal	Positioning of heat-generating HLW in special containers in the lower part of a 4 to 5 km deep, large-diameter borehole drilled into granitic continental crust. Radioactive decay would gradually heat the waste packages to peak temperatures sufficient to generate a substantial zone of partial melting in the surrounding granite at about 850°C.
Hybrid (encapsulated) borehole disposal	The sealing of deep boreholes by partial melting of the rock using HLW packages situated above the main disposal zone, or by the use of electrical heaters.
Spent sealed source disposal	The use of boreholes for the disposal of spent sources. Not included in this review, but currently under investigation by the IAEA.

En slutsats av jämförelsen är att om konceptet djupa borrhål skulle bli aktuellt någonstans är det troligt att det skulle vara ett lågtemperaturkoncept av den typ som bland annat SKB har utrett. Vidare konstateras att säkerheten vid deponering i djupa borrhål vilar nästan helt på den naturliga geologiska barriären. Konceptet vilar således väsentligen på inneslutning i berget vilket i scenariot ”normal utveckling” skulle ge nollutsläpp av radionuklider. Man identifierar åtta nyckelfrågor för konceptet:

1. Grundvattenflödet i deponeringszonen förväntas vara så litet att nuklidtransporten kommer att domineras av diffusion.
2. Avfallet är tillräckligt avklingat för att inte värmedriven konvektion ska destabilisera det av salt stratifierade grundvattnet.
3. Deponeringszonen avskiljs från det ytligare berget av ett långt system av borrhålsförslutning.
4. Att en tillräckligt kraftig rigg används för att man ska kunna dra upp foderrören i hålets övre del eller skapa utfräsningar i borrhålsväggarna som kan användas för att med lämplig återfyllnad bryta den vertikala strömningsvägen genom den störda zonen rund borrhålet.
5. Den övre delen av borrhålet bör utformas så att oavsiktligt tillträde väsentligt försvåras.
6. Avfallskapslarna ska kunna deponeras utan behov av ytterligare skyddsåtgärder i närzonen.
7. Kapslarnas storlek måste anpassas till avfallstypen, håldiametern och eventuella krav på ytterligare utrustning i hålen.
8. På grund av tydliga gränser för hur vida deponeringshålen kan göras begränsas vidden på spalten mellan kapseln och hålväggen.

När det gäller förhållandena i deponeringszonen har följande frågor identifierats som särskilt viktiga:

- Ska man använda foderrör i deponeringszonen eller inte?
- Vilken effekt har borrhåtskan på deponeringsproceduren?
- Effekten av lasten från ovanliggande kapslar under och efter deponering?
- Ska borrhålen vara vertikala?

Rapportens kommentarer om FoU-behovet bygger huvudsakligen på SKB program från år 2000 /SKB 2000b/.

Som nämnts i inledningen till Nirex rapport har djupa borrhål övervägts som en attraktiv metod för slutförvaring av vapenmaterial /US DOE 1996/. Utvecklade flera koncept för att deponera höganrikat uran och plutonium i djupa borrhål antingen direkt som metaller eller oxider eller efter inkapsling i till exempel keramer. Arbetet bygger i stort på SKB:s insatser i PASS-studien och nyare arbeten av relevans för det svenska scenariet har inte kunnat identifieras.

/MIT 2003/ har gjort en bred genomgång av kärnkraftens framtida möjligheter. I studien nämns djupa borrhål som en metod som erbjuder längre transportvägar för radionuklider, berg med lägre porositet och vatteninnehåll, låga flödes hastigheter på grund av stabil salthaltsbetingad stratifiering och god tillgång till lämpliga stabila kristallina urbergsförekomster i så gott som samtliga länder med ett nukleärt program. Man trycker även på att ett förvar enligt principen djupa borrhål är modulärt, det vill säga att det ganska lätt kan byggas i flera geografiskt åtskilda delar, till exempel invid reaktorerna, utan större extrakostnader. De främsta nackdelarna har identifierats att vara att regelverket (det amerikanska) behöver anpassas bland annat till större svårigheter att uppnå återtagbarhet (tidskrävande procedur), att det sannolikt är betydligt svårare att återställa ett djupt borrhål efter ett missöde (till exempel en fastnad kapsel) än vid motsvarande händelse i ett slutförvar av KBS-3-typ samt att det med nödvändighet blir betydligt svårare att bygga upp den nödvändiga kunskapen om berget på dessa stora djup än för mindre djupa anläggningar. Man uttrycker även viss tveksamhet till hur allmänheten skulle uppleva ett byte av strategi.

## 6 Frysning

En forskargrupp från Ruhruniversitetet i Bochum under ledning av Claus Rolfs har nyligen lanserat en metod att djupfrysa radionuklider i syfte att förkorta avfallens livslängd och därmed förenkla det slutliga omhändertagandet /Kettner et al. 2006/. Metoden går ut på att radionuklider bäddas in i någon metall och kyls ner till några få grader Kelvin. Forskargruppen menar att nedkylningen medför att de fria elektronerna i metallen dras närmare de radioaktiva kärnorna och accelererar utstötningen av positivt laddade partiklar från kärnorna men motverkar utstötningen av negativt laddade partiklar. Detta menar gruppen medför att halveringstiden för  $\alpha$ - och  $\beta^+$ -sönderfallande nuklider minskar medan den tvärtom ökar för  $\beta^-$ -sönderfallande nuklider. Gruppen menar att man i försök har sett en förlängd halveringstid för  $^7\text{Be}$  (sönderfaller med elektroninfångning) medan man observerat förkortade halveringstider för  $^{22}\text{Na}$  ( $\beta^+$ -sönderfallande) och  $^{210}\text{Po}$  ( $\alpha$ -sönderfallande). Försök genomförs nu med  $^{226}\text{Ra}$  vars halveringstid man beräknar ska kunna reduceras från 1 600 år till 2–100 år.

De resultat som tagits fram och publicerats av forskargruppen i Bochum har givetvis väckt en viss uppmärksamhet i världen och underkastas nu den normala vetenskapliga granskningsprocessen. Man kan konstatera att forskargruppens resultat är helt nya och att det även om de skulle bekräftas återstår mycket arbete med att få metoden tekniskt användbar.



## 7 Referenser

- Ahlström P-E (ed), 2004.** Partitioning and transmutation – Current developments. A report from the Swedish reference group on P and T-research, SKB TR-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Andersson S, Drouet F, Ekberg Ch, Liljenzin J-O, Magnusson D, Nilsson M, Retegan T, Skarnemark G, 2005.** Partitioning and transmutation – Annual report 2004, SKB R-05-13, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Chapman N, Gibb F, 2003.** A truly final waste management solution – Is very deep borehole disposal a realistic option for high-level waste or fissile materials? Radwaste solutions July/August 2003, 26–37.
- CoRWM, 2006.** Managing our Radioactive Waste Safely – CoRWM's Recommendations to Government. CoRWM Doc 700, Committee on Radioactive Waste Management. July 2006.
- Dufek J, Arzhanov V, Gudowski W, 2006.** Transmutation scenarios – Status and assessment report, SKB R-06-61, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- EC, 2004.** The comparison of alternative waste management strategies for long-lived radioactive wastes. EUR 210221, ISBN:92-894-4986-1.
- Euratom, 2004.** Modified proposal for a COUNCIL DIRECTIVE (Euratom) on the safe management of spent nuclear fuel and radioactive waste. Brussels, 8.9.2004 COM(2004) 526 final.
- Grundfelt B och Lindgren M, 2006.** Separation och transmutation. Belysning av tillämpning i Sverige, SKB R-06-60, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Grundfelt B och Wiborgh M, 2006.** Djupa borrhål – Status och analys av konsekvenserna vid användning i Sverige, SKB R-06-58, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Gudowski W, Wallenius J, Tucek K, Eriksson M, Carlsson J, Seltborg P, Cetnar J, Jollkonen M, Lagerstedt C, Talamo A, Westlén D, Grisell A, 2004.** System and safety studies of accelerator driven transmutation. Annual Report 2003, SKB R-04-79, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Harrison T, 2000.** Very deep borehole – Deutag's opinion on boring, canister emplacement and retrievability, SKB R-00-35, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- IAEA, 2003a.** Storage of Spent Fuel from Power Reactors – International Conference held in Vienna, 2–6 June 2003 organized by the International Atomic Energy Agency in co-operation with the OECD Nuclear Energy Agency, Vienna.
- IAEA, 2003b.** Final report of a Co-ordinated Research PROJECT on Spent Fuel Performance Assessment and Research (SPAR) 1997-2001. IAEA-Tecdoc\_1343, ISBN 92-0-102703-6, International Atomic Energy Agency, Wien.
- IAEA, 2004.** Implications of Partitioning and transmutation in Radioactive Waste Management, Technical Report Series No. 435, International Atomic Energy Agency, Wien.
- Juhlin C och Sandstedt H, 1989.** Storage of nuclear waste in very deep boreholes: Feasibility study and assessment of economic potential. Part I Geological considerations. Part II Overall facility plan and cost analysis. TR 89-39, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Juhlin C, Wallroth T, Smellie J, Eliasson T, Ljunggren C, Leijon B, Beswick J, 1998.** The Very Deep Hole Concept: Geoscientific appraisal of conditions at great depth. TR-98-05, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

- Kettner K U, Becker H W, Strieder F, Rolfs C, 2006.** High-Z electron screening: the cases  $^{50}\text{V}(p,n)^{50}\text{Cr}$  and  $^{176}\text{Lu}(p,n)^{176}\text{Hf}$ , J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 32 (2006) 489–495.
- Lidskog R och Andersson A-C, 2001.** The management of radioactive waste – A description of ten countries, The International Association for Environmentally Safe Disposal of Radioactive Materials (EDRAM) och Svensk kärnbränslehantering AB. ISBN-91-973987-3-X.
- Lind J, 2006.** Lösning eller låsning – Frågan om kärnavfall i några länder. Svensk kärnbränslehantering AB. ISBN 91-976141-2-2.
- Marsic N, Grundfelt B, Wiborgh M, 2006.** Very Deep Hole Concept (VDH) Thermal effects on groundwater flow, SKB R-06-59, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- MIT, 2003.** The Future of Nuclear Power An Interdisciplinary MIT Study, Massachusetts Institute of Technology, Boston. ISBN 0-615-12420-8.
- NEDRA, 1992.** Characterization of crystalline rocks in deep boreholes. The Kola, Krivoy Rog and Tyrnauz boreholes, SKB TR-92-39, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Nirex, 2004.** A Review of the Deep Borehole Disposal Concept for Radioactive Waste, Nirex Report no. N/108, United Kingdom Nirex Limited, June 2004.
- Nirex, 2006.** Status of Technology for Deep Borehole Disposal – Invitation to Tender, Tender ref: NR3204/X, UK Nirex Ltd, Harwell, Didcot.
- OECD/NEA, 2002.** Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles – A Comparative Study, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- OECD/NEA, 2003.** Geological repositories Political and Technical Progress – International Conference held in Stockholm, 7–10 December jointly organized by SKB, IAEA, NEA and EC. NEA No.5299.
- OECD/NEA, 2006.** Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, NEA No. 5990, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- Posiva, 1999.** The final disposal facility for spent nuclear fuel – Environmental impact assessment report, Posiva Oy, Helsingfors.
- Sandstedt H, Pers K, Ageskog L, Munier R, 2001.** Project JADE – Comparison of repository systems, Executive summary and conclusions, SKB TR-01-17, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB, 1992.** Projekt AlternativStudier för Slutförvar (PASS). Slutrapport. Även utgiven på engelska. Project on Alternative Systems Study (PASS). Final report. TR-93-04, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB, 2000a.** Systemanalys – Val av strategi och system för omhändertagande av använt kärnbränsle, R-00-32, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- SKB, 2000b.** Förvarsalternativet djupa borrhål. Innehåll och omfattning av FUD-program som krävs för jämförelse med KBS-3-metoden. R-00-28, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Smellie J, 2004.** Recent geoscientific information relating to deep crustal studies, SKB R-04-09, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- US DOE, 1996.** Technical Summary Report For Surplus Weapons-Usable Plutonium Disposition, DOE/MD-0003 Rev. 1, Office of Fissile Materials Disposition United States Department of Energy.
- Åhäll K-I, 2006.** Slutförvaring av högaktivt kärnavfall I djupa borrhål – En utvärdering baserad på senare års forskning om berggrunden på stora djup, MKG rapport nr 1, Miljöorganisationernas kärnavfallsgranskning, Göteborg.