

Kärnbränslecykelns slutsteg

Använt kärnbränsle – KBS-3

Sammanfattning

Kärnbränslecykelns slutsteg

Använt kärnbränsle – KBS-3

Sammanfattning

SKBF/KBS

Svensk Kärnbränsleförsörjning AB/Avdelningen för
Kärnkraftsavfallets Behandling och Slutförvaring

POSTADRESS: SKBF/KBS, Box 5864, 102 48 Stockholm, Telefon 08-67 95 40

FÖRORD

Reaktorerna Forsmark 3 och Oskarshamn 3, som ägs av Forsmarks Kraftgrupp AB och OKG AB, planeras bli tagna i drift under 1984 respektive vid årsskiftet 1984/85. För att planerna skall kunna fullföljas krävs enligt svensk lag, att regeringen ger särskilt tillstånd att tillföra kärnbränsle till de två reaktorerna. Villkoret för att sådant tillstånd skall kunna ges är, att reaktorinnehavarna visat, att det använda kärnbränslet kan hanteras och slutförvaras på ett säkert sätt. Möjligheterna härtill har utretts inom Svensk Kärnbränsleförsörjning AB, avdelning KBS. Utredningsresultaten har redovisats i rapporten "Kärnbränslecykelns slutsteg. Använt kärnbränsle. KBS-3", som utgör underlag för ansökan om tillstånd för laddning av Forsmark 3 och Oskarshamn 3.

I denna skrift ges en sammanfattning av den hanteringsgång och den slutförvarsutformning, som beskrivs i KBS-3. Den största vikten har lagts vid slutförvaringen och bedömningen av dess långsiktiga säkerhet. En sammanfattande säkerhetsbedömning återfinns i avsnitt 22 sist i skriften.

Stockholm i maj 1983

SVENSK KÄRNBRÄNSLEFÖRSÖRJNING AB
Avdelning KBS

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	SAMMANFATTNING	1
1	Inledning	1
2	Hanteringsgång och slutförvarets funktion	3
3	Använt kärnbränsle	7
4	Anläggningar och utrustningar	9
5	Platsundersökningar	13
6	Bergets grundvattenrörelser	16
7	Grundvattnets och spricksystemens kemi	18
8	Berggrundens förändringar	18
9	Buffert och återfyllnadsmaterial	20
10	Kapsel och kapselkorrosion	21
11	Bränsle och bränsleupplösning	24
12	Radionuklidkemi i grundvattenmiljö	25
13	Nuklidspridning i närområdet	26
14	Nuklidspridning i berget	28
15	Spridning och exposition i biosfären	30
16	Stråldoser	30
17	Säkerhetsmässiga principer	31
18	Platsspecifika data	32
19	Radiologisk säkerhet under drift	36
20	Det slutna förvarets säkerhet	37
21	Missöden och extrema händelser	42
22	Sammanfattande säkerhetsbedömning	44

KÄRNBRÄNSLECYKELNS SLUTSTEG

ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE – KBS 3

SAMMANFATTNING

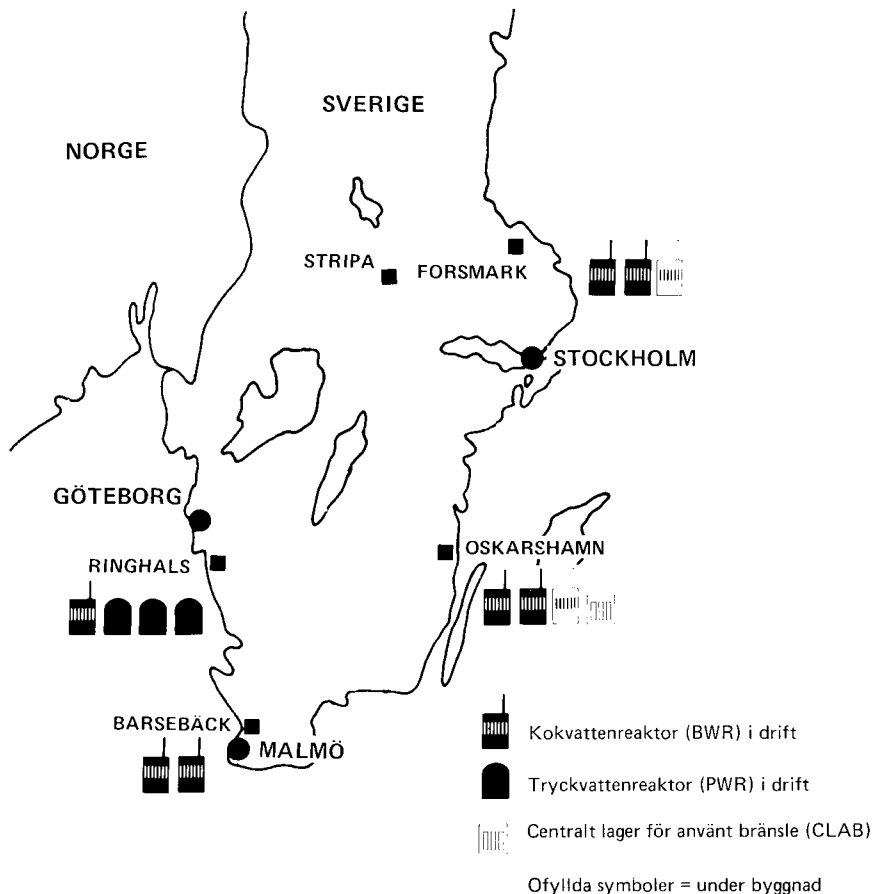
1 INLEDNING

Svensk lag föreskriver att en ny kraftreaktor får tillföras kärnbränsle först efter särskilt tillstånd av regeringen. För att sådant tillstånd skall kunna ges måste reaktorinnehavaren ha visat att det använda kärnbränslet eller radioaktivt avfall från detta slutgiltigt kan tas om hand på ett sätt som uppfyller mycket höga säkerhetskrav.

De svenska kärnkraftföretagen har genom det s k KBS-projektet utrett hur lagens krav kan uppfyllas. Resultaten har redovisats i två rapporter, KBS-1 (nov 1977) avseende högaktivt förglasat avfall från upparbetning och KBS-2 (sept 1978) avseende använt kärnbränsle utan föregående upparbetning. På grundval av KBS-1 samt ett avtal om upparbetning med franska Cogema har regeringen givit laddningstillstånd för fyra reaktorer. KBS-2 har inte prövats av regeringen men har på dess uppdrag granskats av inhemska och utländska remissinstanser. Den förestående drifttagningen av reaktorerna Forsmark 3 (1984) och Oskarshamn 3 (årsskiftet 1984/85) kräver särskilda laddningstillstånd. Ansökningar härom kommer att baseras på slutlig förvaring av använt kärnbränsle utan upparbetning. Då 4 à 5 år förflutit sedan KBS-2 utarbetades har det bedömts motiverat att sammanställa en ny rapport, KBS-3, där de senaste årens utvecklingsarbete beaktas.

Redovisningen i KBS-3 bygger på följande allmänt accepterade grundprinciper.

- En mycket hög grad av säkerhet krävs, på såväl kort som lång sikt.

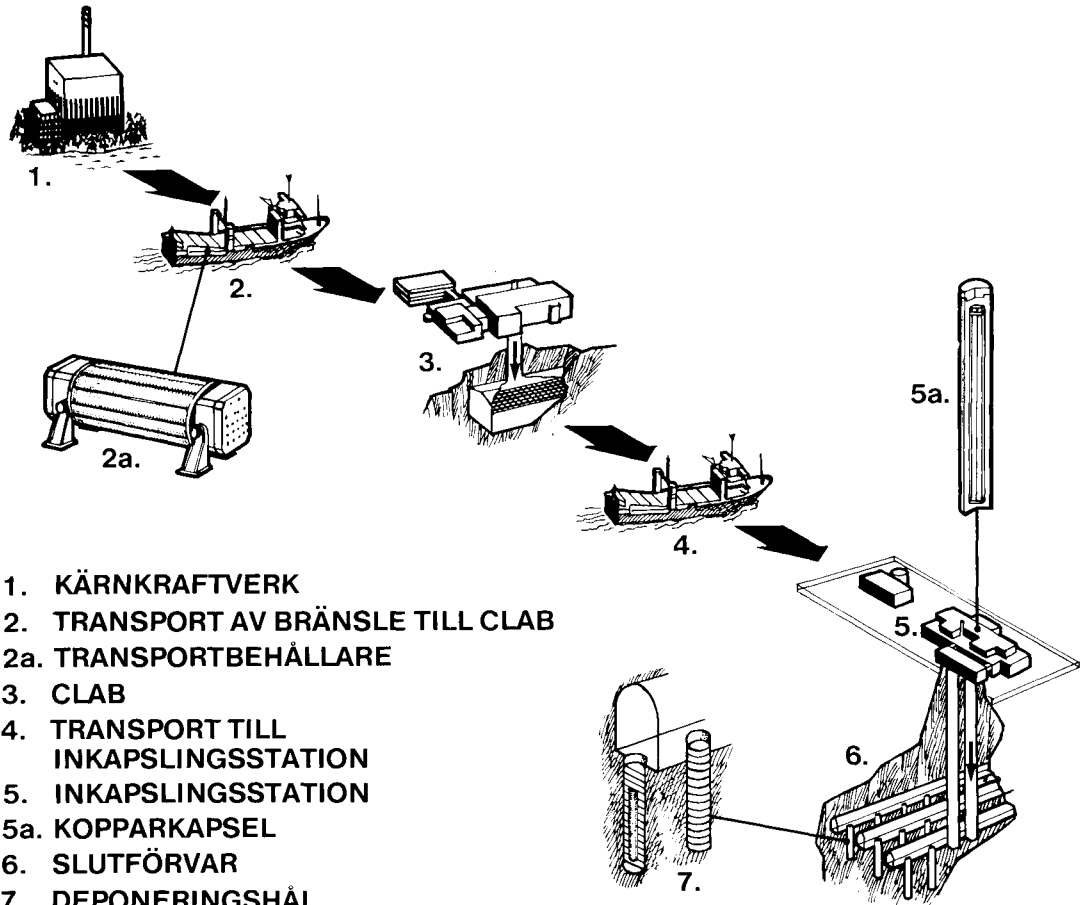


Figur 1. Belägenhet av svenska kärnkraftanläggningar.

- Bördor på kommande generationer skall i möjligaste mån undvikas.
- Erforderliga åtgärder skall kunna genomföras med största möjliga nationella oberoende.

Olika principiella metoder för slutligt omhändertagande av radioaktivt avfall har diskuterats internationellt. Inriktningen har alltmer koncentrerats till slutförvaring i djupa och stabila geologiska formationer. I Sverige, liksom i flera andra länder med liknande geologi, utgör slutförvaring i kristallin berggrund en realistisk lösning.

KBS-3 beskriver hur ett system för säkert slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle kan utformas med utgångspunkt från dagens kunskapsläge. Avsikten är inte att ange hur och var ett slutförvar för använt kärnbränsle skall utföras. Enligt gällande planer skall slutförvaret byggas under perioden 2010 - 2020. Under tiden fram till dess kommer det omfattande forsknings- och utvecklingsarbete, som pågår i många länder, att ge ytterligare underlag för den slutliga utformningen.



Figur 2. Hanteringsgången för använt kärnbränsle.

Rapporten redovisar alla erforderliga hanteringsled men huvudvikten har lagts vid slutförvaringen och därmed sammanhängande långsiktiga säkerhetsbedömningar.

De svenska kärnkraftanläggningarnas lokalisering framgår av figur 1.

2. HANTERINGSGÅNG OCH SLUTFÖRVARETS FUNKTION

Allmänna förutsättningar

En övervägande del av de utrustningar och operationer, som utnyttjas i de olika anläggningarna bygger på erfarenheter från kärnkraftverken och annan industriell verksamhet.

En grundläggande princip i det presenterade systemet är att slutförvarets långsiktiga säkerhet inte skall vara beroende av övervakning efter förslutningen.

För att tillgodose de högt ställda säkerhetskraven tillämpas i slutförvaret den s k flerbarriärsprincipen. Den innebär att sä-

kerheten inte skall vara helt beroende av en enstaka barriär utan bygga på funktionen hos flera barriärer som i möjligaste mån är oberoende av varandra.

Hanteringsgång

Hanteringsgången för det använda kärnbränslet visas schematiskt på figur 2.

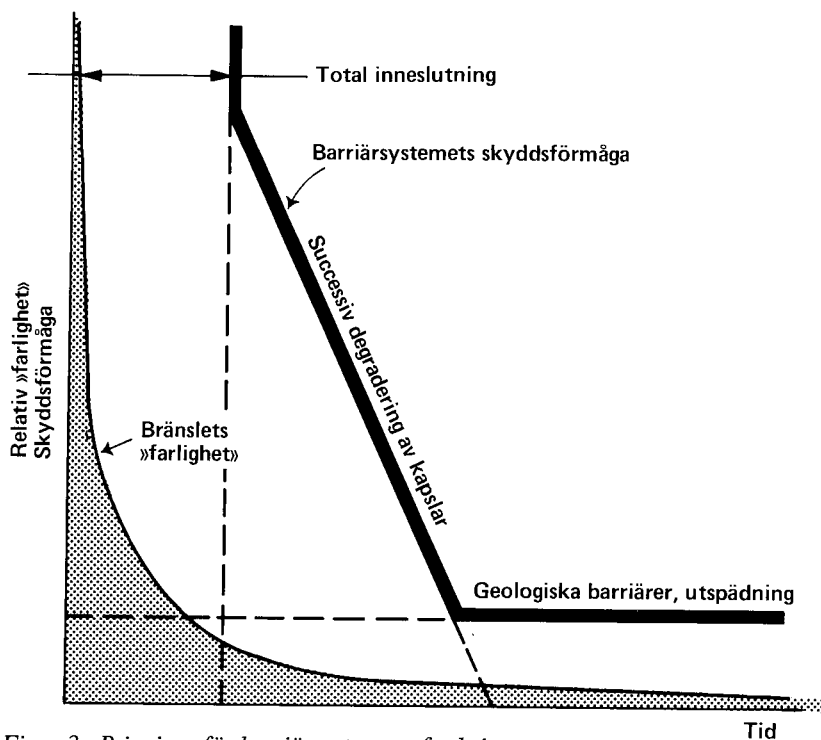
1. Det använda kärnbränslet förvaras först under ca 6 månader i förvaringsbassänger vid kraftverken.
2. Bränslet transporteras i specialkonstruerade behållare (2a) från kraftverken till ett centralt mellanlager.
3. I mellanlagret, CLAB, som är gemensamt för alla svenska reaktorer, förvaras bränslet i vattenbassänger i 40 år.
4. Från CLAB transporteras bränslet till en inkapslingsstation belägen ovan jord i anslutning till slutförvaret.
5. I inkapslingsstationen innesluts bränslet i kopparkapslar (5a).
6. Kopparkapslarna med bränslet överförs till ett slutförvar i berg på ca 500 m djup.
7. I slutförvaret deponeras kapslarna en och en i deponeringshål, där de omges av ett s k buffertmaterial som består av hårt sammanpressad bentonitlera.

Sedan alla kapslar deponerats förseglas slutförvaret genom att alla tunnlar och schakt återfylls med en blandning av sand och bentonitlera.

Slutförvarets funktion

Det använda bränslet har vid deponeringstillfället en mycket hög radioaktivitet och därmed en hög potentiell farlighet. Radioaktiviteten avtar till en början relativt snabbt men med tiden allt långsammare. Aktiviteten efter deponeringstidpunkten avtar i ungefär följande takt (se även figur 6).

efter 100 år	till 1/10
" 1 000 år	" 1/100
" 10 000 år	" 1/400
" 100 000 år	" 1/3 000
" 1 miljon år	" 1/8 000
" 10 miljoner år	" 1/40 000



Figur 3. Principer för barriärsystemets funktion.

Skadlig påverkan på biosfären av de radioaktiva ämnena i bränslet kan förhindras på två sätt, dels genom total inneslutning, dels genom att spridningen sker långsamt och med stor utspädning, så att halterna som kan nå biosfären med grundvattnet blir acceptabelt låga. En total inneslutning kan inte förutsättas bli bestående under hur lång tid som helst. Därför måste skyddet på mycket lång sikt baseras på långsam upplösning och spridning, stor utspädning samt avklingning.

Barriärerna i det här beskrivna systemet utgörs av

- Bränslet själv, som är mycket svårslösligt i vatten.
- Kapseln isolerar helt det använda bränslet från omgivningen under mycket lång tid.
- Buffertmaterialet - den hårt sammanpressade bentonitleran - se figur 11, som förhindrar att strömmande grundvatten kommer i kontakt med kapseln, eller sedan den genombrutits, med det använda bränslet.
- Berget som omger slutförvaret och som valts så att grundvattenomsättningen är mycket låg. I berget sker också en stark fördröjning av de flesta radioaktiva ämnena genom kemiska processer mellan mineralen och de radioaktiva ämnena. Härigenom kommer en mycket stor del av radioaktiviteten att hinna avklinga under transporten i berget.

Barriärernas principiella funktion åskådliggörs av figur 3.

Efter avslutad deponering och i anslutning till förslutningen av tunnlar och schakt avbryts länshållningen av förvaret och kvarvarande hålrum och porer kommer då långsamt att vattenfyllas. När grundvattnet tränger in i deponeringshålen kommer bentonitleran

i buffert- och återfyllningsmaterialet att ta upp vatten och svälla. När håligheter i massan utfyllts kan ingen vidare svällning ske, i stället utbildas ett svälltryck. När förloppet nått jämvikt blir buffertmaterialet minst lika tätt som omgivande berg. Någon vattenströmning av betydelse kan då inte äga rum. Ämnen som finns lösta i vattnet kommer därför att kunna transporteras i leran eller lera/sandblandningen endast genom diffusion.

Ämnen i grundvattnet, som kan angripa koppar, kommer i små mängder men under lång tid att nå kapselytan och orsaka korrosionsangrepp. Efter mycket lång tid kan angreppen nå fram till det inneslutna bränslet. En utlakning av de i bränslet ingående radioaktiva ämnena kan då ta sin början. Den ringa vattenomsättningen och de aktuella ämnenas svårlöslighet gör att utlakningen går ytterst långsamt.

Ämnen som lösts ut från bränslet kommer att diffundera ut genom buffertmaterialet och kan sedan transporteras vidare med grundvattnet. De flesta ämnena fördröjs starkt till följd av olika kemiska och fysikaliska processer och en stor del hinner sönderfalla och övergå till stabila ämnen innan de når biosfären.

Vissa mycket långlivade radioaktiva ämnen kan dock under ogynnsamma omständigheter efter mycket lång tid tänkas komma att nå biosfären. Då de följer grundvattnet, kan utflödet ske i en brunn, i ett vattendrag eller i havet. Krav ställs då att koncentrationerna blir så låga att de inte i någon grad av betydelse förändrar den naturliga strålningsmiljön.

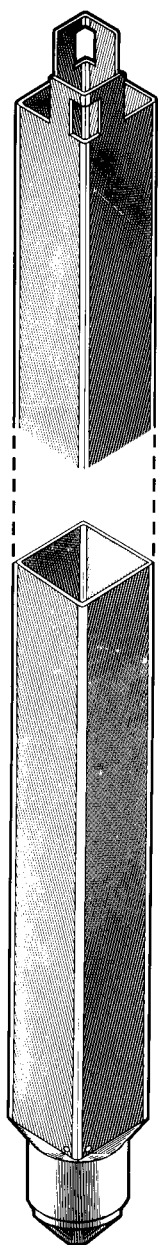
Lokaliseringssynpunkter

Ett slutförvar kan endast förläggas där det finns ett tillräckligt stort bergparti med lämpliga geologiska, hydrologiska och geokemiska egenskaper. I andra hand bestäms förvarets lokalisering av ekonomiska och sociala faktorer. I dagens planer förutsätts ett lokaliseringsbeslut under slutet av 1990-talet.

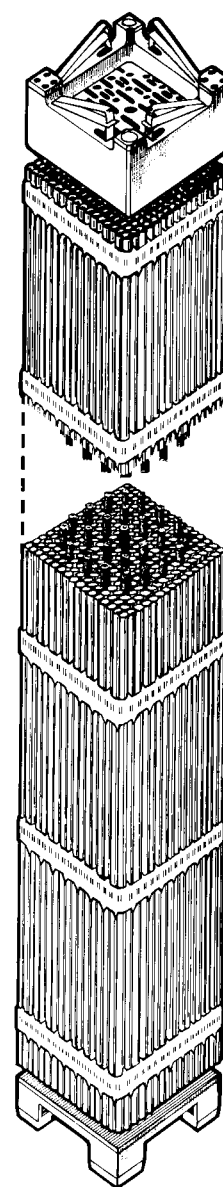
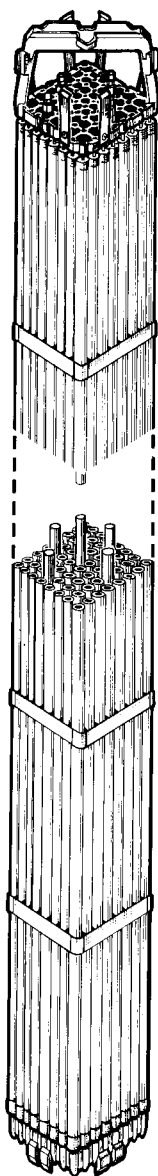
Den behandlingsstation, där det använda bränslet skall inkapslas bör av praktiska skäl samlokaliseras med slutförvaret.

Förläggningsdjup

Ett slutförvar måste förläggas tillräckligt djupt för att på lång sikt inte påverkas av händelser på markytan t ex erosion (bl a till följd av nedisningar), brunnsbörning, underjordsbyggande etc. Ett visst djup krävs också för att vattengenomsläppligheten skall vara tillräckligt låg och de kemiska förhållandena gynnsamma. Djupet bör å andra sidan inte vara för stort, så att höga bergspänningar äventyrar berggrundens stabilitet eller temperaturerna blir för höga. Vid mycket stora djup uppstår också ökade



Figur 4. BWR-bränsle.



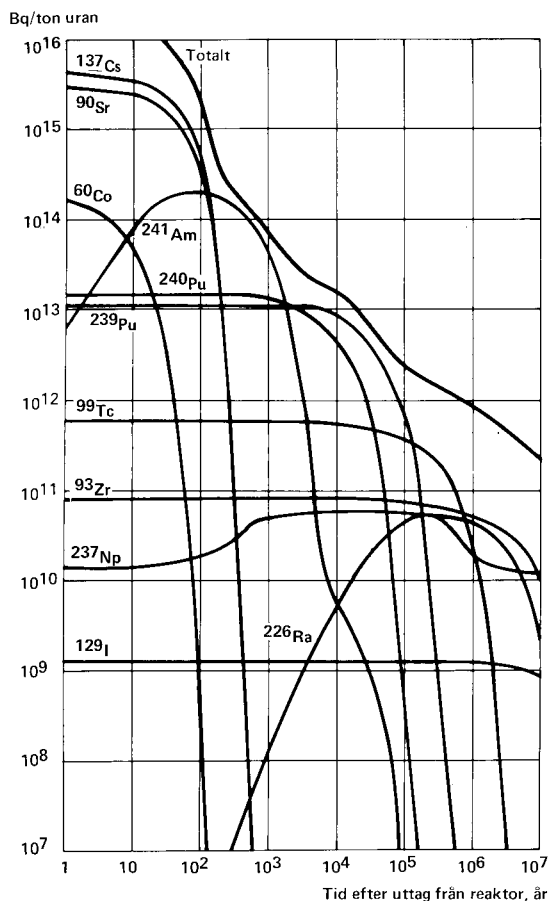
Figur 5. PWR-bränsle.

svårigheter att utföra undersökningar från markytan. I god svensk berggrund kan säkerhetskraven uppfyllas vid ett förläggningsdjup av 400 à 500 m. Förläggningsdjup på upp till ca 1 000 m torde dock inte medföra några svårbemästrade tekniska problem.

3 ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE

Förutsättningar

Enligt riksdagens beslut skall ingen svensk reaktor vara i drift efter år 2010. Den totala mängd använt kärnbränsle, som skall



Figur 6. Radioaktivitet i använt bränsle.

tas om hand blir beroende av hur länge de enskilda reaktorerna kommer att vara i drift. Den redovisning, som SKBF lämnat till Nämnden för hantering av använt kärnbränsle - Plan 82 - som underlag för fastställande av en avfallsavgift, har baserats på en drifttid för varje reaktor av 25 år. Denna beräkningsförutsättning, som satts för att avgiften inte skall bli för lågt beräknad, ger en total mängd använt bränsle motsvarande ca 6 000 ton uran. Om samtliga reaktorer är i drift t o m år 2010 blir den totala bränslemängden något över 7 000 ton. Variationer inom intervallet 6 000 - 7 500 ton saknar betydelse för det principiella system eller de säkerhetsbedömningar som redovisas.

Fig 4 och 5 visar de bränsletyper, som används i svenska reaktorer. Bränsleelementen är något över 4 m långa. BWR-elementen innehåller 63 bränslestavar, har en sida av 139 mm och väger ca 300 kg. PWR-elementen innehåller 264 bränslestavar, har en sida av 214 mm och väger ca 700 kg.

Det använda bränslet består till ca 95% av urandioxid. 3 à 4% utgörs av klyvningsprodukter och ca 1% av plutonium och övriga sk aktinider.



Figur 7. Fordon, behållare och fartyg för transport av använt bränsle.

Radioaktivitet och resteffekt i använt kärnbränsle

I figur 6 visas hur radioaktiviteten hos olika ämnen i det använda bränslet avtar med tiden. Värmeavgivningen, den s k resteffekten, avtar under de första tusen åren till ungefär en tiondel av vad den var vid deponeringstillfället.

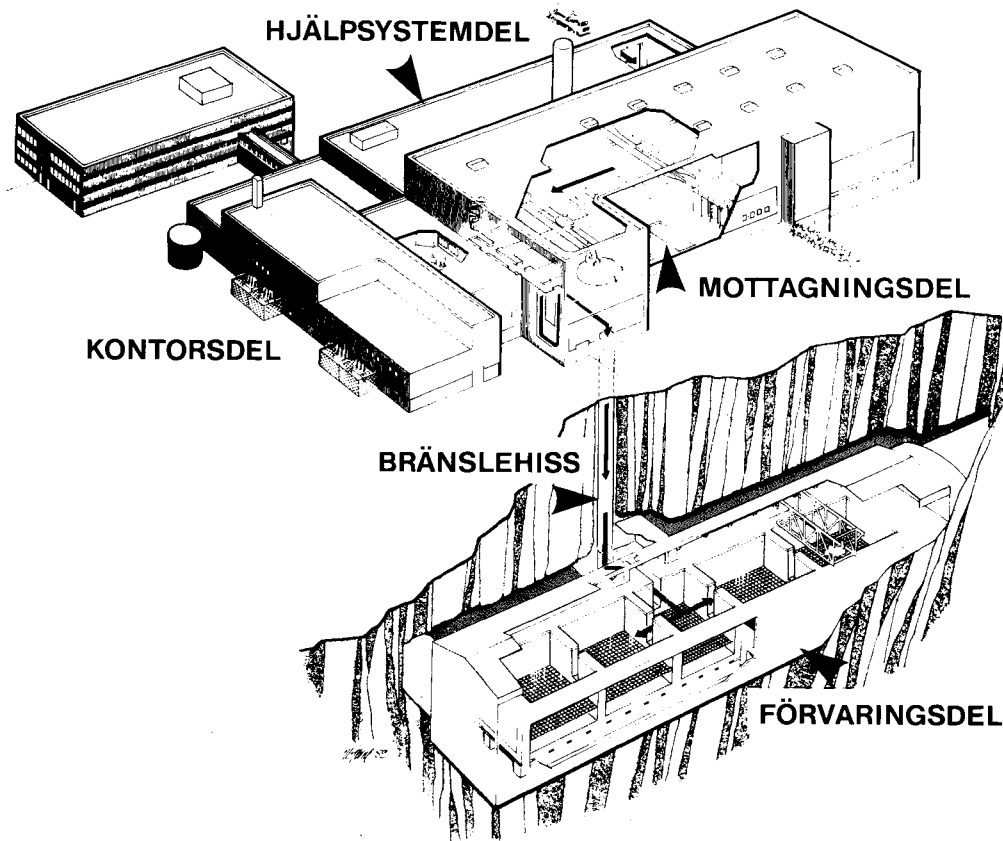
4 ANLÄGGNINGAR OCH UTRUSTNINGAR

Allmänt

De anläggningar som erfordras för att genomföra slutförvaringen och därmed sammanhängande verksamhet visas schematiskt på figur 2.

Transportsystem

I SKBFs regi har ett transportsystem för radioaktiva restprodukter framtagits. Då samtliga svenska kärnreaktorer ligger vid kusten har systemet baserats på sjötransport. Huvudkomponenterna ut-



Figur 8. Perspektivbild av CLAB.

görs av ett specialbyggt transportfartyg, transportbehållare för använt bränsle samt terminalfordon, se figur 7. Transportsystemet, som tagits i drift under 1982, kommer senare att kompletteras bl a med transportbehållare för andra typer av radioaktivt avfall.

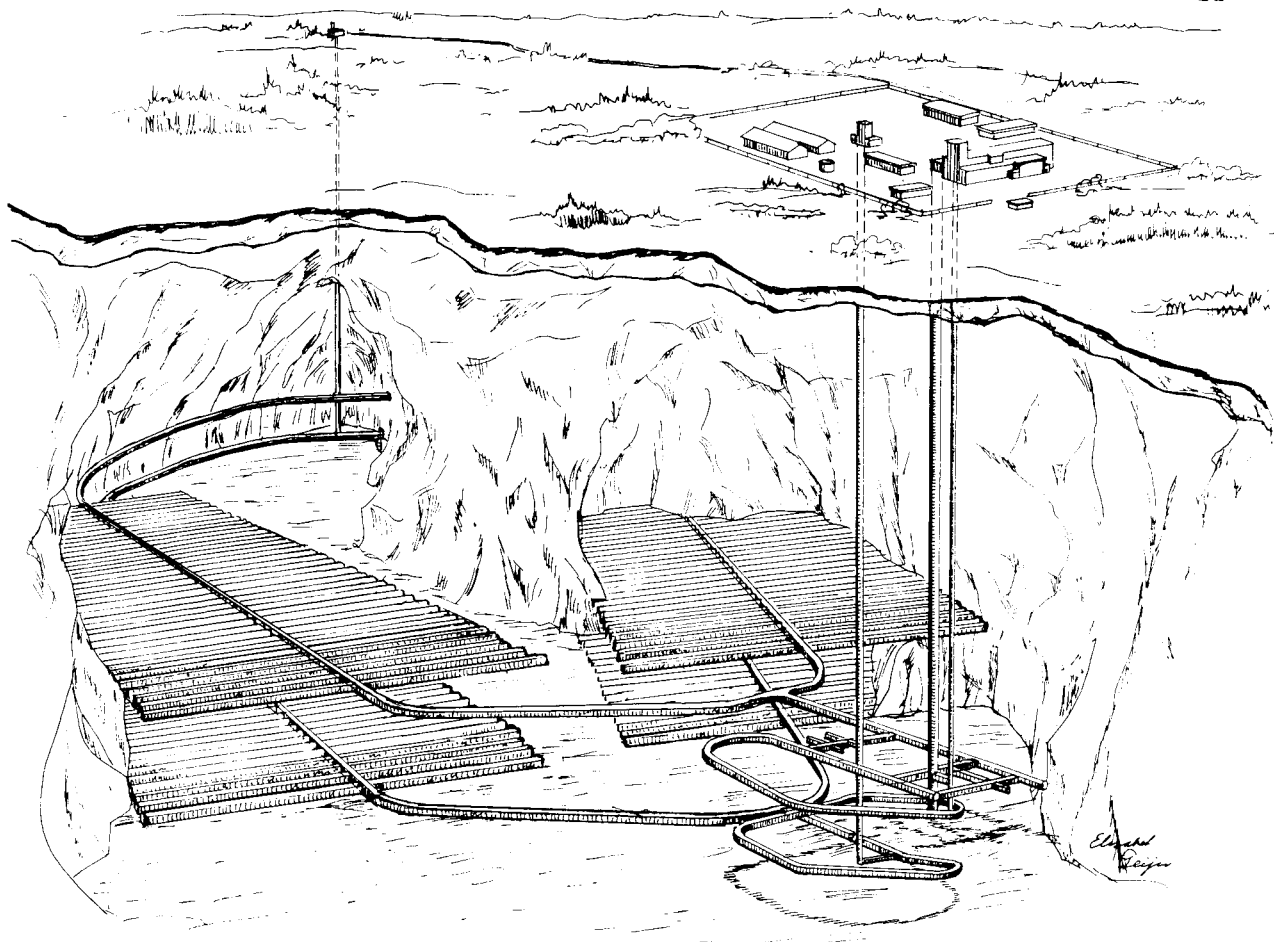
Centralt lager för använt bränsle, CLAB

Ett centralt mellanlager för använt bränsle från samtliga svenska kärnreaktorer är under uppförande vid Oskarshamnsverket. Anläggningen, som benämns CLAB och visas på figur 8, skall vara färdig att ta emot använt bränsle år 1985.

CLAB byggs i en första etapp för lagring av 3 000 ton bränsle. Anläggningen är förberedd för utbyggnad med ytterligare förvaringsutrymmen.

Inkapslingsstation

Före slutdeponeringen innesluts det använda bränslet i kopparkapslar. Det sker i en inkapslingsstation, som uppförs i anslutning till slutförvaret.



Figur 9. Perspektivbild av slutförvar.

Två olika metoder för tillverkning av kopparkapslarna har studerats, se avsnitt 10.

I inkapslingsstationen behandlas även BWR-bränslets boxar och PWR-bränslets borglasstavar. De gjuts in i betong och transporteras därefter till ett särskilt slutförvar.

Slutförvar för använt bränsle

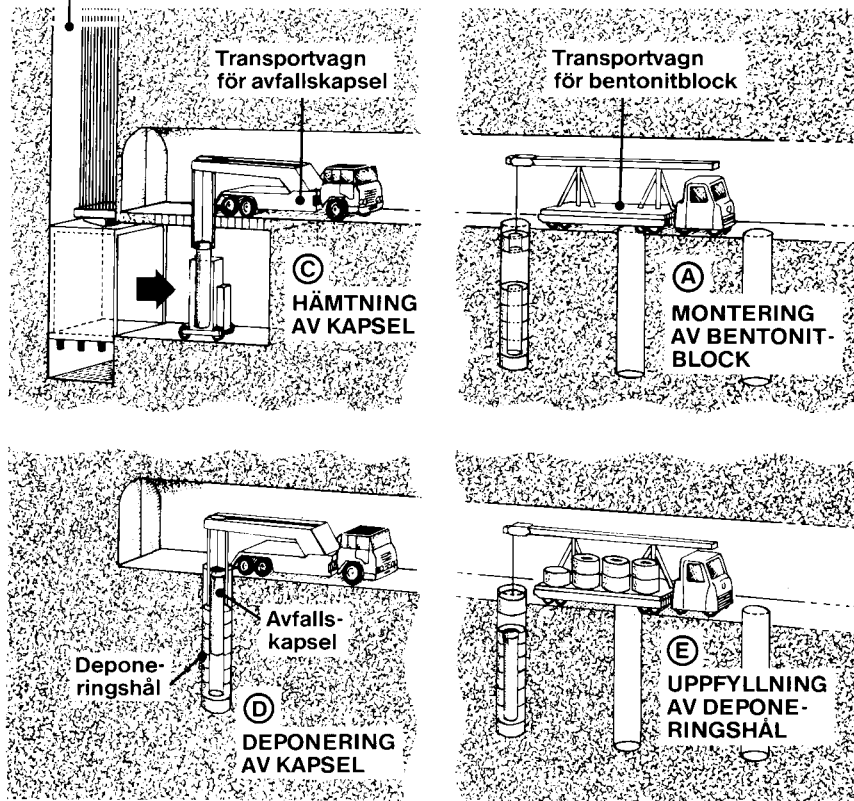
Det inkapslade bränslet slutförvaras på ca 500 m djup i ett utvalt bergparti. Slutförvarets placering och geometri anpassas till berggrundens lokala geologiska egenskaper. Figur 9 visar ett exempel på hur ett slutförvar i två våningar kan utformas.

Slutförvaret består av ett system av parallella tunnlar med vertikala deponeringshål, figur 10. I deponeringshålen omges kapslarna med s k buffertmaterial av högkompakterad bentonitlera, se figur 11. När deponeringen avslutats återfylls tunnlar och schakt med en blandning av bentonit och sand.

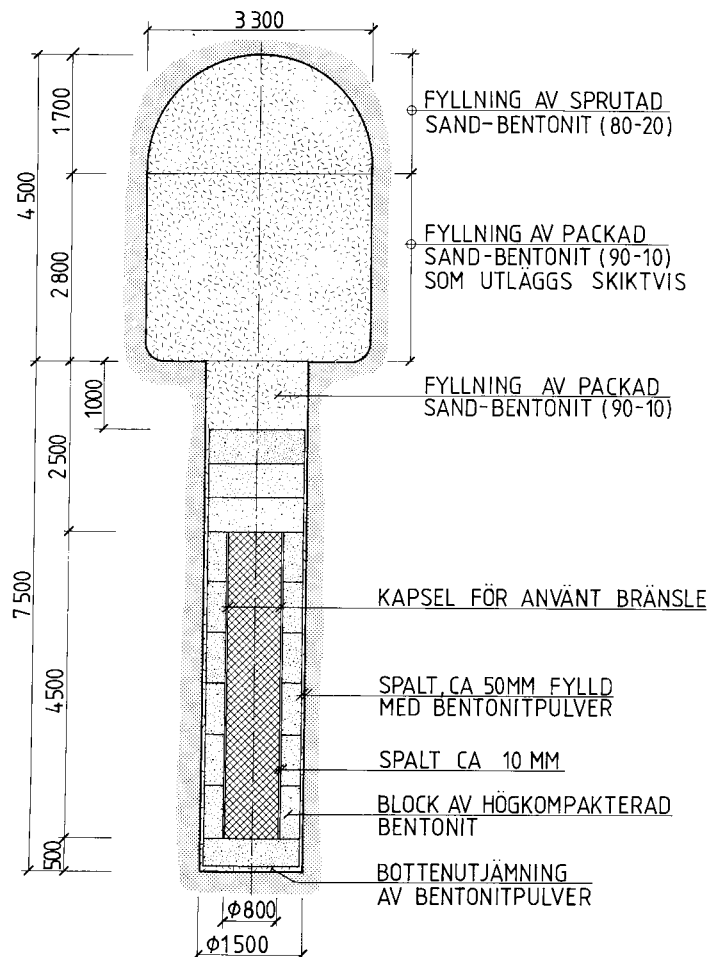
Avstånden mellan förvaringstunnlarna, 25 m vid enplansförvar och 33 m vid tvåplansförvar, och mellan de enskilda deponeringshålen, 6 m, är avpassade så att temperaturen i slutförvaret överallt skall ligga väl under 100 °C.

Ⓑ
FRÅN
INKAPSLINGSSTATION

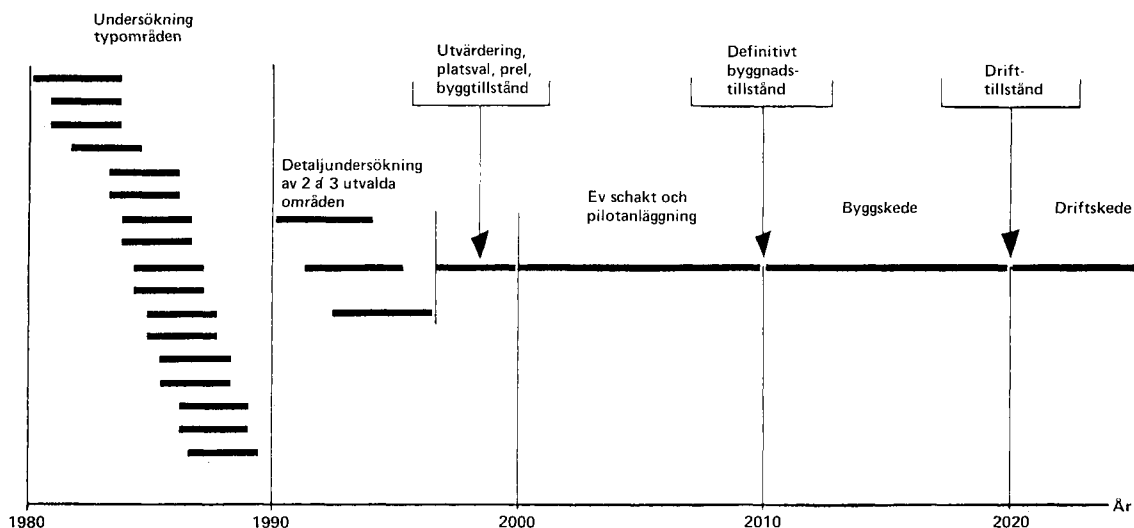
Transportschakt
för avfallskapsel



Figur 10. Kapseldeponering i slutförvar.



Figur 11. Deponeringshål med kapsel, buffertmaterial och återfyllning.



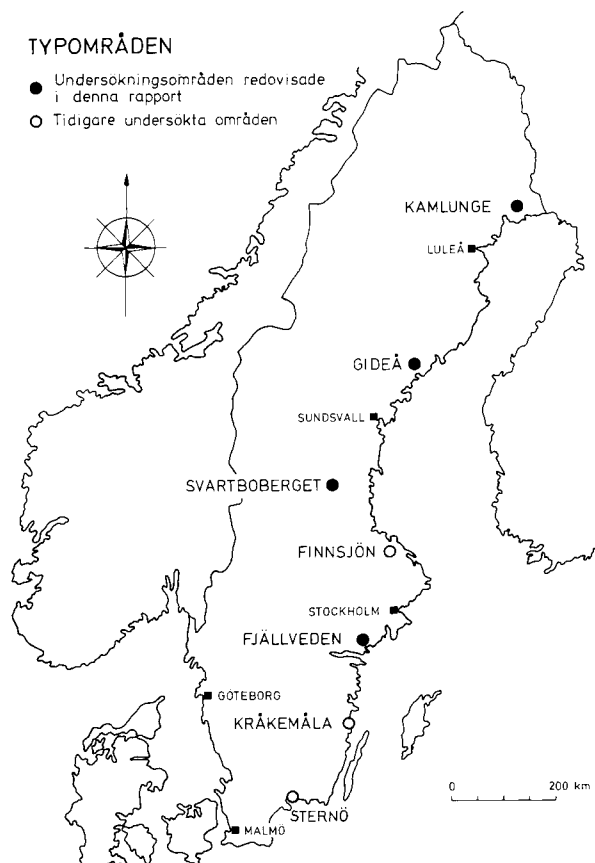
Figur 12. Översiktlig tidplan för slutförvar.

Denna temperaturbegränsning har införts för att säkerställa att bentonitleran inte undergår kemiska förändringar, som skulle kunna påverka dess funktion på lång sikt. Samtidigt leder temperaturbegränsningen till att de värmeinducerade spänningarna i bergmassan blir måttliga.

5 PLATSUNDER SÖKNINGAR

För att kunna genomföra beräkningar i säkerhetsanalysen för ett slutförvar på en viss plats krävs kunskaper om berggrundens hydrologiska egenskaper, förekommande kross- och sprickzoner samt om grundvattnets kemi. Betydande insatser har gjorts under de senaste åren för att förbättra metoder och utrustningar för att mäta olika storheter i fält.

Beslut om slutförvarets lokalisering förutses mot slutet av 1990-talet. För att då ha tillgång till ett brett och tillförlitligt beslutsunderlag avses ett relativt stort antal områden bli undersökta under 1980-talet, se figur 12. I denna rapport redovisas resultat från de under senare år undersökta sk typområdena Fjällveden, Gideå, Kamlunga och Svartboberget, se figur 13.



Figur 13. Undersökta typområden.

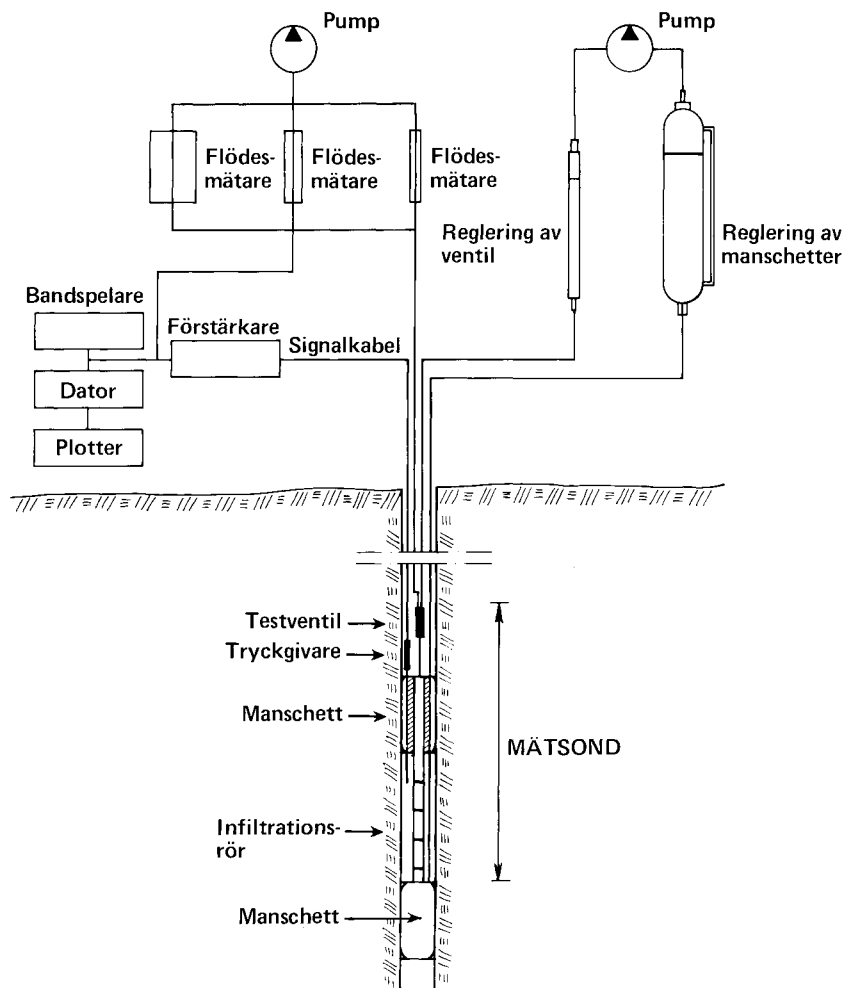
För undersökningarna har gällt ett standardprogram, som anpassats till lokala förhållanden. Programmet är indelat i fyra faser:

1. Rekognosering för val av typområden
2. Undersökningar från markytan
3. Undersökningar i borrhål
4. Utvärdering och modellarbeten

Vid valet av typområden beaktas bl a topografi, förekomst av större sprickzoner, bergartsfördelning och bergmassans struktur, förekomst av malmer och grundvattenkapacitet i närbelägna bergborrade brunnar.

I rekognoseringsfasen ingår bl a borring av ett djupt rekognoseringsborrhål inom de områden, som bedöms vara av intresse.

De områden, som väljs ut för närmare undersökning omfattar en yta av 4-5 km². Där utförs ytundersökningar omfattande kartläggning av bergarter, sprickor och sprickzoner. Samtidigt görs geofysiska markmätningar med olika metoder för att man skall få en indikation bl a på eventuella sprickzoner under jordtäckta partier och dessa zoners lutning.



Figur 14. Utrustning för mätning av bergets vattengenomsläpplighet.

Såväl hammarborrhål som diamantborrhål ingår i djupundersökningarna. Hammarborrhålen, som är relativt grunda (ned till 200 m) syftar främst till att belysa sprickzoners karaktär och orientering.

Djupare borrhål ned till 500–700 m djup har utförts som kärnborrhål med 56 mm diameter. Inom varje område har upp till 15 sådana hål borrats. Kärnborrhålen har placerats och riktats så att bästa möjliga information skall erhållas om den djupa bergmassans geologiska och hydrologiska egenskaper samt om sprickzoners karaktär och vattenföring.

Bestämning av bergets vattengenomsläpplighet eller hydrauliska konduktivitet har gjorts genom vatteninjektionstester, där man pressar in vatten i avgränsade sektioner i borrhålen. Avgränsningen erhålles genom att gummimanschetter pressas ut mot borrhålväggarna, se figur 14.

I anslutning till vatteninjektionstesterna mäts också det naturliga vattentrycket på olika nivåer i borrhålen.

För att belysa grundvattnets kemiska egenskaper och dess variationer har vattenprover från olika djup i vissa borrhål analyserats. Provtagningen har skett genom pumpning från sektioner i

borrhålen, som avgränsats med ett manschettarrangemang liknande det som använts vid vatteninjektionstesterna.

6 BERGETS GRUNDVATTENRÖRELSER

Berggrunden som vattenförande medium

Grundvattenrörelserna i berget är beroende av det aktuella spricksystemet. Den med djupet ökande belastningen av ovanför liggande berg gör att sprickvidderna och därmed vattengenomsläppligheten normalt avtar med djupet.

Betraktad i stor skala kan den kristallina berggrunden anses vara ett poröst medium, där sambandet mellan grundvattenflöde (q) och tryckgradient (i) kan uttryckas med Darcy's lag

$$q = K \cdot i$$

Koefficienten K är ett mått på bergmassans vattengenomsläpplighet, dess s_k hydrauliska konduktivitet.

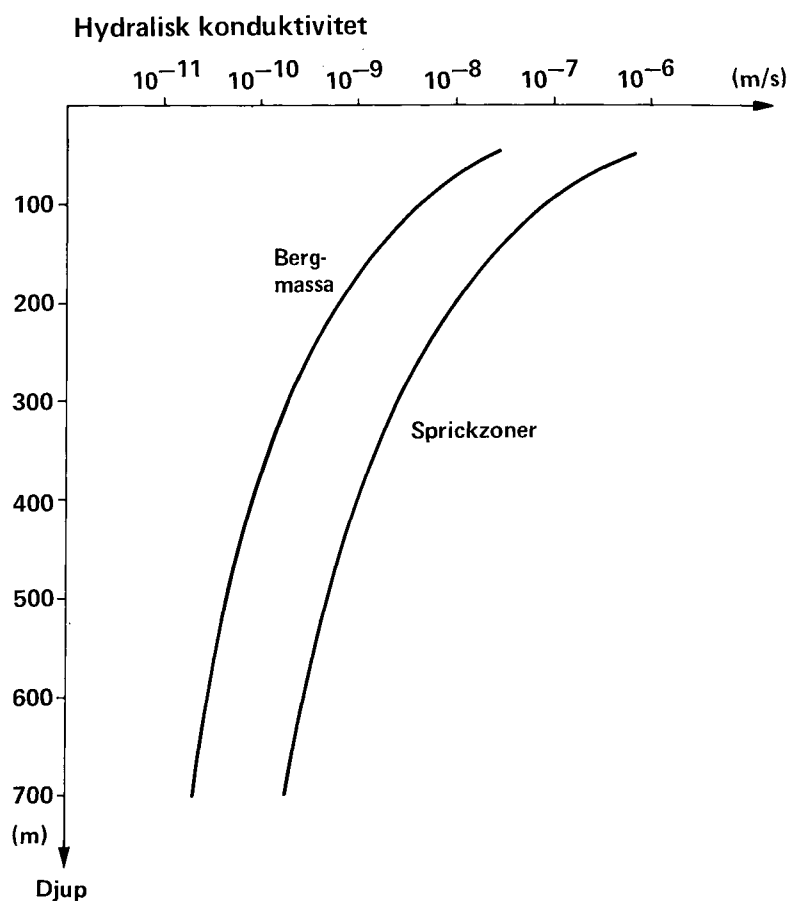
Sprickor, som återfinns på borrhärlor är endast till en del vattenledande. Mätningar inom de undersökta typområdena har visat att 15-30% av sprickorna är vattenledande. Anledningen till att vissa sprickor inte leder vatten kan vara att sprickfyllnadsmaterial tätat sprickan, sprickvidden är för liten eller att sprickan inte har samband med spricksystemet i övrigt.

Hydrauliska enheter

Vid studier av grundvattenrörelserna i typområdena använder man sig av olika hydrauliska enheter.

1. Regionala sprickzoner, som har stor utbredning och avgränsar större bergblock.
2. Sprickzoner av begränsad utbredning.
3. Bergmassa, inkluderande normalt förekommande sprickighet.

För att karakterisera de olika enheternas hydrauliska egenskaper används en "effektiv" hydraulisk konduktivitet, som utgör ett medelvärde av i borrhålen uppmätta individuella konduktivitetsvärden och som anges som en funktion av djupet under markytan, se figur 15.



Figur 15. Exempel på vattengenomsläpplighetens variation med djupet.

Hydraulisk gradient

Drivkraften för grundvattnet är de tryckskillnader, som råder mellan olika punkter i berget, den hydrauliska gradienten. I ett nederbördsrikt klimat bestäms den hydrauliska gradienten främst av topografin, dvs grundvattenytan ligger nära markytan. Tryckskillnaderna utjämnas kraftigt med djupet och de hydrauliska gradienterna på förvarets nivå är väsentligt lägre än nära markytan.

Modellberäkningar

På grundval av spricksystemens geometri samt uppmätta konduktiviteter och gradienter har för varje typområde upprättats en beskrivande modell. För beräkning av grundvattenflödets storlek och riktning indelas området i ett antal tredimensionella element som tilldelas bestämda egenskaper. Genom datoriserade beräkningar baserade på kända samband kan en bild erhållas av grundvattentryckets variationer inom området. Härav kan sedan grundvattenflöden, flödesriktningar och transportvägar beräknas.

7 GRUNDVATTNETS OCH SPRICKSYSTEMENS KEMI

Bergförvaret utgör ett kemiskt system med en fast stationär fas (bergets mineral, sprickfyllnader, buffert och återfyllning) och en flytande rörlig fas (grundvattnet).

Av särskild betydelse för kopparkapselns korrosion och bränslets upplösning och spridning är grundvattnets pH och redoxförhållanden samt dess innehåll av korrosiva ämnen och komplexbildare.

De genomförda typområdesundersökningarna har bl a omfattat kemisk grundvattenanalys från sammanlagt ett 80-tal provtagningspunkter i borrhål på djup varierande mellan ca 100 och 700 m. Analyserna har givit de data för grundvattnet som anges i tabellen nedan (majoriteten av alla mätvärden ligger inom angivna intervall).

pH	7-9
Eh	0-(-0,45)V
HCO_3^-	90-275 mg/l
SO_4^{2-}	0,5-15 mg/l
Cl^-	4-15 mg/l
HS^-	0-0,5 mg/l
Ca^{2+}	10-40 mg/l
Na^+	10-100 mg/l
Fe^{2+}	0,02-5 mg/l

I vissa enstaka fall har väsentligt högre salthalter (NaCl) observerats. Förekomsten av vatten med både hög och låg salthalt inom begränsade områden antyder att vattenutbytet mellan närliggande vattenmagasin kan vara mycket långsam.

Förekommande sprickmineral har studerats på borrhärdar från de undersökta typområdena. Detta är av intresse dels för att belysa sprickbildningens historik, dels för att bedöma sorptionskapaciteten i sprickorna. Sprickmineralerna kan ha såväl högre som lägre sorptionskapacitet än moderberget. Generellt är kapaciteten hos sprickmineralen större.

8 BERGGRUNDENS FÖRÄNDRINGAR

Berggrunden innehåller i allmänhet radioaktiva ämnen som kännetecknas av att de med tiden faller sönder på ett lagbundet sätt samtidigt som andra ämnen bildas. Dessa förhållanden kan utnyttjas för att bestämma hur lång tid som gått sedan en viss bergart

eller mineralisering bildades eller omvandlades och således läggas till grund för en översiktlig geologisk historieskrivning. Man har konstaterat att det äldsta svenska urberget är uppemot 2 000 miljoner år gammalt och det yngsta omkring 900 miljoner år.

Fram till för omkring 650 miljoner år sedan skedde en allmän nedbrytning av berggrundens höjdparter och nedbrytningsprodukterna avlagrades i sänkor där sandstenar ibland bildades.

Under perioden 650-300 miljoner år var förhållandena i det svenska urberget förhållandevis lugna trots att starka berggrunds rörelser och deformationer i den närbelägna skandinaviska fjällkedjan förekom under en del av denna tid.

Under perioden 300-50 miljoner år synes berggrunds rörelserna till en början ha tilltagit och vulkanism förekom flerstädes inom Skandinavien. Under påföljande period fram till 3 miljoner år torde endast mindre berggrunds rörelser ha inträffat och vulkanism i huvudsak ha förekommit i norra Skåne och vid den norska kusten. Däremot kan ett flertal landhöjningsperioder urskiljas.

Från 3 miljoner år fram till nutid finns spår av upp till elva olika nedisningar. Den senaste inlandsisens tjocklek beräknas ha varit mellan två och tre kilometer. Den lämnade Stockholms-trakten för ungefär tiotusen år sedan. Återhämtningen - landhöjningen - pågår fortfarande. På vissa ställen, särskilt i övre Norrbotten, har lokala berggrunds rörelser som synes ha samband med isens avsmältning kunnat konstateras.

Dagens svenska berggrund ger en samlad bild av alla de förändringar som inträffat sedan den bildades för mellan en och två miljarder år sedan. Med utgångspunkt från denna bild och den tidsskala den representerar kan man göra en bedömning av hur likartade skeenden kan förväntas påverka berggrunden under det närmaste miljontalet år.

Det svenska urberget karakteriseras av att det innehåller "block" av fast berg, som begränsas av mer eller mindre utpräglade sprickzoner. Dessa sprickzoner har uppkommit under geologiskt sett mer dramatiska skeden, flertalet för mer än 650 miljoner år sedan. Det kan därför bedömas som uteslutet att berggrundens allmänna sprickmönster skulle komma att förändras i någon större omfattning under någon årmiljon framåt. Däremot kan enstaka lokala förskjutningar, som konstaterats ha inträffat även under geologiskt sett sen tid, inte uteslutas. Sådana rörelser följer, naturligt nog, företrädesvis tidigare uppspruckna och därför försvagade stråk, som självfallet undviks när man väljer platsen för ett slutförvar.

Risken för att en framtida bergförskjutning skulle korsa över ett deponeringshål och skada en kapsel har belysts genom studier av tidigare sprickförskjutningar på blottade hållar. En statis-

tisk analys av dessa observationer anger att på sin höjd något enstaka deponeringshål i slutförvaret kan komma att beröras av en mindre förskjutning under en miljon år. Smärre förskjutningar kommer emellertid inte att skada kapslarna, bl a därför att de skyddas av det plastiska buffertmaterialet. Konsekvenserna av att enstaka kapslar förlorar sin täthet i ett tidigt skede har belysts i säkerhetsanalysen.

9 BUFFERT OCH ÅTERFYLLNADSMATERIAL

Buffertmaterialet av högkompakterad bentonit i deponeringshålen, se figur 11, utgör en mekanisk och kemisk skyddszon runt kapseln och begränsar intransporten av korrosiva ämnen från grundvattnet till kapselytan. I ett senare skede begränsar det utläckaget av radioaktiva ämnen från den genombrutna kapseln till omgivande berg.

Återfyllningen i tunnlar och schakt, som består av en blandning av bentonit och sand, ger mekanisk stabilitet åt de utsprängda utrymmena och återställer de hydrologiska förhållandena i området.

Den kompakterade bentonitleran har

- god bärighet, så att kapseln bibehåller sitt läge i deponeringshålet
- god värmeledningsförmåga
- god kemisk långtidsstabilitet.

Kompakterad bentonit sväller kraftigt vid vattenupptagning. Förhindras svällningen uppkommer i stället ett svälltryck. Detta ger bentoniten en självtätande förmåga och gör att vattenförande passager inte kan uppkomma i materialet. Svälltrycket pressar också in bentoniten i de mindre sprickor, som kan finnas i deponeringshålets väggar. Sprickorna blir på så sätt tätade.

Omfattande undersökningar har gjorts av bentonitens egenskaper. Bl a har det visats att ren bentonit med en densitet av ca 2 ton/m³ har en hydraulisk konduktivitet av 10⁻¹³ à 10⁻¹⁴ m/s, vilket betyder att bentoniten är mindre genomsläpplig för vatten än omgivande berg. Detta medför att grundvattnet i bergsprickorna inte strömmar vidare genom det fyllda deponeringshålet utan runt det. Transport av olika ämnen genom bufferten sker enbart genom diffusion. För en sand/bentonitblandning, som utgör återfyllningsmaterial i tunnlar och schakt är den hydrauliska konduktiviteten högst 10⁻⁹ m/s vilket motsvarar ett berg med "normal" god täthet.

Svälltrycket hos ren bentonit vid en densitet av 2,0 - 2,1 ton/m³ har vid vattenmättnad uppmätts till ca 10 MPa, både i laboratorium och vid försök i stor skala inom Stripa-projektet.

Observationer i naturen har visat att bentoniten i den miljö som råder i slutförvaret förblir kemiskt stabil under mer än en miljon år om temperaturen inte överstiger ca 100 °C. Slutförvaret har därför utformats med inriktningen att temperaturen i bentoniten skall bli högst 80 °C.

Kompakterad bentonit avses även bli använd för pluggning av undersökningshål och som "vattentäta" skott i tunnlar och schakt, se figur 16 och figur 17.

10 KAPSEL OCH KAPSELKORROSION

Kapseln har till uppgift att under lång tid helt innesluta det använda bränslet och därmed förhindra spridning av radioaktiva ämnen.

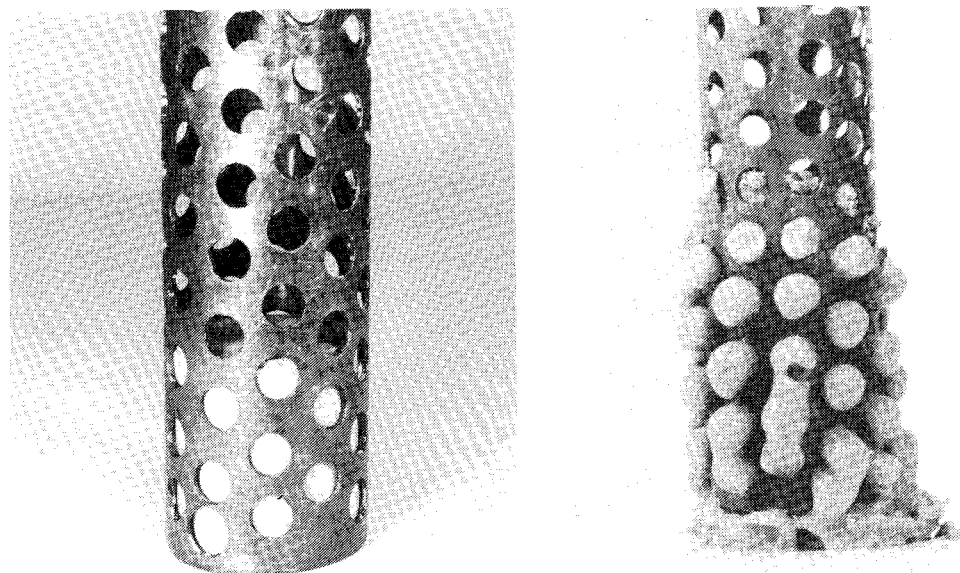
Den kapsel som beskrivs i KBS-3 är utförd av koppar och har en vägg tjocklek av 10 cm. Koppar angrips inte av rent vatten, utan endast av korrosiva ämnen, som kan finnas lösta i vattnet.

Två olika tillverkningsmetoder för kopparkapseln har studerats. I den ena metoden, se figur 18, placeras det använda bränslet i en förtillverkad kapsel, där tomrummen fylls med smält bly. Sedan påsvetsas ett lock med elektronstrålesvetsning.

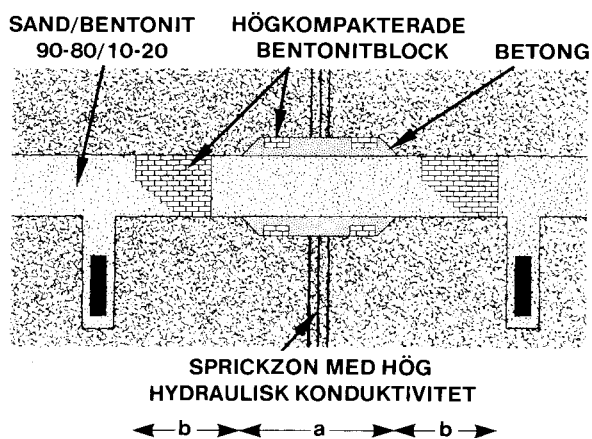
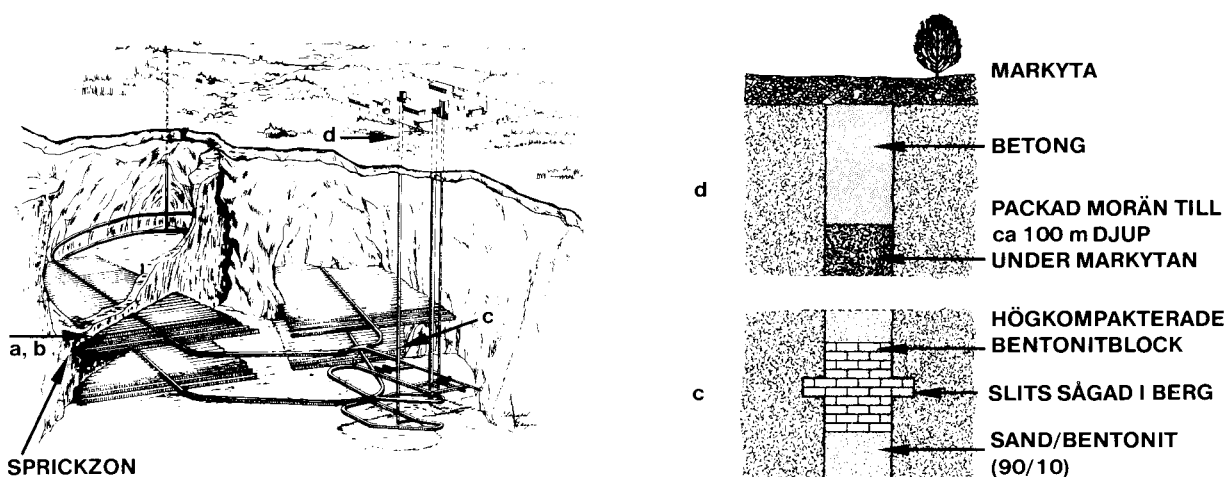
I den andra metoden, se figur 19, fylls tomrummen i kapseln med kopparpulver, varefter ett lock läggs på och det hela pressas i en speciell ugn med högt tryck (150 MPa) vid hög temperatur (500 °C) till en homogen kropp (het isostatisk pressning, HIP). Prov i full skala har utförts med båda metoderna med gott resultat.

De ämnen, som kan angripa kopparkapslarna i ett slutförvar, är främst syre och sulfider. Dessa ämnen kan förekomma dels i buffertmaterialet och tunnarnas återfyllning, dels i grundvattnet. Dessutom kan den radioaktiva strålningen vid tunnväggiga eller genombrutna kapslar sönderdela vattnet genom så kallad radiolys, varvid korrosiva ämnen bildas. De totala mängder av korrosiva ämnen, som kan komma i kontakt med kapseln kan beräknas då man känner halterna och vattenflödet. Ur dessa mängder kan man sedan beräkna hur stora mängder koppar, som maximalt kan korroderas.

Korrosionen av kopparkapseln kan emellertid inte förutsättas ske jämnt över hela ytan utan här och var uppträder djupare frätgropar. Undersökningar av ett stort antal arkeologiska föremål av koppar och kopparlegeringar med åldrar upp till några tusen år

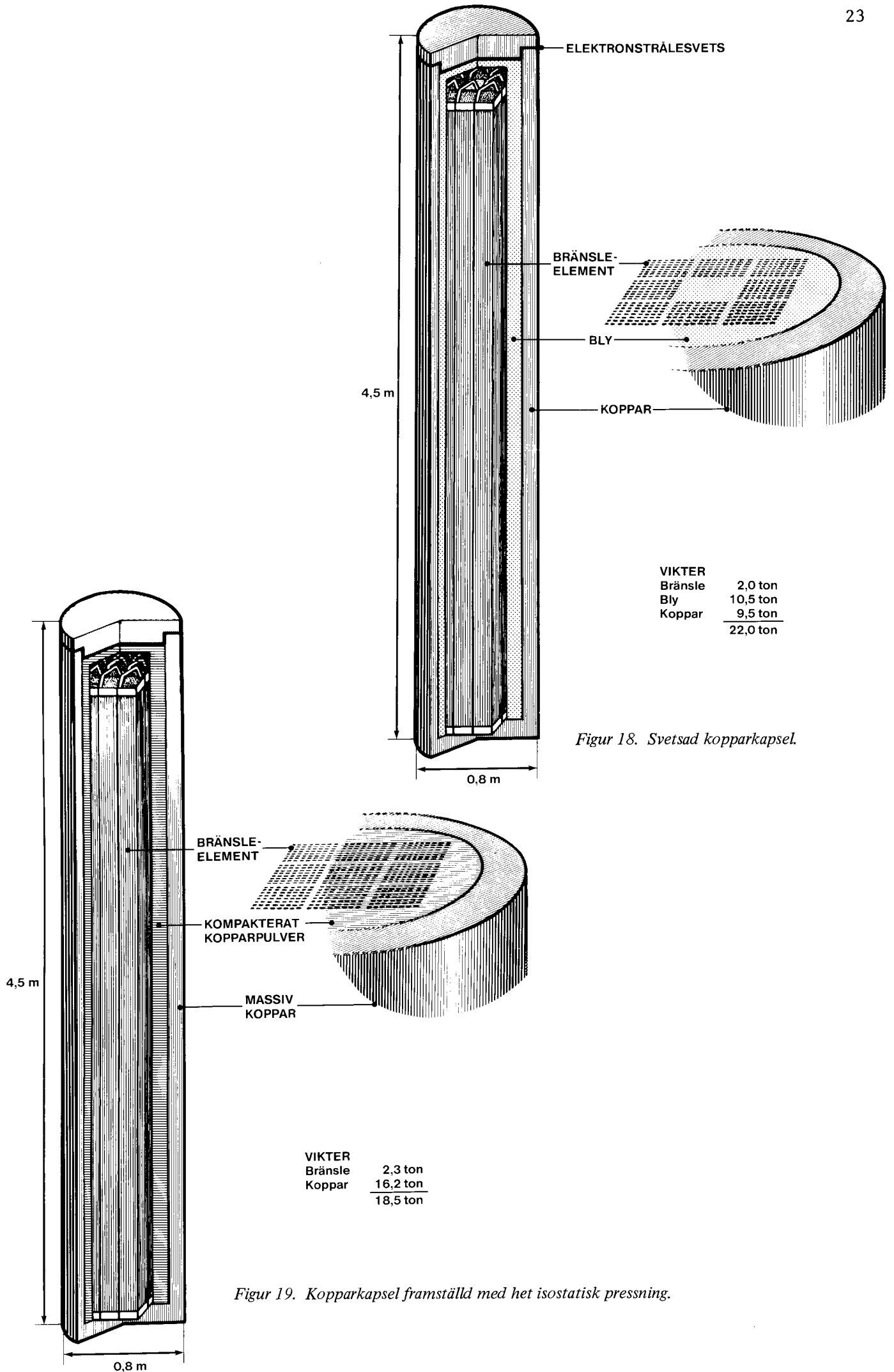


Figur 16. Perforerat rör med pressade bentonitkutsar för tätning av borrhål.



- a) Isolering av sprickzon med hög hydraulisk konduktivitet från tunnel i slutförvaret. Tunneln medger transporter under deponeringstiden och återfylls efter det att deponeringen utförts i denna tunnel.
- b) Återfyllning med pluggar av högkompakterade bentonitblock som staplas i samband med skiktvis packning och sprutning av sand/bentonitblandning.
- c) Återfyllning av schakt med plugg av högkompakterade bentonitblock som staplas i samband med skiktvis packning av sand/bentonitblandning.
- d) Återfyllning av övre del av schakt med skiktvis packning av morän och med plugg av betong.

Figur 17. Pluggar av högkompakterad bentonit för tätning av tunnlar och schakt.



samt s k jordtag för åskledare (kopparkopparplåtar), som legat i jorden under flera tiotal år har visat att det största frätgropsdjupet varit högst 5 gånger medelavfrätningen på hela föremålet. Samma förhållande har påvisats på ett stycke i naturen förekommande ren koppar, som legat på fyndplatsen i åtminstone 8 000 år.

I en utländsk undersökning, där kopparkorrosion i olika jordar studerats, har man funnit frätgropar, som varit upp till 25 gånger medelavfrätningen. Den kemiska miljön torde då ha varit betydligt ogynnsammare än i ett slutförvar. För att belysa även ett extremt ogynnsamt fall har emellertid även beräkningar utförts med en gropfrättningsfaktor av 25.

Den expertgrupp som utrett kapselkorrosionsfrågorna har beräknat livslängder hos kopparkapslar med olika vägg tjocklek. Någon skyddsverkan av fyllningen av bly eller kopparpulver i kapslarna har därvid inte medräknats.

Gruppens slutsats är att vid den sannolika gropfrättningsfaktorn 5 kommer en kapsel med en vägg tjocklek av någon cm att förbli tät i mer än en miljon år. Vid en gropfrättningsfaktor av 25 anges livslängden för samma kapsel till minst 100 000 år. Med gropfrättningsfaktorn 25 får en kapsel med 6 cm vägg tjocklek en livslängd av mer än en miljon år.

För att inte överskatta kapslarnas livslängd har man baserat beräkningarna på värden för grundvattenflöden, vattenkemi m m, som är avsevärt ogynnsammare än de som kan påräknas inom de undersökta områdena.

Bl a på grund av att flödena och grundvattnets halt av korrosiva ämnen varierar inom ett förvarsområde kommer kapslarnas genomfrätning inte att ske samtidigt utan bli fördelade över en mycket lång tid.

11 BRÄNSLE OCH BRÄNSLEUPPLÖSNING

Det använda bränslet utgör själv den innersta av de barriärer, som ingår i slutförvarets barriärsystem. När kopparkapseln genomfrätts i en avlägsen framtid, kan en upplösning av bränslet börja. Dess låga löslighet och den obetydliga grundvattenomsättningen i förvaret gör att upplösningen och spridningen av de ännu kvarvarande långlivade radioaktiva ämnena kommer att ske ytterligt långsamt.

Laboratorieexperiment har utförts såväl i Sverige som i Kanada och USA för att undersöka upplösningstakten hos det använda bränslet. Dessa försök är emellertid svårtolkade och vissa resultat pekar på en extremt långsam upplösning; hela mängden bränsle

i ett slutförvar kan beräknas ha lösts upp först efter hundratal miljoner år. Andra resultat antyder upplösningstider på några tiotusental år. Säkerhetsbedömningarna har därför baserats på data rörande vattenomsättning i slutförvaret och kända löslighetsbegränsningar för olika ämnen i den kemiska miljö som råder där.

12 RADIONUKLIDKEMI I GRUNDTVATTENMILJÖ

Radioaktiva isotoper av thorium, protaktinium, uran, neptunium och americium med långa halveringstider finns i det utbrända bränslet. De är av dominerande betydelse för den långsiktiga säkerhetsbedömningen. Dessa nuklider tillhör en grupp av ämnen som kallas aktinider och har likartade kemiska egenskaper. Aktiniderna kan förekomma i olika oxidationstillstånd och har en stark tendens att bilda komplex.

Grundvattnets redoxförhållande, pH och karbonathalt bestämmer i stort aktinidernas kemiska beteende i slutförvarsmiljön.

Aktinidernas löslighet i våra djupa grundvatten är låg (mindre än 10 mg/l för samtliga) och tendensen att sorberas på mineralytorna i berget hög. Lösligheten för uran, som i form av urandioxid utgör själva bränslematrisen, är av speciell betydelse eftersom frigörelsen av i uranet inneslutna ämnen är kopplade till uranupplösningen.

Både experiment och undersökningar av uranhalter i naturliga vatten visar att uran har en mycket låg löslighet under de reducerande förhållanden som råder på de djupa nivåerna i berget.

I den omedelbara närheten av det använda bränslet kan genom radiolys av vatten oxiderande förhållanden uppkomma. Uranets löslighet ökar då markant och halten karbonat i grundvattnet bestämmer i så fall hur mycket uran som maximalt kan gå i lösning. Även lösligheten av neptunium ökar då kraftigt medan plutonium får lägre löslighet och de övriga aktiniderna oförändrade eller lägre löslighet.

De radioaktiva klyvnings- och sönderfallsprodukterna i det utbrända bränslet består av ett flertal olika grundämnen. En del av dessa ingår i den s k lantanidserien och bildar i likhet med aktiniderna hydroxid och karbonatkomplex i grundvattnet. Flera av de metalliska ämnena kommer att uppträda som fria katjoner t ex cesium (Cs^+) och strontium (Sr^{2+}). Jod kommer huvudsakligen att gå i lösning som negativ jodidjon (I^-).

Jodidjoner sorberas praktiskt taget inte alls på mineralytorna. Däremot kan jodid i likhet med övriga lösta radionuklider fördröjas genom diffusion in i bergets mikroporer.

Teknetium har hög löslighet under oxiderande betingelser och mycket ringa tendens att sorberas på mineralytor. I reducerande grundvatten har teknetium låg löslighet och sorberas i samma grad som t ex cesium.

De metalldelar som ingår i det använda bränslet innehåller aktiva isotoper av zirkonium, kobolt, nickel, niob och kol. Metalldelarna kommer att förvaras ingjutna i betong som ger en kemisk miljö med högt pH-värde. Både nickel och niob är då mycket svår-lösliga.

Bildning av organiska komplex och kolloider där de radioaktiva ämnena ingår kan leda till en snabbare transport i bergsprickorna. Dessa effekter har beaktats i säkerhetsanalysen.

13 NUKLIDSPRIDNING I NÄROMRÅDET

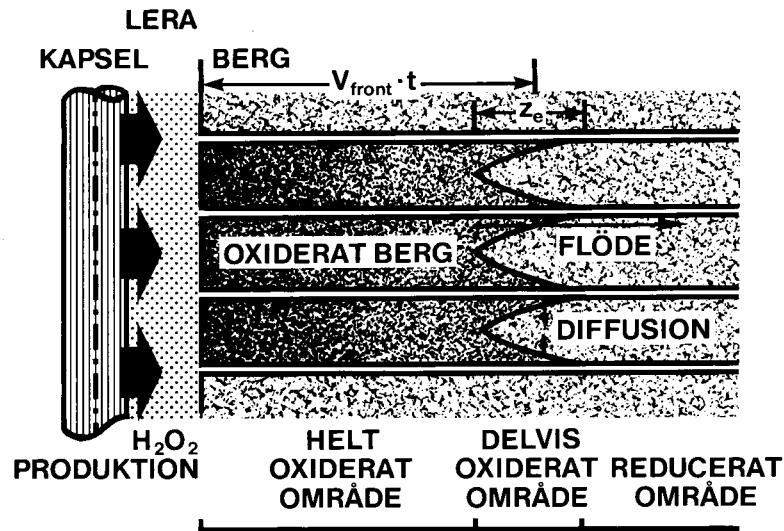
Med närområde avses det område kring kapslarna, där det egentliga förvaret och dess innehåll direkt kan påverka förutsättningarna för spridning av radioaktiva ämnen, sedan kapseln genombrutits. Den här beskrivna kopparkapseln med 10 cm vägg tjocklek har en sannolik livslängd av en miljon år eller mera. Vid studiet av förhållanden i närområdet har dock antagits att det första kapselgenombrottet sker efter 100 000 år. Detta ger möjlighet till en framtida förenkling av kapselutformningen eller alternativt att man ställer lägre krav på berggrundens kvalitet.

Det använda bränslet består till ca 95% av urandioxidkristaller. I dessa kristaller finns övriga radioaktiva ämnen inväxta. Undantag härifrån är vissa ädelgaser, väte, jod och cesium, som under reaktordriften diffunderat ut och lösgjorts från bränslet. Övriga ämnen frigörs i den takt som urandioxiden löses upp. Urandioxidens upplösningstakt bestämmer i stort frigörelsetakten för övriga ämnen.

Urandioxiden löser sig till en viss mättnadsgräns i vatten. Sker ingen borttransport av det lösta uranet avstannar upplösningen när mättnadsgränsen nåtts. I verkligheten diffunderar dock uran ut genom bentonitbufferten och upplösningförloppet fortsätter. Detsamma gäller övriga frigjorda ämnen. En del ämnen bl a plutonium är mera svår-lösliga än uran och upplöses därför långsammare.

Den tid det tar för vissa radioaktiva ämnen att diffundera genom bentonitbufferten är så lång att de hinner avklinga helt innan de når fram till grundvattnet i bergsprickorna. Andra mycket långlivade ämnen har kvar betydande delar av sin radioaktivitet.

Ett fenomen av betydelse för förloppen i närområdet är radiolys av vattnet. När kapseln genombrutits kan α -strålningen från kvar-



Figur 20. Redoxfrontens utbredning från en genombruten kapsel.

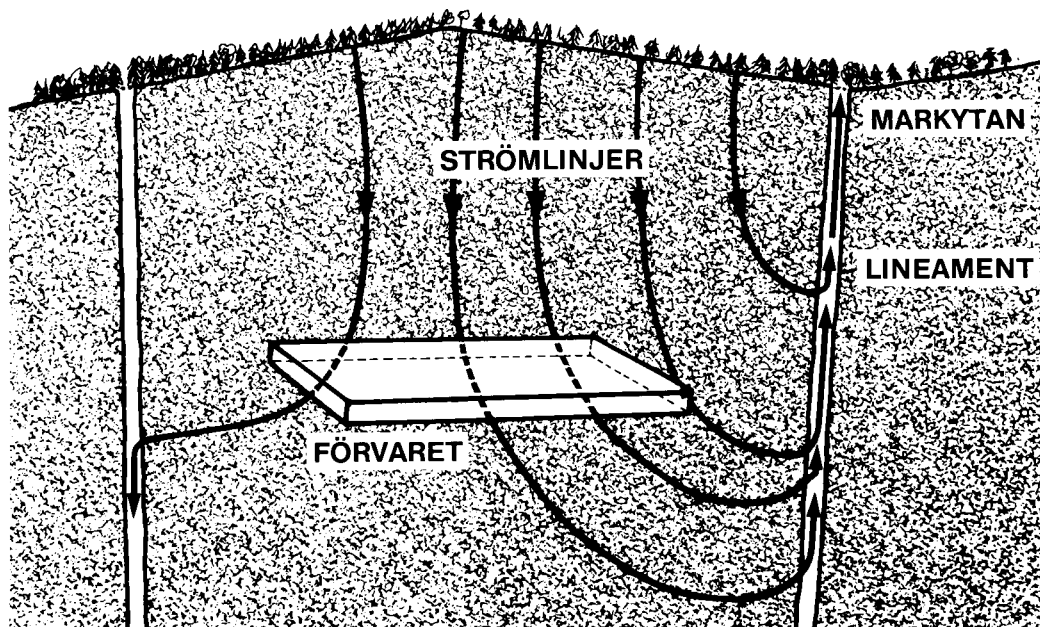
varande långlivade radioaktiva ämnen i bränslet sönderdelas i väte och oxiderande ämnen. Vätet kan diffundera ut snabbare och man får då ett överskott av oxiderande ämnen nära kapseln. Miljön där blir då oxiderande och vissa långlivade radioaktiva ämnen får en väsentligt förhöjd löslighet i vatten. Allt eftersom det oxiderade grundvattnet förflyttar sig bort från deponeringshålen, förbrukas de oxiderande ämnena genom att reagera med det tvåvärda järn som finns i mineralerna. De naturliga reducerande förhållandena påverkas därefter inte.

Förhållandet illustreras på figur 20.

Gränsområdet mellan oxiderande och reducerande förhållanden, den så kallade redoxfronten, beräknas i miljonårsperspektivet, kunna nå högst 10 m bort från en kapsel. Studier av förhållandena omkring den "naturliga reaktor" som upptäckts vid Oklo i Gabon antyder att radiolysens inverkan är väsentligt mindre än vad dessa beräkningar visar. Vid Oklo har urandioxid av naturen själv ansamlats på ett sådant sätt att en självunderhållande kärnreaktion uppstått. Man har där observerat att endast en mycket liten andel av urandioxiden förflyttat sig nämnvärt från "närområdet" under en period av flera hundra miljoner år.

Andra effekter, av betydelse för spridningen av radioaktiva ämnen är möjligheterna till bildning av radioaktiva kolloider och organiska komplex. De kan transporteras snabbare med grundvattnet än de lösta radioaktiva ämnena.

Närområdesstudierna ger uppgift om de mängder och den takt i vilken radioaktiva ämnen sprids till den omgivande bergmassan.



Figur 21. Principbild av grundvattenströmningen.

14 NUKLIDSPRIDNING I BERGET

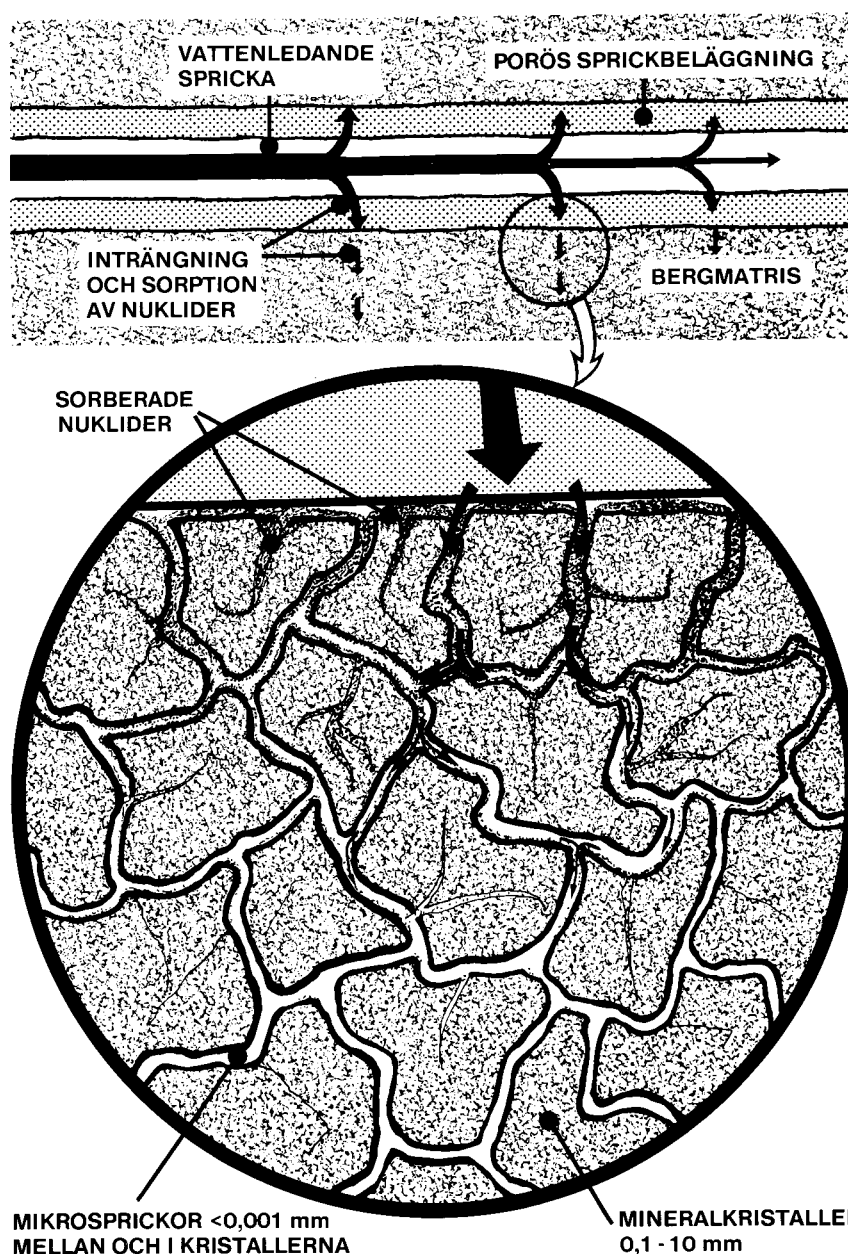
De radioaktiva ämnena transporteras huvudsakligen i löst form i det grundvatten, som sakta rör sig i bergets sprickor. Rörelsemönstret illustreras av figur 21.

Alla betydelsefulla radioaktiva ämnen utom jod reagerar kemiskt och fysikaliskt med de mineral som finns på sprickyterna. De reaktioner, som sammanfattas i begreppet sorption, kan kvantifieras med hjälp av jämviktskonstanter. Jämvikt innebär att förhållandet mellan ämnets koncentration i vattnet och koncentrationen på sprickytan strävar att inställa sig i ett visst jämviktsläge. De i vattnet lösta ämnena kommer därför att förflytta sig långsammare än grundvattnet själv. Man uttrycker detta med en "fördröjningsfaktor", som har olika värde för olika kombinationer av radioaktiva ämnen och mineral.

Inflödet till biosfären av radioaktiva ämnen blir inte detsamma, som det utflöde, som kan tänkas komma från ett slutförvar. På vägen genom berget avklingar radioaktiviteten. Den radioaktivitet som når biosfären blir därför väsentligt mindre än den som tillförs från slutförvaret.

Ytterligare en effekt måste beaktas, nämligen dispersionen. Dispersion innebär att de radioaktiva ämnena sprider sig på olika sätt i grundvattenvolymen och i det oregelbundna spricksystemet. Dessa dispersionseffekter, som studerats i olika fältförsök, gör att den "puls" av radioaktiva ämnen, som lämnade slutförvaret, kommer fram till biosfären i en mer utjämnad form.

Dispersionen leder till en minskning av den maximala halten av radioaktiva ämnen i inflödet till biosfären, men medför att de första spåren av radioaktivitet når biosfären tidigare än om dispersion ej förekommit.



Figur 22. Principbild över de radioaktiva ämnenas sorption och inträngning i bergets mikrospäckor.

En matematisk modell, som beskriver hur olika ämnen sprids i berget, har framtagits. Med hjälp av denna modell och kända data rörande sorption m m har de mängder radioaktiva ämnen som kan nå fram till biosfären beräknats. Samspelet mellan de radioaktiva ämnenas kemiska egenskaper framför allt deras låga löslighet, deras halveringstider och sorption i berget gör att endast en obetydlig del av radioaktiviteten även under ogynnsamma förhållanden kan nå biosfären.

I kristallint berg, som det svenska urberget, finns mikroskopiskt små spräckor mellan kristallerna. Dessa spräckor utgör ett sammanhängande porsystem som innehåller vatten. De i grundvattnet lösta ämnen (jonerna) har mycket mindre dimension än mikrospäckorna och kan därför diffundera in i porsystemet där de sorberas på kristallytorna. Förloppet illustreras på figur 22.

15 SPRIDNING OCH EXPOSITION I BIOSFÄREN

Om radioaktiva ämnen förs med grundvattnet från slutförvaret till biosfären kan individer i omgivningen bli utsatta för radioaktiv strålning. De radioaktiva ämnena kan nå människan främst via konsumtion av vatten och livsmedel.

Den dos, som den mest utsatta gruppen människor (den s k kritiska gruppen) kan komma att utsättas för, kan beräknas med hjälp av olika modeller.

Här har använts en svensk modell benämnd BIOPATH. Modellen beskriver hur spridningen av radioaktiva ämnen sker stegvis mellan olika ekosystem. De data som använts vid beräkningarna har hämtats från en omfattande internationell litteratur.

Beräkningarna baseras på dagens klimat, befolkningsbild och näringsvanor. Då det här gäller förhållanden, som ligger mycket långt fram i tiden, kan dagens förutsättningar komma att ändras väsentligt. Näringsvanor och även människan själv kan komma att förändras på ett sätt som nu inte kan förutses. Detta medför ofrånkomliga osäkerheter i alla långsiktiga dosberäkningar. Då emellertid påverkan från slutförvaret utgör endast en försumbar del av den naturliga strålningen, blir denna osäkerhet av liten betydelse.

16 STRÅLDOSER

Om individer eller grupper av individer exponeras för radioaktiv strålning erhåller de en stråldos. Man skiljer mellan individdoser till den kritiska gruppen, i närheten av slutförvaret, och den kollektiva dosen, som avser delar av eller hela världsbefolkningen.

Dosomvandlingsfaktorerna, som används vid omräkning från aktivitet till dos, bygger huvudsakligen på data och riktlinjer som rekommenderas av det internationella strålskyddsorganet ICRP (=International Commission on Radiation Protection). Man beaktar där främst de radioaktiva ämnenas påverkan på gonader, ben och benmärg, lungor, sköldkörtel och bröst. Enligt ICRPs rekommendation sammanvägs påverkan på olika organ till en s k viktad helkroppsdos.

Höga stråldoser, 2 Sievert (Sv) eller däröver, särskilt om de mottages under kort tid, medför allvarliga risker. För personer i radiologiskt arbete medger de svenska strålskyddsnormerna en högsta årlig helkroppsdos av 0,05 Sv. Den naturliga strålningen i Sverige motsvarar en dos mellan 0,7 och 1,4 mSv/år.

Kunskaperna om vilka skador, som kan bli en följd av mycket små stråldoser, är begränsade. Detta beror bl a på att sådana skador statistiskt inte kan särskiljas från det mycket stora antal skador av samma typ, men som har andra orsaker. ICRP rekommenderar att risken för strålskador skall anses vara proportionell mot den mottagna dosen. Detta antagande bedöms vara försiktigt, dvs leda till en överskattning av skaderisken till följd av låga doser.

ICRP har även angivit riskfaktorer avseende genetiska skador till följd av bestrålning. Några tecken på ökad genetisk skadefrekvens har emellertid inte kunnat konstateras hos avkomman från den stora befolkning, som överlevde bombningen av Hiroshima och Nagasaki och därvid erhöll höga stråldoser. Också detta förhållande kan ha sin grund i, att sådana skador inte kan särskiljas från det mycket stora antal genetiska skador, som förekommer i stora befolkningsgrupper, men som har andra orsaker.

17 SÄKERHETSMÄSSIGA PRINCIPER

Hanteringen av det använda bränslet före slutförvaringen är till stora delar av samma slag som den bränslehantering, som sker inom kärnkraftverksamheten för övrigt. De grundläggande regler, föreskrifter och gränsvärden som gäller för kärnteknisk verksamhet i allmänhet, kan därför tillämpas även på den slutliga hanteringen av det använda bränslet.

För slutförvarets långsiktiga säkerhet är läget ett annat. Något etablerat system av kriterier och föreskrifter finns ännu ej. I vissa länder diskuteras möjligheterna att fastlägga kvantitativa acceptanskriterier för enskilda barriärer eller barriärgrupper. Man kan exempelvis ange krav på minsta livslängd hos kapslarna, minsta transporttid för grundvattnet eller högsta tillåtna spridningstakt för de radioaktiva ämnena i slutförvaret. Någon sådan ansats har inte gjorts här, då det bedömts kunna medföra en låsning av det fortsatta forsknings- och utvecklingsarbetet och motverka en fri och allsidig bedömning av funktionerna hos förvarssystemets olika delar.

I nuvarande skede synes bedömningen av säkerheten hos ett slutförvar böra baseras på en ingående analys av ett visst definierat barriärsystem applicerat på en plats med kända egenskaper.

Dagens normer och riktlinjer för strålskydd ger följande kvantitativa hållpunkter för angivande av krav på radiologisk säkerhet hos ett slutförvar

- Det förväntade bidraget till stråldosen till den mest belastade gruppen skall underskrida 0,1 mSv/år (av SSI angiven konstruktionsmålsättning för svenska kärnkraftanläggningar).

- Bidraget till stråldosen till den mest belastade gruppen skall även vid mycket ogynnsamma förhållanden underskrida 1 mSv/år (av ICRP rekommenderat gränsvärde).

Ett annat, mera objektivt sätt att ange strålskyddskraven är att knyta dem till den naturliga strålningsnivån. Ett sådant krav skulle t ex kunna ges följande formulering:

- Bidraget till stråldosen till den mest belastade gruppen skall utgöra endast en obetydlig del av dosen från den naturliga strålningen och ligga inom det naturliga variationsområdet.

18 PLATSSPECIFIKA DATA

Geologiska, hydrologiska och geokemiska undersökningar har under de senaste åren genomförts på utvalda områden vid Fjällveden, Svartboberget, Gideå och Kamlunge, se figur 13.

Undersökningarna har omfattat berggrundsgeologi, förekommande sprickzoner, bergmassans sprickighet, hydrologiska och meteorologiska förhållanden, vattengenomsläppligheten i berget, grundvattnets kemi samt recipientförhållanden. Undersökningsresultaten har använts för en analys och bedömning av säkerheten hos tänkta slutförvar på de nämnda platserna med undantag för Svartboberget. Berggrunden på Svartboberget har visat sig innehålla sprickzoner orienterade och fördelade så, att ett tänkt slutförvar måste delas upp i många mindre delar på ett sätt, som inte är rationellt. Analyserna för denna plats har därför inte fullföljts.

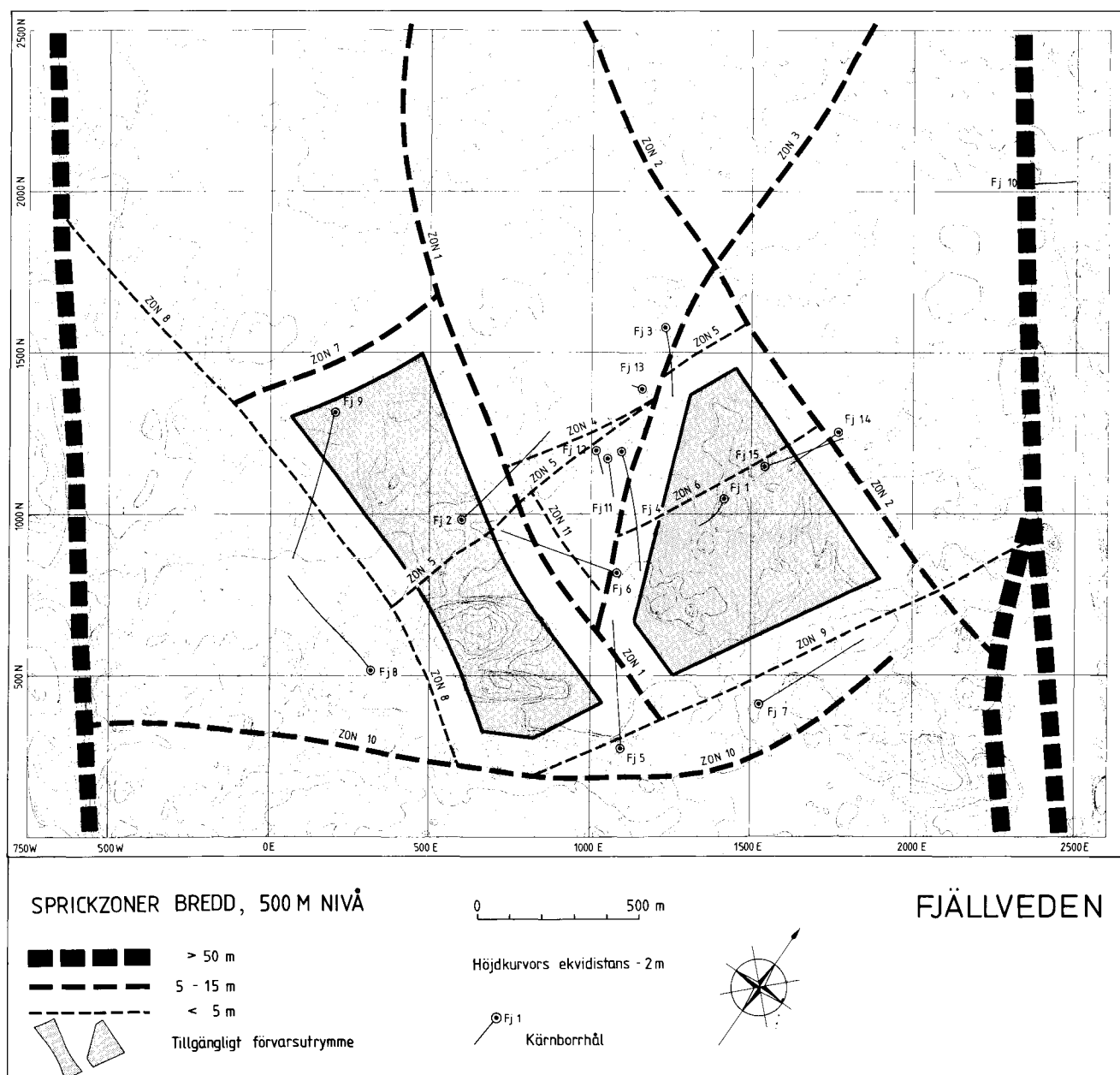
Fjällveden

I området har 15 kärnborrhål borrats ned till ett största djup av 700 m. Kärnborrhålens sammanlagda längd är ca 7 600 m.

Det undersökta området visas på figur 23, där också läget av ett tänkt slutförvar markerats.

Området karakteriseras av en flack topografi. Bergmassan, som huvudsakligen utgörs av ådergnejs, har i allmänhet en låg vattengenomsläpplighet, vilket även gäller de lokala sprickzonerna. Ca 3% av bergmassan består av vertikalt orienterade skikt av gnejsgranit med en förhöjd vattengenomsläpplighet.

Grundvattenflödet på förvarsdjup har beräknats till mellan 0,01 och 0,05 l/(m²·år) varvid hänsyn tagits till förekomsten av ovannämnda skikt av gnejsgranit.

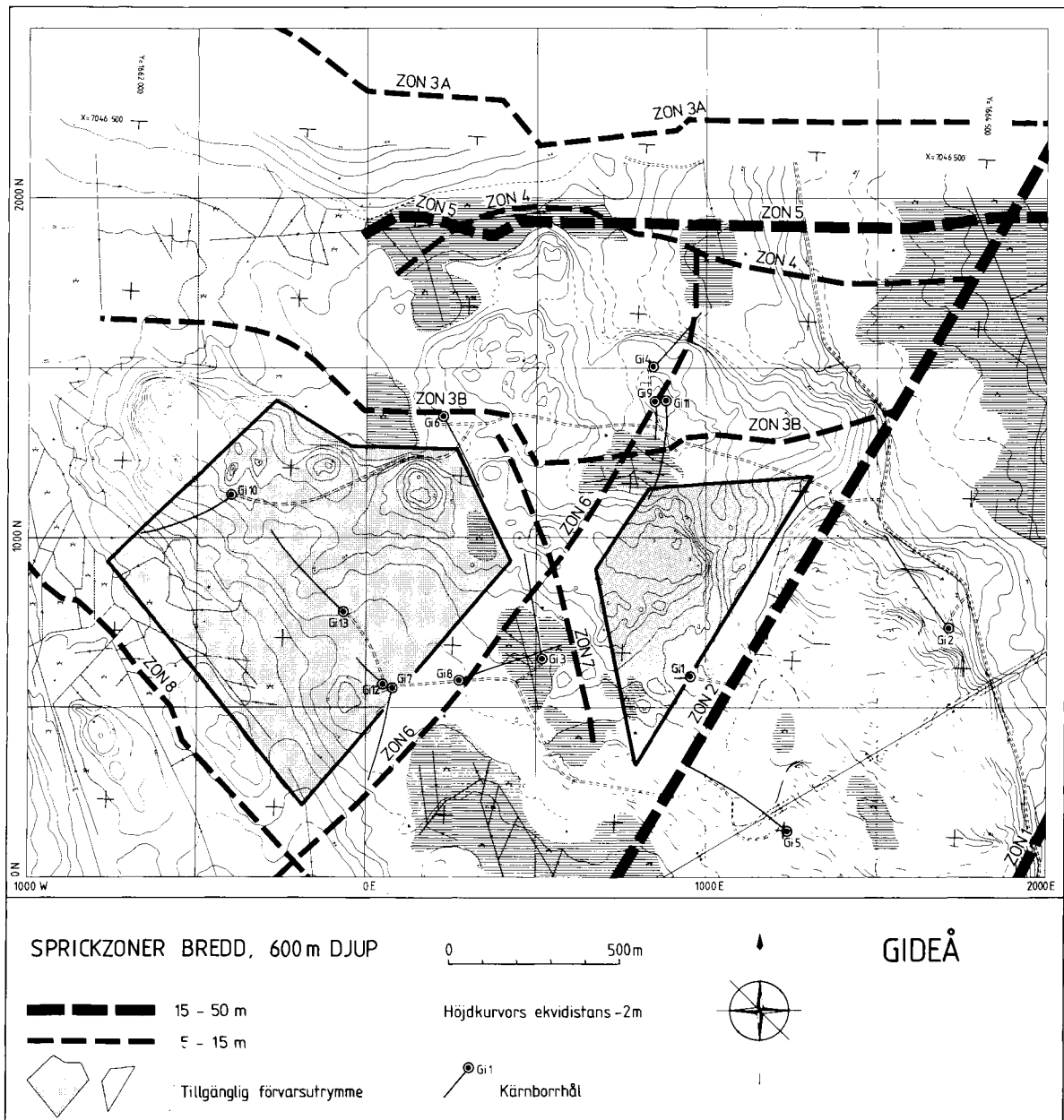


Figur 23. Typområdet Fjällveden.

Förekommande sprickzoner gör att ett tänkt slutförvar bör förläggas i två nivåer på 500 respektive 600 m djup. De ytor, som på figur 23 angivits som tillgängliga för ett slutförvar har en total yta av $1,85 \text{ km}^2$ och täcker behovet för 6 000 ton bränsle med en överskottsmarginal på ca 90%. Inverkan av de vertikala stråken med förhöjd vattengenomsläpplighet kan inte helt överblickas utan ytterligare undersökningar. Det är därför t v oklart om området kan anses lämpligt för lokalisering av ett slutförvar.

Gideaå

I området har 13 kärnbrorrhål ned till ett största djup av 700 m borrats. Kärnbrorrhålens sammanlagda längd är ca 8 250 m.



Figur 24. Typområdet Gideå.

Det undersökta området visas på figur 24, där också läget av ett tänkt slutförvar markerats.

Området karakteriseras av en flack topografi och bergmassan domineras av ådergnejs med låg vattengenomsläpplighet. Vattengenomsläppligheten i de lokala sprickzonerna är obetydligt högre än hos bergmassan. Liksom i Fjällveden finns i bergmassan inlagrade gnejsgraniter med förhöjd vattengenomsläpplighet. Dessa lager är emellertid i Gideå horisontellt orienterade och vattengenomsläppligheten avviker mindre från huvudbergartens. Förekommande diabasgångar uppvisar samma låga vattengenomsläpplighet som huvudbergarten.

Grundvattenflödet på försvarsdjup i det täta berget har beräknats till mellan 0,004 och 0,02 l/(m²·år) oavsett om man räknar med inverkan av de horisontella stråken med större vattengenomsläpplighet eller ej.

I Gideå torde lämpligt utrymme finnas för ett slutförvar förlagt i ett plan. För att påvisa detta skulle emellertid ytterligare undersökningar erfordras. Därför har på figur 25 illustrerats ett förvar i två våningar på nivåerna 500 respektive 600 m inom det välundersökta området. De markerade ytorna har en total yta av 2 km² och täcker behovet för 6 000 ton bränsle med en överskottsmarginal av ca 120%.

Kamlunge

I området har 16 kärnborrhål borrats ned till ett största djup av 670 m. Kärnborrhålens sammanlagda längd är ca 7 800 m.

Det undersökta området visas på figur 25 där även läget av ett tänkt slutförvar markerats.

Området är beläget inom en höjdplatå med lokala höjdskillnader av upp till 30 m. Höjdskillnaden mot omgivande dalgångar uppgår till ca 100 m.

Gnejser och röd granit dominerar berggrunden. Dessutom förekommer amfibolit och granodioritiska bergarter.

Bergmassan har låg vattengenomsläpplighet och genomkorsas av smala brantstående sprickzoner med stora inbördes avstånd.

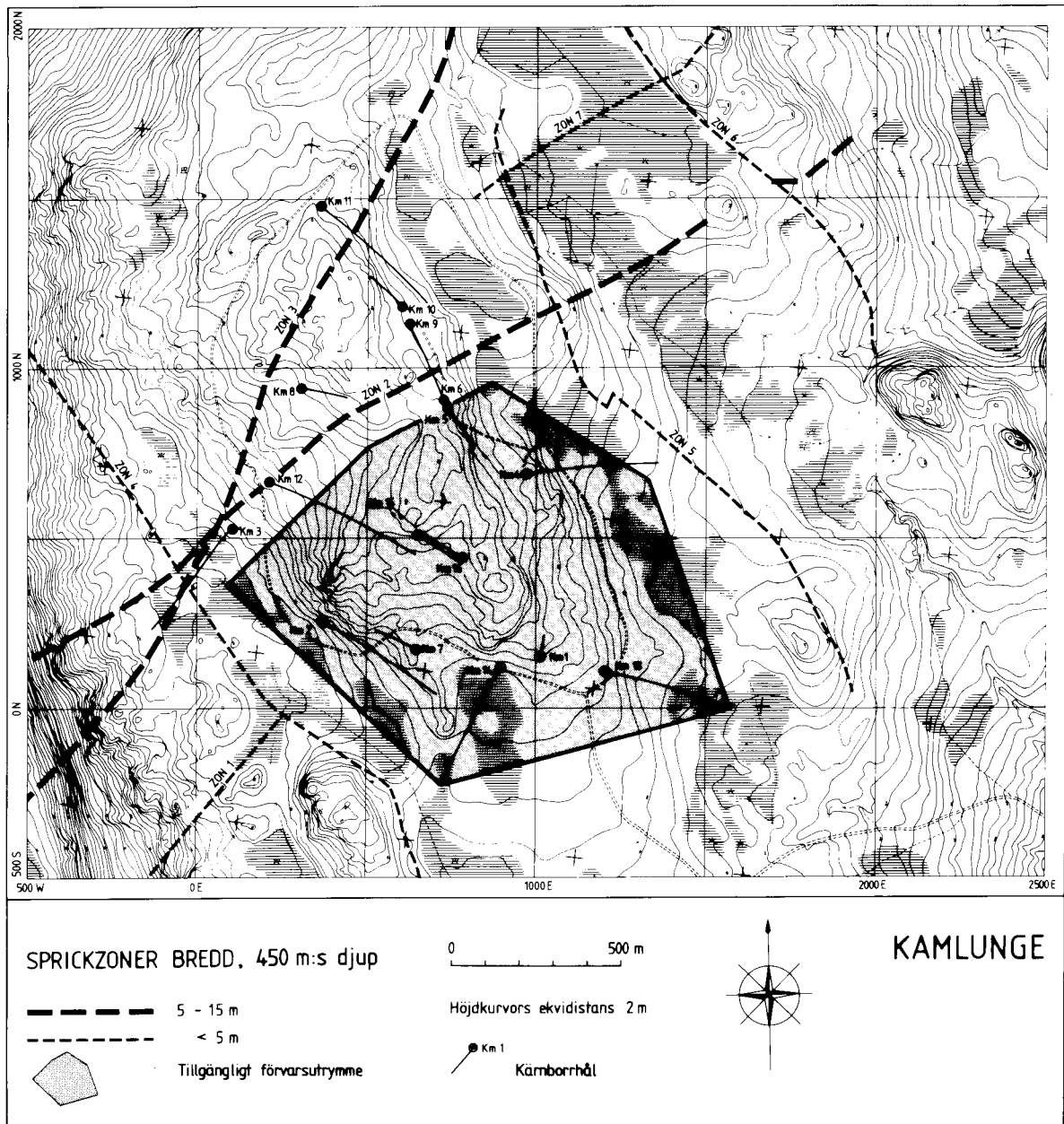
En horisontell sprickzon med förhöjd vattengenomsläpplighet har påträffats på ca 550 m djup under markytan. Zonen har genomborrats med fyra kärnborrhål, där den haft en mäktighet av mellan 4 och 14 m.

Grundvattenflödet på försvarsdjup, ca 450 m, har beräknats till mellan 0,003 och 0,06 l/(m²·år).

Den yta, som markerats på figur 25 som tillgänglig för ett slutförvar i ett plan är 1,1 km² och ger en överskottsmarginal utöver behovet för 6 000 ton bränsle av ca 50%. Med hänsyn till den konstaterade horisontella sprickzonen på djupet 550 m tänks förvaret utfört på djupet 450 m, dvs 100 m över zonen.

Svartboberget

Någon fullständig analys har inte genomförts av Svartbobergets förutsättningar för lokalisering av ett slutförvar. Utförda undersökningar har visat lokala sprickzoner med ett inbördes avstånd av ca 300 m och en lutning av ca 45°. Detta innebär att



Figur 25. Typområdet Kamlunge.

ett slutförvar skulle behöva delas upp på ett stort antal mindre enheter, vilket kan betraktas som en icke rationell lösning.

19 RADIOLOGISK SÄKERHET UNDER DRIFT

Vid hanteringen och transporterna av det använda bränslet på dess väg från kraftverken till slutförvaringen kan olika fel och missöden tänkas inträffa. Olika åtgärder måste därför vidtas för att begränsa riskerna härför och de tänkbara konsekvenserna.

För verksamheten vid CLAB liksom för transportsystemet har detaljerade säkerhetsanalyser redovisats och åtgärderna till väsentliga drag godkänts av myndigheterna. Verksamheten i inkapslingsstationen och i slutförvaret har däremot inte prövats av tillsynsmyndigheterna.

En genomgång har gjorts av de kritiska momenten i inkapslings- och deponeringsförfarandet. Med lämplig utformning av anläggningarna och en kvalitetsövervakning och kontroll av den typ och omfattning, som tillämpas generellt inom kärnteknisk verksamhet kan riskerna för tänkbara aktivitetsutsläpp av betydelse bemästras.

20 DET SLUTNA FÖRVARETS SÄKERHET

Allmänt

Huvudsyftet med rapporten är att visa att en slutlig förvaring av använt kärnbränsle kan genomföras i svensk berggrund och med dagens teknologi, på ett sätt som uppfyller mycket höga krav på säkerhet även under tidrymder, som inte beaktats vid tidigare teknikvärderingar.

Redovisningen bygger på dagens kunskaper. I de led av analyserna där kunskaperna är ofullständiga, har detta kompenseras med att man använt ogynnsamt valda förutsättningar eller bortsett från gynnsamma omständigheter, som ännu inte helt kan styrkas.

Innan man skall utse platsen för ett slutförvar (ca år 2 000), starta byggandet (ca år 2010) och påbörja deponeringen (ca år 2020) kommer ett betydande utvecklingsarbete att vara genomfört. Den lösning, som slutligen kommer att väljas kan därför förutses bli mer optimal än den som redovisas här.

Troligt händelseförlopp

Av genomförda platsundersökningar har framgått att det i Sverige finns ett flertal sammanhängande "plintar" av tätt berg, där grundvattenflödet på ca 500 m djup ligger i intervallet 0,002-0,1 liter per m² och år. Det djupa grundvattnet i dessa områden har mycket låga halter av ämnen, som kan angripa koppar. Om man använder uppmätta värden utan pålagda säkerhetsmarginaler men i övrigt tillämpar samma beräkningsprinciper som Korrosionsinstitutets expertgrupp, får man en livslängd hos en kopparkapsel med 10 cm vägg tjocklek av storleksordningen 100 miljoner år. Prognoser för så långa tider är naturligtvis mycket osäkra. Ändå ger beräkningarna vid handen att huvuddelen av kapslarna kommer att

förbli täta under flera miljoner år och att genombrotten kommer att vara fördelade över miljontals år. Det deponerade bränslet kommer efter så långa isoleringstider att ha en nuklidsammansättning som är ungefär densamma som i naturen förekommande uran med dotternuklider.

Det svenska berget innehåller genomsnittligt ca 5 mg uran per kg. I den bergmassa som omger förvaret ger detta en uranmängd av samma storleksordning som i det deponerade bränslet.

Uranhalten i djupa svenska grundvatten ligger i intervallet 0,1-10 mikrogram per liter. Det högre värdet torde motsvara den övre gränsen för hur mycket uran, som kan lösas i djupa grundvatten. Mängden uran i grundvattnet är således inte beroende av de mängder uran som förekommer i berget, utan av den högsta möjliga mängd som kan lösas i det vatten som omsätts i berggrunden.

Samma mekanismer, som begränsar upplösningen av naturligt uran från berget, kommer att begränsa de halter som kan härledas från uran i det använda bränslet. Om allt grundvatten, som strömmar genom förvaret (0,1 l per m² och år) skulle lösa ut uran till mättnadsgränsen (10 mikrogram per liter) blir tiden för upplösning av allt uran i slutförvaret miljarder år.

Det mest troliga händelseförloppet, som grundar sig på observationer i naturen, blir alltså att såväl möjligheterna till genomkorrosion av kopparkapseln som de naturliga begränsningarna för urans löslighet leder till så långsamma förlopp, att det använda bränslet i slutförvaret inte ger något tillskott alls till den naturliga radioaktiviteten i grundvattnet.

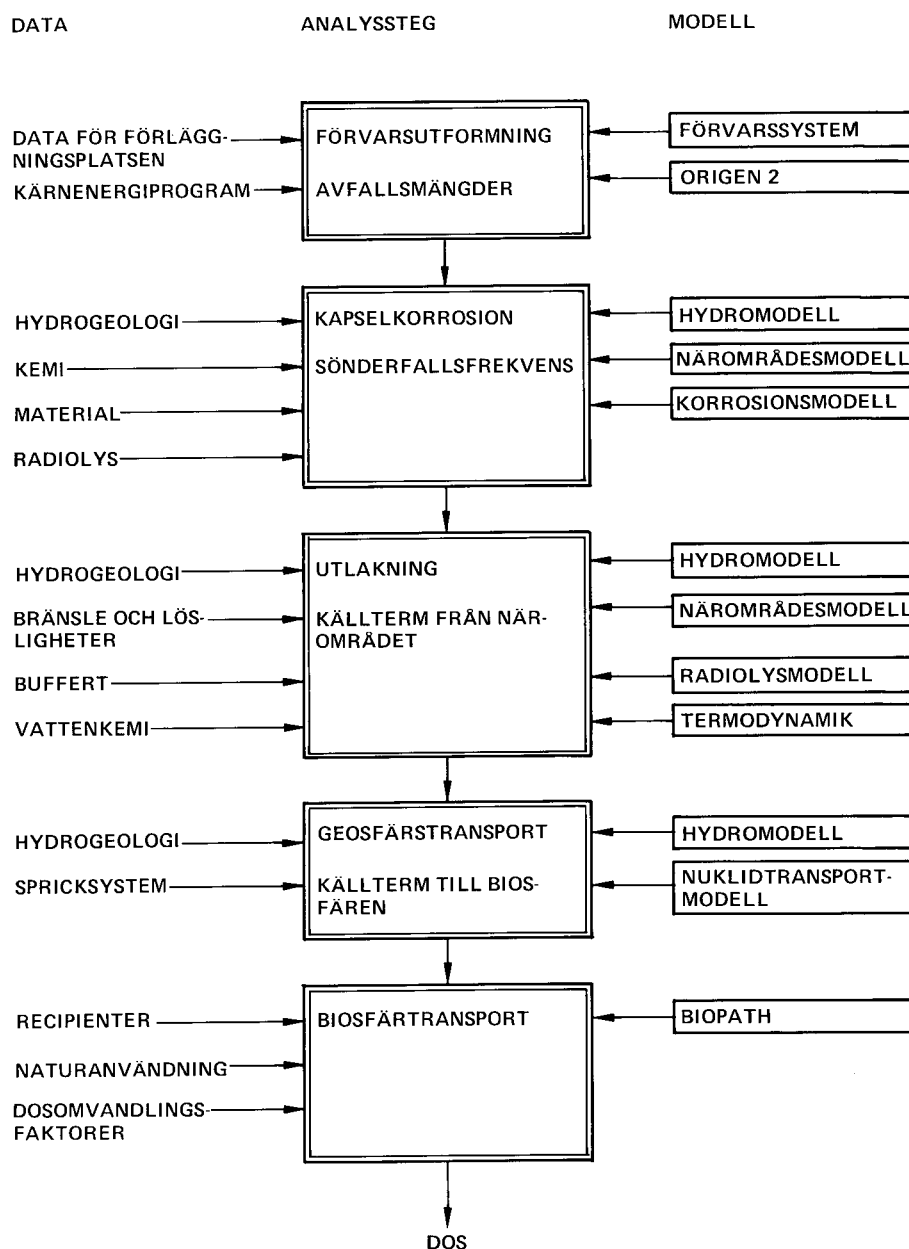
Beräkningsfall

Prognoser för så långa tider, som angetts i föregående avsnitt, måste alltid bli behäftade med osäkerheter. Därför har ett antal beräkningsfall genomförts, där mer ogynnsamma förutsättningar valts för barriärernas funktion. Beräkningar för dessa fall har genomförts enligt det schema som visas i figur 26.

Beräkningsfall A

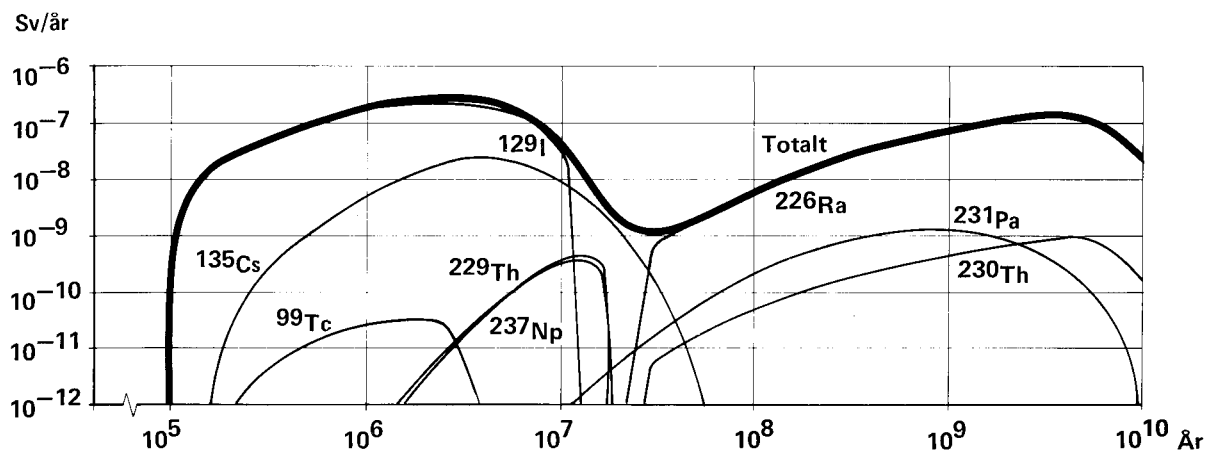
Detta beräkningsfall har valts som "centralt" och bygger på följande förutsättningar.

- Kapslarna genombryts successivt under tiden 100 000 år till en miljon år.
- Grundvattenflödet på 500 m djup är 0,1 l per m² och år.



Figur 26. Schema för säkerhetsanalysens beräkningsfall.

- Bränslets uranmatris antas bli upplöst i grundvattnet med 360 milligram per liter, vilket motsvarar den högsta möjliga lösligheten under oxiderande förhållanden och de karbonathalter som uppmätts i de djupa grundvattnen.
- I det ostörda berget antas att reducerande förhållanden råder, vilket är av betydelse för lösligheten och sorptionsegenskaperna hos vissa radioaktiva ämnen. Uran t ex får då en löslighet av ca 10 mikrogram per liter.
- Slutförvaret förlägges så att det kortaste avståndet till en sprickzon i berget är 100 m.



Figur 27. Doser till närboende i beräkningsfallet A.

I följande beräkningsfall belyses hur olika variationer av ovan angivna förutsättningar påverkar resultaten.

Beräkningsfall B

En kapsel antas vara otät redan vid deponeringen.

Beräkningsfall C

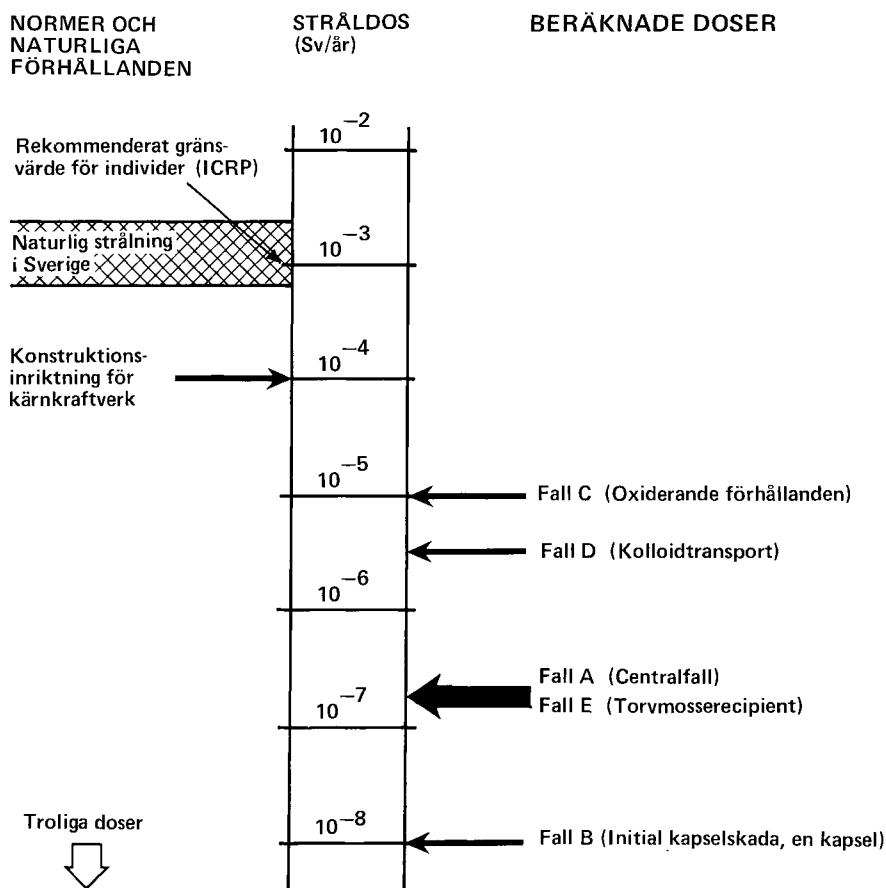
Oxiderande förhållanden antas råda i hela förvarsområdet och ut till närmaste sprickzon.

Beräkningsfall D

Radioaktiva ämnen antas till en del snabbt transporteras till biosfären med s k kolloider.

Beräkningsfall E

Utsläpp till biosfären sker till en torvmosse, där en stor anrikning av uran kan ske.



Figur 28. Beräknade doser till närboende i olika beräkningsfall.

Doser till närboende från utsläpp till biosfären av olika radioaktiva ämnen har beräknats. Som exempel visas i figur 27 de doser som beräknats för beräkningsfall A vid olika tidpunkter. Dosvärdena, som är mycket låga, domineras av jod-129 och radium-226 under olika skeden.

De maximala doserna till närboende, som erhållits i de olika beräkningsfallen, anges i figur 28.

Resultaten av beräkningsexemplen bygger som nämnts på ogynnsamma antaganden. Med ökade kunskaper blir det möjligt att göra mera verklighetsanknutna analyser, som torde resultera i väsentligt lägre dosvärden. Detta i sin tur ger möjligheter att utforma förvaret på ett mer optimalt sätt utan att eftersätta de höga säkerhetskraven.

De led i beräkningsexemplen, där förutsättningarna valts särskilt ogynnsamt är följande.

- Kapsellivslängden torde var underskattad. Dessutom har det antagits att kapselns hela barriärfunktion upphör så snart den penetrerats i en punkt och att grundvattnet då kommer i kon-

takt med allt bränsle i kapseln. I verkligheten kommer de bildade korrosionsprodukterna att begränsa möjligheterna för grundvattnet att nå kontakt med större delen av bränslet.

- Grundvattenflödet har i centralfallet antagits vara 0,1 l per m² och år. De flöden på 500 m djup, som beräknats för de undersökta områdena uppgår till mellan 0,003 och 0,1 l per m² och år.

21 MISSÖDEN OCH EXTREMA HÄNDELSE

Allmänt

I tidigare avsnitt behandlas de långsamma förändringar som kan leda till spridning av radioaktiva ämnen från ett slutförvar. Man kan även tänka sig extrema eller speciella händelser, som ligger utanför de förutsättningar, som gällt i de tidigare redovisade analyserna. Sådana händelser kan antingen vara av naturligt ursprung eller vara en följd av mänsklig verksamhet. Till den förra gruppen hör olika slag av berggrunds rörelser, nedisningar samt kriticitet i slutförvaret. Mänsklig verksamhet som kan påverka säkerheten kan utgöras av krigshandlingar och sabotage och avsiktligt eller oavsiktligt inträngande i förvaret.

Berggrunds rörelser

Berggrunds rörelser kan tänkas skada ett slutförvar dels genom att nya vägar skapas för grundvattenströmningen, dels genom att kapslarna skadas.

Det svenska urberget har en ålder av mellan en och två miljarder år. De radioaktiva ämnen, som finns i berggrunden gör det möjligt att översiktligt följa berggrundens utveckling under hela denna tid. Den bild man på så sätt fått fram visar att även vad som geologiskt sett kan betecknas som dramatiska skeden spänner över mycket långa tider, och att den svenska berggrunden f n synes befinna sig i ett geologiskt sett lugnt utvecklingsskede. Detta hindrar inte att berggrunds rörelser kan uppkomma och då särskilt i anslutning till att berggrunden avlastas i slutskedet av en nedisning. Av naturliga skäl kommer sådana rörelser företrädesvis att ske i redan tidigare försvagade partier dvs befintliga krosszoner. Ett förvar, som placerats i en "plint" av fast berg, som är omgiven av krosszoner, skyddas därför av dessa.

Slutsatsen av den geologiska tillbakablicken blir, att sannolikheten för att de hydrologiska förhållandena i ett förvarsområde skulle väsentligt förändras under den närmaste miljonen år är ytterligt låg.

Det sprickmönster som kan observeras i dagens berggrund utgör det samlade resultatet av alla de påkänningar och omvandlingar som berggrunden hittills varit utsatt för under en miljard år eller mera. Även om man antar, att antalet sprickor skulle fördubblas under en tusendel av denna tid, dvs den närmaste miljonen år, skulle detta inte medföra någon väsentlig ändring av grundvattenflödena.

Risken för, att deponeringshålen skall komma att beröras av bergförskjutningar som gör, att kapslarna blir utsatta för avskärande krafter, har bedömts mot bakgrund av observationer av tidigare sprickförskjutningar och deras frekvens på blottade hållar. En statistisk bearbetning av observationerna ger vid handen, att något enstaka deponeringshål under en miljon år kan beröras av en sådan rörelse. De plastiska och elastiska egenskaperna hos buffertmaterialet och kopparn medför, att mindre rörelser inte leder till skador på kapslarna. Konsekvenserna av skador på enskilda kapslar har behandlats i säkerhetsanalysen (beräkningsfall B).

Kriticitet i slutförvaret

Teoretiskt kan man tänka sig att de klyvbara isotoperna plutonium-239 och uran-235, som finns i förvaret, på mycket lång sikt skulle separeras ut och ansamlas i sådana geometrier att en självunderhållande kedjereaktion uppstår. Av fysikaliska skäl får ett sådant händelseförlopp anses som orimligt. Om man ändå utgår från att en kritisk massa kan uppkomma, blir konsekvenserna endast lokala, då reaktionerna avstannar, då vattnet kokar bort.

Krigshandlingar och sabotage

I det långa tidsperspektivet är det tveksamt om krigshandlingar kan betecknas som "extrema". Däremot får det anses extremt om krigshandlingarna skulle leda till väsentliga skador på ett tillslutet förvar i berg på 500 m djup. Även en markdetonation av en kärnladdning på 10-50 megaton skulle inte ge en krater som är djupare än 100 à 200 m. Detta skulle försvaga men inte totalförstöra den geologiska barriären. I en sådan situation blir utsläppet från förvaret endast en bråkdel av radioaktiviteten från bomben och relativt sett av underordnat intresse.

Slutförvaret bedöms inte vara ett objekt, som kan vara av primärt intresse för sabotörer. Under tiden före tillslutningen förutses rimliga säkerhetsåtgärder bli vidtagna.

Inträngning i förvaret

Framtida generationer måste förutsättas själva ta ansvaret för sina medvetna handlingar. Vad som är av vikt i detta sammanhang är att de ges bästa möjliga underlag för sina beslut, dvs att uppgifter om förvarets belägenhet samt dess utformning och funktion blir omsorgsfullt dokumenterade och bevarade. Om man i framtiden önskar återta och nyttiggöra den koppar eller det använda bränsle, som finns i slutförvaret, är man då samtidigt medveten om och kan möta de radiologiska riskerna.

Kunskaperna om förvaret kan tänkas gå förlorade t ex till följd av katastrofartade händelser som ett globalt utrotningskrig eller om landet under ett nedisningsskede blir obeboeligt och därefter åter befolkas. Det kan då tänkas, att man ovetande om förvarets existens, genom t ex geofysiska metoder, detekterar metallförekomsterna i förvaret och söker sig ner i området för att exploatera dem. Detta torde dock fordra ett så utvecklat tekniskt kunnande, att man då rimligtvis också bör ha förmågan att detektera radioaktiviteten och möta dess risker.

Man kan också tänka sig att det blir attraktivt att nyttiggöra den värmeenergi som under det närmaste tusentalen åren finns lagrad i bergmassan omkring förvaret. Det kan dock inte bli aktuellt efter en förnyad nedisning, då dess varaktighet kan förutsättas bli så lång, att tillskottsvärmen från bränslet har avletts före dess slut.

Då platsen för ett slutförvar väljs där brytvärda mineraler saknas, föreligger ingen risk för att området skall komma att utnyttjas för mineralutvinning.

22 SAMMANFATTANDE SÄKERHETSBEDÖMNING

Allmänt

Enligt svensk lag ansvarar kärnkraftproducenterna för att radioaktivt avfall från kärnkraftstationerna tas om hand på ett säkert sätt. Kärnkraftföretagen har uppdragit åt det gemensamt ägda Svensk Kärnbränsleförsörjning AB att svara för de erforderliga åtgärderna. Detta sker enligt en långsiktig plan, som ses över varje år.

En viktig del av arbetet är att utveckla ett system för slutlig och säker förvaring av använt kärnbränsle. Enligt svensk lag måste en reaktorinnehavare visa att det använda kärnbränslet kan hanteras och slutförvaras på ett säkert sätt innan reaktorn första gången tillförs bränsle.

Radioaktiviteten i det använda kärnbränslet avtar successivt med tiden. En del radioaktiva ämnen i bränslet har dock så långa halveringstider att de praktiskt kan jämföras med stabila giftiga ämnen. Samhället har hittills inte ställt krav på redovisning av hur sådana ämnen kan påverka omgivningen på mycket lång sikt. Det har därför inte varit möjligt att i denna redovisning ställa säkerheten hos ett slutförvar för använt kärnbränsle i relation till hur samhället allmänt bedömer säkerhetsproblem, som berör miljön på mycket lång sikt.

Redovisningen i denna rapport bygger på det kunskapsläge, som uppnåtts vid årsskiftet 1982-83.

Säkerheten i hanteringskedjan

De hanterings- och behandlingssteg, som föregår slutförvaringen av det använda kärnbränslet, har sina motsvarigheter inom industrin och kärnkraftdriften. Erforderliga säkerhetsåtgärder kan därför i stort sett baseras på erfarenhet. Några tekniska svårigheter att tillgodose högt ställda säkerhets- och skydds krav kan inte förutses.

Slutförvarets långsiktiga säkerhet

Tidsperspektivet

Radioaktiviteten i det använda bränslet avtar till en början mycket snabbt. Under de första 10 åren efter uttaget ur reaktorn återstår sålunda endast en hundradel av den ursprungliga. För att aktiviteten i det "10-åriga" bränslet i sin tur skall sjunka till en hundradel krävs en tid av 10 000 år. En tredje hundradelning av aktiviteten sker under perioden 10 000 år till 10 miljoner år.

Under de långa tidrymder, som här måste beaktas kommer många förändringar att ske i vår omgivning.

- Under en tid av något hundratal år kan naturen ändras t ex genom att sjöar växer igen.
- Under en tid av något tiotusentals år kan väsentliga klimatförändringar ske, som eventuellt kan leda till en ny nedisning.
- Under en tid av någon miljon år kan evolutionen leda till att nya arter uppkommer och andra försvinner.
- Under en tid av flera tiotal miljoner år kan betydande geologiska förändringar inträffa.

Osäkerheterna i prognoser och framtidsbedömningar blir givetvis större ju längre tider de avser. För att säkerhetsbedömningen för ett slutförvar för använt kärnbränsle skall bli fullständig, krävs dock att förväntade förhållanden mycket långt i framtiden belyses. Egenskaperna hos såväl det bergparti, som kommer att väljas för slutförvaret som hos de material, som ingår i de tekniska barriärerna karakteriseras av att de varit bestående under geologiska tidrymder. Det blir därför meningsfullt att göra bedömningar av barriärfunktionerna i ett slutförvar även i ett miljonårsperspektiv. Under tidrymder bortom miljonårsperspektivet kommer isotopsammansättningen i det använda kärnbränslet att i huvudsak vara densamma som i det uran, som naturligt förekommer i den svenska berggrunden.

Förvaringsplatsen

Det svenska urberget är geologiskt mycket stabilt och man kan inte förvänta sig några avsevärda förändringar i de hydrologiska eller geokemiska förhållandena på några hundra meters djup under den närmaste årmiljonen.

Säkerhetsanalysen grundar sig på geologiska, hydrologiska och geokemiska data, som erhållits vid omfattande undersökningar på olika platser i Sverige. Förhållandena varierar något mellan platserna. Säkerhetsanalysen täcker dock väsentligen in de variationer som iakttagits.

Platsundersökningarna och säkerhetsanalysen har visat att det finns flera platser i Sverige där berggrunden är sådan att den väl lämpar sig för anläggning av ett säkert slutförvar. De nu undersökta områdena vid Gideå och Kamlungekölen och sannolikt också Fjällveden samt det tidigare undersökta området vid Sternö, är exempel på sådana områden. Analyserna har visat att även områden liknande Finnsjön, med relativt sett högre grundvattenflöden än de nämnda, torde kunna accepteras ur säkerhetssynpunkt.

Innan slutförvarets lokalisering fastställs någon gång mot slutet av 1990-talet avses ytterligare områden bli undersökta, så att tillräckligt underlag skall finnas för ett optimalt platsval.

Säkerheten

Det använda bränslet omges i slutförvaret av olika barriärer. De har utformats och valts dels för att helt isolera bränslet från omgivningen under mycket lång tid, dels för att på ännu längre sikt fördröja och späda ut de radioaktiva ämnen som då kan läcka ut från förvaret.

En kapsel av koppar med några cm vägg tjocklek bedöms förbli tät i minst en miljon år, sannolikt betydligt längre.

Bentonitleran i deponeringshålen utgör ett tätande skikt samt en mekanisk och kemisk buffert mellan kapslarna och bergmassan. Geologiska iakttagelser visar att bentonit är en beständig naturprodukt, som bibehåller sina egenskaper i åtminstone någon miljon år, om temperaturen inte överskrider 100°C .

Både geokemiska observationer i naturen och laboratorieundersökningar visar att uran och andra aktinider, som förekommer i det använda bränslet har en mycket låg löslighet i vatten. Tillsammans med den mycket låga grundvattenomsättningen i slutförvaret leder detta till att utlakningen av de radioaktiva ämnen, som finns kvar när kapslarna genombrutits, blir ytterligt långsam.

I den kemiska miljö, som råder i bergets grundvatten kommer de radioaktiva ämnena att förflyttas utomordentligt långsamt. Framför allt sorptionen i mikrosprickorna i berget fördröjer transporten.

En analys av funktionen hos det beskrivna barriärsystemet och kunskaperna om hur naturligt förekommande uran rör sig i berget ger vid handen att slutförvaret inte kommer att påverka omgivningen över huvud taget. Kunskaper och dataunderlag är dock ännu inte tillräckliga för att visa detta på ett ovedersägligt sätt. Spridningsberäkningar har därför genomförts för ett antal tänkta fall.

I de olika beräkningsfallen har ogynnsamma förutsättningar valts t ex beträffande kapslarnas livslängd, vattenomsättningen i berget och de kemiska fördröjningseffekterna. Även då blir de beräknade doserna obetydliga - någon tusendel till någon hundradel av dosen från den naturliga strålningen - och de uppkommer först i en mycket avlägsen framtid. Jämfört med gällande radiologiska normer ger det redovisade förvarssystemet en avsevärd översäkerhet.

Analyserna visar att det bör finnas betydande utrymme för att genom fortsatt forsknings- och utvecklingsarbete nå fram till en lösning, som utan att ge avkall på de höga säkerhetskraven, är betydligt gynnsammare med avseende på ekonomi och resursanvändning.

Slutsatser

Använt kärnbränsle från de svenska kärnkraftverken kan hanteras och slutförvaras på ett sätt, som tillgodoser mycket högt ställda krav på säkerhet och strålskydd. Hanteringen och slutförvaringen kan genomföras med i dag känd och i Sverige tillgänglig

teknik. Berggrunden har på flera ställen i Sverige den beskaffenhet, som krävs för ett säkert slutförvar.

Den redovisade förvaringsmetoden är flexibel och kan anpassas till lokala förhållanden. Fortsatt forsknings- och utredningsarbete kan förutses ge underlag för betydande förbättringar med avseende på ekonomi och resursanvändning.

