

Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 1987

Samrådsnämnden för kärnavfallsfrågor

- Samrådsnämnden sorterar direkt under regeringen (Miljö- och energidepartementet). Instruktion i SFS 1985:686, senast ändrad 1986:829.
- Samrådsnämnden för kärnavfallsfrågor är ett expertorgan för rådgivning och samråd inom kärnavfallsområdet och i fråga om avveckling av kärntekniska anläggningar.
- Det åligger samrådsnämnden särskilt att
 1. sörja för informationsutbyte mellan statens strålskyddsinstitut, statens kärnkraftinspektion och statens kärnbränslenämnd i fråga om dessa myndigheters forskningsverksamhet avseende kärnavfallshantering och avveckling av kärntekniska anläggningar samt
 2. lämna råd vid beredning av ärenden med anknytning till kärnavfallshantering och avveckling av kärntekniska anläggningar, när detta begärs av statens strålskyddsinstitut, statens kärnkraftinspektion eller statens kärnbränslenämnd.
- Samrådsnämnden skall årligen före den 15 oktober till regeringen redovisa sin bedömning av kunskapsläget på kärnavfallsområdet samt lämna en berättelse om sin verksamhet under det senaste budgetåret.
- Samrådsnämnden är administrativt knuten till statens strålskyddsinstitut.

Kunskapsläget på kärnavfallsområdet

1987

Enligt den svenska kärnkraftslagen ska kärnkraftsmyndigheterna
genomföra en omfattande kunskapsutvärdering av kärnkraftens
säkerhet och miljöpåverkan. Denna kunskapsutvärdering ska
genomföras i samråd med berörda myndigheter och berörda
parter. Kunskapsutvärderingen ska vara en grund för
utvärderingen av kärnkraftens säkerhet och miljöpåverkan.
Kunskapsutvärderingen ska genomföras i samråd med
berörda myndigheter och berörda parter. Kunskapsutvärderingen
ska vara en grund för utvärderingen av kärnkraftens säkerhet
och miljöpåverkan.

Utgiven av:
Samrådsnämnden för kärnavfallsfrågor
Box 60204
104 01 Stockholm

ISBN 91-38-09938-1

Beställningsadress:
Allmänna Förlaget
Kundtjänst
106 47 Stockholm
Telefon: 08-739 96 30

Produktion:
Allmänna Förlaget 684 7 002
Gotab, Stockholm 1987

1987-11-25

**Regeringen
Miljö- och energidepartementet**

Enligt instruktionen skall samrådsnämnden för kärnavfallsfrågor (KASAM) årligen till regeringen redovisa sin bedömning av kunskapsläget på kärnavfallsområdet.

KASAMs första rapport avgiven 1986-12-02 syftade till att ge en översiktlig bild av kunskapsläget i Sverige och utomlands. Denna översikt är i stort sett fortfarande aktuell.

Den nu föreliggande rapporten består av två delar. Avsnitten 1-2 innehåller korta redogörelser för aktualiteter på kärnavfallsområdet, i Sverige och internationellt. I avsnitt 3-6 tas ett antal väsentliga frågeställningar upp till mer ingående behandling.

I avsnitt 3 ges sålunda en översikt beträffande nedläggning av kärntekniska anläggningar. Metoder för säkerhetsanalys beskrivs i avsnitt 4 och naturliga analoger som modell för spridning av radioaktiva ämnen från ett slutförvar beskrivs i avsnitt 5.

I avsnitt 6 redovisas några huvudlinjer från diskussionen vid ett seminarium om etiska frågor som hölls i samarbete med statens kärnbränslenämnd i september 1987.

Underlag till rapporten har skrivits av flera ledamöter av samrådsnämnden och av personal vid SKI, SKN och SSI. Detta underlag har erhållits genom skrifter, deltagande i konferenser och symposier samt studiebesök i Sverige och utomlands.

Rapporten har getts en sådan form att de olika avsnitten skall kunna studeras oberoende av varandra. Det har därför inte varit möjligt att undvika att vissa sakuppgifter upprepas i de olika avsnitten.

Beslut att avge rapporten har fattats vid sammanträde den 25 november 1987 på geologiska institutionen vid Stockholms universitet av ledamöterna C Odhnoff, E Eriksson, D Gee, I Grenthe, L Högberg, J Miettinen, N Rydell, J O Snihs, A-M Thunberg och C-O Wene. Närvarande vid mötet var även cheferna för SKI och SKN: O Hörmander och O Söderberg samt avdelningsdirektör K Andersson ,SKI.

Camilla Odhnoff
Ordförande

Lars Persson
Sekreterare

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	<u>Sid</u>
1. AKTUELL FORSKNING OCH UTVECKLING I SVERIGE.	6
1.1. Granskning av SKBs FoU-program 86.	6
1.1.1. Bakgrund.	6
1.1.2. Kärnbränslenämndens yttrande.	6
1.1.3. SKBs kommentarer.	9
1.1.4. Regeringens beslut.	9
1.2. Om beslutsordning och informationsfrågor under platsvalsprocessen för högaktivt avfall.	9
1.2.1. Bakgrund.	9
1.2.2. Beslutsordning.	11
1.2.3. Informationsfrågor.	12
1.3. Kärnavfallsforskning vid SKB - några nya projekt.	13
1.3.1. Stripaprojektet - fas 3.	13
1.3.2. Underjordiskt berglaboratorium.	14
1.3.3. Poços de Caldas-projektet.	16
1.4. Kärnavfallsforskning vid SKI - några nya projekt.	16
1.5. Aktuellt om kärnavfallsforskning vid SKN.	19
1.6. Aktuellt om kärnavfallsforskning vid SSI.	20
2. AKTUELL FORSKNING OCH UTVECKLING INTERNATIONELLT.	23
2.1. Berggrundens stabilitet.	23
2.1.1. Val av stabil miljö.	23
2.1.2. Framtida förändringar i jordskorpan.	26
2.2. Hydrologisk forskning för slutförvar.	27
2.3. Kemisk forskning.	27
2.4. Kriterier.	28
2.5. OECD/NEAs avfallsprogram.	29
2.6. Berggrundsundersökningar i Finland.	32

	<u>Sid</u>
2.7. Ny policy vad avser slutförvaring av lågaktivt kärnavfall i Storbritannien.	34
2.8. USAs platsvalsprogram.	35
2.9. Kanadensiska riktlinjer för slutförvaring.	37
2.10. Övrigt.	37
3. NEDLÄGGNING AV KÄRNTEKNISKA ANLÄGGNINGAR.	40
3.1. Inledning.	40
3.2. Bakgrund.	40
3.3. Teknik och avfall.	42
3.4. Arbete inom IAEA.	44
3.5. Arbete inom EG.	47
3.6. OECD/NEAs program.	47
3.7. Arbete inom USDOE.	48
3.8. Den svenska situationen.	50
3.8.1. Allmänt.	50
3.8.2. Nedläggningskostnader och finansiering.	52
3.9. Sammanfattning.	55
4. METODER FÖR SÄKERHETSANALYS.	58
4.1. Inledning: Modellbegreppet.	58
4.2. Kunskapsläge.	62
4.2.1. Begreppsmässiga och matematiska modeller.	64
4.2.2. Verifiering och validering.	65
4.2.3. Scenarier.	66
4.2.4. Osäkerheter i ingångsdata.	66
4.2.5. Kriterier.	67
4.3. Diskussion.	68
5. NATURLIGA ANALOGER.	70

	<u>Sid</u>
5.1. Inledning.	70
5.2. De naturliga reaktorerna i Oklo.	70
5.3. Uranmineraliseringar som naturliga anloger.	73
5.4. Geologiska kontaktzoner.	75
5.5. Biosfäriska analoger.	75
5.6. Hur kan man utnyttja data från naturliga analoger.	77
6. SEMINARIUM OM ETISKT HANDLANDE UNDER OSÄKERHET.	82
6.1. Utgångspunkter.	82
6.2. Olika typer av osäkerhet.	83
6.2.1. Människans inbyggda begränsningar.	83
6.2.2. Osäkerhet om samhällets utveckling.	84
6.2.3. Osäkerhet om livsmiljöns utveckling.	85
6.3. System som minskar osäkerheten.	86
6.4. Risk.	87
6.5. Etiskt paradigmskifte.	88
6.6. Vårt ansvar - kommande generationers ansvar och behov av kontroll.	90
Ordlista	93

1. AKTUELL FORSKNING OCH UTVECKLING I SVERIGE

1.1. Granskning av SKBs FoU-Program 86

1.1.1. **Bakgrund**

KASAMs rapport 1986 innehåller (s 37-44) en sammanfattning av det FoU-program som Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) i september 1986 överlämnade till statens kärnbränslenämnd för granskning. Enligt bestämmelserna i kärntekniklagen skall ett sådant program presenteras av kärnkraftföretagen vart tredje år; nästa gång sålunda år 1989.

Efter ett brett inhemskt remissförfarande och en granskning även av ett tiotal utländska expertorgan färdigställde kärnbränslenämnden i maj 1987 sitt granskningsyttrande och överlämnade det till regeringen.

Till yttrandet, Granskning av FoU-Program 86, är fogade tre bilagor. I bilaga 1 återges de svenska remissyttrandena och i bilaga 2 de utländska expertorganens uttalanden. Bilaga 3 innehåller en rapport från den sk platsvalsgruppen, se vidare avsnitt 1.2.

Kärnbränslenämnden föreslog att regeringen skulle ge nämnden i uppdrag att meddela vissa föreskrifter om kompletteringar till och ändringar i SKBs FoU-Program 86. I september 1987 kommenterade SKB nämndens uttalanden och förslag.

I det följande ges ett kort referat av kärnbränslenämndens yttrande samt SKBs kommentarer till yttrandet.

1.1.2. **Kärnbränslenämndens yttrande**

Allmänna synpunkter på SKBs program.

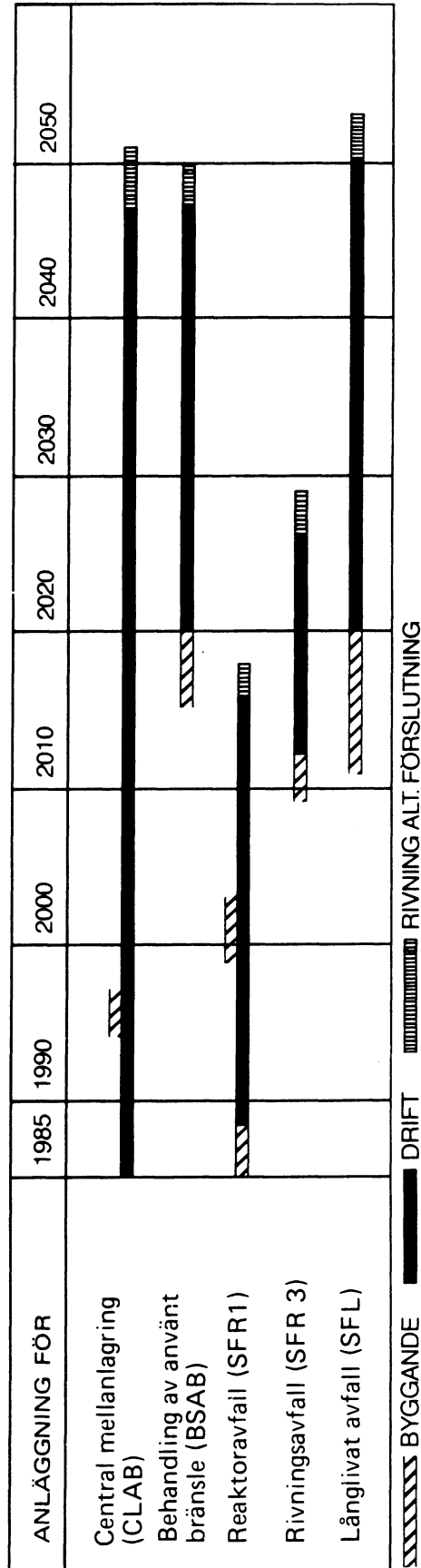
Kärnbränslenämnden liksom remissinstanserna tillstyrker i huvudsak SKBs program.

Den långsiktiga tidsplanen förefaller att vara genomförbar i sina huvuddrag. Det är dock inte nödvändigt att nu fastställa denna tidsplan. Om forskningsresultat eller andra erfarenheter motiverar förskjutningar bör sådana kunna göras (se fig 1.1.).

I programmet för den närmaste sexårsperioden är SKBs målsättningar för sin forskning inte preciserade. Nämnden önskar att SKB i FoU-Program 89 utförligare än i FoU-Program 86 preciserar sina målsättningar, prioriteringar i programmet samt uppskattningar av resursbehov och tidsåtgång för att få erforderligt underlag för system- och platsval.

Exempelvis saknas inom programområdet Geovetenskap en diskussion om hur säkert man kan och behöver bestämma berggrundens egenskaper. En sådan diskussion har betydelse för de viktiga

Fig 1.1. Övergripande tidsplan för anläggningar i det svenska avfallshanteringssystemet enligt SKB.



studierna av grundvattnets rörelser i berggrunden.

Alternativstudier

SKBs program för studier av alternativ till KBS 3-systemet har den bredd som är motiverad i nuvarande kunskapsläge, men kärnbränslenämnden betonar vikten av att olika system med senarelagd tillslutning av slutförvaret eller med på annat sätt bibehållen handlingsfrihet analyseras.

SKBs studier av olika kapselmaterial har karaktären av alternativstudier. Enligt nämndens åsikt bör SKB liksom hittills inrikta dessa studier på korrosionsbeständiga material, i första hand koppar och i andra hand keramiska material. Det är viktigt att SKB analyserar konstruktioner och tillverkningsmetoder för kapslarna för att förvissa sig om att en kapsel som skadas vid tillverkning eller hantering kan återställas i fullgott skick.

Funktions- och säkerhetsanalys

Funktions- och säkerhetsanalyser är av central betydelse för val av utförande och lokalisering av slutförvaret, för besluten om dessa och för utomståendes möjligheter att förstå förvaringssystemets egenskaper och säkerhet. Mot denna bakgrund anser kärnbränslenämnden att SKB bör utarbeta en lättillgänglig, klagörande skrift om metoder och arbetssätt inom funktions- och säkerhetsanalys och dokumentera de beräkningsmodeller SKB använder i sina analyser.

Bedömningsgrunderna, kriterierna, för beslut om slutförvaringen kan påverka genomförandet av säkerhetsanalyserna. SKB bör ta fram underlag för berörda myndigheters arbete med kriterier.

SKBs program för funktions- och säkerhetsanalys motiverar att SKB ökar sina resurser inom detta område.

(Frågor om säkerhetsanalys och kriterier behandlas vidare av KASAM i avsnitten 4 resp 2.4.)

Fortsatta berggrundsundersökningar

Kärnbränslenämnden tillstyrker att SKB kompletterar sina utvärderingar av de hittills undersökta typområdena. SKB bör också studera erfarenheter från geologiskt prognosarbete som gjorts för olika berganläggningar, i vårt land.

SKBs planer på ett underjordiskt berglaboratorium tillstyrks. Innan beslut fattas om dess lokalisering bör dock forskningsprogrammet definieras ytterligare.

SKBs underlag för det framtida valet av plats för slutförvaret behöver förbättras. Nämnden föreslår att en beskrivning tas fram av sådana egenskaper hos berggrunden i olika geologiska regioner inom landet som har betydelse för slutförvaringen. De geologiska värderingarna bör sammanställas med andra värderingsfaktorer i ett värderingsschema, som läggs till grund för en grov rangordning av bergområden/platser som kan komma i fråga för slutförvaringen.

Nämnden önskar få en rapport om en sådan värdering. Eftersom den kommer att vara ett viktigt underlag för det fortsatta arbetet avser nämnden att remittera rapporten till berörda myndigheter för synpunkter på SKBs underlag och urval.

1.1.3. SKBs kommentarer.

SKB finner att de föreslagna kompletteringarna i flertalet fall är av sådan karaktär att endast smärre modifikationer av programmet kommer att krävas. Enligt SKB bör regeringen godkänna FoU-Program 86 med de kompletteringar som angivits av kärnbränslenämnden (se fig 1.2.).

På en punkt har emellertid SKB invändningar mot nämndens förslag. Det gäller uttalandena om inriktningen av fortsatta berggrundsundersökningar. Det tidsschema och den metod för val av förlägningsplats för ett slutförvar som SKB förutsätter gör det enligt SKB inte meningsfullt att göra en strikt rangordning av inventerade områden. I stället föreslår SKB att regeringen uppdrar åt SKB att till kärnbränslenämnden redovisa "inventering, urvalsmetoder och resulterande områden för ytterligare typområdesundersökningar samt de urvalsmetoder som under 1992 avses bli utnyttjade för att bland undersökta typområden välja ut detaljundersökningsplatser".

1.1.4. Regeringens beslut

Regeringen beslöt 26 november 1987 att FoU-program 86 uppfyller de anspråk som ställs i 12 § kärntekniklagen. Regeringen finner vidare att forsknings- och utvecklingsarbetet i huvudsak bör bedrivas i enlighet med den inriktning och tidplan som anges i programmet. De synpunkter som kärnbränslenämnden framfört i sitt yttrande över programmet bör så långt som möjligt beaktas. Regeringen beslutade att FoU-program 86 därmed läggs till handlingarna.

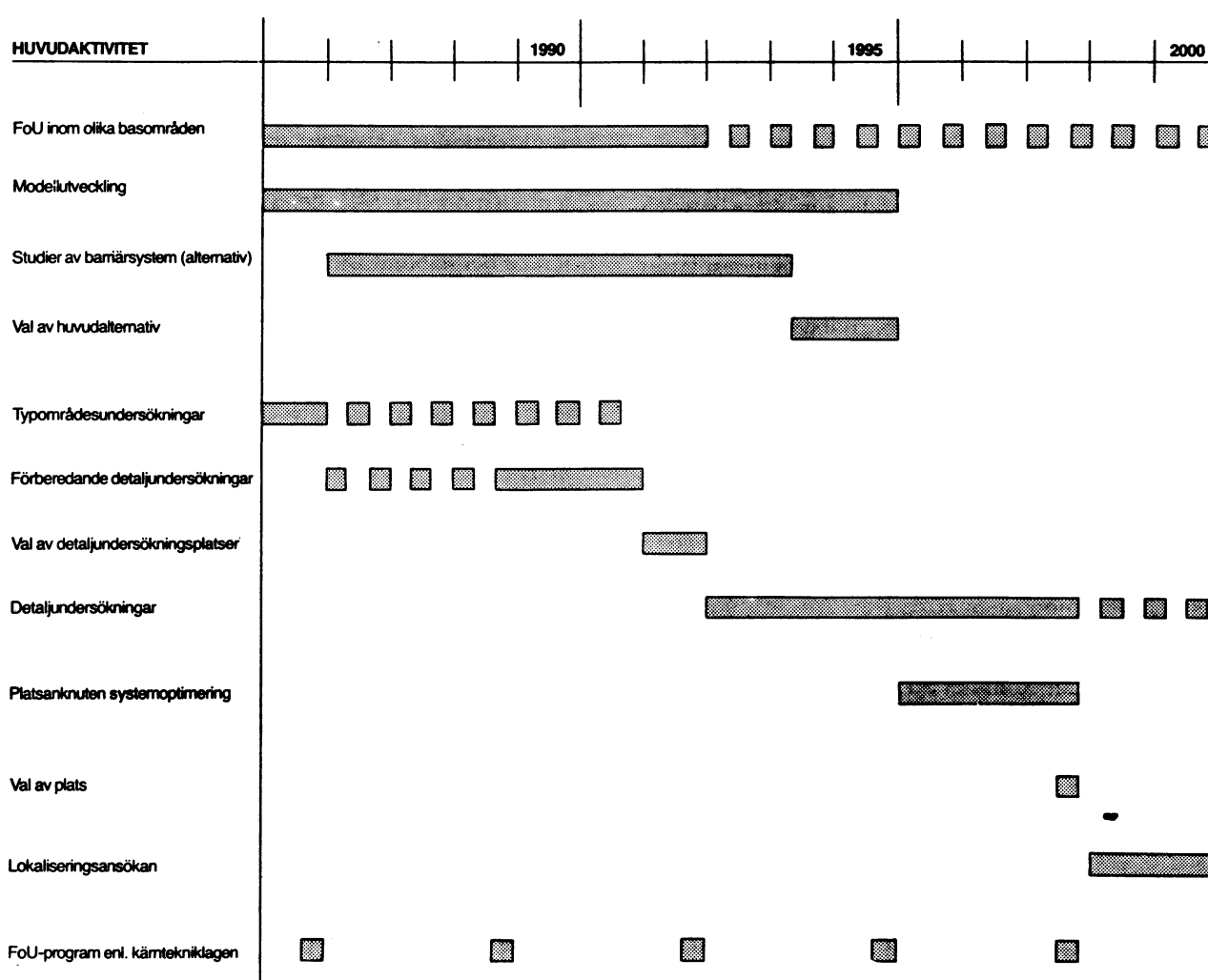
1.2. Om beslutsordning och informationsfrågor under platsvalsprocessen för högaktivt kärnavfall

1.2.1. Bakgrund

Inför granskningen av SKBs FoU-Program 86 hade regeringen också gett statens kärnbränslenämnd i uppdrag att belysa "en ändamålsenlig ordning för hur statsmakterna på grundval av vunna erfarenheter, resultat från berggrundsundersökningarna och andra delar av forsknings- och utvecklingsprogrammet, mm skall fatta beslut i platsvalsfrågor. Vidare bör förslag läggas fram om hur informationen på berörda orter skall ordnas och vem som bör svara för den."

Nämnden uppdrog åt en särskild arbetsgrupp, kallad platsvalsgruppen, att utarbeta underlag i frågan om beslutsordning och information. Platsvalsgruppens rapport, Beslutsordning och information inför val av plats för slutlig förvaring av använt

Fig 1.2. Översiktlig tidsplan för SKBs FoU fram till lokaliseringansökan för slutförvar enligt SKB.



kärnbränsle, utgör bilaga 3 till nämndens granskningsyttrande.

Kärnbränslenämndens syn på dessa frågor redovisas i granskningsyttrandet maj 1987 (s 105-132). Nämnden föreslog att regeringen beaktar nämndens synpunkter i samband med den av riksdagen begärda översynen av det s k kommunala vetot samt att vad som nämnden i övrigt har anfört om beslutsordning och om informationsfrågor läggs till grund för det fortsatta arbetet.

Regeringen har ännu inte tagit ställning i denna fråga.

I det följande redogörs översiktligt för kärnbränslenämndens synpunkter på beslutsordning och informationsfrågor under platsvalsprocessen.

1.2.2. Beslutsordning

Kärnbränslenämndens förslag innebär att beslutsordningen för platsvalet kan inordnas i gällande lagstiftning. Kärntekniklagen (KTL) innehåller bestämmelser som ger staten möjlighet att besluta om åtgärder eller förelägganden i olika skeden av platsvalet. I plan- och bygglagen (PBL) och lagen om hushållning av naturresurser mm (NRL) finns bestämmelser om kommunens befogenheter beträffande mark- och vattenområdenas användning.

Den föreslagna beslutsprocessen innebär att ett komplicerat system av lagar och författningar skall tillämpas. Det krävs därför ett samarbete mellan myndigheterna så att beslutsprocessen hålls samman.

Det successiva urvalet av möjliga platser beskrivs som en utsällning indelad i tre stadier, nämligen provskedet, urvalsskedet och tillståndsskedet.

Under provskedet avgränsas områden med goda grundförhållande, inventeras motstående intressen, görs preliminära bedömningar av tänkta platser som kan ge en säker förvaringsanläggning, etc.

Enligt 2 kap 8 paragrafen första stycket NRL skall områden som är särskilt lämpliga för bl a avfallshantering så långt möjligt skyddas mot åtgärder som påtagligt försvårar tillkomsten eller utnyttjandet av anläggningen. Det är därför viktigt att vederbörande kommun och länsstyrelse så tidigt som möjligt får besked om ett områdes lämplighet för fältundersökningar. Som framgår av referatet av kärnbränslenämndens granskning av SKBs FoU-Program 86 (avsnitt 1.1.) har nämnden föreslagit att SKB upprättar en förteckning över områden som kan vara lämpliga att reservera för fortsatta undersökningar. Med stöd av ett sådant material kommer nämnden efter en egen bedömning att hos berörda länsstyrelser och kommuner begära att specifika områden reserveras i kommunernas översiktsplaner.

Under urvalsskedet kommer fältundersökningarna att fortsätta och de platser som lämpar sig bäst för ett säkert slutförvar att väljas ut.

Under detta skede finns det ett starkt behov av att som s k riksintresse reservera den mark som är tänkbar för hantering och slutförvaring av kärnavfall i den kommunala planeringen. På grundval av SKBs förslag till urval kommer kärnbränslenämnden att bedöma om ett riksintresse enligt NRL kan anses föreligga. Om nämnden anser så vara fallet kommer nämnden att meddela berörda länsstyrelser och kommuner att ett riksintresse enligt NRL föreligger och att detta skall beaktas i planarbetet.

Under tillståndsskedet företas regeringens lokaliseringsprövning enligt 4 kap NRL och tillståndsprövning enligt kärntekniklagen (KTL). Lokaliseringsprövningen förutsätts omfatta den eller de platser som sållningssystemet har resulterat i.

Enligt kärnbränslenämnden är det en fördel om regeringens prövning av lokaliseringsfrågan kan samordnas med prövningen av säkerhets- och strålskyddsfrågorna. Nämnden anser att SKB därför vid en lokaliseringsansökan bör ta fram genomarbetade lösningar på säkerhets- och strålskyddsfrågorna.

När det gäller det kommunala inflytandet föreslår kärnbränslenämnden att nämndens synpunkter på beslutsordning under platsvalsprocessen beaktas vid regeringens översyn av det kommunala vetot.

Riksdagen har nämligen uttalat, vid behandlingen av förslaget till NRL hösten 1986, att det måste vara möjligt att fatta beslut om lokalisering av vissa anläggningar även mot en kommuns avstyrkan. Vissa anläggningar kan ha en sådan nationell betydelse att de måste kunna lokaliseras inom landet. Om alla kommuner som kan komma ifråga motsätter sig en lokalisering skulle etableringen, med ett kommunalt veto, inte komma till stånd inom landet. Uttalandet gjordes mot bakgrund av att riksdagen avtog ett regeringsförslag om att det kommunala vetot skulle slopas. Riksdagen förordade att frågan om inskränkning av det kommunala vetot ytterligare övervägdes inom regeringens kansli och att regeringen lägger fram ett nytt förslag i frågan (BoU 1986/87:3 s 45).

Kärnbränslenämnden konstaterar att det råder politisk enighet om att använt kärnbränsle från svenska kärnkraftverk skall slutförvaras i Sverige. Med ett helt oinskränkt kommunalt veto kan det, anför nämnden, bli svårt att lokalisera slutförvaret. Förslaget till beslutsordning förutsätter därför en viss inskränkning av det kommunala vetot enligt bostadsutskottets förslag. I annat fall finns det, uttalar kärnbränslenämnden, en risk för att beslutsordningen enligt PBL och NRL inte kommer att fungera på det sätt som har beskrivits.

1.2.3. Informationsfrågor

Kärnbränslenämndens förslag och synpunkter hänför sig i huvudsak till provskedet. Som en allmän bakgrund framhåller nämnden att använt kärnbränsle och förvaring av detta omfattar tekniska frågor som är svåra att förstå. Allmänheten har berättigade krav på att erhålla information och att få den presenterad på ett begripligt sätt. Ett oeftergivligt krav på

information från myndigheter är att den skall vara öppen och saklig. Sådan information ger enskilda och grupper av människor möjlighet att göra egna bedömningar, grundade på fakta.

Platsvalsgruppen hade pekat på möjligheten att under urvalsskedet knyta an till systemet med lokala säkerhetsnämnder i kommuner med kärnkraftanläggningar (19 paragrafen KTL).

Kärnbränslenämnden konstaterar att det kan föreligga behov av ett särskilt kontaktorgan i de kommuner som blir aktuella i urvalsskedet. För närvarande torde det dock inte vara nödvändigt att ta ställning till lämpliga organisationsformer för information och kontakter med kommuner under urvalsskedet.

1.3. Kärnavfallsforskning vid SKB - några nya projekt

Här redovisas kortfattat det aktuella läget för tre av de större projekt som ingår i SKBs FoU-program. För en utförligare sammanfattning hänvisas till SKBs Annual Report TR 86-31.

1.3.1. Stripa-projektet - fas 3

I ett underjordslaboratorium i den gamla järnmalmsgruvan i Stripa drivs sedan mer än 10 år internationella forskningsprojekt relaterade till slutförvaring av högaktivt avfall. Sedan 1980 drivs det som ett fristående OECD/NEA-projekt med SKB som verkställande organisation. Fas 1 genomfördes åren 1980-85, fas 2 åren 1983-87 och projektet är nu i fas 3 som startade i september 1986 och beräknas avslutad under 1991. Sju länder - Finland, Japan, Kanada, Schweiz, Storbritannien, Sverige och USA - deltar i fas 3.

Arbetena i fas 3 är en direkt fortsättning av dem som genomförts i de tidigare faserna, men inkluderar även vissa nya forskningsaktiviteter. En ostörd granitisk bergvolym i storleken ca 125x125x50 m skall undersökas och karakteriseras i detalj. En matematisk modell av grundvattenflödet kommer att utvecklas och sedan jämföras med resultat från mätningar.

Tidigare erhållna resultat visar att modeller som behandlar berget som ett poröst medium inte i detalj kan beskriva förhållandena i en uppsprucken bergvolym av ifrågakarande storlek. Undersökningarna i Stripa har också visat att det är realistiskt att beskriva en spricka som en öppning med konstant vidd mellan två parallella ytor. Det verkar snarast som om vattnet strömmar i slumpvis fördelade kanaler i sprickan. Den matematiska modell som kommer att prövas i fas 3 i Stripa-projektet baseras på en beskrivning av grundvattenflödet i sprickor i ett tredimensionellt mönster.

Fas 3-programmet omfattar även s k spårförsök för att detaljstudera kanalflödet i sprickor och i den nämnda bergvolymen. Dessa experiment är en direkt uppföljning av försök som gjorts i fas 1 och 2. Under fas 3 studeras även olika material för injektering och tätning av enskilda sprickor och sprickzoner. Av särskild betydelse är härvid långtidsstabiliteten. Ett storskaligt injekteringsförsök är under diskussion.

1.3.2. Underjordiskt berglaboratorium

I början av 1990-talet kommer Stripa-projektets fas 3 att avslutas. Eftersom Stripa är en gammal gruva är de hydrologiska förhållandena störda och området lämpar sig därför inte för vissa experiment och undersökningar. För att tillgodose behovet av ett lämpligt försöks- och experimentområde har SKB inlett förundersökningar för ett underjordiskt berglaboratorium som avses byggas i början av 1990-talet (se fig 1.3.). I första hand undersöks området vid Simpevarp, där Oskarshamn kärnkraftstation och det centrala bränslelagret CLAB är beläget. SKBs syften med berglaboratoriet är bl a att:

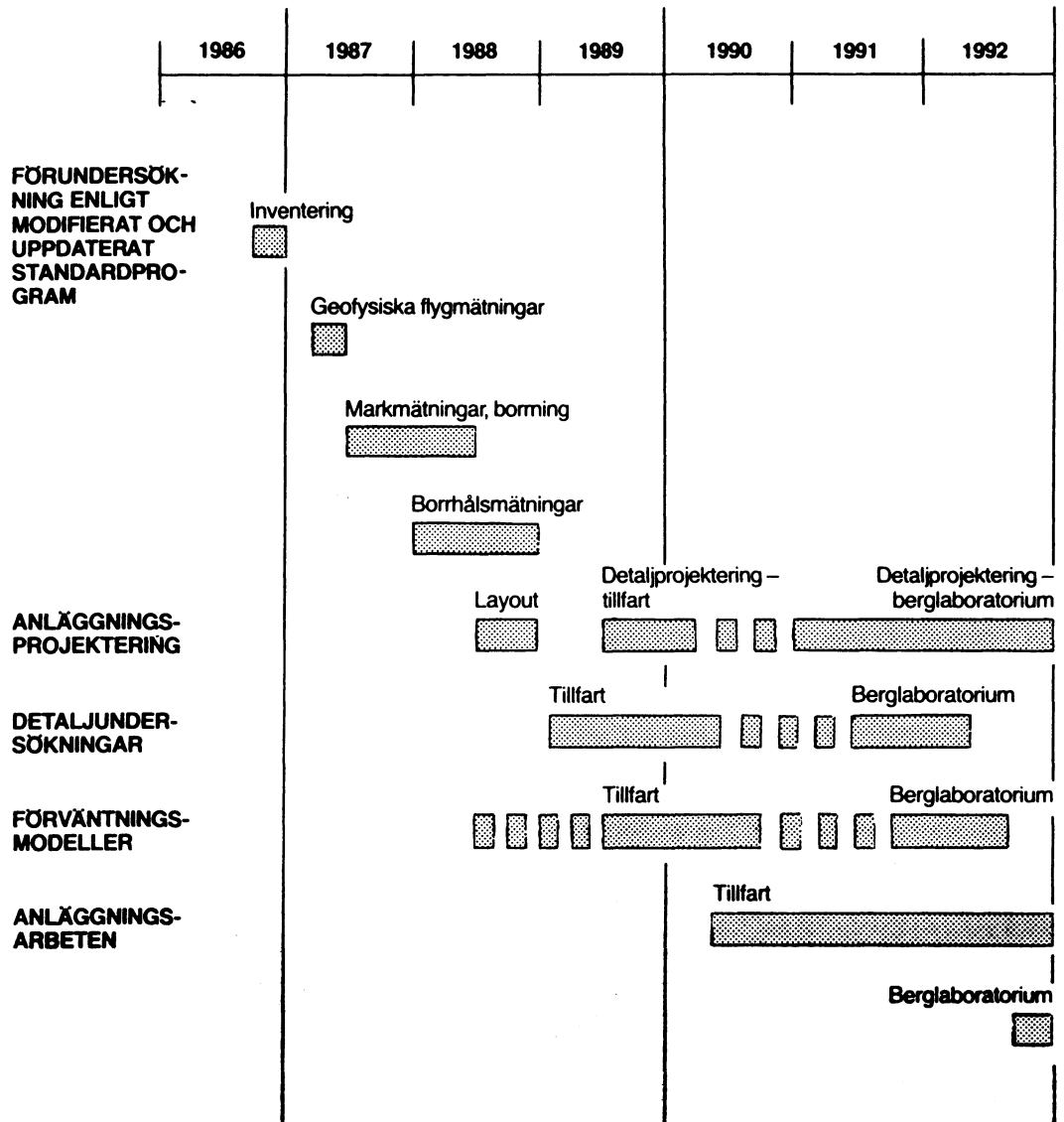
- Ge en bas för utveckling och utprovning av detaljerade platsundersökningsmetoder.
- Detaljstudera grundvattenströmning inom ett större bergområde och hur denna påverkas av schaktsänkning eller tunneldrivning.
- Ge möjlighet till försök med transport av radioaktiva ämnen (med grundvattnet) inom väl karakteriserade och representativa områden.
- Ge möjlighet till pilotförsök med vissa systemkomponenter eller viss utrustning.
- Ge möjlighet till sk in-situ-försök för studier (under relativt lång tid) av samfunktion av delar av ett förvarssystem.
- Ge möjlighet till storskaliga demonstrationsförsök.
- Kunna prova anläggningsteknik eller utförandeteknik för slutförvar.
- Utgöra en väl karakteriserad referensplats för studier av olika förvarsalternativ.

För att utvärdera lämplig plats för detta laboratorium har en tämligen omfattande förundersökning påbörjats. Inom denna har bl a flygmätningar av magnetiska egenskaper i berget inom ett område av 800 kvadratkilometer utförts. Dessa har lämnat värdefulla upplysningar över de yngsta spricksystemens orientering och den allmänna bergartsstrukturen. Av speciellt intresse är det samband som kunnat konstateras mellan magnetiska egenskaper hos berget och bergets förmåga att leda och avge grundvatten.

Under 1987 presenteras en första geologisk och geohydrologisk prediktionsmodell av Simpevarpsområdet. Vidare planeras val av grundlayoutalternativ dvs om schakt eller tunnelalternativ är att föredra för bergdrivningen till experimentnivån.

Viktiga tidpunkter i arbetet med berglaboratoriet är planerad byggstart hösten 1990 och planerad start för experiment på

Fig 1.3. SKBs tidsplan för underjordiskt berglaboratorium.



experimentnivån 1993. Ett av de viktigaste experimenten är dock att förutsäga hur de hydrologiska förhållanden påverkas vid schakt- och tunneldrivning.

1.3.3. Poços de Caldas-projektet

Studier av naturliga analoger (jfr avsnitt 5) ingår som en betydande del av SKBs forskningsprogram. Ett av de större projekten är det internationella Poços de Caldas-projektet.

Undersökningarna i Poços de Caldas-området började redan på 1960-talet som ett samarbete mellan Brasilien och USA. År 1979 och 1981 utvidgades samarbetet till Schweiz (Nagra) och Sverige (SKB).

Undersökningarna var inledningsvis koncentrerade till förekomsten av torium och sällsynta jordartsmetaller i Morro do Ferro. Tyngdpunkten har varit lagd på biosfärsspridningen av naturliga radioaktiva ämnen och de stråldoser som detta förorsakade närboende människor. En del undersökningar gjordes även av rörligheten av torium och radium i grundvattnet.

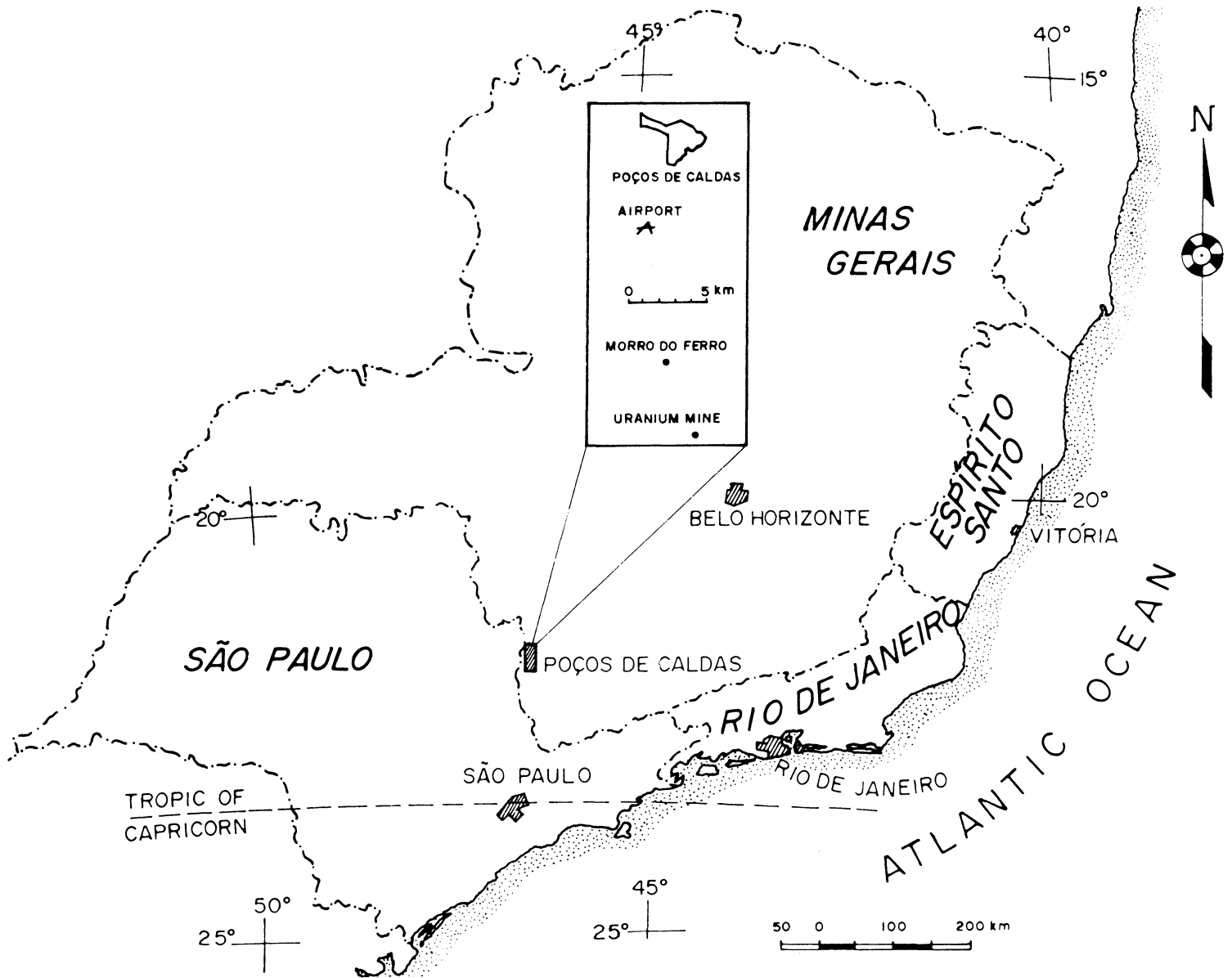
Poços de Caldas-projektet i sin nuvarande form startade den 26 maj 1986 och planeras pågå i tre år. Deltagande länder är Brasilien, Schweiz, Storbritannien, Sverige och USA. SKB svarar för projektledningen. Undersökningarna är inriktade på att validera modeller för frigörelse och transport av radioaktiva ämnen i geosfären. Numera omfattas även en urangruva, Osamu Utsumi, belägen ca 5 km från Morro do Ferro i undersökningarna (se fig 1.4.). Projektet är uppdelat i tre delprojekt:

1. Speciering och kemisk transport av naturliga radioaktiva ämnen och sällsynta jordartsmetaller i ett sprickflödes-system i kristallint berg under dels oxiderande, dels reducerande betingelser.
2. Bildning och rörlighet av kolloidburna radioaktiva ämnen i naturliga grundvatten. Här innefattas även humusämnen och fulvosyror samt mikroorganismer i kolloidbegreppet.
3. Inverkan av värme på transport av radioaktiva ämnen i geosfären.

1.4. Kärnavfallsforskning vid SKI - några nya projekt

Den största delen av SKIs kärnavfallsforskning gäller frågor av betydelse för slutförvaring av använt kärnbränsle och högaktivt avfall. Av speciell betydelse för SKIs del i detta sammanhang är utveckling och utvärdering av metoder för säkerhetsanalys av slutförvar.

Fig 1.4. Karta över undersökningsområdet vid Poços de Caldas och Morro do Ferro i Brasilien.



Den del av SKIs forskning som gäller säkerhetsanalys av slutförvar fokuseras alltmer mot Projekt-90, vars huvudmålsättning är att belysa tekniska och vetenskapliga förutsättningar för de riktlinjer för säkerhetsredovisning för slutförvar som SKI förutser behöver utarbetas tidigt under 1990-talet. Detta skall göras genom att genomföra en så långt möjligt fullständig säkerhetsanalys av SKBs slutförvarssystem.

Med ovan beskrivna målsättningar som bas kan ett stort antal frågeställningar av såväl allmänt strategiskt som tekniskt detaljerat innehåll formuleras. Bland frågorna av teknisk karaktär som kan bearbetas inom Projekt-90 kan exempelvis följande urskiljas:

- Betydelsen av olika osäkerheter i hydrologiska beräkningar
- Inverkan av användningen av olika begreppsmässiga modeller för grundvattentransport (tex poröst medium, spricknätverk, kanaler) på platskaraktärisering
- Inverkan av kopplade effekter på säkerhetsanalysen
- Möjligheterna att genomföra spridningsberäkningar i tre dimensioner
- Möjligheterna att förbättra modellerna av närområdet
- Probabilistiska och analytiska metoders möjligheter att behandla osäkerheter

Genom Projekt-90 bygger SKI upp ett antal säkerhetsanalytiska modeller. Detta bidrar också till att identifiera områden för fortsatt forskningsverksamhet.

För ett sammanhållet arbete med Projekt-90 behöver SKI arbeta med ett referensförvar för modellberäkningar. För detta ändamål konstrueras en "modellplats" med utgångspunkt från realistiska förhållanden.

Som beskrivs i avsnitt 4 är validering av modeller för transport av grundvatten och radioaktiva ämnen i geosfären en central frågeställning för såväl programansvariga organ som för tillståndsgivande myndigheter. Det råder internationell enighet om att en stor del av det återstående forskningsarbetet inför realiserandet av slutförvar för långlivat avfall måste koncentreras mot denna frågeställning.

Mot denna bakgrund har SKI initierat ett internationellt samarbetsprojekt inriktat mot validering av geosfärsmoeller. Sedan våren 1986 har en internationell ad hoc grupp bistått SKI med att utforma projektet som fått namnet INTRAVAL.

Som resultat av ad hoc gruppens arbete har två rapporter publicerats, en projektrapport (SKI 87:3) och en bakgrundsrapport (SKI 87:4). Projektet har nu påbörjats med deltagande från 18 organisationer.

Den tekniska uppläggningsen av INTRAVAL beskrivs i projektrapporten. Grundtanken är att laboratorieexperiment, fältförsök och naturliga analoger tillsammans skall utnyttjas för en systematisk studie av olika begreppsmässiga modellers validitet. I projektrapporten föreslås ett antal försök. Man kan förmoda att förslag och diskussioner inom projektet kommer att leda till ytterligare experiment.

De experiment som skall studeras är av två slag. En grupp utgörs av redan utförda experiment där data således finns färdiga att utnyttjas inom projektet. Den andra gruppen utgörs av experiment som pågår eller är planerade. Dessa experiment kan förhoppningsvis bidra till att förbättra samverkan mellan de som utvecklar modeller och de som utför experiment; en växelverkan som är en nödvändig förutsättning för att valideringsprocessen blir framgångsrik.

SKI gör ytterligare en insats inom valideringsområdet genom deltagande i Alligator Rivers-projektet som studerar naturliga analogier baserade på uranförekomster i ett område i norra Australien. Projektet genomförs i OECD/NEAs regi med deltagare från Australien, USA, Japan, England och Sverige.

1.5. Aktuellt om kärnavfallsforskning vid SKN

Nämndens forskning och utredningar syftar till att skaffa underlag för fortsatta värderingar av SKBs program.

Beijerinstitutet har åt nämnden sammanställt en nulägesrapport om det internationella FoU-arbetet med slutförvaring av högaktivt avfall i sedimentlager på djupa havsbottnar.

Nämnden har uppdragit åt geologiska institutionen vid Göteborgs Universitet att rapportera om geovetenskapliga och borrhåstekniska erfarenheter från internationella och svenska djupborringsprojekt. Rapporteringen avser att bidra till underlag för bedömning av förslaget att slutförvara kärnbränsleavfall i djupa borrhål - om metoden har fördelar vad gäller säkerhet och om den kan utvecklas till ett fungerande förvaringssystem inom överskådlig tid.

Nämnden planerar att låta göra en tvärvetenskaplig, ingående inventering och analys av ytterligare möjliga, alternativa slutförvaringsmetoder. Avsikten är bl a att i olika framtids-scenarier analysera möjlighet till och behov av teknikutveckling samt att identifiera frågeställningar som behöver bearbetas.

Kärnbränslenämnden planerar vidare utredningsinsatser inom områdena - berggrundens stabilitet, berggrundens egenskaper vad gäller transport respektive kvarhållning av radioaktiva ämnen samt modellberäkningar och analyser.

Resultat från den naturvetenskapliga/tekniska forskningen ger underlag för expertvärderingar av olika förvaringsmetoder och de risker de kan föra med sig. I beslut om verkställighet av olika led i hanteringsgången för kärnbränsleavfallet ingår

också ställningstagande till vad som är en för medborgarna och samhället acceptabel risknivå och en avvägning av risk mot samhällsekonomiska och andra konsekvenser av ett beslut. Sådana avvägningar kan inte göras enbart utifrån naturvetenskapliga bedömningsgrunder.

Nämnden har mot denna bakgrund startat ett program för samhällsvetenskaplig forskning om riskbegrepp och riskvärderingar som anknyter till sluthantering av det använda kärnbränslet.

Inom detta program har under 1987 avslutats två studier. Den ena studien belyste den betydelse tidsperspektivet av slutförvaringen har för riskupplevelsen. I den andra ingick undersökningar av vilka faktorer som ingår i människors upplevelse av avfallsrisker och hur dessa faktorer värderas.

I programmet ingår också ett långsiktigt projekt om opinionsbildningen i kärnkraftens avfallsfråga. Projektet har knutits till statsvetenskapliga institutionen vid Göteborgs universitet. Det omfattar dels löpande studier av avfallsfrågans behandling i massmedia och av aktörer i samhällsdebatten, dels återkommande opinionsstudier som omfattar representativa urval av landets befolkning.

I anknytning till detta programområde har kärnbränslenämnden tillsammans med KASAM svarat för det seminarium om etiska aspekter på hanteringen av kärnbränsleavfall, som refereras i avsnitt 6.

1.6. Aktuellt om kärnavfallsforskning vid SSI

SSIs forskning och utredningar på avfallsområdet syftar till att förbättra kunskapsunderlaget för bedömningar om avfallets konsekvenser för människor och miljö på kort och lång sikt och hur SSIs krav och kontroll skall utformas. Det viktigaste forskningsuppgifterna kan klassificeras som radioekologi som avser radioaktiva ämnens spridning och upptag i biosfären. Efter Tjernobylyckan har ett stort antal projekt igångsatts som också har betydelse för avfallsfrågorna. Speciella undersökningar avser spridningsförlopp vid markdeponering av lågaktivt avfall. Nedläggning av kärnkraftverk innebär speciella problem som hanteras i olika projekt t ex avseende aktivitetsfördelning i olika reaktorsystem. Två projekt av speciell betydelse för bedömningen av såväl radiologiska som kemiska risker från kärnavfall är biomovs och genotox.

BIOMOVS (Biospheric Model Validation Study) är ett internationellt samarbetsprojekt där modeller för beräkning av spridning och ackumulation av radioaktiva och icke-radioaktiva ämnen i biosfären utvärderas och jämföres. Speciellt beaktas viktiga processer i vatten och markmiljö (akvatisk och terrest miljö). Huvudsyftet med studien är att jämföra och testa noggrannheten i modellernas förutsägelser, förklara olikheter i dessa förutsägelser, rekommendera riktlinjer för fortsatt forskning och utveckling avseende förbättring av modellers tillförlitlighet

samt utgöra ett forum för utbyte av ideer, erfarenheter och information.

Studien har delats upp i två faser. I fas A jämförs resultatet av modellberäkningar med i naturen uppmätta aktivitetsnivåer. Denna fas är den egentliga valideringsfasen. Fas B syftar till att jämföra modellberäkningar och osäkerheter i dessa beräkningar för test-scenarier som ej går eller är opraktiska att validera.

Fyra möten har hittills hållits och beräkningar för två A- och sex B-scenarier pågår. Rapporter där resultaten kortfattat presenteras utges efter varje möte. För varje färdigräknat scenario sammanställs en teknisk rapport innehållande resultat och erfarenheter från arbetet. Två tekniska rapporter utges under hösten 1987.

Studien beräknas avslutas 1990 och en slutrapport kommer att utges något år senare. Här kommer man bl a att ta upp problemen rörande modellering av biosfären och tillförlitligheten av biosfärsmodeller.

För närvarande deltar 22 organisationer från 14 länder.

GENOTOX. Många ämnen (agens - agentier) som sprids i miljön kan ge upphov till likartade skador på människan och miljön. Detta gäller oberoende om det är joniserande strålning eller kemiska substanser som är orsaken till skadan.

I många sammanhang är spridning eller eventuell ansamling i miljön likartad för radioaktiva ämnen som för kemikalier och tungmetaller. De emissioner som kan äga rum kan i båda fallen även ge spridning över stora områden.

Eftersom den skadeverkan som dessa ämnen kan orsaka är likartad eller densamma syns det angeläget att diskutera i vilken utsträckning en gemensam syn på dessa ämnens skadeverkningar skulle vara värdefull. Ytterst gäller det sålunda att minska risken för genotoxiska skador i en befolkning.

En dylik samsyn är naturligtvis ej enkel och många frågor kräver svar innan en enhetlig bedömningsgrund blir möjlig för de skadliga effekterna av strålning och kemiska ämnen.

En avgörande fråga är här i vad mån jämförbara riskbedömningar kan göras mellan radioaktiva och icke radioaktiva genotoxiska agens. Andra kunskapsluckor som behöver tätas berör dessa ämnens förekomst i miljön, samt lagtekniska, ekonomiska och sociala aspekter på problematiken.

Statens strålskyddsinstitut har tillsammans med kemikalieinspektionen och statens naturvårdsverk beslutat att undersöka möjligheten till en gemensam syn på genotoxiska agens. I dagsläget har beslutats att inleda en förutsättningslös problemidentifikation. Detta görs genom att ett nordiskt seminarium har hållits under november 1987 följt av ett större internationellt symposium i Stockholm i oktober 1988. Projektet går under arbetsnamnet GENOTOX.

Efter detta symposium fattas beslut om och eventuellt hur det fortsatta arbetet skall bedrivas.

2. AKTUELL FORSKNING OCH UTVECKLING INTERNATIONELLT

2.1. Berggrundens stabilitet

Den geologiska forskning som pågår f n både i Sverige och i andra länder med liknande berggrund för att hitta slutförvar för använt kärnbränsle, omfattar i huvudsak tre områden - geokemi, hydrologi och tektonik. Gemensamt för forskningen inom dessa områden är ambitionen att i detalj kartlägga den nuvarande miljön för ett potentiellt slutförvar samt att förutsäga framtida ändringar i denna miljö, åtminstone vad gäller de närmaste hundra tusen åren. Tekniska barriärer kan förväntas vara effektiva i tusentals år eller mer, men för att uppnå tillräcklig säkerhet för den period det här är fråga om, måste vi välja områden med god geologisk stabilitet under hundratusen år eller mer.

För att kunna förutsäga vad som kommer att hända i framtiden behöver vi känna till och förstå det förgångna, framförallt det nära förflutna, och nutiden, dvs pågående processer i jordskorpan och biosfären.

2.1.1. Val av en stabil miljö

I många delar av världen där berggrunden i huvudsak är uppbyggd av gamla, kristallina bergarter är slutförvar på stora djup mest lämplig. Man kan t ex visa att det gamla, prekambrika urberget i den Fennoskandiska skölden har över stora områden varit stabilt och ostört under hundratals miljoner år. Detta bekräftas bl a i Sydsverige där de 600 miljoner år gamla kambriska sedimenten ligger plant och nästan horisontellt på det gamla urberget som därför kan förväntas förbli stabilt under den närmaste årmiljonen (se fig 2.1). Det bör dock påpekas att undersökningar av kvartära avlagringar har visat att en viss förskjutning av berggrunden har skett sedan den senaste istiden, i vart fall lokalt.

De flesta områden av gammalt, kristallint urberg som tills nu har undersökts med tanke på eventuellt slutförvar, har gjorts på ställen där berget ligger lätt tillgängligt, dvs endast täckt av tunna kvartära avlagringar. I områden som är täckta av kambriska och yngre sediment kan urbergets stabilitet under de senaste 400-600 miljoner åren väl avläsas. Fler analyser behöver göras i dessa områden (se fig 2.2).

Vi vet att en sammanpressning av jordskorpan (i NV-SO riktning) pågår i vår del av världen och att detta troligtvis beror på plattrörelser. Dessa rörelser orsakas av att Nordatlanten öppnar sig samtidigt som Afrika kolliderar med den Euroasiatis- ka kontinenten. Ett mycket påtagligt resultat av denna kollision är den alpina fjällkejdans. Direkta mätningar av spänningar i berget i borrhål ned till ca 500 m visar denna sammanpressning. Trots att vi har få jämförbara mätningar från större djup, kan vi med hjälp av seismiska mätningar bekräfta detta mönster.

Fig 2.1. Underpaleozoiska bergarter i Skandinavien.

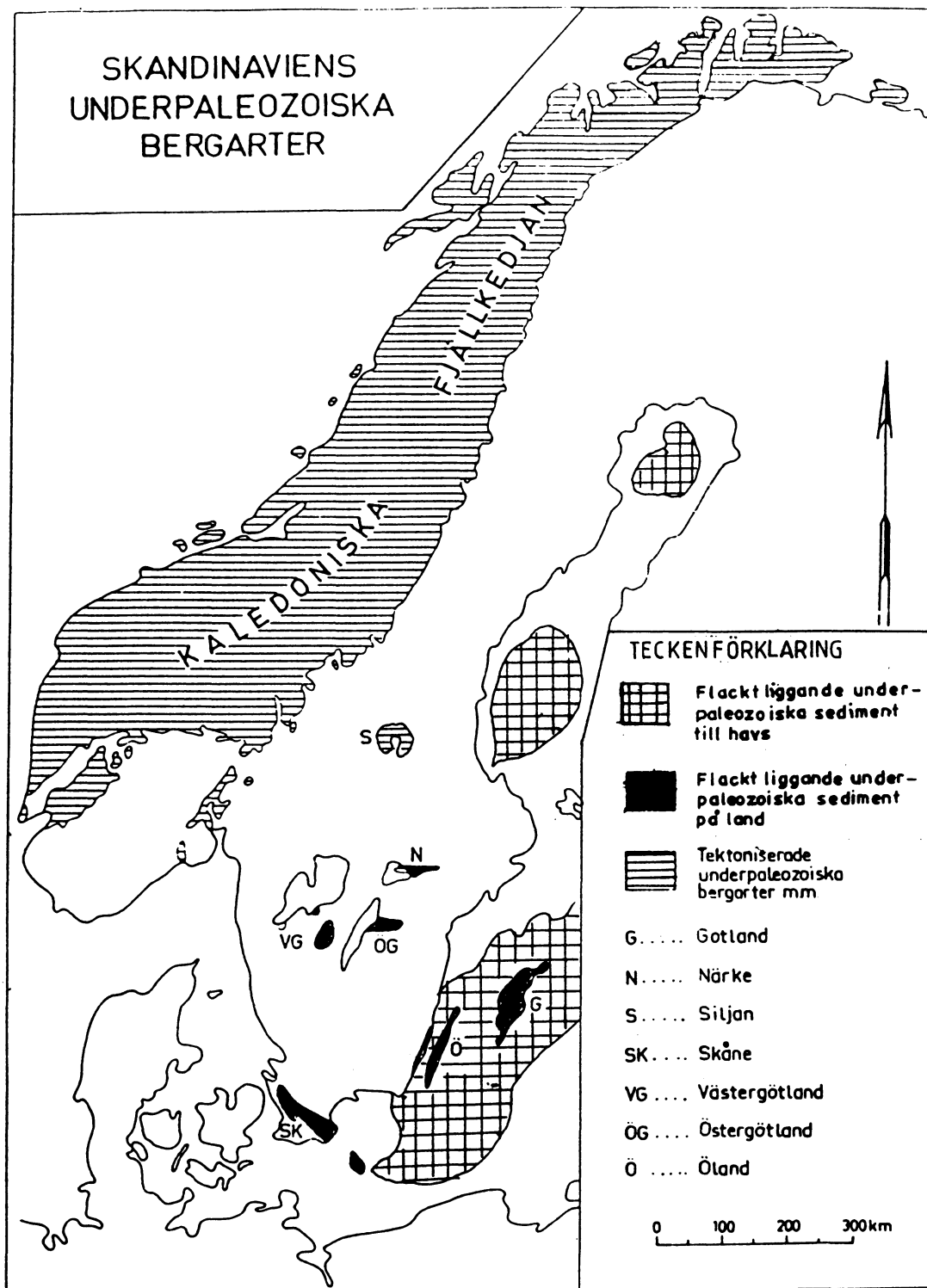
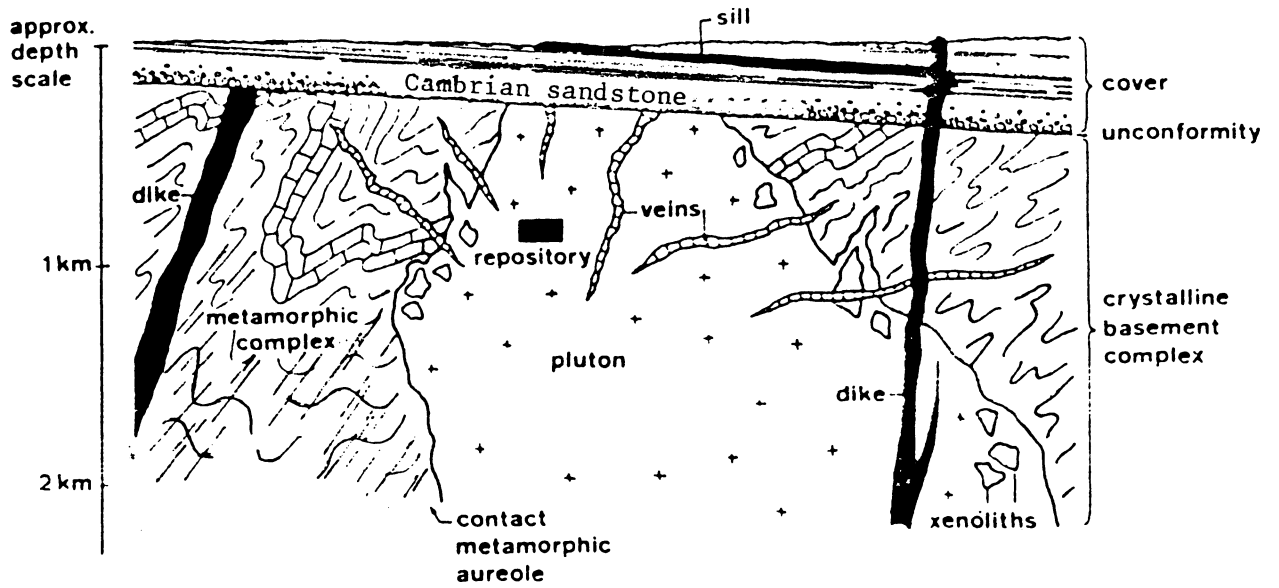


Fig 2.2. Skiss över en vertikal profil genom typiskt prekambrikt kristallint urberg som överlagras av kambriska sandstenar. Baserad på A.G. Milnes 1985 "Geology and Rad waste".
(Repository = Slutförvar för kärnavfall)



Det visar sig att berggrundsblock också rör på sig under sammanpressningen och att rörelsen oftast utlöses längs gamla svaghetszoner i skorpan. Det hela är en mycket långsam process som sannolikt har pågått under de senaste 50 miljonerna åren. Både stressmätningar och seismiska analyser av rörelser i jordskorpan är viktiga när man skall försöka förutsäga slutförvarsplatsens stabilitet över en längre period framåt.

De planer som finns för deponering av radioaktivt avfall avser ett slutförvar på ca 400-500 meters djup. Det har framförts att djupare förvar kan visa sig ha fördelar. För att kunna ställa säkra prognoser behöver vi dock under alla förhållanden känna till den geologiska strukturen på ett väsentligt större djup. Detta kräver en kombination av geologiska och geofysiska undersökningsmetoder av den typ som f n pågår inom olika internationella tvärvetenskapliga projekt, exempelvis International Lithosphere Program.

Mycket djupa borrhål på ned till flera kilometers djup betraktas numera som ett tänkbart alternativ för avfallets slutförvar. Men informationen om de geologiska strukturerna på sådana djup är begränsade. Det finns endast ett fåtal borrhål i världen i kristallin berggrund som kommer tillräckligt långt ned (6-8 km). Ett hål som har borrats på Kolahalvön går ned till 12 km och man fann förvånansvärt stor porositet och vattenföring i den nedre delen av detta hål. På samma sätt visar borrhålet i Siljan (6 km djupt) på sprickzoner och viss genomsläpplighet för vatten på djup större än 5 km.

Försök med borrhningar genom de översta 10-15 km av jordskorpan pågår i många länder i vetenskapligt syfte, framförallt i Sovjetunionen. Det mest ambitiösa projektet i västvärlden är ett borrhål i Västtyskland; 1,5 miljarder kronor har avsatts för borrhning och vetenskapliga undersökningar av ett djuphål ned till 14 km i den västliga delen av det böhmiska massivet.

2.1.2. Framtida förändringar i jordskorpan

Jorden förändras ständigt. Snabba och dramatiska förändringar förekommer i jordskorpan i områden som är seismiskt och vulkaniskt aktiva. I andra områden, som t ex den Fennoskandiska skölden, är förändringarna i ett historiskt och även ett geologiskt tidsperspektiv nästan omärkliga. Generellt sett sker ändringar i biosfären snabbare, och den påverkas också mera av den mänskliga faktorn. Inom den tidsram vi tvingas ta med i beräkningen kan förändringar i biosfären och jordskorpan samverka och påverka miljön för slutförvaret.

Att förutsäga framtida förändringar är inte omöjligt, men för att kunna göra en tillförlitlig bedömning behöver vi detaljerad och noggrann dokumentation av det nära förflutna samt god kännedom om pågående processer. Vad händer om klimatet förändras drastiskt, t ex vid en ny istid eller alternativt en varmetid med bortsmältande ismassor med den påföljd att havsnivån höjs och kustområden dränks. Både hydrologi och kanske även urbergets stabilitet skulle kunna påverkas av sådana händelser.

Många stora internationella forskningsprojekt är sysselsatta med att studera ändringar i litosfären och biosfären ur ett globalt perspektiv. Det kanske viktigaste och för den svenska slutförvaringsforskningen mest relevanta projektet är International Geosphere-Biosphere Program. Svenska forskare behöver aktivt delta i sådana program med utbyte av forskningsresultat för att med bättre säkerhet kunna göra prognoser om slutförvarets framtida miljö.

2.2. Hydrologisk forskning för slutförvar

Berggrundshydrologin är utomordentligt viktig vid val av plats för slutförvar. Tidigare uppfattning att urberg på några hundra meters djup i stort sett saknade vattenförande sprickzoner har visat sig felaktig. Så kallade subhorisontella sprickzoner, dvs i stor utsträckning horisontellt orienterade vattenförande zoner har påträffats på 800 m djup under SKBs platsundersökningar och ännu djupare zoner rapporteras från gasletningsprojektet i Gravberg. Betydelsen av dessa sprickzoner för mönstret i den regionala grundvattenströmningen och för den storskaliga spridningen av lösta ämnen är än så länge tämligen okänd. Ur slutförvarssynpunkt är det närmast de vertikala komponenterna i denna strömning som har intresse och kan vara avgörande för val av plats såväl som för förvarets utformning.

Djupt grundvatten i urbergarter har ibland, för att inte säga ofta en kemisk sammansättning som tyder på långsamma vattenrörelser (omsättningstid hundratusentals år) i de tätare partierna av bergmassan. För ett slutförvar är detta positivt då det hindrar snabb spridning av radioaktivt avfall även sedan de sk tekniska barriärerna (kapsel och bentonitlera) brutits igenom.

Den allmänna kunskapen om urbergets hydrologiska och hydrokemiska egenskaper ökar tämligen snabbt tack vare ett idogt och i vissa delar väl koordinerat internationellt forskningsarbete.

2.3. Kemisk forskning

Många kemiska processer kan påverka säkerheten vid förvaring av radioaktivt avfall. Denna insikt har lett till omfattande kemiska forskningsprogram organiserade av, eller bedrivna inom, de organisationer som har ansvar för avfallsfrågorna. Den följande översikten bygger på material från "Chemistry and migration behavior of actinides and fission products in the geosphere", en stor internationell konferens som hölls i München 14-18 september 1987. Av de muntliga diskussionerna, och delvis i det publicerade materialet, framgick klart att samverkan mellan de olika delarna i avfallsforskningen behöver förbättras, exempel ges i den följande texten.

Ett mycket stort arbete utförs för att studera enkla och väldefinierade processer i laboratoriemiljö. Dessa arbeten utförs för att bredda eller verifiera den vetenskapliga kunskapsbas som utnyttjas för beskrivning av de mycket mera komplexa avfallssystemen. Undersökningar av detta slag ger ofta resultat i form av numeriska värden på parametrar som utnyttjas

i transportmodeller av olika slag, tex löslighetsprodukter för urandioxid. Ett stort arbete pågår för att sammanställa dessa data i databaser. Detta arbete är f.n. inte väl koordinerat, vilket kan leda till dubbelarbete och onödig tidsutdräkt. Databasarbeten utförs f.n. inom OECD/NEA, inom DOE(USA) och inom EG(Mirage II-Chemval). Kunskapsunderlaget är mycket olika för olika systemlösningar. Slutlagring vid temperaturer mycket högre än 100°C - vilket dock ej är aktuellt i Sverige - kräver t ex tillgång till kemiska data som idag i stor utsträckning saknas och som kommer att bli mycket tids- och kostnadskrävande (hundratals manår) att ta fram. Kunskap om humusämnens och fulvosyrors roll vid transport av radioaktiva ämnen är ofullständig. Dessa ämnen tycks dominera transporten i ytvatten, samt ha en central betydelse för transport och redoxprocesser t ex i vissa leror (tex "Boom-clay" i Belgien). Informationen om både ursprung och egenskaper hos organiskt material av detta slag i djupa grundvatten är bristfällig. Ett mycket intensivt arbete pågår internationellt för att öka kunskaperna om dessa ämnen, samma sak gäller också studier av partikelbunden transport av radioaktiva ämnen. De senare studierna är i huvudsak beskrivande - det vore av stort intresse om någon av de teoretiskt framstående svenska forskargrupper som sysslar med yt- och kolloidkemi kunde göra en sammanfattande analys av problemen.

Samverkan mellan kemiska processer och transport i vatten identifierades som ett centralt tvärvetenskapligt område. Två skolor kan urskiljas - en som utnyttjar alltmer förfinade deterministiska modeller och en som vill göra realistiska förenklingar av transportkoderna för att därigenom kunna utnyttja sannolikhetsmodeller (probabilistiska modeller) för transportprocesserna. Den senare metoden har många fördelar (se avsnittet om säkerhetsanalytisk metodik), men kräver kraftfulla insatser för att säkerställa en tvärvetenskaplig samverkan. Avfallsforskningen har genererat en mycket stor mängd av detaljkunskap och nya experimentella metoder har utvecklats (tex lasermetodik för analys av så lite som 10^9 atomer med en teoretisk gräns av 10^5 atomer). Denna utveckling är värdefull men tyngdpunkten i det fortsatta arbetet bör ligga på systemnivå och ske under nära samverkan mellan forskare från de berörda vetenskaps- och teknikområdena.

2.4. Kriterier

Enligt uppslagsboken betyder kriterier "det som något bedöms efter". Denna definition är mycket passande även på den betydelse uttrycket har i säkerhetsanalysen och i samband med beslutsfattande för slutförvar. Emellertid används begreppet på olika nivåer; grundläggande eller primära kriterier och härledda eller sekundära kriterier. Till de grundläggande kriterierna när det gäller radiologisk verksamhet och speciellt slutförvaring av radioaktivt avfall räknas direkt påverkan av människan och hennes omgivning i form av stråldos till enskilda individer eller grupper av individer. Andra grundläggande

kriterier kan vara risk från en verksamhet, eller utsläpp av radioaktiva ämnen till biosfären.

Härledda, eller sekundära, kriterier är sådana som i ett givet tekniskt system kan härledas från de primära. De skall vidare vara sådana att de tillsammans med övriga förutsättningar i systemet, leder till att de grundläggande kriterierna blir uppfyllda. Ett exempel på ett härlett kriterium kan vara värdet på den s k hydrauliska konduktiviteten i en bergsplint som skall användas för slutförvar.

Den uppsättning av kriterier gentemot vilken en verksamhet eller ett system bedöms är bl a beroende av de analytiska metoder som används liksom av det beslutsunderlag som krävs av beslutsfattarna. Utveckling av analytiska metoder (jämför avsnitt 4) och beslutsprocesser vad avser slutförvaring av kärnavfall pågår nationellt och internationellt. Som ett led i detta pågår även utveckling av kriteriedelen.

På det grundläggande planet arbetar ICRP (International Commission on Radiological Protection) med den joniserande strålningens inverkan på människan och miljön. Problemen med de mycket långa tidsaspekterna har bl a tagits upp av strålskydds-institutet i dess remissvar på KBS-3 utredningen. Institutet påpekar där att stråldos inte kan användas på grund av de mycket stora beräkningsmässiga osäkerheterna vad gäller utvecklingen av biosfären, när det gäller tidsperioder överstigande 1 000 år. Utan att ta slutlig ställning pekar institutet på möjligheten att i stället använda omsättningen av farliga ämnen, t ex radioaktiva, i biosfären och jämföra med den som sker via naturliga processer t ex vittring, erosion och vulkanutbrott. Dessa tankegångar har presenterats internationellt för att få till stånd en bredare diskussion.

Ytterligare exempel på kriteriearbeten som pågår är strålskyddsinstitutets satsning tillsammans med naturvårdsverket och kemikalieinspektionen på att försöka få till stånd en gemensam bedömningsplattform för farligheten hos genotoxiska ämnen såsom radioaktiva ämnen, vissa tungmetaller (kadmium, nickel, bly m m) och cancerframkallande kemikalier. (se avsnitt 1.6.) Inom ramen för det nordiska myndighetssamarbetet på strålskyddsområdet har påbörjats ett arbete att ta fram allmänna kriterier för högaktivt avfall. Dessutom förekommer samarbete SSI/SKI och motsvarande myndigheter i Schweiz och Storbritannien. En av målsättningarna med SKIs Projekt-90 är att utarbeta riktlinjer för säkerhets-redovisningar av slutförvar (se avsnitt 1.4.).

2.5. OECD/NEAs avfallsprogram

NEAs verksamhet på avfallsområdet koordineras genom dess "kärnavfallskommitté" (Radioactive Waste Management Committee, RWMC).

I avfallskommitténs verksamhet läggs stor vikt vid frågor som teknisk utveckling och metoder för kontroll av funktion och säkerhet hos olika slags avfallstekniker. Diskussioner om

policy och strategi för hantering och förvar av avfall är också en viktig del av avfallskommitténs verksamhet. Fig 2.3. visar huvudkomponenterna i avfallskommitténs program.

En rådgivande grupp PAAG (Performance Assessment Advisory Group) ger råd till avfallskommittén i frågor om säkerhetsanalys av slutförvar. Gruppen ger tekniska och vetenskapliga synpunkter på säkerhetsanalysstudier och ger förslag till NEAs insatser inom området. PAAG initierar också olika arbetsgrupper som behandlar t ex scenariefrågor.

Med anledning av de höga kostnaderna knutna till större fältförsök och undersökningar av förhållanden in situ, har en särskild rådgivande grupp ISAG (Advisory Group on In-Situ Research and Investigations for Geological Disposal) bildats för att samordna sådana arbeten. Gruppen redovisar pågående nationella arbeten och söker möjligheter för samarbete, ordnar seminarier om frågeställningar i samband med geologisk deponering m m.

"Probabilistic System Assessment Codes (PSAC) User Group" bildades 1985 för att utbyta information om och utveckla s k probabilistiska koder samt i framtiden verifiera dessa som används för att pröva funktion och säkerhet av olika metoder för avfallsdeponering. Nio medlemsländer deltar i detta arbete, i vilket NEAs databank används som hjälpmedel.

Två databaser inom NEA av intresse för avfallsfrågor är ISIRS (International Sorption Information Retrieval System) och TDB (Thermochemical Data Base). Den förra innehåller data om sorption och spridning av radioaktiva ämnen i geosfären. Där finns uppgifter från 10 medlemsländer om 3000 värden på fördröjningskoefficienter (K_d) för 18 element i 8 olika geologiska material. TDB innehåller viktiga termodynamiska data för ett antal kemiska föreningar av intresse. Båda är f n under uppbyggnad.

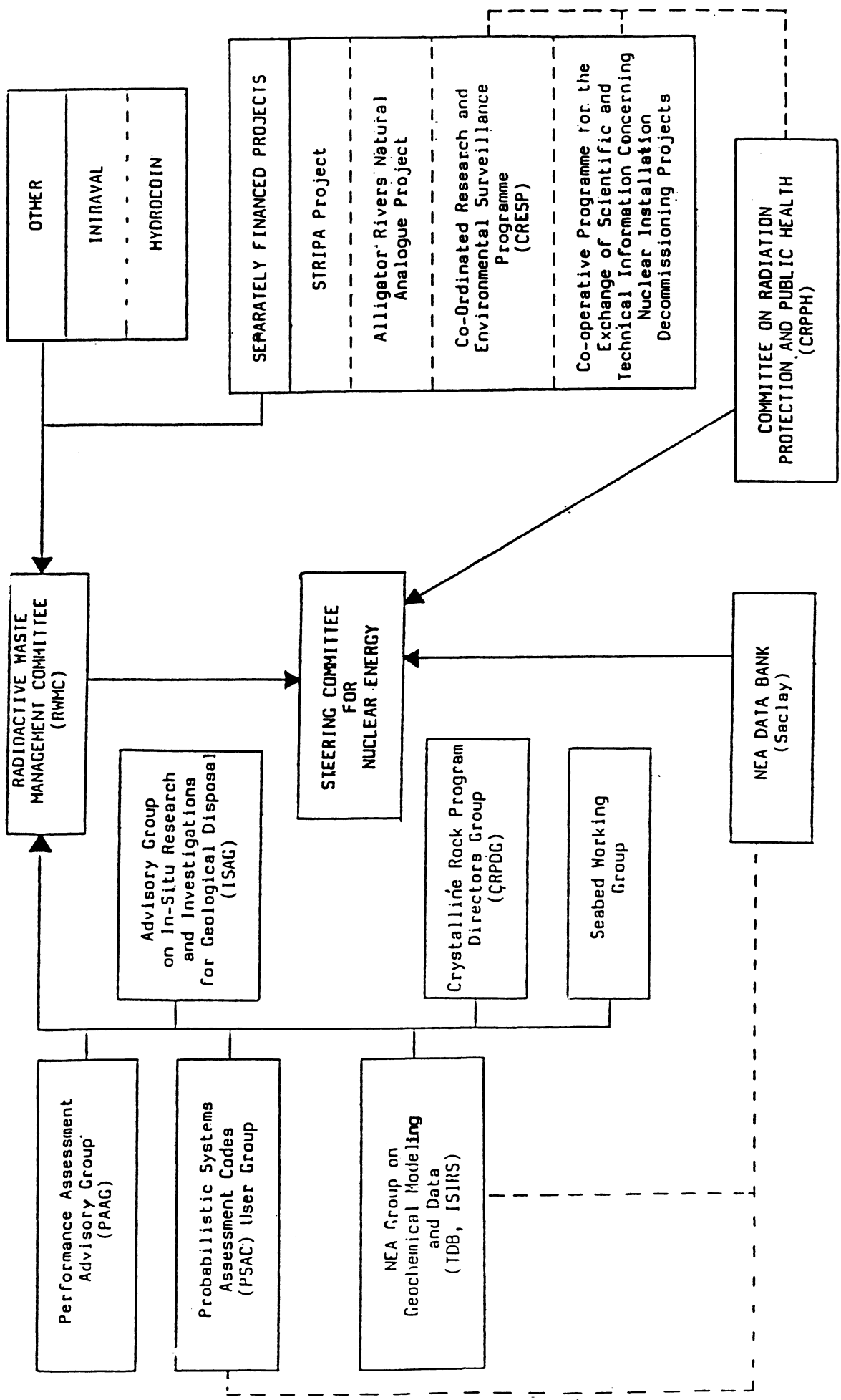
Seabed Working Group (SWG) har sedan 1975 studerat de tekniska möjligheterna och säkerhetsaspekterna vid placering av kärnavfall under havsbotten som ett alternativ till landbaserade förvar. Studien är nu avslutad och kommer att avrapporteras inom kort.

NEA deltar också genom sin avfallskommitté i en rad andra projekt, av vilka en del har nationell anknytning som t ex Stripa-projektet (se avsnitt 1.3.). Ett annat nyligen startat projekt i Australien är det s k Alligator Rivers Natural Analogue Project som skall studera naturliga analoger dvs hur naturligt radioaktiva ämnen uppträder framförallt i geosfären.

NEA deltar i projektsekretariatet för de två internationella projekten HYDROCOIN och INTRAVAL, som initierats och drivs av SKI. Härigenom får NEA och dess medlemsorganisationer insyn i projekten.

Co-ordinated Research and Environmental Surveillance Programme (CRESPE) bildades 1981 för att förbättra det vetenskapliga dataunderlaget vid beräkningar av konsekvenserna för människa

Fig 2.3. Skiss som visar NEAs kärnavfallskommitté med olika underorgan.



och djur av havsdumpningar av låg- och medelaktivt avfall i nordatlanten. Sedan något år tillbaka gör CRESP också på begäran av Pariskommissionen (sekretariat för Convention on the Prevention of Marine Pollution from Land-based Sources) beräkningar avseende konsekvenserna av landbaserade radioaktiva utsläpp.

Avveckling av kärntekniska anläggningar innebär hanteringsproblem av varierande karaktär och svårighetsgrad. NEA har en särskild grupp inom detta område för utbyte av erfarenheter från avvecklingsarbeten i 9 länder. Det tekniska och vetenskapliga utbytet resulterar bl a i en gemensam databas att kunna användas för framtida avvecklingar av kärnkraftverk.

NEA deltar också i ett flertal internationella program avseende verifiering och validering av beräkningsmodeller (jfr avsnitt 3).

2.6. Berggrundsundersökningar i Finland

Industrins Kraft AB (TVO) valde i april 1987 fem områden för undersökning av berggrunden. Bland dessa söker man en lämplig slutförvaringsplats i Finland för kärnkraftverkens i Olkiluoto använda uranbränsle. Områdena är Romuvaara i Kuhmo, Veitsivaara i Hyrynsalmi, Kivijärvenkangas i Sievi, Kivetty i Konginkangas och Olkiluoto i Euraåminne (se fig 2.4.). Från Lovisa kärnkraftstation återsändes det använda kärnbränslet till Sovjetunionen.

Urvalet av dessa fem områden skedde sedan TVO i slutet av år 1985 - utifrån en genomgång av geologiska faktorer och miljöfaktorer - hade presenterat en förteckning över 101 möjliga undersökningsområden. Som geologiska faktorer angavs berggrundens struktur, bergytans topografi, bergarter, grundvattenförhållanden och naturtillgångar. Som miljöfaktorer betecknades befolkningsförhållanden, transportmöjligheter, skyddsområden och grundvattenförekomster, markanvändningsplaner och markägförhållanden. Materialet om de 101 möjliga områdena hade sedan granskats av statliga myndigheter och diskuterats med företrädare för de berörda kommunerna.

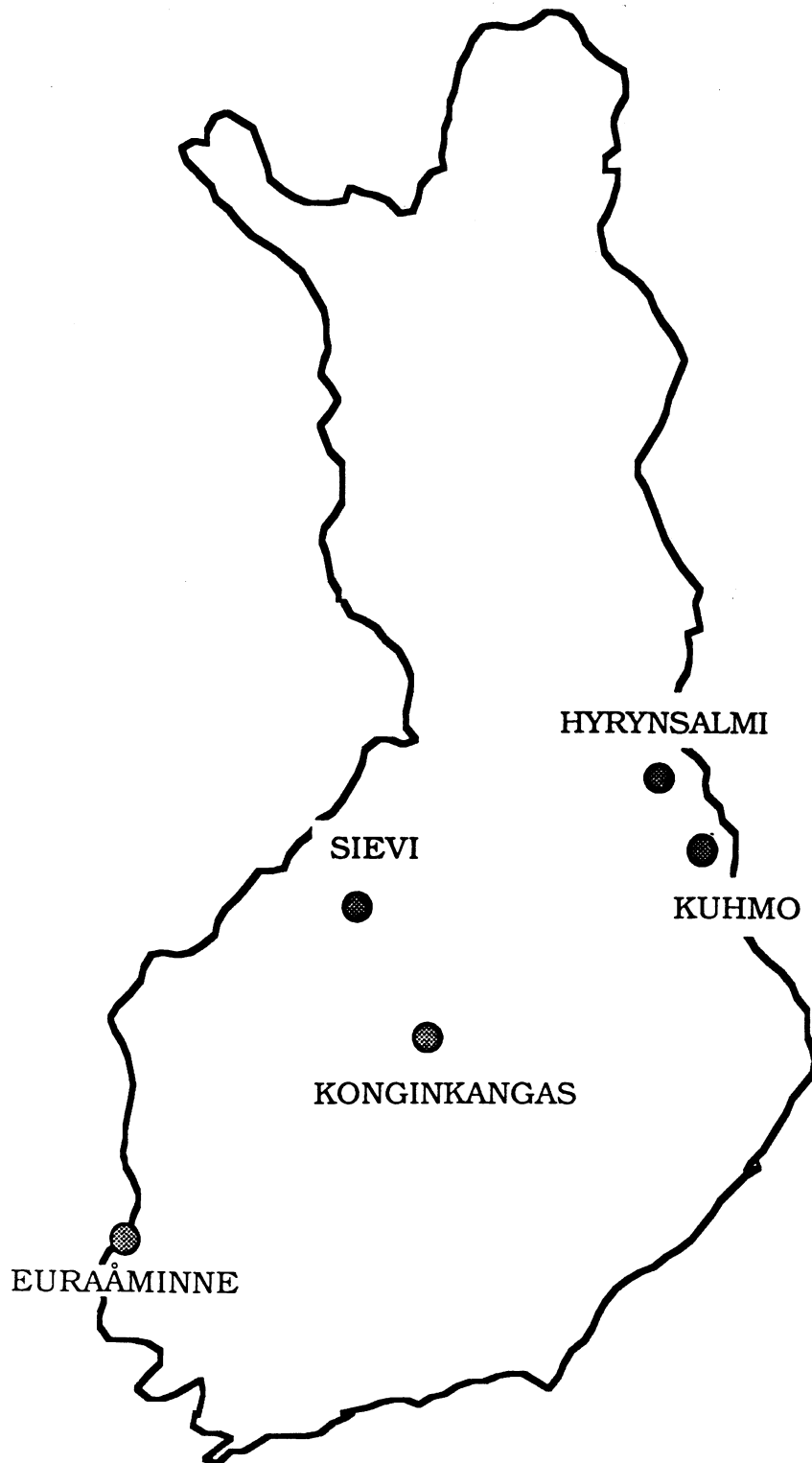
I Kuhmo och Hyrynsalmi påbörjades fältarbetena våren 1987. På båda områdena har man utfört geofysikaliska mätningar och geologiska kartläggningar på markytan. Det första djupgående hålet borrades i Kuhmo under juli - augusti månader. Hålets längd är ca 1000 meter. I slutet av augusti påbörjades borrhälsarbetet i Hyrynsalmi.

På båda områdena borrar 4-5 djupa (500-1000 m) och flera grunda hål. I dessa utförs mätningar och tas grundvattenprover. Undersökningen av ett område räcker under den här forskningsperioden 2-3 år och kostar ca 10 miljoner mark.

På de tre andra områdena påbörjas undersökningarna hösten 1987 med flygmätningar. De egentliga fältarbetena på dessa områden börjar år 1988.

Fig 2.4. Områden för berggrundsundersökningar i Finland för ett slutförvar för högaktivt kärnavfall inklusive använt kärnbränsle.

UNDERSÖKNINGSOMRÅDEN



Till stöd för undersökningarna har man upprättat platskontor i Kuhmo och Hyrynsalmi. Motsvarande kontor upprättas nästa år i Sievi och Konginkangas. Mellan TVO och de fem s k forskningskommunerna har man också inrättat samsamarbetsgrupper. I dessa går kommunernas och TVOs representanter igenom hur forskningarna framskrider samt övriga frågor, som berör kommunerna.

Avsikten är att på basis av forskningsresultaten år 1992 välja ut 2-3 områden för fortsatta undersökningar. Slutdeponeringsplatsen väljs år 2000. Vid behov börjar byggandet av förvaringsutrymmena år 2010 och deponeringen påbörjas år 2020.

2.7. Ny policy vad avser slutförvaring av lågaktivt avfall i Storbritannien

I Storbritannien har omhändertagandet av lågaktivt avfall tidigare skett antingen genom havsdumpning eller deponering på en markdeponeringsanläggning kallad Driggs utanför Sellafield. Sedan 1949 har totalt ca 75 000 ton innehållande 7×10^{14} Bq alfa-strålade ämnen och 4×10^{16} Bq andra ämnen havsdumpats. Dumpningarna har skett i överensstämmelse med reglerna i London Dumping Convention (LDC).

Efter en rekommendation från LDC om ett tillfälligt stopp av havsdumpning för utvärdering av konsekvenserna och protester från bl a det engelska sjöfolksförbundet har ingen dumpning skett under de senaste åren.

På anläggningen i Driggs har per år under perioden 1972-82 i genomsnitt deponerats $70\,000\text{ m}^3$ lågaktivt avfall innehållande 7×10^{13} Bq beta/gamma-strålade ämnen. Avfallet härrör huvudsakligen från verksamhet vid Sellafield.

Med tanke på osäkerheterna vad avser tillstånd för havsdumpning och det faktum att Driggsanläggningen inom en nära framtid är fylld påbörjade NIREX (Nuclear Industry Radioactive Waste Executive) under 1986 undersökningar vid 4 platser (Bradwell, Elstow, Fulbeck och South Killingholme) för ett nytt slutförvar för lågaktivt avfall. Våren 1987 fattades beslut om väsentliga ändringar ifråga om hanteringen av lågaktivt avfall. I skrivelse till miljöministern redogjorde NIREX för ett styrelsebeslut som kortfattat går ut på följande:

- Det pågående arbetet med de fyra platsundersökningarna avbryts omedelbart.
- Det lågaktiva avfallet skall samdeponeras med det medelaktiva avfallet i djupa förvar.
- NIREX omorienterar sina insatser mot att finna godtagbara djupa förvar.
- Anläggning i Driggs skall fortsättningsvis användas endast för avfall från Sellafield.
- Vissa typer av rivningsavfall kan senare eventuellt bli föremål för deponering i ytnära slutförvar.

Huvudskälet till omorienteringen anges vara nya ekonomiska utvärderingar enligt vilka deponeringskostnaderna för lågaktivt avfall i ett ytnära förvar skulle uppgå till mellan 500 och 1000 pund per kubikmeter medan marginalkostnaderna för samdeponering med medelaktivt avfall i djupa förvar skulle ligga i intervallet 750 till 1 200 pund per kubikmeter. Den lilla skillnaden skulle då inte motivera de större problemen med en ytnära deponering.

Miljöministern har i skrivelse den 1 maj 1987 godkänt NIREX förslag.

Med tanke på de stora osäkerheter som råder rörande möjligheten till havsdumpning innebär den nya strategin att allt lågaktivt avfall kommer att få mellanlagras under lång tid framöver eftersom något djupt förvar inte kommer att finnas ännu på många år. Detta kommer sannolikt att innebära att man i England måste satsa ytterligare på volymreduktion av kärnavfallet och uppförande av mellanförvar.

2.8. USAs platsvalsprogram

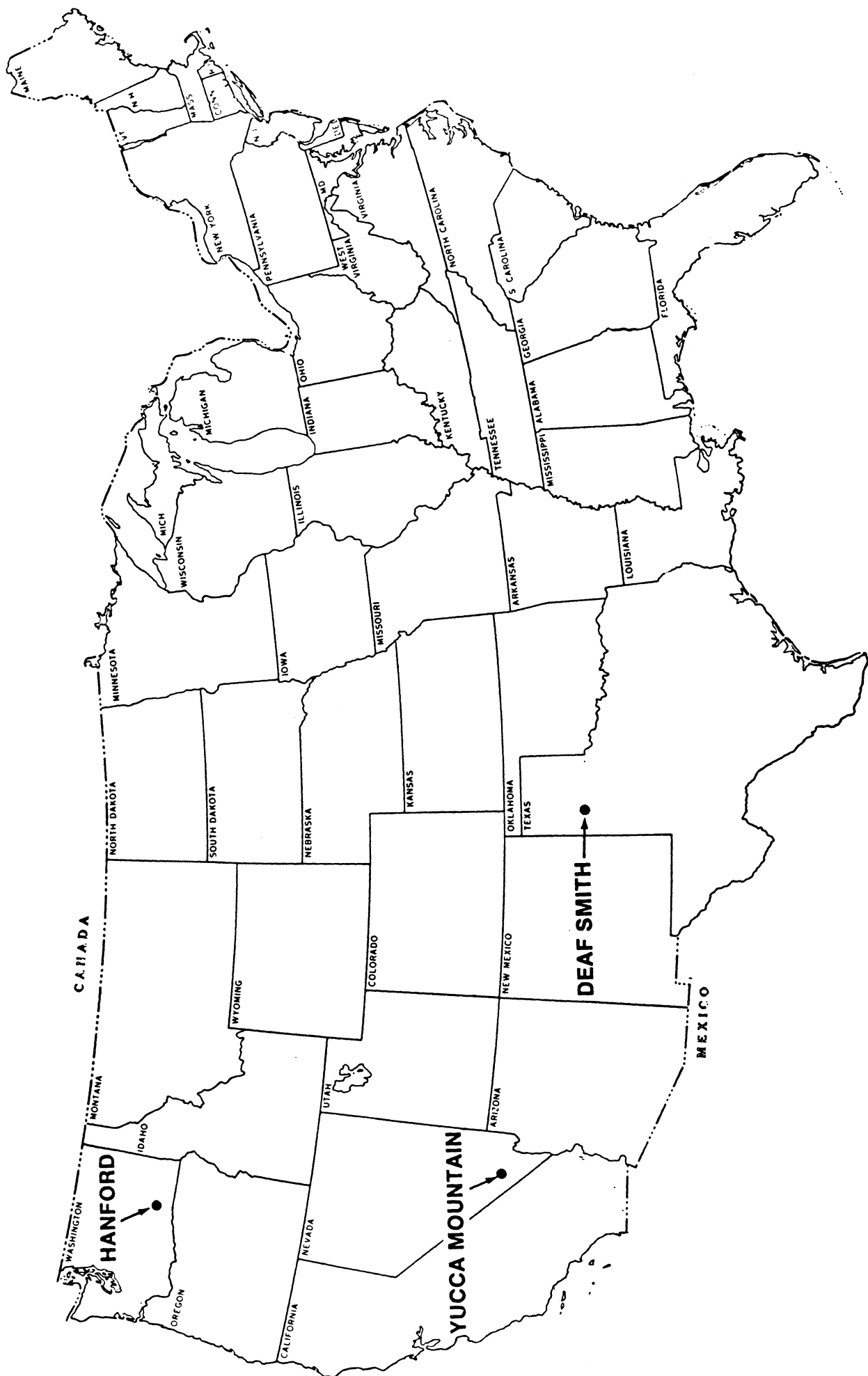
I USA har Department of Energy (DOE) programansvar för slutförvarsprogrammet medan Nuclear Regulatory Commission (NRC) är tillståndsgivande organ. År 1983 antog kongressen en plan, Nuclear Waste Policy Act, för DOEs arbete som bl a innehöll preciserade tidpunkter för alla steg i platsvalsproceduren. Ett grundläggande element i planen var att två slutförvar skall byggas varav det första skulle tas i drift år 1998 och det andra år 2006. Tanken var att det första förvaret skulle förläggas till en av ett antal möjliga platser i västra USA medan det andra skulle placeras i något område i östra delen av landet med kristallin berggrund.

För det första förvaret har DOE valt ut tre platser i olika geologiska formationer. På alla tre platserna planeras ingående platsundersökningar bl a utsprängning av undersökningsschakt. Platserna är Deaf Smith (saltformation i norra Texas), Yucca Mountain (bergsformation av vulkanisk aska, tuff, i Nevada) och Hanford (område med en hård vulkanisk bergart, basalt, i staten Washington) se fig 2.5.

Tidplanen i Nuclear Waste Policy Act har av många betraktats som orealistisk. DOE har nu i ett tillägg till sin Mission Plan förelagt kongressen ett förslag till modifierat tidsschema som innebär en förskjutning av tidplanen med fem år för det första förvaret. Av större betydelse är en minskning av arbetet med det andra förvaret innebärande en senareläggning till år 2023. Arbetet inför detta förvar föreslås också göras mer generellt än tidigare vilket innebär att platsspecifika undersökningar skjuts på framtiden. Vidare vidgas programmet till att omfatta också andra geologiska bildningar än kristallint berg.

I DOEs förslag anges ett antal skäl till förändringarna i planerna för det andra förvaret. Enligt DOE har behovet av ett tidigt andra förvar minskat bl a på grund av reviderade

Fig 2.5. Tänkbara platser för slutförvaring av högaktivt kärnavfall i USA.



prognoser för kärnavfallsproduktion och planerna för ett mellanlager för använt kärnbränsle.

2.9. Kanadensiska riktlinjer för slutförvaring

Den kanadensiska säkerhetsmyndigheten Atomic Energy Control Board (AECB) har våren 1987 utgivit riktlinjer för kärnavfallsförvaring. Riktlinjerna som finns angivna i ett 11 sidor långt dokument "Regulatory objectives, requirements and guidelines for the disposal of radioactive wastes - long-term aspects" är fokuserade på strålskydd. Riktlinjerna är i huvudsak härledda från ICRPs rekommendationer. Här behandlas tre punkter av speciellt intresse för den svenska debatten:

- För att minimera bördan på framtida generationer skall ett slutförvar enligt AECB inte utformas så att det nödvändiggör långvarig institutionell kontroll. Motiveringen är att sådan kontroll inte kan garanteras för längre tid än ett fåtal hundra år. Detta innebär emellertid inte att dokumentation om slutförvarsplatsen skall förstöras eller att övervakning inte är önskvärd.
- Riskerna för dödsfall från framtida effekter av ett slutförvar får för en individ beräkningsmässigt ej överstiga 10^{-6} per år. Med en riskfaktor av 2×10^{-2} dödsfall per Sv svarar detta mot en årlig stråldos av 0,05 mSv. Genom detta har man infört risk som kriterium.
- Vad gäller den svåra problematiken med långtidsperspektivet är innebörden att risk-kriteriet inte behöver tillämpas strikt för tidsperioder över 10 000 år. Om beräknad risk inte når sitt maximum före 10 000 år behöver även längre tider bedömas, dock med mindre starka krav på analysen.

2.10. Övrigt

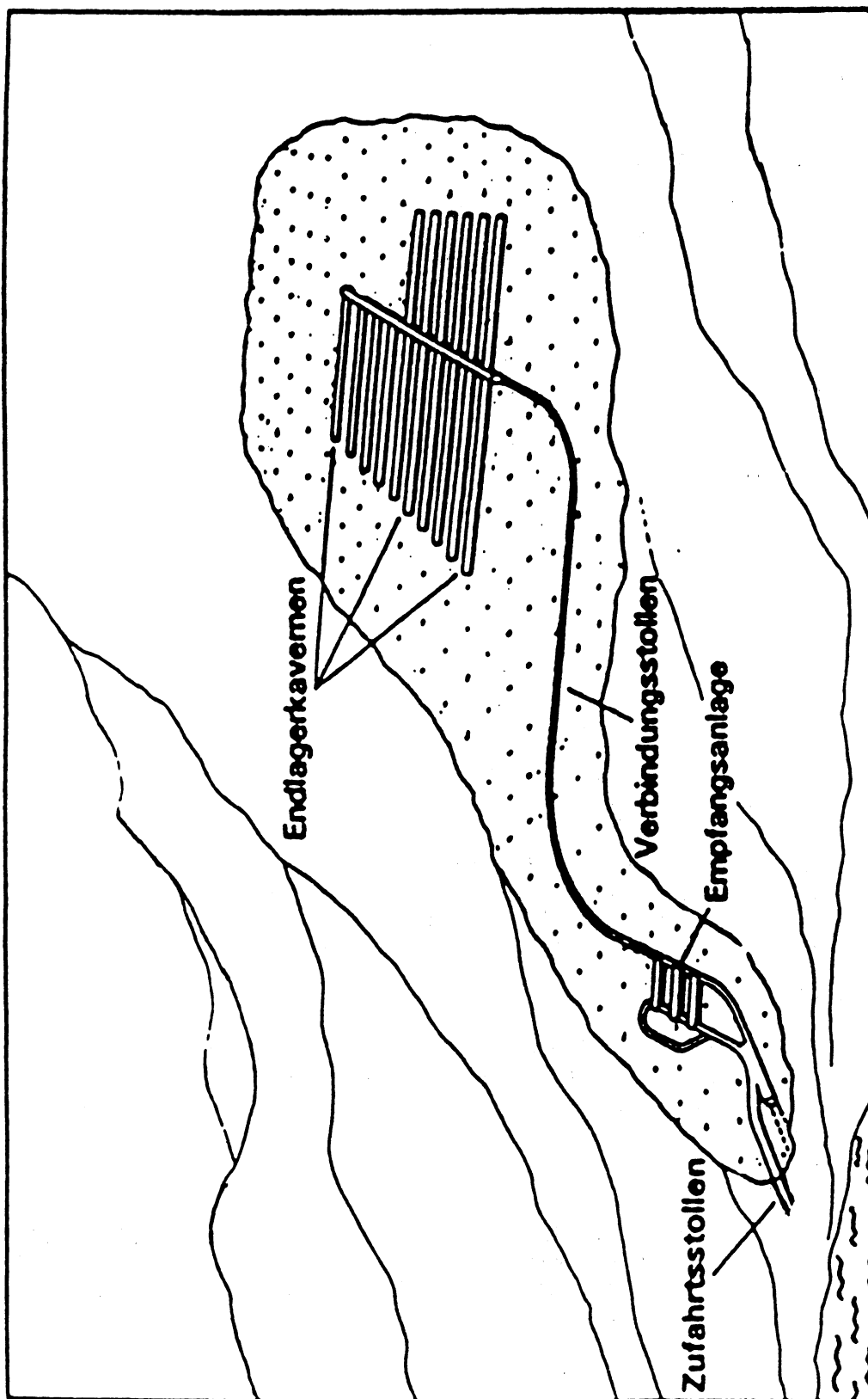
I Frankrike har under det gångna året ett andra slutförvar för lågaktivt kärnavfall beslutats förläggas till Aube i närheten av Soullaines-Dhuys ca 15 mil öster om Paris. Denna anläggning som skall tas i bruk år 1990 rymmer 1 miljon kubikmeter kärnavfall. Vad gäller slutförvaring av högaktivt kärnavfall avser man undersöka fyra olika miljöer granit, sedimentlera, bergsalt och lerskiffer. En granitformation nära Neuvy-Bouin i departementet Deux-Sevres har nyligen valts som en av provplatserna. Möjligheten för att ta emot icke upparbetat kärnbränsle i slutförvaret skall lämnas öppen.

I Argentina har den nationella Atomenergikommissionen utvalt en plats, Sierra del Medio i södra delen av landet, för fördjupade geologiska undersökningar. Om dessa visar goda geologiska och hydrologiska förhållanden avser kommissionen att där på ett djup av minst 100 m anlägga ett slutförvar för högaktivt avfall.

Även i Indien planeras ett slutförvar för högaktivt kärnavfall i en djup geologisk formation i södra delen av landet. Mellanlagring i 25 år förutses innan slutförvaring sker. En forskningsstation har upprättats i en gruva i Kolar nära Bangalore.

I Schweiz avses ett regeringsbeslut beträffande slutförvarings-system för kärnavfall att fattas vid årsskiftet 1987/88 på grundval av projekt Gewähr (garanterad säkerhet) som framtagits av Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiven Abfälle) (se fig 2.4.).

Fig 2.6. Genomskärning av planerat slutförvar för låg- och medelaktivt kärnavfall i Schweiz enligt Nagra. (I föregående års KASAM-rapport fig 23 visades Nagras förslag till slutförvar för högaktivt kärnavfall.)



3. NEDLÄGGNING AV KÄRNTEKNISKA ANLÄGGNINGAR

3.1. Inledning

Enligt instruktionen för Samrådsnämnden för kärnavfallsfrågor skall nämnden även behandla avveckling av kärntekniska anläggningar. Under 1990-talet planeras vissa svenska kärnkraftverk att tas ur bruk (jfr prop. 1986/87:159). Nämnden vill bl a av den orsaken i årets rapport ge en första översikt beträffande kunskapsläget inom området nedläggning av kärntekniska anläggningar.

3.2. Bakgrund

Livslängden på en kärnteknisk anläggning beror huvudsakligen på säkerhetsmässiga och ekonomiska överväganden, men kan även påverkas av t ex energi- och miljöpolitiska beslut. Enligt dagens bedömningar kan flera hundra kärnkraftverk runt om i världen bli aktuella för nedläggning före år 2025.

Målet för nedläggningsprocessen är att överföra anläggningen till ett sådant tillstånd som

- garanterar allmänhetens hälsa och säkerhet,
- ger minimal långsiktig påverkan på omgivningen och
- ej onödigtvis stör den fortsatta användningen av området.

Arbetet med nedläggningen skall ske på sådant sätt att den personal som är sysselsatt ej blir utsatt för onödig bestrålning. Det avfall som uppstår och som är sådant att det på grund av sitt innehåll av radioaktiva ämnen utgör en risk skall omhändertas efter samma principer som gäller för annat radioaktivt avfall, dvs placeras i slutförvar som är lämpligt för avfallet. Slutligen måste vid val av alternativa tekniska lösningar en avvägning göras mellan kostnaderna för alternativet och de fördelar alternativet medför.

En fullständig nedläggning av en kärnteknisk anläggning kan ske i flera etapper. IAEA har i ref 2 definierat tre stadier i nedläggningsförfarandet som vart och ett karakteriseras av anläggningens fysiska status och den övervakning som erfordras.

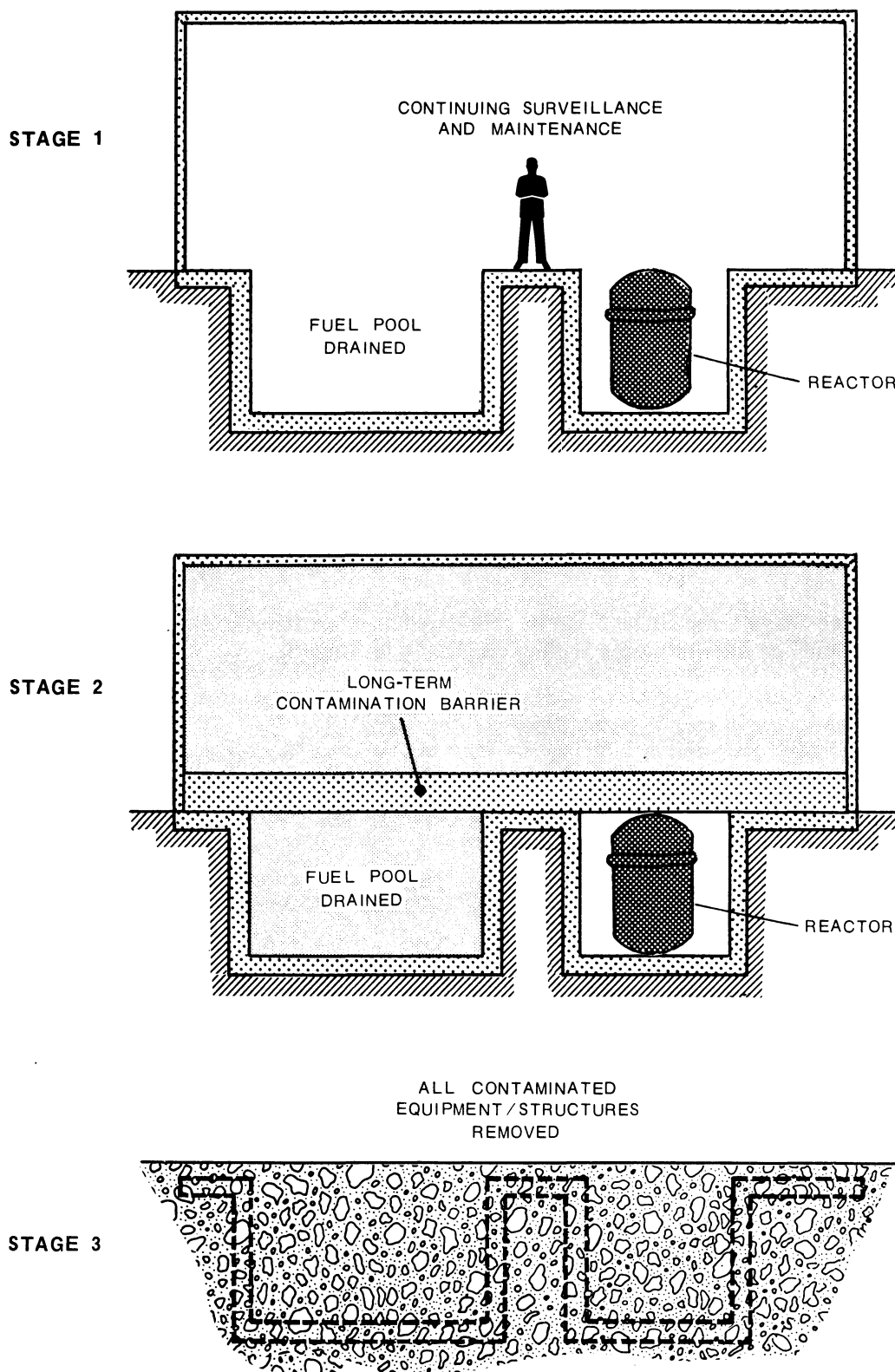
Stadium 1:

Bränslet och alla vätskor avlägsnas från reaktorn. Manöversystem bortkopplas. Atmosfären inom inneslutningen regleras. Tillträdet begränsas. Anläggningen övervakas och inspekteras periodiskt.

Stadium 2:

All utrustning som lätt kan demonteras avlägsnas. Alla radioaktiva ämnen koncentreras i minsta möjliga utrymme. Det behövs mindre övervakning än vid stadium 1, men det är önskvärt med fortsatt periodisk inspektion.

Fig 3.1. Skiss illustrerande de tre stadierna vid rivningen av en kärnreaktor (bild från NEA-översikt 1986 om nedläggning av kärntekniska anläggningar).



Stadium 3:

Allt radioaktivt material (över friklassningsgränser) avlägsnas. Området friklassas.

I fig 3.1 visas en skiss över de tre nedläggningsstadierna.

Det bör noteras att nedläggningen inte måste ske stegvis, det är t ex möjligt att gå direkt till stadium 3 (totalavveckling) eventuellt efter en kort period i stadium 1. Eller också kan det vara så att stadium 1 eller 2 måste förlängas avsevärt på grund av att det inte finns en lämplig anläggning för slutförvaring av det radioaktiva avfallet. De tidsperioder som internationellt diskuteras är 50 till 100 år för stadium 2. Slutmålet med all nedläggning av kärntekniska anläggningar i Sverige är att uppnå stadium 3.

Det finns idag erfarenheter från nedläggning och totalavveckling av mer än 20 reaktorer. Det har varit fråga om forsknings- och prototypreaktorer. Flera anläggningar har överförts till stadium 1 eller 2. Dessutom har ett antal bränsletillverknings- och uppberedningsanläggningar lagts ned. Tabell 1 ger en kortfattad översikt över reaktorer som år 1986 är totalavvecklade. Utöver de upptagna reaktorerna finns ytterligare ett antal totalavvecklade mycket små forskningsreaktorer. Uppgifterna är hämtade ur ref 2 som innehåller en fullständigare lista, vilken även inkluderar nedlagda reaktorer i stadium 1 och 2.

3.3. Teknik och avfall

Närvaron av radioaktiva ämnen innebär att speciella tekniker ibland måste tillämpas vid nedläggningsarbetet, speciellt vid rivningen, liksom särskilda skyddsåtgärder. Stora delar av hjälpsystemen och byggnaderna är emellertid icke radioaktiva och kan således rivas med konventionell teknik och vanliga skyddsinsatser. Uppskattningsvis är 2/3 av materialet, förutom betongen, icke-radioaktivt. För betongen är en större andel icke-radioaktiv.

Innan rivningen påbörjas måste en noggrann kartläggning av aktiviteten i anläggningen göras. Detta sker dels via teoretiska beräkningar dels via direkta mätningar i anläggningen. Arbetet är besvärligt och vad gäller mätningar kan det även resultera i icke oväsentlig bestrålning av personalen. Det är emellertid av stor vikt för ett framgångsrikt genomförande att en detaljerad och korrekt bild av aktivitetsfördelningen föreligger i samband med planeringsarbetet.

System- och komponentdekontaminering kan utföras som ett första steg i rivningen för att reducera strålnivåerna i olika delar av anläggningen och för att underlätta tillgängligheten. Dekontaminering kan också göras i stor omfattning för att möjliggöra friklassning av kontaminerat material. Eftersom systemen och komponenterna normalt inte skall återanvändas kan även aggressiva dekontamineringsmetoder tillämpas. Sådana metoder används idag och utveckling av nya pågår (ref 3). I Sverige har

Tabell 1 Förkortad förteckning över reaktorer som är totalav-
vecklade (stadium 3).

Anläggning	Land	Typ	Effekt MW	Avveckl. slutförd år	Komm.
1 Otto Hahn	FRG	PWR	15(e)	1982	Skepps- reaktor
2 Elk River	USA	BWR	24(e)	1974	Elprod.
3 PM-3A	Antarctica (USA)	PWR	9(e)	1975	Elprod.
4 Cesar	Frankrike	GCR	-	(1986)	
5 Minerve	Frankrike	LWR	1(t)	1977	
6 Pegase	Frankrike	LWR	35(t)	(1986)	
7 Zerlina	Indien	HWR	0	1983	
8 Nora	Norge	HWR	0	(1986)	
9 R-1	Sverige	HWR	1(t)	1983	
10 Ames	USA	HWR	5(t)	1981	
11 EBR-1	USA	FBR	-	1973	
12 SRE	USA	-	20(t)	1984	Natrium- kyld, grafit- modere- rad

(e) elektrisk effekt

(t) termisk effekt

Studsvik Energiteknik AB och ASEA-ATOM utvecklat en metod för dekontaminering av ånggeneratorer (ref 4) som skulle kunna få en vidare användning.

Vid arbete med reaktortanken och de interna delarna i tanken kommer emellertid strålnivån sannolikt att vara så hög att robotar eller annan fjärrmanövrerad utrustning måste användas. Det är här delvis frågan om likartad teknik som f n används vid underhållsarbeten på reaktorerna. Utveckling av tekniker speciellt anpassade till rivningsarbeten pågår internationellt (se t ex ref 2).

Den mängd radioaktivt avfall som uppstår i samband med rivning motsvarar storleksordningen vad som bildas under 30 års normaldrift. Dessutom tillkommer stora mängder inaktivt material, främst byggnadsmaterial (betong). Avfallet skiljer sig från driftavfallet på ett flertal punkter. Dels ingår stora mängder konstruktionsmaterial i form av metaller, främst stål och betong. Dels ingår relativt sett något mer långlivade radioaktiva ämnen främst som inducerad aktivitet i specialstål. Detta är främst i reaktortanken och de interna delarna i tanken. Bortsett från dessa, vilka innehåller den helt dominerande aktiviteten, är aktiviteten i de olika delarna jämförbar med den i det normala driftavfallet. Fig 3.2 visar en sammanställning av avfallsmängderna som uppstår i samband med rivning av de 12 svenska kärnkraftreaktorerna (ref 5). Totalvolymerna radioaktivt avfall, färdigbehandlat för slutförvaring, beräknas till ca 100 000 m³ från det svenska kärnkraftprogrammet.

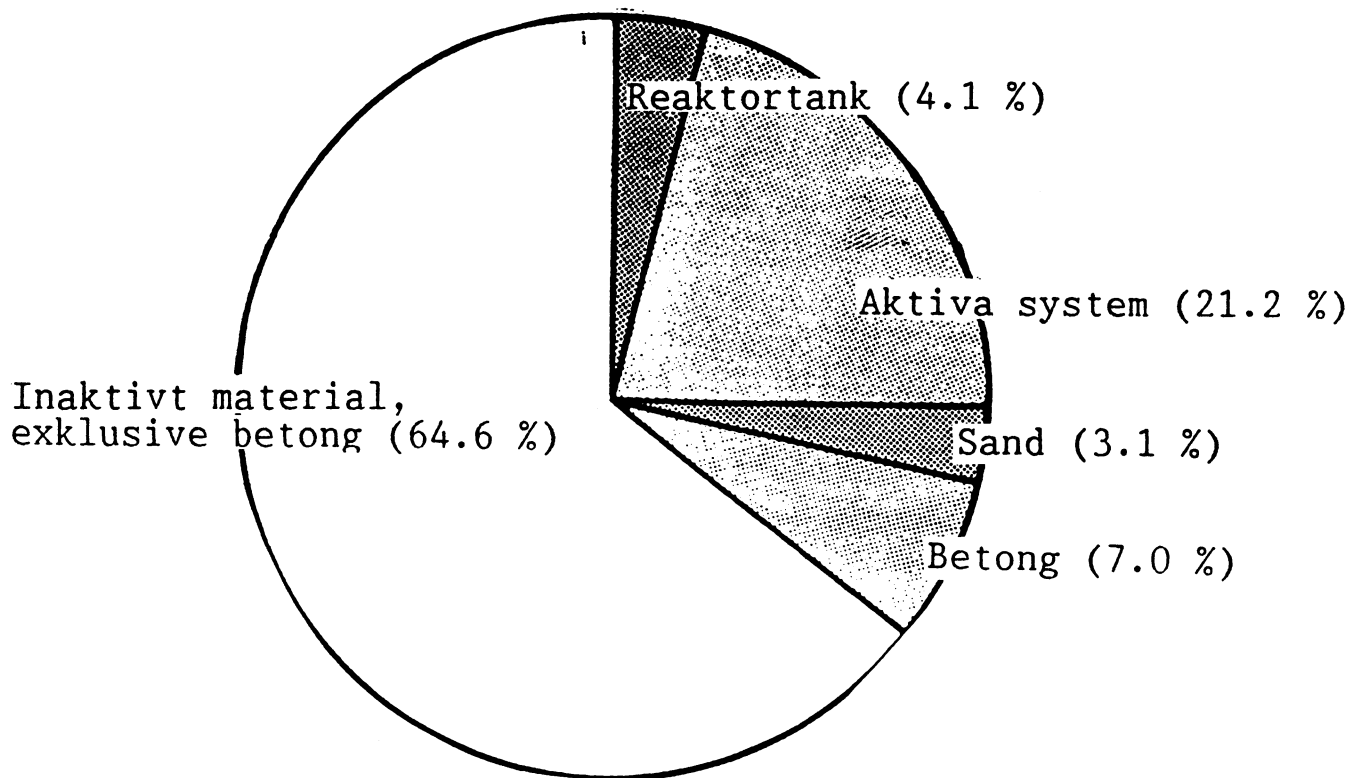
Med avseende på deponering kan avfallet klassificeras i

- 1) Avfall som kan friklassas för återanvändning (främst metallskrot).
- 2) Avfall som kan friklassas för användning som återfyllnad på platsen eller på kommunal soptipp (främst betongavfall).
- 3) Avfall som kan deponeras i förvar av SFR-1 typ (huvuddelen av det radioaktiva avfallet).
- 4) Avfall som måste deponeras i djupa geologiska förvar (främst ett antal komponenter från reaktorns inre delar).

3.4. Arbete inom IAEA

Sedan 1973 har IAEA arbetat med frågor inom nedläggningsområdet och har under de senaste fem åren kraftigt ökat sina insatser. Målet för insatserna är att utarbeta riktlinjer för nedläggningsarbete, söka uppnå internationellt accepterade rekommendationer men även att sammanställa tekniska uppgifter samt uppmuntra och stödja utvecklings- och forskningsarbete inom området. IAEA:s arbeten publiceras i form av "Guide Lines", "Recommendations", "Technical Reports" och "Technical Documents". Vidare arrangerar eller stöder IAEA symposier. De två senaste inom nedläggningsområdet är:

Fig 3.2. Avfallsmängder från rivning av de svenska kärnkraftreaktorerna (ref 5).



- 1982 International Decommissioning Symposium i Seattle, USA den 10 - 14 oktober 1982
- 1987 International Decommissioning Symposium i Pittsburgh, USA den 4 - 8 oktober 1987

På detta sätt bidrar IAEA till en kunskapsbas som systematiskt täcker de tekniska och andra frågor som kan uppkomma i anslutning till nedläggning av kärntekniska anläggningar.

Sedan 1973 när IAEA först inkluderade nedläggning inom sitt program har 10 tekniska rapporter utgivits. De tre senaste är:

- Decommissioning of Nuclear Facilities: Decontamination, Disassembly and Waste Management, Technical Report Serie No. 230, IAEA, Vienna (1983).
- Decontamination of Nuclear Facilities to Permit Operation, Inspection, Maintenance, Modification or Plant Decommissioning, Technical Report Series No. 249, Vienna, (1985).
- Methodology and technology of Decommissioning Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 267, Vienna, (1986).

För närvarande pågår arbete inom expertgrupper på följande rapporter:

- Methods for Reducing Occupational Exposures During the Decommissioning of Nuclear Facilities, Technical Report Series (draft 1986).
- Factors Relevant to the Recycle and Reuse of Components Arising from the Decommissioning of Nuclear Facilities, Technical Reports Series (draft 1986).
- Decontamination and Demolition of Concrete and Metal Structures During the Decommissioning of Nuclear Facilities, Technical Reports Series (draft 1982).
- Application of Exemption Principles to Recycle of Contaminated Material from Decommissioning of Nuclear Facilities, Technical Reports Series (draft 1987).
- Development of Regulatory Procedures for the Decommissioning of Nuclear Facilities (draft 1987).

IAEA:s rapporter tas fram efter gedigen och tidskrävande behandling av konsulter och i rådgivande kommittéer och expertkommittéer i flera omgångar. En "Technical report" kan ta tre till fyra år mellan det första utkastet och utgivning i slutversion. Rapporterna av typ "Guide Lines" och "Recommendations" är bra som referenser då de sammanfattar centrala och icke kontroversiella frågor inom olika ämnesområden. De tekniska rapporterna behöver inte bara ta upp frågor som det råder enighet om utan kan fritt redovisa tekniska frågor. På grund av den

långa tiden för färdigställande av rapporterna kan det emellertid hända att de senaste teknologiska nyheterna inte är medtagna. Svenska experter, både från myndigheterna och industrin, deltar aktivt i arbetet med framtagningen av dessa dokument.

3.5. Arbete inom EG

Inom den gemensamma marknaden (EG) är den kärnkraftbaserade delen av elproduktionen mer än 20%. Mer än 100 reaktorer är i drift. Det finns 10 nedlagda reaktorer, alla är små eller medelstora. Ingen av dessa har ännu totalavvecklats.

År 1979 startades ett första femårigt forsknings- och utvecklingsprogram om nedläggning av kärnkraftverk. Programmet hade en budget på 4,7 MECU (34 MSEK) och avrapporterades vid en konferens i Luxembourg, maj 1984 (ref 6). Samtidigt startades ett andra femårsprogram som är budgeterat på 12,1 MECU (88 MSEK). Det andra programmet innehåller följande moment:

A FOU-projekt

- Långtidshållbarhet för byggnader och system
- Dekontaminering i samband med nedläggning
- Demonteringsteknik
- Behandling av specifika avfall: stål, betong, grafit
- Stora behållare för aktivt rivningsavfall
- Uppskattning av mängd aktivt avfall vid rivning
- Inflytande av anläggningskonstruktion på rivning

B Identifiering av riktlinjer beträffande:

- Konstruktion och drift av kärnenergianläggningar för att förenkla deras framtida rivning
- Rivning av kärnenergianläggningar så att man kan börja arbeta med en gemensam EG-policy i detta område

C Provning av ny rivningsteknik i verkliga förhållanden i samband med storskaliga rivningsprojekt inom medlemsländerna

3.6. OECD/NEAs program

Inom OECD/NEA är arbetet främst koncentrerat till det i slutet av 1985 etablerade "OECD/NEA Co-operative Programme on Decommissioning". Programmet syftar till att utväxla teknisk information om ett antal större rivningsprojekt. Deltagande organisationer liksom vilka reaktorer som ingår i studien framgår av tabell 2.

SKB har åtagit sig programmets koordineringsfunktion med Shankar Menon, Studsvik Energiteknik AB, som programkoordinator.

Inom programmet utbyts teknisk information vid möten inom den s k Technical Advisory Group (TAG) eller vid speciellt anordnade Workshops. Varje möte/Workshop skall ha ett projekt som diskussionsobjekt.

I lägesrapporter, den senaste från december 1986 (ref 7) sammanfattas läget för varje deltagande projekt. Aspekter av speciellt intresse påpekas. Lägesrapporten beskriver mer i detalj de projekt som har behandlats vid TAG-möten eller Workshop.

Tidigare har OECD/NEA arrangerat en workshop för att diskutera frågor kring hur lång tid som skall förflyta mellan avställning av en reaktor och den slutliga nedmonteringen av anläggningen. Något ställningstagande i frågan gjordes inte, men de framförda argumenten finns redovisade i en rapport från mötet (ref 8).

3.7. Arbete inom USDOE

De största forsknings- och utvecklingsinsatserna liksom erfarenheterna av nedläggning av kärntekniska anläggningar finns i USA där ansvaret för insatserna åvilar Department of Energy (US DOE).

I USA bedrevs tidigt omfattande experimentell verksamhet som inkluderade kärntekniska anläggningar både inom det militära och civila programmet. Många tidiga nedläggningar av sådana anläggningar skedde inte på ett sätt som idag betraktas som acceptabelt. USDOE har därför tre stycken "Uppstädningsprogram" löpande

UMTRAP (Uranium Mill Tailings Remedial Action Program)
GJRAP (Grand Junction Remedial Action Program)
FUSRAP (Formerly Utiliced Sites Remedial Action Program)

UMTRAP syftar till att identifiera och rensa upp de privatägda anläggningar i vilka uran koncentrerades från uranmalm och som främst användes före 1970. UMTRAP omfattar 24 f d koncentratverk samt över 8 000 egendomar som möjligen kan vara kontaminerade med restprodukter från verken. Den av kongressen godkända programtiden slutar år 1990. Ett förslag till förlängning till 1993 har framtagits.

Mellan 1951 och 1970 drevs ett koncentratverk för uranmalm i Grand Junction, Colorado. Flera hundratusen ton malmrester utnyttjades under åren mellan 1952 och 1966 som fyllnadsmaterial i samband med hus- och kontorsbyggen i Grand Junction med omnejd. År 1972 startades upprensningsprogrammet vid Grand Junction, vars huvudmål är att minska radongasemissioner i bostadshus i Mesa County, Colorado, till acceptabla nivåer.

Tabell 2 Förteckning över organisationer som deltar i OECD/NEA Cooperative Programme on Decommissioning samt de reaktorer som ingår.

Land	Organisation	Reaktor	Driftperiod
Canada	Atomic Energy of Canada Limited	Gentilly-1	1970-79
Väst- tyskland	Kernkraftwerk Lingen jointly with Kernforschungszentrum Karlsruhe	Kernkraft- werk Niederaich- bach	1972-74
		Kernkraft- werk Lingen	1968-77
Frankrike	Commissariat à l'Energie Atomique	Rapsodie	1967-82
		G 2	1958-80
		AT 1	1969-79
Italien	Ente Nazionale per l'Energia Elet- trica jointly with Comitato Nazio- nale per la Ricerca e per lo Svi- luppo dell'Energia Nucleare e delle Energie Alternative	Garigliano	1964-78
Japan	Japan Atomic Energy Research Insti- tute	Japan Power Demonstration Reactor (JPDR)	1963-76
Spanien	Junta de Energia Nuclear		
Sverige	Svensk Kärnbränslehantering AB	(Programkoordinator)	
Storbrita- nien	United Kingdom Atomic Energy Authority	Windscale Advanced Gas Cooled Reactor	1962-81
USA	Department of Energy	Shippingport	1957-82
		West Valley Demonstra- tion Project	1966-72

Programmet väntas vara klart under 1987, med verifikationsmätningar under 1988.

FUSRAP:s huvudmål är att "städa upp" vid de anläggningar som drevs av Manhattan Engineering District och Atomic Energy Commission. Många av dessa användes under fyrtio- och femtiotalet för behandling och förvaring av uran och tritium.

Förutom uppställningsprogrammet löper även inom USDOE ett program SFMP (Surplus Facilities Management Program). Detta syftar till att avveckla och riva ett 35-tal laboratorier och reaktorer som inte längre används. Ett av de största projekten inom detta program är rivningen av Shippingportreaktorn. Denna reaktor är ungefär lika stor som Ågestareaktorn och har även för övrigt många konstruktionsmässiga likheter.

SFMP beräknas avslutat i början av 1990-talet.

Förutom i USA finns även stor erfarenhet av praktiskt nedläggningsarbete i Frankrike och på senare tid även i Västtyskland och Japan. I Frankrike och Japan pågår ett omfattande forsknings- och utvecklingsarbete.

3.8. Den svenska situationen

3.8.1. Allmänt

I Sverige finns erfarenhet av avveckling av ett antal mindre kärntekniska anläggningar av vilka forskningsreaktorn R-1 vid Drottning Kristinas väg (Stockholm) är den största. Vidare är Ågestareaktorn avställd och befinner sig i stadium 1, dvs lös aktivitet är borttagen och anläggningen är föremål för kontroll och inspektion.

En förteckning över de i Sverige nedlagda kärntekniska anläggningarna visas i tabell 3.

Erfarenheterna, om än begränsade på grund av att de nedlagda anläggningarna var små, har varit goda. Detta framgår bla av rapporter till strålskyddsinstitutet och andra rapporter t.ex den över erfarenheterna från rivningen av R-1 reaktorn (ref 9). Fig 3.3 och 3.4 visar arbetet med R-1 reaktorns rivning.

Inom Sverige bedrivs för närvarande ett relativt litet FoU program vad avser nedläggning av kärntekniska anläggningar. SKB deltar i OECD/NEA programmet som samordnare och kan på det sättet tillgodogöra sig en stor del av det internationella arbetet på området. Dessutom görs vissa översiktliga studier av teknik för nedläggning av de svenska kärnkraftreaktorerna och kostnaderna för detta (ref 5). Vattenfall och Studsvik har gjort preliminära studier av rivning av Ågestareaktorn.

Värdefull erfarenhet och kunskap erhålls även från större modifieringar och ombyggnadsarbeten som sker vid kärnkraftverken.

Tabell 3 Nedlagda kärntekniska anläggningar i Sverige

<u>Anläggning</u>	<u>Friklassade år</u>
Pu-laboratorium FOA	1972
Laboratorie- och pilotanläggning för uranframställning i Vinterviken och vid Lövholmsvägen i Stockholm	1973
Forskningsreaktorn R-1 vid Drottning Kristinas väg i Stockholm	1984
Nolleffektsreaktorn RO i Studsvik	1984
Nolleffektsreaktorn KRITZ i Studsvik	1984
Materialtestlaboratoriet (alfa-lab) i Studsvik	1985
Anläggning i Studsvik för rening av tungt vatten och jonbytare från Ågesta reaktorn	1986

Utöver ovanstående har även nedläggning skett av de anläggningar för provbrytning av uran som skett vid Kvarntorp i Närke och Ranstad i Västergötland.

För eventuell användning i samband med ånggeneratorbytet i Ringhals har Studsvik och ASEA-ATOM i samarbete med Vattenfall, SKI och SSI utprovat en nyutvecklade dekontamineringsmetod som skulle kunna få användning även i samband med nedläggning av kärntekniska anläggningar (ref 4).

Strålskyddsinstitutet har delvis i samarbete med NKA (Nordiska kontaktorganet för atomenergifrågor) initierat projekt vad gäller aktivitetsinventarier, transport och deponeringsfrågor. Ett första utkast till en myndighetssyn har gjorts av SSI vid det tidigare nämnda IAEA-symposiet i Pittsburgh i oktober 1987(ref 10).

3.8.2. Nedläggningskostnader och finansiering

I betänkandet Samordnad kärnavfallsforskning (ref.11) ges bakgrunden till den svenska modellen för finansieringen av kostnaden för rivning av kärnkraftverk.

SKB presenterade i maj 1986 en utredning kallad "Teknik och kostnader för rivning av svenska kärnkraftverk" (ref 5). Kostnaden för att riva en kokarvattenreaktor (BWR) av Ringhals 1 storlek har enligt denna studie beräknats till ca 540 Mkr i 1986 års penningvärde och för en tryckvattenreaktor (FWR, Ringhals 2) till 640 Mkr. För övriga svenska kärnkraftverk ligger kostnaderna i intervallet 410-760 Mkr. Till dessa kostnader skall läggas kostnaderna för att transportera bort och slutförvara rivningsfallet, ca 100 000 m³. Dessa kostnader har beräknats till totalt 600 Mkr.

Ytterligare kostnader tillkommer för avställningsperioden från det att kärnkraftverket tas ur drift till dess att rivningsarbetet påbörjas. En uppskattning av dessa kostnader vid fördröjd rivning anges ligga i storleksordningen 2-3 Mkr/år och reaktorstation. Dessa kostnader utgörs bl a av kontinuerlig bevakning.

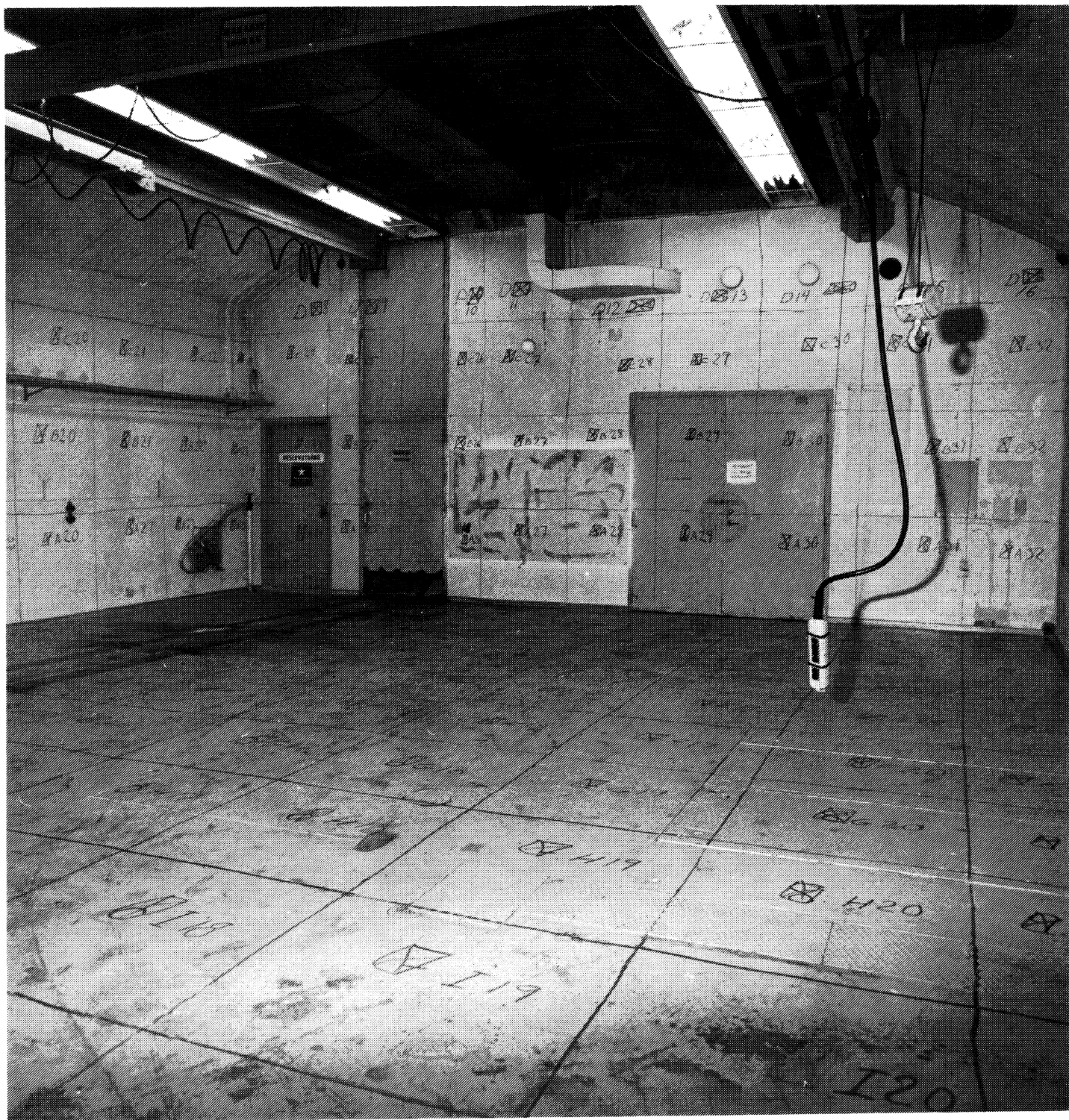
Studsvik Energiteknik AB har granskat SKBs undersökning och gjort jämförelser med motsvarande kostnadsbedömning 1979. Den dominerande kostnadstypen anges vara erforderlig mantid. Kostnader per mantidstimme är därför en väsentlig faktor som borde följas upp. Sammanfattningsvis ger granskningen inte anledning att peka på omständigheter eller faktorer som skulle kunna orsaka kraftiga avvikelser i förhållande till de kostnader som SKB redovisat.

SKB påpekar också att det finns ett restvärde i reaktorläggningarna. Det finns stora mängder material och utrustning som kan säljas i samband med att anläggningarna läggs ned och rivs. Det är bl a reservdelar, rörmaterial, verkstadsutrustningar, etc. En försiktig bedömning av restvärdet på material vid Oskarshamnverket anges till ca 230 Mkr, och totalt för alla kärnkraftverk i Sverige till ca 900 Mkr.

Fig 3.3. Arbete med rivning av grafitreflektorn som var belägen runt reaktortanken till R1-reaktorn i Stockholm. Under arbetet måste personalen på grund av dammriskerna vara iförd andningsskydd, vilket framgår av figuren.



Fig 3.4. Sedan allt radioaktivt material bortförts vid R1-reaktorn i Stockholm och anläggningen rengjorts måste en slutavmätning göras. Figuren visar en del av reaktorhallen klar för slutlig avmätning. Rutmönstret används som koordinatsystem för att lokalisera de enskilda mätpunkterna.



I SKB plan 87, Kostnader för kärnkraftens radioaktiva restprodukter anges kostnader för avställningsdrift i 1987 års penningvärde totalt till 905 Mkr och för rivning av kärnkraftverk till 7 020 Mkr, dvs totalt till 7 925 Mkr. Beräkningarna grundas på att samtliga reaktorer drivs t o m år 2010.

I en kompletterande beräkning av kostnaderna för det fall varje kärnkraftblock drivs i 25 år ökar de uppskattade kostnaderna för avställningsdriften till 1 496 Mkr. Kostnaderna för rivning beräknas även i detta fall till 7 020 Mkr. De totala nedläggningskostnaderna beräknas sålunda till 8 516 Mkr.

Fördelat på varje företag redovisas kostnader till följande belopp (varje verk drivs i 25 år) i Mkr

	Avställnings- drift	Rivning av kärnkraftverk	Summa
Barsebäck	205	997	1 202
Ringhals	500	2 017	2 517
Oskarshamn	338	1 710	2 048
Forsmark	453	2 296	2 749
	1 496	7 020	8 516

De sammanlagda framtida kostnaderna för att omhänderta och slutförvara kärnavfallet och avveckla anläggningarna beräknas enligt SKB till ca 37 miljarder kr, räknat på 25 års drifttid. Kostnaderna för avställningsdriften och rivningen utgör ca 23 % av detta belopp.

Den avgift som kärnkraftföretagen betalar enligt finansieringslagen för att avveckla kärnkraften uppgår f n i genomsnitt till 1,9 öre per kWh. Av detta belopp kan sålunda ca 0,4 öre per kWh beräknas utgöra avgift för avställningsdrift och rivning.

3.9. Sammanfattning

I denna rapport har givits en kortfattad redovisning om pågående arbeten rörande nedläggning av kärntekniska anläggningar inom ett antal internationella organisationer samt i USA.

Mer än tjuugo forsknings- eller prototypreaktorer har totalavvecklats, dvs allt radioaktivt material har avlägsnats från förläggningsplatsen. Många flera har lagts ned i stadier som är förberedande till totalavveckling. Dessutom har det rivits anläggningar där kärnbränsle har tillverkats eller upparbetats.

Det kan konstateras att den teknisk-vetenskapliga kunskapen finns i dag för nedläggning och rivning av kärntekniska anläggningar. Erfarenheter med rivning har hittills inte avslöjat några nya problem av principiell karaktär att lösas.

I Sverige har forskningsreaktorn R1 i Stockholm rivits och lokalerna friklassats från strålskyddssynpunkt för annan användning. Ågestareaktorn har efter avställning överförs till det som betecknats som stadium 1. Vidare har ett antal mindre

anläggningar totalavvecklats. Ett första utkast till myndighetssyn på området har presenterats på ett internationellt symposium i oktober 1987.

Vad gäller forskningsinsatser har från svensk sida endast ett relativt blygsamt program initierats och genomförts. Tonvikten har lagts vid att följa den internationella utvecklingen. Den svenska policyn att främst följa de stora internationella projekten och endast i mindre omfattning göra egna forskningsinsatser måste betecknas som acceptabel. Det kan emellertid trots detta finnas skäl att framledes öka de svenska insatserna.

Vad gäller de fortsatta insatserna inom det tekniska området bör arbetet främst syfta till att ge en bättre detaljkunskap som möjliggör en optimering av nedlägningsinsatserna för olika reaktortyper och individuella reaktorer - med hänsyn taget till de nationella förhållandena. Vidare bör arbetet med ökat internationellt samförstånd i principfrågor och allmänna riktlinjer fortsätta. De konkreta rivningsprojekt som pågår liksom de pågående internationella organens, främst IAEA och OECD/NEA, arbeten kommer säkerligen att lämna värdefulla bidrag till den samlade bas av kunskap som skall göra det möjligt att riva de svenska kärnkraftverken på ett från säkerhets- och strålskyddssynpunkt tillfredställande sätt.

REFERENSER

- Ref 1 International Atomic Energy Agency, Decommissioning of Nuclear Facilities, IAEA-TECDOC-179, IAEA, Vienna 1975.
- Ref 2 International Atomic Energy Agency, Methodology and Technology of Decommissioning Nuclear Facilities, Technical Reports Series No 267, IAEA, Vienna 1986.
- Ref 3 International Atomic Energy Agency, Methodology and Nuclear Facilities to permit Operation, Inspection, Maintenance, Modification or Plant Decommissioning, Technical Reports Series No 249, IAEA, Vienna 1985.
- Ref 4 S Menon, H Christensen och P-O Andersson: Dekontaminering av Ånggeneratorer, Tillämpningsstudie för dekontaminering av ånggeneratorer i kärnkraftverket Ringhals 2. Gemensam rapport från Studsvik Energiteknik AB, AB ASEA-ATOM och Statens Vattenfallsverk, daterad 1985-10-25.
- Ref 5 Svensk kärnbränslehantering AB, Teknik och kostnader för rivning av svenska kärnkraftverk, SKB, Stockholm 1986.
- Ref 6 Commission of the European Communities, Decommissioning of Nuclear Power Plants, Proceedings of a conference in Luxembourg 22-24 maj 1984.
- Ref 7 S Menon och S Kärker, OECD/NEA Cooperative Programme on Decommissioning, Lägesrapport december 1986. SKB arbetsrapport 86-20.
- Ref 8 Organisation for Economic Cooperation and Development, Nuclear Energy Agency, OECD/NEA; Storage with Surveillance Versus Immediate Decommissioning for Nuclear Reactors, Proceedings of an NEA Workshop in Paris 22-24 October 1984, OECD Paris 1985.
- Ref 9 S Kärker, T Dahlgren, L Devell, L Andersson, O Sundgren, S Ervik och C O Widell. Rivning av Forskningsreaktorn R1 i Stockholm, Studsvik report NW-84/627, Studsvik 1985.
- Ref 10 C Bergman, R Boge and J O Snihs: Decommissioning Policy in Sweden (To be published in proceedings from the decommissioning symposium in Pittsburgh October 1987).
- Ref 11 Betänkandet Samordnad kärnavfallsforskning, SOU 1984:76.

4. METODER FÖR SÄKERHETSANALYS

Systemanalys är den allmänna benämningen på det arbetssätt där man med hjälp av modeller och analytiska metoder beskriver ett system. Systemanalytiska metoder används inom:

- Säkerhetsanalys när syftet är att utvärdera säkerheten av ett system.
- Konsekvensanalys när syftet är att utvärdera konsekvenserna av ett system.
- Funktionsanalys när syftet är att beskriva funktionen av ett system.

Även om dessa begrepp har något olika innebörd används för enkelhetens skull i detta avsnitt genomgående begreppet säkerhetsanalys (se vidare bilaga 4 i föregående års KASAM-rapport).

4.1. Inledning: Modellbegreppet

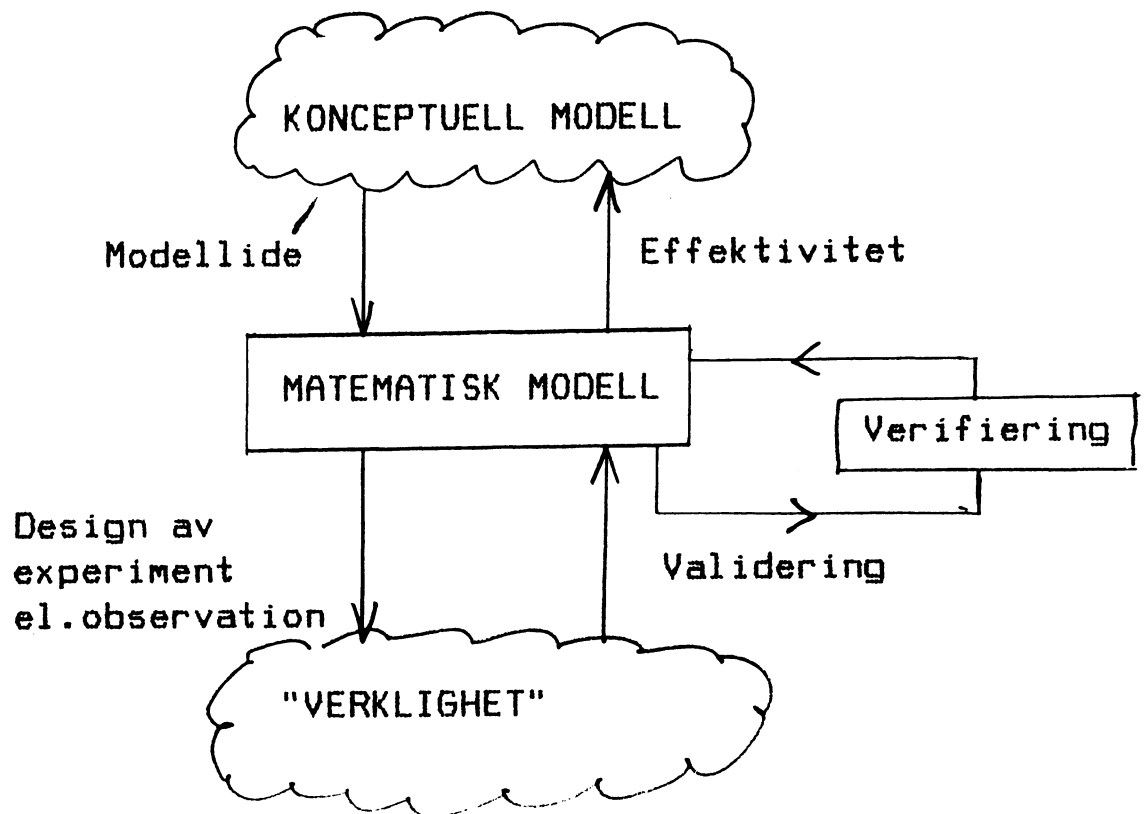
Olika typer av radioaktivt avfall ställer olika krav på ett slutförvar. Ju större aktivitetsmängder och ju mer långlivat avfall som skall förvaras, desto större krav ställs på slutförvarets förmåga att förhindra eller begränsa utläckaget av radioaktiva ämnen till omgivningen under långa tidsrymder - tusentals till hundratusentals år.

Det är självklart att bedömningar av ett sådant slutförvars funktion under så lång tid inte kan bygga på faktiska drifterfarenheter av liknande anläggningar. I stället får vi utifrån vår kunskap om naturlagarna och de kemiska och fysikaliska processer som styr utläckaget av radioaktiva ämnen (radionuklider) formulera matematiska modeller som beskriver dessa processer där modellen är en förenkling av verkligheten. Med hjälp av dessa modeller försöker vi beräkna så väl som möjligt hur förvaret förväntas fungera under långa tidsrymder och vilka hälso- och miljörisker det kan medföra. Det är ett väl etablerat arbetssätt inom naturvetenskaperna att med hjälp av matematiska modeller beskriva och förutsäga uppträdandet hos komplicerade system. Ett tidigt vetenskapshistoriskt exempel är hur man med hjälp av Newtons rörelselagar kunde bygga en matematisk modell av solsystemet som i detalj kan förutsäga planeternas - och även rymdfarkosternas - rörelser.

De moderna datorernas kapacitet har gjort det möjligt och meningsfullt att bygga numeriska modeller och göra beräkningar över allt mer komplicerade system. Därmed blir det också mer komplicerat att kontrollera att modellen ger en rättvisande beskrivning av de verkliga förloppen och vilka begränsningar som modellen har därvidlag. I princip ingår följande steg i utveckling och användning av modeller för beräkningar av hur komplicerade system uppträder:

- Man bygger först upp en begreppsmässig (konceptuell) bild av det förlopp man vill studera (t ex hur grundvatten strömmar genom sprickigt berg), vilka faktorer som kan

Fig 4.1. Skiss över sambandet konceptuell (begreppsmässig) modell och verklighet. Validering är i denna bild något som endast kan ske av en matematisk, kvantitativ modell. Validering innebär att man kontrollerar att den matematiska modellen korrekt förutsäger resultatet av experiment eller utfallet av observationen. När den matematiska modellen har validerats med framgång kan man med fog påstå att den konceptuella modellen representerar en fungerande (effektiv) bild av verkligheten. I den vetenskapliga litteraturen ser man denna process genom att man mer och mer övergår från att diskutera den konceptuella modellen till de matematiska modellerna. Den konceptuella modellen har fått karaktär av paradigm och alla som arbetar inom ämnet anses vara så väl förtrogna med den att den inte längre uttryckligen behöver refereras i ett vetenskapligt arbete. En arbetar man inom säkerhetsanalysen för ett slutförvar parallellt med flera olika konceptuella modeller.



påverka denna strömning (t ex tryck, bergets sprickighet m m) samt hur dessa faktorer kan förändras över tiden.

- Man bygger sedan upp en matematisk modell av förloppet, stödd på kända formler och samband för olika delförlopp. Den matematiska modellen överförs vanligen till ett datorprogram för de siffermässiga beräkningarna.
- Datormodellen verifieras, dvs man kontrollerar att den gör sina beräkningar på ett matematiskt korrekt sätt.
- Man validerar modellen, dvs försöker kontrollera att den beskriver verkliga förlopp på ett tillfredställande sätt. Man jämför då det resultat som räknas fram med hjälp av modellen med resultat från laboratorieförsök, fältförsök och med data från verkliga förlopp i naturen, t ex s k naturliga analoger (se avsnitt 5).

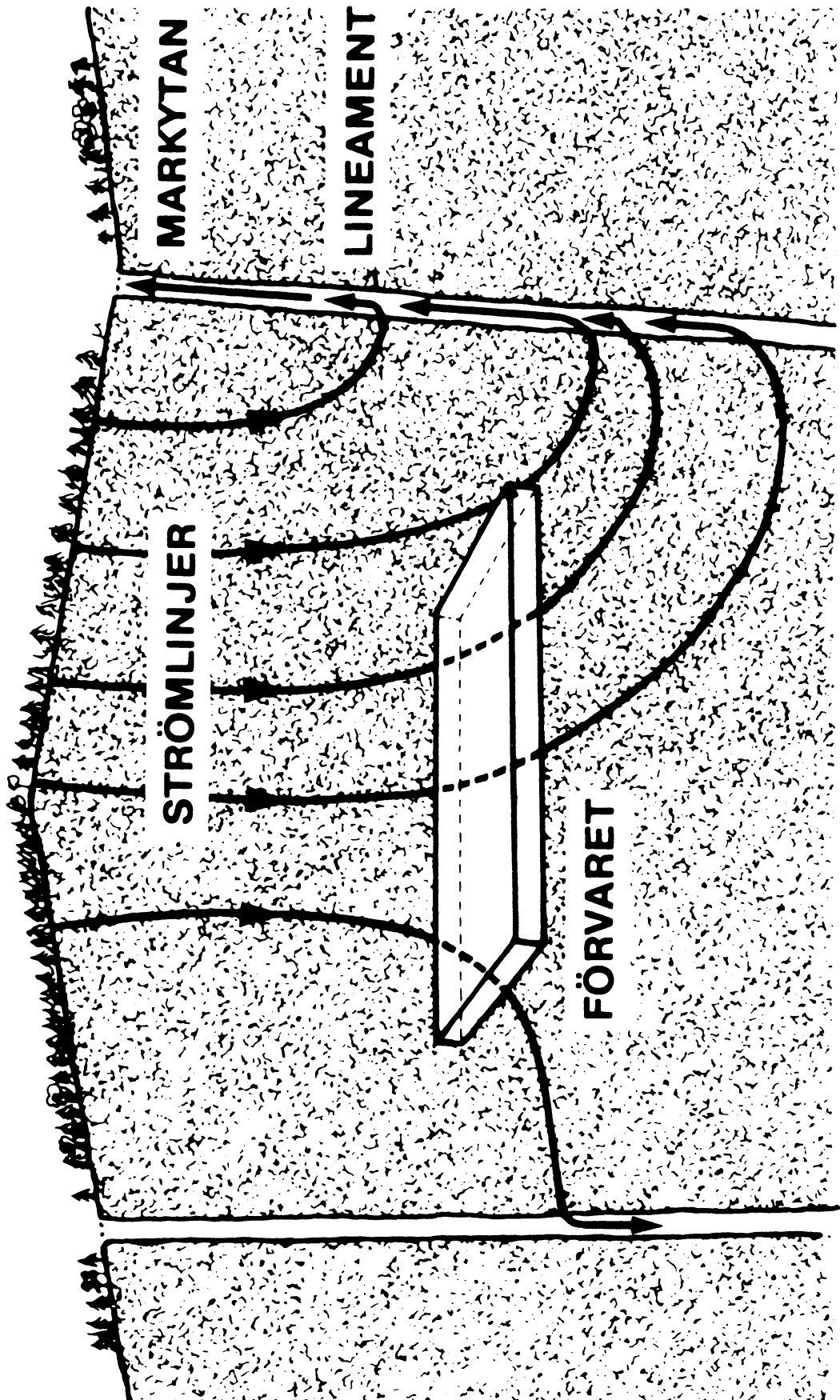
I figur 4.1 ges en skiss över sambandet mellan modeller och verkligheten.

En fullständig validering av sådana modeller för komplicerade förlopp som utnyttjas vid säkerhetsanalys av slutförvar kan av naturliga skäl inte göras. Lång erfarenhet av arbete med matematiska modeller inom naturvetenskaperna visar dock att om man omsorgsfullt och med ingående kvalitetsgranskning följer ovanstående procedur så kan man bygga modeller som med hög trovärdighet beskriver även komplicerade förlopp. Trovärdigheten bygger då ofta på att den samlade styrkan i det vetenskapliga bevisnätet är större än styrkan i enskilda maskor.

För att beskriva hur ett slutförvar för använt kärnbränsle fungerar krävs en rad olika modeller för olika delförlopp. Detta exemplifieras i det följande för ett slutförvar i djupa bergformationer. I ett sådant förvar kan de radioaktiva ämnena endast nå biosfären genom att de transporteras via grundvattnet (se fig 4.2). Denna transport börjar först när den vattentäta inkapslingen av kärnbränslet skadats genom korrosion eller på annat sätt. För att analysera hur ett slutförvar av använt kärnbränsle i djupa bergformationer fungerar måste således framförallt följande processer och fenomen beskrivas i matematiska modeller.

- Innehållet av radioaktiva ämnen i kärnbränslet och hur detta innehåll förändras över tiden genom radioaktivt sönderfall
- Hur grundvattnet strömmar genom sprickor i berget in mot förvaret
- Hur korrosiva ämnen i grundvattnet transporteras in genom bufferten till kapseln
- Hur kapseln korroderar
- Hur radioaktiva ämnen lakas ut ur kärnbränslet av grundvattnet

Fig 4.2. Grundvattenströmningen genom ett slutförvar i djupt berg styr intransporten av korrosiva ämnen som angriper kapslarna liksom utlakningen av radioaktiva ämnen och deras uttransport till omgivningen.



- Hur de utlakade radioaktiva ämnena transporteras ut genom kapslingsrester och buffert till berget och dess grundvattnen
- Hur radioaktiva ämnen fortsättningsvis transporteras genom berget och hur olika kemiska processer därvid kan göra att transporten går långsammare än grundvattnets strömning
- Hur radioaktiva ämnen når biosfären, sprids vidare och tas upp i växter, djur och människor
- Hur radioaktiva ämnen påverkar biologiska system särskilt människan

En uppsättning beräkningsmodeller med tillhörande ingångsdata för ovannämnda processer och förlopp utgör grunden för en säkerhetsanalys av ett slutförvar för kärnavfall. En säkerhetsanalys, utförd med en sådan uppsättning beräkningsmodeller, syftar till att ge ett kvantitativt underlag för värdering av säkerheten hos ett slutförvar för kärnavfall och dess möjliga inverkan på hälsa och miljö över mycket långa tidsrymder.

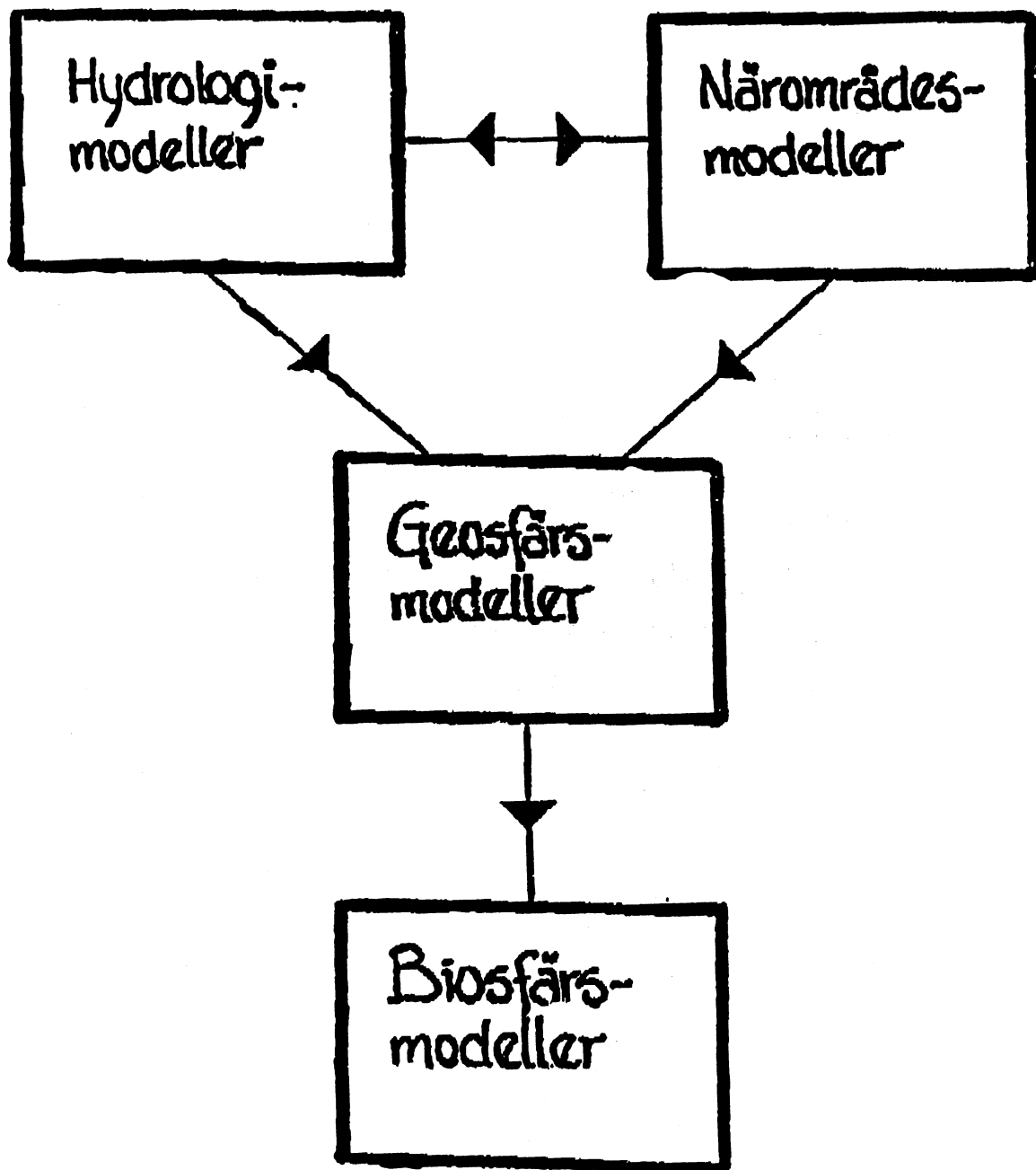
Från praktisk synpunkt kan man indela de modellsystem som används för sådana säkerhetsanalyser i fyra huvudgrupper (se fig 4.3): hydrologimodeller, närområdesmodeller, geosfärmodeller och biosfärmodeller. Hydrologimodellerna beskriver grundvattentransporten i slutförvarsområdet och ger som resultat transportvägar och flödesvärden. Dessa resultat behövs som ingångsvärden både till närområdesmodellerna, som behandlar transporten av korrosiva ämnen och radioaktiva ämnen inom förvaret och till geosfärmodellerna som beskriver transporten av nukliderna genom berget med grundvattnet. Geosfärmodellerna ger i sin tur ingångsvärden till biosfärmodellerna som beräknar spridningen av de radioaktiva ämnena i biosfären och konsekvenserna för människa och miljö.

4.2. Kunskapsläge

De matematiska modeller som används i säkerhetsanalysen är hjälpmedel vid bedömning av säkerheten hos ett slutförvar. Det måste betonas att de modeller som nu finns inte är färdiga utan att de tvärtom utvecklas dels genom fortsatt forskning och dels genom att kraven på modellerna ökar allt eftersom slutförvarsprogrammet närmar sig genomförande. Vidare utgör själva modellberäkningarna endast ett steg i säkerhetsanalysen. För att de skall kunna användas som beslutsunderlag måste förutsättningarna för beräkningarna liksom resultatens betydelse klargöras. Totalt omfattar således säkerhetsanalysen följande steg:

- Uppbyggnad av begreppsmässiga modeller
- överföring av de begreppsmässiga modellerna till matematiska modeller
- verifiering och validering av modellerna

Fig 4.3. Modellsystem för säkerhetsanalys av slutförvar.



- val av scenarier (tänkbara yttre händelseutvecklingar)
- beräkningar för aktuella förslag till slutförvar med beaktande av osäkerheter i ingångsdata
- analys av resultat och jämförelser med kriterier.

I det följande behandlas kortfattat dessa steg var för sig med tonvikt på de problemområden som förutses bli föremål för de mest krävande forsknings- och utvecklingsinsatserna innan ett slutförvar för utbränt kärnbränsle och annat högaktivt avfall förverkligas.

4.2.1. Begreppsmässiga och matematiska modeller

En säkerhetsanalys som gör anspråk på trovärdighet måste grundas på förståelse av slutförvarssystemet med de kemisk-fysikaliska processer och andra förhållanden i berggrunden som styr grundvattnets strömning och de radioaktiva ämnens transport i förvaret och dess omgivning. De begreppsmässiga beskrivningarna av dessa processer kallas konceptuella modeller.

Det finns olika orsaker till osäkerheter i modellbeskrivningen. Dessa är bl a:

- otillräcklig kunskap om strömning i sprickigt berg.
- gjorda förenklingar i modellerna
- osäkerhet i ingående parametervärden och ingångsvariabler

Ett exempel på ofullständig eller starkt förenklad modellering utgörs av de hittills genomförda närområdesbeskrivningarna. Närområdet kring ett slutförvar uppvisar en komplex bild med en lång rad av möjliga kopplingar. Hittills har man nöjt sig med en förhållandevis enkel modell och tillämpat pessimistiska ansatser för beräkningarna. Det är osäkert hur långt modelleringen av närområdet kan eller bör drivas. Ett stegvis förfarande mot en bättre modellering torde vara att föredra framför ett försök att tidigt utveckla en mycket komplex och detaljerad modell.

Strömning i sprickigt berg kan tas som exempel på ett område där ett relativt stort forskningsarbete återstår innan förståelsen har utvecklats tillräckligt. Hittills har grundvattenströmningen modellerats genom att beskriva berget som sammansatt av ett stort antal porösa element med olika permeabilitet. Detta förfarande har bedömts ge en god uppskattning av grundvattenflödet kring slutförvar. Det råder emellertid osäkerhet om i vilken omfattning och i vilken skala denna ansats är riktig. Alternativa modellidéer är därför under utveckling. En idé går ut på att beskriva berget som ett nätverk av sprickor med slumpmässigt fördelade egenskaper. En annan idé, som också har viss experimentell förankring, beskriver transporten i berget som strömning genom endast delar av spricksystemet, s k kanaler. Vilken modellidé som används

kan ha stor betydelse för resultaten av en säkerhetsanalys. Det är därför viktigt att det fortsatta forskningsarbetet kan klargöra vilken roll som de olika idéerna skall ha i säkerhetsanalysen.

En närliggande frågeställning är i hur stor utsträckning radioaktiva ämnen kan vandra (diffundera) in i bergets mikrosprickor för att där fastna (sorberas) på sprickytorna. Även denna s k matrisdiffusion kan ha stor inverkan på transporten av radioaktiva ämnen i berggrunden.

Av speciellt intresse är de osäkerheter som är förenade med den begreppsmässiga modelleringen av biosfären. Mänsklig påverkan t ex genom skogsavverkning, urbanisering och försurning kan på kort sikt väsentligt förändra de lokala förhållandena. På längre sikt kommer klimatförändringar och evolutionära processer att radikalt förändra de nu gällande förutsättningarerna. Allt detta medför att oundvikliga osäkerheter är förenade med modelleringen och bortom ett visst tidsperspektiv kan ett flertal nu använda biosfärmodeller te sig meningslösa.

Med utgångspunkt i de konceptuella modellerna för de olika förloppen i ett slutförvar finns ett stort antal matematiska modeller utvecklade. Det pågår också på flera håll i världen, inkl Sverige, ett intensivt utvecklingsarbete på förbättrade och förfinade matematiska modeller.

4.2.2. Verifiering och validering

Innan de matematiska modellerna kommer till användning i verkliga säkerhetsanalyser måste man noga kartlägga deras numeriska egenskaper. Man verifierar modellerna, dvs kontrollerar att datorprogrammen räknar rätt. Detta är i många fall inte enkelt eftersom modellerna innehåller komplicerade numeriska beräkningsförfaranden. Ett vanligt sätt att verifiera de matematiska modellerna är att låta olika modeller beräkna samma väl definierade teoretiska problem och sedan jämföra resultaten. Detta görs ofta i internationella samarbetsprojekt där modeller från olika länder jämförs. Ett exempel på ett sådant projekt är det av SKI ledda HYDROCOIN-projektet där ett av syftena är verifiering av olika hydrologimodeller. Erfarenheterna från HYDROCOIN visar att vissa resultat kan vara känsliga för hur den numeriska metodiken utformas i datorprogrammet. Området rymmer också ekonomiska aspekter eftersom bättre numerisk säkerhet ofta kan köpas till priset av mer noggranna beräkningar, som i sin tur leder till högre datorkostnader.

Vid validering av modellerna kontrollerar man, som ovan nämnts att modellerna ger en så rättvisande bild som möjligt av verkligheten. I valideringsprocessen utnyttjar man laboratorieexperiment, fältförsök och naturliga analoger. Dessa tre informationskällor har alla sina fördelar och begränsningar ur valideringssynpunkt. Utnyttjade tillsammans i ett systematiskt arbete kan de bidra till att åtskilligt minska de osäkerheter som finns i modellerna. En utförligare diskussion av naturliga analoger återfinns i avsnitt 5 av denna rapport.

Rent praktiskt innebär valideringen att man kontrollerar hur modellen kan förutsäga resultatet av ett experiment, exempelvis diffusion av olika ämnen genom berget, eller utfallet av en observation exempelvis på naturliga analoger som inte har ingått i utvecklingen av modellen. En väl validerad matematisk modell styrker giltigheten av den konceptuella modell, som varit utgångspunkten när man utvecklade den matematiska modellen. En viss osäkerhet om giltigheten kvarstår dock som har att göra med vår förmåga att sätta upp experiment och genomföra observation. Efterhand som den experimentella tekniken utvecklas och mätmetoderna förfinas kan denna osäkerhet reduceras.

Valideringsproblem behandlas i ett antal internationella projekt såväl av experimentell natur som modellinriktade. Bland dessa kan nämnas HYDROCOIN, BIOMOV5 och INTRAVAL, (se avsnitt 1).

4.2.3. Scenarier

Säkerhetsanalysen av ett slutförvar omfattar långa tidrymder. Analysen måste därför grundas på vissa antaganden eller ansatser som ger ramar för modellberäkningarna - scenarier. En vanlig typ av scenario utgår från i tiden konstanta yttre förhållanden med ingångsdata och andra parametervärden som styr processerna i förvaret som bedöms som en "bästa uppskattning". En andra typ av scenario utgår från mer eller mindre sannolika händelser som t ex en ny istid (sannolikt) eller tidigt kapselgenombrott (osannolikt). En tredje vanlig typ av scenario använder genomgående mycket pessimistiska ansatser för att man skall få en övre gräns för tänkbara konsekvenser. Speciella problem uppkommer vid analyser av scenarier som beskriver inträngning av människa i förvaret.

I vissa fall kan man relativt väl beskriva ett scenario och dess konsekvenser i andra fall är detta svårare. Ett extremt fall är meteoritnedslag som är en mycket osannolik händelse vars konsekvenser vi svårigen kan beräkna. Problematiken kring scenarier har uppmärksamats internationellt och påbörjade arbeten, bl a i OECD/NEAs regi, kan leda fram till ett bredare internationellt samförstånd kring dessa frågor.

4.2.4. Osäkerheter i ingångsdata

Osäkerheter i ingångsdata till de säkerhetsanalytiska modellerna ger upphov till osäkerheter i beräkningsresultaten. Dessa osäkerheter har sin grund i osäkra mätresultat, naturliga variationer, osäkerheter i bakomliggande beräkningar, etc.

Osäkerheter kan analyseras med olika metoder. En vanlig metod är att ansätta ett antal rimliga variationer av några ingångsparametrar för att belysa deras betydelse för beräkningarna. Detta kan göras med de normalt relativt detaljerade sk deterministiska modellerna som arbetar med entydigt bestämda samband mellan ingångsdata och resultat. För

att möjliggöra mer omfattande och systematiska variationsanalyser har även modellsystem för probabilistiska (sannolikhetsmässiga) beräkningar utvecklats i ett antal länder (t ex Kanada, England och Sverige). I sådana beräkningar låter man datorprogrammet slumpa värden enligt vissa sannolikhetsfördelningar på ingångsdata och andra parametrar som är osäkert kända. Sedan får programmet räkna ut hur den resulterande sannolikhetsfördelningen då blir, t ex vad gäller utläckage av olika nuklider. Sådana modellsystem måste i många fall använda enklare undermodeller av hänsyn till datorresurser eftersom modellkörningen måste upprepas ett stort antal gånger för att ge statistiskt relevanta resultat. En grundläggande svårighet med de probabilistiska modellerna är att tillgången till data i form av fördelningsfunktioner för olika parametrar är begränsad. Ett NEA-projekt pågår som syftar till utvärdering av probabilistiska modellers möjligheter och begränsningar.

De probabilistiska modellsystemen kan använda olika statistiska metoder. Ytterligare ett alternativ för variationsanalyser är att utnyttja analytiska metoder för att omforma de stora matematiska modellerna så att de fås att automatiskt beräkna resultatens känslighet för parametervariationer. Hittills har användningen av sådana metoder varit begränsad till lokal känslighetsanalys, dvs undersökning av små parametervariationer. Området är emellertid under stark utveckling och mer kraftfulla metoder kan komma att ge nya möjligheter.

En inneboende begränsning i denna analys är att den enbart beaktar osäkerheter i parametrar och inte i de osäkerheter som föreligger i den begreppsmässiga osäkerheten modeller har.

4.2.5. Kriterier

Resultaten från de säkerhetsanalytiska modellberäkningarna jämförs med acceptanskriterier. Dessa kan vara utformade på olika sätt. Vanliga kriterier bygger på begreppen individdos, kollektivdos eller risk.

SSI har i sitt yttrande över KBS-3-studien konstaterat att förändringarna i biosfären över tidsperioder som överstiger 1 000 år är så stora att beräknade stråldoser saknar vetenskapligt värdesom beslutsunderlag. Något som direkt kan ersätta stråldos som acceptanskriterium har inte getts, men ett antal alternativ har diskuterats. Det som SSI främst har studerat är användningen av den naturliga omsättningen av farliga ämnen, dvs hur farliga ämnen tillförs biosfären, som ett kriterium. Denna metod bygger på att de kemiska och geologiska processerna som styr denna omsättning bättre kan beräknas över långa tidsperioder än biologiska processer. Ett möjligt kriterium skulle därvid vara att tillförseln av radioaktiva ämnen till biosfären från ett slutförvar ej får överskrida vad som via vittring och andra i naturen förekommande processer tillförs biosfären. Mycket arbete återstår både vad gäller kriteriet i sig själv och hur det skulle kunna presenteras på ett begripligt sätt så att det kan bli allmänt accepterat.

Kriteriernas utformning påverkar säkerhetsanalysens metodik. Å andra sidan kan modellutvecklingen aktualisera förnyade kriterier. Kriterieutvecklingen är föremål för en omfattande diskussion bl a inom olika internationella grupper, framför allt inom ICRP, IAEA och NEA (jfr avsnitt 2.4.).

4.3. Diskussion

De säkerhetsanalyser av förslag till slutförvar av kärnavfall i djupa bergformationer som gjorts såväl i Sverige som i andra länder har resulterat i beräknade konsekvenser som ligger långt under de nivåer som normalt leder till motåtgärder både vad gäller risker för individer och för samhället. Likväl fortsätter ett omfattande forsknings- och utvecklingsarbete för att förbättra kunskaperna om framtida slutförvars funktioner. Det finns i huvudsak två förklaringar till denna utveckling.

Den ena sammanhänger med konstruktionen av slutförvaret. Om den fortsatta forskningen leder till att hittills gjorda pessimistiska antaganden kan ersättas med säkra observationer så skulle ett slutförvars barriärer kanske kunna förenklas. Det finns också en stark koppling mellan säkerhetsanalysen och de data som behöver ingå i beskrivningen av ett tänkt slutförvarsområde. Således kan olika konceptuella modeller ställa olika krav på de data som behöver samlas in i platsundersökningsprogrammet.

Den andra sammanhänger med granskningen av säkerheten när ett slutförvars lokalisering och utförande skall godkännas. En grundläggande osäkerhet i den modellmässiga beskrivningen av exempelvis vattenflödet i kristallint berg ger då svårigheter.

Som framgår av framställningen i detta kapitel utvecklas de säkerhetsanalytiska modellerna delvis mot större komplexitet och detaljrikedom. Enkla modeller som lätt kan förstås också av icke-expertter och som behöver en liten mängd ingångsdata vore att föredra. Osäkerheten om betydelsen av ännu outredda effekter gör emellertid den pågående utvecklingen nödvändig. Först sedan större insikter om ett slutförvars olika funktioner har nåtts kan den modellmässiga beskrivningen förenklas genom att effekter som har kunnats visas vara små kan avföras från modellerna.

Det finns idag utförliga konceptuella och matematiska modeller av olika förlopp för att göra ingående säkerhetsanalyser av slutförvar av använt kärnbränsle och högaktivt avfall i djupa bergformationer. Många av dessa modeller bygger på pessimistiska antaganden för att kompensera osäkerheter i modellernas utformning och i ingångsdata. Fortfarande återstår dock ett omfattande forsknings- och utvecklingsarbete. Några av de viktigaste problemområdena har belysts ovan. Nödvändigheten av ett systematiskt program för validering av beräkningsmodeller bör därvid speciellt poängteras liksom behovet av vidare utveckling av metoder för val av scenarios och vidare utveckling av kriterier för att värdera slutresultaten av en säkerhetsanalys med hänsyn till strålskyddsaspekter i mycket långa tidsperspektiv.

Med säkerhetsanalysen som verktyg kan de viktigaste problemområdena för fortsatt forskning identifieras. Samtidigt ger den möjlighet att bedöma hur långt i detaljförståelse man behöver gå inom olika områden och hur vissa osäkerheter skulle kunna kringgåas genom förenklade pessimistiska ansatser vad gäller modellernas utformning och ingångsdata.

Den vetenskapliga metodiken för att hantera ovannämnda problem vid uppbyggnad, verifiering och validering av de säkerhetsanalytiska modellerna är väl etablerad. Betydande insatser torde återstå när det gäller att göra modellerna och deras resultat begripliga och lättillgängliga för beslutsfattare och en bredare allmänhet.

5. NATURLIGA ANALOGER

5.1. Inledning

KASAM gav i 1986 års rapport en översiktlig beskrivning av några olika system för slutförvaring av högaktivt avfall från kärnkraftreaktorer. Ett avfallsförvar kan ses som ett system, uppbyggda av ett flertal tekniska och naturliga komponenter som växelverkar med varandra. Systemets funktion och säkerhet påverkas av många olika faktorer av vilka en del är svåra att överblicka på grund av bristande detaljkunskap. Vid studier av slutförvar är det väsentligt att förvarssystemet kan analyseras i sin helhet. Detta sker med systemanalytiska metoder vilka beskrivs i avsnitt 4 liksom kortfattat i föregående års KASAM-rapport.

Vid systemanalysen utnyttjar man scenarier för att studera tänkbara händelseförlopp i systemet. Olika typer av modeller ingår som delar i scenariebeskrivningen. Modellerna styrs av ett antal parametrar som möjliggör kvantitativa beräkningar av systemets egenskaper. Verifiering och validering är en naturlig del av varje modellutveckling. Verifiering innebär en kontroll av att man "räknar rätt", validering att den använda modellen verkligen beskriver den "verklighet" som man studerar.

Ett avfallsförvar är en stor konstruktion och dess funktion påverkas av olika fysikaliska, kemiska och geologiska processer i en volym som kan omfatta flera kubikkilometer. Den tid som behövs för att avfallets radioaktivitet skall nå en för människa ej skadlig nivå är också mycket lång med mänskliga mått mätt. I perspektivet tusentals till hundratusentals år kommer civilisationer och arter att försvinna och nya att uppstå, vidare kommer storskaliga geologiska förändringar till följd av istider att inträffa. Det är självfallet omöjligt att göra en validering genom att studera det färdiga avfallsförvaret. I bästa fall kan man validera de modeller som beskriver funktionen av avfallsförvaret i tid och rum.

Forskare och tekniker utnyttjar därvid en metod som kombinerar laboratorieexperiment, fältförsök och s k naturliga analoger.

En naturlig analog är ett "experiment" som "utförts" av naturen och där resultatet kan studeras i olika slag av geologiska formationer. I de följande avsnitten ges några exempel på formationer och processer i naturen som liknar de som kan uppträda i ett kärnbränsleförvar. Man försöker vidare att jämföra de naturliga spridningsförloppen och de som beräknas ske från ett slutförvar för kärnavfall.

5.2. De naturliga reaktorerna i Oklo

Den kanske intressantaste analogen till ett avfallsförvar är de naturliga reaktorzonerna i Oklo i Gabon i Afrika. Fenomenet upptäcktes år 1972 i en högkoncentrerad uranmineralisering med uranhalter på 60% eller mera genom att andelen U-235 i tagna prover var lägre än det vanliga värdet. Detta antydde att kärnklyvning hade ägt rum och således uran-235 förbrukats.

Fig 5.1. Schematisk bild över tillkomsten av uranmineraliseringen i Oklo, Gabon. Genom vittring av det ursprungliga berget med en uranhalt av 4 mg/kg har uranet frigjorts och transporterats med grundvatten till en sedimentär bergart (sandsten) där det, på grund av syrebrist utfällts som UO_2 , uranoxid i sandstenens porer. Därvid har en anrikning inträffat så att sandstenens uranhalt som mest blivit 4000 mg/kg.

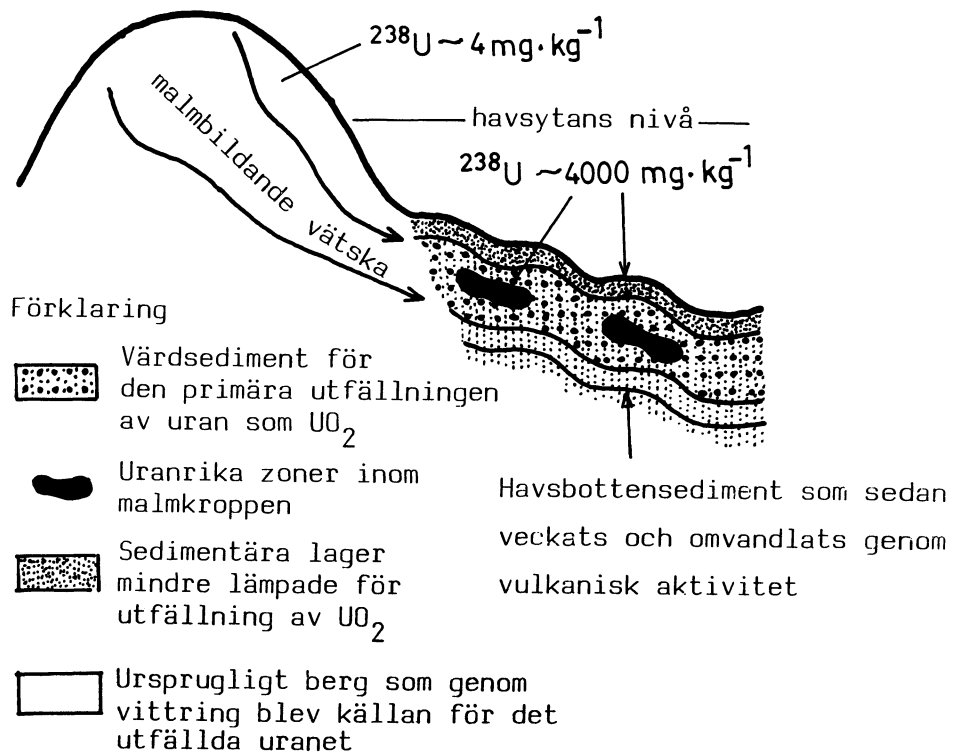
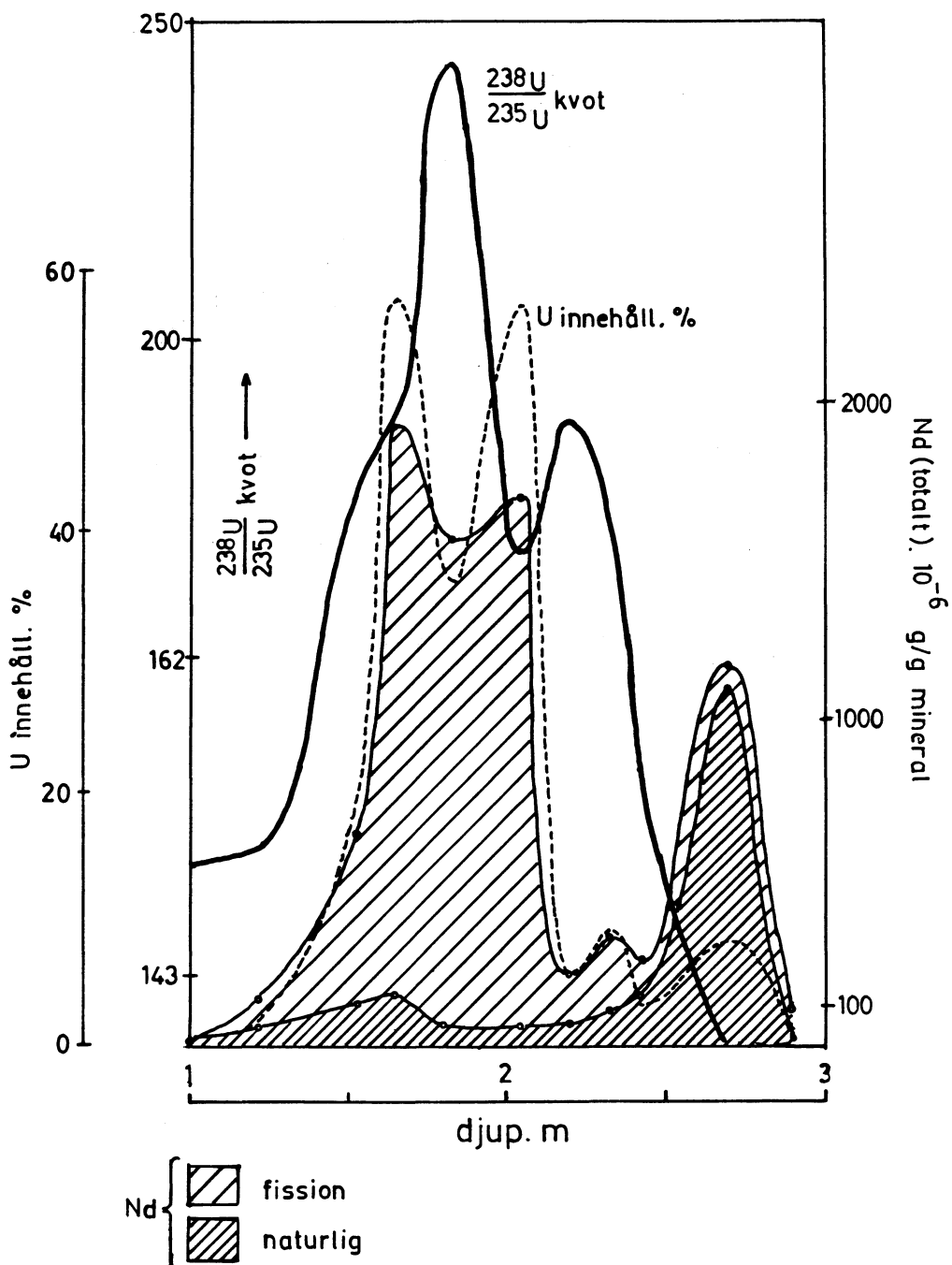


Fig 5.2. I figuren visas malmens uranhalt i procent (streckad linje) som funktion av avlagringens tjocklek (horisontella skalan). I den heldragna kurvan anges hur halten U-235 avtar och är minst i malmskiktets mitt, där totala U-halten är högst. Bägge dessa faktorer tyder på att klyvningsprocessen har varit intensivast här (mest U-235 har här förbrukats). Den tätstreckade ytan anger naturlig halt neodym i malmkroppen. Den glesstreckade ytan anger halt av sådana neodymisotoper som uppkommit genom kärnklyvningen (neodym är en klyvningsprodukt). Det intressanta är att klyvningsneodyms yta nära sammanfaller med den höga totala uranhalten och låga U-235-halten. Detta visar ytterligare att en klyvningsprocess ägt rum, men också att neodym inte vandrat bort från reaktorn på 1800 miljoner år. I marken uppför sig de långlivade plutonium- och americiumisotoperna ganska likartat neodym, varför de ej heller förväntas vandra i berggrunden.



Genom isotopanalyser har man visat att mineraliseringen bildades för ungefär 1800 miljoner år sedan. Då var halten av den klyvbara isotopen U-235 mycket högre än idag, nära 4% jämfört med nuvarande 0,7%. Halten är således högre än den som vi nu använder i nytt isotopanrikat reaktorbränsle. Troligen blev reaktorzonerna kritiska mycket snart efter det att uranmineraliseringen bildats och förblev så mellan hundratusen och femhundratusen år. Den totala mängden uran i zonerna har uppskattats till ungefär 800 ton. Under kedjereaktionen bildades ca 4 ton klyvningsprodukter och över 1 ton plutonium. Se fig 5.1 och 5.2.

För att kunna underhålla kärnreaktionen fordras vatten som moderator. Genom analyser av blytransporten från reaktorzonen vet man också att denna varit i kontakt med vatten under större delen av tiden sedan kedjereaktionen avslutades. Reaktorzonen (eller, rättare sagt, zonerna, eftersom det finns flera) gör det alltså möjligt att undersöka vad som kan hända med klyvningsprodukter, uran och plutonium, under miljontals års kontakt med vatten. Idag har naturligtvis alla kortlivade, och praktiskt taget även alla långlivade isotoper som bildats vid processen för länge sedan klingat av, dvs de har fallit sönder till stabila ämnen. Så har t ex neptunium-237 med en halveringstid på 2,2 miljoner år, via en lång sönderfallskedja omvandlats till vismut-209, som är en stabil slutprodukt, medan plutonium-239 har övergått i stabilt bly-207. Dessa stabila slutprodukter kan påvisas genom masspektrometrisk analys.

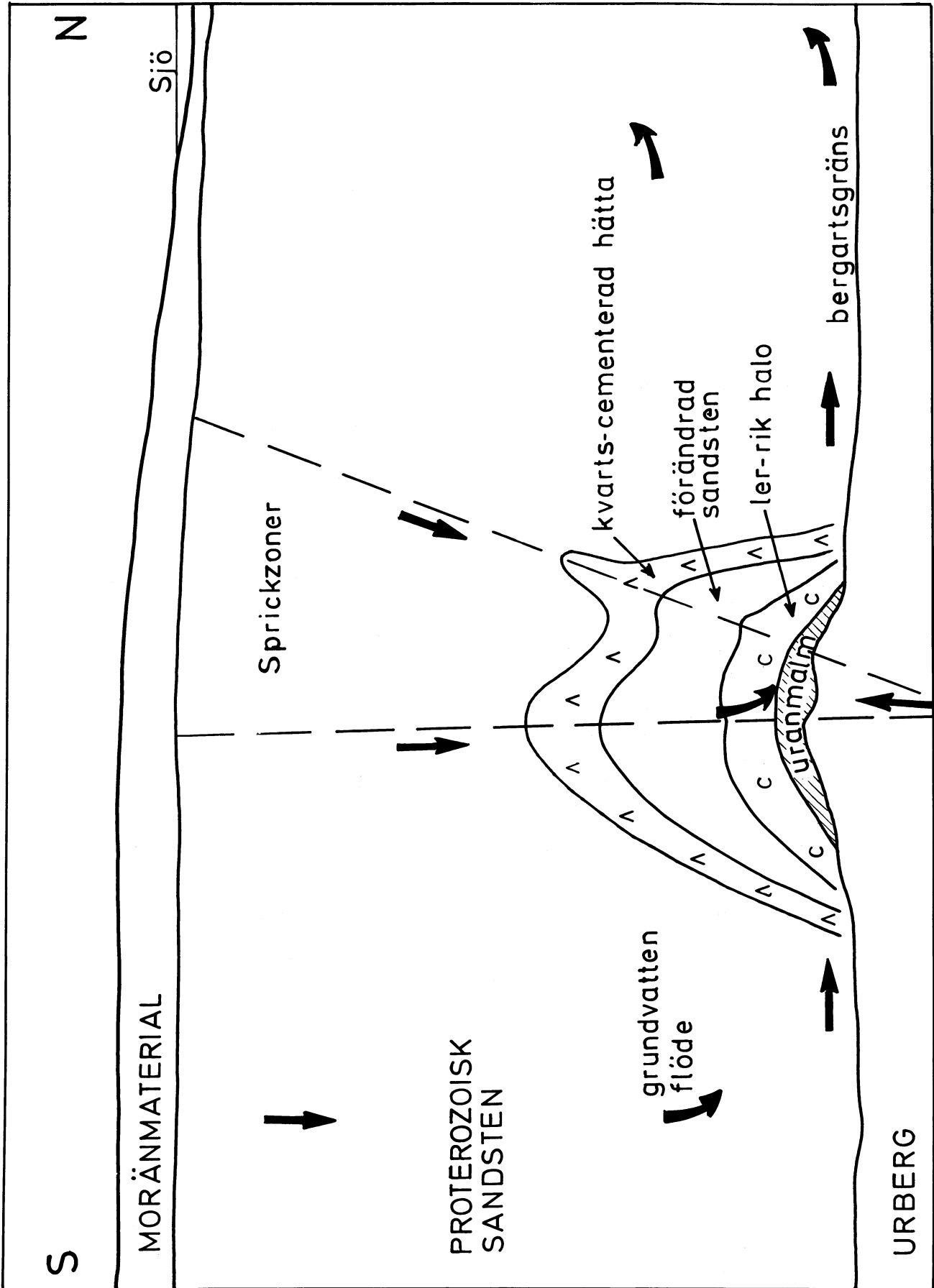
Resultatet visar att vissa klyvningsprodukter transporterats från reaktorzonerna, men att många, t ex sällsynta jordartselement fortfarande finns opåverkade. Inte heller plutonium har transporterats bort. Data tyder vidare på en mycket kort transport av uran, högst några tiotal meter från reaktorzonen. Även spår av klyvningsprodukterna cesium, strontium och barium finns kvar, trots att dessa är relativt lätttröliga i berggrundvatten.

Dessa data antyder mycket stor kemisk stabilitet hos urandioxid under de reducerande förhållandena i Oklo-bildningen. Bildningen är ett starkt indicium på att använt kärnbränsle kan komma att vara opåverkade under mycket långa tider, även om av människan tillverkade barriärer inte skulle hålla. Den visar också att under årmiljonerna har klyvningsprodukterna och plutonium bara ytterst långsamt transporterats i berggrunden.

5.3. Uranmineraliseringar som naturliga analoger

Uran förekommer i små mängder i de flesta bergarter, t ex granit och gnejs, ofta i form av urandioxider. Vissa typer av brytvärda uranmalmer har bildats genom att uran lösts ut ur vittrade bergarter och sedan återutfällts. Upplösningen sker under oxiderande förhållanden och återutfällningen under reducerande. Geologerna har en omfattande erfarenhet av dessa processer och kan utnyttja dem för att beskriva hur uran och de likartade ämnen som finns i kärnavfall rör sig i grundvattensystem.

Fig 5.3. Figuren visar en genomskärning av uranfyndigheten i Cigar Lake i Kanada. Malmkroppen omges av sandsten. I denna kan man urskilja två zoner som tätar den relativt porösa sandstenen. Den inre zonen innehåller lera som troligen bildats vid kemiska omvandlingsprocesser av sandstenen vid högre temperatur. Den yttre kvartsrika zonen kan ha bildats genom utfällning av kvarts från vatten som har haft en hög temperatur.



I Cigar Lake i norra Kanada finns en uranförekomst som innehåller upp till 60% uran. Uranmineraliseringen är omgiven av sandsten som genom geologiska omvandlingsprocesser innehåller olika lermineral.

Alltsedan malmkroppen bildades för omkring 1 miljard år sedan har den under flera geologiska perioder varit i kontakt med grundvatten. Trots detta finns idag inga indikationer på markytan i form av joniserande strålning eller spår av de element som finns i malmkroppen. Sådana indikationer finner man vanligen i samband med uranmineraliseringar; de utnyttjas för övrigt vid uranprospektering.

Figur 5.3 visar en schematisk bild av mineraliseringen i Cigar Lake, ett par sprickzoner, samt grundvattenflödet. Sandsten är en relativt porös bergart medan leran bör ha fungerat som en effektiv spärr för transport av uran och andra element i malmkroppen.

Analyser av olika element i lerlagren har utförts i en annan uranfyndighet i Dawn Lake, se fig 5.4. Efter 5-6 meter i det lerskikt som omger fyndigheten är uranhalten nere i "bakgrundsvärden" på några delar av miljonen. Den undre figuren visar fördelningen av grundämnet hafnium i samma fyndighet. Hafnium liknar i vissa avseenden kemiska grundämnet plutonium under de rådande förhållandena. Figurerna visar att en relativt liten transport av uran skett, men ingen mätbar transport av hafnium.

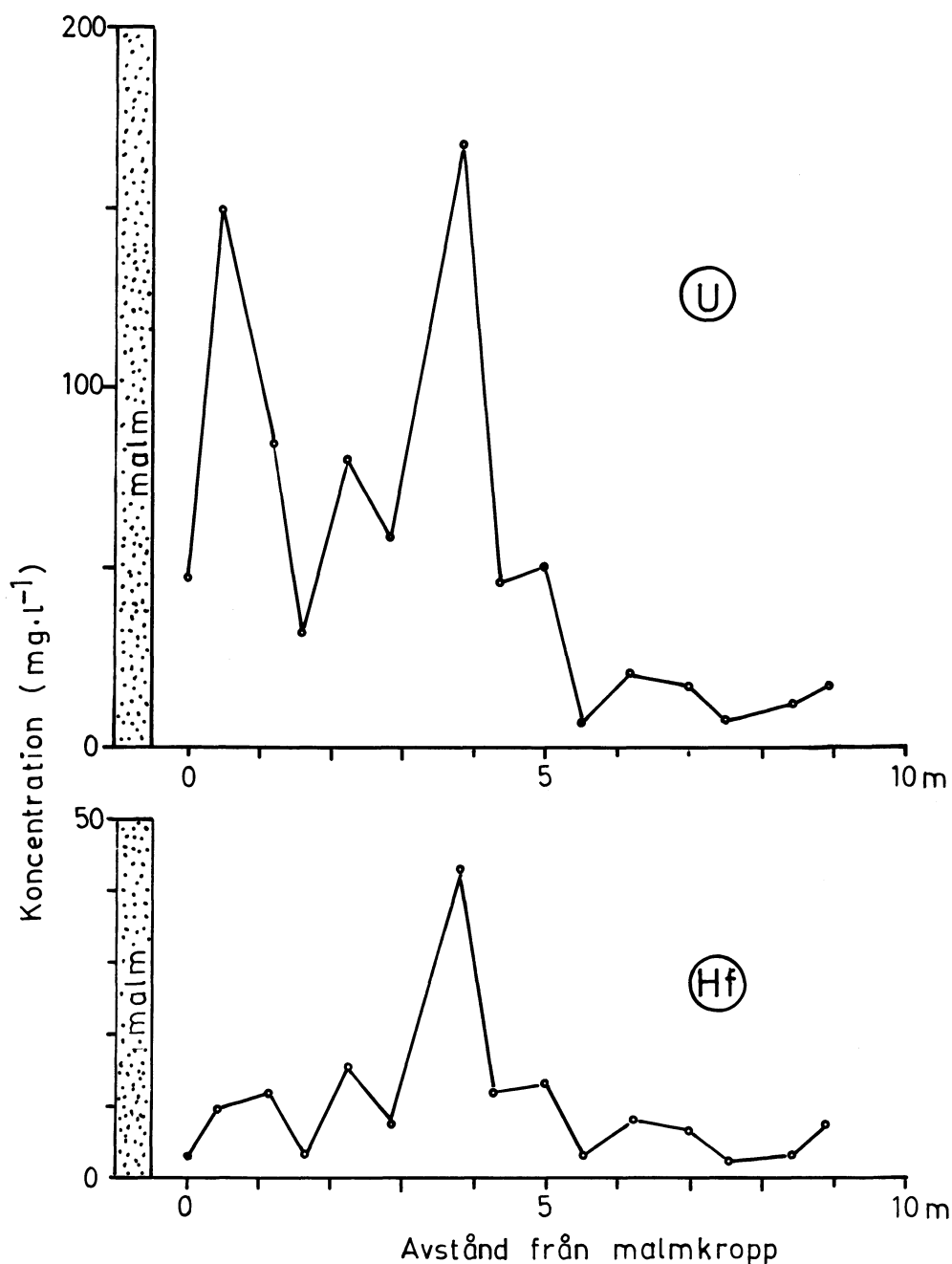
5.4. Geologiska kontaktzoner

Många mineraliseringar har uppstått genom så kallade hydrotermala processer (processer som sker under medverkan av vatten vid högt tryck och temperatur) i samband med att het magma tränger in i en äldre geologisk formation (intrusion). De kemiska egenskaperna och den kemiska sammansättningen är ofta mycket olika i intrusionen och i den äldre bergarten. Genom att studera ett tvärsnitt över kontaktzonen kan man bestämma om och hur mycket olika grundämnen har rört sig under den tid som förflutit sedan bildningen uppstod. Ett exempel från Hood River i Oregon, USA, visas i figur 5.5. Koncentrationsprofilen för uran och torium är mycket skarp vilket visar att ingen påtaglig transport har skett varken under högtemperaturperioden då intrusionen bildades eller senare. Dessa exempel från geologin visar alltså att det finns geologiska förhållanden under vilka man inte har någon påtaglig transport av många av de starkt radiotoxiska ämnena i kärnavfall. Detta är självfallet ett mycket viktigt konstaterande men det räcker inte för säkerhetsbedömningarna av konstruerade slutförvar för använt kärnbränsle.

5.5. Biosfäriska analoger

I motsats till naturliga analoger i geosfären har naturliga analogier i biosfären ännu inte tilldragit sig något större intresse. Detta kan bero på att de största ansträngningarna har lagts ner på att försöka isolera det högaktiva avfallet från

Fig 5.4. Figuren visar koncentrationen av uran och hafnium i lerskiktet kring en uranfyndighet (Dawn Lake, Kanada). Hafnium är ett grundämne som har kemiska egenskaper som liknar plutonium (Pu(IV)). Koncentrationen av hafnium är i stort sett konstant i lerskiktet. Detta visar att hafnium inte transporteras bort från uranmalmen. Den övre figuren visar att koncentrationen av uran varierar i lerskiktet från höga värden nära malmkroppen till låga värden på ungefär 5-6 meters avstånd från malmen. Dessa resultat visar att en viss transport av uran har skett från malmen, men att uranet under den mycket långa tid som gått sedan malmen bildades bara rört sig några meter. Lera är en effektiv transportspärr.



biosfären för så lång tid som möjligt att det därvid framstått som viktigast att verifiera och validera de geosfärmodeller som används. Ett annat skäl kan vara att förloppen i biosfären helt skiljer sig från geosfären, dels genom de relativa snabba förloppen i biosfären av de levande organismerna, dels genom den kontinuerliga utvecklingen av biologiskt liv som gör det svårare att från det förflutna dra slutsatser om framtiden. I princip bör dock naturliga analoger på biosfärområdet kunna användas på ett likartat sätt som för geosfärssidan t ex vad gäller validering av modeller, identifiering av dominerande mekanismer och/eller processer för att förstå händelseförlopp.

Med kemiska analoger avses ämnen eller kemiska föreningar, som till sina kemisk/fysikaliska egenskaper (valenstillstånd, komplexbildning, jonradie mm) är likartade de som primärt är av intresse. Sådana analogier är värdefulla och har redan använts i stor omfattning t ex vid upptags- och omsättningsstudier i biologiska system.

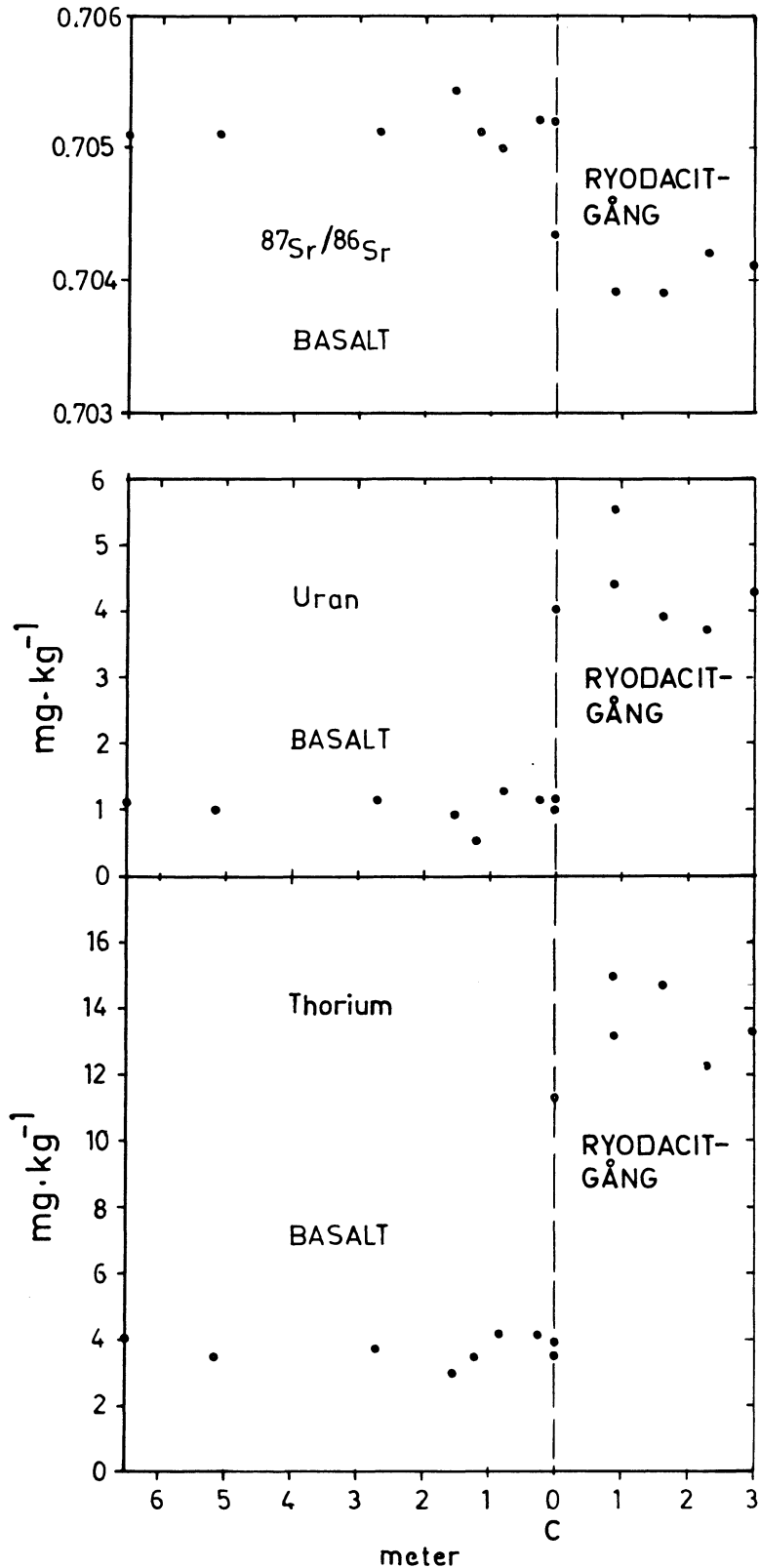
Ett exempel på denna användning av naturliga analoger i naturen är upptag i växter där t ex kalium kan användas som analog för cesium-137, kalcium för strontium-90 osv. Ett annat exempel är studien i Morro do Ferro, i Brasilien, som bl a rapporterades på en EG-konferens om naturliga analoger i Bryssel i april 1987, där man studerat transportvägarna i biosfären av bl a torium och uran från de i naturen förekommande mineraliseringarna. Se vidare avsnitt 1.3.3 och fig 1.4. Några försök att verifiera hela modeller för biologiska system förekommer inte ännu. Det finns därför anledning att här göra ytterligare insatser.

Det kan tilläggas - även om dessa studier inte strikt kan hänföras till naturliga analoger - att ett flertal studier har gjorts där undersökarna använt sig av nedfall efter atmosfäriska kärnvapenprov för studium av biosfärsspridning av radioaktiva ämnen och vidare kommer ett stort antal studier att använda sig av det efter Tjernobylyolyckan utspridda radioaktiva materialet.

5.6. Hur kan man utnyttja data från naturliga analoger

Allt sedan Aristoteles har filosoferna diskuterat om analogier är en form av induktivt bevis eller om de utgör en särskild klass av argument. Man har också diskuterat hur man kan demonstrera analogimetodens giltighet. Redan John Stuart Mill diskuterar frågan i sin bok "A System of Logic" och påpekar att både analogin och induktionen baseras på insamling och korrelation av experimentella observationer. Skillnaden mellan de båda metoderna ligger på bevissidan - induktion baseras på ett vetenskapligt orsakssamband (kausalt) mellan olika observationer, medan analogin, i frånvaro av ett sådant vetenskapligt härlett orsakssamband, utnyttjar ett observerat samband. Några exempel kan kanske antyda hur man utnyttjar analogiresonemang inom kärnavfallsforskningen. Exemplet visar fyra olika nivåer med ökande komplikationsgrad.

Fig 5.5. Figurerna visar resultatet av analyser av olika ämnen i en geologisk kontaktzon. Denna har bildats genom en process där en högtemperaturmagma (ryodacit) trängt in i ett geologiskt medium med helt annan sammansättning. Kontaktzonen är ofta mycket skarp. Eftersom sammansättningen är olika på ömse sidor om kontaktzonen bör man förvänta sig att dessa koncentrationsskillnader utjämnas med tiden. Detta kan t ex ske genom diffusion. Figuren visar att man i den aktuella kontaktzonen (Hood River, Oregon, USA) har haft en mycket liten transport av strontium, uran och torium, samtliga ämnen som förekommer i radioaktivt avfall.



- Identifikation och bekräftelse av geologiska, kemiska och fysikaliska processer som kan påverka en eller flera av komponenterna i ett slutförvar för kärnbränsle och deras transport till biosfären.

Exempel: Använt kärnbränsle består till 95% av urandioxid som under reducerande förhållanden är extremt svårlöslig, men under oxiderande förhållanden förhållandevis löslig. De processer som sker vid bildningen av vissa typer av uranmineraliseringar ger information om de fysikaliska och kemiska fenomen som också kan påverka upplösning och transport av använt kärnbränsle. Den naturliga analogen ger här i första hand en kvalitativ information; kvantitativ information är svårare att få. Den kvalitativa informationen är viktig eftersom den kan utnyttjas för en validering av den vetenskapliga begreppsapparaten som används i funktions- och säkerhetsanalyser.

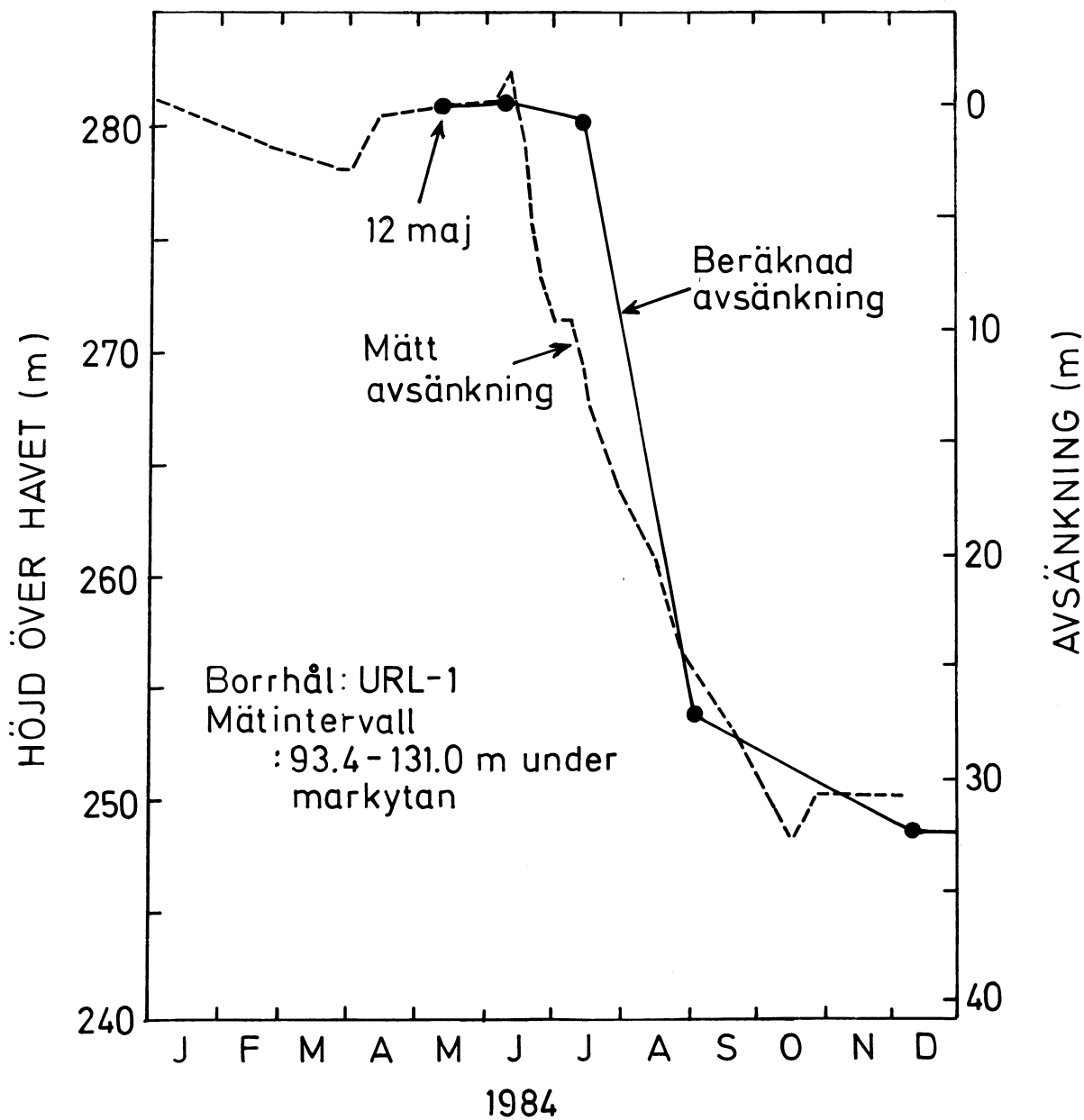
- Användning av analogidata för att bestämma värdet av en eller flera storheter (parametrar) som ingår i de modeller som utnyttjas i funktions- och säkerhetsanalys. Dessa parametrar kan i naturen fås från processer som har skett i tidskalan tusentals till miljontals år.

Exempel: Jodisotoper av olika slag i radioaktivt avfall utgör en radiologisk risk. Transporter av jod i form av jodidjoner fördröjs av den långsamma diffusionen i lera. Diffusionen kan mätas i laboratorieförsök och beskrivs kvantitativt genom att ange diffusiviteten. I sjön Loch Lomond i Skottland finns ett ungefär en meter tjockt marint sedimentlager som bildades under ett saltvatteninbrott för några tusen år sedan. På ömse sidor om detta lager finns sötvattensediment. Den kemiska sammansättningen hos sedimenten och vattnet i sedimentens porer är olika. Genom att ta prov från sedimentlagret, som är ungefär 5000 år gammalt, kan man följa diffusionen av olika ämnen och jämföra resultatet med ett laboratorieförsök. För bromidjoner som är kemiskt nära besläktade med jodidjoner fann man i leran en diffusivitet på $3-8 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sek}$, som jämförelse gav laboratorieförsök värdet $10 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sek}$.

- Användning av analoger för att validera ett av de delsystem eller delmodeller som används i funktions- och säkerhetsanalysen. Syftet är främst att klarlägga om modellerna är användbara och fullständiga.

Exempel: I samband med konstruktionen av ett underjordslaboratorium i "Whiteshell Nuclear Research Establishment" i Kanada gjordes en validering av den hydrologiska modell som utnyttjades för att beskriva grundvattenflödet i ett område som är ungefär $4,8 \text{ km}^2$. När man spränger undan en stor volym berg under den normala grundvattenytan, så ändras det lokala vattenflödet och därigenom grundvattenytans läge. Denna förändring kunde följas i ett stort antal borrhål som undersöktes före och efter utsprängningen. Jämförelsen med beräknat och observerat läge utföll väl (se figur 5.6).

Fig 5.6. Grundvattenytans beräknade och verkliga läge i samband med att underjordslaboratoriet i Whiteshell, Kanada utsprängts år 1984.



- Användningen av analogidata för att validera hela system, eller kopplingen mellan två eller flera undersystem. Valideringar av detta slag är svåra att genomföra eftersom den nödvändiga kvantitativa informationen om de naturliga systemen ofta inte finns tillgänglig - man är därför hänvisad till att göra antaganden av olika slag. I exemplet med Loch Lomond måste man t ex anta att sedimentationshastigheten varit konstant, att de fysikalisk-kemiska förhållandena i sedimenten varit någorlunda konstanta (bortsett från diffusionen) etc. Antagandena som gjorts är i och för sig rimliga och stämmer med andra observationer.

Det sagda innebär inte alltför allvarliga begränsningar i användningen av naturliga analoger. Vi kan kanske likna metoden vid konstruktionen av ett nät där de individuella trådarna inte är särskilt bärkraftiga, men den sammanknutna helheten kan ha en avsevärd styrka.

Studier av naturliga analoger spelar en stor roll för validering av funktions- och säkerhetsanalytiska modeller. De har också ett betydande pedagogiskt värde eftersom de ger handfasta exempel på att det verkligen finns "inneslutningar" som varit intakta under många hundra tusentals år. Studier av naturliga analoger är en utpräglad tvärvetenskaplig forskning som kräver tillgång till expertis av många olika slag: hydrologer, geologer, fysiker och kemister. Det svenska arbetet sker i huvudsak inom ett antal olika internationella samarbetsprojekt. Det är enligt KASAMs mening värdefullt om forskare vid svenska universitet och högskolor ville ta en mera aktiv del i denna fascinerande forskning.

6. SEMINARIUM OM "ETISKT HANDLANDE UNDER OSÄKERHET"

6.1. Utgångspunkter

I sin rapport "Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 1986" presenterade KASAM en ansats för att utifrån etiska utgångspunkter belysa slutförvaring av kärnavfall. Det grundläggande dilemman i det etiska ställningstagandet formulerades därvid som en spänning mellan å ena sidan vår kunskap om avfallets långsiktiga verkningar och å den andra förhållandet att just det långa tidsperspektivet leder till osäkerhet i vår bedömning av konsekvenserna på lång sikt. Vi står med ansvar för de långsiktiga konsekvenser, som blir följden av dagens elproduktion genom kärnkraft. Samtidigt skapar den långa tidrymden osäkerhet om hur vi utövar det ansvar vi accepterat som vårt.

När KASAM i syfte att fördjupa och vidareutveckla dessa frågeställningar i samarbete med Statens kärnbränslenämnd anordnade ett tvärvetenskapligt seminarium 8-9 september 1987, var det därför naturligt att formulera den övergripande etiska problemställningen med orden Etiskt handlande under osäkerhet. Till seminariet hade inbjudits ett 30-tal vetenskapsmän och deltagare i den offentliga debatten med både humanistisk/teologisk och naturvetenskaplig/teknisk bakgrund. Dessutom deltog förutom KASAMs ledamöter även företrädare för kärnbränslenämnden, Statens kärnkraftinspektion, Statens strålskyddsinstitut och Svensk kärnbränslehantering AB. Seminariet kommer att redovisas i en särskild rapport, men KASAM vill redan här presentera några huvudlinjer i detta.

Seminariet bekräftade att det, just när man anlägger ett "avfallsperspektiv" på kärnkraften, dvs behandlar vad vi skall göra med det avfall som måste tas om hand, oavsett hur vi fortsättningsvis gör med kärnkraften, är fruktbart och riktigt att formulera den övergripande etiska frågeställningen som "Etiskt handlande under osäkerhet". Ett viktigt skäl till detta är den kunskap vi har om den långa tidsdimensionen när det gäller kärnavfallet - vi vet t ex halveringstiderna för olika typer av kärnavfall. Det finns därför ett unikt, klart samband mellan vad vi idag vidtar för åtgärder och vad som kan inträffa långt in i framtiden. Nutid och framtid hör uppenbart ouplösligt samman. Sedd i ett avfallsperspektiv har kärnkraften tydliggjort hur vårt ansvar sträcker sig så långt in i framtiden, att vi t o m saknar förmåga att föreställa oss denna framtid. Detta innebär att vi tvingas acceptera osäkerhet i vår bedömning av konsekvenserna på lång sikt av vårt handlande idag.

Förhållandet att ansvarshorisonten alltså inte bara gäller nuet och den nära, överskådliga framtiden utan också den obestämda framtiden ställer krav på en ny sorts solidaritet, en solidaritet i tid, mellan nutid och framtid.

Samtidigt fann flera av de medverkande vid seminariet det viktigt att framhålla, att den långa tidsdimensionen trots allt inte är unik för kärnkraften. Snarare bör frågan om hur vi hanterar kärnavfallet kunna tjäna som modell för hur vi bör ge

oss i kast med en rad andra långsiktiga konsekvenser av "vår generations framfart, som skett till priset inte bara av nyttigheter för vår generation utan också av hot mot människors hälsa och livsmiljö tusentals generationer framöver". Ett samspel av faktorer gör att det är just kärnavfallet som först fått bredare uppmärksamhet, inte minst det faktum att kärnkraftsteknologi för många människor förknippas med kärnvapenteknologi.

En huvudfråga i den etiska bedömningen av hur vi tar hand om kärnavfallet blir hur vi i vårt handlande skall ta hänsyn till en i det långa tidsperspektivet ofrånkomlig osäkerhet. De riktningar, i vilka seminariet genom sin uppläggning och tvärvetenskapliga sammansättning rörde sig kan sammanfattande tecknas i följande punkter.

6.2. Olika typer av osäkerhet

Vi rör oss med olika typer av osäkerhet och generellt därmed också med olika tidsdimensioner av osäkerhet: den mänskliga, den samhällsliga, den biologiska och den geologiska. För samhället är t ex 1 000 år ett långt tidsperspektiv - tänk bara på vad som kunnat ske i Västeuropa de senaste två århundradena! Geologiskt representerar däremot 24 000 år (halveringstiden för plutonium) ett ytterligt kort tidsperspektiv, närmast en obetydlighet, medan samma tidrymd för biosfären framstår som lång.

6.2.1. Människans inbyggda begränsningar

På ett sätt är det oegentligt att tala om människan som en osäkerhetsfaktor. I själva verket är nämligen människan en ovanligt välfungerande varelse med stark utvecklingspotential. Men samtidigt har hon vissa i sig inbyggda begränsningar, ofullkomligheter, hon är "inherently unfool-proof". Dessa i människan inneboende begränsningar söker man ofta eliminera genom att tekniskt förbättra säkerheten i syfte att med ett "perfekt" tekniskt system uppnå säkerhet och därmed göra systemet oåtkomligt för mänskligt felhandlande.

Utifrån vad vi vet om människans sätt att fungera som individ kan man ifrågasätta, om detta är en framkomlig väg. För det första bygger vi i varje system in den ofullkomlighet, som utmärker människan. För det andra har människan en oförmåga att hantera händelselöshet - ett passivt skeende sänker hennes förmåga att gripa in vid oförutsedda händelser och kan dessutom fresta henne att felaktigt söka bryta händelselösheten. För det tredje är hjärnans behov av stimulans fundamentalt, vilket bl a tar sig uttryck i att människan har ett behov av att kunna kontrollera.

Vill man minska den risk för felhandlingar, som ligger i människans inneboende begränsningar, måste man alltså ta hänsyn till den mänskliga individens förutsättningar. Frågan blir hur detta kan ske, när det gäller slutförvar av kärnavfall. Byggs t ex inte, även i slutförvarssystemet in att dess säkerhet kan påverkas av risken för mänskliga felhandlingar eller av den

ofullkomliga kunskap, som just på grund av människans begränsning karakteriserar även den mest sakkunnige expert? Finns det en fara i att människor tvingas tolerera att vara avstängda från inflytande och kontroll, som skulle bli fallet i ett längre perspektiv vid ett helt slutet förvar av kärnavfall?

Lika viktigt som det är att ta hänsyn till individens förutsättningar är det dock att beakta människans sätt att fungera i grupp. Studier visar, att gruppen, särskilt under starkt tryck utifrån, strävar efter enighet, med följd att det egna personliga kritiska omdömet lätt utplånas. Gruppen uppfattar sig som osårbar, vilket kan leda till överoptimism och därmed till risktagande. Medlemmarna avtrubbas lätt och vaksamheten går förlorad. Oron klingar av, innan den har kanaliserats. Man blir blind för kritik utifrån. Det är därför viktigt att gruppens arbetsresultat utsätts för en grundläggande och kritisk granskning av "utomstående", alltså av personer som inte deltagit i gruppens arbete.

Genom 1984 års lag om kärnteknisk verksamhet infördes i vårt land ett system med offentlig granskning vart tredje år av kärnkraftsindustrins forsknings- och utvecklingsprogram för sluthantering av använt kärnbränsle. En motivering för denna ordning var att staten ville säkerställa, att de som hade ålagts ansvaret för det praktiska arbetet inför val av metod för sluthantering av det använda bränslet skulle undvika bindningar till en viss metod på ett tidigt stadium av arbetet. Systemet med offentlig granskning synes härigenom vara ägnat att motverka effekter av sådant "grupptänkande", som antytts i det föregående.

6.2.2. Osäkerhet om samhällets utveckling

Varje samhälle har vissa tendenser att reproducera sig självt och därmed bevara sin stabilitet. Dessa tendenser är särskilt tydliga på tre nivåer eller samhällseliga områden. Det gäller för det första överförandet av värden och förhållningssätt till en ny generation (socialisation) inom primärgrupper av skilda slag. Inom dessa skapas en för en grupp gemensam mentalitet, som gör att vi med en hygglig grad av säkerhet kan förutse andra människors beteende. För det andra rör det sig om statens rättsliga apparat, dvs lagstiftning och den sociala kontrollen av att denna efterlevs, samt för det tredje om den ekonomiska aktivitetens sociala nätverk, där olika aktörer utvecklar ett likartat beteende beroende på att de styrs av sina intressen.

Mot denna bakgrund kan, som det formulerades vid seminariet, osäkerhet om samhällsutvecklingen definieras som "upplevelsen av brist på stabilitet inför framtiden, beroende på att stabiliserande faktorer är svaga eller försvagade". Den analys, som lades fram vid seminariet, om utvecklingen av de stabiliserande tendenserna på de tre ovan nämnda nivåerna eller samhällsområdena, visar sammanfattande att skilda grader av säkerhet eller osäkerhet är inbyggda i vårt nuvarande kunskapsystem. Som den säkraste stabiliserande faktorn framstår det rättsliga systemet, under förutsättning att detta är kopplat till legalt våld. Som osäkrast framstår enligt denna den folkliga

mentaliteten, sedan den traditionellt kristna gemensamma värdegrundvalen börjat luckras upp. Samtidigt synes det uppenbart, att just den faktor som framstår som den osäkraste när det gäller att bedöma samhällets stabilitet - konsistens i samhällets värdegrundval - är den viktigaste, om man vill öka säkerheten och samtidigt bevara och stärka demokratin.

Den slutsats man därför kan dra är följande. Säkerheten om samhällsutvecklingen kan ökas endast om fundamentala värden hålls levande genom socialisation och information/opinionsbildning och om dessa värden inlemmas i alla grupper och alla generationer. De viktigaste styrinstrumenten blir därvid inte rätten och polisen utan kulturen och skolan. Detta följer också av att de fundamentala värden det är fråga om bäst kan uttryckas med begreppen en demokratisk samhällssyn, en humanistisk människosyn och en miljömedveten framtidssyn.

Vilka konsekvenser får det för hanteringen av kärnavfallet, om man accepterar att den för det demokratiska samhällets säkerhet viktigaste stabiliserande faktorn är consensus och uppslutning kring fundamentala värden? Här kan vi endast konstatera, att beslutsprocessen i alla dess led spelade en central roll i diskussionen vid seminariet. Några frågor får exemplifiera. Vilka är vägarna att nå consensus kring en lösning? Är en av förutsättningarna för consensus att man arbetar sig fram till kompromisser? Kan beslutsunderlaget breddas genom att fler får insyn och möjlighet att få sin värdering av risker beaktad? Är detta en väg att minska osäkerhet? Hur undviker man att informationen filtreras och att den därmed framstår som manipulativ? Hur vidgar man makten och förmågan att hantera informationen? Hur skiljer man i beslutsprocessen mellan fakta och värderingar, så att de värderingar som varje beslut till sist också är ett uttryck för blir tydliga och därmed kan bli föremål för offentlig debatt och ställningstagande i en demokratisk process? Hur uppnår man gemensamma värderingar där känslökäl till varje pris kräver vissa slutsatser?

6.2.3. Osäkerhet om livsmiljöns utveckling

En tredje vid seminariet behandlad typ av osäkerhet gällde livsmiljöns utveckling. Vi vet att samma vetenskapligt-tekniska framsteg som i många avseenden haft genomgripande, positiva följder för människans livsvillkor, också utsätter livsmiljön för exploatering och åsamkar delvis redan uppenbara skador. Dessutom kan vi, om inte effektiva motåtgärder vidtas, förutse ytterligare hotande effekter, t ex skador på ozonskiktet och genetiska skador på människan. Både i ett relativt kort tidsperspektiv och det längre, som gäller kärnavfallet, måste åtgärder mot skador och hot mot livsmiljön ta sikte på såväl nusituationen som livsmiljön för framtida generationer.

Samtidigt är dock svårigheterna att på längre sikt förutsäga konsekvenserna av de åtgärder vi idag vidtar stora. Vi rör oss med alltför många osäkra faktorer, t o m när det gäller villkoren för mänsklighetens framtida överlevnad, för att kunna göra något så när säkra förutsägelser. Med säkerhet vet vi dock

att vårt handlande idag, om vi inte vidtar effektiva motåtgärder, leder till en försämring av framtida livsmiljöer. Vissheten om att skadorna kan komma att inträffa borde därför etiskt sett väga tyngre än osäkerheten om de framtida skadornas storlek.

Sett i det större sammanhang, som livsmiljön utgör, är visserligen problemet att konstruera ett säkert slutförvar för kärnavfall en relativt liten fråga. Dock kan den modellmässigt få en avgörande betydelse genom att man just i relation till detta problem medvetet vägt in långsiktiga etiska aspekter.

Den slutsats som för dagen ligger närmast till hands att dra av att vårt handlande i relation till livsmiljön utmärks av osäkerhet är, att vi behöver rådrum för att ta fram "acceptabla" lösningar och därmed söka undvika förhastade beslut, som kan stäcka handlingsfriheten.

6.3. System som minskar osäkerheten

Av analysen av olika typer av osäkerheter har redan framgått att det är viktigt att i bedömningen av den grad av säkerhet, som går att nå, urskilja vilken typ av osäkerhet man tar ställning till. I den slutliga bedömningsprocessen måste sedan de olika slagen av osäkerheter vägas samman. Hur långt kan ökad säkerhet på en nivå uppväga kvarstående osäkerheter på andra nivåer?

Uppenbart är därvid att naturvetenskapligt/tekniska osäkerheter på ett stadium av bedömningsprocessen måste behandlas åtskilt från andra typer av osäkerheter. I det material, som lades fram vid seminariet, konstaterades följande.

Bl a med tanke på det långa tidsperspektivet är det omöjligt att naturvetenskapligt/tekniskt hävda att absolut säkerhet går att nå. I detta perspektiv framstår det för övrigt klarare att alla kunskaper kan vara behäftade med osäkerheter, vilket bl a betyder att fel kan vara inbyggda i varje konstruktion. Däremot kan man hantera de naturvetenskapligt/tekniska osäkerheterna så att man minskar riskerna för framtida skadlig påverkan på människa och miljö.

Två grundläggande principer för slutförvarssystemet framstår därvid som viktiga. Båda syftar till att slutförvaret skall vara så utformat att det kan tåla misstag, vara "självförlåtande", alternativt ha en inbyggd säkerhet. Den ena är flerbarriärprincipen, enligt vilken avfallet är omgivet av flera av varandra oberoende barriärer, i syfte att förvarets säkerhet inte skall hänga på funktionen av en enstaka barriär. För att motverka den grundläggande osäkerhet som ändå kvarstår i analysen av barriärernas funktion - i och med de långa tidsperioder som gör det omöjligt att fullt ut prova barriärerna i laboratorieexperiment - kompletteras denna med en andra princip: att söka utforma förvaret som ett naturnära system. Man söker då material, som är naturligt förekommande, och man kan också använda sig av de observationer som görs i

naturen och jämföra med naturliga system, s k naturliga analoger (se avsnitt 5).

6.4. Risk

Ordet risk kan användas i huvudsakligen två, närbesläktade betydelser. För det första kan det beteckna den uppskattade sannolikheten att en farlig händelse skall inträffa. För det andra kan ordet risk, mera allmänt, beteckna en situation där det är möjligt men inte säkert att en farlig händelse skall inträffa. Man innefattar därvid i begreppet risk både sannolikheten för den farliga händelsen och den farliga händelsens karaktär.

I riskanalyser ingår alltså bedömningar såväl av sannolikheten av en farlig händelse som av konsekvenserna av denna händelse.

I beslut om verkställighet av olika led i hanteringsgången för använt kärnbränsle ingår ställningstaganden till vad som är en ur samhällets och medborgarens synvinkel godtagbar risknivå och en avvägning av risk mot samhällsekonomiska och andra konsekvenser av ett beslut. Sådana avvägningar kan inte göras enbart från naturvetenskapliga bedömningsgrunder.

Detta är den allmänna bakgrunden till att ett av seminariets fyra teman var "risk". Diskussionen rörde sig kring begreppen uppskattad risk, upplevd risk och acceptabel risk.

Vid seminariet redogjordes för resultatet av psykologiska studier av hur människor upplever risker. Ett resultat av dessa studier är att informerade experters riskbedömningar ofta skiljer sig radikalt från allmänhetens. Det är intressant att konstatera att det både finns frågor, där experterna bedömer riskerna som avsevärt mindre än vad allmänheten gör, och frågor där allmänheten uppfattar riskerna som avsevärt mindre än vad experterna gör. Exempel är kärnavfall resp brandrisker; båda områden där relativt omfattande information har lämnats till allmänheten. Resultaten från studierna visar också att det kan finnas stora skillnader mellan riskupplevelser hos olika grupper inom allmänheten - beroende på utbildningsnivå, kön, ålder etc. Vissa studier tyder på att män uppfattar begreppet risk mer som sannolikhet för en negativ händelse, medan kvinnor i större utsträckning förknippar begreppet risk med konsekvenserna av den negativa händelsen.

I diskussionen underströks att syftet med psykologiska studier kring riskbegreppet inte är att få fram kunskaper, som kan användas för att manipulera människor, att besvara frågan: "hur man skall få folk att acceptera hanteringen av kärnavfall". I stället bör kunskap om vilka faktorer det är som påverkar våra riskuppfattningar och riskbedömningar bidra till att vi bättre kan värja oss mot manipulation från olika håll.

En särskild föredragning ägnades frågan om "filosofin" bakom strålskyddet och framväxten av en samsyn mellan denna "filosofi" och tankegångarna bakom utformningen av skydd mot

kemiska och andra skadliga ämnen, ett s k allmänt genotoxiskt skydd.

En viktig princip i "strålskyddsfilosofin" har sammanfattats i begreppet ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Detta begrepp innebär att all strålexponering skall hållas så låg som det är rimligt möjligt med beaktande av ekonomiska och samhällseliga överväganden.

Vid tillämpningen av denna filosofi utgår strålskyddsmyndigheterna från antagandet att det inte finns något tröskelvärde nedanför vilket ett stråldostillskott inte har någon skadlig effekt. Detta uttrycks i hypotesen om den s k linjära relationen, enligt vilken skadan av en stråldos är proportionell mot dosens storlek, oavsett hur liten dosen är. Denna linjära relation är omdiskuterad bland forskare; några anser att den underskattar risken för skada av en liten stråldos, andra anser att små stråldoser inte leder till någon skada alls.

Ansvariga internationella organ och nationella myndigheter bedömer den linjära relationen utan tröskelvärde som ett tillräckligt säkert mått på strålningsrisken och använder sig av den när de utformar strålskyddsregler.

Uppfattningen vid seminariet var att synsättet med en linjär relation mellan dos och skada utan tröskelvärde samt ALARA-principen var etiskt acceptabla synsätt. Dessa synsätt bör också präglade vår inställning till doser av vissa kemiska och andra skadliga ämnen.

En allmän slutsats bör alltså vara att människan bör bete sig så, att tillskotten av radioaktiva ämnen och kemikalier på vår planet blir små. Villkorslagen 1977 och kärntekniklagen 1984 har resulterat i ett omfattande arbete med tänkande, administration och konstruktion på området kärnavfall. Samhället måste tillägna sig samma syn vad gäller skydd mot långsiktig verkan av kemiska och andra skadliga ämnen.

För att minska de långsiktiga riskerna för negativ miljöpåverkan så långt det är möjligt måste vi, framhålls det i olika sammanhang under seminariet, söka oss fram till system som nära knyter an till naturen. Följande "budord" formulerade en av deltagarna som vägledande:

- " - Ej skall Du substanser bruka som ej bryts ned i Ditt vatten.
- Ej skall Du processer bruka som ger substanser livet ej fördrar.
- När detta inte går: konstruera på bästa sätt: Tänk på livet så att Du helgar det.
- Missbruka ej Din kunskap och Din teknik för att skada liv."

6.5. Etiskt paradigmskifte

Övervägandena vid seminariet i dess helhet om vad som är ett rätt etiskt handlande med tanke på långsiktiga konsekvenser och under den osäkerhet, som därmed utmärker handlandet, pekar mot

ett åtminstone partiellt etiskt paradigmskifte. Här kan endast göras några antydningar om i vilken riktning detta går.

För det första är det uppenbart, att den etiska teori, som går under beteckningen konsekvensetik, måste kompletteras. Det för konsekvensetiken traditionella kriteriet, att en handling är moraliskt rätt, om den leder till minst lika goda konsekvenser som andra tänkbara alternativ, är otillräckligt. Med tanke på vissa handlingars långsiktiga konsekvenser kan vi nämligen aldrig veta om en handling verkligen var rätt. Vi tvingas i stället arbeta med sannolikhetskalkyler, samtidigt som vi måste vara öppna för att dessa kan slå fel.

Det framfördes i detta sammanhang, att vi visserligen i relation till långsiktiga konsekvenser aldrig kan upphöra att söka beräkna dessas konsekvenser, om än i form av sannolikhetskalkyler. Men samtidigt måste detta kompletteras med beslutsmetoder för rätt handlande. Därvid betonades särskilt att vi i våra beslut klart måste ange, om dessa gäller konsekvenser, som vi endast kan beräkna med en viss grad av sannolikhet, och besluten alltså träffas under osäkerhet, eller om det alternativt är fråga om beslut under risk. Har vi underlag för att göra en någorlunda rimlig bedömning av riskerna, är det fråga om beslut under risk. Det gjordes gällande att beslut om behandlingen av kärnavfall utifrån dagens kunskap hör in under kategorin beslut under osäkerhet. Däremot finns det skäl att anta att frågan om kärnkraftverkens driftsäkerhet hör till kategorin beslut under risk.

Svårigheterna att på lång sikt beräkna konsekvenserna av våra handlingar och den osäkerhet som följer därmed leder vidare till att behovet av etiska principer eller grundnormer aktualiseras på ett nytt sätt. Med tanke på att verkningarna på lång sikt av vårt handlande idag i hög grad gäller livsbetingelserna för allt levande, är det naturligt att söka grundnormer i naturens eget sätt att fungera och ställa frågan, om det finns en biologisk etik. Försök att formulera en sådan gjordes också, och enighet förelåg om att detta är en viktig möjlighet att nå fram till bärande etiska principer, till värn för både människan och hennes livsmiljö. Vårt ansvar på lång sikt skulle därmed kunna sammanfattas i principen: "Belasta naturen lagom litet!"

Samtidigt stod det klart att vad vi kan kalla en naturetik måste kompletteras med de etiska principer, som kan utläsas ur en humanistisk människosyn. Detta gäller då inte bara antaganden om människans värde utan också om för människan grundläggande livsvärden. Centralt i detta sammanhang är möjligheten till ansvar, insyn och kontroll. På denna punkt aktualiserade seminariet gång på gång dels frågan om beslutsprocessen, dels problemet att kunskaper och information är ojämnt spridda i vårt samhälle. Man torde sålunda kunna konstatera, att flertalet människor inte fått information i förståelig form och därmed saknar möjligheter till insyn och demokratisk kontroll. Det borde t ex vara möjligt att på flera områden kunna precisera vilka fakta som är okontroversiella respektive vilka fakta det råder olika uppfattningar om. När det gäller kärnavfallsområdet betonades att den gemensamma

faktabasen i dagens läge är "onödigt liten" samt att det på detta område krävs en vidgad dialog mellan experter, opinionsbildare och allmänhet.

Detta senare är desto viktigare som vi för det andra tycks stå inför ännu ett etiskt paradigmskifte. Den västerländska etiken har av tradition dominerats av regler för den enskildes handlande. Den har vidare varit centrerad kring människornas egna intressen och behov. När ansvarshorisonten vidgas till verkningarna av vårt handlande långt in i framtiden för livs-
betingelserna för allt levande, måste det gemensamma och kollektiva ansvaret på ett nytt sätt ställas i centrum. Vidare måste ansvaret i allt högre grad gälla hänsynen till allt levande och icke-levande, dvs den totala miljön.

Innebörden av detta återstår ännu att utveckla, men en konsekvens står helt klar både utifrån erfarenheten av KASAMs eget arbete och av seminariet. Den etiska bedömningen måste ske i ett samspel mellan människor med olika kompetens, erfarenheter och ansvarsområden och ingå som ett led i varje del av den arbetsprocess som skall leda fram till ett nödvändigt slutligt ställningstagande. Facketikerns särskilda bidrag i denna bedömning kan endast vara att klarlägga problem- och konfliktmönster i relation till uppställda kriterier för hanteringen av kärnavfall. Men bedömningen av hur kriterierna uppfylls måste ske i ett samspel mellan olika kompetenser och fackområden och öppet kunna redovisas som grund för det ställningstagande som vår generation måste göra. Detta är desto viktigare som kriterierna, såsom dessa framgår av redan fattade politiska beslut, är och måste vara relaterade till samhällets grundläggande värderingar av människors liv, hälsa och trygghet med tillämpning på också kommande generationer och självklart på livsmiljön i dess helhet.

6.6. Vårt ansvar - kommande generationers ansvar och behov av kontroll

En huvudfråga vid seminariet gällde vår generations ansvar för avfallet från kärnkraftverken i förhållande till kommande generationer. Enligt den hittills förhärskande synen har gällt att det är vår generations ansvar att finna en sådan lösning av avfallsproblemet att avfallet efter att ha förslutits inte kräver någon övervakning. KASAM ifrågasatte redan i föregående rapport denna huvudprincip. Det skedde bl a med hänvisning dels till att "vi saknar kunskapsunderlag för att ta ansvar för samtliga tänkbara konsekvenser för framtida generationer och deras livsgrundval", dels till att det enligt en humanistisk människosyn "är ett värde att garantera kommande generationer samma rätt som vi själva till integritet, etisk frihet och ansvar".

Seminariet fördjupade diskussionen i denna principiellt mycket viktiga fråga och var enigt om att vi i varje fall är på väg mot ett nödvändigt paradigmskifte i synsätt. Det återstår ännu att klarlägga vilka konsekvenser detta får för bl a det tekniska arbetet i kärnavfallsfrågan.

Resonemanget löpte huvudsakligen efter två linjer, vilka i sak leder till samma slutsats. För tydlighetens skull redovisar vi här båda resonemangstyperna.

Enligt den ena något utförligare, är det naturligt att på varje teknisk produkt, som skall fungera under en något längre tid, ställa två krav: den bör vara dels driftsäker, dels reparerbar. Samma krav kan ställas på ett avfallsförvar. Driftsäkerheten innebär därvid att kärnkraftsavfallet förvaras så att, såvitt vi vet, inte kommande generationer behöver göra något för att skydda sig och sin miljö från det radioaktiva avfall vi lagrat. Reparerbarhet innebär att kommande generationer kan rätta till de eventuella misstag vi ändå begår i förvaringen av kärnkraftsavfall.

Hittills har driftsäkerhetskravet nästan uteslutande stått i centrum för diskussion, forskning och politiska beslut om kärnavfallet. Detta har varit naturligt, därför att kärnavfallsdebatten ännu så länge förts i ett kärnkraftsperspektiv. Vi har diskuterat avfallsfrågans lösbarhet/olösbarhet som argument för/emot att använda kärnkraft. I detta perspektiv är det rimligt att koncentrera sig på driftsäkerhetskravet. Samtidigt har reparerbarhetskravet kommit i bakgrunden.

Anlägger vi istället ett avfallsperspektiv, dvs låter tyngdpunkten ligga på vad vi skall göra med den betydande mängd avfall som måste tas om hand, oberoende av hur vi gör med kärnkraften, blir med nödvändighet reparerbarhetskravet mera aktuellt. I avfallsperspektivet tvingas vi nämligen ta hänsyn till faktorer som svårigheter att nå total enighet bland experter om olika systemlösningars absoluta säkerhet utan möjligheter att gå in i systemet och reparera, samt till att mänskliga misstag och felhandlingar också kan ske i utformningen av slutförvaret.

Det framhölls att det mot denna bakgrund ter sig svårt att se hur vi skall kunna fatta beslut om en slutförvaringsmetod, som är "irreversibel", oåterkallelig, i den meningen att reparerbarhetskravet inte är uppfyllt i rimlig utsträckning. Samtidigt står det dock klart att kraven om driftsäkerhet och reparerbarhet delvis står i strid med varandra. Driftsäkerheten kräver ett, i varje fall i en viss mening, slutet förvar. Reparerbarheten kräver ett, delvis i en annan mening, öppet förvar. Den tekniska frågan om hur dessa båda krav skall kunna kombineras är ännu otillräckligt utredd.

I den andra resonemangstypen spelade den förutsedda kunskapsutvecklingen en viktig roll. Å ena sidan kan vi idag knappast garantera att kunskapen om avfallsförvaring finns kvar i all framtid. Slutförvaret bör i ett sådant perspektiv utformas så att det inte kräver någon övervakning efter att ha förslutits. Det är vårt ansvar att finna en systemlösning, som gör att förvaret inte kräver aktiv övervakning för att säkerheten skall kunna upprätthållas.

Å andra sidan är det också tänkbart, att kunskapsutvecklingen blir sådan, att kommande generationer får möjlighet att behandla avfallet på ett sätt, som ökar säkerheten och/eller

vill utnyttja energiresursen som finns i avfallet. Valet av vad man vill göra måste åvila den generation det gäller och bygga på dess avvägning av för- och nackdelar. En utveckling i denna riktning förutsätter att förvaret utformas på ett sådant sätt, att det kan kontrolleras av kommande generationer.

Resonemanget leder till en dubbel slutsats: Ett slutförvar bör utformas så att det dels gör kontroll och åtgärder onödiga, dels inte möjliggör kontroll och åtgärder. Vår generation bör med andra ord inte lägga ansvaret för slutförvaret på senare generationer men bör å andra sidan inte heller beröva kommande generationer deras möjlighet att ta ansvar.

Med olika formuleringar och från delvis olika utgångspunkter uppsattes alltså en dubbel målsättning för avfallsförvaret: driftsäkerhet och reparerbarhet, kontroll obehövlig men samtidigt möjlig. En förutsättning för denna dubbla målsättning är fortsatt utveckling av kunskaper och kompetens för avfallshantering.

Den nu angivna målsättningen med de skiftande motiveringar den fick vid seminariet, ligger helt på linje med de överväganden som gjordes vid seminariet i dess helhet och som i sina huvudlinjer redovisats i det föregående.

Samrådsnämnden för kärnavfallsfrågor avser att fortsätta att bearbeta dessa frågeställningar.

ORDLISTA

Denna ordlista har utarbetats speciellt för att användas i samband med hantering av kärnavfall.

- Agens:** (Plural agentier) En faktor av något slag t ex kemiskt ämne eller en typ av strålning ("verkande medel").
- Aktinid:** Benämning på de tyngsta kända grundämnena (atomnummer 89-103), däribland uran, thorium, americium, plutonium och neptunium. Samtliga är alfa-aktiva.
- Alfaaktivt avfall:** Radioaktivt avfall innehållande betydande mängd alfa-aktiva ämnen, vanligen aktinider.
- Alfaaktivitet:** Radioaktiv strålning bestående av alfa-partiklar, dvs heliumkärnor.
- Barriär:** (I avfallsförvar) Naturlig eller artificiell faktor som förhindrar utläckage ur förvaret.
- Bentonit:** Namn på leror i montmorillonitgruppen, varav en (natriummontmorillonit) har stor förmåga att svälla i kontakt med vatten.
- Biosfär:** Den del av omgivningen där levande organismer finns.
- Biota:** Levande organismer.
- Buffertmaterial:** Material som används för att fylla tomrum mellan avfallsbehållare och bergyta i bergförvar, t ex lera.
- Buffertzona:** Kontrollerat område kring kärnanläggning (mellanlager etc) där allmänheten ej har tillträde.
- Darcy's lag:** Grundvattenhastigheter kan beräknas med hjälp av Darcy's lag; $Q/A = -K(dh/dl)$, där Q =flöde (m^3/s), A =ytanhet (m^2), K =permeabilitet (m/s), dh/dl =tryckgradient (m/m).
- Deterministisk analys:** (Om matematisk modell) Använder bestämda parametervärden vid beräkning (Motsats: probabilistisk, se do).
- Diffusion:** Transport av lösta ämnen i koncentrationsgradient på grund av molekylrörelser.
- Dispersion:** Sammanfattande benämning på fenomen som ger en utspridning av en koncentrationsfront i strömmande vatten. Leder till att

en liten del av det lösta ämnet kan transporteras snabbare än vattnet. Uppstår genom molekylär diffusion och/eller omblandning av vattnet (turbulens).

- Ekosystem:** Ett naturligt komplex av djur och växter och de speciella fysikaliska betingelser som de lever under; organismerna på en lokal och deras omgivning betraktat som en enhet.
- Eruptiv bergart:** Bergart bildad av magma som strömmat upp från jordens inre. Indelas i plutoniska, vulkaniska och intrusiva bergarter.
- Fixering (i jord):** Övergång av ett vattenlösligt ämne till mer eller mindre olöslig form, varvid vidare spridning förhindras.
- Fulvosyror:** (se även humus) Organiska syror som bildas vid nedbrytning av växt och djurdelar. Kan vara komplexbildare (se do) för radioaktiva ämnen och andra metaller och påverka rörligheten.
- Förvar:** Lagringsutrymme för avfall.
- Gabbro:** Basisk djupbergart (med låg kvartshalt).
- Genotoxisk:** Som ger upphov till skador på gener.
- Geohydrologi:** Läran om de hydrologiska och hydrauliska egenskaperna hos vatten under markytan.
- Geosfär:** Berggrund och grundvatten.
- Grundvatten:** Vatten som helt fyller hålrum i jord och berg och vars hydrostatiska tryck är större än eller lika med atmosfärstrycket.
- Heterogena processer:** Kemiska processer två eller flera faser (fast, vätska, gas) förekommer.
- Humus:** Organisk komplexbildare i mark, bildad genom nedbrytning av växtdelar. (Jfr fulvosyror) Humus är sammanfattande beteckning för humussyror, fulvosyror m fl.
- IAEA:** International Atomic Energy Agency, Internationella atomenergiorganet.
- Icke plats-specifik analys:** (Eng. generic analysis) Allmän analys utan koppling till speciell plats.
- ICRP:** International Commission on Radiological Protection, Internationella strålskyddskommissionen.

Illit:	Lermineral, bildat genom vittring av glimrar, fältspater etc.
Intrusiv bergart:	Bergart som trängt upp i annan formation i form av smälta (jfr eruptiv bergart).
Joniserande strålning:	Strålning som ger upphov till joner i det material som den tränger in i. Exempel på joniserande strålning är alfa-, beta- och gammastrålning.
Kapsel:	Behållare för fast radioaktivt avfall (glas, bränsle).
Kolloider:	Fasta partiklar som är så små att de håller sig svävande i en lösning (några myn).
Kompartiment:	(I matematiska modeller) Del av omgivningen som ur spridningssynpunkt behandlas som en enhet (t ex sjövattnen, matjord, sediment)
Komplexbildare:	Ämne i lösning som tillsammans med metalljoner (t ex radionuklider) bildar sk komplex som kan uppvisa andra löslighets- och sorptionsegenskaper än de ursprungliga jonerna.
Koncentration-faktor:	Mått på anrikning av radionuklid etc. som uttrycks som en haltskillnad mellan olika komponenter i ett ekosystem. T ex vatten/fisk.
Konceptuell modell:	En begreppsmässig modell av verkligheten.
Konsekvensanalys, biosfär:	Analys för att uppskatta individ- och kollektivdoser vid ett utsläpp av radioaktivitet till biosfären.
Limnisk:	I sötvatten.
Litosfär:	Berggrund (av grek lithos = sten).
Mafiskt mineral:	Allmänt uttryck för silikatmineral innehållande järn och magnesium. Exempel: olivin, hornblende, biotit.
Magmatisk bergart:	Bergart bildad ur smälta (magma).
Mellanlagring:	Lagring av avfall i väntan på slutförvaring, t ex i CLAB.
Metamorf bergart:	Bildad genom omvandling av fast bergart genom inverkan av tryck, temperatur eller kemiska processer.

Migration:	Spridning i mark/berggrund. Kan ske genom transport av lösta ämnen eller partiklar med strömmande vatten eller genom diffusion i vattenfyllda porer etc.
Morfologisk:	Form- (fysikalisk).
Naturlig analogi:	Fenomen i naturen som liknar processer man önskar modellera matematiskt. Utnyttjas för att påvisa existensen av och validera mycket långsamma förlopp som kan förväntas ske kring ett bergförvar.
NEA:	Är förkortning för OECDs Nuclear Energy Agency, OECDs kärnenergiorgan.
Närzon:	(I avfallsförvar) Område i berget kring ett förvar som påverkas kemiskt eller fysikaliskt av anläggningsarbetena i samband med förvarsbygget.
OECD:	Organization for Economic Co-operation and Development, Organisationen för ekonomiskt samarbete och utveckling.
Overpack:	Extra inneslutning av avfall.
Paradigm:	Mönster (modell för naturen)
pH:	Mått på vattenlösningars surhetsgrad (vätejonaktivitet).
Plutonisk bergart:	Magmatisk (se do) bergartskropp, bildad under markytan (jfr eruptiv bergart).
Probabilistisk analys:	(Om matematiska modeller) Bygger på sannolikhet för parametervärden i stället för fixa värden (jfr deterministisk analys).
Radioaktivitet:	Är egenskapen hos vissa ämnen att spontant utsända joniserande strålning.
Radioaktiva ämnen:	Innehåller atomer med instabila atomkärnor, som genom sönderfall strävar efter att nå ett stabilt tillstånd. Vid sönderfallet avger atomen strålning.
Radiolys:	Kemisk reaktion förorsakad av radioaktiv strålning.
Recipient:	Hav, sjö, flod eller annat vatten som fungerar som mottagare för förorenat vatten.
Redoxpotential (Eh):	Mått på oxidations- eller reduktionsförmåga hos lösning (mV).

Sediment:	Avlagring av finpartikulärt material. Kan bilda bergart. Kan också beteckna bottenskikt i hav, sjö eller vattendrag, bildat av fast material (djur- och växtdelar såväl som eroderat mineral) som fallit ut från vattnet samt nedbrytningsprodukter från detta.
Slutförvaring av avfall	Förvaring av avfallet på ett sätt som förhindrar att allmänheten kommer i kontakt med oacceptabla mängder eller halter.
Speciering:	(Kemisk) Fördelning av jonslag i en lösning.
Stratigrafi:	Läran om geologiska avlagringar.
Stråldos:	Är ett allmänt uttryck för absorberad strålmängd eller absorberad energi.
Synergistisk:	Samverkande effekter som tillsammans är starkare än summan av de enskilda delarna.
Sänka:	(I matematiska modeller) Plats där en komponent försvinner ur det studerade systemet, t ex en radionuklid fälls ut i fast form och anrikas i stället för att transporteras vidare.
Tektonik:	Läran om jordskorpans formförändringar och de krafter som orsakar dessa förändringar (bergskedjeveckningar, förkastningar m m)
Tektonisk:	Anger strukturella egenskaper hos berg, dvs yttre form, som uppstått genom deformation av jordytan vid bergskedjebildning.
Transferkoefficient:	se överföringskoefficient
Transient:	övergående
Transuraner:	Aktinider med högre atomnummer än uran (alla utom aktinium, thorium, protaktinium och uran). Samtliga transuraner förekommer mycket sparsamt eller inte alls i naturen.
Trofi:	Närings-
Tuff:	Bergart bestående av fragment av vulkaniskt material som transporterats via atmosfären i samband med vulkanutbrott.
UNSCEAR:	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, FNs vetenskapliga strålningskommitté.

- Upparbetning:** Behandling av använt kärnbränsle för att avlägsna klyvningsprodukter och utvinna klyvningsbart material.
- Validering:** (Om matematiska modeller) Säkerställande att en modell av ett förlopp i naturen och det datorprogram som används för beräkning ger en god bild av det verkliga förloppet. Utförs genom jämförelse av beräkningar och fältobservationer.
- Verifiering:** (om matematisk modell) Kontroll att den matematiska/numeriska lösningen är korrekt.
- Verifiering/
validering:** Verifiering och validering är naturliga delar av varje modellutveckling. Validering av en systemmodell omfattar dels systemmodellens överstruktur, och dels ingående submodeller. I valideringen måste såväl systemanalytiker som teoretiska och experimentella specialister inom olika delområden delta.
- Vulkanisk bergart:** Bergart bildad ur magma (se do) vid vulkanisk aktivitet på jordytan (jfr eruptiv bergart).
- Zeolit:** Aluminiumsilikatmineral.
- Zircaloy:** Metallegering med hög zirkoniumhalt. Används inom reaktorteknologin, t ex till bränslekapsling.
- Överförings-
koefficient** (Även kallad transferkoefficient) Andel av innehållet av en komponent i ett kompartiment (se do) som byts ut per tidsenhet.

ALLMÄNNA FÖRLAGET



ISBN 91-38-09938-1