



UNDERLAGSRAPPORT TILL
FoU-PROGRAM 86

Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring

Alternativa slutförvaringsmetoder

September 1986

Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring.

Alternativa slutförvaringsmetoder

September 1986

INLEDNING

Föreliggande rapport diskuterar innebörden av begreppen alternativ utformning och alternativa barriärer. Vidare presenteras olika principiella metoder för slutförvaring och olika komponenter som kan ingå i ett system för slutförvaring. Idéerna till de olika metoderna, komponenterna eller utförandena kommer från många håll. En del har länge varit identifierade i svenska eller utländska diskussioner om kärnavfallens hantering, andra är utformningar som diskuterats inom SKB eller föreslagits av SKBs konsulter att tas upp i FoU-programmet.

Idéerna har sammanställts i rapporten utan några försök att identifiera deras upphovsmän.

Valet av utformning och plats för ett slutförvar skall grundas på ett allsidigt beslutsunderlag bl a om de möjliga alternativa utformningarna. Forskningsprogrammet måste emellertid inriktas även med hänsyn till faktorer som inte behandlas i denna rapport, exempelvis utvecklingspotential inom olika FoU-områden, tillgång till validerade modeller och kontrollerade data, möjligheter till internationellt samarbete etc.

En på samtliga dessa grunder gjord sammanvägning av FoU-insatserna under perioden 1987-1992 redovisas i FoU-program 86 /1/.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	BAKGRUND	7
2	SYSTEMATIK	9
2.1	Allmänt	
2.2	Ej behandlade alternativ	
2.3	Sorteringssystematik	
3	ALTERNATIVGENOMGÅNG	13
3.1	Principiella systemlösningar	
3.2	Platsanknutna alternativ	
3.3	Spridningshinderarrangemang	
3.4	Teknisk utformning och utförande	
4	FoU-INSATSER	27

1 BAKGRUND

SKB skall enligt lagen om kärnteknisk verksamhet svara för att den allsidiga forsknings- och utvecklingsverksamhet bedrivs, som är nödvändig för att på ett säkert sätt hantera och slutförvara kärnavfall.

Kravet på allsidighet innebär att FoU-arbetet skall omfatta dels olika tänkbara avfallsformer, dels olika metoder för att åstadkomma en acceptabel säkerhet vid hantering och slutförvaring.

Den hittills genomförda FoU-verksamheten har utgått ifrån vissa förutsättningar och ramar för den svenska avfallsverksamheten. En del av dem bedöms vara giltiga också för den fortsatta allsidiga FoU-verksamheten. Andra tillkommer som följd av att verksamheten breddas. Följande förutsättningar ligger till grund för den föreliggande genomgången av alternativa metoder för slutförvaring av radioaktivt avfall:

- Det svenska kärnenergiprogrammet omfattar de nuvarande 12 reaktorernas drift till år 2010.
- Slutförvaringen skall ske i en vanligt förekommande bergart i svensk berggrund.
- FoU-arbetet skall ge underlag för att genomföra en slutförvaring med en för samhället godtagbar säkerhet och till god effektivitet och ekonomi.
- Den *långsiktiga* säkerheten bör inte vara beroende av övervakning eller framtida korrigerande åtgärder.
- Mellanlagringen av bränslet antas ske i CLAB.

I denna rapport diskuteras enbart avfallsformen använt kärnbränsle. Den forskning och utveckling som bedrivs om avfallsformer eller slutförvaringsmetoder, som inte är aktuella i Sverige, kommer att följas i den mån som kunskaperna bedöms vara av värde för den egna verksamheten.

Ett lämpligt slutförvar för använt kärnbränsle i kristallint berg måste visas vara tekniskt genomförbart, ge en godtagbar säkerhet samt vara kostnadseffektiv.

En godtagbar säkerhet innebär att slutförvaret skall skydda biosfären från tänkbara skadeverkningar från avfallet genom att:

- avskärma strålning,
- förhindra skadlig spridning av radionuklider,
- försvåra oavsiktligt intrång.

Slutförvaringen skall vidare ske med metoder som medger säker hantering.

FoU-verksamheten skall studera olika alternativa utformningar för ett förvarssystem för använt bränsle i kristallint berg, studera alternativa möjligheter att åstadkomma en tillräcklig säkerhet i förvaret samt studera kostnader för de olika alternativen.

En ytlig förläggning av ett slutförvar erbjuder inte samma möjligheter till långtidsskydd mot spridning av radionuklider eller fysiskt skydd mot mänsklig påverkan som en djupförläggning. För att erbjuda tillräckligt skydd kräver sådana anläggningar att förvarsområdet är kontinuerligt övervakat. Anläggningar för

slutförvaring som kräver lång tids övervakning betraktas inte i detta sammanhang som slutförvar. Vissa utformningar av det totala systemet som innefattar ett initialt övervakat skede kommer dock att diskuteras.

Vid en djup geologisk slutförvaring i svenskt berg utgör grundvatten det enda realistiska transportmedlet för radioaktiva ämnen från förvaret till biosfären. Transporten av radioaktiva ämnen till biosfären kan förhindras, begränsas eller fördröjas på ett antal principiellt olika sätt:

- genom att vatten förhindras komma i kontakt med avfallet,
- genom att vattenomsättningen kring avfallet begränsas,
- genom att avfallets löslighet i närområdet påverkas, och
- genom att radionuklidernas transport i den omgivande geosfären påverkas.

De spridningsbegränsande effekterna kan påverkas, dels via förvarets naturliga miljö genom val av förlägningsplats, dels via åtgärder av teknisk natur som påverkar avfallets närmiljö. Exempel är olika former av behandling eller konditionering av avfallet och uppbyggande av spridningshinderande barriärer kring avfallet.

Kostnaden för ett slutförvar påverkas, förutom av kostnader för eventuella säkerhetsåtgärder enligt ovan, också av förvarets utformning och placering samt det tekniska utförandet av förvarsdelar utan direkta säkerhetseffekter. Alternativa utformningar och utföranden kan gälla:

- Avfallets hantering, form och konditionering.
- De tekniska barriärernas utförande.
- Förvarets anpassning till andra delar av kärnenergisystemet.
- Förvarets geometriska utformning.
- Tekniskt genomförande av utbyggnad, deponering och försegling.

Ett slutförvar kan utformas på ett i praktiken obegränsat antal sätt, alla i någon detalj skiljande sig från de övriga. Den systematiska genomgången av alternativ har därför i denna rapport baserats på alternativa utformningar av delsystem eller element som kan ingå i förvarssystemet. Dessa kan sedan kombineras till olika system med hänsyn till elementens samfunktion och krav på teknisk genomförbarhet, tillräcklig säkerhet och god ekonomi.

I kapitel 2 diskuteras systematiken och i kapitel 3 görs en genomgång av de olika alternativ som identifierats. Kapitel 4 redovisar den FoU-insats som är nödvändig för att planmässigt kunna jämföra alternativen i syfte att slutligen kunna definiera en eller flera genomförbara förslag för en praktisk slutförvaring i Sverige.

2 SYSTEMATIK

2.1 Allmänt

Det finns många olika principer som kan tillämpas för att utforma ett geologiskt slutförvar för radioaktivt avfall. En tillräcklig säkerhet baseras för samtliga principutformningar på val av plats-specifika förutsättningar och på utformning av olika spridningshindrande arrangemang.

De spridningshindrande arrangemangen kan tekniskt utformas eller utföras på olika sätt.

Diskussionen om möjliga alternativa förvarsutformningar har nedan systematiserats i följande grupper:

- A - Principiella systemlösningar
- B - Platsanknutna alternativ
- C - Spridningshindrande arrangemang
- D - Teknisk utformning och utförande

Varje gruppindelning av alternativen medför naturligtvis områden, där gränsdragningen mellan grupperna blir diffus eller där grupperna överlappar varandra. Exempelvis påverkas valet av en principlösning av de platser som kan vara möjliga att använda och de spridningsbarriärer som måste införas för att en viss säkerhetsnivå skall kunna uppnås. Likaså återverkar ofta spridningsbarriären på den tekniska utformningen, liksom kvaliteten på utförandet av en barriär återverkar på effekten av dess funktion som spridningshinder.

Avsikten här är att, utan överdriven formalism, sortera alternativen i grupper, där de primärt synes höra hemma. Alternativ som listas är sådana som bedömts vara värda att utredas med avseende på tekniska, säkerhetsmässiga eller ekonomiska fördelar.

2.2 Ej behandlade alternativ

Förutom de alternativ som behandlas längre fram i rapporten finns ett antal förslag till hur slutförvaring skall genomföras som inte överensstämmer med de förutsättningar som diskuterats i kapitel 1. Några av dessa alternativ kommer att kort kommenteras här.

Slutförvaring med återtagbarhet

Det framtida restvärdet i använt kärnbränsle med avseende på exempelvis kvarstående energiinnehåll, förekomst av ädelmetaller eller ovanliga isotoper etc, eller med avseende på återvinningsvärdet i de material som ingår i barriärerna, kan skilja sig radikalt från dagens värderingar. Det har därför ibland förts fram krav på att utforma förvar på sådant sätt att ett återtagande av avfallet underlättas. Ett annat skäl för återtagande är att säkerhetsbedömningarna kan komma att förändras på sådant sätt att samhället önskar förändra slutförvarets utformning.

För svenska förhållanden kan det konstateras att varje form av slutförvaring i kristallint berg innebär att avfallet är fixerat och i princip återtagbart - i motsats till slutförvaring i salt och plastiska lerlager. Beroende på hur avfallet konditioneras och hur förvaret förseglas, kan emellertid kostnaderna för återtagandet vara olika. Kostnaderna för att återta avfallet förändras stegvis när bränslet inkapslas, när avfallet deponeras och när förvaret förseglas.

En besvärande konsekvens av att förenkla återtagbarheten i det långsiktiga förvaringsskedet är att åtgärderna också kan påverka de passiva barriärerna för isolering eller fördröjning av radionuklider. Betydelsen av denna påverkan är systemspecifik.

Med den i Sverige planerade fyrtioåriga mellanlagringen av använt kärnbränsle i CLAB och med de möjligheter, som föreligger att även väsentligt kunna utöka lagringstiden, bedöms det lämpligt att i första hand förlänga lagringen i CLAB om en rimlig tveksamhet skulle föreligga om hur det använda kärnbränslet lämpligen bör slutförvaras.

Värdet av och kostnaderna för att åstadkomma olika grader av återtagbarhet måste bedömas för varje utformning för sig. Då en enkel återtagbarhet från CLAB nu föreligger över perioder som är väsentligt längre än längden av realistiska ekonomiska prognosperioder, är det inte meningsfullt att i nuvarande skede ställa krav på en utökad återtagbarhet. Sådana avvägningar görs lämpligen i ett skede strax före det att förvarets detaljutformning skall fastställas.

Vad gäller säkerhetsargumentet kan det helt kort konstateras att en säkerhetsanalys av långtidseffekterna av en slutförvaring inte kan accepteras som tillförlitlig om det inte kan visas att den baserats på fenomen som är så väl integrerade i det vetenskapliga kunnandet att en förändring i väsentliga delar av det betraktas som orimliga.

Av ovanstående skäl behandlas inte slutförvarssystem med återtagbarhet som separata alternativ.

Deponering i djuphavssediment

Internationellt samordnade studier har sedan länge bedrivits om möjligheterna att genomföra en slutlagring av radioaktivt avfall i djuphavssediment.

Då emellertid den övergripande svenska inriktningen varit att i första hand studera möjligheterna att genomföra en slutlig deponering på territorium under svensk kontroll och med teknik tillgänglig inom landet, bedöms djuphavssediment inte utgöra ett alternativ som aktivt bör studeras. Likartade problem och frågeställningar kan emellertid också uppkomma vid en lokalisering av ett förvar under Östersjön, varför den internationella verksamheten kommer att följas.

Upparbetning av använt kärnbränsle

Sverige har för närvarande kontrakt på upparbetning av kärnbränsle med klausuler som bl a ger upparbetaren rätt att återsända det radioaktiva avfallet till ursprungslandet. Sonderingar pågår för överlåta dessa kontrakt. Därigenom skulle slutförvaringen kunna renodlas till att endast omfatta använt kärnbränsle.

Innan dessa överlåtelser kommit till stånd måste SKB följa utvecklingen inom upparbetningsområdet inklusive hur olika avfallskategorier kommer att konditioneras. Dessa studier styrs i hög grad av de direkta kontakterna med upparbetaren, och med de andra kunderna, varför de inte behandlas här.

Även om alla upparbetningskontrakt skulle bli överlåtna föreligger fortfarande ett intresse för SKB att följa utvecklingen inom upparbetningsområdet, speciellt inom områdena aktinidkemi och bränsleupp-lösning.

Transmutation

Ett av grundproblemen med radioaktivt avfall är att vissa av de ingående nukliderna har mycket långa halveringstider. Skulle sådana nuklider separeras och neutronbeståras, kan en väsentlig reduktion av halveringstiderna erhållas, dock oftast mot kostnaden av en högre initial aktivitet. Metoden att genom transmutation av långlivade nuklider reducera problemen med det långlivade radioaktiva avfallet har ibland presenterats som ett alternativ till långtidsförvaring av avfall.

Det kan dock konstateras att transmutation för närvarande inte är en kommersiellt tillgänglig metod och den bedöms inte heller kunna bli det förrän en stor-skalig utbyggnad av snabba reaktorer skett i världen. Transmutation förutsätter tillgång till huvuddelen av upparbetningsteknologin och därutöver en utveckling av kemisk separationsteknik för speciella radionukli-der (exempelvis Np, Am, I, Cs, Zr, Nb).

Med hänsyn till detta utvecklingsläge och till riksdagsbeslutet att avveckla svensk kärnenergi-produktion till 2010, bedöms transmutation inte vara ett aktuellt alternativ för hantering av radioaktivt avfall i Sverige. De kemiska landvinningarna inom området torde dock kunna vara av intresse och kommer att bevakas.

Uppskjutning av radioaktivt avfall i rymden

Ett alternativ till kvittblivning av radioaktivt avfall i berggrunden vore att skjuta upp avfallet i en stabil omlopps bana kring jorden eller solen.

För att detta skall vara realistiskt ur energisynpunkt måste dock det mindre aktiva materialet, som dominerar det använda kärnbränslets massa, skiljas av. Vä-sentliga delar av en upparbetningsprocess måste alltså genomföras före en uppskjutning i rymden på samma sätt som vid transmutation.

Rymdteknologins utveckling kan eventuellt göra denna metod till ett realistiskt alternativ i framtiden. Med hänsyn till att utvecklingen är nära knuten till rymdindustrin och till upparbetningsindustrin be-döms dock metoden inte föranleda FoU-insatser i Sverige.

2.3 Sorteringssystematik

Nedan följer en beskrivning av den systematik för sortering av alternativ som tillämpas i denna rapport.

Grupp A - Principiella systemlösningar

Inom denna grupp diskuteras idéer och systemlösningar för slutförvaring av använt kärnbränsle som principiellt skiljer sig från det som tidigare utretts inom SKB.

Exempel

- System med väsentligt kortare eller längre avklingning före tillslutningen av slutförvaret.
- System för förvaring över grundvattennivån.
- Djupa borrhål.

Grupp B - Platsanknutna alternativ

De platspecifika förhållanden som har säkerhetsmäs-sig betydelse för ett slutförvar varierar inom vida gränser. Variationen är dock inte slumpvis, många parametrar är systematiskt kopplade till varandra och när ett platsval väl är gjort så är samtidigt också en mängd naturliga omgivningsförhållanden fastlåsta.

I praktiken kan inte platsundersökningarna styras av syftet att uppfylla exakt fastställda önskemål om parametrar av säkerhetsbetydelse. Man får undersöka områden som torde ha en generell lämplig karaktär och där acceptera eller förkasta de givna parameter-kombinationerna i klump.

Av denna anledning betraktas alternativ vad gäller förläggning som en speciell grupp.

Det är inte meningsfullt att beteckna varje möjliga förläggningsplats i Sverige som ett alternativ, då de potentiella platserna dels i stort antal finns spridda över så gott som hela landet, dels synes vara mycket likartade vad gäller geologiska och hydrauliska karakteristika. Dock kan ibland vissa förutsättningar anges för en förläggningsplats som är så specifika eller begränsar de potentiellt tillgängliga platserna så mycket att de därigenom kan sägas utgöra distinkt skilda alternativ. Exempel på sådana är alternativet att förlägga förvaret i gabbro eller kravet att ett eventuellt ut-läckage alltid skall komma att ske i saltvatten.

Andra förutsättningar, som tunnelstabilitet eller krav på låga gradienter eller låg permeabilitet, ställer så små krav eller kan uppfyllas på så många sätt att de flesta potentiella förvarslägen kan vara acceptabla. De definierar således inte distinkta alternativ utan ger snarast ett flertal möjliga varianter för så gott som alla alternativ. Ofta kan exempelvis geometrisk utformning och djup på ett relativt obundet sätt varieras inom varje förläggningsplats för att tillgodose krav.

Exempel på frågor som behandlas i gruppen plats-anknutna alternativ:

- Bergart
- Ytförhållanden (topografi, grundvatten, recipient)
- Förläggningsplats

Grupp C - Spridningshindrande åtgärder

Som nämnts i kap 1 bedöms transporten med grundvattnet vara den enda realistiska mekanism som kan föra signifikanta mängder av radioaktivitet från förvaret till biosfären. De spridningshindrande åtgärderna kan indelas i tre huvudgrupper:

- C1 Inkapsling av bränsle
- C2 Begränsning av grundvattenflödet
- C3 Begränsning av radionuklidens löslighet

Inkapsling av det använda bränslet görs i syfte att omge avfallet med ett icke vattengenomsläppligt skikt för att förhindra en tidig kontakt med grundvatten. Inkapslingsalternativen uppdelas efter material (exempelvis metaller som Cu, Ti, Fe; keramer som Al_2O_3 , TiO_2 ; kompositer). En kapsel av ett visst material kan ha flera alternativa tillverkningsmetoder, konstruktionsutförningar eller dimensioneringar.

Begränsningar av grundvattenflödet kring kapsel/avfall kan åstadkommas genom olika typer av dränerade system, genom strömningshindrande barriärer av exempelvis lera eller genom gradientreducerande metoder som hydrauliska burar. För varje alternativ metod kan många varianter erhållas genom att täthet och skiktjocklek för applicerade material kan varieras och genom att förvarsdjup kan väljas med hänsyn till berggrundens permeabilitet.

Exempel på alternativa metoder för att begränsa grundvattenflödet i närzonen är:

- Torra system – genom aktiv eller passiv dränering, ventilation eller vätskeundantågning genom gasproduktion.
- Strömningshinder – genom omslutande skikt av lågkonduktiva material som moräner, olika leror, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, cement.
- Injektering av tätningsmaterial i spricksystem eller uppbyggnad av tätande proppar i borrhål, tunnlar och schakt.
- Hydrauliska burar kring förvaret eller förbiledning av grundvattnet genom kanaler, som avsiktligt lämnats öppna.

Lösligheten av olika avfallsämnen i grundvatten kan begränsas genom kemisk konditionering av zonen kring avfallet, exempelvis genom materialval i kapsel och buffert eller genom tillsatser i närzonen syftande till att binda specifika ämnen eller till att skapa för säkerheten gynnsamma miljöer.

Exempel är

- Fyllning av förvarets håligheter med uranmalm eller utarmat uran.
- $\text{Fe}(\text{II})$ eller kopparpulver i bufferten för att styra Eh.
- pH stabilisering genom bentonitbuffert.

Grupp D - Teknisk utformning och utförande

Vissa alternativ för utformning eller alternativa metoder för utförande av delar i slutförvarssystemet kan vara föranledda av tekniska eller ekonomiska hänsyn.

Även om de inte primärt syftar till att påverka säkerheten utgör de element som både scenarioanalys och säkerhetsanalysen måste ta hänsyn till.

Sådana alternativ kan gälla:

- layout, utformning av bergtrum, tunnlar eller deponeringspositioner, teknik för bergarbeten (ex. fullortsborrning, försiktig sprängning),
- transport, hanterings- och deponeringsteknik,
- utnyttjande av tunnlar för samdeponering av låg- och medelaktivt avfall, rivningsavfall etc,
- teknik för tillverkning eller applicering av barriärer (olika grader av förtillverkade paket kontra applicering på plats) tidplanering för utbyggnad, deponering och försegling (ex. vis snabb resp successiv utbyggnad eller försegling).

3 ALTERNATIVGENOMGÅNG

Nedan görs en genomgång av idéer eller förslag till alternativa principer, metoder eller element i slutförvarssystemet enligt den i kapitel 2 givna systematiken. Varje alternativ diskuteras i huvudsak enligt följande mall:

- 1 Beskrivning av alternativets princip och på vilket sätt den skiljer sig från andra alternativ, speciellt det som redovisats i KBS-3.
- 2 De fördelar eller den nytta resp nackdelar och restriktioner som alternativets tillämpning kan medföra. Samband med övriga systemelement. Vilka varianter kan alternativet ha ifråga om exempelvis materialval, dimensionering eller utförande.
- 3 De kunskapsluckor som måste fyllas för att alternativets värde skall kunna bedömas. Följande aspekter behandlas:
 - teknisk genomförbarhet,
 - säkerhetsmässig acceptans,
 - kostnads- och tidplaneaspekter.
- 4 En bedömning av nödvändiga forskningsinsatser samt en prioritetsbedömning.

3.1 Grupp A - Principiella systemlösningar

Förteckning över alternativ

- A1 Tidigarelagd eller fördröjd slutdeponering
- A2 System över grundvattennivån
- A3 Djuphålsdeponering
- A4 WP-cave

A1 -Tidigarelagd eller fördröjd slutdeponering

1 Principer

Som grund för planeringen i det FoU-program som inlämnades tillsammans med KBS-3 har en 40-årig lagringsperiod antagits för avfallet mellan uttag ur reaktorn och försegling av slutförvaret. Lagringsperioden medför att radioaktivitet och restvärmeeffekt i bränslet/avfallet avtar.

Internationellt har vissa länder eftersträvat kortare mellanlagringstider (USA, Västtyskland), andra åter planerar för längre mellanlagring (Frankrike, Storbritannien). Även i Sverige har kortare eller längre mellanlagringstider diskuterats.

På begäran av Statens Kärnbränslenämnd har SKB utrett konsekvenserna för planering, säkerhet och kostnader vid alternativa tidplaner för hanteringen av det använda kärnbränslet /2/.

2 Fördelar och nackdelar

En tidigareläggning av avfallskonditionering och deponering skulle medföra en högre strålning och resteffekt i bränslet vid hanteringen. En senareläggning minskar dessa effekter. Strålfältet påverkar skärningsbehovet vid hanteringen och kan, via radiolys, inverka på lösligheten av avfallsmatrisen vid tidigt kapslingsgenombrott. Temperaturen påverkar grundvattenflöde och kemiska jämvikter i ett initialskede och kan även påverka långtidsstabiliteten av vissa buffertmaterial.

Utredningen har baserats på den i KBS-3-rapporten redovisade inkapslings- och deponeringsmetoden.

I utredningen konstateras att inga klara tidsberoende tröskeeffekter uppkommer i de tekniska eller säkerhetsmässiga förhållandena vid en ändring av nuvarande planerade deponeringstidpunkt, år 2020, tidigarelagd till 2005 eller senarelagd till 2080. En deponering före år 2005 bedöms inte vara praktiskt rimlig med hänsyn till nödvändiga planerings- och forskningsinsatser. En väsentlig senareläggning i tiden bortom år 2080 kan komma att kräva en torrlagring av bränslet. Inga andra säkerhetsmässigt väsentliga effekter har kunnat påvisas.

3 Värderingar och bedömningar

På nuvarande bedömningsgrund konstateras att en acceptabel säkerhet kan åstadkommas oavsett när den första deponeringen görs efter år 2005. Tekniskt blir en hantering av bränslet vid inkapsling och deponering enklare ju längre lagringstiden är, såvida bränslet bibehåller sin integritet. Vid normal realförräntning dominerar vinsten av senarelagda investeringar över ökade kostnader för den förlängda driften av CLAB.

Det bör emellertid uppmärksammas att alternativa förvarsutformningar eller barriärsystem kan vara mera känsliga för deponeringstidpunkten än vad KBS-3 metoden är. För att skapa en möjlighet att inom rimliga gränser optimera deponeringstidpunkten oavsett förvarsmetod, bör de olika alternativens känslighet för temperaturer och strålfält granskas.

4 Erforderliga insatser

- Marginalkostnaderna för ändringar i sådana systemdelar som har en temperaturanknytning bör redovisas. Exempel på sådana är djup, bränslemängd per kapsel, deponeringstäthet osv.
- Fördjupade FoU-insatser bör planeras in för studium av effekter av högre temperatur (exempelvis 125 eller 150°C) på geokemi, buffertstabilitet, korrosion, löslighet och grundvattenomsättning. Visst material finns tillgängligt utomlands.
- Fördjupade studier av alfa-radiolys kombinerat med högre temperaturer och av hur temperaturpåverkan bergspänningar inverkar på flödet i närzonen.

Prioritet

Eftersom en förändring av deponeringstider kan göras vid alla alternativa slutförvar innebär detta alternativ inte att speciella forskningsinsatser initieras utan ställer kravet att de olika alternativens känslighet för temperaturer och strålfält analyseras parallellt med att alternativet utvärderas.

A2 - System över grundvattennivån

1 Principer

Förvaret förläggs till en geologisk formation, som medger ett djup av ca 400 m eller mer och där topografiska förhållanden också medger dränage genom självfall till ett större vattendrag.

Inkapslat, använt bränsle placeras i bergutrymmen som ventileras genom självdrag. Luften torkar och transporterar inläckande grundvatten från avfallsutrymmen mot kallare dränerade utrymmen.

2 Fördelar och nackdelar

Så länge avfallsvärmen ger luftväxling nog att torka bergväggar och hålla relativa fuktigheten $\ll 100\%$ kan inte rinnande vatten påverka kapslar eller frigöra och bortföra något från avfallsmatrisen. Ventilationen och uppvärmningen av berget kan medföra ytlossning i bergväggar. Vid eventuell igensättning av dränagesystemet kan rinnande vatten helt eller delvis fylla förvaret.

3 Värderingar och bedömningar

Även om torkeffekten i det renodlade fallet endast kvarstår under begränsad tid och förvaringsplatsen har speciella krav på topografi (fjälltrakter) kan alternativet kombineras med sen tillslutning och aktiv dränering i andra förvaringslägen. Uppvärmning på grund av restvärme och ventilation av bergutrymmen sker i alla alternativ i ett första skede. Av dessa skäl bör förvaringsutformning med ventilerade kapselutrymmen studeras.

Den eventuella acceptansen av förvaringsanläggningar beror, förutom på den rena tekniska genomförbarheten, även av hur samhället betraktar övervakningskravet vid anläggningar som inte är återfyllda och passivt förseglade.

4 Erforderliga insatser

- Ett klarläggande av samhällets syn på övervakning, möjligheter till återupptagning av bränslet och liknande frågor.
- Studier av kapselkorrosion under luftfuktiga förhållanden.
- En studie av ventilerade förvaringsutformningar med värmeförhållanden beräknade för minst 1000 år.
- En studie av effekter av ventilation i bergschakt, ytuppluckring, långtidsstabilitet i tunnlar och schakt m m.

Prioritet

Insatserna under första punkten bör kunna genomföras de närmaste åren. Punkt 2 bör ingå som allmänna överväganden i kapselstudierna. Se även A4 - WP-cave.

A3 - Djuphålsdeponering

1 Principer

Genom att deponera radioaktivt avfall på stort djup under markytan, finns möjlighet att uppnå så långa transporttider, att avfallet enbart på grund av detta hinner avklinga eller utspädas till ofarlig halt innan det når biosfären. Ofta har mycket stora djup diskuterats (5-10 km) men även några kilometers djup bör kunna vara av intresse.

För att från markytan nå dessa djup (5 - 10 km) med håll av tillfredsställande diameter, erfordras kraftiga borrhålsborrningar av den typ som används vid oljeborrning. Genom lösa jordlager och i sprickigt berg måste borrhålen förses med någon form av inklädnad (t ex stålrör), som kan behöva tas bort innan borrhålet försluts.

Avfallet som skall deponeras kan bestå av demonterade eller sönderdelade bränslestavar, men även av bränsleelement eller högaktivt avfall från uppberedning. Avfallet placeras lämpligen i en kapsel. Kravet på kapseln bör kunna begränsas till vad som behövs vid hantering och nedsänkning i deponeringshålet.

I borrhålets övre del placeras inget avfall och efter deponering bör borrhålet förslutas till samma täthet och beständighet, som det omgivande berget.

2 Fördelar och nackdelar

Om transporthastigheten i berget kan bevisas vara tillräckligt låg, kan hela säkerhetsfilosofin baseras enbart på den långa transporttiden, en stabil berggrund och en fungerande borrhålstättningsmetod.

Allt arbete kan med denna metod bedrivas från ett centralt område på markytan genom att låta borrhålen sprida sig på djupet.

Metoden inrymmer dock flera osäkra faktorer, där de viktigaste är:

- Vår vetenskap om bergförhållandena på dessa djup är i dag starkt begränsade.
- Borrning i hårt berg av håll med ovan beskrivna dimensioner har hittills inte utförts i världen. De ryska borrhålen på Kolahalvön torde kunna ge en viss erfarenhet.
- All hantering med avfallet måste ske fjärrmanövrerat och i väl avskärmda utrymmen ovan mark.

3 Värderingar och bedömningar

Den beskrivna förvaringsmetoden kan visa sig vara ekonomiskt gynnsam. Det kan också vara av intresse att studera djuphålsdeponering på några kilometers nivå.

Borrning av håll med aktuella dimensioner och djup kan vara förenat med stora kostnader. Tekniken inom detta område utvecklas dock snabbt i samband med oljeborrning och tiden fram till deponering är lång. Utöver de stora dimensionerna, måste vid borrhålsarbetet även krav på tillräcklig raket ställas.

Eventuella oinklädda bergväggar i deponeringszonen kan orsaka problem vid nedsänkning av avfallskroppar i händelse av bergutfall.

Risken att tappa avfallet under nedsänkningen, eller att det fastnar, måste även beaktas. Temperaturen på stora djup kan medföra komplikationer. Kriticitetsrisken måste bedömas.

4 Erforderliga insatser

- Kvalificerade kostnadsbedömningar måste göras inom ett område, där vi saknar tillförlitliga kunskaper. Internationellt samarbete bör därför eftersträvas.
- Metoder att undersöka bergkvalitet och grundvattenförhållanden på större djup måste utvecklas.
- Metoder för hantering av avfallet såväl före deponeringen som vid appliceringen i hålet måste utredas.
- Metoder för borrhålspluggning och backfilling bör analyseras.
- Haveririsker av typ tappad avfallsbehållare, berggras i hålet och fastnad avfallskapsel i hålet måste analyseras.
- Effekter av höga bergtemperaturer (100-200°C) bör utredas.
- Kriticitetsrisken måste bedömas vid olika håldimensioner och tekniskt utförande.

Prioritet

En bedömning av potentialen för ekonomiska fördelar bör kunna avgöra behovet av speciella insatser. Utveckling av ny teknik för djuphålsborrning bedöms så dyrbar och långsiktig att SKB enbart bör följa redan pågående teknikutveckling som genomförs för andra ändamål.

A4 - WP-Cave

1 Principer

WP-cave är ett förslag till utformning av en slutförvarsanläggning där en större bränslemängd (1500 ton uran) sammanförts i ett förvarsutrymme som i ett initialskede kyls genom luftcirkulation via värmewäxlare /3/. Bränslet är inkapslat i järnkapslar (3,5 ton/kapsel) och placeras i borrhåls i flera våningar ut från ett centralschakt. De borrhåls hålen är inklädda med järnplåt och plåten fixeras mot berget med betong.

Efter ca 100 år kan kylanläggningen avlägsnas och förvaret tillåtas bli vattenfyllt. Fram till denna tidpunkt är det använda bränslet återtagbart.

På ca 20 meters avstånd omges förvarsutrymme av ett 5 m tjockt helt omslutande bentonitskikt för att förhindra vattenströmning genom förvaret. Ytterligare ca 20 m ut omges anläggningen av en hydraulisk bur bestående av regelbundet utplacerade borrhål från ett sammanhängande tunnelsystem. Detta system syftar till att utjämna de hydrauliska gradienterna över förvaret.

2 Fördelar och nackdelar

Genom en längre aktiv kylperiod kan en större bränslemängd placeras per ytenhet i berget utan att antagna temperaturbegränsningar i berget utanför bentonitskiktet överskrids.

Korrosions- och temperaturförhållande under uppfyllningsskedet med vatten är dock svårkvantifierbara. Större mängder använt kärnbränsle som i löst eller kolloidal form kan cirkulera i systemet utgör en svårberäknad kriticitetsrisk.

Ett 5 m tjockt bentonitlager torde ge långa transporttider för ev utläckande radioaktivitet till det strömmande grundvattnet. Detta förstärks av att den hydrauliska burens kan reducera de hydrauliska gradienterna och öka effekten av det s k filmmotståndet. Vätgasbildande korrosion av järn i närzonen kan ge upphov till pumpeffekter i förvaret, vilket kan förorsaka uttransport av aktivitet.

3 Värderingar och bedömningar

Eftersom CLAB redan är i drift och en förvaring där lätt kan förlängas, bedöms behovet av en ytterligare förlängning av återtagbarheten mindre intressant.

Om olika förvarsutformningar visar sig genomförbara till en acceptabel säkerhetsnivå utgör kostnadsbildningen ett huvudargument för prioriteringarna. Realistiska kostnadsanalyser bör således genomföras här liksom för andra alternativ.

Vad gäller det tekniska underlaget för att värdera WP-cave har vissa bedömningar gjorts inom en projektstudie beställd och bekostad av SKN.

4 Insatser

- En övergripande kostnadsstudie för att fastställa förslagens ekonomiska potential.
- En övergripande funktionsstudie av WP-cave under olika tidsskeden.
- Vätgasbildande korrosion av järn (jfr C1:2).
- Kemiska effekter av betong på förvarets närmiljö och på geosfären (jfr C2:4).
- Utformning och långtidseffekter av hydrauliska burar (jfr C2:1).
- Korrosions- och löslighetsförhållande i tvåfasset.
- Konsekvenser av gastyckuppbyggnad under en bentonitkupol.
- Kriticitetsberäkningar

Prioritet

De övergripande studierna rörande funktion och kostnader pågår för närvarande inom SKB och kommer att ge underlag för prioriteringen av detaljinsatserna. Många av de element eller komponenter som ingår i WP-systemet eller problem som behöver studeras för att bedöma dess genomförbarhet utgör även delar eller problem inom andra slutförvarsutformningar.

Enligt nuvarande planering skall SKBs arbete koncentreras på att klarlägga de grundläggande villkoren för hur system med olika material samverkar under den långsiktiga passiva lagringsperioden. Detta utgör sedan underlaget till en jämförelse mellan alternativa utformningar. Övan uppräknade frågeställningar är centrala för utnyttjande av järn och betong vid många olika förvarsutformningar. Först därefter bedöms studier av dimensionering och optimering vara meningsfulla.

3.2 Grupp B - Platsanknutna alternativ

Förteckning över alternativ

- B1 Gabbroförläggning
- B2 Förläggning under saltvatten-brackvatten
- B3 Deponering i gamla oljefickor
- B4 Deponering i gamla urangruvor
- B5 Förläggning under CLAB
- B6 Förläggning på 1500 meters nivå

B1 - Gabbroförläggning

1 Principer

Förvaret placeras i bergarten gabbro. Dess förläggningsdjup och principiella utformning kan vara densamma som i granitkonceptet. Skillnader i detaljutformning av barriärerna kan förledas av olikheter i grundvattenkemi och grundvattenomsättning.

2 fördelar och nackdelar

Gabbro har i regel lägre värmeledningsförmåga än granit och gnejs, vilket medför att ett förvar för en given mängd använt kärnbränsle måste göras större. Detta kan, men behöver inte, påverka anläggningskostnaderna.

Data från Sverige och Kanada visar, att gabbro i avseende på vattengenomsläppligheten kan vara åtminstone likvärdig med gnejs och granit på större djup. Det är möjligt att lämpliga gabbro-förekomster kan vara tätare än hittills undersökta områden.

Geokemiskt kan gabbro förväntas erbjuda vissa fördelar, nämligen större reduktionskapacitet, högre reduktionshastighet och högre sorption. Radionuklidernas diffusion in i bergartsmatrisen kan däremot vara mindre än i granit och gnejs. Gabbro kan eventuellt erbjuda en bättre arbetsmiljö i förvaret med lägre silikoserisk, lägre rasrisker samt lägre strålningsnivå och mindre radon i "gruv"-luften.

Även andra basiska bergarter, exempelvis ultramafiter, kan uppvisa liknande egenskaper.

3 Värderingar och bedömningar

Gabbro och liknande bergarter utgör en liten del av Sveriges berggrund. Antalet gabbrokroppar med tillräcklig storlek är begränsat och flera av dem finns i områden långt ifrån befintliga kärnkraftverk och goda transportleder. Detta gör det svårare att finna lämpliga typområden än ifråga om granit och gnejs. En förutsättning för låg vattenföring är att gabbrokroppen inte är genomslagen av andra bergarter. Homogena gabbrokroppar synes vara sparsamt förekommande.

Ett argument som talar mot en gabbroförläggning är att malmfynd ibland gjorts i dessa och i kontaktzonen till omgivande bergarter. En utgångspunkt för platsvalet är att undvika bergarter som i framtiden kan bli brytvärda. Det är lätt att undvika kända förekomster, men man bör dessutom beakta möjligheten att det kan finnas okända ännu inte upptäckta malmer. Denna risk reduceras dock vid platsundersökningarna, där flera av de känsligaste malmletningsmetoderna kommer till användning.

Förekomsten av ultramafiter i Sverige är begränsad till fjälltrakterna och kropparna är ännu mindre än gabbrokropparna. Även vid ultramafiter hittas ofta brytvärda malmer.

4 Erforderliga insatser

Förutom de geologiska undersökningarna föranleder en eventuell gabbroförläggning speciella studier av hur ett förvar skall utformas med hänsyn till temperaturförhållande. Hur den speciella grundvattenkemin påverkar utformningen av barriärsystem måste analyseras.

Prioritet

I samband med den utvärdering av tidigare resultat och vunna erfarenheter som legat till grund för FoU-program 86 har även frågan om gabbro-undersökningar prövats. Genomförda undersökningar och allmänna erfarenheter av gabbro visar att det är förhållandevis svårt att finna tillräckligt stora homogena formationer bland de i jämförelse med gnejs eller granit sparsamt förekommande gabbromassiven. Nyttan av ytterligare kunskap om gabbro bedöms som marginell och ytterligare undersökningar av denna bergart är inte en nödvändig förutsättning för genomförandet av slutförvaringen.

Omfattande gabbroundersökningar bedöms således ha en låg prioritet.

B2 - Förläggning under brackvatten/saltvatten

1 Principer

Förvaret förläggs på sådant sätt att eventuellt utläckande radionuklider inte skulle kunna nå biosfären på annat sätt än genom utströmning till en brack- eller saltvattenrecipient. Därigenom undviks att radionuklider når människor direkt via dricksvatten. I vissa förläggningar kan också tjocka, leriga sedimentbergarter ge en separering mellan ytvattnet och det djupare grundvattnet.

2 fördelar och nackdelar

Alternativets fördel är att den normalt viktiga exponeringsvägen för radionuklider via dricksvatten direkt till människan eller via dricksvatten-djur-människa kan försummas. Likaså kan en annan exponeringsväg, bevattning-grönsaker-människa, få en mindre betydelse. Normalt erhålls därutöver en väsentligt förbättrad utspädning i primärrecipienten.

På grund av landhöjningen är varaktigheten av Östersjön som brackvattenhav svårbedömd.

3 Värderingar och bedömningar

Att i en säkerhetsanalys kunna bortse ifrån dricksvattenintag och bevattning av djur och grönsaker, kan – tillsammans med den högre utspädningen i havsrecipienter – ge en ca 10-faldig reduktion av de beräknade maximala indoserna.

Tekniskt innebär dock alternativet en svårare platsundersökning med större möjlighet till feltolkning jämfört med förläggningalternativ, där bergytan är tillgänglig för direkt studium.

Täta sedimentlager kan väsentligt förlänga de grundvattenvägar längs vilka eventuella läckage kan nå biosfären. Samtidigt kan de också leda regionala gradienter från stranden långt ut under havsbotten.

4 Erforderliga insatser

- En kostnadsjämförelse bör göras mellan tillfarter via tunnel och hisschakt.
- En bedömning av kvarstående landhöjning bör göras.
- Kriterierna för acceptabelt säkra slutförvar bör klarläggas, speciellt med hänsyn till de tidrymder under vilka sk normalscenarios skall tillämpas.

Prioritet - medelhög. Bör kunna omvärderas om studierna av kustnära bergområden (exempelvis vid SFR eller CLAB) ger tillräckligt intressanta resultat.

B3 - Deponering i olje/gas-fickor i sedimentärt berg

1 Principer

Förvaret arrangeras i en tömd olje- eller gasficka, vars existens kan tas till bevis för att berget ovanför har en mycket låg permeabilitet.

2 Fördelar och nackdelar

Fördelarna framgår av principen. Nackdelar: Det täta berget som håller kvar oljan eller gasen är penetrerad genom undersöknings- eller produktionshål. Stabiliteten av strukturen kan ha påverkats av att tryckförhållandena ändrats vid utpumpningen. Stort innehåll av organiskt material i berggrunden.

3 Värderingar och bedömningar

Kunskapen om hur en tömning av en olje- eller gasficka påverkar fickans geologiska stabilitet synes vara alltför bristfällig för att tillåta en säkerhetsanalys.

4 Erforderliga insatser

En inventering av oljegasindustrins erfarenheter av stabiliteter i tömda gasfickor kan göras. Därutöver förefaller inga andra insatser motiverade än en generell uppföljning av de utländska program, där sedimentära bergarter studeras som möjliga förvarsmidler.

Prioritet - Låg.

B4 - Deponering i gamla urangruvor

1 Principer

Förvaret arrangeras i en bergart som är så rik på naturligt uran att tillförseln av använt bränsle inte väsentligt ändrar den geokemiska situationen i stort. Samtidigt erhålles en rejäl utspädning av de uranlika radionukliderna i bränslet genom utbytesreaktioner.

2 Fördelar och nackdelar

Fördelarna framgår av principen. Därutöver kan löslighetsbegränsningar på grund av uranmättade grundvatten uppkomma.

Nackdelar:

- Platsen kan utgöra en ekonomiskt intressant naturresurs.
- Svenska uranfyndigheter är oftast knutna till sprickmineraliseringar.
- Hittills studerade potentiella urangruvor ligger ytligt.

3 Värderingar och bedömningar

Med hänsyn till den av riksdagen beslutade kärnkraftsavvecklingen förefaller det inte meningsfullt att i Sverige koppla slutförvaringen till eventuella framtida urangruvor.

De vetenskapliga studierna av de kemiska effekter, som kan nyttiggöras (ex långsammare uranmatrisupplösning, medfällningsprocesser för aktiniderna) kan även motiveras av alternativet C3:1, som innebär att tomma utrymmen i förvaret återfylls med utarmat uran eller uranmalm.

4 Erforderliga insatser

Allmän kunskapsinsamling utan någon prioritet.

B5 - Förläggning under CLAB

1 Principer

Inkapslingsstation och slutlager för långlivat avfall placeras vid eller i närheten av CLAB (inom ca 10 km) så att externtransporter kan undvikas.

2 Fördelar och nackdelar

Fördelar:

- Kostnadsbesparingar av storleksordningen 3 à 4 miljarder kronor erhålls, prisnivå 1985.
- Inga transporter sker utanför anläggningen (CLAB, inkapslingsstation och slutlager), vilket minskar riskerna för transportolyckor.
- Förläggningen sker till plats, där kärnteknisk verksamhet är etablerad.
- Samordningsvinster kan göras för driften vid samtliga anläggningar.

Nackdelar:

- Då endast ett begränsat område är aktuellt kan mindre goda geologiska och hydrologiska förutsättningar behöva kompenseras med mer omfattande tekniska barriärer
- Byggnadsarbeten måste bedrivas i nära anslutning till CLAB-anläggningen under driftförhållanden.

3 Värderingar och bedömningar

Vissa preliminära studier av tekniska möjligheter till sådan samlokalisering visar på goda möjligheter till samordning. Bedömningen av genomförbarheten är dock helt beroende på om tillgängligt berg i närheten av CLAB är acceptabelt ur säkerhetssynpunkt.

Skulle det vertikala schaktet till förvarsnivå bytas ut mot en lutande tillfartstunnel så kan deponeringsområdet ligga var som helst inom 5 à 10 km avstånd från CLAB.

Med hänsyn till de potentiellt stora besparingsmöjligheterna vid en CLAB-förläggning kan ett eventuellt mindre gott berg kompenseras med att förvaret läggs djupare (ca 700 à 800 m) eller att avfallet fördelas glesare över förvarsytan jämfört med tidigare diskuterade alternativ. Om en lång tillfartstunneldrivs ut under Östersjön, ger förläggningen möjligheter till extremt låga grundvattengradienter och goda utspädningsförhållanden i en brackvattenrecipient.

4 Erforderliga insatser

För att kunna utvärdera realismen i att placera ett slutförvar i anslutning till CLAB måste följande underlag tas fram:

- En detaljerad analys av möjliga besparingar i behandlingsstation och transportsystem.
- En översiktlig berggrundsundersökning omfattande området inom 10 km från CLAB för att fastställa områdets allmänna karaktär med hänsyn till en SFL-anläggning.

Prioritering - Hög

B6 - Förläggning på 1500 meters djup

1 Principer

Professor Markus Båth har framfört en teori om att den svenska berggrundens egenskaper, vad gäller bl a sprickfrekvens och grundvattenomsättning, genomgår en relativt snabb förändring då man passerar ett djup någonstans mellan 1200 och 1500 meter /4/. Åsikterna grundas bland annat på resultat från mätningar i ett antal refraktionsseismiska profiler.

2 Fördelar och nackdelar

Eftersom grundvattenrörelserna i kapselns omgivning är av stor betydelse både för kapsellivslängd och upplösningshastighet kan det finnas skäl, att i valet av nivå för ett slutförvar ta hänsyn till sådana diskontinuiteter. Sker en snabb förbättring av bergets egenskaper, så är sådan information av vikt både vid modellering av grundvattenströmning och vid val av optimalt djup för ett slutförvar. Nackdelarna är främst knutna till en ca 15°C högre bergtemperatur på denna nivå och ökade kostnader knutna till bygandet av förvaret.

3 Värderingar och bedömningar

Det finns uppenbarligen olika åsikter i frågan bland fackfolket. Skulle diskontinuiteter förekomma och bergets hydrauliska konduktivitet sjunka markant snabbare än det tidigare antagna exponentiella avtagandet med djupet, så måste fördelarna av en minskad vattenomsättning vägas mot de mer begränsande temperaturförhållandena på det aktuella djupet. Då genomförbarhetsstudierna i KBS-3 visat, att tillräckligt låg vattenomsättning redan kan hittas på flera ställen i landet på ca 500 m djup förefaller vinsten tveksam.

Ett annat problemområde är att det kan finnas större lokala skillnader i grundvattenkemin i områden med mera stagnant vatten. Detta förhållande kan försvåra möjligheten att prognosera löslighets- och kor-

rosionsförhållanden om det stagnanta tillståndet störs genom konstruktionen av förvaret.

Frågan har tagits upp för diskussion och kan ha en principiell betydelse för vår förståelse av grundvattenströmning i berg, varför en insats bör göras för att undersöka diskontinuitetens existens.

4 Erforderliga insatser

En insats bör göras för att granska underlaget för Båths teori inklusive vissa försök för att verifiera eller falsifiera tolkningarna. Skulle resultatet bekräfta existensen av Båths diskontinuitet bör ett borrhål till under diskontinuiteten borraras för att möjliggöra en undersökning av sprickförekomst och hydraulisk konduktivitet.

Prioritet

Den första insatsen bör ha en hög prioritet och samplaneras exempelvis med utbyggnaden av ett eventuellt underjordiskt berglaboratorium. Viss information om berg på större djup erhålls genom informationsutbyte med NAGRA.

3.3 Grupp C - Spridningshinderarrangemang

Förteckning över alternativ

- C1 – Kapselmateriäl
 1. Passiva materiäl
 2. Korroderande materiäl
 3. Keramer
- C2 – Strömningshinder
 1. Hydrauliska burar
 2. Tätinjektering av berg
 3. Buffertstabilitet
 4. Betong
 5. NAGRAS gas-embolism
- C3 – Begränsning av nuklidlöslighet

C1 - Kapselmateriäl

Inledning

Det högaktiva avfallet, vare sig det är förglasat högaktivt avfall från upparbetning eller utbränt reaktorbränsle, kräver inneslutning i en yttre behållare (kapsel) av i huvudsak två skäl. Vid hanteringen av avfallet i deponeringsanläggningen måste avfallet vara förpackat i täta behållare, som förhindrar utsläpp av radioaktivitet. Efter deponeringen kan det dessutom vara önskvärt att garantera att ingen radioaktivitet läcker från avfallet under en viss tidsperiod.

Längden på tidsperioden för noll-utsläpp kan för närvarande inte definieras. Bättre kunskaper om avfalllets egenskaper, de hydrologiska/geologiska förhållandena och radionuklidernas spridning i geosfären krävs för att fastställa den optimala perioden för noll-utsläpp. Gängse uppfattningar ger en mycket stor spännvidd, 10^3 - 10^5 år.

Beroende på vilken tidsperiod, som eftersträvas, kan flera olika kapselmateriäl vara aktuella. Av praktiska skäl kan kapselmateriälen indelas i följande klasser.

- Helt eller partiellt termodynamiskt stabila material (t ex guld, koppar)
- Passiva material (t ex rostfritt stål, titan, Hastelloy, aluminium)
- Korroderande (offer-)material (t ex bly, stål)
- Icke-metalliska material (t ex keramer Al_2O_3 , TiO_2)

Under KBS-arbetet har koppar varit huvudalternativ. Dock har även glas-, keram- och titan/blykapslar studerats. Korrosionsegenskapen och tillverkningsteknologin för en kopparkapsel är efter insatserna för KBS-3 rapporten relativt väl kända, även om kompletterande undersökningar fortfarande måste genomföras. För de närmaste tre åren kommer emellertid huvudinsatserna för kapselmaterial att ligga på alternativa material, dvs typerna b, c och d. Viss uppföljning av möjligheterna att använda flerskikt-kapslar eller offeranoder kommer att göras.

Oavsett val av kapsel, dvs till viss del oavsett vilken tidsperiod för absolut inneslutning som eftersträvas, visar såväl svenska som utländska bedömningar och forskningsresultat, att kapselgenombrott med största sannolikhet kommer att orsakas av lokal korrosion eller fördröjt brott.

För SKBs del kommer därför insatserna på alternativa kapselmaterial att fokuseras på lokal korrosion och brott. Den typ av lokal korrosion, som är mest kritisk, varierar från material till material och behandlas därför separat för varje material.

C1:1 Passiva material

1 Principer

Passiva material studeras som tänkbara kapselmaterial i flera länder: rostfritt stål (316L) för tuff-förvaret i USA, titan (och titanlegeringar) för salt-förvar i USA och granit-förvar i Kanada och Hastelloy i Frankrike. Eftersom titan studerats tidigare i det svenska programmet och titan dessutom visat sig ha stora fördelar genom att allmänkorrosionen är mycket låg, har titan valts som representant för kategorin passiva material. Till detta kommer att både USA och Kanada har omfattande program för studier av titankorrosion. Resultaten framför allt från Kanada har direkt tillämpning på svenska förhållanden.

2 Fördelar och nackdelar

Titans allmänkorrosion under förvarförhållanden är extremt låg. En titankapsel skulle därför kunna göras tunnväggig, vilket ger stora fördelar, både vad gäller tillverkning av kapseln och förslutningen.

De största nackdelarna med en titankapsel ligger i att titan, som alla passiverbara material, kan vara känslig för lokal korrosion, i första hand spaltkorrosion och väteförsprödning.

Vid användning av titan, liksom av koppar, måste materialvärdet inkluderas i bedömningarna dels av kostnadsskäl dels av skälet att förvaret kan komma att betraktas som en framtida gruva.

3 Värderingar och bedömningar

Den tekniska genomförbarheten är redan tidigare belyst i KBS-1 /5/.

Allmänkorrosionen är så låg att lång kapsellivslängd kan förväntas, om lokal korrosion kan uteslutas. I det kanadensiska programmet (AECL/WNRE), som förutsätter en geologi lika den svenska, har under flera år särskild uppmärksamhet ägnats åt lokal korrosion, i första hand spaltkorrosion och väteförsprödning. De närmaste åren kommer också inverkan av radiolys på titans korrosion och väteförsprödning att undersökas inom det kanadensiska programmet.

Med tanke på de relativt stora insatserna i USA och framför allt Kanada, bör för de närmaste åren det svenska programmet utformas så att det kompletterar främst det kanadensiska programmet. Detta torde inte stöta på några svårigheter, eftersom liknande koordinering redan förekommer för de respektive programmen för studier av utbränt bränsle. Dessutom förekommer redan ett informationsutbyte mellan svenska och kanadensiska forskare inom ramen för samarbetsavtalet mellan AECL och SKB.

4 Nödvändiga FoU-insatser

Med tanke på inriktningen av undersökningarna i Kanada kan det, åtminstone i en första fas, vara värdefullt att komplettera dessa med undersökningar av de mer fundamentala aspekterna av titankorrosion och försprödning. Kunskaper om dessa är nödvändiga för att kunna göra tillförlitliga prognoser för kapselns livslängd.

För titansstudier bör undersökningar av väteförsprödning prioriteras. De jämförande kanadensiska studier av ren titan och Ti-12 (0,7%Ni, 0,3%Mo) har givit indikationer på inriktningen av programmet.

Viktiga punkter är:

- inverkan av legeringselement på korrosionshastigheten för Ti-Ni-Mo legeringar,
- sammansättningen av passivfilmen på Ti-legeringar,
- betydelsen av fassammansättningen för allmän och lokal korrosion på Ti-legeringar,
- sammansättningen på metallfasen under aktiv upplösning,
- studier av vätes diffusivitet i oxiderna,
- studier av vätereaktionerna på olika ytillstånd,
- betydelsen av legeringssammansättningen för lösligheten av väte i legeringen,
- reaktioner mellan radiolysprodukter (t ex H_2O_2 och H_2) med Ti och Ti-legeringar.

Inom dessa områden finns goda svenska resurser.

Som ett första steg, före en detaljplanering av forskningsprogrammet, bör en noggrann litteraturgenomgång göras. Därefter tas kontakter med i första hand AECL, för att definera de områden, där svenska och utländska insatser kompletterar varandra och där respektive organisations resurser utnyttjas bäst.

Prioritet - Medelhög, anpassas till övriga kapselmaterialinsatser

C1:2 Korroderande material

1 Principer

Korroderande material studeras som tänkbara kapselmaterial i bl a England, Schweiz och USA. Principer-

na är att en tjockväggig kapsel i detta material visserligen korroderar, men relativt långsamt och på förutsägbart sätt i förvaringsmiljön.

Av framför allt ekonomiska och tillverkningstekniska skäl är kolstål det intressantaste materialet inom denna kategori.

Korrosionsegenskaperna hos kolstål är relativt väl kända och korrosionen under förvaringsförhållandena i granitiskt berg har studerats i England och Schweiz (gjutstål).

2 Fördelar och nackdelar

Både avseende materialkostnader och tillverkningskostnader är kolstål ett billigare alternativ än referensmaterialet koppar.

Nackdelar är den betydligt högre korrosionshastigheten. Emellertid kan fördjupade kunskaper om bl a radionuklidens spridning och fördröjning i geosfären, och även bättre kunskaper om det utbrända bränslets lakegenskaper, visa att de extremt långa kapsellivslängder som kan erhållas med koppar inte är nödvändiga ur säkerhetssynpunkt.

Reducerande betingelser garanteras, vilket är positivt med avseende på uttransport av aktinider och teknitium.

3 Värderingar och bedömningar

Tekniskt torde tillverkning och förslutning av en stål-kapsel ge mindre svårigheter än vad som är fallet för kopparkapseln.

Experimentella data, som erhållits utomlands, visar att korrosionshastigheten under förvaringsförhållandena kan vara acceptabel. Vid bestämning av livslängden för en kapsel av ett korroderande material krävs emellertid långa extrapolationer från korttidsexperiment i laboratorier eller in-situ-försök. Sådana är bara berättigade, om de kan stödjas av en sund mekanistisk förståelse, som kan läggas till underlag för matematiska modeller för de inblandade korrosionsprocesserna. Modeller måste kunna testas och valideras mot korttidsexperiment av olika slag.

För material som stål är modeller av detta slag väsentliga inte enbart för allmänkorrosion, utan i hög grad för gropfrätning och spaltkorrosion.

4 Nödvändiga FoU-insatser

Utvecklingen av modeller för korrosion av kolstål har påbörjats vid Harwell i England, huvudsakligen med inriktning på låg- och medelaktivt avfall. Resultaten har varit lovande. Det skulle vara fruktbart att ta tillvara erfarenheterna från Harwell och tillämpa dessa på svenskt slutförvar.

Modelleringen och det experimentella program detta förutsätter bör kompletteras med specifika studier av ståls korrosion under reducerande förhållanden. Kompetens och resurser för att göra detta finns vid svenska universitet och forskningsinstitut. Av särskilt intresse är kinetiken för vätgasutveckling i samband med korrosionen av järn under reducerande förhållanden, speciellt i närvaro av sulfider.

Prioritet

Med tanke på att stål är ett attraktivt material både ur tillverkningsteknisk och ekonomisk synpunkt, bedöms studier av stålkorrosion ha hög prioritet.

C1:3 Keramer

1 Principer

Keramer som kapselmateriale har studerats tidigare i KBS-2 och arbete pågår även i Schweiz och Kanada.

Keramer, som t ex Al_2O_3 och TiO_2 , "korroderar" eller löses upp extremt långsamt i grundvatten och kan potentiellt ge mycket långlivade kapslar. Råvarorna för keramer är dessutom billiga jämfört med de metaller, som kan komma till användning för långlivade kapslar.

Eftersom Al_2O_3 studerats tidigare i det svenska programmet och en baskompetens utvecklats, bör detta material väljas för vidare studier. Som alternativ kan TiO_2 vara lämpligt. Även detta material har på senare år studerats i Sverige som tänkbart kapselmateriale och den utvecklade kompetensen bör tillvaratas.

För låg- och medelaktivt avfall har betong sedan länge använts som inkapslingsmateriale för avfallet. I KBS-3 redovisas också en inkapsling av bränsleboxar o dyl i betong. En vidare undersökning av möjligheter att använda betong som kapselmateriale kräver främst studier av de konsekvenser i närområde och geosfär som de kraftigt basiska förhållandena, som uppkommer vid betongurlakningen, ger upphov till (se C2:4).

Givetvis skall utveckling utomlands följas upp även för andra keramer.

2 Fördelar och nackdelar

Keramer kan vara mycket beständiga i grundvatten och kan användas till kapslar med mycket lång livslängd. Dessutom är råvarorna i regel billiga, om inte tillverkningsteknik m m ställer höga krav på renhet.

Nackdelar är komplicerad tillverkning av kapsel och framför allt förslutning. Keramers sprödhet ställer även högre krav på hanteringen vid deponering m m.

3 Värderingar och bedömningar

Tidigare KBS studier har visat att tillverkning och förslutning är tekniskt genomförbart.

Experimentella undersökningar visar, att den kemiska beständigheten av keramkapslar är extremt god.

Tidigare svenska undersökningar har visat att fördröjt brott sannolikt är det största problemet.

4 Nödvändiga FoU-insatser

I första omgången bör ansträngningar inriktas på att klargöra mekanismer för fördröjt brott i förvaringsmiljön. Det finns god anledning att anta att åtminstone vissa mekanismer är oberoende av materialet.

Prioritet

För att kunna göra acceptabla prognoser för keramkapslars livslängd har studiet av mekanismerna för fördröjt brott den högsta prioriteten. Jämfört med metallkapslar av alternativa materiale bedöms dock keramer ha lägre prioritet.

Studier av effekterna av höga pH diskuteras i avsnitt C2:4.

C2 - Strömningshinder

C2:1 Hydrauliska burar

1 Principer

Vid slutförvaring av radioaktivt avfall i berg utgör grundvatten den enda realistiska transportmediet upp till biosfären. Genom att avsiktligt uppborrade vattenströmningsvägar skapas i berget kring avfallet reduceras den hydrauliska gradienten över avfallets närzon och grundvattenutbytet i området minskar.

2 Fördelar och nackdelar

En lägre grundvattenomsättning i avfallets närzon reducerar mängden korroderande ämnen som kan transporteras till kapslar i förvaret. Samtidigt reduceras också frigörelsetakten ur avfallsmatrisen för ämnen som är bundna i matrisen eller som är löslighetsbegränsade. Svårigheterna är knutna till en osäkerhet om hur effektivt ett begränsat antal borrhål kan koppla spricksystem med olika tryck, hur länge etablerade strömningskanaler hålls öppna, och hur effektivt spricksystem med kanalbildning kan kortslutas.

3 Värderingar och bedömningar

Även om långtidsstabiliteten och funktionen av hydrauliska burar är tveksam bör "korttidseffekten" (dvs effekten under de första 1000 åren) vara så gynnsam att tillämpningen bör studeras för olika geometriska utformningar av slutförvaret. Det är möjligt att inte ens korttidseffekten kan kvantifieras vid säkerhetsanalyserna förrän sprickzonsstudierna skapat en större förståelse för hur sprickor och sprickzoner ser ut och hur lerfyllningar och mineraliseringar påverkar och förändrar vattenflödet.

Utformningen av en hydraulisk bur bör speciellt ta hänsyn till risken att tilltäppning av någon kanal kan medföra en ogynnsammare gradientsituation i avfallets närzon än den som ursprungligen rådde.

4 Erforderliga insatser

– En orienterande studie av utformning av hydrauliska burar och effekter av dem bör påbörjas. En detaljerad studie kan behöva tillämpa resultaten av sprickzonsstudien.

Prioritet - Medelhög.

C2:2 Tätinjektering av berg

1 Principer

Bergsprickor i anslutning till deponeringshål, borrhål, tunnlar och schakt fylls medelst injektering med material som hindrar grundvattenströmning.

2 Fördelar och nackdelar

Grundvattenströmning i avfallets närzon kan medföra migration av ämnen skadliga för kapslar eller av radionuklider. Tätmaterial i bergsprickor förhindrar grundvattenströmning. Tätinjektering av berg omgivande deponeringshål är en metod som med ringa material effektivt hindrar strömning och kan minska kraven på obehandlat berg.

Tätinjektering av berg omgivande tätpluggar i schakt, borrhål och tunnlar kan göra dessa hinder för grundvattenströmning mer effektiva. Möjligheterna att med känd teknik noggrant kontrollera fyllningen av grundvattenkonduktiva sprickor är dock små.

Injektering med högt tryck i bergets spricksystem kan medföra irreversibel öppning av sprickor.

3 Värderingar och bedömningar

Lämplig spricktätningmetod, och kännedom om i vilken grad det är möjligt att läka sprucket berg, kan medföra ändrade bedömningar av vad som betraktas som acceptabelt berg såväl vid val av geologisk formation som vid utförande av en anläggning. Inriktning bör vara på forskning och utveckling av metoder för reparation av störda zoner kring schakt och deponeringshål samt behandling av de partier av sämre berg som penetreras av pluggade undersökningsborrhål.

4 Erforderliga insatser

- Laboratorieundersökningar av spricktätningmaterial omfattande deras reologi och kemisk-mekanisk beständighet. Både syntetiskt beredda material och geologiska material bör ingå.
- Metodutveckling av tätinjektering i laboratorium och i fält.
- Utveckling av metoder för övervakning och kontroll av bergmassa under injektering.
- Studier och experiment av långtidsstabilitet och långsiktig växelverkan med sprickfyllnadsmineral eller material i närzonen.

Prioritet - medelhög till hög och anpassad till eventuellt intresse för internationellt samarbete.

C2:3 Buffertmaterial

1 Bakgrund och principer

Buffertmaterialen högkompakterad bentonit är ett svällande buffertmaterial som kan användas vid slutförvaring av högaktivt avfall eller använt kärnbränsle enligt NAGRA och KBS. Genom att fullständigt omge kapslarna med en svällande lera erhålles en tät barriär mot grundvattenströmning fram till kapselytan. All transport genom barriären måste ske genom diffusionsprocesser.

På grund av bränslets resteffekt kommer bentoniten att utsättas för en temperaturhöjning som beror på avfallsmängd i kapsel, materialens värmeledningsförmåga, geometri för deponeringshål samt slutförvarens utformning och geologiska förhållanden. Smektit, som är huvudbeståndsdelen i bentonit, kan omvandlas till illit med reducerad svällningsförmåga och högre hydraulisk konduktivitet som följd. Kunskapen om kinetiken för smektit/illitomvandling och eventuella termodynamiska stabila faser i olika ordningar av illit/smektit är väsentlig för att kvantitativt beskriva effekter av temperatur. I tillgängliga modeller spelar förhållandet K^+ /andra katjoner roll.

Begränsningar i buffertmaterialens stabilitet föranledda av temperaturen utgör viktiga förutsättningar för förvarsutformningen. Alternativa utformningar,

där det strömningstäta skiktet placeras på visst avstånd från kapseln för att tillåta högre temperaturer på kapselytan, eller material med högre temperaturbeständighet bör utvärderas.

2 Diskussion

Illitiseringsgraden av bentonit varierar beroende på temperaturförloppet så att en kortvarig hög temperatur närmast kapseln kan motsvara effekten av en relativt låg temperatur under lång tid.

Konsekvensen av illitisering är minskad svällningsförmåga och ökad hydraulisk konduktivitet. Konduktivitetssökningen kan uppskattas till ett par storleksordningar vid kompakta förhållanden och för *fullständig* illitisering. Eventuellt kan andra effekter uppstå, t ex mineralomvandling, som ger cementering och lägre pH. Kunskapen om dessa effekter bör ökas för att noggrannare värdering skall kunna göras.

Kaliumtillgången är oftast så liten att en fullständig illitisering tar så lång tid att den i praktiken kan försummas.

3 Erforderliga insatser

- En systematisk genomgång av olika möjliga buffertmaterial pågår redan.
- Ytterligare studier behöver genomföras vad gäller de temperaturbegränsningar som behöver tillämpas vid olika utföranden och bufferttjocklekar.
- För att tillåta en detaljerad dimensionering av buffertskikt som till del kan tillåtas degradera, så krävs att temperaturmodelleringen förbättras.
- Effekten av olika tillsatser i syfte att styra kemiska förhållanden i närzonen måste kartläggas (jfr.C3)
Prioritet - Medelhög.

C2:4 Betong för kringgjutning

1 Principer

I de flesta hittills genomförda studierna av hur ett slutförvar skall anordnas söker man använda naturliga material med hög, geologiskt uppvisad stabilitet.

I den vardagliga användningen av byggnadsmaterial har emellertid vissa konstgjorda produkter visat sig så lämpliga för olika ändamål att de används så gott som överallt.

Om betong kan visas vara acceptabel i förvaret så skulle en etablerad gjutteknik kunna användas för deponering av avfallskapslarna och för återfyllning av bergutrymmen i förvaret.

2 Fördelar, nackdelar och värderingar

Redan nu används stora mängder cement av framförallt portlandstyp för ingjutning av låg- och medelaktivt avfall.

Den kemiska miljön i vattenmättad betong är sådan att flertalet betydelsefulla radionuklider har lägre löslighet och sorberas lättare än vad som skulle vara fallet i den ostörda grundvattenmiljön. Orsaken är främst det höga pH-värdet som beror på närvaron av kalciumhydroxid och mindre mängder alkalihydroxider.

En övergång av de upplösta radionukliderna från betongens porvatten till bergets grundvatten förväntas inte ge upphov till kolloider eftersom berggrundvattenmiljön generellt har högre löslighet (och lägre sorption) av radionuklider.

På grund av den höga halten kalciumhydroxid utgör betongen under lång tid en effektiv sänka för karbonatjoner från grundvattnet. Detta sänker porositeten, förhindrar karbonatkomplexbildning och ger förutsättningar för medfällning av t ex strontium och radium.

Organiska ytaktiva ämnen tillsätts betongen för att ge önskade tekniska egenskaper. De sorptionsförsök som gjorts visar inte på någon negativ effekt av detta. I det mycket långa tidsperspektivet måste emellertid betydelsen av sådana tillsatser för radionuklidkemin, kapselkorrosionen etc analyseras och värderas.

Bakterier som angriper betong är kända, t ex thio-bacillus concretivorus. Detta kräver förutom svavelväten också riklig tillgång till syre och bör alltså inte vara av någon större betydelse i ett slutförvar. Det kan möjligen vara motiverat att gå igenom den mikrobiella betydelsen av betongens tillsatsämnen.

Strukturen och sammansättningen av de olika kemiska faser som håller samman den stelade betongen är långtifrån välkända trots att betong är ett så vanligt konstruktionsmaterial. Man kan inte utesluta förekomsten av kvardröjande långsamma processer såsom fortsatt hydratisering och kristalltillväxt. Vad det innebär för betongens hållfasthet och formstabilitet i det mycket långa tidsperspektivet är svårt att sätta om. Konstruktionsbetong av någorlunda modern typ har inte funnits mer än ca 50 år.

Flera av betongens komponenter är relativt lösliga och även starkt reaktiva, t ex kalciumhydroxiden. I det långa loppet kan detta få betydelse för betongens mekaniska egenskaper.

Ett högt pH från cementen kan påverka övriga kapslings- och återfyllnadsmaterial och eventuellt även omgivande berg.

3 Erforderliga insatser

Långtidsstabilitet

De undersökningar som gjorts av 70 år "gamal" betong från väggen i en kraftverkstunnel för vatten i Porjus tyder på att förändringarna är mycket små /6/. Man hittar inget speciellt anmärkningsvärt i kristallstrukturen och inte heller förefaller kalciumhydroxid att ha lösts ut eller karbonatiserats i någon större omfattning trots den myckenhet vatten som under årens lopp runnit förbi tunnelväggen.

Det bör inte vara omöjligt att ställa upp modeller för hur betong kan förändras kemiskt eller tom strukturellt, baserat på transportförhållandena i närområdet. Laboratorieundersökningar av "gamal" betong bör i så fall ligga till grund för en sådan modellbehandling för att ge någorlunda realistiska förändringshastigheter.

Hållfasthet och sprickighet kan säkert vara näst intill omöjliga att bedöma i det långa tidsperspektivet. Här blir det säkert fråga om mycket konservativa antaganden. Tidslöppen för kemiska egenskaper i betongen och kemisk påverkan på omgivningen liksom även porositet bör däremot vara förutsägbara.

Möjligheter att utveckla nya betongtyper med lera eller speciella tillsatser bör undersökas.

Närkemieffekten

Betydelsen av betongens höga pH behöver analyseras. Effekten av höga pH på berggrundvatten, återfyllnings- och kapslingsmaterial kan analyseras teoretiskt och experiment är inte i första hand nödvändiga.

Grundvattnets inverkan på betongen, t ex karbonatisering, bör kunna förutses med hjälp av transportberäkningar och vad som är känt om kemisk påverkan på betong och grundvattensammansättning.

Sorptionspåverkan

Vad som framförallt behöver undersökas är betydelsen av betongens kemiska inverkan på sorptionen i det omgivande berget, dvs om de ämnen (kalciumjoner, hydroxidjoner, organiska tillsatssämnen etc) som frigörs från betongen, kan allvarligt störa de normala sorptionsprocesserna ute i berget.

Prioritet

Genomgående hög och samordnad med insatser för SFR och WP-cave. Liknande studier utomlands för främst driftavfall från kraftreaktorer och alfa-aktivt avfall från uppberedningsprocessen bör bevakas (jfr D:3).

C2:5 NAGRAS gasemobilism

1 Principer

I det schweiziska slutförvarskonceptet som presenteras i "Projekt Gewähr" föreslås tjockväggiga järnkapslar för det högaktiva förglasade avfallet från uppberedningen i Frankrike. Järn i syrefri miljö korroderar med vätgasbildning. Bentonit, som i det schweiziska konceptet föreslås som återfyllnadsmaterial, har låg diffusivitet för vätgas. En hög koncentration av väte invid kapselytan verkar hämmande på korrosionen men det är oklart om den stoppas helt. Det kan därför inte uteslutas att vätgasen efter viss tid utskiljs och bildar "bubblor" invid kapselytan.

NAGRA har inför "Projekt Gewähr" diskuterat en lösning, där kapseln i ett skikt närmast ytan omges av sand med en sådan kornstorlek att vätgasen undantränger vattnet kring kapseln /7/. När inte vattnet kapseln så stannar korrosionen av.

2 Erforderliga insatser

Denna lösning är inte fullständigt utvärderad. Idén är emellertid intressant och bör granskas närmare och utvecklas, eventuellt i samarbete med NAGRA, i kombination med olika buffertmaterial (C2:3) och kopplat till studiet av järnkapslar (C1:2).

Prioritet - Medelhög.

C3 - Begränsning av nuklidlöslighet

Buffertmaterialet i ett avfallsförvar fyller flera funktioner:

- (1) mekanisk barriär - upptag av rörelser,
- (2) värmeledande medium,
- (3) hinder mot fritt vattenutbyte - strömningsspärr och diffusionshinder,
- (4) kemisk barriär.

I ett tidigt skede av KBS-projektet valdes bentonit som lämpligt buffertmaterial. Bentonit är lämpligt enligt kriterierna (1) - (3) ovan, men även acceptabelt enligt (4). Dock har inga systematiska studier av tänkbara alternativa material eller försök att optimera bentonitens funktion med tillsatsmedel gjorts inom KBS-projektet. Några synpunkter på tänkbara tillsatsmedel etc för att kemiskt förändra avfallets närmiljö på ett gynnsamt sätt ges nedan.

1 Tillsatsmedel till bentonit

Genom tillsatsmedel kan bentonitens funktion som kemisk barriär förbättras. Givetvis måste bentonitens mekaniska egenskaper liksom förändringar av stabilitet etc till följd av tillsatsmedlen eller höga pH studeras. Aktuella halter är 0.5-1%.

1.1 pH och karbonatkontroll

Retentionen av framför allt aktiniderna förbättras om pH kan hållas vid en hög nivå om samtidigt karbonathalten begränsas. Högkapacitetsmaterial såsom bentonit har en påtaglig pH-buffrande effekt. Porvattnet håller som regel ett pH över 9, vilket är fördelaktigt. Dock förefaller porvattnets karbonat innehåll vara reglerat av löslighetsprodukten kalciumkarbonat, vilket kan leda till höga karbonathalter vid låga kalciumhalter. Ett tillsatsmedel som ger både höga pH och god karbonatkontroll erfordras. Höga kalciumhalter kan möjligen påverka bentonitens mekaniska egenskaper.

En genomgång bör göras av effekterna av tillsats av sulfatfri cement (kalciumsilikat-kalciumhydroxid-kalciumaluminat); cementmiljön buffrar pH till över 12.5 och karbonathalten är som regel $<10^{-6}$ M.

1.2 Eh-kontroll

För de multivalenta aktinider (U, Np, Pu) liksom för Tc är det fördelaktigt om de lägre oxidationstillståndet föreligger. Redoxpotentialen bör nedbringas till $E < 0.25-0.06$ pH (V) i buffertmaterialet.

Effekten av följande tillsatser bör prioriteras. Tillsatser av Fe(II) (<1%) i form av

- $Fe_3(PO_4)_2(s)$ (vivianit)
- Fe(II)-silikat (naturligt Fe(II)silikatmineral)
- $Fe_3O_4(s)$ (möjligen långsam kinetik)
- UO_2 (reducerar övriga aktinider!)

Tillsats av metall

- Pb
- "rostfritt" stål, järn.

Metaller och metallföreningar bör även kunna tjäna som sulfidfällor. Sulfid, som möjligen kan bildas ur sulfat genom mikrobiell aktivitet under reducerande betingelser, begränsas av löslighetsprodukten för motsvarande metallsulfid. Risker för vätgasutvecklande korrosion och dess konsekvenser måste beaktas.

1.3 Kemisorption - komplexbildning

Tillsats av kemisorberande ämnen eller selektiva sorbentmaterial skulle kunna reducera mobiliteten av enskilda grundämnen. Även medfällningsfenomen kan härvid bli av betydelse.

Följande tillsatser, i halter mindre än 1% bör prioriteras:

- Fosfatmineral; sorbent för aktinider.
- Attapulgit; potentiell sorbent för aktinider.
- Tungmetallföreningar som Pb, Cu och As kan utgöra potentiella sorbent för jod (dålig experimentell verifiering) eller sulfid.

2 Alternativa material

De huvudsakliga nackdelarna med bentonit är att:

- materialet ej är termodynamiskt stabilt under alla tänkbara förvarsbetingelser, och att
- en frigörelse av kolloidala partiklar under vissa kemiska betingelser ej kan uteslutas; dessa kan tjäna som radionuklidbärare.

Alternativa material bör inventeras (jfr C2:3).

En lera med hög jonbyteskapacitet och gott upptag av aktinider och cesium och sannolikt med acceptabla mekaniska egenskaper är illit. Illit representerar en stabilare fas än montmorillonit under de kemiska betingelser som förväntas; en omvandling av montmorillonit till illit är för övrigt tänkbar i förvarsmiljön. Blandningen av t ex bentonit/illit (eller 2-skiktbarriärer) bör utvärderas.

Amorfa oxider omvandlas som regler till kristallina faser eller kemiskt till nya föreningar med konsekvenser för buffertens mekaniska egenskaper. Tänkbara oxidmaterial bör inventeras. Ett intressant material är betong, t ex i kombination med en plastisk lerbarriär. Möjligen kan betongens mekaniska egenskaper förbättras och porositeten reduceras genom små tillsatser av skikt-silikater (montmorillonit, illit) till betongen. (Jfr C2:4)

3 Erforderliga insatser

Enligt ovanstående diskussion bör effekterna utvärderas av följande tillsatser till bentonit eller andra buffertmaterial

- Sulfatfri cement för pH-buffring och reduktion av lösta karbonatmängder i grundvattnet.
- Fe(II) i form av $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2(\text{S})$, vivianit, naturliga Fe(II) silikat eller $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s})$.
- UO_2 (jfr. B4) eller metaller (som Pb, Fe) för kontroll av redox-förhållanden.
- Fosfatmineral eller attapulgit som sorbenter för aktinider.
- Tungmetallföreningar som sorbenter för jod.

Alternativ till bentoniter bör även studeras med ovan angivna funktion i åtanke. Exempel:

- Bentonit/illit i blandning eller tvåskiktbarriär.
- Icke kristallina oxider.
- Betong.

Prioritet - Medelhög till hög.

3.4 Grupp D - Teknisk utformning och utförande

Även om vissa parametrar för utformningen av ett förvar kan bli låsta på grund av säkerhetsmässiga överväganden återstår andra som kan väljas eller an-

passas i syfte att kostnadsoptimera förvarsutformningen. Ett exempel på detta i KBS-3-metoden är förvarsområdets geometri och fördelningen av deponeringshål i detta. Skulle deponeringstunnlarna placeras långt ifrån varandra blir deras ömsesidiga värmepåverkan mindre. Detta ger en möjlighet att placera en större mängd avfall i varje deponeringshål utan att temperaturbegränsningarna överskrids och längden utsprängd tunnel per ton avfall minskar. Likaså finns en möjlighet att reducera den utsprängda volymen genom att mellan glest dragna tunnlar borra långa vertikala eller horisontella deponeringshål, där ett flertal avfallskapslar placeras i rad.

De flesta sådana möjligheter till optimering påverkas i hög grad av platsspecifika förhållanden. Det finns emellertid ett intresse av att veta hur stora vinster dylika optimeringar maximalt kan ge. Kostnadsjämförelser av olika utformningar kommer därför att genomföras utan att de direkt betecknas som alternativ.

En annan typ av optimering kan illustreras med följande KBS-3-baserade exempel.

Om ett förvarssystem inte visat sig kunna erbjuda en tillräckligt hög säkerhet så kan säkerhetsbarriärernas funktion förbättras genom:

- att kapselns väggtjocklek ökas så att mera kapselmaterial måste korrodera innan ett genombrott sker,
- att buffertens tjocklek ökas så att kapselns och avfallets växelverkan med grundvattnet reduceras med längre kapsellivslängd och långsammare avfallsupplösning som följd,
- att förvarets djup ökas med följd att grundvattnets väglängd till biosfären blir längre samtidigt som vattenomsättningen i berget kring avfallet minskar på grund av det större djupet, eller genom någon kombination av dessa åtgärder.

För sådana optimeringar måste marginaleffekterna av ändrade barriärdimensioner eller utföranden tas fram för de studerade alternativen.

Förutom bakgrundsinformation av ovanstående allmänna karaktär kan ett antal specifika utformningsalternativ till KBS-3-metoden definieras som exempel på teknisk utformning av deponering, barriärtillverkning och praktisk hantering.

Förteckning över alternativ

D1 - Kapseldeponering i tunneln

D2 - Sandfyllda kapslar

D3 - Inplacering av låg- och medelaktivt avfall i SFL

D1 - Kapseldeponering i tunnel

1 Principer

Kapslar för använt bränsle kan tänkas placerade i tunnlar t ex som i KBS-1 i återfyllnadsmaterial som packas på plats eller, som i NAGRA Projekt Gewähr 1985, i borrade tunnel med högkompakterade block av bentonit anbringade mellan kapsel och berg.

2 Fördelar och nackdelar

Volymen av berglagret kan minimeras med fullortsborrade tunnlar som helt används som "deponeringsutrymme".

Kapselpaket med buffertmaterial, som iordningsställs i förväg samt transporteras och deponeras i tunnel, kan måhända ge en bättre kontrollerad och rationellare hantering.

Jämfört med en deponering i hål borrhåll från tunneln, där kapslarna kommer att ligga på avstånd från den störda zonen kring tunneln kommer kapslarna vid tunneldeponering helt att befinna sig inom en störd bergzon omgivande tunneln. Kapslarna kan därvid i viss grad påverka varandra kemiskt.

Allteftersom alternativstudierna fortskrider från studiet av genomförbarhet och säkerhetsfunktion till optimering och praktisk teknikanpassning, måste den tekniska utformningen och utförandet av alla förvarets komponenter ges en allt högre prioritet.

3 Värderingar och bedömningar

Det är troligt att utvecklingen av fullortsborring kan medföra ekonomiska fördelar för alternativ med kapselplacering i tunnlar emedan materialåtgången kan reduceras. Skillnaderna i miljön mellan de olika deponeringsalternativen är beroende bl a på den störda zonen.

4 Erforderliga insatser

- Tekniken att utföra horisontella hål samt hur dessa påverkar omgivande berg, studeras i realistiska förhållanden
- Utveckling av metoder för anbringande av buffertmaterial, övervakning och kontroll
- Därutöver torde viss utveckling av närzonsmodeller och modellering av grundvattenrörelser i den störda zonen kring tunneln erfordras.

Prioritet - medelhög

D2 - Sandfyllda kapslar

1 Principer

Kapselkonstruktioner utsätts för mycket höga tryck i förvaret efter tillslutning. Ett alternativ till tidigare studerade utformningar är att låta bergtryck-vatten-tryck-bufferttryck tas upp av en sandfyllning istället för en självbärande kapselkonstruktion eller en homogen metallfyllning (som i KBS-3).

2 Fördelar och nackdelar

Genom sandfyllning (eller fyllning med glaspärlor) kan den uppvärmning av bränslekapsel, som krävs vid exempelvis blyfyllning och HIP-prensning enligt KBS-3, undvikas. Ugnar och avsvalningspositioner kan därvid insparas. Vidare erhålls en ökad inre volym för fissionsgaser och helium.

Nackdelar som nämnts är knutna till de inhomogena spänningar som introduceras i kontaktpunkten mellan kapselvägg och sandkorn, risken för att kornen krossas och risken för att få in föroreningar i systemet.

Eventuellt kan jonbytande material som smektit eller zeolit användas för kapselfyllning.

3 Värderingar och bedömningar

De ekonomiska fördelarna av att slippa en uppvärmning av den bränslefyllda kapseln bedöms så stora att även höga kostnader för fyllningsmaterial bör kunna accepteras.

Säkerhetsmässigt är det en fördel att inte behöva utsätta bränslestavarna för uppvärmning. Möjligen behöver en buffertzon för temperaturen införas för att tillåta tätsvetsning av metallkapslarna.

Gasttryckuppbyggnaden i använt bränsle är så långsam att det hydrauliska trycket på 500 meters nivå inte uppnås förrän efter ca en miljon år. Skulle emellertid kraven på slutförvarets funktion tillåta en yttligare förläggning, kan det inre gasttrycket utgöra en livstidsbegränsning för kapseln.

4 Erforderliga insatser

Samtliga hittills studerade system har förutsatt att hela bränsle-kapsel-paketet skall uppvärmas i något skede av inkapslingen. En uppskattning bör göras av de kostnader som direkt hänför sig till detta.

En analys bör göras av vilka konsekvenser som den ojämna tryckfördelningen mellan kapsel och fyllmaterial har för olika kapselmaterial.

En genomgång av möjliga material för fyllningen bör göras inklusive lämplig gradering av kornstorleksfördelningen och temperaturkonsekvenser.

Prioritet - Hög

D3 - Inplacering av låg- och medelaktivt avfall i SFL

1 Principer

En uppenbar möjlighet att förbilliga slutförvaringen av de olika avfallstyperna i Sverige är att samordna slutförvaringen av dem. Några systematiska analyser av sådana möjligheter har inte gjorts.

Då de studier som hittills gjorts syftat till att visa genomförbarheten av en säker slutförvaring, har bevisningen renodlats till så enkla och okomplicerade förfaranden som möjligt.

2 Fördelar och nackdelar

Fördelarna ligger i att kunna utnyttja utrymmen som av transport- och utbyggnadsskäl sprängts ut i SFL till deponering av exempelvis låg- och medelaktivt avfall från CLAB eller från rivningen av kärntekniska anläggningar.

Förfarandet innebär dock ett omfattande behov av analyser av den växelverkan som de olika avfallsformerna kan ha på varandra och den eventuella påverkan på förslutningen av förvaret.

3 Diskussion

De effekter som i första hand kan förväntas är knutna till organiska ämnen, som kan förekomma i det lågaktiva avfallet och metaller, främst stål, i rivningsavfall.

Ingjutningen av vissa avfallstyper i betong eller bitumen kommer också att kunna påverka miljön i ett förvar.

Många av dessa frågor behandlas bl a vid säkerhetsgranskningen av SFR. Därutöver kommer vissa "alternativstudier" att ge direkt information i frågan, exempelvis korrosion av stålkapslar och effekten av betong i slutförvaret.

4 Erforderliga insatser

En genomgång av karaktärer och mängder av de avfallsformer som lämpligen kan samdeponeras i SFL bör göras. Med hänsyn till resultatet av denna genomgång kan studier av samverkans effekter för nuklider genomföras för de olika alternativa slutlagringsutformningarna.

Prioritet - medelhög

4 FORSKNINGSSINSATSER

Den forskning och utveckling som t o m 1983 prioriterats inom SKB, har syftat till en bevisning av genomförbarheten av en säker slutförvaring.

Den fortsatta forskningen inriktas i första hand på att ge underlag för:

- platsval,
- utveckling av system, teknikutveckling inom icke etablerade områden och optimering av förvarsutformning,
- utformning av layout och konstruktioner,
- byggande och drift.

Kärntekniklagen och dess förarbeten framhåller att insatserna i detta skede skall ge en allsidig belysning av de olika möjligheter, som finns för slutförvaring, samt framhåller värdet av en bibehållen handlingsfrihet under de närmaste åren.

För att möjliggöra en allsidig utvärdering av olika tänkbara slutförvaringsmetoder krävs vissa forskningsinsatser. Dessa inriktas dels på att belysa de naturliga förutsättningarna för slutförvaring i Sverige, dels på en bred genomgång av olika möjligheter till att införa eller utforma tekniska barriärer i systemet eller för att ge möjligheter till att optimera säkerhetssystemen. Härutöver krävs andra forskningsinsatser, som syftar till att fördjupa kunskapen inom vissa kritiska forskningsområden. Dessa senare insatser diskuteras i annat sammanhang.

Följande lista upptar sådana forskningsinsatser som krävs för en belysning av olika alternativ som kan bli aktuella med de förutsättningar som fn gäller i Sverige.

Undersökning av naturliga förhållanden

- Platsundersökningarna genomförs enligt nuvarande program med bl a undersökning av kustnära områden.
- En genomgång av bedömningar av kvarvarande landhöjning för att utröna möjligheter till en förvarsplacering som under viss tid garanterar att eventuellt utsläpp hamnar i salt eller bräckt vatten.
- En undersökning av eventuella diskontinuiteter i bergets sprickighet ner till ca 1500 bör genomföras.

Undersökningar av närmiljön vid avfallet

- Effekten av temperaturer över 100°C på buffertmaterial och berg i närzonen bör studeras för att fastslå gränserna för tillåten temperaturbelastning i förvaret.
- En systematisk genomgång av effekten av att använda betong i förvaret på viktiga närzons- eller geosfärsprocesser.
- Radiolysfrågorna utgör underlag för val av kapseltjocklek.

Spridningshindrande åtgärder

- En systematisk genomgång av olika former av ”getters” eller kemiska buffrar bör påbörjas, inklusive deras effekt på systemet i övrigt och geosfären.
- Uppbyggnaden och effekten av hydrauliska burar måste studeras. Studierna bör kopplas till sprickzonsprojektet och specialgranska långtidseffekter.
- Borrhålspluggning och injektering. Studierna inriktas på långtidfunktion och möjlig växelverkan mellan olika material och övriga komponenter i förvarssystemet.
- Studiet av kapselmaterial bör förutom Cu, Ti och keramer även omfatta järn.
- Insatser för att om möjligt kvantifiera sannolikheten för fördröjda brott bör igångsättas.

Utformning och utförande

- Sandfyllda kapslar eller liknande kapselkonstruktioner som inte kräver uppvärmning och långsam, kontrollerad avsvälning bör studeras.

Den ovan gjorda genomgången av FoU-insatser för SKBs framtida verksamhet är baserat på en idé-inventering och syftar till att skapa ett brett kunskapsunderlag inför slutförvaring av använt kärnbränsle i Sverige. Det finns även andra skäl till varför vissa FoU-insatser bör prioriteras. Exempel på sådana skäl är att dataunderlag eller modeller inte är tillräckligt förfinade för att tillåta realistiska jämförelser mellan alternativ, att tillgängliga instrument inte ger nödvändigt detaljerade data för utvärderingar av vissa utformningar, eller att metoder för analys av säkerheten är kostsamma och grova. Ett framtida forskningsprogram måste väga in samtliga sådana synpunkter och även, så långt det är möjligt, ta hänsyn också till den utvecklingspotential olika forskningsområden har.

Ytterligare grund för prioriteringar av FoU-insatserna har erhållits dels från de många forskare som av Industridepartementet och andra ombetts granska redovisningarna i KBS 1-3, dels av de, i många fall okvantifierade, säkerhetsmarginaler eller förenklade antaganden som gjordes i KBS-rapporterna.

En på samtliga dessa grunder gjord sammanvägning av de insatser som behöver igångsättas under perioden 1987-1992 redovisas i 1986 års FoU-program /1/.

REFERENSLISTA

- 1 Kärnkraftavfallets behandling och slutförvaring;
Program för forskning, utveckling och övriga åtgärder.
SKB september 1986
- 2 Alternativa tidplaner för hantering av använt kärnbränsle; Konsekvenser för planering, säkerhet och kostnader.
SKB december 1985
- 3 NAK WP-Cave project; Report on the Research and Development Stage, May 1984 to October 1985.
SKN Report 16 (1985)
- 4 BÅTH M, 1979
Fracture Risk Estimation for Swedish Earthquakes.
SKBF Technical Report 79-27
- 5 Kärnbränslecykelns slutsteg
Förglasat avfall från upparbetning
Del III Kapitel 5
Kärnbränslesäkerhet november 1977.
- 6 ALLARD B, ELIASSON L, HÖGLUND S,
ANDERSSON K, 1984
Sorption of Cs, I and Actinides in Concrete Systems.
SKB Technical Report 84-15.
- 7 NERETNIEKS I, 1985
Some Aspects of the Use of Iron Canisters in Deep Repositories for Nuclear Waste.
NAGRA Technical Report 85-35