



SKB rapport

R-97-21

Juni 1998

Använt kärnbränsle – Djupförvarets
funktion och utveckling

En delrapport från projektet
"Beskrivning av risk"

Lena Morén

SKB

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

SKB, Box 5864, S-102 40 Stockholm, Sweden

Tel 08-459 84 00 Fax 08-661 57 19

Tel +46 8 459 84 00 Fax +46 8 661 57 19

ISSN 1402-3091
SKB Rapport R-97-21

ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE – DJUPFÖRVARETS FUNKTION OCH UTVECKLING

**EN DELRAPPORT FRÅN PROJEKTET
”BESKRIVNING AV RISK”**

Lena Morén

SKB

Juni 1998

Förord

Frågor om hur radioaktivt material påverkar oss människor kan vara komplicerade. Breda kontakter med allmänhet, beslutsfattare men också med experter och vetenskapsmän har gjort det tydligt för oss på SKB att de behöver förklaras bättre. Debatten, där olika delar lyfts fram beroende på olika intressen, har inte gjort det lättare för en utomstående att få perspektiv på vad som är farligt, hur stora säkerhetsmarginaler som finns etc. Kraven att kunna överblicka konsekvenser över mycket långa tidsperioder och kraven på stora säkerhetsmarginaler är ovanliga, och går långt utöver vad som är normalt i samhället. Det är naturligt att detta kan vara svårt att förstå.

Samtidigt gäller att vi som arbetar med frågorna ofta i våra redovisningar tagit för givet att många har de grundläggande problemställningarna klara för sig. Det är idag uppenbart att vi måste lägga mycket mera möda på att förklara vilka risker och farligheter som våra förslag till lösningar avses ge skydd emot. Möjligheterna att på ett bättre sätt än tidigare beskriva risker är goda idag, efter många år av intensiv och bred forskning i internationellt samarbete. Man har haft möjlighet att tänka igenom grundläggande förhållanden och samlat på sig ett stort faktaunderlag. Det ger möjlighet att placera in olika problem i sina sammanhang och även ange storleksordningar.

Inom SKB har vi därför beslutat att ta upp en rad av de viktigaste frågorna inom ramen för ett särskilt projekt – ”Beskrivning av risk”. På nästa sida finns en lista på de rapporter som idag finns tillgängliga i denna serie. Tanken är att rapporterna ska utgöra ett aktuellt bibliotek som på ett populärvetenskaplig sätt redovisar riskerna kring hanteringen av det radioaktiva avfallet. Vår förhoppning är att rapporterna ska bidra till att lyfta fram de verkligt viktiga frågorna när det gäller att ta hand om det använda kärnbränslet. Allt eftersom arbetet med avfallsfrågorna går framåt kan rapporterna behöva uppdateras och nya skrivas.

Delrapporter – ”Beskrivning av risk”

I projektet ”Beskrivning av risk” ingår följande delrapporter:

- Använt kärnbränsle – Hur farligt är det? (R-97-02)
- Plutonium – data, egenskaper m m (R-97-10)
- Vad betyder en istid för djupförvaret? (R-97-11)
- Använt kärnbränsle – Barriärernas säkerhetsmässiga betydelse (R 97-20)
- Använt kärnbränsle – Djupförvarets funktion och utveckling (R 97-21)
- Använt kärnbränsle – Transporter (R 97-22)
- Farliga ämnen i människans omgivning (R 97-23)

Sammanfattning

Radioaktiva ämnen avger strålning och kan vara mycket farliga. All hantering av radioaktiva ämnen regleras därför i lagar och förordningar. Den här rapporten beskriver hur ett djupförvar för använt kärnbränsle kan utformas mot bakgrund av etablerade strålskyddsprinciper. Den vänder sig till den som söker fördjupade kunskaper i ämnet utan att vara expert.

Ett djupförvar av den typ SKB föreslår bygger på den s k flerbarriärprincipen. Det är uppbyggt av flera barriärer som kompletterar varandra, och i möjligaste mån fungerar oberoende av varandra. Förvarets säkerhetsfunktioner är att:

- isolera;
det använda bränslet innesluts i kopparkapslar,
- hålla kvar och fördröja;
om isoleringen bryts hålls radionukliderna till största delen kvar i förvarets barriärer,
- späda ut och fördela i tid och rum;
radionuklider som transporteras genom barriärerna fördelas i tid och rum och späds i bergets och biosfärens vattenmagasin.

Förvarets byggda barriärer, de s k tekniska barriärerna, består av bufferten, kapseln och bränslet självt. Den geologiska barriären, berget, ger de tekniska barriärerna en stabil miljö. Genom att välja en plats med gynnsamma recipientförhållanden kan stråldosen till människa och miljö begränsas.

Använt kärnbränsle är mycket farligt. Kärnbränslets radioaktivitet och därmed farlighet avtar med tiden. Till en början snabbt, och sedan i allt långsammare takt. Efter ca 100 000 år är aktiviteten hos bränslet jämförbar med den hos naturlig uranmalm. Ur mänskligt perspektiv är det en ofattbart lång tid. Under den senaste 100 000-års perioden har Sverige under stor del av tiden varit istäckt.

Djupförvaret har konstruerats så att dess funktion ska bibehållas under mycket lång tid. Förändringarna på djupet i den svenska berggrunden kan förutsägas under långa tidsperspektiv. Störst förändringar förväntas i samband med att inlandsisar växer till och drar sig tillbaka. Förvaret har utformats mot bakgrund av de förväntade förändringarna. Kännedomen om materialen i de tekniska barriärerna är god och deras långtidsstabilitet kan studeras i naturen, i s k naturliga analogier.

För att beskriva djupförvarets säkerhet och funktion under olika förhållanden genomför SKB säkerhetsanalyser. Eftersom framtiden inte kan förutsägas med säkerhet arbetar man med scenarier. Inom ett scenario beskrivs en tänkt framtid. I en säkerhetsanalys beskrivs djupförvarets funktion och säkerhet för en vald uppsättning scenarier.

Avfallet

Kärnbränsle – det avfall som ska hanteras i ett djupförvar – består av urandioxid. Uran-dioxid är ett keramiskt material som till sin karaktär påminner om stengods. Ett kärnbränsleelement består av ett antal rör, kapslingsrör, fyllda med centimeterstora cylindrar, kutsar, av urandioxid. Före driften i reaktorn kan kärnbränslet hanteras utan strålskyddsåtgärder. Vid driften uppstår radioaktiva ämnen genom fission (kärnklyvning) och neutroninfångning. De bildade ämnena har olika egenskaper som radioaktivitet, löslighet i vatten och rörlighet i buffert och berg. Ämnenas farlighet står i relation till radioaktiviteten. Risken förknippad med ett ämne beror dels på farligheten, dels på hur effektivt djupförvarets barriärer kan hindra det att nå biosfären. Bränslets farlighet avtar med tiden. På lång sikt domineras farligheten av ämnen som stoppas effektivt av barriärerna.

Biosfären

Biosfären är den del av jorden där det förekommer biologiskt liv. Djupförvaret ska hindra radioaktiva ämnen att nå biosfären. Biosfären inkluderar ekosystem och människans markanvändning. Variationer i biosfären har stor betydelse för den stråldos människor kan utsättas för vid ett eventuellt utsläpp av radioaktiva ämnen. Förändringarna i biosfären är stora och snabba i relation till förändringarna i djupförvaret.

Berget

Det svenska urberget är mycket gammalt, mellan 900 och 3 000 miljoner år. Det består av massiva bergblock omgivna av sprickor med olika form och utbredning. Spricksystemet är viktigt för bergets mekaniska och hydrologiska egenskaper. I spricksystemet tas mekaniska påkänningar upp, och där kan vatten röra sig. Förvaret byggs på 400–700 m djup i berget och placeras in med hänsyn till spricksystemet. Längs sprickor som korsar kapselpositioner förväntas små rörelser och vattenflödet är begränsat. Berget bidrar till isoleringen genom att ge de tekniska barriärerna en stabil miljö. Om isoleringen bryts bidrar långsamt vattenflöde, långa transporttider och sorptionsprocesser till att fördröja och hålla kvar radionuklider. Berget förändras långsamt. De förändringar som kan förväntas inom de närmaste 100 000 åren förväntas inte bli så stora att de tekniska barriärernas funktion hotas.

Bufferten

Bufferten består av bentonitlera. Leror innehåller lermineral. Lermineral har formen av mycket tunna flak. En del leror sväller då de tillförs vatten. I svällande leror tar sig vatten in mellan skikten av mineralflak så att leran expanderar. Bentonitlera har ett stort innehåll av svällande lermineral. Den sväller och fyller utrymmet mellan kapsel och berg. De många små platta lermineralen gör tänkbara passager för vatten små och svårframkomliga, och ytan tillgänglig för sorption stor. Bufferten är praktiskt taget vattentät. Bufferten bidrar till isoleringen genom att förhindra intransport av korroderande och därmed korrosion av kopparkapseln. Rörelser i berget tas upp som plastiska deformationer i leran, ungefär som då man trycker på modeller. Bufferten hindrar uttransport av radionuklider genom långsam transport, filtrering och sorptionsprocesser. Bentonitlerans utveckling i tiden har studerats i beräkningsmodeller, laboratorieförsök och naturliga analogier. Bufferten förväntas behålla sina goda egenskaper under mycket långa tidsrymder.

Kapseln

Kapseln av koppar och gjutjärn har konstruerats för att motstå de förändringar den kan tänkas utsättas för i ett djupförvar. Koppar har valts på grund av sin korrosionsbeständighet. Koppar är en duktil, tånjbar, metall som tål stora plastiska deformationer utan att spricka. Kapselns kopparhölje innesluter det använda bränslet. Insatsen av gjutjärn ger mekanisk hållfasthet. Kapseln förväntas bli intakt under mycket långa tidsperioder även om en viss korrosion förekommer. Mekaniska påkänningar i samband med glaciationer och jordskalv tas upp av gjutjärnsinsatsen. Om det skulle finnas hål på kopparhöljet utgör de oskadade delarna av kapseln en effektiv barriär mot radionuklidtransport.

Bränslet som barriär

Kärnbränsle består av urandioxid. Uran- och syreatomerna sitter bundna till varandra i ett gitter, kallat bränslematrisen. De flesta radionukliderna sitter inbakade i bränslematrisen. Bränslet är utomordentligt svårslösligt i vatten och utgör därför en barriär för de inbakade radionukliderna. Innan de kan lösas måste bränslematrisen ha brutits sönder. En del radionuklider kan under driften transporteras ut mot bränslets yta och mellanrummet mellan kapslingsrören av zirkaloy och bränslet, det s k gapet. Några finns lokalt ansamlade i form av metalliska utfällningar eller oxidutfällningar vid bränslekornens ytor, det s k korngränsinventariet. Inventariet i gapet upplöses relativt snabbt; även korngränsinventariet kan lösas snabbare än de nuklider som sitter inbakade i matrisen. Naturliga analogier visar att urandioxid är beständigt i geologiska miljöer.

Innehåll

		<i>Sida</i>
	Tabeller	ix
	Figurer	xi
1	Inledning	1
1.1	Läsanvisningar	2
2	Förvarets funktion	3
3	Förvarets normala utveckling	7
4	Säkerhetsanalyser	11
5	Avfallet – det använda kärnbränslet	13
5.1	Det använda kärnbränslet	15
6	Biosfären	23
6.1	Biosfären vid ett djupförvar	24
6.2	Förändringar av biosfären i ett 100 000-årsperspektiv	26
7	Berget	29
7.1	Berget – massiva bergblock omgivna av sprickor	33
7.2	Grundvattnet i berget	33
7.3	Kemiska förhållanden i berget	37
7.4	Bergets funktion	38
	7.4.1 Isolera	38
	7.4.2 Hålla kvar och fördröja samt späda ut och fördela i tid och rum	44
7.5	Bergets förväntade utveckling	48
	7.5.1 Tiden fram till nästa istid	48
	7.5.2 Kommande glaciation	51
	7.5.3 Utvecklingen i ett plattektoniskt tidsperspektiv	54
8	Bufferten	57
8.1	Inledning	60
8.2	Uppbyggnad och egenskaper hos leror – buffertens bentonitlera	61
8.3	Buffertens funktion	65
	8.3.1 Isolera	65
	8.3.2 Hålla kvar och fördröja samt fördela i tid och rum	70

	<i>Sida</i>	
8.4	Buffertens förväntade utveckling	73
8.4.1	På kort sikt – återfuktningsfasen	73
8.4.2	På lång sikt	74
9	Kapseln	77
9.1	Inledning	80
9.2	Krav på kapseln	80
9.3	Koppar och järn	81
9.3.1	Koppar	81
9.3.2	Järn	83
9.3.3	Korrosion	83
9.4	Kapselns funktion	86
9.4.1	Isolera	86
9.4.2	Hålla kvar och fördröja samt fördela i tid och rum	86
9.5	Kapselns förväntade utveckling	87
9.5.1	Korrosion av kopparhöljet	87
9.5.2	Korrosion av gjutjärnsinsatsen	91
9.5.3	En otät kapsels utveckling	92
9.5.4	Mekanisk utveckling	93
10	Bränslet som barriär	95
10.1	Bränslet fungerar som barriär	97
10.2	Bränsleupplösning	99
10.3	Naturliga analogier till använt kärnbränsle	100
	Referenser	103
Bilaga 1:	Radioaktivt sönderfall och strålning	109
Bilaga 2:	Bergarter och tektonik	113

Tabeller

	Sida
<i>Tabell 5-1: Sammansättning i viktsprocent av uranet hos typiskt svenskt kärnbränsle (typ SVEA 64 med utbränningsgrad 38 MWdygn/kg U) före drift och vid tiden för deponering.</i>	17
<i>Tabell 5-2: Några data för de 10 farligaste radionukliderna i 40 år gammalt använt kärnbränsle. Två av de farligaste radionukliderna är fissionsprodukter och de övriga är aktinider. Övriga fissions- och aktiveringsprodukters bidrag till farligheten har, liksom de övriga aktinidernas, summerats.</i>	20
<i>Tabell 7-1: Några viktiga substanser i grundvatten och deras normala halter i kristallint berg. De barriärer, barriärfunktioner och processer som kan påverkas om halterna faller utanför det normala.</i>	43
<i>Tabell 7-2: Påverkan på djupförvaret under de olika klimatstyrda processtillstånden.</i>	53
<i>Tabell 8-1: Sammansättning och några egenskaper hos bentonit av typen MX-80.</i>	64
<i>Tabell 8-2: Halveringstid, fördröjning i bufferten samt ungefär hur mycket som sönderfaller i bufferten för några viktiga radionuklider.</i>	72
<i>Tabell 9-1: Sammanställning av kopparkorrosionen de inledande 100 000 åren, samt beräknad tid till genomfrätning.</i>	91

Figurer

	Sida
<i>Figur 2-1: Förvarssystemet. Förvarssystemets olika delar, de olika barriärernas funktion och biosfärens betydelse för förvarets funktion.</i>	4
<i>Figur 3-1: Övre delen: Det använda bränslets aktivitet som funktion av tiden. Aktiviteten visas i relation till aktiviteten i den mängd uranmalm som behövs för att framställa bränslet. Undre delen: Den förväntade klimatutvecklingen i Sverige.</i>	8
<i>Figur 3-2: Uranmalmyndigheten vid Cigar Lake påminner om ett djupförvar. Malmkroppen som är 2 000 m lång, 50–100 m bred och 1–20 meter tjock omges av ett 10–50 m tjockt lerlager (huvudsakligen illit). Malmkroppen ligger på urberg och ovanför malmkroppen består berget av sandsten. Närmast markytan finns jordarter som avsatts i samband med glaciationer. I djupförvaret omges det använda bränslet av kopparkapslar och en bentonitbuffert och placeras på 500 meters djup i urberget.</i>	9
<i>Figur 5-1: Kärnbränsle.</i>	13
<i>Figur 5-2: Till vänster: Kärnbränslekutsar av urandioxid. Bränslekutsarna placeras i rör av zirkaloy, s k bränslestavar. Till höger: Ett bränsleelement för en kokvattenreaktor. 64 bränslestavar sätts ihop till ett bränsleelement. I en kokvattenreaktor finns 440–700 bränsleelement, varje år byts ca en femtedel av elementen. Före driften i reaktorn kan bränslet hanteras utan strålskyddsåtgärder.</i>	16
<i>Figur 5-3: Radioaktiviteten för typiskt svenskt kärnbränsle (typ SVEA 64 med utbränningsgrad 38 MWdygn/kg U) som funktion av tiden. Som jämförelse visas aktiviteten för motsvarande mängd uranmineral. Aktiviteten domineras av fissionsprodukter de inledande drygt 100 åren, därefter av aktinider. Då bränslet är ca 100 000 år gammalt är dess aktivitet jämförbar med aktiviteten hos den mängd uranmalm som brutits för att tillverka bränslet.</i>	18
<i>Figur 5-4: Radionukliderna i använt kärnbränsle kan delas in i två kategorier: de med extremt låg tillgänglighet (blå linje) samt övriga (röd linje). De med extremt låg tillgänglighet hålls kvar i förvarets barriärer. De dominerar också farligheten. I figuren visas hur farligheten förändras de första 1 000 åren efter deponering. Farligheten avser intag via föda och anges relativt den mängd naturligt uran som använts för att tillverka bränslet.</i>	21
<i>Figur 5-5: Figuren illustrerar samma sak som Figur 5-4 men med logaritmiska skalor för att ett längre tidsperspektiv ska kunna överblickas.</i>	21
<i>Figur 6-1: Biosfären.</i>	23

Figur 6-2:	<i>Biosfär med självförsörjande lantbrukare som lever invid en sjö. Lantbrukarna har egen brunn. Ett utsläpp av radionuklider har skett, en del av utsläppet hamnar i brunnen och resten i sjön. Nukliderna kan transporteras runt i ekosystemen, från vatten – till mark – till växt – till djur – till mark – till vatten – osv. Människor kan exponeras via intag med föda, inandning och extern bestrålning. Den dominerande exponeringsvägen är via födan; de radioaktiva ämnena kan finnas i vatten, vegetabilier och olika animaliska produkter.</i>	25
Figur 7-1:	<i>Berget.</i>	29
Figur 7-2:	<i>Schematisk skiss över en 1 x 1 cm stor del av en spricka i kristallint berg. I stora delar av sprickan pressas bergytorna mot varandra. I vissa partier finns mellanrum som är fyllda med vatten. Om de vattenfyllda partierna står i förbindelse med varandra kan vattnet röra sig i dem.</i>	34
Figur 7-3:	<i>Typiska tryckskillnader och därav följande flöden för ett parti med kristallint berg någonstans i Sverige. De svartfärgade linjerna är linjer med lika stort grundvattenstryck, s k ekvipotentialer, och de blå markerar grundvattenflöde. Grundvattenflödet är störst närmast ytan. Bergets vattengenomsläpplighet avtar med ökande djup. På djup ned till ca 200 m avtar vattengenomsläpplighet snabbare än på större djup. Vattnets salthalt ökar med djupet, även det bidrar till att minska vattnets rörlighet. Gråtonen visar förändringen i hydraulisk konduktivitet med djupet, ju mörkare desto mindre konduktivitet.</i>	36
Figur 7-4:	<i>De rörelser man kan förvänta sig i en spricka är proportionella mot sprickans utbredning. I diagrammet visas rörelsen längs en spricka, eller sprickzon, som funktion av sprickans längd. (Ur /7-4/)</i>	41
Figur 7-5:	<i>Radionuklider som är lösta i grundvattnet kan följa med grundvattnets rörelser. Transporten påverkas av dispersion, diffusion och sorption. På sin väg genom berget hinner många av radionukliderna sönderfalla.</i>	45
Figur 7-6:	<i>Några faktorer som påverkar berget i ett 100 000-årsperspektiv.</i>	49
Figur 7-7:	<i>Det glaciala klimatstyrda processtillståndet. Belastningarna på berget och randvillkoren för grundvattenflöde bestäms av isens närvaro. De mer exakta förhållandena bestäms av rådande regim och delregim.</i>	54
Figur 8-1:	<i>Bufferten.</i>	57
Figur 8-2:	<i>En buffert av bentonitlera fyller utrymmet mellan de deponerade kapslarna och deponeringshålens vägg.</i>	60
Figur 8-3:	<i>Schematisk skiss över kristallstrukturen i ett lermineral tillhörande gruppen smektiiter. Mineralen är uppbyggt av ett T-lager, ett O-lager och ytterligare ett T-lager. Mellan T-O-T-lagren finns katjoner. Katjonerna kan omge sig med vattenmolekyler.</i>	62
Figur 8-4:	<i>Bentonitens väg från lertakten till djupförvaret. Leran bearbetas så att egenskaperna anpassas till djupförvarets funktionskrav.</i>	66

	Sida
<i>Figur 8-5: Transport av korrodanter genom bufferten. I figuren är koncentrationsprofilen symmetrisk, i verkligheten hinner ämnena på "uppströmssidan" diffundera in lite längre än på "nedströmssidan".</i>	68
<i>Figur 9-1: Kapseln.</i>	77
<i>Figur 9-2: Kapsel för använt kärnbränsle. Kapseln består av ett kopparhölje och en insats av gjutjärn. Kapseln väger 24,6 ton.</i>	80
<i>Figur 9-3: En kopparplåt nedsänkt i rent vatten.</i>	82
<i>Figur 9-4: En korrosionscell under en vattendroppe på en ärgande kopparplåt.</i>	84
<i>Figur 9-5: Olika typer av lokala korrosionsangrepp, från höger till vänster: gropfrätning, korngränsfrätning och spänningskorrosion.</i>	85
<i>Figur 9-6: Kopparkorrosion i vatten innehållande sulfidjoner. Kopparjonerna närmast ytan bildar sulfid som fälls ut. Kopparplåten blir negativt laddad, elektronerna tas upp av väte i vattnet.</i>	85
<i>Figur 9-7: Massbalansberäkning av korrosionen orsakad av sulfid som finns i buffertmaterialet.</i>	90
<i>Figur 10-1: Bränslet.</i>	95
<i>Figur 10-2: Bränslekuts som spruckit under driften i reaktorn.</i>	97

1 Inledning

Grundämnen kan i vissa fall genom uppbyggnaden av sina atomer innehålla ett energiöverskott. Det överskottet strävar de efter att göra sig av med genom *radioaktivt sönderfall*. Vid sönderfallet avges energin som strålning. Strålning finns runt omkring oss i naturen. Genom att utnyttja kunskapen om grundämnena, deras uppbyggnad och egenskaper kan människor utnyttja strålningen till sin nytta. Några exempel är: i hemmet i brandvarnare, inom sjukvården för diagnos och behandling och inom processindustrin i mätinstrument.

Radioaktiva ämnen är tyvärr inte enbart till nytta, utan kan tvärtom också vara mycket farliga. De måste hanteras med försiktighet. Eftersom strålning kan skada finns skyddsprinciper som gäller vid all användning och hantering av radioaktiva ämnen. Flera av skyddsprinciperna har man kommit överens om internationellt. Några viktiga sådana principer är:

- Verksamheten ska vara berättigad.
- Strålskyddet ska vara optimerat.
- Individens skydd ska säkerställas genom dosgränser.

Den här rapporten behandlar hur ett djupförvar för använt kärnbränsle kan utformas bland annat mot bakgrund av dessa principer. För djupförvaret innebär strålskyddsprinciperna att alla åtgärder som är försvarbara med hänsyn till kostnader och sociala faktorer ska vidtas för att minska den totala *stråldosbelastningen*. Under normala förhållanden får *stråldosen* inte överskrida 0,1 mSv/år. Vid extrema händelser får *riskan* för människor inte överskrida den risk som motsvaras av ovan nämnda stråldos. (Radioaktivitet och strålning beskrivs i Bilaga 1.)

De nordiska länderna har dessutom tillsammans formulerat ytterligare mål för förvaringen av högaktivt avfall. Några av dem är:

- Det är både människa och miljö som ska skyddas.
- Hälsorisker och miljöeffekter ska vara små för all framtid och inte större än de som accepteras idag.
- Belastningen på kommande generationer ska begränsas.

Det innebär att systemet för djupförvaring ska vara robust och långtidsstabil. Det ska inte kräva långsiktig övervakning eller aktiva underhållsåtgärder.

Med utgångspunkt från skyddsprinciperna har bland annat följande krav på förvarets utformning formulerats (citat ur den s k Flaggboken /1-1/):

”Den långsiktiga säkerheten ska baseras på flera passiva barriärer så att:

- a) bristfälligheter i en av barriärerna inte nämnvärt stör helhetsfunktionen hos systemet,
- b) realistiska geologiska förändringar förväntas sannolikt endast delvis påverka barriärsystemet” (slut citat).

Skyddsprinciper och utformningskrav har tillsammans med kunskap och erfarenhet lett fram till det förvarssystem SKB föreslår och vars funktion och utveckling beskrivs i denna rapport.

1.1 Läsanvisningar

Rapporten inleds med översiktliga kapitel om förvarets funktion och utveckling samt en beskrivning av vad en säkerhetsanalys är. Därefter följer relativt detaljerade redovisningar av det använda bränslet, biosfären och förvarssystemets barriärer. Rapporten är populärvetenskapligt skriven. Den tar upp många av de frågeställningar som behandlas vid analyser av djupförvarets funktion och säkerhet och som studeras i olika forsknings- och utvecklingsprojekt. Rapporten vänder sig till den som vill fördjupa sig i tekniska frågor runt djupförvaret utan att vara områdesexpert.

Kapitlen om det använda bränslet, biosfären och de olika barriärerna innehåller relativt utförliga beskrivningar och är därför långa. För den som vill snabbläsa rapporten inleds dessa kapitel med en sammanfattning. Rubrikerna i sammanfattningarna är desamma som avsnittsrubrikerna i kapitlen. Sammanfattningarna ger tillsammans med figurer och tabeller en överblick över ämnesområdet. Huvudtexten innehåller fördjupade beskrivningar av djupförvarets olika delar, deras funktion och utveckling.

2 Förvarets funktion

Syftet med förvaret är bland annat att skydda människor och miljö från att komma till skada av det radioaktiva avfallet. Förvarets säkerhetsfunktioner är att:

1. isolera;
det använda bränslet innesluts i kopparkapslar,
2. hålla kvar och fördröja;
om isoleringen bryts hålls radionukliderna till största delen kvar i förvarets barriärer,
3. späda ut och fördela i tid och rum;
radionuklider som transporteras genom barriärerna fördelas i tid och rum och späds i bergets och biosfärens vattenmagasin.

En skiss över förvarssystemet och de olika delarnas funktion visas i *Figur 2-1*.

Det använda bränslet från våra kärnkraftverk är farligt. Farligheten avtar med tiden. För att undvika att någon skadas hålls det använda bränslet avskilt från människa och miljö. Använt kärnbränsle kommer aldrig att bli helt ofarligt. Efter ca 100 000 år är det använda bränslet ungefär lika farligt som den malm som en gång bröts för att tillverka det. Bergpartiet med djupförvaret är då jämförbart med ett naturligt bergparti innehållande uranmalm. Genom att förvara det använda bränslet djupt ned i berget isoleras det från människa och miljö. Isoleringen förväntas bestå tills bränslets farlighet är jämförbar med uranmalms.

Djupförvarets säkerhet får inte vara beroende av funktionen hos en enda barriär. De olika barriärerna ska komplettera varandra genom att i möjligaste mån fungera oberoende av varandra. Detta brukar kallas flerbarriärprincipen.

Säkerheten får inte heller enbart vara beroende av isoleringen. Förvaret måste kunna skydda människor och miljö även om isoleringen bryts. Det uppnås genom att hålla kvar och fördröja samt späda ut och fördela radionukliderna i tid och rum.

För att hålla kvar och fördröja har förvaret utformas så att radionukliderna om möjligt ska fastna i någon av barriärerna. För de nuklider som inte hålls kvar i barriärerna ska transporten ut till biosfären vara långsam. Fördelning sker både i tid och rum genom att radionukliderna tar olika vägar, fördröjs på vägen, och slutligen hamnar på olika ställen i biosfären. Utspädning sker i bergets, men främst i biosfärens, vattenmagasin. Många radionuklider kommer att hållas kvar i någon av förvarssystemets barriärer och aldrig nå biosfären, även om isoleringen skulle brytas. Fördröjningen gör att atomer hinner sönderfalla så att radioaktiviteten och därmed farligheten avtar innan nuklider från det

FÖRVARSSYSTEMET

A. BIOSFÄREN

Genom att välja en plats med gynnsamma förhållanden kan stråldosen begränsas.

Utspänningsförhållanden, recipienters förmåga att buffra, lagra eller ackumulera radionuklider samt mark- och vattenanvändning påverkar dosen till människor.

Överföring av radionuklider till människor via recipienter för djupt grundvatten och lokala ekosystem.

B. BERGET

Isolering:

- håller avfallet avskilt från människor
- ger de tekniska barriärerna en stabil miljö

Hålla kvar och fördröja:

- långsamt vattenflöde och därmed långa transporttider
- håller kvar radionuklider genom att fungera som filter och buffert

C. BUFFERTEN AV BENTONITLERA

Isolering:

- tar genom sina geologiska egenskaper upp mekaniska påkänningar
- förhindrar vattenflöde så korrosiva ämnen hindras att nå kapseln
- buffrar den kemiska miljön runt kapseln

Hålla kvar och fördröja:

- hindrar vattenflöde och därmed uttransport av radionuklider
- partiklar och lösta ämnen fångas upp via filtrering och sorption

D. KAPSELN AV KOPPAR OCH GJUTJÄRN

Isolera:

- innesluter helt det använda bränslet
- kopparhöljet gör kapseln tät
- gjutjärnsinsatsen ger mekanisk hållfasthet

Hålla kvar och fördröja:

- oskadade delar av en defekt kapsel begränsar in- och uttransport av vatten

E. BRÄNSLET

Hålla kvar och fördröja:

- låg löslighet i vatten och låg korrosionshastighet
- de flesta radionuklider sitter inbakade i urandioxiden och kan ej frigöras förrän urandioxiden lösts eller omvandlats



Figur 2-1: Förvarssystemet. Förvarssystemets olika delar, de olika barriärernas funktion och biosfärens betydelse för förvarets funktion.

använda bränslet när biosfären. Spädning minskar de farliga ämnens koncentration och därmed möjligheten att någon exponeras för en skadlig dos.

3 Förvarets normala utveckling

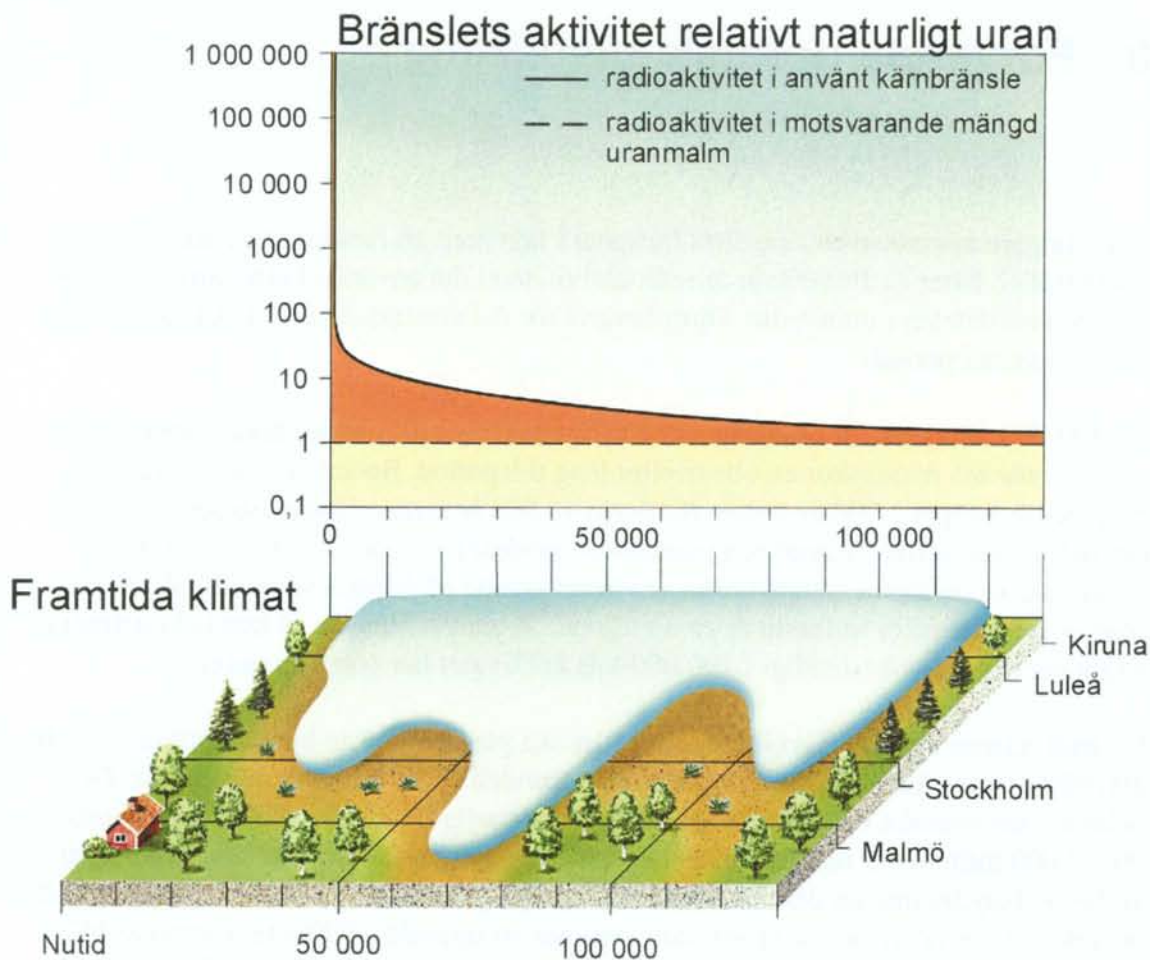
Som tidigare nämnts avtar bränslets farlighet i takt med att radionukliderna i bränslet sönderfaller. Efter ca 100 000 år är radioaktiviteten i det använda kärnbränslet jämförbar med aktiviteten i uranmalm. Djupförvaret för det använda bränslet ska fungera under hela denna period.

De 100 000 år det tar för bränslets aktivitet att avklinga till samma nivåer som i uranmalm är för oss människor en obegripligt lång tidsperiod. Betänk att vår tideräkning började för knappt 2 000 år sedan; för drygt 10 000 år sedan släppte istiden sitt grepp om det vi idag kallar Sverige och människor vandrade in i landet; för ca 100 000 år sedan kanske de första människorna av vår art jagade på Afrikas savanner; de äldsta spår av förmänniskor vi funnit är ca 3 miljoner år gamla. Hur ska vi kunna konstruera något som ska vara beständigt i 100 000-tals år? Svaret har sökts i naturen.

Förändringarna i den omgivning där bränslet ska placeras måste kunna uppskattas i ett 100 000-årsperspektiv. Förändringar av berggrunden sker i miljonårsperspektiv. De delar av den svenska berggrunden som kan bli aktuella för ett djupförvar har funnits i 900–3 000 miljoner år och förväntas bestå många miljoner år till. Att berget kommer att bestå, betyder inte att det förblir helt oförändrat. Rörelser i jordskorpan kommer att påverka lastförhållanden och jordskalv kommer att uppträda. Klimatet förväntas bli kallare, och liksom vid upprepade tillfällen de gångna 100 000-tals åren förväntas Sverige och stora delar av norra Europa att täckas av inlandsis. Bergrörelser och klimatförändringar kommer att påverka både berget och det grundvatten som finns i berget. För att finna en miljö där förändringarna inte är så stora får man söka sig relativt djupt ned i berget. Mot bakgrund av de övriga barriärernas utformning och funktion bedöms 4–700 meter vara ett lämpligt djup att förlägga förvaret på.

Även de tekniska barriärerna, buffert och kapsel, bör vara beständiga i 100 000-årsperspektivet. Som material i bufferten och kapsel har därför valts beständiga material som vi känner väl. Buffertens bentonitlera skyddar kapseln både kemiskt och mekaniskt. Bentonitlera finns på flera ställen på jorden och dess beständighet och förmåga att bevara föremål som begravts i leran har studerats på flera platser. De förändringar bentonitleran förväntas genomgå i förvaret i ett 100 000-årsperspektiv bedöms inte påverka dess goda egenskaper.

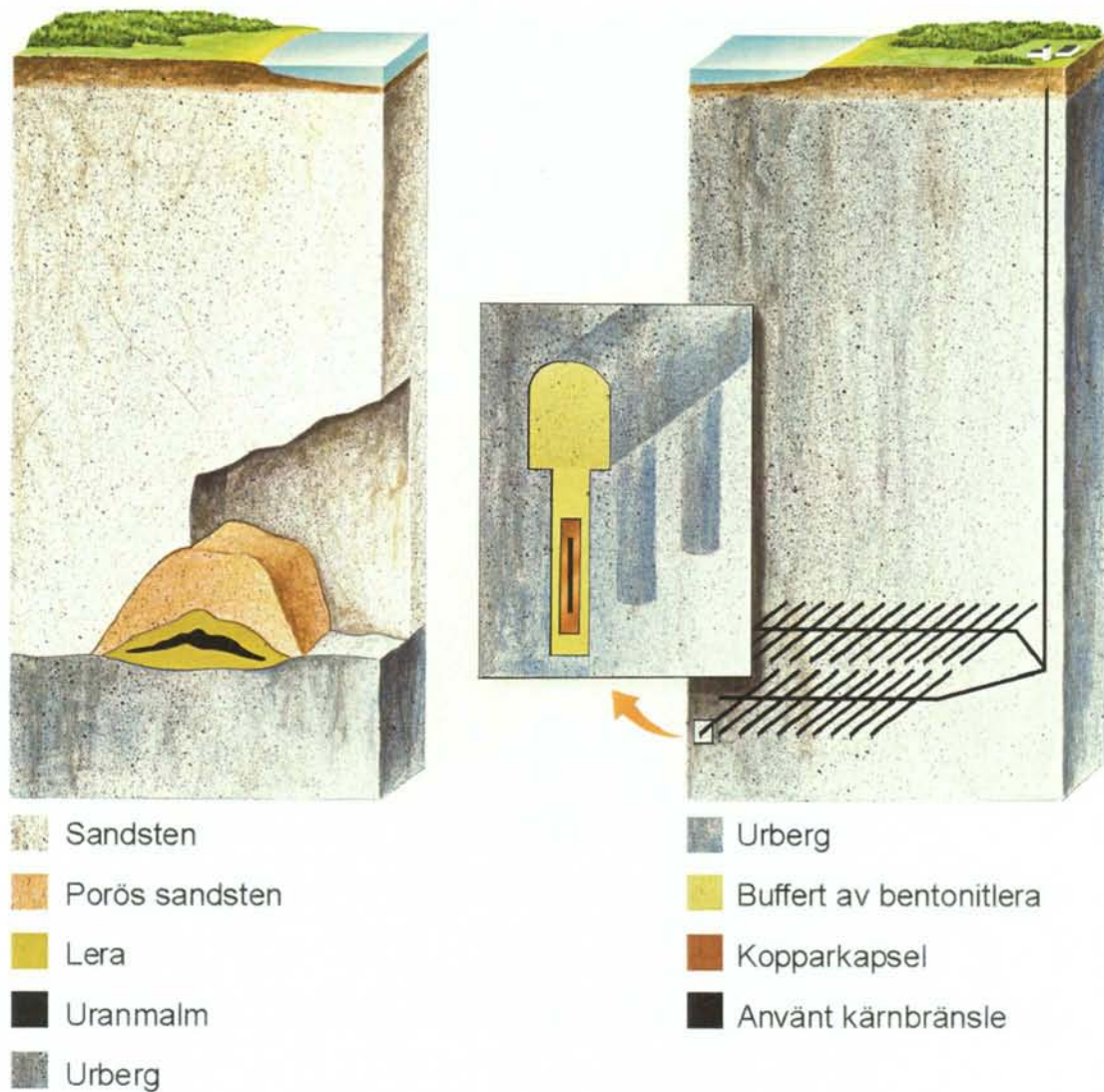
Kapseln, med sitt kopparhölje, stänger inne radionukliderna. Insatsen av gjutjärn ger kapseln mekanisk stabilitet. Så länge kopparhöljet är tätt slipper inga radionuklider ut. Koppar har valts för att det är ett beständigt material som vi har goda kunskaper om. Berg och buffert skyddar kopparhöljet från kemisk och mekanisk påverkan. I sin skyddade miljö förväntas kapseln förbli tät i tidsperioder långt över 100 000 år.



Figur 3-1 : Övre delen: Det använda bränslets aktivitet som funktion av tiden. Aktiviteten visas i relation till aktiviteten i den mängd uranmalm som behövs för att framställa bränslet. Undre delen: Den förväntade klimatutvecklingen i Sverige.

I Figur 3-1 sätts avklingningen av bränslets aktivitet /3-1/ i relation till de klimatförhållanden som kan förväntas i Sverige de närmaste 130 000 åren /3-2/. Vi förväntar oss att djupförvaret kommer att utsättas för påfrestningar av kommande glaciationer och jordskalv. Även människors aktiviteter kan komma att påverka djupförvaret. I alla normala fall förväntas djupförvaret tåla påfrestningarna utan att isoleringen bryts. Vi kan trots allt inte utesluta att isoleringen ändå bryts. Om det skulle inträffa fördröjs och späds radionukliderna i förvarssystemets barriärer så att stråldoser till människa och miljö minimeras.

I Kanada, på en plats som heter Cigar Lake, har man hittat en kropp med mycket rik uranmalm, snitthalten uranmineral är 14 % och maxhalten 55 %. Malmkroppen, som är 1 300 miljoner år gammal, ligger på 430 meters djup. Malmen är omgiven av ett 10–50 m tjockt lerlager. Under malmen finns bergarter som liknar dem djupförvaret ska placeras i, ovanför malmen finns en porösare sandsten. Malmkroppen genombryts på flera ställen av sprickor. Vid ytan har man inte hittat några spår av uranmalmen, varken geokemiska eller radiologiska. Det bör påpekas att kärnklyvning (se avsnitt 4) inte har



Figur 3-2: Uranmalmyndigheten vid Cigar Lake påminner om ett djupförvar. Malmkroppen som är 2 000 m lång, 50–100 m bred och 1–20 meter tjock omges av ett 10–50 m tjockt lerlager (huvudsakligen illit). Malmkroppen ligger på urberg och ovanför malmkroppen består berget av sandsten. Närmast markytan finns jordarter som avsatts i samband med glaciationer. I djupförvaret omges det använda bränslet av kopparkapslar och en bentonitbuffert och placeras på 500 meters djup i urberget.

förekommit i malmkroppen. Förhållandena vid Cigar Lake påminner på många sätt om ett djupförvar. Cigar Lake kan sägas vara en s k *naturlig analogi* till ett djupförvar. Analogier som den i Cigar Lake är ett stöd då djupförvarets framtida utveckling och säkerhet ska utvärderas.

4 Säkerhetsanalyser

I den här rapporten beskrivs funktionen och utvecklingen för det system för djupförvaring av använt kärnbränsle som SKB föreslår. Syftet är att beskriva på vilka grunder SKB anser att systemet är säkert. I normala fall förväntas kapslarna förbli täta och bränslet isolerat från människa och miljö under 100 000-tals år. Efter så långa tidsperioder är bränslets farlighet jämförbar med naturligt förekommande uran och behovet av total inneslutning har upphört. För att beskriva systemets säkerhet och funktion under olika förhållanden genomför SKB *säkerhetsanalyser*. En säkerhetsanalys ska visa att systemet uppfyller ställda säkerhetskrav.

Vi kan på goda grunder anta att djupförvarets primära funktion att isolera det använda bränslet kommer att bibehållas långt in i framtiden. Helt säkra på att det verkligen kommer att bli så kan vi dock inte vara. Vi kan av okunskap ha bortsett från några viktiga förhållanden och konstruerat förvaret på ett olämpligt sätt. Kombinationer av olika, var för sig obetydliga, ogynnsamma förhållanden kan tillsammans påverka förvarets funktion. Tillverkningsfel kan förekomma.

Inom en säkerhetsanalys görs en systematisk beskrivning av förvarssystemet. Utifrån den identifieras tänkbara utvecklingsvägar och situationer som skulle kunna leda till försämrad funktion hos förvaret. Även orealistiska situationer som illustrerar vad som händer om vi tänkt fullständigt fel på någon punkt beskrivs. Dessutom måste vi beskriva konsekvenserna av de tänkta utvecklingsvägarna och situationerna. Vi pratar om att beskriva förvaret givet olika scenarier /4-1/. I en analys av djupförvarets långtida säkerhet visas systemets funktion givet en vald uppsättning scenarier. Den valda scenarieuppsättningen ska täcka in:

- framtida realistiska utvecklingsvägar (t ex istider och jordskalv),
- kritiska situationer som kan tänkas uppstå (t ex mänskliga intrång),
- mer eller mindre orealistiska utvecklingsvägar och/eller situationer som belyser systemets robusthet, dvs hur känsligt systemet är för osäkerheter i barriärernas funktion och de processer som är knutna till den (t ex kapslar med stora initiala skador, förlorad buffert etc).

Säkerhetsanalysens resultat ska kunna användas för att belysa vilka faktorer som har betydelse för säkerheten. Bedömningar av vilka faktorer som är speciellt viktiga under olika situationer eller utvecklingsskeden ska kunna göras. Säkerhetsanalysen ska om möjligt avslöja systemets svaga punkter och belysa möjliga förbättringar och behov av ytterligare forskning.

5 Avfallet – Det använda kärnbränslet

Sammanfattning – Avfallet – Det använda kärnbränslet



Figur 5-1: Kärnbränsle.

Kärnbränsle är ett keramiskt material. Kärnbränsle tillverkas av urandioxidpulver (UO_2) som pressas till centimeterstora cylindrar, s k *kutsar*. Bränslekutsarna innesluts i ca 4 m långa metallrör av legeringen zirkaloy (se *Figur 5-2*). Urandioxid finns i jordskorpan i form av uranmineralet uraninit. I kärnbränsle är innehållet av uranisotopen U-235 större. Oanvänt kärnbränsle kan hanteras utan strålskyddsåtgärder.

Vid driften i reaktorn uppstår radioaktiva ämnen genom *fission* (kärnklyvning) och *neutroninfångning*. Isotoper av vissa ämnen (t ex U-235) kan klyvas om deras atomkärna träffas av en neutron. Vid klyvningen frigörs energi och neutroner som fortplantar reaktionen. Den delade atomkärnan bildar nya ämnen, s k *fissions-* eller *klyvningsprodukter* (t ex jod, cesium och strontium). Ett 60-tal ämnen med skilda egenskaper kan bildas på detta sätt. De frigjorda neutronerna kan också fångas in av urankärnor som inte klyvs. På så sätt bildas tyngre ämnen s k *transuraner* (t ex plutonium och americium). Transuranerna tillhör liksom uran en grupp ämnen som kallas *aktinider*. Neutroner kan också fångas upp av t ex metalldelar i bränsleelementen och bilda s k *aktiveringsprodukter*.

Innehållet av radioaktiva ämnen i använt kärnbränsle beror på bränsletyp och driftförhållanden. *Utbränningsgraden*, dvs hur mycket energi som utvunnits ur elementet, är viktig för mängden långlivade ämnen. Allt eftersom bildade radioaktiva ämnen sönderfaller blir det använda bränslet allt mer likt den uranmalm som en gång bröts för att

tillverka det. Farligheten som är relaterad till radioaktiviteten avtar med tiden (se *Figur 5-3*).

Vid radioaktivt sönderfall genereras olika typer av strålning, såsom alfa-, beta-, gamma- respektive neutronstrålning. Gamma- och neutronstrålning kan tränga igenom kroppen och skada vid *externbestrålning*. Alfa- och betastrålning orsakar skada om det radioaktiva ämnet kommer in i kroppen, såsom *internbestrålning*. Människor skyddas från gamma- och neutronstrålning genom strålskärmning och/eller att tiden man får befinna sig vid strålkällan begränsas. Alfa- och betastrålande ämnen hindras att tränga in i kroppen.

I strålskyddssammanhang används storheten dosekvivalent med enheten Sievert (Sv). Vid beräkning av dosekvivalenten tas hänsyn till strålslag samt strålningens biologiska skadeverkningar. Myndigheternas gränsvärden för accepterade stråldoser anges i Sv.

Risken förknippad med de radioaktiva ämnena i det använda bränslet beror på ämnets farlighet och hur effektivt djupförvarets barriärer kan hindra ämnet att nå biosfären. Ett mycket farligt ämne som effektivt hålls kvar av barriärerna kan därför utgöra en mindre risk än ett mindre farligt ämne som inte hålls kvar lika bra (se *Tabell 5-2* samt *Figur 5-3,4,5*).

5.1 Det använda kärnbränslet

Kärnbränsle är ett keramiskt material. Keramer är en sammanfattande benämning på oorganiska icke metalliska material. Vid framställning av keramer utgår man från ett, ofta mycket finkornigt, pulver. Partiklarna binds till varandra vid höga temperaturer. Kännetecknande för keramer är att de är hårda och spröda, samt att de tål höga temperaturer och svåra kemiska miljöer. Exempel på keramer i vår vardagsmiljö är glas, porslin, keramik och betong. Natursten är materialtekniskt sett också en keram.

Kärnbränsle tillverkas av urandioxidpulver (UO_2) som pressas till centimeterstora cylindrar, s k *kutsar*. Kutsarna sintras (dvs upphettas, jämför bränning av keramik) och slipas därefter av. Bränslekutsarna innesluts i ca 4 m långa metallrör. Rören tillverkas av en legering av metallen zirkonium, kallad zirkaloy, som valts med hänsyn till de påfrestningar rören utsätts för vid driften i kärnreaktorn. Rören med kutsar kallas bränslestavar. Flera bränslestavar sätts ihop till s k bränsleelement som hanteras som enheter (se *Figur 5-1*).

Urandioxid (UO_2) finns i jordskorpan i form av uranmineralet uraninit. Uran- och syreatomerna i urandioxid sitter bundna till varandra i ett regelbundet mönster, ett s k gitter. Uraninnehållet i det oanvända bränslet utgörs till ca 96,5 % av U-238, ca 3,5 % U-235 och några hundradels procent U-234. Det är U-235 som används som bränsle i en kärnreaktor. Halveringstiderna för uranisotoperna är mycket långa (4,5 miljarder år för U-238, 0,7 miljarder år för U-235 och 246 000 år för U-234). Det betyder att få atomkärnor sönderfaller per sekund, dvs radioaktiviteten är låg och den utsända strålningen begränsad. Oanvänt kärnbränsle kan hanteras utan strålskyddsåtgärder. Vid driften i kärnreaktorn uppkommer radioaktiva ämnen genom:

- fission (kärnklyvning),
- neutroninfångning.

Om en neutron tas upp av en atomkärna kan det leda till att atomen klyvs, s k *kärnklyvning* eller *fission*. U-235 är klyvbar. Fission, kärnklyvning, karakteriseras av att mycket energi frigörs, neutroner som kan fortplanta klyvningen frigörs och radioaktiva ämnen bildas. I ett kärnkraftverk utnyttjas fissionsenergin för att producera el. Fissionen i en kärnreaktor är ett slags självunderhållande kedjereaktion. I reaktorn placeras bränslet omgivet av vatten så att neutronerna som frigörs då U-235-kärnor klyvs ges möjlighet att träffa, och klyva nya U-235 kärnor osv. I en större reaktor klyvs ca 10^{20} U-235-kärnor per sekund.

Fissionen, klyvningen av U-235-kärnor kan ske på ett 30-tal olika sätt. Vid klyvningen bildas således ett 60-tal nya atomkärnor, s k *klyvnings-* eller *fissionsprodukter*. De olika fissionsprodukterna förekommer i olika mängder och har olika egenskaper. Några ämnen har så korta halveringstider att de i stort sett försvinner ögonblickligen då reaktorn stängs av. De flesta av klyvningsprodukterna stannar kvar där de bildats i uransyre-gittret medan några, t ex gasformiga ämnen, frigörs och transporteras genom uran-



Figur 5-2: Till vänster: Kärnbränslekulsar av urandioxid. Bränslekulsarna placeras i rör av zirkaloy, s k bränslestavar. Till höger: Ett bränsleelement för en kokvattenreaktor. 64 bränslestavar sätts ihop till ett bränsleelement. I en kokvattenreaktor finns 440–700 bränsleelement, varje år byts ca en femtedel av elementen. Före driften i reaktorn kan bränslet hanteras utan strålskyddsåtgärder.

dioxiden. Exempel på fissionsprodukter är jod (I-129, I-131), cesium (Cs-134, Cs-135, Cs-137) och strontium (Sr-90).

Vid klyvningen av U-235-kärnorna frigörs 2 eller 3 neutroner. En del av neutronerna kommer att fångas in av U-238, som inte klyvs. Successiva neutroninfångningar ger allt tyngre ämnen, s k *transuraner*. Några exempel på transuraner är neptunium (Np-237), ameritium (Am-241, Am-243) och plutonium (Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242). Plutoniumisotoperna Pu-239 och Pu-241 är också klyvbara och bidrar till energiproduktionen. De tunga ämnena som bildas vid reaktordriften tillhör en grupp av grundämnen i det periodiska systemet som kallas *aktinider*. Uran tillhör också aktiniderna.

En del av de frigjorda neutronerna tas upp av olika material, främst metaller, i bränslelementen. Ämnena kan därigenom bli radioaktiva. Dessa ämnen kallas *aktiveringsprodukter*, några exempel är kobolt (Co-60), nickel (Ni-59, Ni-63), niob (Nb-93, Nb-94) och zirkonium (Zr-93).

Det exakta innehållet av radionuklider i använt kärnbränsle beror av bränsletyp, driftförhållanden och bränslets ålder. För mängden långlivade ämnen är den totala mängd energi som utvunnits ur varje element, den s k *utbränningsgraden* speciellt betydelsefull. För de kortlivade ämnena har den energi som utvinns varje sekund under drift, den s k *specifika effekten* större betydelse. I *Tabell 5-1* redovisas sammansättningen hos oanvänt bränsle samt sammansättningen vid tiden för deponering.

Tabell 5-1: Sammansättning i viktsprocent av uranet hos typiskt svenskt kärnbränsle (typ SVEA 64 med utbränningsgrad 38 MWdygn/kg U) före drift och vid tiden för deponering.

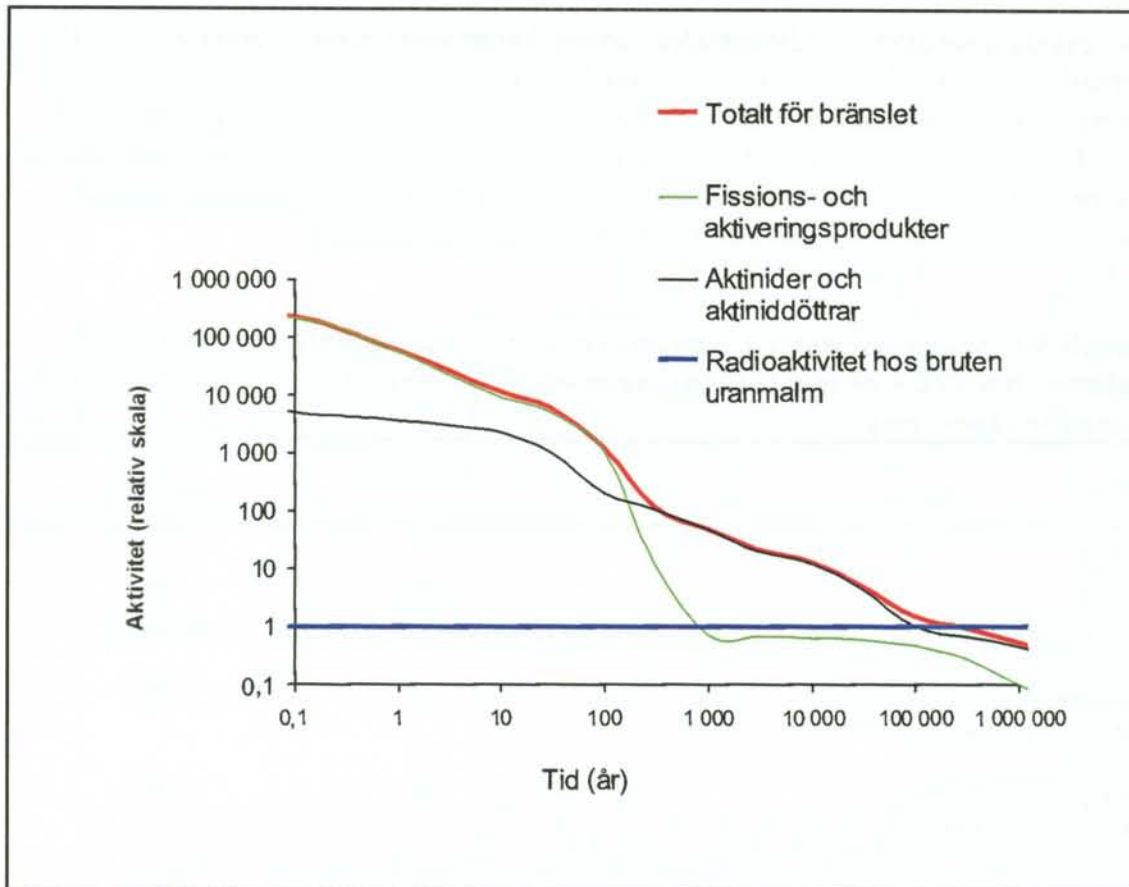
	Oanvänt	40 år gammalt
Uran (varav klyvbart)	100 (3,5 %)	95 (0,7 %)
Radioaktiva fissions- och aktiveringsprodukter	0	0,4
Övriga fissions- och aktiveringsprodukter	0	3,5
Plutonium (varav klyvbart)	0	0,8 (62 %)
Övriga tunga radionuklider	0	0,2

I *Figur 5-3* visas hur aktiviteten för ett typiskt svenskt kärnbränsle förändras med tiden. Bidraget från fissions- och aktiveringsprodukter samt aktinider visas separat. Som jämförelse visas aktiviteten för motsvarande mängd uranmineral. I ett långt tidsperspektiv kommer det använda bränslet alltmer att likna det mineral som ursprungligen bröts för förekommande uranisotoperna U-238 och U-235 och deras dotterprodukter.

Farligheten hos använt kärnbränsle är relaterad till radioaktiviteten, dvs hur många atomkärnor som sönderfaller per sekund. Använt kärnbränsle innehåller radionuklider dvs radioaktiva isotoper av olika ämnen. Radionuklider har ett energiöverskott i atomkärnorna. Atomkärnorna gör sig av med sitt energiöverskott genom radioaktivt sönderfall. Vid sönderfallet skickas energiöverskottet ut i form av strålning. Det är framför allt strålningen som kan vara skadlig (Se Bilaga 1: Radioaktivitet och strålning).

Allteftersom de radioaktiva isotoperna sönderfaller återstår allt färre radioaktiva atomer i bränslet. Därför avtar radioaktiviteten, och därmed farligheten, med tiden.

Ett ämne med kort halveringstid sönderfaller i rask takt och mycket strålning genereras. Som en tumregel kan man säga att ju kortare halveringstid ett radioaktivt ämne har,



Figur 5-3: Radioaktiviteten för typiskt svenskt kärnbränsle (typ SVEA 64 med utbränningsgrad 38 MWdygn/kg U) som funktion av tiden. Som jämförelse visas aktiviteten för motsvarande mängd uranmineral. Aktiviteten domineras av fissionsprodukter de inledande drygt 100 åren, därefter av aktinider. Då bränslet är ca 100 000 år gammalt är dess aktivitet jämförbar med aktiviteten hos den mängd uranmalm som brutits för att tillverka bränslet.

desto farligare är det. Men farligheten bestäms inte enbart av antalet sönderfall utan också av typen av strålning. Dessutom är olika organ är olika känsliga för strålning. Farligheten beror därför också på om det radioaktiva ämnet sönderfaller i eller utanför kroppen, s k *intern-* respektive *externbestrålning*. I använt kärnbränsle förekommer alfa-, beta-, gamma- samt neutronstrålning. Vid alfa-sönderfall utslungas en partikel som består av två neutroner och två protoner. Alfastrålning stoppas av huden och är bara farligt om det sönderfallande ämnet kommer in i kroppen. Då är skadeverkan desto större. Vid betasönderfall slungas en elektriskt laddad partikel ut. Även betastrålning gör störst skada vid internbestrålning. Gamma- och neutronstrålning tränger igenom kroppen och kan orsaka skada även vid externbestrålning. (Se Bilaga 1: Radioaktivitet och strålning)

Vid all hantering av radioaktiva ämnen gäller det att förhindra att någon strålskadas. Det innebär att:

- tiden man får befinna sig i närheten av material som skickar ut gamma- och neutronstrålning måste begränsas och/eller strålningen måste skärmas,
- alfa och beta sönderfallande ämnen ska hindras att komma in i kroppen.

I strålskyddssammanhang är det enklare om man kan presentera gränsvärden utan hänsyn till strålslag. Man har därför infört storheten dosekvivalent som tar hänsyn till strålslagets biologiska farlighet. Enheten för dosekvivalent är Sievert, vilket förkortas Sv.

Den stråldos människor tillåts exponeras för får inte överskrida vissa gränsvärden som bestämts av myndigheterna. För det använda kärnbränslet är den accepterade stråldosen 0,1 millisievert per år. Det är en mycket liten dos. Den kan jämföras med stråldosen från de radioaktiva isotoperna av kol (C-14) och kalium (K-40) som naturligt finns i vår egen kropp. Den årliga dosen från dessa nuklider är för en genomsnittlig svensk 0,2 mSv.

När väl bränslet är taget ur drift kan vi inte påverka ett bränsleelements farlighet. För att undvika att någon skadas begränsas tillgängligheten, gamma- och neutronstrålning skärmas av och människor hindras från att inandas eller förtära alfa- och betasönderfallande nuklider från bränslet. Bränslet kommer att vara radioaktivt i oändlig tid. Efter i storleksordningen 100 000 år kommer radioaktiviteten att motsvara aktiviteten i den uranmalm som en gång bröts för att tillverka det. Då är förhållandena jämförbara med dem som rådde innan malmen bröts och kärnbränsle framställdes och användes. Minst så länge vill vi helst att kopparkapsel och buffert behåller sin funktion.

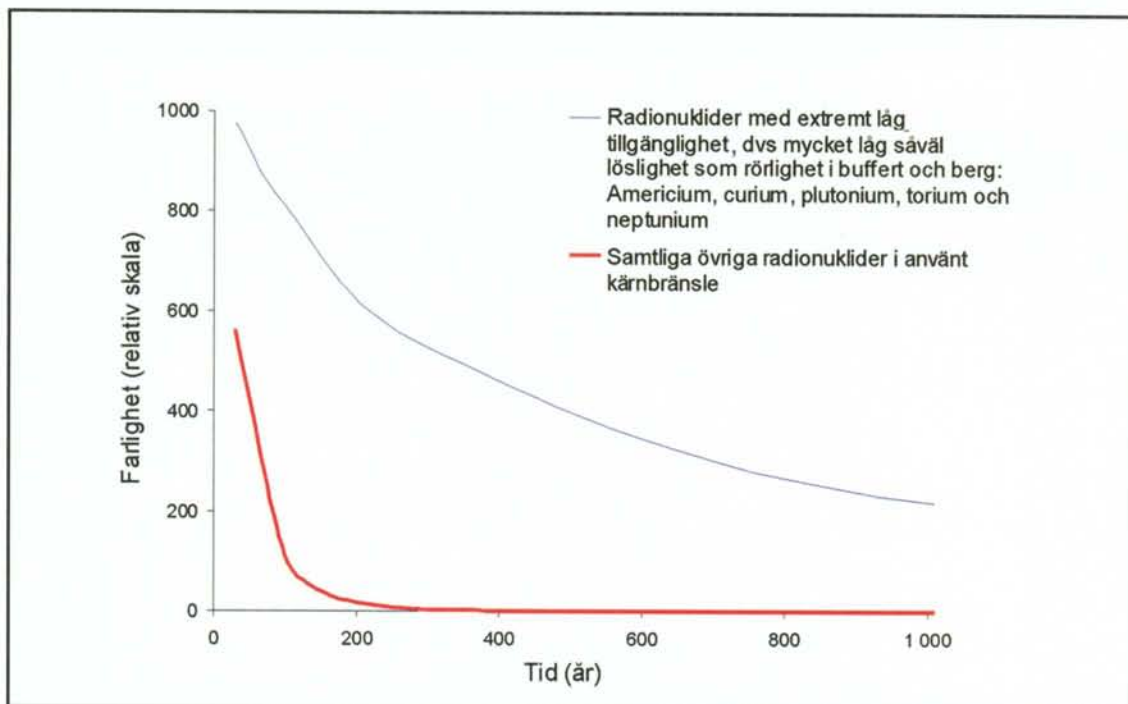
Risken med det använda kärnbränslet är en kombination av dess farlighet och tillgänglighet. Farligheten är beroende av innehållet av radionuklider. Både mängd och vilket ämne det rör sig om har betydelse. Tillgängligheten begränsas av förvarets barriärer. Om och så länge alla kopparkapslar är täta är tillgängligheten och därmed risken obefintlig. I fall av otäta kapslar hindras radionukliderna att nå biosfären och människan genom bränslets löslighetsegenskaper, oskadade delar av kapseln, buffert och berg. Barriärernas förmåga att hålla kvar och fördröja varierar mellan olika ämnen. Ett relativt sett ofarligt ämne som finns i en liten mängd, men som i mindre grad hålls kvar och fördröjs i barriärerna, kan därför utgöra en större risk än ett mycket farligt ämne som effektivt hålls kvar i barriärerna.

Det är således ingen enkel fråga att besvara vad som är den största risken med använt kärnbränsle. Risken förändras ju dessutom i takt med att bränslets aktivitet avklingar. I *Tabell 5-2* redovisas de 10 potentiellt farligaste radionukliderna i 40 år gammalt bränsle, dvs vid det planerade deponeringstillfället. Farligheten avser intag via föda. Två av de farligaste radionukliderna (Sr-90 och Cs-137) är fissionsprodukter och de övriga är aktinider. För att ge en bild av hur effektivt förvarets barriärer förmår att hålla kvar nukliderna anges deras vattenlöslighet samt rörlighet i buffert och berg. Kriterierna för indelning är desamma som i /5-1/. Tiden, tills de vid deponeringen farligaste nukliderna sönderfallit till ca 99 %, redovisas också.

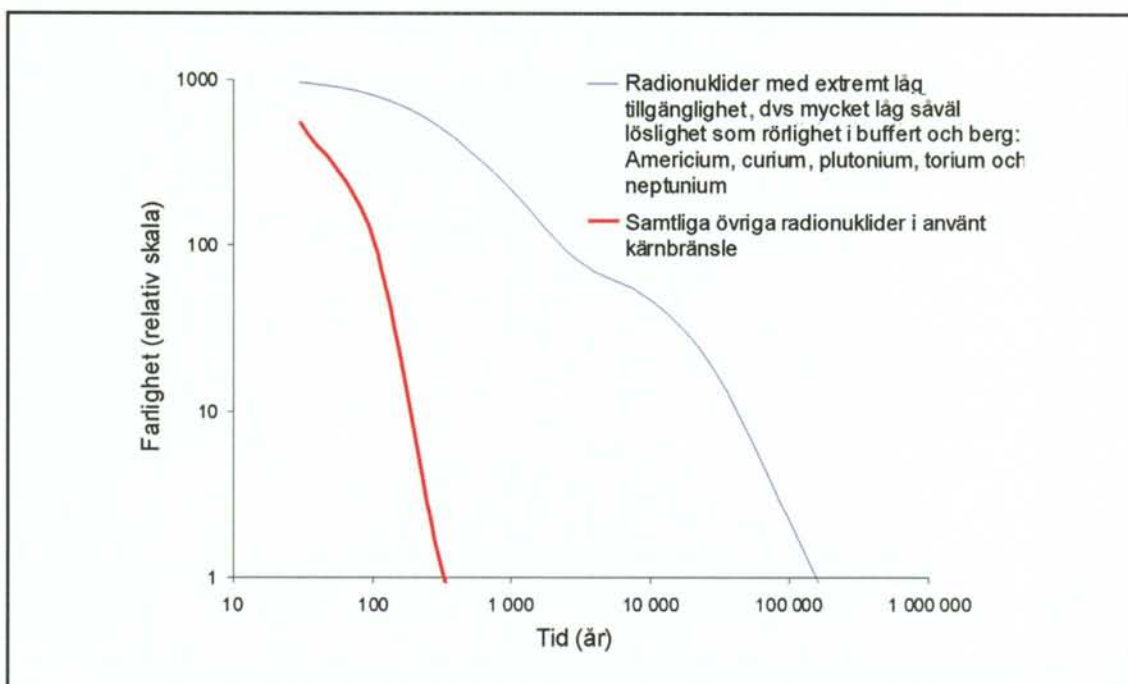
Tabell 5-2: Några data för de 10 farligaste radionukliderna i 40 år gammalt använt kärnbränsle. Två av de farligaste radionukliderna är fissionsprodukter och de övriga är aktinider. Övriga fissions- och aktiveringsprodukters bidrag till farligheten har, liksom de övriga aktinidernas, summerats.

Radionuklid	Andel av vikt [%]	Andel av farlighet [%]	Löslighet i vatten/ Rörlighet i buffert/ Rörlighet i berget	Tid tills ca 99 % sönderfallit [år]
<i>Fissions- och aktiveringspr.</i>				
Strontium-90 (Sr-90)	0,02	17,5	Hög / Hög / Låg	200
Cesium-137 (Cs-137)	0,05	14,1	Hög / Hög / Mycket låg	200
Övriga	3,8	0,03	–	–
<i>Aktinider</i>				
Americium-241 (Am-241)	0,1	36,7	Mycket låg / Mycket låg / Mycket låg	4 900
Plutonium-238 (Pu-238)	0,01	18,4	Mycket låg / Mycket låg / Mycket låg	600
Plutonium-240 (Pu-240)	0,2	4,3	Mycket låg / Mycket låg / Mycket låg	45 000
Curium-244 (Cm-244)	0,001	3,4	Mycket låg / Mycket låg / Mycket låg	100
Plutonium-241 (Pu-241)	0,02	2,9	Mycket låg / Mycket låg / Mycket låg	100
Plutonium-239 (Pu-239)	0,4	2,2	Mycket låg / Mycket låg / Mycket låg	160 000
Americium-243 (Am-243)	0,01	0,3	Mycket låg / Mycket låg / Mycket låg	50 000
Americium-242 (Am-242)	–	0,06	Mycket låg / Mycket låg / Mycket låg	900
Övriga	95,3	0,07	–	–

Radionukliderna i använt kärnbränsle kan delas in i två kategorier /5-1/. I den ena samlas radionuklider med mycket låg löslighet i vatten samt mycket låg rörlighet i buffert och berg. Här hamnar aktiniderna plutonium, americium, curium, torium och neptunium. I den andra gruppen samlas alla övriga radionuklider. I *Figur 5-4* och *Figur 5-5* redovisas hur farligheten för de båda ämnesgrupperna utvecklas med tiden.



Figur 5-4: Radionukliderna i använt kärnbränsle kan delas in i två kategorier: de med extremt låg tillgänglighet (blå linje) samt övriga (röd linje). De med extremt låg tillgänglighet hålls kvar i förvarets barriärer. De dominerar också farligheten. I figuren visas hur farligheten förändras de första 1 000 åren efter deponering. Farligheten avser intag via föda och anges relativt den mängd naturligt uran som använts för att tillverka bränslet.



Figur 5-5: Figuren illustrerar samma sak som Figur 5-4 men med logaritmiska skalor för att ett längre tidsperspektiv ska kunna överblickas.

6 Biosfären

Sammanfattning – Biosfären



BIOSFÄREN

Genom att välja en plats med gynnsamma förhållanden kan stråldosen begränsas.

Utspärningsförhållanden, recipienters förmåga att buffra, lagra eller ackumulera radionuklider samt mark- och vattenanvändning påverkar dosen till människor.

Överföring av radionuklider till människor via recipienter för djupt grundvatten och lokala ekosystem.

Figur 6-1: Biosfären.

Biosfären är den del av jorden där det förekommer biologiskt liv. Det använda kärnbränslet ska hållas isolerat från biosfären. Vid ett eventuellt läckage av radionuklider är konsekvenserna för människa och miljö beroende av radionukliden, recipienten, hur radionukliden transporteras och ansamlas i ekosystemen, samt hur människan genom sin markanvändning utnyttjar platsen (se *Figur 6-2*). Variationer i biosfären innebär att den stråldos människor kan utsättas för vid ett visst utsläpp kan variera många tusentals gånger.

Biosfärens utveckling

Förändringarna i biosfären är stora och snabba i relation till förändringarna i djupförvaret. Klimat, landhöjning, markanvändning och distribution av livsmedel är några faktorer som påverkar biosfären. Även om platsens geografiska läge kan säga oss något om tänkbar utveckling och samhällsbildning finns många osäkerheter. Mer detaljerade beskrivningar kan möjligtvis göras i ett 100-årsperspektiv.

På sikt kommer klimatets övergång mot kallare förhållanden med permafrost och inlandsis över Sverige att bestämma förhållandena i biosfären. Utifrån existerande miljöer från andra platser på jorden, och fynd från det förgångna kan framtida biosfärer skisseras. På grund av de stora variationsmöjligheter och osäkerheter som är involverade i biosfärsbeskrivningarna används ofta förenklade, stiliserade biosfärsbeskrivningar i säkerhetsanalyser.

6.1 Biosfären vid ett djupförvar

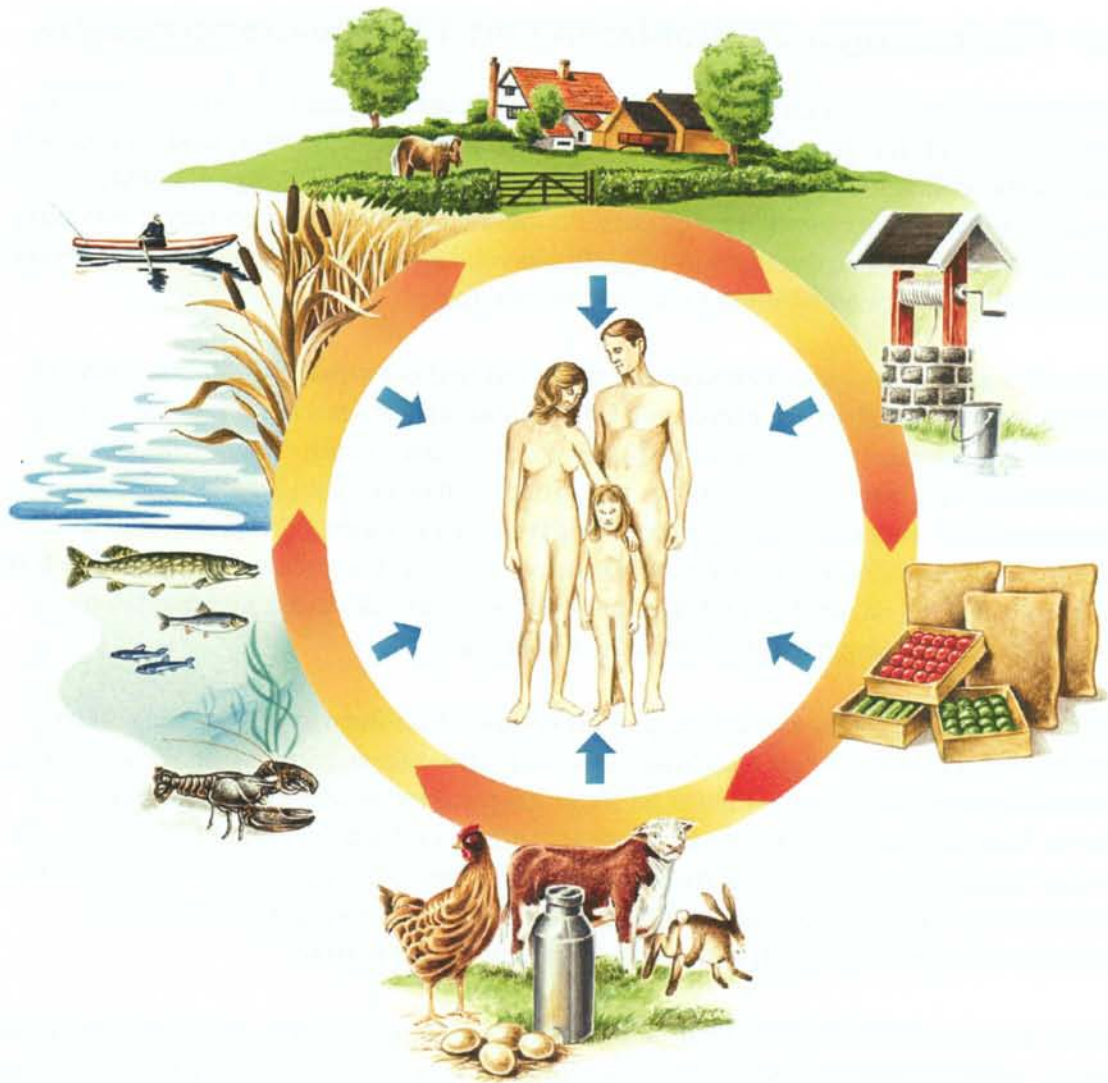
Människa och miljö ska inte komma till skada på grund av det använda kärnbränslet; man säger att bränslet ska hållas isolerat från biosfären. Biosfären är den del av jorden där det förekommer biologiskt liv. I analyser av djupförvarets växelverkan med biosfären studeras ekologiska, biologiska, termiska, hydrologiska, kemiska och mekaniska förhållanden som råder på ytan av djupförvaret.

Konsekvenserna för människa och miljö vid ett eventuellt utsläpp är beroende av var i biosfären radionukliderna hamnar. Man talar om olika typer av *recipienter*. Exempel på *recipienter* är sediment, torvmosse, jord, vattendrag, sjö, hav och brunn. Recipienten kan på olika sätt bidra till att hålla kvar och fördröja samt späda ut och fördela radionukliderna i tid och rum. Konsekvenserna av ett utsläpp beror förutom på recipienten även på vilken radionuklid det handlar om och det ekologiska system recipienten är en del av.

Radionukliderna kan transporteras runt i ekosystemen på olika sätt. En radionuklid som t ex hamnar i ett jordlager kan beroende på nuklidens och jordens egenskaper bilda någon slags förening som kan tas upp av mikroorganismer, föras vidare till någon växt som finns på platsen och senare till något djur eller kanske tillbaka till jordlagret. Beroende på var i systemet en radioaktiv nuklid befinner sig kan människor exponeras för dess strålning. Exponeringen kan vara yttre genom att man vistas på en förorenad markyta. Den kan ske via inandning om nukliden är i gasform eller förts upp i luften via damm, eller via intag med föda. Exponeringen sker då genom att man dricker vatten eller mjölk eller äter växter, fisk, ägg eller kött som innehåller radionuklider. Det kan också tänkas att någon äter förorenad jord, kanske framför allt barn men även vuxna som smakar på osköljda bär eller grönsaker. Den stråldos en människa slutligen får beror både på hur exponeringen sker och på hur radionukliden transporterats fram till exponeringsplatsen.

Konsekvenserna vid ett utsläpp beror således på radionukliden, recipienten, transport- och exponeringsvägarna. Dessa i sin tur beror på platsens naturliga förutsättningar och klimat och hur människan genom sin markanvändning, bevattning, vattendistribution, konsumtion av livsmedel m m utnyttjar platsen. I *Figur 6-2* visas schematiskt hur radionukliderna transporteras runt i ekosystemen och hur människan kan exponeras för dem. Figuren illustrerar en tänkt biosfär i en jordbruksbygd med självförsörjande lantbrukare. Recipienter för radionuklidutsläppet är en sjö och en brunn.

Variationer i biosfären innebär att den stråldos en människa utsätts för vid ett visst utsläpp av radionuklider kan variera många tusentals gånger. Om utsläppet sker i en brunn för dricksvatten, hushållsvatten och bevattning i ett självförsörjande jordbruk blir utspädningen liten och sannolikheten för exponering stor. Om utsläppet sker i havet blir utspädningen i allmänhet större och sannolikheten att människor exponeras mindre. En recipient som ger låg potentiell stråldos till människa anses vara gynnsam.



Figur 6-2: Biosfär med självförsörjande lantbrukare som lever invid en sjö. Lantbrukarna har egen brunn. Ett utsläpp av radionuklider har skett, en del av utsläppet hamnar i brunnen och resten i sjön. Nukliderna kan transporteras runt i ekosystemen, från vatten – till mark – till växt – till djur – till mark – till vatten – osv. Människor kan exponeras via intag med föda, inandning och extern bestrålning. Den dominerande exponeringsvägen är via födan; de radioaktiva ämnena kan finnas i vatten, vegetabilier och olika animaliska produkter.

6.2 Förändringar av biosfären i ett 100 000-årsperspektiv

Recipienter, transport- och exponeringsvägar är viktiga att känna någorlunda väl för biosfären vid ett förvarssystem. De påverkas av förändringar i klimat, landhöjning och hur samhället fungerar med avseende på markanvändning, bevattning, distribution av livsmedel och vatten m m. Under de första hundratals åren efter att ett förvar förslutits kan dessa förhållanden överblickas någorlunda väl. I ett längre tidsperspektiv är förändringarna allt svårare att förutsäga med någon exakthet.

Förvarets geografiska läge kan säga oss något om tänkbar samhällsbildning. Tillsammans med förutsägelser om klimat och landhöjning kan det ge en uppfattning om hur marken kan komma att användas för människornas vatten och livsmedelsförsörjning. Flera osäkerheter finns dock, t ex kan nya grödor och odlingsätt införas och konsumtionsvanor kan ändras. En viktig exponeringsväg, dricksvatten, påverkas enbart av radionuklidkoncentrationen i vattnet, vilken i och för sig kan variera mycket – t ex från en liten brunn till en sjö. Förändringarna i biosfären kan vara svåra att beskriva med någon exakthet i tidsperspektiv längre än 100-tals år.

Klimatet på jorden styrs av den energi som kommer hit i form av solstrålning. Med tiden går jorden mot ett kallare klimat. Det finns ett starkt empiriskt stöd för att klimatförändringar på jorden ytterst beror på förändringar i den infallande solstrålningen. Dessa förutsägbara förändringar beror på att jordens omloppsbanan runt solen och jordaxelns lutning cykliskt varierar med tiden så att kallare perioder följs av varmare. Vilka konsekvenser den ändrade solinstrålningen får för jordens klimat bestäms av ett komplext samspel mellan atmosfär, hav, kontinenter och biosfär.

Under de senaste 800 000 åren har de kalla perioderna, *glacialerna*, som är längre än de varma, *interglacialerna*, medfört att Skandinavien täckts av is och permafrost under ca 85 % av tiden. Isen har under vissa perioder nått ända ned till Polen och norra Tyskland. Under den kommande 100 000-årsperioden förväntas den nuvarande interglacialen att avbrytas av en ny glacial med permafrost och inlandsis över stora delar av Sverige (se *Figur 3-1*). En utförligare redovisning av klimatvariationerna ges i /6-1/.

Med utgångspunkt från idag existerande miljöer och fynd från det förgångna kan vi skissa framtida biosfärer. Under glacialens kallaste perioder då istäcket brer ut sig ned över norra Europa kommer förhållandena i Sverige att vara ungefär som vid polerna idag. Däggdjur och fåglar kan inte leva i Sverige under dessa perioder, och människor måste, om de bor kvar, liksom dagens polarforskare försörjas utifrån. Vid iskanten och när permafrost råder kan förhållandena likna dem på Grönland, i nordligaste Norge och Kanada eller Sibirien idag. Människor, däggdjur och fåglar kan finna sitt uppehälle. I landets södra delar kan kortare perioder med varmare klimat medföra att förhållandena tidvis tillåter odling. Idag är motsvarande miljöer glest befolkade.

Den närmaste 100 000-årsperioden förväntas domineras av en glacial med is och permafrost över Sverige. Nästa interglacial, med klimat liknande dagens, förväntas komma

om ca 120 000 år. Då har det använda bränslets radioaktivitet avklingat till nivåer motsvarande uranmalms. Utifrån fynd från det förgångna kan vi i grova drag beskriva kustlinje, växt- och djurrike för denna period. Det är dock svårt att i detalj uttala sig om hur de högre stående landdjuren kommer att se ut. Vid den förra interglacialen, Eem, existerade inte vår art. Man har gjort fynd av mammutar från Eem, men spår av människa finns endast från den nuvarande interglacialen.

Biosfären inkluderar flera komplexa delar. Många faktorer påverkar den stråldos människor kan exponeras för vid ett utsläpp av radionuklider. Osäkerheterna och variationsmöjligheterna är många. I säkerhetsanalyser används därför ofta förenklade, stiliserade beskrivningar av biosfären. De är avsedda att ge en illustration av tänkbara konsekvenser och grundar sig ofta på ogynnsamma förhållanden. Ett exempel är biosfären med de självförsörjande bönderna som visas i *Figur 6-2*.

7 BERGET

Sammanfattning – Berget



BERGET

Isolering:

- håller avfallet avskilt från människor
- ger de tekniska barriärerna en stabil miljö

Hålla kvar och fördröja:

- långsamt vattenflöde och därmed långa transporttider
- håller kvar radionuklider genom att fungera som filter och buffert

Figur 7-1: Berget.

Berget – massiva bergblock omgivna av sprickor

Bergarterna i Sveriges urberg är 900–3 000 miljoner år gamla. Berget förändras mycket långsamt och på förvarsdjup kan miljön sägas vara stabil i 100 000-tals år. Urberget är ett hårt och sprött material. Under årmiljonernas gång har det utsatts för stora påfrestningar. Mönstret av bergarter, krosszoner och spricksystemen i berget har uppstått som en följd av dessa påfrestningar. Urberget består av massiva delar och ett spricksystem. Spricksystemet är viktigt för bergets mekaniska och hydrologiska egenskaper. Bergets kemiska egenskaper beror av grundvattenkemin och mineralogin.

Grundvattnet i berget

Mellan kristallerna i bergets massiva delar finns mikroskopiska hålrum, s k *mikroporer*. I mikroporerna och spricksystemen finns grundvatten. Huvuddelen av grundvattenrörelserna sker i spricksystemen, medan mikroporerna magasineras största delen av den vattenvolym som ryms i berget. Sprickorna har olika egenskaper som riktning, läge och vidd. I stora delar av en spricka pressas bergytorna mot varandra och där mellanrum finns kan vatten röra sig (se *Figur 7-2*).

Hur stort grundvattenflödet blir bestäms av bergets vattengenomsläpplighet, vattnets densitet och viskositet samt tillgängliga drivkrafter. Vattengenomsläppligheten avtar oftast med djupet, eftersom både antalet sprickor och sprickvidden minskar på större djup. Vattnets salthalt ökar med ökande djup; även det bidrar till att begränsa vattnets rörlighet. Drivkraften för grundvattenflöde kan vara skillnader i tryck, salthalt eller temperatur. Tryckskillnader är den dominerande drivkraften.

I Sverige gör den relativt rikliga nederbörden och berggrundens låga vattengenomsläpplighet att grundvattenytan i stort sett följer topografin. Nära markytan är höjdskillnaderna i grundvattenyta och skillnaderna i tryck ungefär lika stora, drivkraften för grundvattenflöde, den s k hydrauliska gradienten, följer i stort sett topografin. Den hydrauliska gradienten avtar med ökande djup (se *Figur 7-3*).

Kemiska förhållanden i berget

När man pratar om kemisk miljö i berget är det i första hand grundvattenkemin man är intresserad av. Några viktiga komponenter i grundvattnet är: löst syre, salthalt, och organiskt material.

Grundvattnet vid ytan är infiltrerat nederbördsvatten. Det ytliga grundvattnet blandas med djupare, som kan vara mycket gammalt. Grundvattenkemin är starkt kopplad till hydrogeologin. På stora djup i kristallint berg finner man alltid salt vatten. Nära ytan finns sött vatten. Mängden löst syre avtar med djupet. På förvarsdjup är förhållandena reducerande. Det innebär att vattnet är fritt från löst syre och buffrat med ämnen som reagerar med syre. Reducerande förhållanden önskas bland annat för att kapselns kopparhölje inte ska korrodera.

Bergets funktion

Isolera

Berget bidrar till isoleringen av avfallet genom att:

- göra det använda bränslet otillgängligt för människor,
- ge kapseln och bufferten en stabil miljö.

Djupförvaret byggs på stort djup i vanligt förekommande berg utan potentiellt värdefulla naturresurser. Detta för att undvika att människor bygger eller borrar i närheten av förvaret och på så sätt ofrivilligt kommer i kontakt med bränslet eller skadar barriärerna.

Bergets viktigaste bidrag till isoleringen är indirekt, nämligen att ge kapseln och bufferten en stabil miljö såväl kemiskt som mekaniskt. Med stabil miljö menas i detta fall att de kemiska och mekaniska förändringarna inte ska vara så stora att de tekniska barriärernas funktion hotas. Förändringarna ska dessutom vara förutsägbara i ett tidsperspektiv på 100 000-tals år.

Djupförvarets tunnlar och deponeringshål placeras in i berget med hänsyn till spricksystemet. Mekaniska belastningar på berget tas i första hand upp som rörelser längs befintliga sprickor. De större sprickzonerna fungerar som ett slags stötdämpare. Genom att placera deponeringshålen med respektavstånd från större sprickor erhålls en mekaniskt stabil miljö.

Berget ska erbjuda en kemiskt stabil miljö med reducerande förhållanden och en grundvattenkemi som i övrigt ger försumbar påverkan på buffert och kapsel. Vattnet ska vara fritt från löst syre och vara neutralt, dvs ha ett pH-värde på ca 7. Salthalten får inte vara extremt hög eller låg.

Berget ger en kemiskt stabil miljö genom att löst syre förbrukas nära ytan, dels genom reaktioner med organiskt material, dels genom reaktioner med bergets mineral, främst järnmineral. På förvarsdjup finner man i allmänhet gynnsamma grundvattenkemiska förhållanden.

Hålla kvar och fördröja samt späda ut och fördela i tid och rum

Om isoleringen bryts ska berget fördröja och sprida utläckande radionuklider genom att:

- hålla kvar radionukliderna genom *retentionsprocesser* av olika slag,
- fördela i tid och rum genom olika transportvägar med olika transporttider.

Man kan säga att bergets förmåga att fördröja och sprida har en fysikalisk och en kemisk del. Den fysikaliska delen har att göra med grundvattnets rörelser och den kemiska med bergets, grundvattnets och radionuklidernas kemiska egenskaper.

Grundvattnet rör sig i bergets spricksystem. Radionuklider som är lösta i vattnet kan följa med grundvattnets rörelser, det kallas *advektion*. Vattnets flödes hastighet varierar både mellan sprickor och inom en spricka. Där sprickor korsar varandra kan vattnet blandas. På så sätt sprids lösta ämnen i bergvolymen, ett fenomen som kallas *dispersion*. Genom sina ständiga slumpvisa rörelser transporteras ämnen som är lösta i en vätska från områden med höga koncentrationer till områden med låga. Fenomenet kallas *diffusion*. Genom diffusion kan lösta ämnen transporteras in i det massiva bergets mikroporer (se *Figur 7-5*).

All transport av radionuklider genom berget påverkas av advektion, dispersion och diffusion. Så gott som samtliga radionuklider påverkas även av sorptionsprocesser av olika slag. *Sorption* är ett samlingsnamn på processer då lösta ämnen fäster på en fast fas.

Den advektiva transporten begränsas av det långsamma vattenflödet och den låga vattenomsättningen. Lösta radionuklider sprids i bergvolymen genom dispersion. Det långsamma vattenflödet och kontakten med sprickytorna ger radionukliderna möjligheter att diffundera i det massiva bergets mikroporer. Radionuklider sorberar på sprickyor, sprickmineral och inne i mikroporerna.

Bergets förväntade utveckling

De krafter som påverkar berget i ett 100 000-årsperspektiv visas i *Figur 7-6*. Förändringarna på förvarsdjup förväntas inte hota buffertens och kapselns funktion.

Berget påverkas även av själva byggandet av förvaret. I en zon runt tunnlar, schakt och deponeringshål ökar vattengenomsläppligheten. För att undvika att vattenförande passager uppstår längs tunnlarna pluggas de med bentonitblock där de korsas av vattenförande sprickzoner och sprickzonerna tätas. Berget kommer också att påverkas lokalt på grund av av den värme det använda bränslet avger. Förändringarna är lokala och påverkar inte buffertens och kapselns funktion.

Kommande klimatförändringar är kopplade till förutsägbara förändringar av solinstrålningen. De kommande 100 000 åren väntas en kallperiod med permafrost och inlandsis över Sverige. Permafrost, inlandsis och kustlinjeförskjutningar i samband med ändringar av havsnivån och landhöjning/sänkning ger termiska och mekaniska påfrestningar på berget samt påverkar grundvattenflöde och grundvattenkemi. På förvarsdjup förväntas inte förändringarna bli så stora att buffertens eller kapselns funktion hotas.

7.1 Berget – massiva bergblock omgivna av sprickor

Sveriges urberg är mycket gammalt och en del av den Baltiska skölden. Bergarterna det består av bildades för 900–3 000 miljoner år sedan /7-9/. Urberget består av *vulkaniska* och *sedimentära* bergarter som under höga tryck och temperaturer omvandlats till *kristallint berg* (se Bilaga 2) /7-10/. Områden med kristallint urberg täcker ca 75 % av Sveriges yta. Urberget förändras mycket långsamt, så långsamt att miljön på förvarsdjup kan sägas vara stabil i ett 100 000-årsperspektiv.

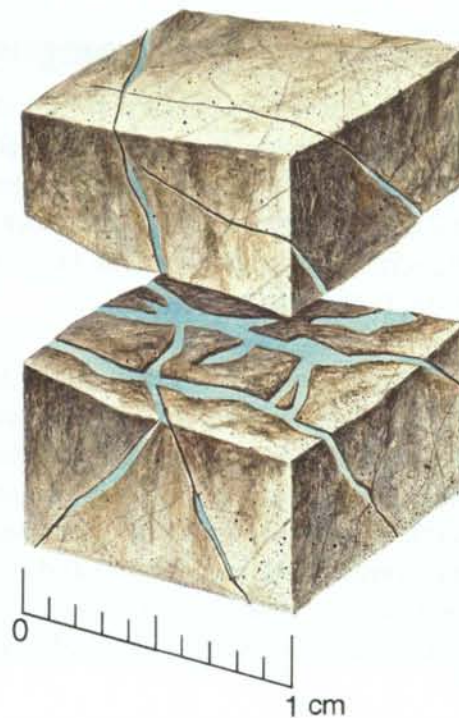
Urberget är ett hårt och sprött material. Det är uppbyggt av kristaller. Kännetecknande för sådana material är att de har hög tryckhållfasthet och liten draghållfasthet. När de går sönder spricker de. Sprickorna utvecklas längs kristallernas ytor. Om kraften som håller ihop två kristaller är mindre än kraften som vill dra isär dem uppstår en spricka. Sprickan uppstår där de sammanhållande krafterna är som minst. Om man belastar ett redan uppsprucket material kommer delarna i första hand att röra sig längs den redan utvecklade sprickan. Utvecklade sprickor ger materialet en viss seghet eller elasticitet. Tack vare sprickorna kan materialet röra sig fram och tillbaka då det belastas utan att spricka sönder mera.

Omvandlingen av de ursprungliga bergarterna till kristallint berg har givit urberget dess spröda materialstruktur. Efter det att urberget bildats har det utsatts för påfrestningar både i vertikal- och horisontalled. Den del av jordskorpan Sverige tillhör har rört sig och kolliderat med andra delar. Bergskedjor har veckats. Berget har trycks ned av avlagrade sediment. Bergets yta har utsatts för vittring och erosion. Istider har passerat. Mönstret av bergarter, krosszoner och spricksystemen i dem har uppstått som en följd av dessa påfrestningar. Spricksystemets utseende beror både på belastningarna och bergartens egenskaper. (Se Bilaga 2: Bergarter och tektonik)

Den massiva berggrunden är således genomkorsad av sprickor och krossade partier. I sprickorna finns grundvatten. På stora djup kan vattnet vara mycket gammalt, kanske instängt redan då bergarten bildades. I sprickorna tränger också vatten ned från ytan och bildar grundvatten. Grundvattnet kan röra sig i bergets spricksystem. För bergets mekaniska egenskaper och förmåga att släppa igenom vatten är spricksystemet mycket viktigt. De kemiska egenskaperna beror främst på grundvattnet och det massiva bergmaterialets mineralogi och struktur. Bergets termiska egenskaper beror huvudsakligen av mineralogin. De termiska, hydrologiska, mekaniska och kemiska egenskaperna är kopplade till varandra.

7.2 Grundvattnet i berget

Urberget består av massiva delar och ett spricksystem. Det är i sprickorna huvuddelen av grundvattenrörelserna sker. Det massiva berget brukar kallas *bergmatrisen*. Mellan och genom mineralkristallerna i bergmatrisen finns hålrum, s k *mikroporer*, dit vattnet kan nå. Vattenrörelserna i mikroporerna är så små att bergmatrisen kan anses vara tät då man betraktar vattenflödet i en bergvolym. Av den mängd vatten som finns i en berg-



Figur 7-2: Schematisk skiss över en 1 x 1 cm stor del av en spricka i kristallint berg. I stora delar av sprickan pressas bergytorna mot varandra. I vissa partier finns mellanrum som är fyllda med vatten. Om de vattenfyllda partierna står i förbindelse med varandra kan vattnet röra sig i dem.

volym återfinns dock en stor del i mikroporerna. Sprickorna står således för flödet och porerna för det mesta av den vattenvolym som finns magasinerad i berget (7-1).

Sprickorna har, på grund av hur de bildats, olika egenskaper som riktning, läge, längd och vidd. En spricka är utrymmet mellan två skrovliga bergytor. I vissa delar av sprickan pressas bergytorna mot varandra i andra delar finns det mellanrum med olika vidd. Om mellanrummen står i förbindelse med varandra bildas flödesvägar för vattnet. Mellanrummen kan också bilda slutna utrymmen eller återvändsgränder. Delar av sprickan kan vara fylld av mineral, s k sprickmineral, som bildats vid reaktioner mellan vattnet och berget. En spricka kan vara mer eller mindre fylld med sprickmineral. Vattnets möjligheter att röra sig i en spricka varierar således längs sprickan. I Figur 7-2 visas en schematisk skiss över en 1 x 1 cm stor del av en spricka.

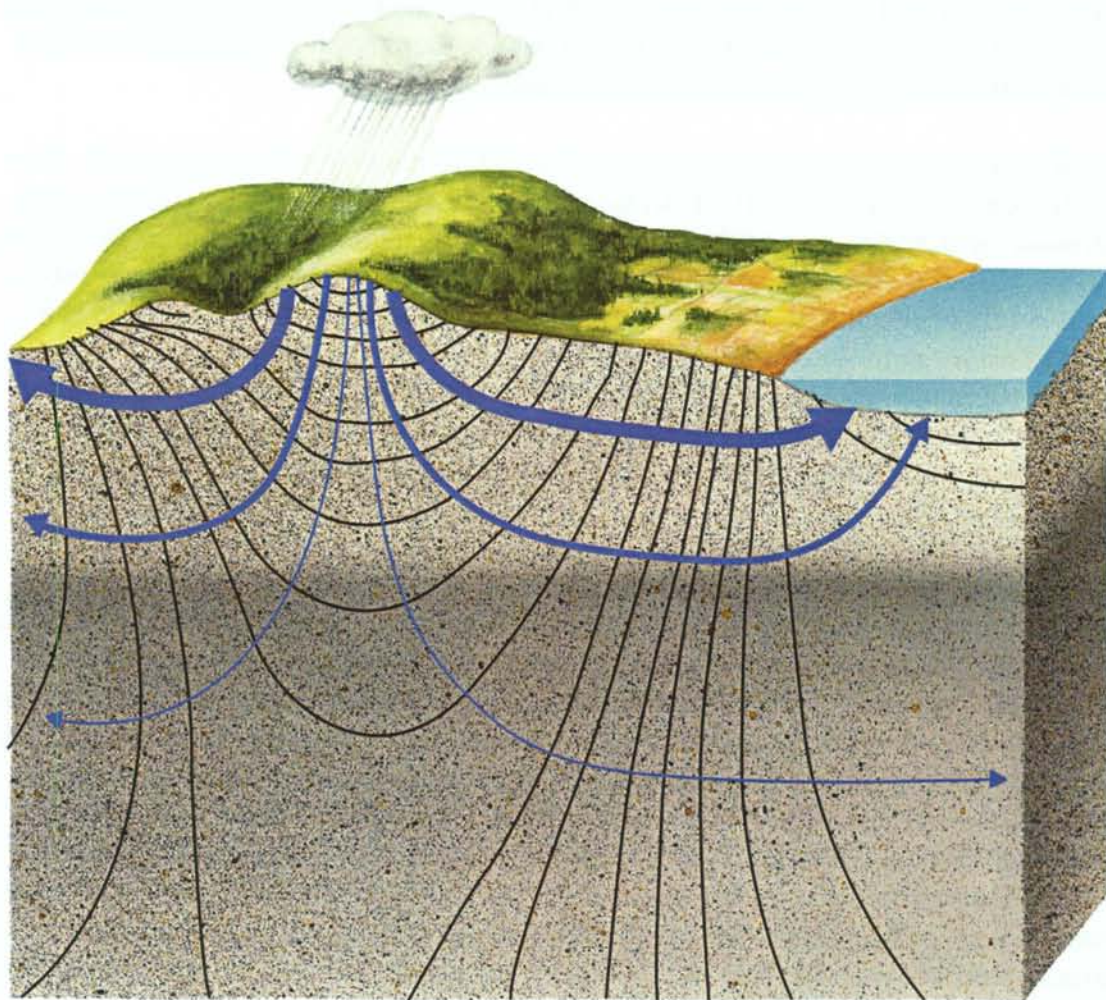
För att beskriva flödet av vätskor i berg, och även andra material, måste genomsläppligheten, *permeabiliteten* beskrivas på något sätt. Även vätskans egenskaper måste beskrivas. Viktiga egenskaper hos vätskan är *densitet* och *dynamisk viskositet*. Hur stort flödet blir beror både på materialet och vätskan. För att beskriva grundvattenflöde i berg används ofta begreppet *hydraulisk konduktivitet*. Den hydrauliska konduktiviteten är ett sammanslaget mått på vattnets densitet och dynamiska viskositet och bergets permeabilitet. Konduktiviteten har enheten m/s eller $\text{m}^3/\text{m}^2 \times \text{s}$ och anger hur stor volym vatten som per tidsenhet kan passera en tvärsnittsytta genom berget.



Bergets förmåga att släppa igenom vatten avtar oftast med djupet. Det beror på att både antalet sprickor och sprickvidden avtar med ökande djup. Även vattnets salthalt bidrar till att vattnets möjligheter att röra sig avtar med djupet.

För att vattnet ska röra sig behöver det inte bara utrymme utan också en drivkraft. Drivkraften kan vara skillnader i tryck, temperatur och salthalt. Olika temperatur och olika kemiska förhållanden, t ex salthalt, leder till att vattnet får olika densitet eller täthet. Vatten med högre densitet sjunker på grund av tyngdkraften i förhållande till vatten med lägre densitet och ger därmed en drivkraft för grundvattenrörelser. Den dominerande drivkraften för grundvattenflöde är dock tryckskillnader. Tryckskillnaderna brukar anges per längdenhet i strömningsriktningen och kallas den hydrauliska gradienten. Vattnet rinner från områden med högre tryck till områden med lägre tryck. Hur stora tryckskillnaderna blir beror på bergets genomsläpplighet, vattnets egenskaper och grundvattenbildningen.

I Sverige gör den relativt rikliga nederbörden och berggrundens låga vattengenomsläpplighet att grundvattenytan i stort sett följer topografin. Man kan tänka sig att vatten hålls på berggrunden. När alla tillgängliga hålrum är fyllda står vattenytan nära markytan. Fylls ytterligare vatten på sker en utströmning och en avrinning i form av ytvatten. Nära markytan är höjdskillnaderna i grundvattenyta och skillnaderna i tryck ungefär lika stora, och den hydrauliska gradienten följer i stort sett topografin. Den hydrauliska gradienten avtar med djupet. På 500 meters djup är den i storleksordningen några procent av gradienten vid ytan. I *Figur 7-3* visas tryckskillnader och grundvattenflöde för ett parti med kristallint berg. Tillsammans gör minskningen i bergets genomsläpplighet, vattnets ändrade egenskaper och minskningen av den hydrauliska gradienten att grundvattenflödet vid ytan kan vara 1 000–10 000 gånger större än på 500 meters djup /7-2/.

Flödet på grund av tryckskillnader kan, enligt Darcy's lag, beräknas som den hydrauliska konduktiviteten gånger den hydrauliska gradienten. Liksom den hydrauliska konduktiviteten anges grundvattenflödet som volym vatten som per tidsenhet kan passera en tvärsnittsytta, och får enheten $\text{m}^3/\text{m}^2 \times \text{s}$ eller m/s . Enheten indikerar att det som avses är flödets hastighet. I själva verket består den största delen av tvärsnittsarean av tät bergmatris och flödet sker endast i vissa delar av sprickorna. Strömningshastigheten varierar både inom de enskilda sprickorna och mellan olika sprickor. Grundvattenflödet beräknat med hjälp av den hydrauliska konduktiviteten brukar kallas Darcy-flödet. Darcy-flödet kan ses som ett slags medelflöde. Det finns olika angreppssätt för att beräkna grundvattenflödet i berg. De tar på olika sätt hänsyn till bergets inhomogenitet. Några metoder som SKB använder beskrivs i /7-3/.



 Grundvattenflöde
 Tryck – ekvipotential

Figur 7-3: Typiska tryckskillnader och därav följande flöden för ett parti med kristallint berg någonstans i Sverige. De svartfärgade linjerna är linjer med lika stort grundvattentryck, s k ekvipotentialer, och de blå markerar grundvattenflöde. Grundvattenflödet är störst närmast ytan. Bergets vattengenomsläpplighet avtar med ökande djup. På djup ned till ca 200 m avtar vattengenomsläpplighet snabbare än på större djup. Vattnets salthalt ökar med djupet, även det bidrar till att minska vattnets rörlighet. Gråtonen visar förändringen i hydraulisk konduktivitet med djupet, ju mörkare desto mindre konduktivitet.

7.3 Kemiska förhållanden i berget

När man pratar om kemisk miljö i berget är det i första hand grundvattenkemin man är intresserad av. Några viktiga komponenter i grundvattnet är; löst syre, salthalt, lösta fasta ämnen och gaser, bakterier och organiskt material (se *Tabell 7-1*). Grundvattnets sammansättning beror på vattnets ursprung, bergartens kemiska egenskaper och hur vattnet rört sig och blandats i berget. Ytligt grundvatten kan, beroende på lokala förhållanden, sägas finnas ned till ca 100–200 meters djup. Det ytliga grundvattnets sammansättning kan beskrivas med formeln:

Nederbördsvatten + Luft + Organiskt material + Mineral i jord och berg →

Ytligt grundvatten

Ytligt grundvatten som finns under landområden kommer för det mesta från nederbörd av olika slag som regn, snö och smältvatten. Det ytliga grundvattnet blandas med det djupare, en process som till följd av den avtagande vattenomsättningen går allt långsammare med ökande djup.

Nederbördsvattnet består av nästan rent vatten och luft som lösts i vattnet. Grundvattnet däremot innehåller mera lösta ämnen och salter, organiskt material och med djupet allt mindre löst syre. Att grundvattnets sammansättning skiljer sig från nederbördsvattnets beror huvudsakligen på följande processer:

- Biologiska och kemiska processer då vattnet infiltreras genom jordlager och sediment på ytan.
- Biologiska processer på grund av det organiska material som tillförts grundvattnet under infiltrationen.
- Reaktionen med bergets mineral vid kontaktytan mellan grundvatten och berg.
- Reaktionen med mineral i sprickor och det massiva bergets porer.
- Upplösning och utfällning av mineral.
- Blandning av vatten med olika ursprung.

De kemiska förhållandena i berget är således starkt kopplade till hydrogeologin. Söker man sig till större djup i kristallint berg skiljer sig grundvattnets sammansättning endast lite från plats till plats. Det beror på den långsamma vattenomsättningen och bergets kemiska egenskaper. Följande mönster återupprepas i stort sett överallt; nära ytan finns sött vatten och på större djup finns alltid salt vatten. Mängden löst syre i vattnet avtar snabbt med djupet, det beror på att syret konsumeras i de biologiska processerna nära ytan eller vid reaktioner med bergets mineral.

Vatten som innehåller löst syre är *oxiderande*. Vatten som inte innehåller löst syre är *anoxiskt*. I berget råder *reducerande* förhållanden. Utöver att vattnet då är fritt från löst syre är det buffrat med ämnen som reagerar med löst syre t ex järn (Fe^{2+}) och sulfid (HS^-). Ett viktigt mått på vattnets redoxförhållanden är det s k Eh-värdet. Det visar vattnets *redoxpotential*, dvs förmågan att reducera löst syre. Syre som annars skulle kunna reagera med t ex kapselns kopparhölje. På stora djup är Eh-värdet lågt, man säger att *reducerande* förhållanden råder.

Djupet till salt vatten beror på lokala förhållanden och varierar både mellan platser och inom en plats. Vid kusten går gränsen mellan sött och salt vatten ofta närmare markytan än i inlandet. Undersökningar av grundvattenkemi har utförts av SKB bland annat vid Äspölaboratoriet och Finnsjön. Vid Äspö går gränsen mellan sött och salt vatten vid 100–200 meters djup och vid Finnsjön vid 200–400 meter. Det söta vattnet kommer från regn och snö. Salt vatten finns där *stagnanta* förhållanden råder eller antas ha rått. Vattnet är salt antingen på grund av långa uppehållstider så det hunnit reagera med bergets mineral eller för att havsvatten infiltrerat berget under de tider det legat under havets yta. På djup ned mot 1 000 meter finns ett mycket salt vatten som anses vara mycket gammalt. En teori är att det har stängts in i bergmassan då den bildades. Liknande mönster återfinns på de flesta platser i Sverige.

7.4 Bergets funktion

7.4.1 Isolera

Berget bidrar till isoleringen av avfallet genom att:

- göra det använda bränslet otillgängligt för människor,
- ge kapseln och bufferten en stabil miljö.

Tillgänglighet för människor

Berget ska göra det använda bränslet otillgängligt för människor. Det innebär att:

- sannolikheten för att människor oavsiktligt kommer i kontakt med det använda bränslet ska vara liten,
- det ska vara svårt men inte omöjligt för människor att komma åt det använda bränslet om de så önskar,
- sannolikheten för att människors aktiviteter försämrar förvarets funktion ska vara liten.

Otillgängligheten åstadkoms genom:

- val av lämplig plats,
- försvarsdjupet och systemets konstruktion.

Principen att samla farligt material på en plats innebär en möjlighet att komma åt en stor mängd på en gång. Då människor bygger och/eller borrar i berget kan de ofrivilligt, t ex av nyfikenhet eller okunskap, exponeras för avfallet. Att bygga och/eller borra i närheten av förvaret kan också leda till att barriärerna och deras funktion påverkas. Förvaret ska inte bara skydda människorna från avfallet utan även skydda avfallet från människornas aktiviteter.

Sannolikheten för att människor kommer i kontakt med avfallet eller påverkar barriärerna kan minskas genom ett lämpligt platsval. Platser där berget innehåller potentiellt värdefulla naturresurser undviks. Exempel på naturresurser är malmer, industrimineral eller platser med möjlighet för energilagring och energiutvinning. Plats och försvarsdjup väljs också så att sannolikheten för brunnborrning i närheten av förvaret är liten. Genom att välja en plats med lämplig bergart och genom försvarsdjupet isoleras avfallet från människornas aktiviteter.

Det kan tänkas att människor någon gång i framtiden, efter det att förvaret återfyllts och stängts, vill hämta upp det använda bränslet. Det är möjligt att göra och kräver då en byggnadsinsats av ungefär samma omfattning som då förvaret byggdes.

För att underlätta för framtida generationer att återta bränslet eller ändra förvarssystemet och för att undvika ofrivilliga intrång kommer någon form av dokumentation över var och hur bränslet finns förvarat att upprättas. Exakt hur informationen om förvaret ska bevaras är såväl en lokal som nationell och internationell fråga. Tills vidare arkiveras information om förvaret hos myndigheter och SKB.

Stabil miljö

Bergets viktigaste bidrag till isoleringen är indirekt, nämligen att ge kapseln och bufferten en stabil miljö såväl kemiskt som mekaniskt. Med stabil miljö menas i detta fall att de kemiska och mekaniska förändringarna inte ska vara så stora att buffertens och kapselns funktion hotas. Förändringarna ska dessutom vara förutsägbara i ett tidsperspektiv på 100 000-tals år.

Mekanisk stabilitet

Berget ska erbjuda en mekaniskt stabil miljö. Det innebär:

- att rörelserna på försvarsdjup ska vara små,
- inga snabba, stora förändringar av bergets belastning på buffert och kapsel.

Den mekaniska stabiliteten bygger på:

- det massiva bergets materialegenskaper,
- spricksystemet,
- förvarsdjupet,
- inplaceringen av förvaret i berget,
- bergets långsamma förändringstakt.

Stabiliteten bygger på materialet, dvs den massiva bergarten själv, och dess omgivning, dvs djupet och spricksystemet, samt på den långsamma utvecklingen. Genom att anpassa förvarets utformning, dvs inplaceringen av tunnlar och deponeringshål, till de geologiska förhållandena på platsen kan de förväntade kemiska och mekaniska förändringarna begränsas.

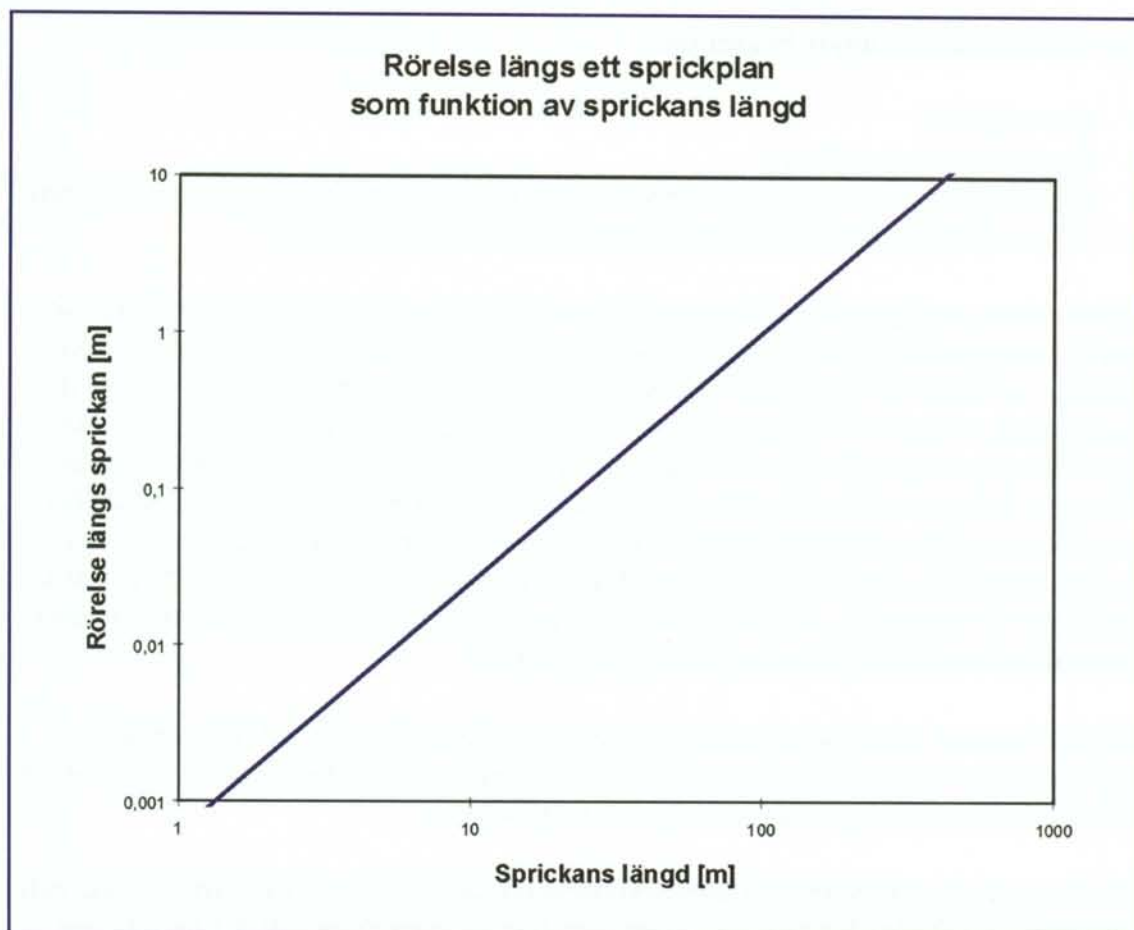
I berget finns krossade partier och spricksystem i olika storlekar från makroskopiska (milslånga, meterbreda) ned till mikroskopiska (mellan bergskristaller, tiondels mikrometer). Större sprickzoner omger bergblock med små sprickor. Sprickorna har uppstått då berget bildades och till följd av de påfrestningar det utsatts för under årmiljonernas gång. Hur spricksystemet ser ut beror både på belastningarna och bergartens egenskaper. Om framtida belastningar inte blir större än de tidigare kommer de att leda till att berget rör sig längs de redan öppnade sprickorna.

Studier av sprickor i berg visar att rörelserna längs sprickorna är proportionella mot sprickstorleken. I *Figur 7-4* visas sambandet mellan förskjutningen längs en spricka och sprickans utbredning /7-4/. Genom att utnyttja sprickornas egenskaper och mönster och genom att placera in förvaret i förhållande till sprickzonerna åstadkoms den mekaniska stabiliteten.

Förvarsdjupet bidrar till en mekaniskt stabil miljö genom att effekterna av de påfrestningar berget kommer att utsättas för under tidens gång, t ex under en glaciation och vid jordbävningar, avtar med ökande djup.

Rörelserna i berget vid ett jordskalv är mindre på djupet. Vid ett jordskalv fortplantas en belastning snabbt genom berget. Belastningen uppstår till följd av en rörelse på stort djup och leder till att en *stötvåg* går genom berget. Förenklat kan man säga att fronten på stötvågen trycker till det den har framför sig som i sin tur trycker till det den har framför sig osv. Då stötvågen, som rör sig med ljudets hastighet genom berget, når ytan reflekteras den. De reflekterade vågorna har en annan karaktär än den ursprungliga stötvågen, t ex är våglängden längre. Det är dessa reflekterade vågor som får jordytan att gunga. Vid ett jordskalv blir därför rörelserna störst vid ytan och avtar med djupet.

Jordskalvet utlöses som en snabb förskjutning längs en diskontinuitet, sprickzon, i berget. Vid studier av inträffade skalv har man funnit att det finns ett samband mellan skalvens magnitud och storleken på den diskontinuitet där de utlösts. Stora skalv utlöses i stora diskontinuiteter. Man har också sett ett samband mellan diskontinuiteternas storlek och storleken på den förskjutning skalvet åstadkommer längs zonens eller



Figur 7-4: De rörelser man kan förvänta sig i en spricka är proportionella mot sprickans utbredning. I diagrammet visas rörelsen längs en spricka, eller sprickzon, som funktion av sprickans längd. (Ur I7-4)

sprickans plan. Deponeringshålen kommer att placeras med säkerhetsavstånd från större sprickor. Utbredningen på de sprickor som tillåts skära deponeringshålen är begränsad. Därmed kommer rörelsen vid deponeringshålet att bli begränsad om ett skalv utlöses i en närliggande diskontinuitet.

Kemisk stabilitet

Förvaret ska erbjuda en kemiskt stabil miljö med:

- syrefria reducerande förhållanden,
- vattenkemi som i övrigt ger försumbar påverkan på bentonitens egenskaper,
- vattenkemi med lågt innehåll av ämnen som påverkar korrosionshastigheten för kapselmaterialet.

Den kemiskt stabila miljön bygger på:

- förvarsdjupet,
- långsam vattenomsättning,
- allmänt gynnsamma förhållanden som resultat av reaktioner mellan vatten och berg,
- bergets redoxbuffert-kapacitet som ger reducerande förhållanden.

Gynnsamma grundvattenkemiska egenskaper är sådana att vattnet inte gärna reagerar med bentoniten och kapseln. Vattnet ska vara *reducerande*, dvs fritt från löst syre och obenäget att bidra till oxidation. *Vätejonskoncentrationen*, surhetsgraden, i vattnet ska vara neutral, dvs pH ~7. (Vätejonskoncentrationen anges som $-\log(\text{H}^+)$ och förkortas pH). Förutom att grundvattnet ska vara reducerande bör halterna av sulfider, klorider, bakterier, kalcium och kalium inte vara för höga. Extremt höga salthalter (kloridhalter) kan påverka buffertens egenskaper. Tillgång på kalium kan i kombination med höga temperaturer leda till en strukturomvandling av bentoniten. Allt för låga salthalter är inte heller bra för bentoniten. I *Tabell 7-1* redovisas några viktiga substanser i grundvattnet samt vilken inverkan de kan ha på förvarets barriärer.

Förändringarna i grundvattenkemin ska vara förutsägbara i ett långt tidsperspektiv. Förvarsdjupet och den långsamma vattenomsättningen ger en stabil kemisk miljö. Även platsens geografiska läge har betydelse för vattenkemin.

För att begränsa korrosionen av kopparkapseln bör det inte finnas löst syre i vattnet och reducerande förhållanden råda. Löst syre som finns i nederbördsvattnet som förs ned i berget bör förbrukas innan vattnet når förvarsdjup. Bergets och grundvattnets förmåga att förbruka löst syre kallas *redoxbuffert-kapacitet* och beror av inblandningen av organiskt material vid infiltrationen och reaktioner med bergets mineral. Då det gäller infiltrerat ytvatten som innehåller organiskt material har bakteriell syrereduktion visat sig vara mycket effektiv. Vattnets innehåll av organiskt material omvandlas till vätekarbonat med hjälp av bakterier varvid syret förbrukas. Bland bergmineralen bidrar framförallt järnmineral, t ex pyrit (FeS_2), till redoxbuffert-kapaciteten. Järn reagerar lätt med syre; de bruna utfällningar som ofta syns vid vattenförande bergsprickor är järnoxider. Även om vattenomsättningen är snabb kommer löst syre att förbrukas nära markytan och reducerande förhållanden att råda på förvarsdjup. Under vissa skeden av en glaciation kan eventuellt syresatt vatten nå större djup, se /7-5/.

Sammanfattningsvis kan sägas att den kemiskt stabila miljön ges av berggrundens kemiska egenskaper och den långsamma vattenomsättningen. Den sistnämnda beror både på att bergets förmåga att släppa igenom vatten är mindre på stora djup och att vattenflödet avtar med djupet.

Tabell 7-1: Några viktiga substanser i grundvatten och deras normala halter i kristallint berg. De barriärer, barriärfunktioner och processer som kan påverkas om halterna faller utanför det normala.

Komponent	Normala halter [mg/liter*]	Påverkad barriär/ process och/eller funktion
Eh**	-0,5 – 0	Bränsle / upplösning av radionuklider Kapsel / korrosion Berg / sorption av radionuklider
pH	6,5 – 9,0	Bränsle / upplösning av radionuklider Kapsel / korrosion Berg / sorption av radionuklider
Sulfid HS ⁻	0,1 – 1	Bränsle / upplösning av radionuklider Kapsel / korrosion
Sulfat SO ₄ ²⁻	40 – 60	Kapsel / korrosion (omvandlas till sulfid av bakterier)
Karbonat HCO ₃ ⁻	40 – 500	Bränsle / upplösning av radionuklider Berg / sorption av radionuklider
Kväveföreningar NO ²⁻ , NO ³⁻	0,01 – 0,7	Kapsel / korrosion
Klorid Cl ⁻	1 – 17 000	Kapsel / korrosion Buffert Berg / sorption av radionuklider
Kalium K ⁺	1 – 25	Buffert / strukturomvandling
Katjoner Na ⁺ , Ca ⁺ , Mg ⁺ mfl	15 – 7 500	Buffert / stabilitet, svälltryck
Organisk material inkl. bakterier	1 – 8	Bakterier medverkar till redoxbuffring Bakterier omvandlar sulfat till sulfid

*) gäller ej Eh, pH.

**) låga Eh-värden innebär att förhållandena är reducerande.

Strålskydd

Vid deponeringen avger det använda bränslet fortfarande relativt mycket gamma- och neutronstrålning. För att avskärma denna strålning räcker det med 5–10 meter berg. Berget fungerar därför som ett kraftigt överdimensionerat strålskydd för denna typ av strålning.

7.4.2 Hålla kvar och fördröja samt späda ut och fördela i tid och rum

Om isoleringen bryts ska berget fördröja och sprida radionuklider genom att:

- hålla kvar radionukliderna genom *retentionsprocesser* av olika slag,
- fördela i tid och rum genom olika transportvägar med olika transporttider.

Fördröjningen och fördelningen i tid och rum är beroende av:

- den kemiska miljön,
- det massiva bergets materialegenskaper,
- spricksystemet,
- förvarsdjupet,
- långsam vattenomsättning,
- inplaceringen av förvaret i berget.

Man kan säga att bergets förmåga att fördröja och sprida har en fysikalisk och en kemisk del. Den fysikaliska delen har att göra med hur grundvattnet rör sig i spricksystemet och det massiva bergets porer samt radionuklidernas fysikaliska egenskaper. Den kemiska delen har att göra med bergets och sprickornas mineralogi, grundvattenkemin och radionuklidernas kemiska egenskaper /7-11/.

Radionukliden Krypton-85 är en gas. Kol-14 kan förekomma i gasfas. Dessa nuklider kan komma att transporteras i gasfas. Enkla överslagsberäkningar visar att de mängder radionuklider som kan transporteras på detta sätt ger stråldoser som ligger klart under de accepterade. Direkt transport i gasfas bedöms därför inte ha någon säkerhetsmässig betydelse. Det dominerande transportmediet är vatten. Radionuklidtransport i berg och grundvattenrörelser i berg hänger därför intimt ihop.

Mekanismer som påverkar transport av radionuklider i grundvatten är (se även *Figur 7-5*):

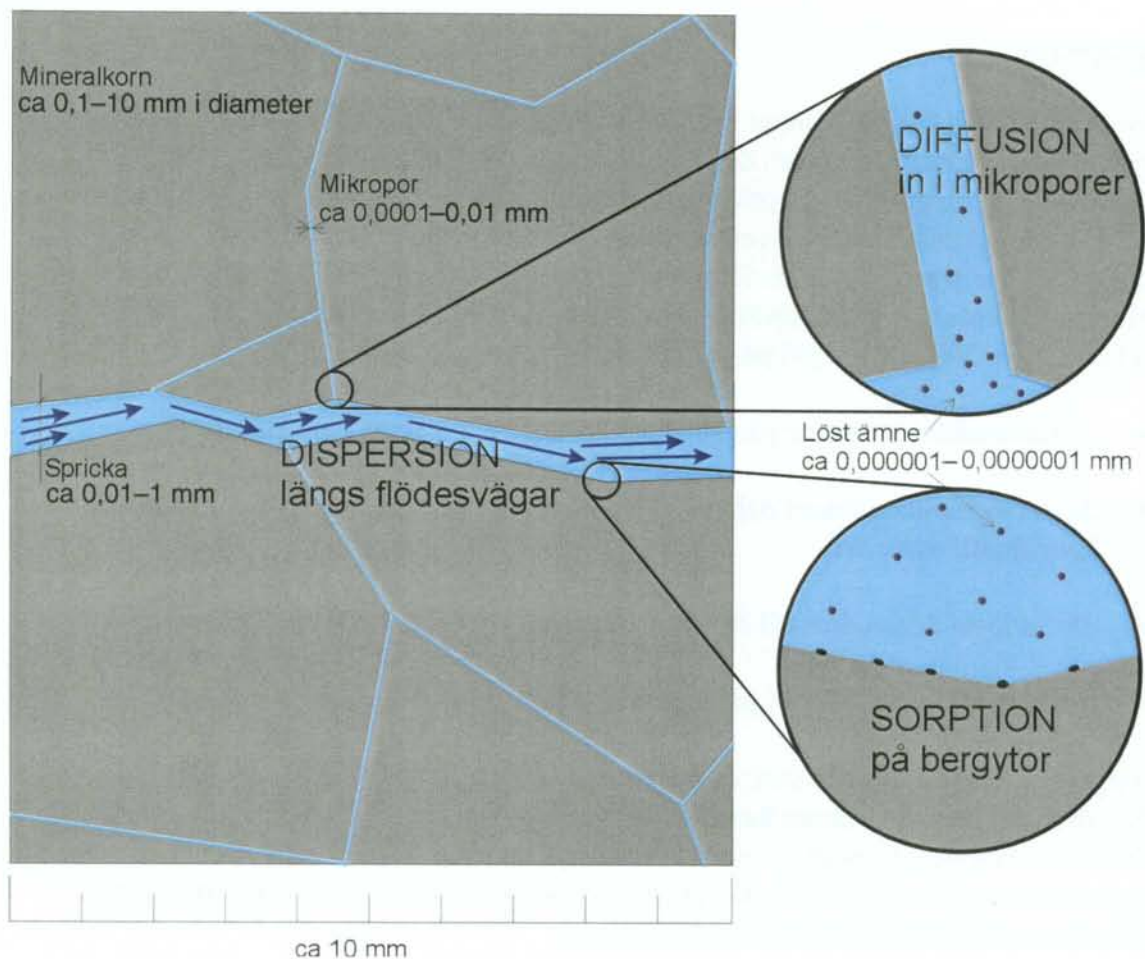
- advektion,
- dispersion,
- diffusion,
- sorption.

Advektion

Advektion är när lösta ämnen transporteras enbart genom grundvattnets rörelse. De lösta partiklarna följer med grundvattenflödet i berggrundens sprickor.

Dispersion

Vattnet rör sig i bergets spricksystem. Inom en viss spricka rör det sig i flera olika passager (se *Figur 7-2*). Flödes hastigheten varierar både inom varje spricka och mellan



Figur 7-5: Radionuklider som är lösta i grundvattnet kan följa med grundvattnets rörelser. Transporten påverkas av dispersion, diffusion och sorption. På sin väg genom berget hinner många av radionukliderna sönderfalla.

dem. Inom en spricka rör sig vattnet längs strömbanor med olika hastighet. Sprickor korsar varandra och flöden från olika sprickor kan eventuellt mötas och deras vatten blandas. Ibland kan själva korsningen mellan sprickor bilda en passage för grundvatten. Detta leder till att flödet blir ojämnt fördelat i berget och ämnen som är lösta i grundvattnet sprids i bergvolymen. Detta spridnings- och blandningsfenomen kallas dispersion. I sprickigt berg domineras dispersionen av hastighetsvariationer mellan olika strömningsvägar /7-6/.

Diffusion

Kallas även molekylär diffusion och sker genom att ämnen som är lösta i vattnet, genom sina ständiga slumpvisa rörelser, transporteras från områden med höga koncentrationer till områden med låga koncentrationer. Diffusion in i porerna i bergmatrisen brukar kallas *matrisdiffusion*. Ämnen kan också diffundera in i återvändsgränder och partier med stagnant vatten i en spricka.

Sorption

Processen då ett ämne i lösning fäster på en fast fas kallas sorption. Ämnet kan fastna på två olika sätt. Det kan upptas i det fasta materialet, s k absorption, eller fästa på ytan av det fasta materialet, s k adsorption. Ibland kan de två sätten vara svåra att särskilja /7-12/. I berg kan båda sätten verka samtidigt eftersom ämnen kan adsorbera långt in i bergmatrisens porer. Det finns flera olika processer, både kemiska och fysikaliska, som bidrar till sorption. Flera sorptionsprocesser kan samverka, och en process kan övergå till en annan. Några exempel på sorptionsprocesser är:

- då radionukliden fastnar på grund av sin storlek, s k molekylär filtrering,
- då det sorberande ämnet och det fasta ämnet delar sina elektroner och binds kemiskt till varandra,
- då det lösta ämnet dras till den fasta ytan på grund av sin elektriska laddning,
- då det lösta ämnet fälls ut på den fasta ytan.

Sorptionen kan vara *reversibel*, dvs det sorberade ämnet kan lösas igen, eller *irreversibel*, dvs det sorberade ämnet kan inte lösas igen. Faktorer som kan påverka sorptionen är det lösta ämnets fysikaliska och kemiska egenskaper, bergets fysikaliska och kemiska egenskaper, tryck, temperatur och grundvattenkemi. De olika sorptionsprocesserna påverkas olika mycket av de olika faktorerna.

Så gott som samtliga radionuklider i bränslet reagerar med berget i olika sorptionsprocesser. Om vattentransporten sker utan påverkan av sorptionsprocesser kallas den *icke-reaktiv*. Den icke-reaktiva transporten är den snabbast tänkbara och omfattar vattentrogna substanser. Några radionuklider kan i vissa jonformer vara vattentrogna. Radionukliderna kan också reagera med substanser i grundvattnet och på så sätt bli vattentrogna. De kan bilda *komplex* med olika ämnen, t ex *karbonater* och *humusämnen*, som finns i grundvattnet. De kan också sorbera på *kollodiala* partiklar och följa med dem. Kolloider är material som finfördelats i vattnet så att det inte sedimenterar utan hålls uppslammat i vätskan. Om sorptionen på kolloiderna är irreversibel kan nukliden inte bromsas av sorptionsprocesser med berget. Även gasbubblor och bakterier kan fungera som bärare av radionuklider. Halterna av *komplexbildare* och kolloider i djupa grundvatten är låga. Den mängd nuklider som kan transporteras snabbare via dem blir mycket liten.

Ju längre en radionuklid kan hållas kvar i berget, ju längre blir transporttiden till biosfären och ju mer hinner radioaktiviteten och därmed farligheten att minska. All transport av radionuklider genom berget, såväl reaktiv som icke-reaktiv, påverkas av:

- avståndet från förvaret (buffertens yta) till biosfären
- advektion
- dispersion
- diffusion

Nästan samtliga radionuklider i bränslet reagerar med berget och grundvattnet och transporten påverkas därmed också av sorption.

Advektionen, grundvattenflödet på förvarsdjup, är i allmänhet mycket liten. I storleksordningen någon liter vatten passerar en tvärsnittsytta på en kvadratmeter under ett års tid, och flödes hastigheten är någon meter per år. Advektionen motsvaras av det medelflöde som kan beräknas med hjälp av den hydrauliska konduktiviteten. Den beräknade advektiva transporthastigheten motsvarar en medelhastighet. I själva verket är flödet ojämnt fördelat över tvärsnittet. Radionukliderna kommer på grund av dispersion och diffusion att transporteras olika snabbt. En del kommer att bli kvar i berget, en del transporteras långsammare än medelflödet och andra kommer att transporteras snabbare.

Vid inplaceringen av förvaret i berget placeras kapslarna inte för nära potentiellt snabba transportvägar, dvs sprickor med hög genomsläpplighet. Oavsett detta kan man inte utesluta att vissa snabba transportvägar kan finnas. Både transporttid, transporterad mängd och koncentration av nukliden har betydelse för konsekvenserna vid ett utsläpp.

Hur stor spridningen på grund av dispersionen blir beror både på spricksystemets egenskaper och transportsträckan. Ju längre transportsträcka och ju fler tänkbara flödesvägar, desto större dispersion.

Hur stor diffusionen blir påverkas av flödes hastigheten och av sprickans ytvolymförhållande. Stor *flödesvätt yta*, dvs yta som är vätt av det flödande vattnet, och långsamt flöde gör att de ämnen som lösts i vatten stor utsträckning kan diffundera in i berget. Det gäller både diffusion in i sprickor och matrisdiffusion. Ju långsammare flödet är, desto mindre flödesvätt yta krävs för att diffusionen ska begränsa transporten av lösta ämnen genom berget. Om koncentrationen av radionuklider är mindre i vattenförande delar av sprickan än i området med stagnant vatten eller mikroporer diffunderar de lösta nukliderna ut i sprickans flödande vatten igen.

Den tillgängliga bergytan är viktig för sorptionsprocesserna. Liksom för diffusionen har sprickans flödesvätta yta stor betydelse. Den yta som finns inne i bergmassan runt bergmatrisens porer är mycket större än ytan runt sprickorna. Förekommer matrisdiffusion ökar därför ytan som är tillgänglig för sorption flera storleksordningar. Förutom av den tillgängliga bergytan är sorptionsprocesserna beroende av det lösta ämnets fysikaliska och kemiska egenskaper, eventuell närvaro av sprickmineral, bergets fysikaliska och kemiska egenskaper, tryck, temperatur och grundvattenkemi. Olika processer är känsliga för olika faktorer eller kombinationer av faktorer. En process kan t ex vara känslig för höga temperaturer vid ett visst pH-värde, medan temperaturen inte har någon större betydelse vid ett annat pH-värde. Några sorptionsprocesser är beroende av flödes hastigheten medan andra är så snabba att de är oberoende av flödes hastigheten.

Den totala sorptionen av radionuklider i berget är således ett resultat av flera olika processer. De enskilda processerna beror av olika kemiska och fysikaliska parametrar. För att bedöma hur stor sorptionen blir på ett enkelt och samlat sätt används ofta den sk fördelningskoefficienten (K_d). Fördelningskoefficienten anger hur ett ämne fördelar sig

vid jämvikt som sorberat på det fasta materialet (c_s) respektive hur mycket som förekommer i vattnet (c_w). Fördelningskoefficienten ($K_d = c_s/c_w$) kan bestämmas experimentellt som funktion av betydelsefulla parametrar som t ex pH, salthalt och mineral-sammansättning.

7.5 Bergets förväntade utveckling

Bergets stabilitet bygger på dess mekaniska, hydrologiska och kemiska egenskaper. Dessa är starkt kopplade till varandra. För de mekaniska och hydrologiska egenskaperna är spricksystemet mycket viktigt. De kemiska egenskaperna är kopplade till hydrologin och det massiva bergets mineralogi. Via spricksystemet kan mekaniska förändringar, t ex ett jordskalv, påverka de geohydrologiska förhållandena, vilket i sin tur kan påverka kemien. Ändrade hydrologiska förhållanden på ytan, t ex under en istid, påverkar direkt grundvattenrörelserna genom ändrade drivkrafter, även grundvattenkemin kommer att påverkas. Temperaturförändringar, grundvattentryck och -flöden kan ge så stora mekaniska laster att spricksystemet förändras. Termiska, mekaniska, hydrologiska och kemiska förändringar är därför intimt sammankopplade.

Utvecklingen de närmaste 100 000 åren kommer självklart att medföra påverkan på bergets mekaniska, hydrologiska och kemiska egenskaper. Faktorer som påverkar berget visas schematiskt i *Figur 7-6*. Utifrån vår kunskap om bergets uppbyggnad, de geologiska skeenden som påverkar berget och spår av de förgångna vi hittat i berggrunden, bedöms utvecklingens effekter inte hota bergets primära funktion, dvs att ge de byggda barriärerna en stabil miljö.

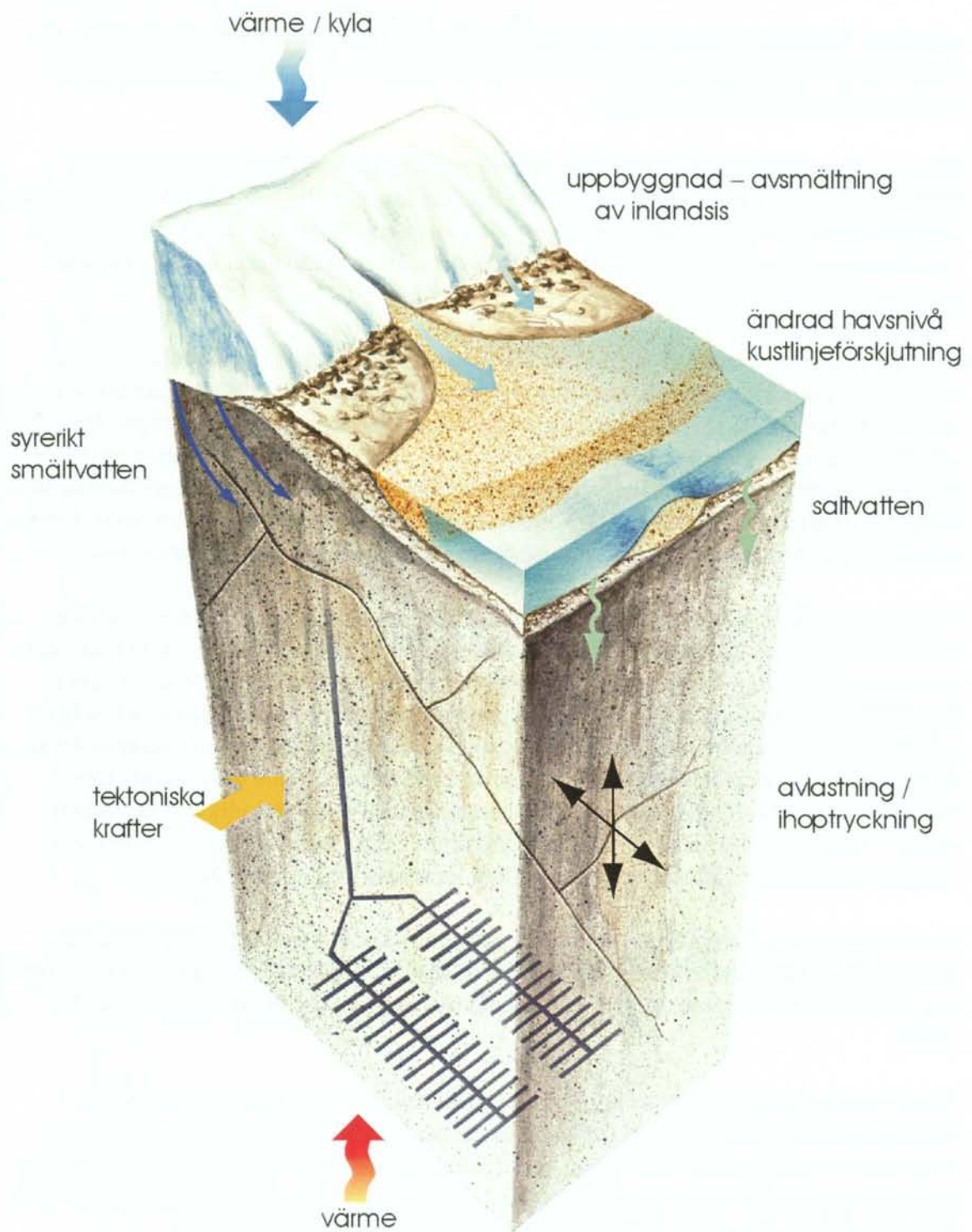
Bergets framtida utveckling kan beskrivas i tre tidsperspektiv:

- tiden fram till nästa istid,
- kommande glaciation,
- tiden därefter i ett plattetektoniskt tidsperspektiv.

Under tiden fram till nästa istid är det kanske framförallt människan och hennes agerande som kan komma att påverka berget. Landhöjningen kommer att påverka förhållandena för grundvattenflöde. När vi går mot kallare klimat då permafrost och is breder ut sig kommer förändringarna i berget att domineras av de termiska, mekaniska, hydrologiska och kemiska effekter klimatförändringarna medför. I ett mycket långt geologiskt tidsperspektiv kommer även de plattetektoniska krafterna att förändras.

7.5.1 Tiden fram till nästa istid

Lokala förändringar i berget kommer att uppstå i samband med byggandet av förvaret. Förändringarna beror på mekanisk påverkan i samband med byggnationen och temperaturförändringar under byggnationen och då det använda bränslet placeras i förvaret. Då schakt, tunnlar och deponeringshål byggs kommer berget att påverkas i ett område runt de skapade berggrummen. Nya sprickor bildas och gamla sluts eller vidgas. Hur stor



Figur 7-6: Några faktorer som påverkar berget i ett 100 000-årsperspektiv.

påverkan blir beror på spricksystemets egenskaper, hålets form, hålets riktning i förhållande till sprickorna samt byggmetoden. Inplaceringen av förvaret i berget görs så att påverkan blir så liten som möjligt.

Störningarna vid byggandet leder till att bergets vattengenomsläpplighet ökar intill bergrummens väggar, främst i radiell riktning från tunneln eller schaktet. Vid de borrade deponeringshålen ökar porositeten till ett djup av några centimeter. Buffertens bentonitlera kommer på grund av sitt svälltryck i viss mån att tränga in i och täta de skapade porerna då förvaret stängs.

I en sprängd tunnel sträcker sig den *störda zonen* cirka en tunneldiameter, dvs några meter, från tunnelväggen. Närmast tunnelväggen kan vattengenomsläppligheten öka 100–1000 gånger. På lite längre avstånd från tunneln är ökningen ca 10 gånger det ostörda bergets vattengenomsläpplighet /7-7/. Om vattengenomsläppligheten ökat i tunnelns riktning och vattentillgång och drivkraft finns kommer flödet längs tunnarna att öka. För att undvika det tätas de vattenförande sprickzoner tunnarna passerar. Dessutom pluggas tunnarna med block av högkompakterad bentonit invid sprickzonen.

Då förvaret stängs återfylls tunnlar och schakt med en blandning av bentonit och sten och/eller sand. Återfyllnadsmaterialet ska ha ungefär samma hydrauliska konduktivitet som det omgivande ostörda berget. Det ska vara långtidsstabil och påverka miljön i berget så lite som möjligt. Återfyllnadsmaterialet tätar och fyller ut tunnlar och schakt och ger de återfyllda bergrummen egenskaper som liknar det omgivande bergets. Ovanför deponeringshålen är återfyllnaden ett mothåll så att buffertens bentonitlera inte sväller ut i tunneln. På lång sikt kommer berget att sträva efter att utjämna de förändringar i bergspänningar som tunnarna åstadkommer. Det leder till att en mycket långsam fortlöpande uppsprickning av berget kan förväntas intill tunnelväggarna.

De förändringar av berget byggnationen medför är lokala. Även om förändringarna i vissa punkter kan vara relativt stora innebär de inte att bergets egenskaper i stort förändras. Berget är inhomogent, tunnlar och schakt kan ses som en inhomogenitet bland andra.

Då det använda bränslet placeras i förvaret avger det fortfarande värme. Förhöjda temperaturer kommer att råda i förvaret i tusentals år. Maximal temperatur vid en enskild kapsel uppnås efter cirka 10 år, och förväntas bli 70–90°C. Om man betraktar hela deponeringsområdet som en enhet, kommer de maximala temperaturerna att uppnås i de centrala delarna efter 100–400 år. Därefter avtar temperaturen successivt.

Höjda temperaturer ger följande effekter:

- ändrade spänningar i berget, som i sin tur kan påverka spricksystemet,
- drivkraft för grundvattenflöde,
- påverkan på grundvattenkemin.

Storleken på de spänningar som uppstår på grund av temperaturen, är små i förhållande till de spänningar som normalt råder på stora djup. Uppvärmningen leder till att de

massiva bergpartierna utvidgas och sprickorna trycks ihop. Då berget svalnar vidgas sprickorna igen. Förändringen av sprickornas egenskaper påverkar bergets vattengenomsläpplighet. Utifrån beräkningar av förändringarnas omfattning bedöms de inte påverka bergets funktion /7-8/.

Temperaturskillnader är en drivkraft för grundvattenflöde. Lokala *konvektionsceller* kan bildas i närheten av de deponerade kapslarna. För grundvattenflödet i stort är temperaturskillnaderna en underordnad drivkraft, tryckskillnader är klart dominerande /7-3/.

Temperaturen i förvaret kommer också, om än i betydligt mindre omfattning, att påverkas under byggtiden och den tid tunnlar och schakt hålls öppna.

Då man bygger i berg uppstår en hydraulisk gradient in mot bergrummet och grundvatten strömmar in. Vatteninflödet kan i viss mån begränsas genom att vattenförande sprickzoner och sprickor injekteras med betong. Under drifttiden måste det vatten som strömmar in pumpas ut. Det leder till att grundvattenytan ovanför förvaret sänks, och berget är under drifttiden inte vattenmättat ända upp till ytan. Då kapslarna deponerats och tunnlar och schakt återfylls avbryts pumpningen och vattnet fyller åter tillgängliga hålrum. Grundvattenytan återtar sitt ursprungliga läge. Under denna period som brukar kallas *återfyllnadsfasen*, rör sig grundvattnet in mot förvaret. Hur lång tid det tar innan berget åter är vattenmättat beror på den hydrauliska konduktiviteten. Studier av återmättnadsförloppet visar att det tar minst ett år /7-3/.

Fram till nästa istid kommer Sverige att påverkas av landhöjning. Landhöjningen är för närvarande ca 1 mm per år. I landets södra delar är den mindre än i de norra. Landhöjningen medför försumbara förändringar på förvarsdjup. Däremot kan utströmningsområdena för grundvattnet förändras. Landhöjningen har framförallt betydelse för biosfären.

7.5.2 Kommande glaciation

Kommande klimatförändringar och deras effekter beskrivs mot bakgrund av kunskapen om klimatologiska system, idag existerande miljöer och studier av de spår gångna klimatförändringar lämnat i naturen. I naturen, bland annat i sediment från djuphavsgravar, kan cykliska mönster av gångna klimatförändringar återfinnas. Mönstren kan korreleras till kända cykliska förändringar av solinstrålningen, orsakade av ändringar i jordens omloppsbana runt solen. Genom att beskriva jordens klimatsystem, t ex med hjälp av datormodeller kan sedan orsak, dvs förändrad solinstrålning, och effekt, t ex tillväxt av glaciärer, kopplas samman. Modellerna kan användas för att göra beskrivningar av klimatet bakåt i tiden. Deras riktighet kan testas mot geologiska observationer av olika slag.

Klimatforskarna är idag överens om att det är förändringar i solinstrålningen som är drivkraften bakom klimatförändringar på jorden. Vilka effekter ändringarna i sol-

instrålningen får beror på jordens klimatsystem. I klimatsystemet står solinstrålningen för den yttre drivkraften och atmosfären, oceanerna, glaciärerna, biosfären och de tektoniska förhållandena bestämmer i komplex samverkan responsen i varje del.

Då förvarets utveckling beskrivs antar vi att de förutsägbara förändringarna av solinstrålningen kommer att påverka klimatsystemet på samma sätt som de gjort de närmast gångna 700 000–800 000 åren. Vi kan inte vara säkra på att så blir fallet. Inom loppet av några hundratals år har vi människor förändrat biosfären och förbränt den olja det tagit naturen många hundratusentals år att bygga upp. Vi vet idag att människans störning av naturens långsamma kretslopp, bland annat genom den s k växthuseffekten, påverkar jordens klimat. Exakt vilka följder människans aktiviteter får kan vi inte avgöra. Globalt varmare klimat kan leda till att nästa istid låter vänta på sig. Det kan också medföra förändringar av havsströmmarna, vilket i sin tur kan ge Sverige ett betydligt kallare och torrare klimat än idag. För bergets del betyder en kommande istid större förändringar än om isen låter vänta på sig. En utveckling som liksom i det förgångna leder till inlandsis över Sverige antas därför ske även i framtiden /7-5/.

För att kunna bedöma klimatförändringarnas effekter på berget har man försökt identifiera situationer med karakteristiska förhållanden, dessa har kallats klimatstyrda processtillstånd. Under kvartärtidens glaciationscykler kan fyra sådana processtillstånd identifieras. De benämns:

- tempererat/borealt tillstånd (interglacial),
- permafrost-tillstånd,
- marint tillstånd,
- glacialt tillstånd.

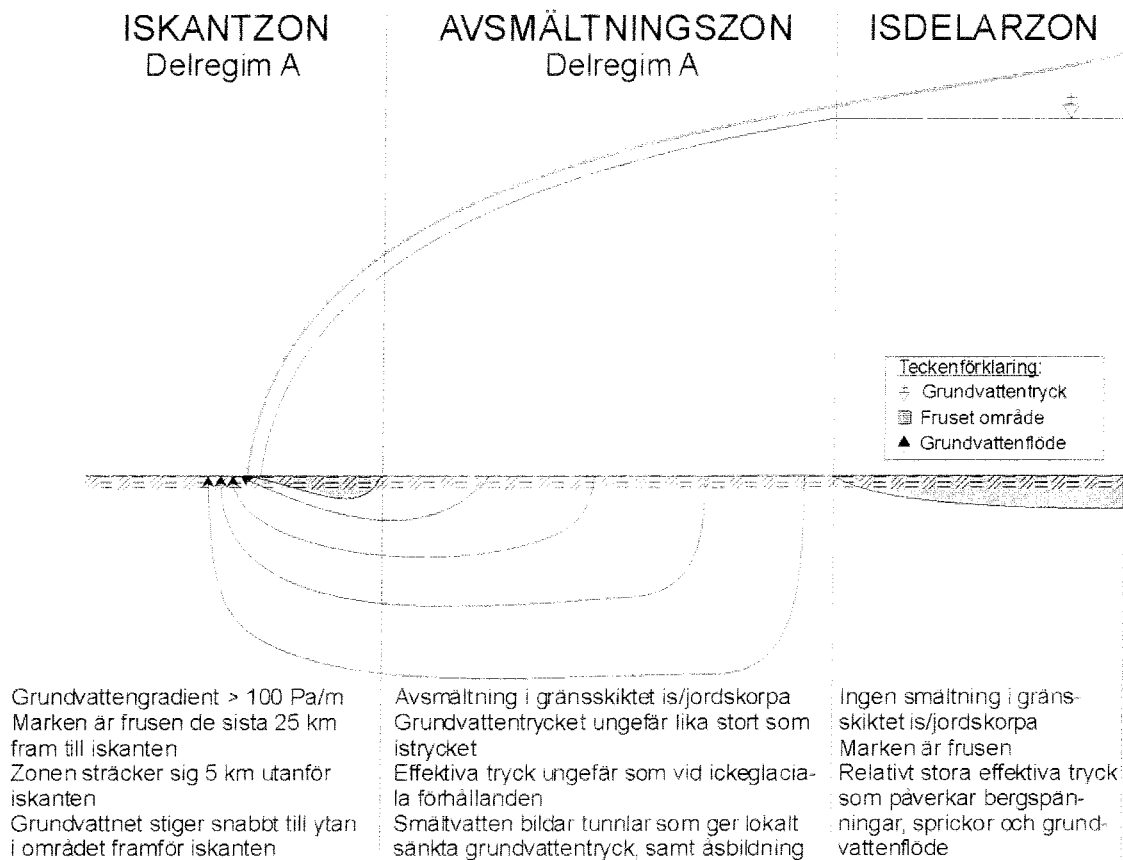
Inom de olika klimatstyrda processtillstånden finns regimer och delregimer med olika termo-hydro-mekaniskt-kemiska förhållanden. Regimerna är relaterade till isen och dess utbredning i tid och rum. Delregimerna är relaterade till förhållanden på markytan som t ex avstånd till isälvar och vattendrag. Det rådande klimatstyrda processtillståndet, regimen och delregimen bestämmer de termo-hydro-mekaniska-kemiska förhållandena. Från förvaret sett kan de ses som yttre belastningar. I *Figur 7-7* visas det glaciala tillståndet och dess regimer och hur de påverkar mark, berg och grundvattenflöde.

Isens utbredning och omfattning varierar både i tid och rum. För att bedöma hur förvaret påverkas måste, som tidigare nämnts, förvarsplatsens geologi och geografi vägas in. Det geografiska läget avgör både vilken typ av förändringar glaciationen kan förväntas medföra och hur länge de olika klimatstyrda processtillstånden kan förväntas råda. Sverige kan, med hänsyn till glaciationer, storskaligt delas in i tre generella geografiska zoner. De är fjällzon, sluttning- och högplatåzon samt flack kustzon. Inom varje zon kan tänkbara belastningar på grund av glaciationer beskrivas. Med kunskap om förvarsplatsens geologi kan sedan bedömningar av hur de påverkar förvaret göras. I *Tabell 7-2* räknas några förändringar och deras effekter på berget upp. Effekterna och deras konsekvenser beskrivs närmare i /7-5/.

Tabell 7-2: Påverkan på djupförvaret under de olika klimatstyrda processtillstånden.

Klimatstyrt processtillstånd	Klimatrelaterad förändring	Förändringar i djupförvaret	
Tempererat/borealt	Kustlinjeförskjutning på grund av landhöjning och/eller havsnivåförändring	Ändrade utströmningsområden för grundvatten	
	Salthalt i omgivande sjö/hav	Salthalt i grundvattnet	
	Förändringar i biosfären t ex klimat, vegetation, erosion	Vattenomsättning, grundvattnets sammansättning	
Permafrost	Temperatur	Permafrost, vattengenomsläppligheten minskar markant och frostsprängning kan förekomma	
	Nederbörd	Vattenomsättning	
	Lokalt bruten permafrost, s k talik	Flödesvägar, utströmningsområden för grundvatten	
Marint	Kraftig kustlinjeförskjutning på grund av landhöjning och havsnivåförändring	Ändrade utströmningsområden för grundvatten	
	Salthalt i omgivande hav	Salthalt i grundvattnet	
Glacialt – isdelarzon	Temperatur	Permafrost (se ovan)	
	Islast, 1 000–3 000 m mäktig is	Nedtryckning, omfördelning av bergspänningar	
	– avsmältningsson	Smältvattenflöde, upp till 50 mm per år	Vattenomsättning
		Höga vattentryck	Vattenomsättning, samt omfördelning av bergspänningar
		Istunnel – ås	Vattenomsättning
– iskantzon	Infiltrationsförhållanden	Grundvattnets sammansättning	
	Temperatur	Permafrost (se ovan)	
	Stora tryckgradienter	Vattenomsättning	

GLACIALT TILLSTÅND



Figur 7-7: Det glaciala klimatstyrda processtillståndet. Belastningarna på berget och randvillkoren för grundvattenflöde bestäms av isens närvaro. De mer exakta förhållandena bestäms av rådande regim och delregim.

I normala fall bedöms förändringarna i berget under en glaciation inte bli så omfattande att förhållandena på 500 m djup kommer att äventyra de byggda barriärernas funktion.

7.5.3 Utvecklingen i ett plattetektoniskt tidsperspektiv

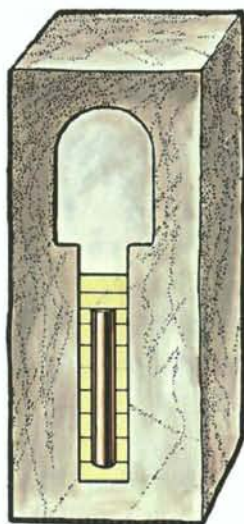
Enligt den plattetektoniska teorin är jordskorpan inte sammanhängande utan indelad i minst tolv delar, s k *tektoniska plattor*. Plattorna rör sig i förhållande till varandra, för närvarande med en hastighet av några centimeter per år [7-9]. Det förklarar på ett logiskt sätt både pågående geologiska förändringar och de fenomen vi ser spår av i berggrunden. (Se Bilaga 2: Bergarter och tektonik). Om de plattetektoniska förhållandena förändras på ett påtagligt sätt, t ex om en platta bryts upp och nya gränser bildas, säger man att man går från en *tektonisk regim* till en annan. Förändringarna i plattetektoniska förhållanden sker i miljonårsperspektiv.

Den nuvarande tektoniska regimen inleddes för ca 50 miljoner år sedan då den mitt-atlantiska spridningsryggen öppnades och Atlanten började bildas. I en mer detaljerad analys kan de nuvarande tektoniska förhållandena med sina karakteristiska bergspänningar och -rörelser sägas ha rått i ca 2 miljoner år. Perioden är lugn för den Baltiska skölden, de jordskalv som förekommer i allmänhet små /7-14/.

Det är förstås omöjligt att säkert beskriva kommande tektoniska tillstånd. Genom att studera det förgångna och analoga tillstånd på andra delar av jorden kan man göra en bedömning av en trolig framtid. Ser man enbart till plattetektoniken förväntas inga större förändringar att äga rum i miljonårsperspektivet. De horisontella spänningarna förväntas få ändrad betydelse i samband med landhöjningar och sänkningar i samband med glaciationer. Betydelsen ökar vid landhöjning, och i samband med avsmältningen av inlandsisar förväntas en ökad seismisk aktivitet med kraftigare jordskalv än de idag förekommande. Aktiviteten i den mittatlantiska spridningszonen skulle kunna förändras inom den närmaste miljonen år, även om man idag inte kan se några tecken på det. Aktiviteten skulle kunna öka och jämföras med de aktivitetsnivåer som fanns för 10–12 miljoner år sedan. Påverkade strukturer och förflyttningshastigheter från denna tid kan bedömas utifrån geologiska undersökningar. Alternativt skulle aktiviteten kunna avta och horisontalspänningarna och de därav följande deformationerna att minska. Oavsett vilken av de nämnda utvecklingarna som inträffar bedöms förändringarnas omfattning inte påverka bergets funktion /7-13/.

8 Bufferten

Sammanfattning – Bufferten



BUFFERTEN

Isolering:

- tar genom sina reologiska egenskaper upp mekaniska påkänningar
- förhindrar vattenflöde så korrosiva ämnen hindras att nå kapseln
- buffrar den kemiska miljön runt kapseln

Hålla kvar och fördröja:

- hindrar vattenflöde och därmed uttransport av radionuklider
- partiklar och lösta ämnen fångas upp via filtrering och sorption

Figur 8-1: Bufferten.

Uppbyggnad och egenskaper hos leror – buffertens bentonitlera

Lera är den gemensamma beteckningen på mineraljordar med en stor andel finkornigt material. Största delen av det finkorniga materialet i en lera består av *lermineral*. Lermineral har en plattliknande mineralstruktur. I ett korn med lermineral är flera skikt av lermineralflak travade på varandra (se Figur 8-4).

Leror har låg vattengenomsläpplighet. Deras konsistens förändras med vatteninnehållet. Fuktiga leror är formbara, de sägs ha *plastisk konsistens*. En del leror sväller då de tillförs vatten. I leror med god svällförmåga tar sig vatten in mellan skikten av mineralflak så att leran expanderar. Eftersom leror innehåller många mycket små partiklar blir partiklarnas sammanlagda yta mycket stor. Den tillgängliga ytan för sorption är stor. I svällande leror kan vatten ta sig in mellan de platta mineralflaken, och den yta som är tillgänglig för sorption kan vara 800–1000 m² per gram lermineral.

Som buffertmaterial i djupförvaret har bentonitlera valts. En lera med god svällförmåga som är praktiskt taget vattentät. I djupförvaret har leran plastisk konsistens. Den sväller och fyller hela utrymmet mellan kapsel och berg, och den förmår bära kapseln och hålla den på plats i deponeringshålet.

Buffertens funktion

Buffertens primära uppgift är att bidra till isoleringen genom att skydda kapseln från kemiska och mekaniska påfrestningar. Om en kapsel skulle vara otät ska bufferten förhindra och fördröja uttransporten av radionuklider.

Isolera

Bufferten hindrar kapselkorrosion genom att förhindra intransport av korroderanter. Inget flöde av vatten förekommer genom bufferten, all transport av korroderanter sker genom diffusion, en utomordentligt långsam process. Den möjliga intransporten av korroderanter blir en flaskhals för kopparkorrosion.

Några komponenter i grundvatten som kan påverka korrosionen av kapseln är löst syre (O_2), sulfid (HS^-), pH ($pH = -\log(H^+)$), kväveföreningar (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+) och klorid (Cl^-). Bufferten har genom innehåll av järnmineral en viss redoxbuffrande förmåga. Syre som når bufferten reagerar i första hand med järnmineral och bidrar inte till kopparkorrosion förrän järnmineralet är förbrukat. Bufferten har även en viss pH-buffrande förmåga och pH hålls ofta inom intervallet 8–10.

Genom sin plastiska konsistens skyddar bufferten kapseln från mekaniska påfrestningar. Ett plastiskt material som utsätts för yttre belastning får en kvarstående formförändring. Den tillförda energin tas upp vid formförändringen och materialets egenskaper förblir desamma som före deformationen. De rörelser som kan tänkas uppstå i berget invid deponeringshålen tas upp genom plastiska deformationer i lerbufferten.

Hålla kvar och fördröja samt fördela i tid och rum

Om kapseln skulle vara otät måste radionukliderna tränga igenom bufferten för att de ska kunna transporteras vidare genom berget. Transport genom bufferten kan bara ske genom diffusion. På grund av att utrymmet mellan partiklarna i bufferten är mycket trångt filtreras större partiklar. Flertalet radionuklider reagerar med leran i olika sorptionsprocesser. En radionuklid som når bufferten och börjar diffundera ut i lerans porvatten kommer att röra sig mycket långsamt. De molekyler som först når porvattnet kommer att sorberas på lermineralen. Först när jämvikt mellan koncentrationerna i det fasta materialet och vattnet uppnåtts kan radionukliden vandra vidare. Det kan ta flera tusen år innan de första spåren av en sorberande radionuklid når buffertens utsida (se *Tabell 8-2*).

Buffertens förväntade utveckling

På kort sikt

Efter deponeringen stängs förvarstunnlarna och grundvattnet rör sig tillbaka in i förvarsområdet. Vattnet tränger in i deponeringshålen och sugs upp av buffertens bentonitlera. Bentoniten sväller och fyller utrymmet mellan kapsel och berg.

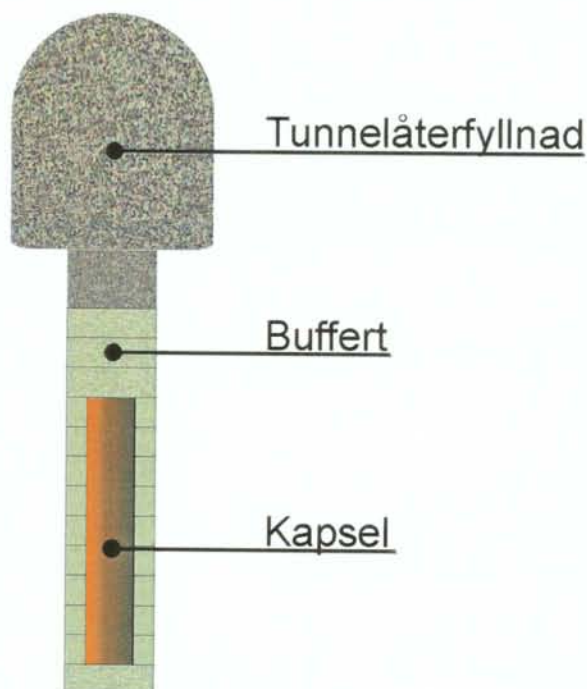
På lång sikt

Bentonitens goda egenskaper kan försämrats genom olika processer, *illitisering* och *cementering* är benämningen på två viktiga sådana processer. Dessa processer har studerats i beräkningsmodeller, laboratorier samt i naturliga analogier. Studierna visar att buffertegenskaperna kommer att bestå under mycket lång tid även under svåra kemiska förhållanden.

8.1 Inledning

Buffert är benämningen på flera olika saker som har en utjämnande eller dämpande effekt. En buffert kan vara mekanisk, kemisk eller ett lagerutrymme. Stötdämpare mellan järnvägsvagnar kallas buffertar, de tar upp stötarna som vagnarna ger varandra t ex vid en inbromsning. En kemisk lösning av buffrande ämnen kan spädas, tillsättas syra eller bas utan att pH-värdet förändras. En buffert kan också vara ett lagringsutrymme som används för att kompensera för skillnader i bearbetnings- och överförings-hastigheter. Djupförvarets buffert av bentonitlera fungerar som mekanisk buffert mot berggrörelser och har även en viss pH-buffrande förmåga. Genom att bufferten i princip är vattentät och har förmåga att hålla kvar lösta substanser begränsas all transport av lösta ämnen mellan kapsel och berg, och omvänt, även om tillförseln av oönskade sådana ämnen ökar.

I kapitel 7 beskrivs hur berget utnyttjas för att ge de tekniska barriärerna en stabil miljö. Trots att miljön kan betraktas som stabil kommer vissa förändringar att ske. För att göra förhållandena runt kapseln än mer gynnsamma och långtidsstabila omges den av en buffert. Bufferten finns i utrymmet mellan kapseln och deponeringshålens vägg och botten samt täcker kapselns ovansida mot tunnelåterfyllnadsmaterialet (se *Figur 8-2*). Då buffertmaterialet vattenmättats fyller den hela detta utrymme. Bufferten av bentonitlera tar upp och dämpar de förändringar som förekommer i berget.



Figur 8-2: En buffert av bentonitlera fyller utrymmet mellan de deponerade kapslarna och deponeringshålens vägg.

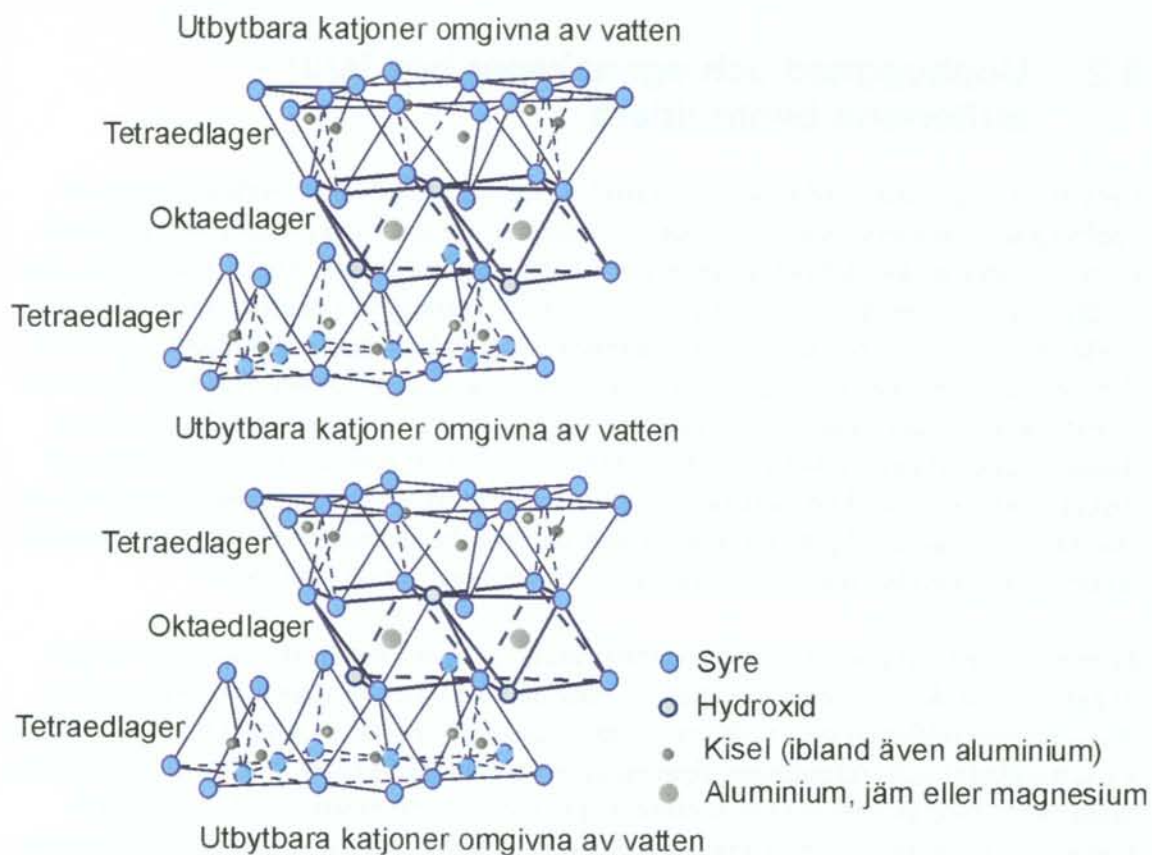
8.2 Uppbyggnad och egenskaper hos leror – buffertens bentonitlera

Lera är ett slags jord. Jord består av partiklar eller korn med olika storlek. Kornen är uppbyggda av mineral och/eller organiskt material. En jords egenskaper beror på jordkornens sammansättning och geometri, fördelningen av partiklar med olika storlek, hur jordkornen är ordnade samt innehållet av vätska och/eller gas i porerna mellan kornen. Jordar med mycket litet innehåll av organiskt material benämns mineraljordar. *Lera* är den gemensamma beteckningen på mineraljordar med en stor andel finkornigt material. Största delen av det finkorniga materialet i en lera består av *lermineral*. De flesta lermineral har en maximal kornstorlek av 0,002–0,005 mm, men de flesta partiklarna är mycket mindre än så. Lerornas större partiklar består av bergartsbildande mineral. Lera ska inte förväxlas med gyttja. Gyttja är den korrekta benämningen på den jord, innehållande relativt mycket organiskt material, vi bland annat ser på våra åkrar.

Lermineral har en plattliknande mineralstruktur. Ett jordkorn med lermineral är uppbyggt av flera skikt av lermineralflak travade på varandra i en stapelliknande struktur. Även lermineralflaken har en skiktvis uppbyggnad. De består av olika kombinationer av s k tetraedlager och oktaedlager. Tetraedlagren består vanligen av kisel- och/eller aluminium- samt syre-atomer som är sammankopplade i en tetraedstruktur. Oktaedlagren består av aluminium- eller magnesium-atomer omgivna av syre eller hydroxid (en syreatom och en väteatom) i en oktaedstruktur (se *Figur 8-3*). Andra metalljoner än kisel, aluminium och magnesium kan också förekomma. Flaken av sammankopplade tetraed- och oktaed-lager är oladdade eller negativt laddade, beroende på vilken eller vilka metalljoner de innehåller. Om flaken är negativt laddade balanseras laddningen av positivt laddade joner, s k *katjoner*, mellan dem. Olika lermineral består av olika kombinationer tetraedlager och oktaedlager med olika metallinnehåll samt olika katjoner mellan flaken.

Nedan beskrivs några egenskaper som är gemensamma för alla leror:

- låg vattengenomsläpplighet; det stora innehållet av små partiklar gör att kornen kan packas tätt, och porerna mellan dem blir så trånga och kringelkrokiga att något vattenflöde i egentlig mening inte förekommer,
- de är *kohesiva*; deras hållfasthet påverkas av sammanhållande krafter mellan kornen,
- konsistensen förändras med vatteninnehållet; en lera som innehåller mycket vatten har en flytande konsistens; minskas vatteninnehållet blir leran formbar, då sägs den ha *plastisk* konsistens; minskas vatteninnehållet ytterligare blir leran hård och spröd.



Figur 8-3: Schematisk skiss över kristallstrukturen i ett lermineral tillhörande gruppen smektiter. Mineraliet är uppbyggt av ett T-lager, ett O-lager och ytterligare ett T-lager. Mellan T-O-T-lagren finns katjoner. Katjonerna kan omge sig med vattenmolekyler.

En del leror sväller då de tillförs vatten. Svällförmågan beror framförallt av lermineralens struktur och kemiska sammansättning. Att en lera sväller beror framförallt på att vatten tar sig in mellan mineralflaken. En leras svällförmåga är beroende av flakens laddningstäthet samt katjonens radie och laddning. Hos en lera med god svällförmåga är mineralflaken relativt lågt laddade. Katjonen har hög laddning, drar gärna till sig vattenmolekyler samt passar dåligt in i mineralflakens struktur.

En i förvarssammanhang viktig egenskap hos leror är sorptionsförmågan. Gemensamt för alla leror är att ytan som är tillgänglig för sorption tack vare de många små partiklarna är mycket stor, mellan 10 och 100 m² per gram lermineral. Hos svällande leror kan dessutom vatten och därmed lösta substanser ta sig in, och hållas kvar mellan mineralflaken. Ytan tillgänglig för sorption kan hos svällande lermineral vara 800–1 000 m² per gram lermineral. Liksom svällförmågan är ett svällande lerminerals förmåga att sorbera lösta substanser kopplad till mineralflakens laddningstäthet samt

katjonens storlek och laddningstäthet. Lösta katjoner adsorberas genom utbyte av katjonen mellan mineralflaken. Dessutom kan katjoner reagera med hydroxidgrupperna på flakens ytor och bilda ytkomplex. Hydroxidgrupperna kan också bytas mot andra negativt laddade joner, s k *anjoner*.

Leran i djupförvarets buffert ska ha följande egenskaper:

- låg vattengenomsläpplighet;
leran ska vara så tät att grundvattenströmning och därmed transport av ämnen mellan kapsel och berg förhindras,
- god svällförmåga;
hela utrymmet mellan kapsel och berg/tunnelåterfyllnad ska fyllas och eventuella sprickor i leran ska självläka,
- plastisk konsistens;
eventuella berggrörelser tas upp som plastiska deformationer i leran (se avsnitt 8.3.1),
- goda sorptions- och jonbytaregenskaper;
korroderingar förhindras att nå kapseln och radionuklider att lämna den, pH-värdet ska hållas inom vissa gränser,
- god värmeledande förmåga;
värmenergin från kapseln ska ledas bort,
- förmåga att bära och hålla kapseln centrerad i deponeringshålet,
- långtidsstabilitet;
de goda egenskaperna ska bestå i 100 000-tals år.

En lera med de önskade egenskaperna måste innehålla svällande mineral i tillräcklig kvantitet. Andra mineral som kan bidra till att motverka de önskade egenskaperna får endast förekomma i mindre omfattning. Leror med stort innehåll av mineral av typen smektiter (se *Figur 8-3*) har de egenskaper som önskas. Bentonit är en sådan lera.

Bentonit är ursprungligen den geologiska beteckningen på naturligt förekommande smektitrika leror som bildats av glaskomponenten i vulkaniska askor. Namnet kommer från Fort Benton där de först upptäcktes. Beteckningen bentonit används numera även på andra leror med liknande egenskaper. Huvudkomponenten i bentoniter är lermineralet montmorillonit, som alltså tillhör gruppen smektiter. Typen av katjon varierar, i de flesta bentoniter utgörs den till största delen av kalcium ofta tillsammans med magnesium. Natriummontmorilloniter är mer sällsynta, men de förekommer t ex i Wyoming-bentoniterna från USA. Natriumbentoniter har bättre svällegenskaper än kalciumbentoniter. Beroende på sammansättningen av den vulkaniska askan och hur bentoniten bildats innehåller de även varierande andel kvarts, glimmer, fältspat och andra mineral.

Djupförvarets buffert planeras att tillverkas av vulkanisk bentonitlera från Wyoming i USA. Då bentoniten brutits torkas den. Därefter mals den sönder till ett fint pulver. Denna produkt kallas MX-80 och dess sammansättning samt några av dess egenskaper redovisas i *Tabell 8-1*. Både vattengenomsläpplighet, svälltryck och lerans bärighet beror av dess densitet eller täthet. Högre densitet, med tätt packade lerpartiklar, ger lägre vattengenomsläpplighet, högre svälltryck och bättre bärighet. För att få en hög densitet sammanpressas eller kompakteras det fina bentonitpulvret till block. Blocken av högkompakterad bentonit liknar till utseendet skiffer. Bentonitlera har naturligt låg vattengenomsläpplighet, bearbetningen och kompakteringen till en hög densitet gör den hydrauliska konduktiviteten än lägre, ca 10^{-13} – 10^{-14} m/s. Den höga densiteten bidrar också till att svälltrycket blir högt, ca 7 MPa.

Tabell 8-1 : Sammansättning och några egenskaper hos bentonit av typen MX-80.

Sammansättning hos MX-80		Några egenskaper hos MX-80	
Mineral	Viktsprocent	Egenskap	
Montmorilonit	75	Densitet (i djupförvaret)	2.0 – 2,1 kg/m ³
Kvarts	15		
Fältspat	5–8	Korndensitet	2,75 kg/m ³
Karbonat	1,4		
Glimmer	<1	Mellanlayersjon	86% Natrium (Na)
Pyrit	0,3–0,4	Svälltryck (i djupförvaret)	ca 7 MPa
Organiskt kol	0,4	Yta tillgänglig för sorption	560 m ² /g
Övrigt	2		

Mineralen i bentonitleran har stor betydelse för vattenkemin i bufferten. I fuktig bentonit kan vattnet delas in i tre typer beroende på hur vattenmolekylerna samverkar med mineralen i leran:

- fritt vatten – i porerna som inte direkt påverkas av krafter från mineralens ytor,
- adsorberat vatten – vatten som påverkas av mineralens ytor,
- strukturellt vatten – vatten som är byggstenar i mineralen.

I förvaret kommer bentoniten att innehålla ca 20 viktsprocent vatten. Eftersom den tillgängliga mineralytan är mycket stor är det osäkert om det överhuvudtaget existerar något vatten som inte är påverkat av mineralen, s k fritt vatten. Det krävs energi för att bentoniten ska lämna ifrån sig sitt vatteninnehåll. En bentonit som ska torkas måste värmas till 100°C–200°C för att det adsorberade vattnet ska avges. För att avlägsna det strukturella vattnet krävs temperaturer på 500°C–800°C /8-1/. Man skulle kunna säga att bentoniten har en förmåga att hålla fast och även dra åt sig vatten. Det är den egenskapen som gör att bentonitleran sväller i kontakt med vatten. Vattnets möjligheter att röra sig och delta i kemiska reaktioner påverkas också av lermineralen. Mineralen kan ses som stora orörliga negativt laddade joner som aktivt påverkar bentonitvattnet och de ämnen som är lösta i det. I *Figur 8-4* visas bentonitens väg från lertakten till djupförvaret. För varje steg visas schematiska skisser över lerans struktur. Då bentonitblocken placerats i djupförvaret och återfuktats får bufferten efterhand en struktur som påminner om den obrutna bentonitens.

8.3 Buffertens funktion

Buffertens primära uppgift är att bidra till isoleringen genom att skydda kapseln från de kemiska och mekaniska påfrestningar den kan tänkas utsättas för i förvaret. Om en kapsel skulle vara otät ska bufferten förhindra eller åtminstone fördröja och minimera den möjliga uttransporten av radionuklider.

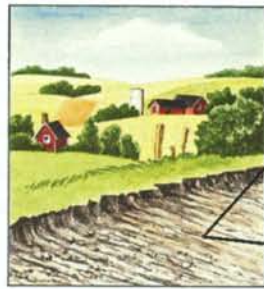
8.3.1 Isolera

Bufferten bidrar till isoleringen av det använda bränslet genom att:

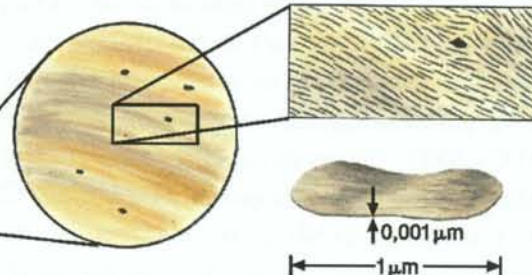
- förhindra korrosion av kapselns kopparhölje genom att hindra strömning av grundvatten och därigenom fördröja intransport av korrodanter till kapselns ytteryta,
- skydda kapseln genom att utgöra ett plastiskt skydd mot bergrörelser,
- bära och helt omge kapseln.

Förhindra kapselkorrosion

Redan berget erbjuder en kemisk miljö där koppar är mycket beständig mot korrosion. Bufferten bidrar till att skydda kapseln från korrosiva ämnen, s k *korrodanter*. Den vattenmättade bufferten har så låg hydraulisk konduktivitet att den helt förhindrar flöde av vatten. All transport av eventuella korrodanter i grundvattnet in till kapseln måste ske genom diffusion. Själva transporten äger rum i porerna mellan lerpartiklarna. Porerna är mycket trånga och kringelkrokiga. Olika sorptionsprocesser bidrar till att ytterligare begränsa diffusionen. Transporten av korrodanter in till kapselytan blir därför så långsam att den i sig blir en flaskhals för korrosionsprocesser.



Bentonit finns på många ställen i naturen, oftast ej i brytbar mängd.



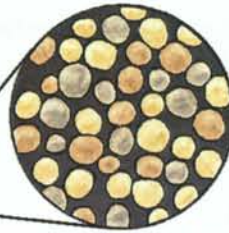
Lermineralerna har avsatts i skikt, med inslag av andra mineral.



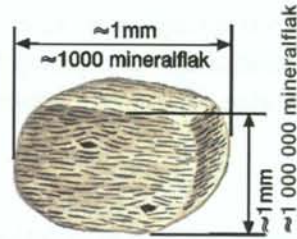
Lermineral har formen av mycket tunna flak.
 ↑ 0,001 μm
 ← 1 μm →



Efter brytning torkas och mals bentoniten.



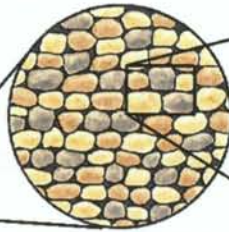
De malda kornen är millimeterstora.



Ett korn består av ca 1000 × 1000 × 1 000 000 mineralflak
 ≈ 1 mm
 ≈ 1000 mineralflak
 ≈ 1 mm
 ≈ 1 000 000 mineralflak



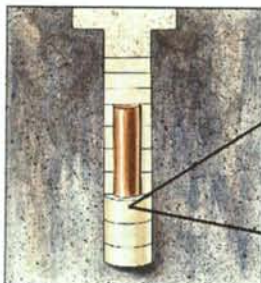
Bentonitpulvret pressas till block.



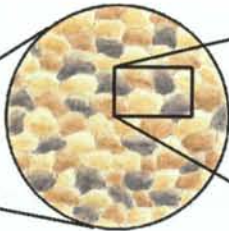
Kornen trycks ihop vid pressningen.



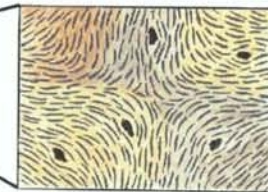
Små porer finns mellan kornen i de pressade blocken.



Bentonitblocken placeras runt kapseln i djupförvaret.



Vatten tränger in och kornen sväller.



Den uppsvällda leran har en tät struktur liknande den naturliga.

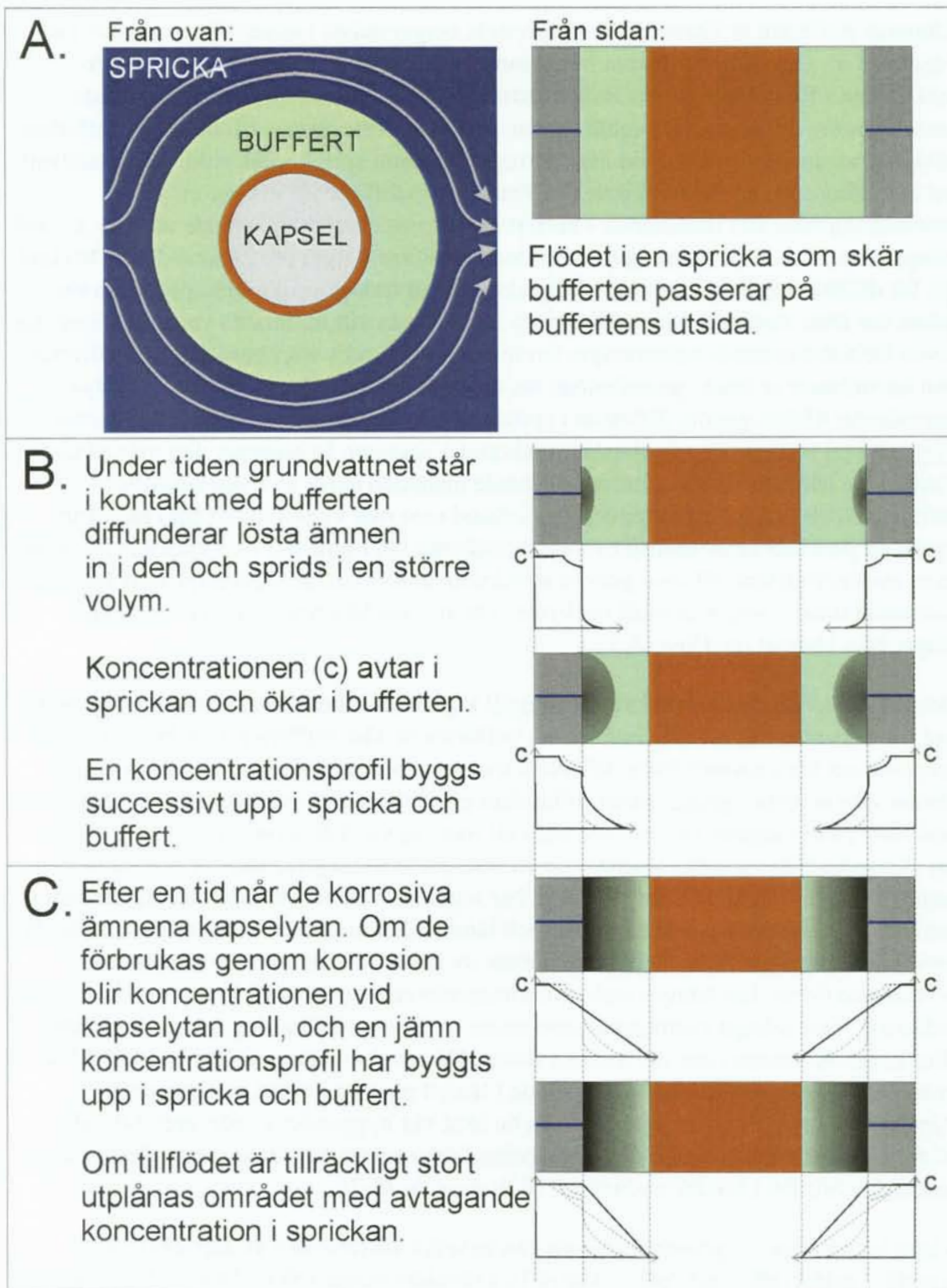
Figur 8-4: Bentonitens väg från lertäkten till djupförvaret. Leran bearbetas så att egenskaperna anpassas till djupförvarets funktionskrav.

Eftersom bufferten är tätare än det omgivande berget måste vattnet flöda runt den (se *Figur 8-5 a*). Om flödet är litet och långsamt är diffusion den viktigaste transportmekanismen för ämnen som är lösta i vattnet. I bufferten sker all transport av lösta ämnen genom diffusion. Den möjliga transporten av lösta ämnen till och från bufferten påverkas av antalet sprickor vid deponeringshålet samt sprickornas vidd. När grundvattnet i en trång spricka når bufferten kan lösta ämnen diffundera in över en större tvärsnittsytta eftersom transporten i bufferten sker i ett sammanhängande nätverk av små trånga porer. Det lösta ämnet sprids därmed i en större volym (se *Figur 8-5 b*). Drivkraften för diffusion är koncentrationsskillnader. För att transport in mot kapseln ska ske måste det lösta ämnets koncentration vara lägre där än vid buffertens yta mot berget. En given förbiströmmande vattenvolym har under en viss tid varit i kontakt med bufferten. Om korrodanter är lösta i grundvattnet tas de upp i bufferten genom diffusion. Nya korrodanter tillförs genom diffusion i sprickan. Den koncentrationsprofil som hinner byggas upp i buffert och spricka då grundvattnet passerar, bestämmer den mängd korrodanter som når kapseln. Den intransporterade mängden beror av koncentrationsskillnaden och transportmotståndet. Underhand som nytt vatten flödar till i sprickan byggs en jämn koncentrationsprofil upp i bufferten (se *Figur 8-5 c*). I sprickan transporteras nya korrodanter till även genom advektion. Om flödet är tillräckligt stort kommer koncentrationen i sprickan intill buffertens yta att vara lika hög som i grundvattnet längre bort i berget (se *Figur 8-5 c*).

Den mängd av ett ämne som kan föras in till kapseln blir beroende av hur mycket som kan tillföras via bergsprickan och hur tät bufferten är. Om bufferten vore helt tät skulle grundvattnet bara passera förbi. Eftersom transport genom diffusion är möjlig hinner ämnen som är lösta i grundvattnet diffundera in i bufferten då vattnet passerar. Eftersom små lösta joners *diffusivitet*, dvs förmåga att röra sig via diffusion, i vatten inte skiljer sig nämnvärt från varandra kommer de att transporteras ungefär lika fort vid samma koncentrationsskillnad. Under ett års tid har volymen vatten som kommer till bufferten med en viss koncentration korrodanter och lämnar den med koncentrationen noll, beräknats till maximalt ca 1 liter. Vid beräkningen av detta flöde, som brukar kallas det *ekvivalenta flödet*, har hänsyn tagits till transportmotståndet både i bergets sprickor och bufferten. Den mängd korrodanter som under ett år kan tillföras kapseln är innehållet, eller koncentrationen i det ekvivalenta flödet. Då det ekvivalenta flödet beräknats har man tagit hänsyn till ett lokalt större flöde i berget på grund av att vattengenomsläppligheten runt deponeringshålen kan ha ökat vid byggandet av förvaret. Om tillflödet vore obegränsat skulle det ekvivalenta flödet enbart begränsas av bufferten. I ett sådant fall blir det i storleksordningen 10 liter per år /8-2/.

Några komponenter i grundvatten som kan påverka korrosionen av kapseln är löst syre (O_2), sulfid (HS^-), pH ($pH = -\log(H^+)$), kväveföreningar (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+), klorid (Cl^-) och sulfat (SO_4^{2-}). Tillförseln av samtliga dessa komponenter begränsas tack vare buffertens täthet. Den maximala mängd som årligen når kapseln är innehållet i det ekvivalenta flödet. Nedan beskrivs buffertens inverkan på löst syre, sulfid och pH mer i detalj.

Löst syre förekommer normalt inte i grundvattnet på förvarsdjup. Skulle löst syre komma in i bufferten har den liksom berget en redoxbuffrande förmåga. Bentoniten



Figur 8-5: Transport av korrodanter genom bufferten. I figuren är koncentrationsprofilen symmetrisk, i verkligheten hinner ämnena på "uppströmssidan" diffundera in lite längre än på "nedströmssidan".

innehåller en liten andel, ca 0,3 %, av järnmineralet pyrit. Om grundvattnet i någon av sprickorna i deponeringshålets vägg skulle innehålla löst syre diffunderar det långsamt in och sprids i bufferten (se *Figur 8-5*). Det långsamt intransporterade lösta syret reagerar med pyriten och når inte kapselytan förrän all pyrit är förbrukad. I naturliga bentonittäkter kan man se spår av detta fenomen genom att det en bit under markytan finns en gräns mellan gulröd och gråblå bentonit. Löst syre finns i luften vid markytan. Då syret tränger ned och reagerar med järnmineral bildas en oxid som färgar bentoniten röd. På motsvarande sätt skulle ett område där pyriten förbrukats utvecklas i bentoniten runt en kapsel. Det skulle ta lång tid innan något syre når fram till kapselytan. Om all pyrit förbrukats och syretillförseln fortsätter begränsas den mängd syre som årligen når fram till kapseln av det ekvivalenta flödet.

Sulfid diffunderar lite långsammare genom leran än syret, dess diffusivitet i lera är lägre. Det gör att det ekvivalenta flödet för sulfid blir något mindre än för syre.

I porvattnet i bentonit hålls pH-värdet ofta inom intervallet 8–10. Det beror på att bentoniten har en viss pH-buffrande förmåga tack vare att lerflakens hydroxid kan plocka upp och/eller avge vätejoner. Grundvattnets salthalt kan genom jonbytesprocesser påverka pH-värdet i bufferten. Eftersom väte liksom natrium och kalcium är positivt laddade joner konkurrerar de om utrymmet mellan mineralflaken. Om bentoniten står i kontakt med en relativt koncentrerad saltlösning, t ex av natriumklorid, kommer natriumjoner att tränga in i bufferten och ta en del av vätejonernas platser vid mineralflakens ytor. Halten fria vätejoner kommer att öka vilket leder till ett något lägre pH. På motsvarande sätt kommer ett grundvatten som innehåller få lösta joner att dra ut katjoner ur bentoniten. Fria vätejoner kommer då att bindas till mineralflaken, vilket leder till att halten av fria vätejoner minskar och pH-värdet höjs. Även vissa av de mineral som ingår i leran i mindre mängder, t ex karbonater, liksom organiska orenheter och sulfid påverkar porvattnets pH-värde. Karbonater kan öka pH något medan organiska orenheter och sulfid kan bidra till att sänka pH om de skulle oxideras.

Skydda kapseln från mekaniska belastningar

Vattenhalten i bentonitleran i förvaret kommer att ligga inom intervallet där leran har plastisk konsistens. Om ett plastiskt material utsätts för yttre påfrestningar får det en kvarstående formförändring. Detta till skillnad från ett elastiskt material där deformationen går tillbaka efter avlastning. En plastisk deformation är stum; en plastisk lerklump som släpps i golvet studsar inte, rörelseenergin som den hade i fallet förbrukas vid den plastiska deformationen då den slår i golvet. Materialets egenskaper är desamma som före deformationen, det enda som förändrats är formen. De små rörelser som kan tänkas uppstå i berget invid deponeringshålen tas på motsvarande sätt upp genom plastiska deformationer i lerbufferten. Tack vare den plastiska konsistensen och svälltrycket kommer bufferten att förbli tät och fylla hela utrymmet mellan kapsel och berg även efter en deformation.

Då deponeringshålet borrar förändras spänningstillståndet i det omgivande berget. Buffertens svälltryck bidrar till att i huvudsak återställa det ursprungliga spänningstillståndet. Om lösa bergblock förekommer hindras de att falla ut. Även detta bidrar till den mekaniska stabiliteten.

Bära och helt omge kapseln

En förutsättning för att få buffertverkan runt hela kapseln är naturligtvis att den helt omges av buffertmaterial. I detta fall innebär det dels att bufferten måste kunna bära den flera ton tunga kapseln och hålla den centrerad i deponeringshålet och dels att den måste stanna kvar i deponeringshålet.

Bentonitens bärighet beror som tidigare nämnts av densiteten. De kompakterade bentonitblocken, som hållfasthetsmässigt är jämförbara med sedimentära bergarter, förmår bära kapseln. Då bufferten vattenmättats får den en plastisk konsistens och kapseln kan på grund av tyngdkraften sjunka ned i leran. Eftersom blocken i torrt tillstånd inte upptar hela utrymmet mellan kapsel och berg leder den inledande vattenmättnaden och därav följande svällningen till en viss förändring av densiteten. I deponeringshålen blir medeldensiteten vid full vattenmättnad 2,0–2,1 ton/m³. För denna densitet har kapselns nedsjunkning på grund av tyngdkraften beräknats bli mindre än 10 mm efter 1 miljon år /8-3/.

Bentonit i kontakt med vatten från en bergsspricka sväller och tenderar att tränga ut i sprickan. Utträngningen motverkas av ett strömningsmotstånd beroende på inre krafter i bentoniten och av friktionen mot sprickväggarna. Den maximala mängden bentonit som kan tränga ut i berget har beräknats för några olika förutsättningar vad gäller spricktäthet, sprickvidd och strömningsmotstånd. I ett extremt fall, där deponeringshålet korsas av 75 sprickor med en maximal vidd på 2,5 mm och med strömningsmotstånd endast i sprickor med en vidd under 1 mm, har densiteten i bufferten beräknats minska till 1,9 ton/m³ på en miljon år /8-4/. Även denna densitet är tillräcklig för att upprätthålla svälltryck och bärförmåga. I normala fall antas ett deponeringshål korsas av max 10 sprickor med en sprickvidd av någon tiondels millimeter.

Man skulle också kunna tänka sig att bentoniten eroderades bort av strömmande grundvatten. Vattenhastigheten i sprickorna runt deponeringshålen är dock inte tillräcklig för att mekaniskt avskilja partiklar från bentoniten som även med höga vattenhalter bildar en stabil gel i grundvatten. Även vattnets sammansättning har betydelse för gelens stabilitet. I destillerat vatten kan kolloidala partiklar bildas. Innehåller vattnet katjoner motverkas denna process. I grundvatten innebär det att halten kalcium (Ca²⁺) ska vara minst 4 mg/l. Normala kalciumhalter i djupa grundvatten är 10– 2000 mg/l.

8.3.2 Hålla kvar och fördröja samt fördela i tid och rum

Bufferten bidrar till att hålla kvar och fördröja radionuklider genom att:

- förhindra strömning av grundvatten och därigenom förhindra och fördröja uttransport av radionuklider,
- filtrera kolloider.

Om kapseln skulle vara otät måste radionukliderna även tränga igenom bufferten för att de ska kunna transporteras vidare genom berget. Transport genom bufferten kan bara ske genom diffusion, som är en utomordentligt långsam process. Härigenom kan bufferten helt förhindra eller åtminstone fördröja och minimera den möjliga uttransporten av radionuklider.

Flertalet radionuklider är metaller och förekommer som katjoner om de löses från det använda bränslet. Bufferten har god förmåga att sorbera katjoner. Katjonerna adsorberas dels genom jonbyte och dels genom bindning till lermineralens hydroxidgrupper (OH⁻). Katjoner i en vattenlösning omges av hydroxid eller vattenmolekyler; man säger att de bildar hydro- respektive akvakomplex. Olika joner uppträder i olika former vid olika pH. Lermineralen föredrar vissa joner före andra, detta kallas *selektivitet*. I allmänhet adsorberar hydrokomplex starkare än akvakomplex. Vilken jon som föredras beror också av koncentrationsförhållanden. Som tidigare nämnts påverkar katjonerna mellan mineralflaken svällningen. Detta i sin tur påverkar selektiviteten och även reversibiliteten.

Katjonadsorbition i bentonit är således komplex, men även om de kemiska processerna inte kan beskrivas i detalj kan adsorbitionen mätas. Mätresultaten redovisas ofta som den sk fördelningskoefficienten (K_d). Fördelningskoefficienten anger koncentrationen i det fasta materialet (c_s) i relation till koncentrationen i vattnet (c_w) vid jämvikt. Fördelningskoefficienten ($K_d = c_s/c_w$) mäts under olika förhållanden som funktion av betydelsefulla parametrar som t ex pH, vattnets totala saltinnehåll och lerans mineral-sammansättning. I säkerhetsanalyser används ofta konservativt satta konstanta fördelningskoefficienter som grundar sig på mätningar från ogynnsamma men realistiska förhållanden.

En radionuklid som når bufferten och börjar diffundera ut i lerans porvatten kommer att röra sig mycket långsamt. De molekyler som först når porvattnet kommer att sorberas på lermineralen. Först när jämvikt mellan koncentrationerna i det fasta materialet och vattnet uppnåtts kan radionukliden vandra vidare. Det kan ta flera tusen år innan de första spåren av en sorberande radionuklid når buffertens utsida. Tiden det tar för en nuklid att nå buffertens utsida brukar kallas genombrottstiden och definieras som den tid det tar innan koncentrationen på utsidan av bufferten är 5 % av koncentrationen på dess insida.

Om genombrottstiden är lång i förhållande till nuklidens halveringstid hinner radioaktiviteten, och därmed nuklidens farlighet att avta i bufferten. Om genombrottstid och halveringstid är lika långa hinner aktiviteten halveras i bufferten, är genombrottstiden 10 gånger halveringstiden minskar aktiviteten till en tusendel (eg $1/1024 = 1/2^{10}$).

I *Tabell 8-2* redovisas halveringstid, samt den ungefärliga transporttiden genom bufferten för några viktiga radionuklider. Genom att relatera transporttiden till respektive

Tabell 8-2 : Halveringstid, fördröjning i bufferten samt ungefär hur mycket som sönderfaller i bufferten för några viktiga radionuklider.

Nuklid	Fördröjning [År]	Halveringstid [År]	Sönderfallit [%]
Americium-243 (Am-243)	187 000	7 380	100
Americium-241* (Am-241)	187 000	432	100
Plutonium-239 (Pu-239)	3,1 miljoner	24 100	100
Plutonium-238 (Pu-238)	3,1 miljoner	87,7	100
Neptunium-237 (Np-237)	187 000	2,1 miljoner	6
Radium-226* (Ra-226)	126	1 600	5
Cesium-137 (Cs-137)	12,6	30,1	25
Strontium-90 (Sr-90)	2,6	29,1	6
Teknetium-99 (Tc-99)	6 200	0,2 miljoner	2
Jod-129 (I-129)	394	15,7 miljoner	0
Klor-36 (Cl-36)	394	0,3 miljoner	0

*) Ingår i sönderfallskedjor och växer in, vilket innebär att halten kan öka med tiden.

nuklids halveringstid har en skattning av sönderfallet i bufferten gjorts. De radionuklider som sönderfaller i bufferten når aldrig berget.

Då genombrottstiden uppnåtts kommer uttransporten av radionuklider från bufferten att ske på motsvarande sätt som intransporten av korrodanter. Den möjliga borttransporten blir beroende av antalet vattenförande sprickor som skär deponeringshålet samt sprickornas vidd. När vattnet i en spricka når bufferten kan radionuklider vid buffertytan diffundera ut i grundvattnet. Nya radionuklider tillförs genom hålet i kapseln och diffusion i bufferten. En given vattenvolym som passerar deponeringshålet har under en viss tid varit i kontakt med bufferten. Den koncentrationsprofil som hinner byggas upp i sprickan under denna tid bestämmer mängden radionuklider som förs bort från bufferten. Den borttransporterade mängden beror dels på hur mycket som hinner diffundera ut i sprickorna och dels på hur mycket som hinner tillföras från bufferten och hålet i

kapseln. Förloppet är det omvända till den tidigare beskrivna intransporten av korrodanter. För uttransporten tillkommer ytterligare ett transportmotstånd, nämligen kapseln.

Om kapseln och/eller bufferten vore helt täta skulle grundvattnet passera förbi utan att ta med sig några radionuklider. Eftersom en viss mängd nuklider hinner transporteras ut till buffertytan kan de diffundera in i grundvattnet då det passerar förbi i sprickan. Liksom för intransporten av korrodanter kan ett tänkt flöde som lämnar bufferten med nuklidens mättnadskoncentration beräknas med hänsyn till transportmotståndet i kapselhålet, bufferten och bergsprickan. Detta s k ekvivalenta flöde blir mindre för uttransporten av nuklider än för intransporten av korrodanter eftersom kapseln bidrar till att öka transportmotståndet. Det ekvivalenta flödet för uttransport av radionuklider blir 10–1 000 gånger mindre än för intransporten av korrodanter beroende på hur stort hålet i kapseln är. Den mängd vatten som årligen lämnar kapseln med mättnadskoncentration blir därmed i storleksordningen milliliter till deciliter.

Den transporterade mängden av en nuklid beror både på transportmotståndet och hur mycket av nukliden som kan hållas löst i vattnet. Många svårlösliga katjoner har en tendens att bilda s k *kolloider*. Kolloider är partiklar som är så små att de inte sedimenterar, dvs mindre än 1 mm i diameter. Kolloiderna fälls inte ut på samma sätt som jonerna, det gör att mängden nuklid som finns i vattnet kan överskrida den mängd som begränsas av nuklidens löslighet. Bufferten fungerar som ett filter för kolloider. Bland annat tack vare att porerna i kompakterad bentonit är så trånga att de stora molekylerna inte tar sig igenom. Dessutom tenderar kolloiderna att sorbera på lermineralen.

8.4 Buffertens förväntade utveckling

8.4.1 På kort sikt – återfuktningssfasen

Efter deponeringen stängs förvarstunnlarna och grundvattnet rör sig tillbaka in i förvarsområdet. Vattnet tränger in i deponeringshålen och sugs upp av buffertens bentonitlera. Bentoniten sväller och fyller utrymmet mellan kapsel och berg. Först vattenfylles porerna mellan lermineralkornen, sedan sugs vattnet in mellan mineralflaken i kornen. Lerkornen expanderar och trycker ihop porerna. Vattenupptagningen går allt långsammare.

Lermineralflak på kornens ytor bladar ut sig och en del av dem frigörs och bildar en gel tillsammans med vattnet i porerna. Efter en tid erhålls en relativt homogen mikrostruktur (se *Figur 8-4*). Hela vattenmättnadsförloppet förväntas ta tiotal år.

Då bentoniten tar upp vatten alstras värme, s k bevätningsvärme, och temperaturen stiger något. Den högre vattenhalten leder också till en ökning av värmeledningsförmågan, så värmen från kapseln lättare leds bort. De båda effekterna tar ut varandra. Vid mätningar i forskningsgruvan Stripa har bevätningsvärmen inte kunnat urskiljas från värme motsvarande den som alstras av det använda bränslet. Det är viktigt att

värmen kan ledas bort eftersom höga temperaturer stimulerar processer som försämrar buffertens egenskaper.

8.4.2 På lång sikt

Analys av mineralinnehållet i tusentals lersediment jorden över visar att mineral-sammansättningen i första hand beror på vad sedimenten bildats av och i stort sett är oberoende av hur sedimenten avsatts (ett undantag är lermineralet klorit). Bristen på samband mellan mineralsammansättning och avlagringsmiljö indikerar att lermineralen i allmänhet är beständiga och okänsliga för omgivningsfaktorer /8-5/. Flera smektit-förekomster har en ålder på hundratals miljoner år.

Det finns flera naturliga exempel på att bentonitlera är beständig över mycket långa tidsperioder. I naturen, i s k naturliga analogier, har även processer som förändrar bentonitlerans egenskaper studerats. *Illitisering* och *cementering* är benämningen på två viktiga sådana processer. De beskrivs nedan. En annan process som påverkar bentonitens egenskaper är utbyte av mellanlagrets katjon från natrium till kalcium.

Smektitleror kan genom illitisering omvandlas till illitleror. Mineralflaken i illit har något högre laddningstäthet än hos smektit och katjonen (oftast kalium) passar väl in i mineralstrukturen. Mineralflaken hålls ihop och vatten kan inte ta sig in mellan dem. Därför har illit avsevärt sämre svällförmåga, sämre jonbytesförmåga och högre hydraulisk konduktivitet än smektiter.

Illitisering av bentonitlera har studerats teoretiskt i beräkningsmodeller, i laboratorier samt i naturliga analogier. Studierna har visat att omvandling av montmorillonit till illit kräver aktiveringsenergi, hög temperatur och tillgång på kalium. En studie av bentoniter från Sardinien /8-6/ visar att vid en kritisk temperatur på ca 150°C omvandlas montmorillonit till beidellit. Även beidellit tillhör gruppen smektiter. För att ytterligare omvandling till illit ska ske krävs tillgång på kalium. Dessa resultat i kombination med modellberäkningar har lett till slutsatsen att illitisering inte utgör något hot mot buffertens beständighet. Slutsatsen gäller för den kaliumtillgång som kan förväntas på förvarsdjup och temperaturer under ca 130°C. Temperaturen i förvaret hålls under denna nivå genom att antalet bränsleelement i kapslarna begränsas och avståndet mellan deponeringshålen görs tillräckligt stort. Man kan dock inte utesluta att en viss illitisering sker även under förvarsförhållanden. Processen är så långsam att maximalt någon procent av montmorilloniten omvandlas under 100 000 år.

Cementering är ett samlingsnamn på flera olika processer som leder till att bentonitens egenskaper påverkas på ett likartat sätt. Vid cementering försämrar smektiternas svällförmåga och de reologiska egenskaperna påverkas så att leran blir sprödare och mindre plastisk. Även jonbytesförmågan kan försämrar. Kemiska föreningar kan bildas i utrymmet mellan lermineralflaken och hindra vatten att ta sig in. Om jonerna mellan lermineralflaken håller ihop dem, och ogärna drar till sig vatten, fås en liknade effekt. Igensättning av porerna mellan lerpartiklarna kan hindra vatten att transporteras in i

leran, så svällningen försämras på grund av vattenbrist. Samtliga dessa processer brukar kallas cementering.

Cementering kan förekomma vid förvarsförhållanden. Vid mekaniskt stabila förhållanden har även en cementerad bentonit acceptabla buffertegenskaper. Om en cementerad bentonit utsätts för mekaniska påfrestningar kan dock sprickor uppstå. I sprickorna kan vatten flöda och kolloider passera. Om smektitinnehållet i bufferten är tillräckligt stort kommer dock sprickorna att självläka. En smektithalt på 15–25 % bedöms vara tillräcklig för att få självläkning /8-6/.

Montmorillonit föredrar kalcium före natrium som mellanlagarsjon. Kalciumbentoniter har sämre svällförmåga och något högre hydraulisk konduktivitet än natriumbentoniter. Vid den densitet buffertmaterialet kommer att ha i förvaret är dock skillnaden mellan kalcium- och natriumbentoniter liten. Beräkningar av bentonitens kalciuminnehåll har gjorts för de förhållanden som råder vid Äspö-laboratoriet. Efter vattenmättnad upptas ca 20 % av absorptionsplatserna av kalcium. Andelen kalcium ökar med tiden, och har efter 150 000 år beräknats till ca 40 % /8-7/.

För att undersöka vilka egenskaper bufferten kan tänkas ha mycket långt in i framtiden har ett antal naturliga smektitleror undersökts. Leror från sju lertäkter vars sammansättningar bedöms vara likvärdiga med de som skulle kunna tänkas utvecklas i förvaret undersöktes. Lerorna var tiotals till hundratals miljoner år gamla. Samtliga leror hade egenskaper som gjorde dem lämpliga som buffertmaterial, trots att tre av dem var cementerade. Resultaten indikerar att vid förvarsförhållanden kommer buffertmaterialets goda egenskaper att kunna bevaras under mycket långa tidsperioder även om de kemiska påfrestningarna blir stora /8-6/.

9 Kapseln

Sammanfattning – Kapseln



KAPSELN

Isolera:

- innesluter helt det använda bränslet
- kopparhöljet gör kapseln tät
- gjutjärnsinsatsen ger mekanisk hållfasthet

Hålla kvar och fördröja:

- oskadade delar av en defekt kapsel begränsar in- och uttransport av vatten

Figur 9-1: Kapseln.

Kapseln har konstruerats för att motstå de kemiska och mekaniska påfrestningar den kan tänkas utsättas för i djupförvaret. Den består av ett kopparhölje och en insats av gjutjärn (se Figur 9-2).

Krav på kapseln

Kopparkapseln har dimensionerats för att under lång tid motstå korrosionsangrepp. Kapselns gjutjärnsinsats ska tåla de mekaniska belastningar kapseln utsätts för i djupförvaret. Dessutom är kapseln utformad så att strålning och temperatur inte blir för höga samt ingen risk för kriticitet finns.

Koppar och järn

Koppar har valts som material i kapselns täta hölje på grund av sin korrosionsbeständighet. Koppar är den ädlaste av de vanliga konstruktionsmetallerna. Koppar korroderar inte i rent vatten. För att koppar ska korrodera krävs närvaro av korrosiva ämnen i vattnet. Koppar är en duktil, tånjbar, metall som tål stora plastiska deformationer utan att spricka.

Järn är ett av våra vanligaste konstruktionsmaterial och dess egenskaper är väl utredda.

Korrosion

Termen korrosion används mest om metaller. Vid metallkorrosion avger metallen elektroner, oxideras, elektronerna tas upp av en oxidant. För att metallkorrosion ska äga rum krävs närvaro av metall och ett oxidationsmedel. Beroende på korrosionsangreppets karaktär skiljer man mellan olika typer av korrosion (se *Figur 9-5*). Jämn korrosion eller allmänkorrosion sker med ungefär samma hastighet över hela metallytan. Gropfrätning, eller punktkorrosion, leder till bildning av gropar på metallens yta. Kvoten mellan korrosionsdjupet i gropar och det allmänna korrosionsdjupet brukar kallas gropfrätningfaktorn.

Kopparkorrosion

Om det finns syre löst i vattnet korroderar koppar. Ämnen i grundvatten och buffert som kan orsaka korrosion är sulfid (HS^-), klorid (Cl^-), sulfat (SO_4^{2-}) och nitrat (NO_3^-). I närvaro av sulfid kan vätejoner i vattnet fungera som oxidationsmedel och kopparn korroderar. Vid lågt pH kan kopparn reagera med kloridjoner och bilda kopparklorid. Med bakterier som katalysator kan sulfat orsaka kopparkorrosion.

Järnkorrosion

Järn korroderar lättare än koppar. I djupförvaret där vattnet är fritt från löst syre reagerar järn med vatten under bildning av magnetit och vätgas. Magnetiten bildar ett skyddande skikt på ytan som gör att korrosionshastigheten avtar.

Kapselns funktion

Isolera

Kapselns kopparhölje bidrar till isoleringen genom att innesluta det använda bränslet så att inga radionuklider kan lämna kapseln. Gjutjärnsinsatsen bidrar till isoleringen genom att ge kapseln mekanisk hållfasthet.

Hålla kvar och fördröja samt fördela i tid och rum

Även en otät kapsel har stor förmåga att hålla kvar radionukliderna. Vatten måste först ta sig in i kapseln och lösa radionuklider från bränslet. De lösta radionukliderna ska sedan transporteras ut ur kapseln. Transporten begränsas av zirkaloyrören som bränslet är inneslutet i, gjutjärnsinsatsen och storleken på hålet i kopparhöljet.

Kapselns förväntade utveckling

Kapseln förväntas bli intakt under mycket långa tidsperioder. Den kommer dock att utsättas för vissa korrosionsangrepp och mekaniska påfrestningar.

Kopparkorrosion har studerats i flera naturliga analogier. Sammanställning av data från ett antal sådana studier ger en korrosionshastighet på 0,000001–0,001 mm per år (1 mm på 1 000–1 000 000 år). I samband med att förvaret byggs kommer syre att föras ned på förvarsdjup. Det mesta av detta syre kommer att reagera med järnmineral i berg, tunnelåterfyllnad och bentonit och når aldrig kapseln. Den korrosion syret beräknats leda till redovisas i *Tabell 9-1*. Av de övriga tänkbara korrodanterna sulfid (HS^-), klorid (Cl^-), sulfat (SO_4^{2-}) och nitrat (NO_3^-) är det endast sulfid som är av betydelse. Korrosion på grund av nitrat sker inte vid de tryck och temperaturer som råder på förvarsdjup. Klorid kräver lågt pH och sulfat närvaro av bakterier som katalysator. Låga pH förekommer normalt inte på förvarsdjup, bufferten har dessutom kapacitet att hålla pH inom acceptabla nivåer. Bakterier kan inte överleva i bufferten. Sulfid finns i buffert och tunnelåterfyllnad, små mängder finns också i grundvattnet. Om sulfid når kapseln orsakar den kopparkorrosion. En enkel massbalansberäkning av sulfidkorrosionen redovisas i *Figur 9-7*. Resultaten från en mer realistisk beräkning av sulfidkorrosionen, där man tagit hänsyn till reaktionens förlopp och diffusionen genom bufferten, redovisas i *Tabell 9-1*.

De små mängder vatten och luft som kan finnas kvar i kapseln då den förslutits orsakar begränsade korrosionsangrepp på gjutjärnsinsatsen. Bortsett från det krävs hål på kopparhöljet för att gjutjärnsinsatsen ska korrodera. Om det går hål på höljet och vatten tar sig in i kapseln korroderar järnet. Vid korrosionen bildas vätgas. Ett gastryck som stryker intransporten av vatten uppstår, vatten i form av ånga kan dock fortfarande diffundera in i kapseln. Då järnet korroderar bildas magnetit som långsamt fyller kapseln. Under pessimistiska antaganden har gjutjärnsinsatsen beräknats mista sin bärförmåga 10 000 år efter ett läckage på kopparhöljet uppstått. Kapseln är då fylld av magnetit så den kollapsar inte men är känslig för yttre belastningar. Magnetit har mindre densitet än järn och trycket från den bildade magnetiten kan skada kopparhölje och bränsleelement. Magnetiten hindrar också vattnet att röra sig.

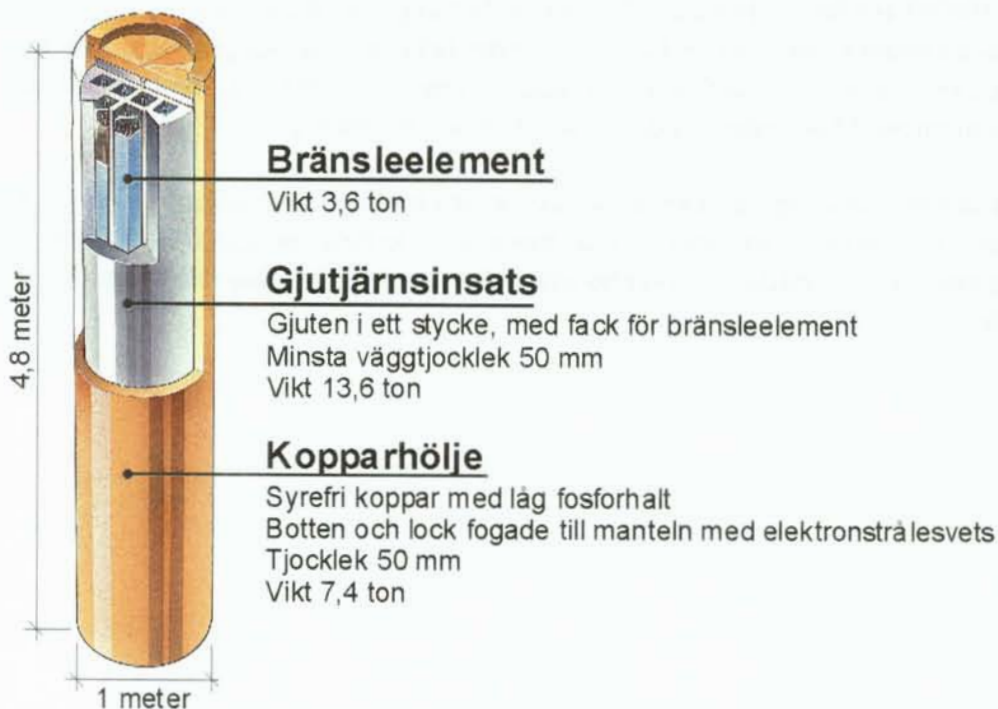
I samband med glaciationer kan det hydrostatiska trycket öka med upp till ca 20 MPa. I normala fall kommer kapslarna att tåla denna last. De belastningar kapseln kan komma att utsättas för vid jordskalv förväntas inte heller kunna skada kapseln så en otäthet uppstår.

9.1 Inledning

Kapselns uppgift är att under lång tid helt innesluta det använda bränslet. Kapslarna är utformade så att de förblir täta under mycket långa tidsperioder. Kapseln har konstruerats för att motstå de kemiska och mekaniska påfrestningar den kan tänkas utsättas för i djupförvaret. Den består av ett kopparhölje och en insats av gjutjärn. Kopparhöljet är tätt och skyddar mot kemiska angrepp. Gjutjärnsinsatsen står för den mekaniska hållfastheten. I *Figur 9-2* visas kapselns planerade utformning, den s k referenskapseln.

9.2 Krav på kapseln

Vid bestämning av kopparhöljets dimensioner har man tagit hänsyn till koppars korrosionshastighet och avklingningstakten hos de radioaktiva ämnena. Kopparhöljets vägg tjocklek avgör hur lång tid det tar innan kapseln penetrerats på grund av korrosion. Kapseln bör vara tät åtminstone till dess att det använda bränslets radioaktivitet avklingat till nivåer jämförbara med aktiviteten hos naturligt uran, dvs ca 100 000 år. Förutom krav på täthet, korrosionsbeständighet och hållfasthet ställs följande krav på kapseln och dess utformning:



Figur 9-2: Kapsel för använt kärnbränsle. Kapseln består av ett kopparhölje och en insats av gjutjärn. Kapseln väger 24,6 ton.

- värme och strålning ska begränsas; höga temperaturer kan orsaka processer som försämrar buffertens egenskaper, strålning kan indirekt påverka korrosionen av kopparhöljet,
- bottenstrycket mot bufferten får inte bli för stort; kapselns vikt och utformning får inte vara sådan att den sjunker ned genom bufferten,
- ingen risk för kriticitet om vatten skulle komma in i kapseln.

Kapselns temperatur och strålningen vid dess yta beror av bränsleelementens utbränning och ålder, samt hur många bränsleelement som placeras i varje kapsel. Strålningen på utsidan beror även av kapselns tjocklek. Strålningen kan leda till så kallad *radiolys*. Vid radiolys sönderdelas vatten på grund av gamma- och neutron-strålningen från bränslet så att oxidanter (väteperoxid) bildas. Halten bildade oxidanter bör vara liten i förhållande till de mängder oxidanter som normalt förekommer i förvaret. En låg strålningsnivå gör också kapseln mer lätthanterlig med hänsyn till strålskyddet för driftspersonalen. Värme och strålning, liksom bottenstrycket, begränsas genom en lämplig utformning av kapseln.

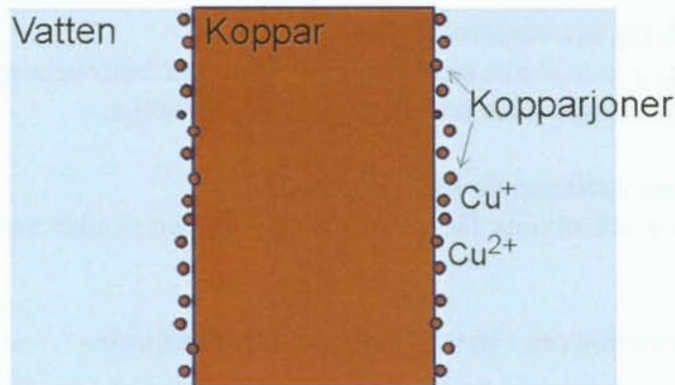
Kriticitet kan uppstå om klyvbart material (uran-235 och/eller plutonium-239, -241) blandas med vatten eller vissa andra lätta ämnen (t ex grafit) på ett sådant sätt att en självunderhållande kärnklyvningsreaktion kommer i gång. I ett kärnkraftverk arrangeras bränsleelementen så att en kontrollerad kärnklyvningsprocess upprätthålls. Vid all annan hantering av kärnbränsle undviks kriticitet. I referenskapseln undviks risk för kriticitet genom att en minsta utbränning garanteras för bränsleelementen. Dessutom hålls elementen åtskilda i de gjutna kanalerna i gjutjärnsinsatsen.

Den kapselutformning som visas i *Figur 9-2* är inte slutgiltig. Olika alternativ studeras, gemensamt för dem alla är ett kopparhölje som skyddar mot korrosion och en inre tryckbärande komponent som ger mekanisk hållfasthet. Olika kopparkvaliteter kan bli aktuella. För den inre komponenten kan alternativa utformningar och material komma ifråga (se t ex *Figur 9-1*). Olika tillverkningsmetoder kommer också att utvärderas. Valet av utformning och tillverkningsmetod görs mot bakgrund av djupförvarets funktionskrav, radiologiska risker för driftspersonal, driftsäkerhet, miljö och ekonomi. Möjligheterna att utföra en gedigen kvalitetskontroll av de färdiga kapslarna är också mycket viktiga. Brister i kontrollen av kapslarna kan vara det största hotet mot deras integritet.

9.3 Koppar och järn

9.3.1 Koppar

Koppar har valts som material i kapselns täta hölje på grund av sin korrosionsbeständighet. Koppar är den äldste av de vanliga konstruktionsmetallerna. Koppar är



Figur 9-3: En kopparplåt nedsänkt i rent vatten.

termodynamiskt stabil i rent vatten. Det betyder att om man sänker ned en bit kopparplåt i rent vatten råder jämvikt mellan kopparn och vattnet. Synbart händer absolut ingenting. Tittar man på molykylärnivå har dock ett antal kopparatomer lämnat kopparplåten i form av kopparjoner. Jonerna finns helt nära plåten. Vid jämvikt sker inget flöde av koppar från plåten via jonskiktet till vattnet, kopparn är stabil (se Figur 9-3). Jämvikten mellan kopparn och vattnet kan endast rubbas om ett ämne som förmår binda kopparjoner till sig finns löst i vattnet. Nya kopparjoner förs då från plåten till jonskiktet och plåten korroderar. Att kopparn är stabil i rent vatten innebär att bedömningar av korrosionen kan grunda sig på en inventering av de ämnen som kan rubba vatten-kopparsystemets kemiska stabilitet, samt i vilka mängder dessa ämnen kan tänkas förekomma.

Överslag av maximala mängder korroderad koppar kan göras med enkla massbalansberäkningar. Vid analys av korrosionsprocessernas förlopp är det inte nödvändigt att exakt modellera alla detaljer.

En annan viktig egenskap hos koppar är dess duktilitet. Duktilitet kommer från latinets ductilis som betyder tånjbar. Ett duktilt material tål stora plastiska deformationer utan sprickbildning. Vid en plastisk deformation får materialet en kvarstående formförändring. Koppar är mycket formbart, beroende på belastningens art tål koppar mycket stora deformationer utan att brista, en egenskap som t ex utnyttjas vid smidesarbeten och i konsthantverk. I djupförvaret är det framförallt koppars s k krypduktilitet som är av intresse. Krypning är en långsam fortgående deformation. Krypdeformationer i metaller har plastisk karaktär.

Koppars egenskaper kan varieras inom vissa gränser. De egenskaper man är intresserad av är korrosionsegenskaper, krypduktilitet, svetsbarhet samt möjligheterna att kontrollera den färdiga kapseln. De materialparametrar som kan varieras är kornstorlek, halt av föroreningar och legeringsämnen. Olika varianter har, och kommer att, testas. I referenskapseln används en koppar med en högsta kornstorlek på 0,25 mm, en tillsats på 40–60 ppm (**p**arts **p**er **m**illion) fosfor, samt högsta tillåtna föroreningshalter av syre, väte och svavel på 10, 2 respektive 6 ppm.

9.3.2 Järn

Järn är ett av våra vanligaste konstruktionsmaterial. Stål är en legering av järn och kol. Kolhalten i stål är mindre än 2 %, är kolhalten större kallas legeringen gjutjärn, tackjärn eller råjärn. Järnets egenskaper kan varieras genom inblandning av legeringsämnen, och genom olika typer av bearbetning. Egenskaperna hos olika järnlegeringar är väl utredda. Erfarenheterna är stora både vad gäller materialets egenskaper och funktionen i olika typer av konstruktioner. Referenskapselns insats planeras att tillverkas av gjutjärn. Tillräcklig tryckhållfasthet och duktilitet kan uppnås även med andra materialvarianter. Provgjutning av en insats har genomförts med gott resultat.

9.3.3 Korrosion

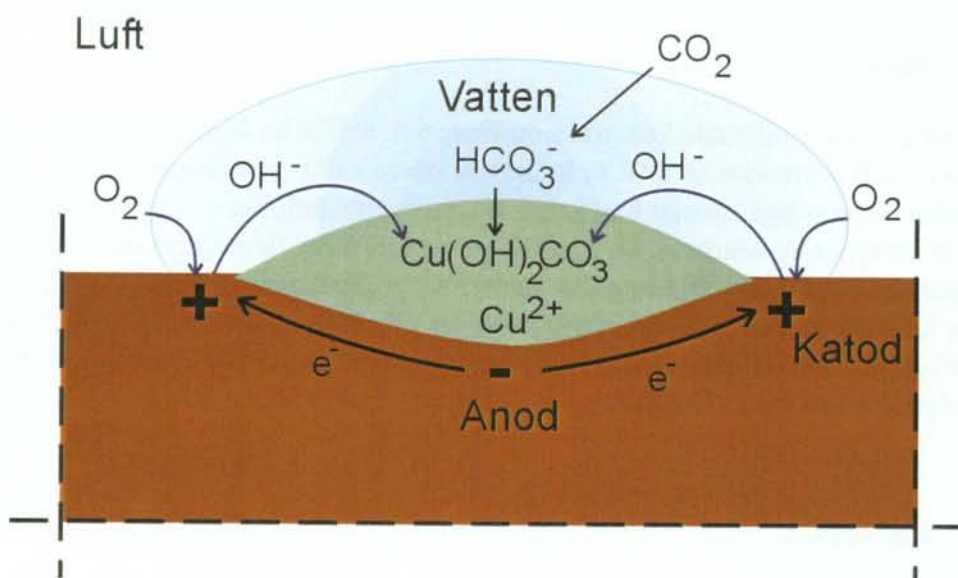
Allmänt

Korrosion är en redoxprocess. En redoxprocess är en kemisk reaktion i vilken ett ämne upptar elektroner, reduceras, och ett ämne avger elektroner, oxideras. Vid korrosion avger det korroderande ämnet elektroner. Eftersom elektroner inte kan existera fritt, de måste vara bundna till något ämne, krävs närvaro av en oxidant, ett ämne som kan ta upp elektroner för att redoxprocessen ska äga rum. Ursprungligen avsåg oxidation bildning av oxid, dvs en förening med syre. Syre är också ett starkt oxidationsmedel. Andra exempel på oxidationsmedel är klor och svavel. Väte kan både lämna och ta upp en elektron. Som oxidationsmedel, upptagare av elektroner, är väte inte alls lika starkt som syre.

Termen korrosion används mest om metaller. Vid metallkorrosion avger metallen elektroner, oxideras, elektronerna tas upp av en oxidant. Metallkorrosion sker i elektrokemiska celler, s k korrosionsceller. En korrosionscell består av en anod, en katod och en elektrolyt. Vid anoden avger metallen elektroner, oxideras. Vid katoden upptas elektronerna av något oxidationsmedel. Elektrolyten leder strömmen, den s k korrosionsströmmen, genom cellen. För att metallkorrosion ska äga rum krävs således närvaro av metall, oxidant och elektrolyt. I *Figur 9-4* visas en korrosionscell under en vattendroppe på en kopparplåt.

Grundorsaken till metallkorrosion är att metallen inte är stabil i den omgivande miljön. Vid jämvikt råder balans mellan de ämnen som finns i systemet, man säger att systemets fria energi är noll. Om systemet inte är stabilt råder obalans mellan ämnernas fria energier. Det finns en termodynamisk drivkraft för omvandling av metallen till en stabilare tillståndsform. Vilken tillståndsform som är stabil, metall, metalljon, metalloxid etc, beror av den kemiska miljön. Förutom av den kemiska miljön påverkas korrosionen av rådande tryck och temperatur.

Den termodynamiska teorin kan reda ut vilka förhållanden som ska råda vid kemisk jämvikt, men saknar möjligheter att reda ut med vilken hastighet systemet närmar sig jämvikt. Reaktionernas hastighet beror inte i första hand av det slutgiltiga jämviktstillståndet utan av den väg reaktionen måste ta för att nå dit. På reaktionsvägen kan flera



Figur 9-4: En korrosionscell under en vattendroppe på en ärgande kopparplåt.

energibarriärer finnas. Situationen kan liknas vid att man i en bergskedja befinner sig i en högt belägen dal och ska rulla en vagn ned till en lågt belägen. Mellan startpunkten och dalen ligger en bergskam. Totalt sett har man nedförsbacke men för att komma till målet måste man passera en slingrig, backig ibland oframkomlig väg. Kemiska system strävar efter att nå lägre liggande jämviktstillstånd men reaktionsvägen kan ibland vara oframkomlig. Man säger att processen är kinetiskt hämmad. Genom katalys kan dock reaktionen få hjälp med att hitta den lättaste vägen eller forcera de högsta topparna. För att skjuta tillbaka vagnen till den högt belägna dalen måste man tillföra energi; vagnen kan aldrig rulla upp av sig själv. På motsvarande sätt kan aldrig kemiska reaktioner spontant nå ett högre liggande jämviktstillstånd.

Beroende på korrosionsangreppets karaktär skiljer man mellan olika typer av korrosion. Jämn korrosion eller allmätkorrosion sker med ungefär samma hastighet över hela metallytan. Gropfrätning, eller punktkorrosion, leder till bildning av gropar på metallens yta. Kvoten mellan korrosionsdjupet i gropar och det allmänna korrosionsdjupet brukar kallas gropfrättningsfaktorn. Gropfrättningsfaktorn anger således hur många gånger större gropfrätningen är än allmätkorrosionen. Korngränsfrätning, eller interkristallin korrosion, är lokaliserad till korngränserna i metallen. Spänningskorrosion kan orsaka sprickbildning i en i övrigt intakt metall. Spänningskorrosion sker genom samtidig korrosion och töjning under statisk dragpåkänning. På motsvarande sätt sker korrosionsutmattning genom korrosion och växlande dragpåkänning. Olika typer av lokal korrosion visas i *Figur 9-5*.

Kopparkorrosion

I närvaro av syre korroderar koppar (se t ex *Figur 9-4*). I rent vatten är koppar, som tidigare nämnts, termodynamiskt stabilt. Det rena vattnet kan således inte få koppar att

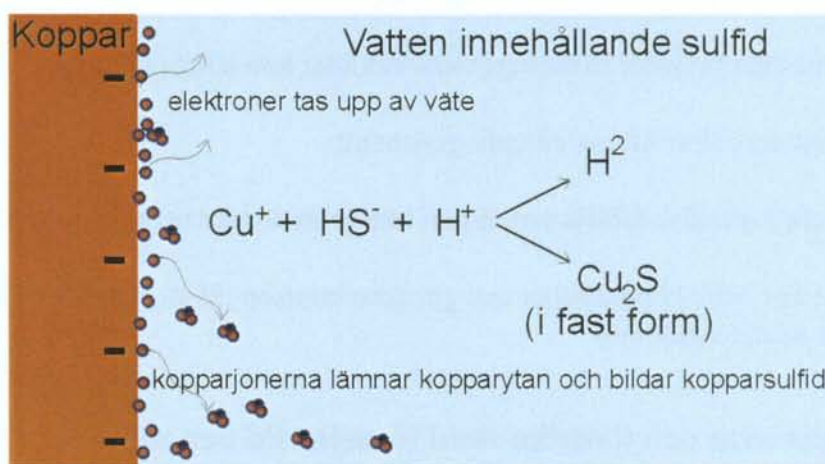


Figur 9-5: Olika typer av lokala korrosionsangrepp, från höger till vänster: gropfrätning, korngränsfrätning och spänningskorrosion.

korrodera. Korrosion kan endast orsakas av ämnen som är lösta i vattnet. Ämnen i grundvatten och buffert som kan orsaka korrosion är sulfid (HS^-), klorid (Cl^-), sulfat (SO_4^{2-}) och nitrat (NO_3^-).

I rent vatten är vätejonen inte ett tillräckligt starkt oxidationsmedel för att orsaka kopparkorrosion. Vätejonen kan dock fungera som oxidant under förutsättning att bildade kopparjoner binds i en förening med mycket låg fri energi. En sådan förening är kopparsulfid (Cu_2S). Finns sulfidjoner (HS^-) i vattnet förmår de dra till sig kopparjonerna i skiktet närmast metallytan, och bilda kopparsulfid som fälls ut i vattnet. Nya kopparjoner kan frigöras från ytskiktet, och ett överskott på elektroner uppstår i kopparn (se Figur 9-6). I denna situation förmår vattnets vätejoner plocka upp elektroner från kopparytan och bilda vätgas. Kopparn korroderar och processen fortsätter så länge det finns tillgång på sulfid.

Klorid kan förena sig med kopparjoner och bilda olika typer av kopparklorider. För att denna process ska äga rum krävs dels höga kloridhalter, dels höga koncentrationer av vätejoner, dvs lågt pH, i vattnet.



Figur 9-6: Kopparkorrosion i vatten innehållande sulfidjoner. Kopparjonerna närmast ytan bildar sulfid som fälls ut. Kopparplåten blir negativt laddad, elektronerna tas upp av väte i vattnet.

Sulfat kan via reduktion till sulfid orsaka korrosion. För att processen ska vara möjlig krävs även närvaro av tvåvärda järnjoner som extra elektrongivare. Processen är möjlig med hänsyn till de termodynamiska jämvikterna. I praktiken äger den inte rum eftersom den är kinetiskt hämmad. Bakterier kan fungera som katalysator för reduktionen.

Korrosion med nitrat är också teoretiskt möjlig med hänsyn till de termodynamiska jämvikterna. Även denna process är kinetiskt hämmad.

Järnkorrosion

Korrosion hos järnmaterial kallas rostning. Korrosionen är betydligt snabbare i syresatta, aeroba, förhållanden än i miljöer utan tillgång till fritt syre, anaeroba miljöer. I aeroba miljöer kräver järnkonstruktioner i regel någon form av rostskydd. Rostfritt stål innehåller t ex en tillsats av krom och får tack vare det ett skyddande skikt, ett så kallat passivskikt, av kromhaltig oxid eller hydroxid på ytan. I djupförvaret kommer, med undantag av ett inledande skede, anaeroba förhållanden att råda.

Om det inte finns tillgång till fritt syre reagerar järn med vatten under bildning av magnetit (Fe_3O_4) och vätgas (H_2). Magnetiten bildar ett passivskikt på materialets yta. Magnetitskiktet hindrar vattnet att komma i kontakt med järnet och stryker den anodiska upplösningen. Korrosionshastigheten som således styrs av magnetitskiktet påverkas av vattnets pH-värde samt mängd och laddning på de joner som finns lösta i vattnet, den så kallade jonstyrkan. Lågt pH och hög jonstyrka ökar korrosionshastigheten.

9.4 Kapselns funktion

9.4.1 Isolera

Kapselns kopparhölje bidrar till isoleringen genom att:

- totalt innesluta bränslet så att inga radionuklider kan lämna kapseln.

Gjutjärnsinsatsen bidrar till isoleringen genom att:

- ge kapseln mekanisk hållfasthet så den inte bryts sönder utan förblir tät.

Dessutom bidrar både kopparhöljet och gjutjärnsinsatsen till att skärma av bränslets gamma- och neutronstrålning.

9.4.2 Hålla kvar och fördröja samt fördela i tid och rum

Även en otät kapsel har stor förmåga att hålla kvar radionukliderna inom sig. Kapseln består som tidigare nämnts av ett kopparhölje och en gjutjärnsinsats. Bränslet ligger i rör av legeringen zirkaloy. För att radionuklider ska föras ut ur kapseln måste vattnet passera kopparhöljet, gjutjärnsinsatsen och zirkaloyrören, lösa upp radionuklider i

bränslet, och sedan ta sig ut igen. För att det ska vara möjligt måste både kopparhölje, gjutjärnsinsats och zirkaloyrör ha läckor. Om så är fallet är tomrummen som är tillgängliga för transport inne i kapseln begränsade. Det tillgängliga transportutrymmet minskas ytterligare genom att sprickor och hålrum successivt fylls med korrosionsprodukter.

Det finns flera hinder för transport genom kapseln, deras exakta betydelse är svår att avgöra. Till exempel brukar man anta att vatten kan ta sig in mellan den gjutna insatsen och dess lock, men hur stor är denna passage? Några av zirkaloyrören kommer att ha skadats under reaktorns drift, men hur många, var är läckorna placerade och hur ser de ut? Hur kommer korrosionsprodukterna att fördela sig inne i kapseln, osv. Eftersom det är mycket svårt att exakt förutsäga transportmotståndet inne i kapseln, brukar man i säkerhetsanalyser antingen inte tillgodoräkna det sig alls, använda sig av förenklade konservativa antaganden eller tillgodoräkna sig motståndet i bättre definierade delar, t ex ett hål i kopparhöljet.

9.5 Kapselns förväntade utveckling

Kapseln förväntas förbli intakt under mycket långa tidsperioder. Där den är placerad djupt ner i berget, omgiven av en skyddande buffert kommer förändringen, utvecklingen av kapseln att bli synnerligen långsam. Berget och bufferten ger kapseln en stabil, men inte helt oföränderlig miljö. Vissa kemiska och mekaniska påfrestningar förväntas uppstå. Kapseln är utformad för att tåla dem med en betydande säkerhetsmarginal. Säkerhetsmarginalen täcker in osäkerheter i förutsättningarna för olika belastningsfall. Studier visar att kapseln troligen kommer att förbli tät i miljontals år. Nedan redovisas de processer som beaktats vid utformningen av kapseln.

En förutsättning för att kapseln ska förbli tät under långa tidsperioder är naturligtvis att den är tät då den placeras i förvaret. Tillverkning och kontroll ska garantera att högst en kapsel av 1 000 ska kunna innehålla defekter som kan medföra initial otäthet eller leda till tidiga kapselbrott. Med en sådan garanti förväntas den verkliga felfrekvensen att bli lägre, kanske en kapsel på 10 000.

9.5.1 Korrosion av kopparhöljet

Korrosion av koppar har studerats i flera naturliga analogier. Koppar är en av de få metaller som återfinns i ren form, s k nativ koppar, i naturen. Fynd av nativ koppar visar att koppar är stabil vid de förhållanden som kommer att råda i djupförvaret. Koppar var en av de metaller människan först lärde sig att använda, och kopparföremål kan studeras i flera arkeologiska fynd. Nackdelen med arkeologiska fynd som naturliga analogier är att både de kemiska miljöerna och koppars renhet ofta skiljer sig från djupförvarets. En intressant analogi är dock de bronskanoner från skeppet Kronan som 1676 begravdes på botten utanför Ölands kust. Havsbotten består här av ett upp till 0,5 m tjockt sandlager och därunder en glacial lera innehållande mineralen illit, montmorillonit och kaolinit. Kanonen, som till 96,3 viktsprocent består av koppar, har begravts vertikalt i

leran. Undersökningar av kanonen visar att den årliga kopparkorrosionen varit 0,000015 mm (1 mm på 67 000 år). Sammanställning av data från ett stort antal fynd av arkeologisk och nativ koppar ger en korrosionshastighet på 0,000001–0,001 mm per år (1 mm på 1 000–1 000 000 år). I de arkeologiska fynden är i samtliga fall gropfrättningsfaktorn mindre än 3. För nativ koppar ligger gropfrättningsfaktorn mellan 2 och 6 /9-1/.

På kort sikt

I samband med att förvaret byggs kommer syre att föras ned på förvarsdjup. Den största mängden finns instängd i tunnelåterfyllnadsmaterialet. Relativt stora volymer finns också i buffertens porer. Det mesta av det instängda syret kommer att reagera med järn i berg och bergkross och når aldrig kapseln. Det är lättare för syret i återfyllnadsmaterialet att reagera med bergkrossen eller att diffundera in i det omgivande berget och reagera med järnhaltiga mineral, än att transporteras ned genom bufferten till kapseln. Endast en liten del av syret i tunnelåterfyllnaden, ca 1 %, förväntas nå kapseln. Om man pessimistiskt antar att detta syre och allt syre som finns i bufferten når kapselytan och där för bort koppar i form av envärda joner (Cu^+) från kapseln, försvinner ca 5 kg, eller mindre än 0,05 mm /9-2/.

I verkligheten kommer syret som är instängt i bufferten att reagera med järnmineralet pyrit (FeS_2) som finns som en förorening i bentoniten. Det är osäkert hur snabb denna process är. Beräkningar visar att den är mycket snabbare än utdiffusionen av syre mot berget. Det betyder att syret som finns instängt i bufferten antingen kommer att reagera med pyriten eller med kapselns kopparhölje. Enligt beräkningar kommer det att finnas syre i bufferten i ca 10–300 år efter det att förvaret stängts /9-3/. Hur stor korrosion av kopparhöljet syret åstadkommer beror bland annat på hur mycket syre som diffunderar in mot kapselytan. Enligt beräkningar blir den årliga allmänkorrosionen 0,000005 mm (dvs 1 mm på 200 000 år) /9-3/. Med hänsyn till de osäkerheter som finns i beräkningarna bedöms den årliga korrosionen kunna bli en faktor 10 större, dvs 0,00005 mm per år (dvs 1 mm på 20 000 år). Det kan jämföras med korrosionshastigheten 0,000015 mm per år (dvs 1 mm på 67 000 år), som räknats fram för skeppet Kronans kanoner, se även *Tabell 9-1*.

Beräkningarna ovan gäller allmänkorrosion. Då kopparn korroderar med syre kommer gropfrätning att förekomma. Mot bakgrund av vad som funnits i naturliga analogier antas att gropfrätningen lokalt ökar korrosionshastigheten med en faktor 5. Det innebär att korrosionen på grund av instängt syre lokalt kan bli 0,000025 mm per år (dvs 1 mm på 40 000 år). I extrema fall antas att lokala angrepp kan vara 100 gånger större än allmänkorrosionen, dvs ända upp till 0,0005 mm per år (1 mm på 2 000 år) /9-3/.

Då kapseln deponeras avger det använda bränslet fortfarande relativt mycket gamma- och neutronstrålning som förmår penetrera både kopparhöljet och gjutjärnsinsatsen. Strålning sönderdelar, genom sk radiolys, vattenmolekyler så att oxidanter bildas. Kapseln skärmar av strålningen till sådana nivåer att korrosionen på grund av radiolysen är försumbar i relation till korrosionen orsakad av det instängda syret (strålningsnivån på kapselns utsida är ca 0,5 Gray per timme eller lägre).

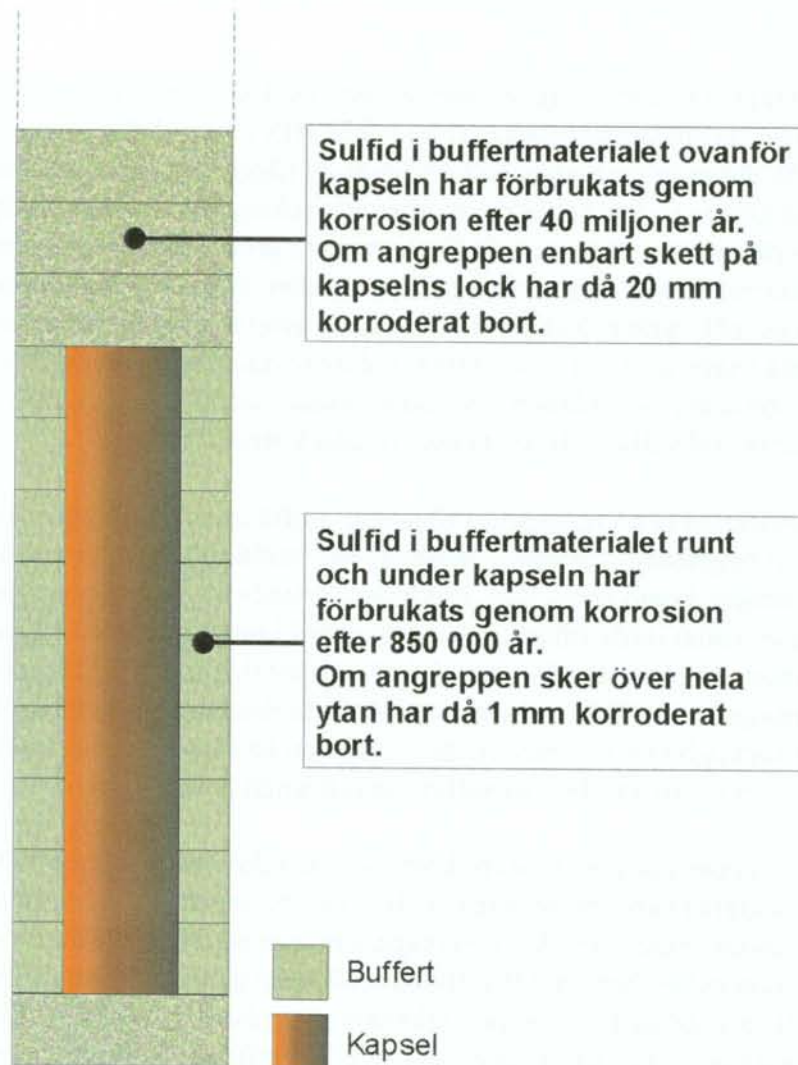
På lång sikt

Då syre som stängts in under byggnationen är förbrukat kommer grundvattnet att vara fritt från löst syre. Möjliga korrodanter är nu sulfid (HS^-), klorid (Cl^-), sulfat (SO_4^{2-}) och nitrat (NO_3^-). Av dessa är det endast sulfid som är av någon betydelse. Korrosion på grund av klorid kräver en kombination av höga kloridkoncentrationer och låga pH-värden. Vid de pH-värden som normalt förekommer i grundvatten blir denna typ av korrosion försumbar även vid mycket höga kloridhalter. Bufferten hindrar dessutom uppkomst av låga pH-värden. Sulfatoxidation är en kinetiskt hämmad process. Hittills finns inga kända exempel på sulfatoxidation vid de temperaturer och tryck som råder i förvaret. Detsamma gäller oxidation orsakad av nitrat. Sulfat kan dock med assistans av bakterier reduceras till sulfid och därigenom orsaka korrosion.

Sulfid finns i bufferten och i tunnelåterfyllnaden. Sulfid finns också i grundvatten, även om tillgången är begränsad. I grundvattnet reagerar sulfid, liksom syre, med ämnen som förekommer i berget, bland annat järn. Bakterier i grundvattnet kan genom mikrobiologisk reduktion av sulfat bilda sulfid. Källan till sulfid i buffert och återfyllnad är pyrit (FeS_2). Då bentoniten placeras i förvaret är halten pyrit 0,2–0,3 %. Vid överslagsmässiga beräkningar av sulfidkorrosion antas att hela denna mängd bidrar till kopparkorrosionen. I verkligheten kommer en del av pyriten att förbrukas vid reaktioner med det instängda syret (se ovan). Halten sulfid i grundvatten är 0,1–1 ppm.

En enkel massbalansberäkning av sulfidkorrosionen redovisas i *Figur 9-7*. Sulfidkorrosionens hastighet beror bland annat av hur snabbt sulfiden kan transporteras in till kapseln, vilka andra ämnen sulfiden kan reagera med och själva sulfidkorrosionens hastighet. Tar man enbart hänsyn till sulfidens diffusion genom bufferten, dvs transport-hastigheten, blir den årliga korrosionen 0,000004 mm (dvs 1 mm på 250 000 år) /9-3/. Vid en antagen ursprunglig sulfidhalt på 0,2–0,3 % i bufferten kommer det att ta flera miljoner år innan all sulfid förbrukats /9-2/. Då buffertens sulfid förbrukats tillförs sulfid från grundvattnet. Då begränsas korrosionen av det ekvivalenta flödet (se buffertkapitlet avsnitt 8.3.1). En uppskattning av sulfidkorrosionens verkliga hastighet har gjorts med hänsyn till data för termodynamisk jämvikt, kinetik och diffusion i bufferten. Beräkningarna gav en korrosionshastighet på 0,00000005 mm/år (dvs 1 mm på 20 000 000 år). Med hänsyn till osäkerheter i de data beräkningarna grundar sig på kan den verkliga korrosionshastigheten vara en faktor 10 högre. Gropfrätning är inte trolig vid sulfidkorrosion, dels på grund av processens karaktär, dels för att sulfiden förväntas vara jämnt fördelad i bufferten. Med utgångspunkt från det, och naturliga analogier, antas gropfrätningens faktor i normala fall vara 2, som en övre gräns sätts den till 5.

Resultaten av de ovan redovisade korrosionsanalyserna sammanfattas i *Tabell 9-1*. I tabellen redovisas beräkningsresultat från massbalans, ett realistiskt fall och ett ogynnsamt fall, samt resultaten från studierna av Kronans bronskanoner. Referenskapselns kopparhölje är 50 mm tjockt; som framgår av tabellen skulle det ta miljontals år innan höljet är genomkorroderat. Korrosion är inget hot mot kapseln. Ett undantag skulle vara någon form av lokalt angrepp, en tänkbar sådan process kan vara spänningskorrosion.



Figur 9-7: Massbalansberäkning av korrosionen orsakad av sulfid som finns i buffertmaterialet.

Det finns flera exempel på att stålkonstruktioner brutits sönder på grund av spänningskorrosion, bland annat från offshoreindustrin. Blankt, fint stål har brutits sönder på grund av lokal korrosion. I koppar är spänningskorrosionsbrott mer sällsynt, men det förekommer. Spänningskorrosionsbrott kan äga rum om koppars är utsatt för dragspänning och samtidigt korrosionsangrepp där kväveföreningar är inblandade. Spänningskorrosion i koppar kräver stor dragpåkning och en kemisk miljö med höga halter kväveföreningar. Inget av dessa villkor uppfylls i förvaret. Utmattningsbrott då metallen utsätts för korrosion i kombination med växlande dragpåkning är en liknande typ av lokalt angrepp. Förutsättningar för utmattningsbrott finns inte heller i förvaret. Eftersom mekanismerna bakom spänningskorrosion inte är helt kända pågår studier i ämnet.

Tabell 9-1: Sammanställning av kopparkorrosionen de inledande 100 000 åren, samt beräknad tid till genomfrätning.

	Massbalans [mm]	Troligt fall [mm]	Ogynnsamt fall [mm]	Kronans kanon [mm]
Allmän korrosion				1,5
I närvaro av syre	0,005	0,0005	0,002	
Syrefria förhållanden	1–20	0,005	0,4	
Gropfrätning	–			4,5*
I närvaro av syre		0,003	2	
Syrefria förhållanden		0,01	2	
Totalt efter 100 000 år	1–20	0,02	4,4	6
Tid till genomfrätning	–	500 milj. år	2,5 milj. år	–

*) Uppgift om gropfrättningsfaktor finns ej för Kronans kanoner. Faktorn har satts till 3, som är maxvärdet för arkeologiska fynd, för naturlig koppar har gropfrättningsfaktorer på upp till 6 registrerats.

Mikroorganismer, bakterier, finns i de flesta underjordiska miljöer. Bakterier kan leva i dessa till synes ogästvänliga miljöer men deras aktivitet är lägre än för jordlevande mikroorganismer. Bakteriernas möjligheter att överleva begränsas av temperaturen, som inte får vara för hög, samt tillgången till vatten och energikällor. En del typer av bakterier använder sig av sulfat som oxidationsmedel i sin livsprocess, som elektrongivare används organiskt material och ibland vätgas. Ur processen kommer sulfid, som i sin tur kan korrodera koppar. Sulfathalten i grundvatten är 40–60 ppm och halten organiskt material 1–8 ppm. Det betyder att halterna sulfid som kan produceras i grundvattnet är begränsade. I bufferten finns relativt stora mängder sulfat. Studier visar dock att mikroorganismer inte kan leva i bufferten. Bentoniten drar till sig vattnet som behövs för deras överlevnad.

9.5.2 Korrosion av gjutjärnsinsatsen

Bränsleelementen lagras nedsänkta i vatten. Innan de placeras i kapseln torkas de. Luften i hålrummet mellan bränsle och gjutjärnsinsats ersätts med inert gas innan locket läggs på. En inert gas är en gas som inte gärna reagerar med andra ämnen, den är reaktionströg. Påsvetsningen av kopparhöljets lock planeras ske i vakuum, så även utrymmet mellan gjutjärnsinsatsen och höljet blir fritt från luft. De små mängder vatten och luft som blir kvar då kapseln förslutits är det enda som kan orsaka korrosion av gjutjärnsinsatsen så länge kopparhöljet är tätt. Inneslutna mängder luft och vatten angriper gjutjärnsinsatsen eftersom den är mer korrosionsbenägen än kopparhöljet. Angreppen i form av allmätkorrosion eller gropfrätning blir obetydliga.

Stråldosen inne i gjutjärnsinsatsen är initialt relativt hög (300 Gray per timme). Strålningen kan i närvaro av vatten och luft leda till radiolytisk bildning av nitrat (NO₃⁻). Är den instängda volymen vatten och luft tillräckligt stor kan det bildade nitraten i kombination med dragspänningar orsaka spänningskorrosion på gjutjärnsinsatsen. Dragspänningar förekommer framförallt i hörnen på kanalerna för bränsleelementen. Här

kan spänningskorrosion leda till lokal sprickbildning eller i extrema fall kanske till lokala brott i väggen mellan två bränslekanaler. De delar av gjutjärnsinsatsen som kan utsättas för spänningskorrosion har ingen relevant betydelse för insatsens hållfasthet.

9.5.3 En otät kapsels utveckling

Om det skulle gå hål på kopparhöljet kan vatten ta sig in i kapseln. Till en början sipprar vattnet genom hålet på grund av att det hydrostatiska trycket utanför kapseln är större än trycket inne i kapseln. När vattnet kommer in i kapseln reagerar det med järnet i insatsen och bildar magnetit (Fe_3O_4) och vätgas (H_2) – ett vätgastryck byggs upp. När trycket inne i kapseln blivit lika stort som trycket utanför finns inte längre någon tryckskillnad som kan pressa in vatten. Vattentillförseln fortsätter då genom diffusion av vattenånga genom vätgasen /9-4/.

Under tiden vatteninflödet drivs av tryckskillnaden kan vattennivån inne i kapseln stiga. Om nivån överhuvudtaget stiger och hur mycket den stiger, beror på hur mycket vatten som kan transporteras genom hålet och gjutjärnsinsatsens korrosionshastighet. Om inflödet är större än mängden vatten som förbrukas vid korrosionen fylls vatten på. Det förutsätter ett relativt stort hål; beräkningar visar att ett cirkulärt hål måste ha en diameter på 2,5 mm (area ca 8 mm²) för att vattennivån ska stiga /9-4/. Om vattennivån stigit över hålet i kopparhöljet när tryckjämvikt uppnås mellan kapseln och omgivningen, fortsätter vätgastrycket att öka över vattenytan i kapseln och vattnet drivs ut. Detta är det enda utflöde i flytande form man kan få ur kapseln. Utflödet fortsätter till nivån sjunkit under hålet. Då ventileras vätgasen ut, tryckjämvikt uppstår och transporten genom hålet drivs av diffusion. Diffusionen är liten i förhållande till korrosionshastigheten, allt tillfört vatten förbrukas vid korrosionen. Även vattnet som redan finns inne i kapseln kommer att förbrukas och kapseln blir gasfylld /9-4/.

Då vatten kommer in i kapseln börjar gjutjärnsinsatsen att korrodera. Korrosionshastigheten beror som tidigare nämnts av vattnets pH och jonstyrka. För de förhållanden som kan tänkas råda i förvaret beräknas den årliga korrosionen bli 0,0001–0,001 mm (1 mm på 1 000–10 000 år). Om spalten mellan kopparhöljet och gjutjärnsinsatsen är vattenfylld kan ske galvanisk korrosion uppstå. I anaerob miljö innebär det en initialt högre korrosionshastighet, maximalt dubbelt så stor, till dess det skyddande magnetit-skiktet hinner byggas upp. Efter det styrs korrosionshastigheten av magnetit-skiktet. I en syresatt miljö kan den galvaniska korrosionen vara betydande. Skulle kapseln bli otät under den inledande syresatta perioden begränsas emellertid syretillförseln av den låga transporthastigheten genom bufferten.

Allt eftersom järnet korroderar försämras insatsens hållfasthet. Om insatsen korroderar med en hastighet av 0,001 mm om året över hela sin yta, beräknas den mista sin bärförmåga efter drygt 10 000 år. Det korroderade järnet bildar magnetit. Magnetit har lägre densitet än järn och kommer därför att fylla tomrummen inne i kapseln. Eftersom tomrummen är fyllda finns ingen risk att kapseln kollapsar totalt, trots att insatsen mist sin bärförmåga. Den bildade magnetiten kommer på grund av sin större volym att

trycka på kopparhöljet, trycket kan leda till nya brott på höljet och/eller att hålet i kopparkapseln vidgas. Trycket från den bildade magnetiten kan också skada insatsen så att kanalerna för bränsleelementen bryts. Den minskade bärförmågan gör också kapseln mer känslig för yttre belastningar. Möjligheterna för radionuklider att transporteras ut ur en otät kapsel förändras således på lång sikt. Vatten- och vattenångetransporten genom kapseln är svår att beräkna och ändras med tiden. Därför antar man ofta i säkerhetsanalyser att kapseln kommer att bli helt vattenfylld någon viss tid efter att en otäthet uppstår, att vattnet omedelbart når bränslet och löser radionuklider som sedan transporteras ut genom hålet i kapseln.

9.5.4 Mekanisk utveckling

På kort sikt

För att gjutjärnsinsatsen ska kunna placeras in i kopparhöljet är höljets invändiga radie 2 mm större än insatsens utvändiga radie, dvs det finns ett radiellt spel på 2 mm mellan gjutjärnsinsatsen och kopparhöljet. Då kapseln placeras i förvaret kommer den att utsättas för ett likformigt yttre tryck på ca 14–17 MPa. Trycklasten består av ett hydrostatiskt tryck, vattentryck, på 4–7 MPa och ett tryck på 7–10 MPa från buffert och berg. Trycket kommer att orsaka en krypdeformation av kopparhöljet motsvarande det radiella spelet. De töjningar av kopparn som uppstår är långt under vad den tål.

Då förvaret stängs kommer vattnet, som under drifttiden pumpats ut, åter att fylla tillgängliga hålrum. Vattnet som rör sig in mot deponeringshålen kommer att tas upp av bufferten och ett svälltryck byggs upp. Ojämn vattentillförsel eller densitet i bufferten kan leda till att svälltrycket blir ojämnt fördelat, med en snedbelastning på kapseln som följd. Kapseln ska tåla en sådan snedbelastning inom rimliga gränser för ojämnheter i vattentillförsel och densitetsfördelning i bufferten. Risken för att stora snedbelastningar ska uppstå begränsas genom krav på bufferten och inplaceringen av deponeringshålen i berget.

På lång sikt

Under en glaciation, då en tjock inlandsis täcker förvaret, kan mycket höga vattentryck uppstå under vissa delar av istäcket. På förvarsdjup kan det hydrostatiska trycket bli 7–10 MPa. I normala fall kommer kapslarna att tåla denna last. Kapslar som av någon anledning redan är skadade skulle kunna gå sönder i detta skede. Konsekvenserna av detta utreds i säkerhetsanalyser. Viktigt vid analysen av sådana scenarier är hur långt in i framtiden de kan förväntas äga rum, samt rådande geohydrologiska förhållanden och förhållanden i biosfären.

Det är inte alls otroligt att förvaret någon, eller kanske flera gånger, under sin livstid kommer att utsättas för jordskalv. Det tar man hänsyn till vid inplaceringen av förvaret i berget. De rörelser som kan förekomma vid deponeringshålen tas även vid stora skalv upp i bufferten. Den belastning som fortplantas till kapseln förmår inte skada den.

10 Bränslet som barriär

Sammanfattning – Bränslet som barriär



BRÄNSLET

Hålla kvar och fördröja:

- låg löslighet i vatten och låg korrosionshastighet
- de flesta radionuklider sitter inbakade i bränslet och kan ej frigöras förrän urandioxiden lösts eller omvandlats

Figur 10-1: Bränslet.

Kärnbränsle består av keramen urandioxid (UO_2). Uran- och syreatomerna i urandioxiden sitter bundna till varandra i ett gitter, även kallat *bränslematrisen*. De flesta radionukliderna sitter inbakade i gittret som russinen i en kaka. Eftersom bränslet är utomordentligt svårlösligt i vatten kan det sägas fungera som en barriär för de inbakade radionukliderna. Vissa av radionukliderna är i en form som är mer svårlöslig än bränslet själv. Deras låga löslighet kan därmed sägas utgöra en barriär.

Förhållandena under drift påverkar både radionuklidinnehåll och det använda bränslets förmåga att fungera som barriär. Temperaturskillnader som uppstår då reaktorn slås av och på gör att bränslet spricker sönder. Under bestrålningen i reaktorn kan vissa av fissionsprodukterna transporteras ut till ytan av bränslet och mellanrummet mellan bränslet och kapslingsrören av zirkaloy, det s k *gapet*. Vid ett eventuellt läckage blir de direkt tillgängliga för upplösning. Jod och cesium är sådana ämnen. Man räknar med att någon procent av det totala innehållet av dessa nuklider finns vid bränsleytan. Några fissionsprodukter finns lokalt ansamlade i form av metalliska utfällningar eller oxidutfällningar. En del av utfällningarna, det s k *korngränsinventariet*, tros finnas vid bränslekornens ytor. Om så är fallet skulle dessa radionuklider bli mer tillgängliga för upplösning än om de suttit jämnt fördelade i bränslematrisen. De tunga ämnena, de s k transuranerna, sitter jämnt fördelade i urandioxiden.

Bränsleupplösning

Frigörelsen av radionuklider från använt kärnbränsle sker enligt de flesta forskarna i tre kronologiskt överlappande processer:

1. snabb upplösning av fissionsprodukter som transporterats till gapet eller bränsleytorna under driften,
2. selektiva angrepp av ojämnt fördelade fissionsprodukter vid korngränser,
3. allmän upplösning av bränslematrisen med samtidig frigörelse av fissionsprodukter och aktinider.

Faktorer som påverkar bränsleupplösningen är radionuklidernas egenskaper, var och i vilken form de förekommer i bränslematrisen och grundvattenkemin. Vid reducerande förhållanden, som råder på förvarsdjup, är urandioxids löslighet något miljondels gram per liter vatten. Bränsleupplösningen blir på grund av den låga lösligheten och långsamma vattenomsättningen synnerligen begränsad. Om förhållandena är tillräckligt oxiderande kan bränslematrisen omvandlas snabbare genom oxidation. Strålningen från bränslet befaras genom radiolys ge oxiderande förhållanden vid bränsleytan.

Exakt hur bränsleupplösningen går till är svårt att beskriva. Då mängden frigjorda radionuklider ska beräknas i säkerhetsanalyser används förenklade modeller som överskattar mängden frigjorda radionuklider. Allt eftersom forskningen framskrider förfinas modellerna.

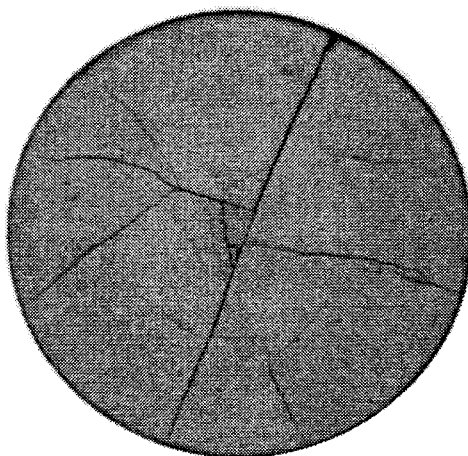
Naturliga analogier till använt kärnbränsle

Urändioxid finns i naturen i form av uranmineralet uraninit. Fynd av uraninit som är hundratals miljoner år gammal har gjorts på flera platser. Det ses som ett tecken på att urandioxid är mycket beständig i geologiska miljöer. Speciellt intressanta är de naturliga analogierna vid Cigar Lake i Kanada (*Figur 3-2*) och Oklo i Gabon. Cigar Lake är intressant på grund av att förhållandena påminner om dem i ett djupförvar. Vid Oklo har naturliga kärnklyvningsprocesser liknande dem i en reaktor förekommit. Analogierna har använts för att studera upplösning av urandioxid och transport av de ämnen som lösts. Mätningar gjorda vid de naturliga analogierna har jämförts med resultat från säkerhetsanalysens beräkningsmodeller. På så sätt kan man kontrollera att upplösningshastighet och transport inte underskattas i beräkningsmodellerna.

10.1 Bränslet fungerar som barriär

Det vore kanske fel att kalla det använda kärnbränslet en av förvarssystemets barriärer – det är ju det avfall som ska isoleras. Men eftersom bränslet är utomordentligt svårlösligt i vatten fungerar det som en barriär för de radionuklider som finns inbäddade i det. Vissa av radionukliderna är i en form som är mer svårlöslig än bränslet själv. För dem begränsar lösligheten möjligheten att transporteras ut från en otät kapsel. Kärnbränsle består av keramen urandioxid (UO_2). Uran- och syreatomerna i urandioxiden sitter bundna till varandra i ett gitter, även kallat *bränslematrisen*. Innan bränslet placeras i reaktorn kan det hanteras utan strålskyddsåtgärder. Vid driften i kärnreaktorn bildas radioaktiva isotoper av olika ämnen genom fission och neutroninfångning (se kapitel 4). Det är framförallt de ämnen som bildas vid driften som bidrar till bränslets farlighet. De flesta bildade ämnena, såväl fissionsprodukter som aktinider, sitter inbakade i bränslematrisen ungefär som russinen i en kaka. För att de ska kunna lösas upp och spridas måste den omgivande urandioxiden först ha lösts eller korroderat bort. Eftersom urandioxiden är utomordentligt svårlöslig bildar den en barriär för de inbakade radionukliderna.

Förhållandena under driften i kärnreaktorn påverkar *nuklidinventariet*, dvs mängd och typ av radionuklider. Även bränslets förmåga att fungera som barriär påverkas av driftsförhållandena. För nuklidinventariet är det framförallt utbränningsgraden, dvs den totala mängd energi som utvunnits ur varje element, som har betydelse. Om utbränningsgraden är hög har en stor andel av bränslets uran-235-kärnor klyvts, många plutonium-kärnor har bildats och klyvts, och mängden radionuklider blir större. Radionuklidernas fördelning i bränslet och bränslets struktur påverkas förutom av utbränningsgraden av faktorer som bestrålningshistoria, hur mycket energi som utvunnits per tidsenhet och hur ofta reaktorn slagits av och på. Fördelningen av fissionsprodukter och aktinider beror också på de bildade radionuklidernas egenskaper och masstransport t ex orsakad av temperaturgradienter i bränslestavarna /10-1/. När reaktorn slås av och på uppstår temperaturvariationer som får bränslet att spricka sönder. Uppsprickningen påverkar storleken på bränsleytan som vattnet kan komma i kontakt med. I *Figur 10-2* visas ett tvärsnitt genom en använd bränslekuts.



Figur 10-2: Bränslekuts som spruckit under driften i reaktorn.

Andelen av U-235-kärnorna som klyvts varierar längs en tvärsektion genom bränslet. Det beror bland annat på att flödet av neutroner varierat längs tvärsnittet, läget i bränsleknippet, närheten till styrstavar etc. Även bestrålningshistoria och utbränningsgrad spelar in. I det allra yttersta skiktet på bränslet är utbränningen, andelen tunga aktinider, alfaaktiviteten och porositeten högre än i de inre delarna av bränslet /10-1/.

Klyvningen av uran och plutonium under driften i reaktorn ger upphov till ett antal radioaktiva isotoper av olika ämnen, så som fissionsprodukter. De flesta av dem stannar kvar där de bildats i urandioxiden. Endast mindre andelar av några få nuklider kan under bestrålningen transporteras genom bränslematrisen /10-1/. De transporteras ut till ytan av bränslet och mellanrummet mellan bränslet och kapslingsrören av zirkaloy, det så kallade gapet. Om kapseln är otät blir de lätt tillgängliga.

Ämnen i gasform transporteras genom urandioxidgittret, ett exempel är ädelgasen krypton (Kr). Trots att dessa så kallade fissionsgaser skulle kunna spridas snabbt vid ett eventuellt läckage har de ingen större betydelse i djupförvarssammanhang. Det beror till största delen på att de har så korta halveringstider att de hinner avklinga innan bränslet ska djupförvaras.

Jod (I) och cesium (Cs) kan också transporteras genom gittret under driften i kärnreaktorn. Eftersom dessa ämnen relativt lätt kan transporteras genom buffert och berg har de stor betydelse för djupförvarets säkerhet, speciellt om ett tidigt läckage skulle uppstå. Hur stor andel av bildad jod och cesium som transporteras ut till bränsleytan och gapet beror av faktorerna som räknats upp ovan. Då bränslet ska djupförvaras räknar man med att någon procent av det totala jod- och cesiuminventariet kan finnas i gapet.

Flera av fissionsprodukterna som i och för sig är inbakade i bränslet kan vara ojämnt fördelade. De kan finnas lokalt ansamlade i form av metalliska utfällningar eller oxidutfällningar. Några exempel på ämnen som finns i metalliska utfällningar är teknetium (Tc), molybden (Mo) och palladium (Pd). Eventuellt kan de finnas vid urandioxidens korngränser. Vissa andelar av andra radionuklider, till exempel strontium (Sr) och cesium (Cs), kan finnas samlat vid korngränserna i form av oxidutfällningar. Om så är fallet skulle dessa nuklider bli mer tillgängliga för tidig upplösning än om de suttit jämnt fördelade i bränslematrisen. Man har försökt bestämma förekomsten av ett sådant så kallat *korngränsinventarium*, experimentellt. Experimenten har inte entydigt identifierat något korngränsinventarium. En del av de metalliska utfällningarna förekommer dock vid korngränserna. Även mindre andelar av cesium och strontium, kanske någon tiondels procent, kan ingå i korngränsinventariet /10-2/. Strontium är mycket viktig i säkerhets-sammanhang, bland annat på grund av sin löslighet i vatten. Strontium (Sr) anses till största delen vara jämnt fördelat i gittret /10-1/.

Fissionsprodukter – som tillhör den grupp av ämnen i det periodiska systemet som kallas *lantanider* – sitter liksom aktiniderna, inkorporerade i urandioxidgittret som lösta oxider.

10.2 Bränsleupplösning

Frigörelsen av radionuklider från använt kärnbränsle sker enligt de flesta forskarna i tre kronologiskt överlappande processer /10-1/:

1. snabb upplösning av fissionsprodukter som frigjorts till gapet eller bränsleytorna under driften,
2. selektiva angrepp av ojämnt fördelade fissionsprodukter vid korngränser,
3. allmän upplösning av bränslematrisen med samtidig frigörelse av fissionsprodukter och aktinider.

Exakt hur frigörelsen av radionuklider går till är svårt att bestämma. Forskning pågår, men experiment kan vara svåra att genomföra, bland annat på grund av att upplösningen är så långsam att de upplösta mängderna bränsle blir svårdetekterade. Strålningen från bränslet kan också försvåra mätningar. Nedan redovisas några av de faktorer som påverkar bränsleupplösningen.

Hur radionukliderna frigörs beror på deras egenskaper samt var och i vilken form de förekommer i det använda bränslet. Av avgörande betydelse är också sammansättningen på det vatten som eventuellt kommer i kontakt med bränslet. Vattnets sammansättning har betydelse både för bränsleupplösning och -korrosion samt för lösligheten av de olika radionukliderna.

Vid reducerande förhållanden, som råder på förvarsdjup, är urandioxid termodynamiskt stabil. Frigörelsen av nukliderna i matrisen begränsas av hur mycket av urandioxiden som kan lösas upp av vattnet. Lösligheten av urandioxid i vatten är av storleksordningen miljondels gram per liter. När denna mängd lösts måste nytt omättat vatten tillföras för att bränsleupplösningen ska fortsätta. En komponent i grundvatten som kan påverka upplösningen av det använda bränslet är karbonatjoner (HCO_3^-). Bränslets löslighet ökar något med ökande karbonathalt.

Om förhållandena är oxiderande kan bränslematrisen omvandlas genom oxidation av uranet. Uranatomer avger elektroner och oxideras från fyrvärt, U(IV), till fem- U(V) eller sexvärt U(VI), elektronerna tas upp av syre som inkorporeras i gittret. Under mildt oxiderande förhållanden bryts inte bränslematrisen och upplösningen begränsas fortfarande av lösligheten. För att matrisen ska omvandlas krävs att det i snitt finns mer än 2,33 syreatomer per uranatom, dvs att uranoxidens sammansättning har ändrats från UO_2 till $\text{UO}_{2,33}$. Om oxidationen går så långt förändras bränslets struktur så att radionuklider som finns inbakade i gittret kan frigöras. Oxiderande förhållanden innebär även att vissa radionuklider får högre löslighet.

Normalt är förhållandena på förvarsdjup reducerande. Det använda bränslet avger dock strålning som leder till radiolytisk sönderdelning av vattnet. Vid radiolysen bildas ekvivalenta mängder oxiderande och reducerande species. Eftersom de oxiderande är

mer reaktionsbenägna än de reducerande befaras förhållandena vid bränsleytan bli oxiderande. Strålningen avtar med tiden men är ändå tillräcklig för att kunna orsaka radiolys under mycket långa tidsperioder.

Eftersom bränsleupplösningen – och därmed frigörelsen av radionuklider – är svår att beskriva i detalj, använder man förenklade modeller. Förenklingarna är gjorda så att frigörelsen av radionuklider överskattas. Allt eftersom forskningen går framåt kan modellerna, vid behov, förfinas. I SKB:s säkerhetsanalys av ett djupförvar, SKB 91, antogs t ex ett väl tilltaget korngräns- och gapinventarie (t ex 5 % av cesium och 10 % av jod) som omedelbart frigjordes vid kontakt med vatten. Vidare antogs oxiderande förhållanden vid bränsleytan med oxidationshastigheten proportionell mot strålningen. Även om mycket konservativa antaganden om bränsleupplösning används, blir den mängd radionuklider som beräknas lösas liten. Det beror dels på att många nuklider har låg löslighet i vatten och dels på att vattenomsättningen inne i en otät kapsel är mycket liten.

10.3 Naturliga analogier till använt kärnbränsle

En utmärkt naturlig analogi till använt kärnbränsle är naturligt förekommande uranmineral, främst uraninit men även pechblände. Uraninit består liksom använt kärnbränsle av urandioxid. Uraninit har samma kristallografiska struktur som använt bränsle. Det finns dock avgörande skillnader, t ex innehållet av orenheter. I det använda bränslet består de av fissionsprodukter och aktinider med dotterprodukter, medan orenheterna i naturliga uranmineral är icke radioaktiva. Dessutom har ju bränslet utsatts för påfrestningar i samband med driften i reaktorn. Trots skillnaderna kan flera intressanta slutsatser dras från naturliga analogier. Förekomster av uraninit som är hundratals miljoner år gamla finns på flera ställen. Det kan ses som ett bevis för att urandioxid är mycket beständigt i geologiska miljöer.

Några speciellt intressanta naturliga analogier är de vid Cigar Lake i Kanada (se även avsnitt 3) samt Oklo i Gabon. Vid Cigar Lake finns en mycket rik uranmalm omgiven av lermineral (se *Figur 3-2*). Malmen har varit tillgänglig för vatten under reducerande förhållanden under mycket långa tidsperioder. Inga spår av uranmalmen har setts i ytliga grundvatten, vegetation eller jordlager. Högre uranhalter har uppmätts i vattnet vid fyndighetens centrala delar, men det lösta uranet har inte rört sig långt från malmkroppen. Malmen är ca 1 300 miljoner år gammal. De mineralomvandlingar och upplösningsprocesser som har ägt rum är begränsade. Analogin vid Cigar Lake har också använts för att testa de modeller för bränsleupplösning som används i säkerhetsanalyser. Enligt modellberäkningarna skulle malmen varit totalt upplöst efter 18–170 miljoner år. Att den fortfarande finns kvar efter 1 300 miljoner år ses som ett bevis för att de använda modellerna är konservativa. Studier vid Cigar Lake visar också att redoxpotentialen måste överskrida ett tröskelvärde för att urandioxiden ska kunna lösas genom oxidation.

Fyndigheten vid Oklo är unik eftersom den rika uranmalmen (upp till 70 % urandioxid) för ca 2 000 miljoner år sedan blev kritisk på flera olika ställen och en naturlig kärnklyvningsprocess, liknande den i en reaktor, kom i gång. Man har hittat ca 15 sådana reaktorzoner. Temperaturerna i Oklo-reaktorerna tros inte ha varit lika höga som i ett kärnkraftverk och processen pågick under en mycket lång tidsperiod, 10 000–100 000 år. Trots att förhållandena skiljer sig från dem i ett djupförvar har några intressanta iakttagelser kunnat göras. Då kärnklyvningsprocessen i Oklo avstannade och reaktorn svalnade löstes en del av urandioxiden och en del ämnen omfördelades, men den största delen av uranet finns ändå kvar på samma plats som före kriticiteten. De tunga transuranerna stannade kvar i uraniniten. Andra radionuklider som inte passar så väl in i urandioxidgittret har dock, helt eller delvis, transporterats ut. Några av ämnena har fångats in i de lermineral som omger malmen. Vid Oklo har urandioxiden och de mineral som omger den kunnat hålla kvar den största delen av de bildade radionukliderna, trots att malmen är mycket gammal och under tidens gång utsatts för många påfrestningar. Det ger ett stöd för djupförvarets säkerhet, men man ska inte glömma bort att vissa radionuklider faktiskt försvunnit från platsen /10-3/.

Referenser

Samtliga kapitel

- 0-1 SKBF/KBS**
Kärnbränslecykelns slutsteg
Använt kärnbränsle – KBS-3
Maj 1983
- 0-2 SKB**
SKB 91
Slutlig förvaring av använt kärnbränsle
Berggrundens betydelse för säkerheten
Maj 1992
- 0-3 SKB**
SR 95
Mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel
December 1995
- 0-4 SKB**
FUD-PROGRAM 95
Kärnkraftavfallens behandling och slutförvaring
September 1995
- 0-5** Sveriges Nationalencyklopedi

Kapitel 1

- 1-1 Strålskydds- och kärnsäkerhetsmyndigheterna i Danmark, Finland, Island, Norge och Sverige**
Slutförvaring av högaktivt radioaktivt avfall
Några grundkriterier
Svensk översättning
1993

Kapitel 3

3-1 Hedin A

Använt kärnbränsle – Hur farligt är det?
SKB rapport R-97-02
Januari 1997

3-2 Boulton B, Hulton N, Wallroth T

Impacts of long-term climate change on subsurface conditions: time sequences, scenarios and boundary conditions for safety assessments
SKB Progress Report U-96-19
Juni 1996

Kapitel 4

4-1 Millet S M, Honton E J

A manager's guide to technology forecasting and strategy analysis methods
Batelle Press
1991

Kapitel 5

5-1 Se 1-1.

Kapitel 6

6-1 Wallroth T

Vad betyder en istid för djupförvaret?
SKB Arbetsrapport
Juni 1997

Kapitel 7

7-1 Rehbinder G, Gustafsson G, Thunvik R

Grundvattenströmningens teori
Kompendium KTH, CTH
1995

7-2 Se 0-1

7-3 Se 0-3

- 7-4 Turcotte D L**
Fractals and chaos in geology and geophysics
Cambridge University Press
ISBN 0 521 44767 4
1992
- 7-5** Se 6-1
- 7-6 Gylling B**
Simulation of fluid flow and transport of solutes in fractured rock using a channel network model – application to field experiments
Licentiate Treatise
TRITA-KET R20
ISSN 1104-3488
ISRN KTH/KET/R-20-SE
1995
- 7-7 Andersson J, Jennervik A**
Vattenpåverkan av bergarbeten
SKB Arbetsrapport AR 44-93-010
1993
- 7-8 Claesson J, Probert T**
Thermoelastic stress due to a rectangular heat source in a semi-infinite medium
Derivation of an analytical solution
SKB Technical Report TR 96-13
1996
- 7-9 Morfeldt C-O, Jansson L-T**
Marken vi står på
ISBN: 91-7736-297-281-0
1992
- 7-10** Sveriges nationalatlas
Berg och jord
Temaredaktör Curt Fredén
- 7-11 Brandberg F, Skagius K**
Porosity, sorption and diffusivity data compiled for the SKB 91 study
SKB Technical Report 91-16
1991
- 7-12 Eriksson E, Holtan H**
Hydrokemi – Kemiska processer i vattnets kretslopp

7-13 Muir Wood R

Reconstructing the tectonic history of Fennoscandia from its margins: The past 100 million years

SKB Technical Report 95-36

1995

7-14 Larsson S Å, Tullborg E-L

Tectonic regimes in the Baltic Shield during the last 120mMa – A review

SKB Technical Report 95-05

1995

Kapitel 8

8-1 Grauer R

Bentonite as a backfill material in the high-level waste repository: chemical aspects

Nagra Technical Report 86-12E

1986

8-2 Se 0-2

8-3 Pusch R

Stress/Strain/Time properties of highly compacted bentonite

KBS Technical Report 83-47

1983

8-4 Pusch R

Stability of bentonite gels in crystalline rock – physical aspects

KBS Technical Report 83-04

1983

8-5 Pusch R, Börjesson L, Fredriksson A, Johannesson L-E, Hökmark H, Karnland O, Sandén T

The buffer and backfill handbook

Part I: Definitions, basic relationships and laboratory methods

SKB Arbetsrapport 95-45

1995

8-6 Miller W, Alexander R, Chapman N, McKinley I, Smellie J

Natural analogue studies in the geological disposal of radioactive wastes

Studies in Environmental Science 57,

1994

8-7 Se 0-3

Kapitel 9

9-1 Se 8-6

9-2 Werme L, Sellin P, Kjellbert N

Copper canisters for nuclear high level waste disposal. Corrosion aspects
SKB Technical Report 92-26
1992

9-3 Wersin P, Spahiu K, Bruno J

Kinetic modelling of bentonite-canister interaction. Long-term predictions of
copper canister corrosion under oxic and anoxic conditions
SKB Technical Report 94-25
1994

9-4 Bond A E, Hoch A R, Jones G D, Tomczyk A J, Wiggin R M, Worraker W J

Assessment of a spent fuel disposal canister
Assessment studies for a copper canister with cast steel inner component
SKB Technical Report 97-19
December 1997

9-5 Frost H, Ashby M F

Deformation-mechanism maps. The plasticity and creep of metals and ceramics
Pergamon Press
1982

Kapitel 10

10-1 Forsyth R

Spent nuclear fuel
A review of properties of possible relevance to corrosion processes
SKB Technical Report 95-23
1995

10-2 Se 0-2

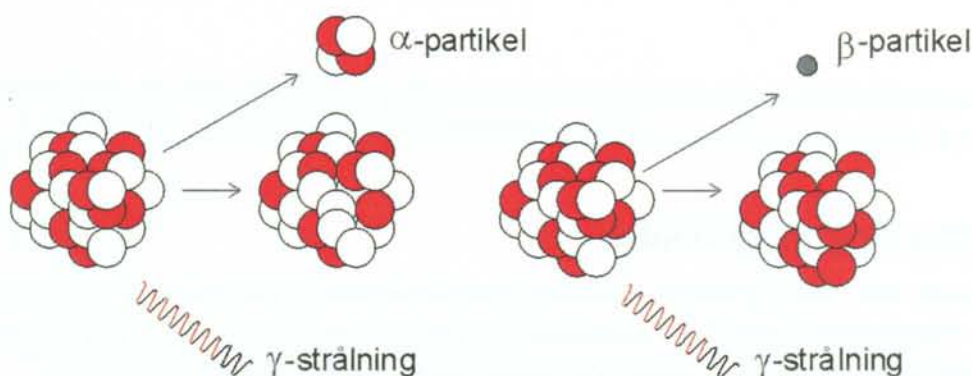
10-3 Se 8-6

Bilaga 1: Radioaktivt sönderfall och strålning

Radioaktivitet

Vissa ämnens atomkärnor är inte stabila utan de omvandlas till andra ämnen genom radioaktivt sönderfall. Vid sönderfall uppkommer joniserande strålning. Sönderfallen kan ha olika karaktär. Då t ex uran-238 sönderfaller till torium-234 bildas alfastrålning. (Siffrorna står för isotopens masstal, dvs summan av protoner och neutroner i kärnan.) Alfastrålningen kan ses som att positivt laddade partiklar, bestående av två protoner och två neutroner, sänds ut vid sönderfallet.

När däremot americium-241 bildas genom sönderfall av plutonium-241 alstras betastrålning. Betasönderfallet innebär att en neutron omvandlas till en proton i kärnan varvid en negativt laddad partikel, en elektron, sänds ut. Det motsatta kan också ske, nämligen att positiva betapartiklar, positroner, sänds ut då en proton övergår i en neutron. Vid både alfa- och betasönderfall bildas gammastrålning som till sin natur liknar vanligt ljus, fotoner, eller röntgenstrålning fast med betydligt högre frekvens. Figur 1 visar en principiell bild av radioaktiva sönderfall.



Figur 1: Radioaktivt sönderfall kan ske på flera sätt. Alfasönderfall innebär att den sönderfallande atomkärnan sänder ut en partikel bestående av två neutroner och två protoner och ett ämne med lägre masstal bildas. Vid betasönderfall övergår en neutron till en proton, eller tvärtom, och en elektron sänds ut från kärnan. Vid båda typerna av sönderfall bildas dessutom gammastrålning, som kan liknas vid röntgenstrålning.

Ytterligare en typ av strålning uppträder i använt kärnbränsle, nämligen neutronstrålning, vid vilken en neutron (oladdad partikel) sänds ut från atomkärnan. Antalet sönderfall per sekund anges i Becquerel (Bq) och beror på mängden av det radioaktiva ämnet samt dess halveringstid. Med halveringstid menas den tid det tar för hälften av atomkärnorna i ett ämne att sönderfalla.

Olika ämnen har vitt skilda halveringstider, från bråkdelar av sekunder till miljarder år. Exempel:

Isotop	Halveringstid	Förekomst
kol-14	5 730 år	atmosfären m m
kväve-16	7,1 sek	turbin m m i kärnkraft
verkkalium-40	1,3 miljarder år	människokroppen m m
cesium-137	30,2 år	kärnavfall, använt kärnbränsle
kobolt-60	5,3 år	strålkällor på sjukhus m m
polonium-216	0,15 sek	toriummineral
radon-222	3,8 dygn	berggrunden, "radonhus"
radium-226	1 600 år	berggrunden m m
uran-235	704 miljoner år	berggrunden, kärnbränsle
uran-238	4,5 miljarder år	berggrunden, kärnbränsle
plutonium-239	24 100 år	använt kärnbränsle
plutonium-241	14,4 år	använt kärnbränsle

Att radioaktiviteten avtar med tiden beror på att radioaktivt sönderfall avspeglar ett överskott av energi, som när den väl avgivits inte längre finns kvar.

Strålning och strålskador

Strålning kan vara skadlig för människor, djur och växter, därför att den skadar eller till och med dödar organiska celler. All strålning är en form av energi och det är denna energi som förmår ändra strukturen i organiska celler. Därför finns det risker förknippade med all hantering av radioaktiva ämnen. Alfa- och betastrålning når inte speciellt långt ens i vanlig luft och stoppas upp av t ex tjockare kläder och glasögon. För att stoppa gammastrålning krävs däremot ett bättre skydd. Exempelvis halveras intensiteten av 1 cm bly eller 10 cm vatten.

Hur farlig strålningen är beror på flera saker. Olika typer av strålning, alfa- beta- och gammastrålning, är olika farlig. Dessutom måste man skilja på extern och intern bestrålning. Vid extern bestrålning finns det strålande ämnet utanför kroppen, vid intern bestrålning har det strålande ämnet kommit in i kroppen via mat eller inandning. Generellt kan sägas att intag via andning som regel är farligare än intag via födan. Alfa- och betastrålning är energirik men har mycket kort räckvidd och kan lätt skärmas av. Så länge ämnen som avger alfa- och betastrålning inte kommer in i kroppen utgör därför sådan strålning en liten risk. Intern alfa- eller betastrålning, i synnerhet den förra,

är däremot mycket farligt och kan leda till stora skador på inre organ. Vid extern bestrålning är det alltså främst gamma- och neutronstrålning som är farligt.

Stråldos

Enheten Becquerel säger endast något om antalet sönderfall per tidsenhet och inget om farlighet eller risk. Som redan nämnts kan strålningen skada genom att dess energi absorberas i kroppens vävnader. Energiupptaget mäts i enheten Gray. Eftersom olika strålning – alfa, beta, gamma, neutroner – har olika biologisk verkan vid lika energiupptag använder man oftast i strålskyddsammanhang enheten Sievert (Sv) eller vanligare mSv= milliSievert som mått på stråldos med hänsyn tagen till strålningens biologiska verkan. Eftersom olika organ är olika känsliga skiljer man ofta på helkroppsdos och organdos. I naturen finns en ständig bakgrundsstrålning som bland annat beror på strålning från rymden och från berggrunden. I Sverige får en person en genomsnittlig stråldos av ca 1 mSv/år på grund av bakgrundsstrålningen och totalt erhåller han eller hon en dos av drygt 4 mSv/år. Detta fördelar sig på följande sätt: 40 % radonhus, 35 % sjukvård och strålbehandling, 19 % bakgrundsstrålning och 1 % övrigt.

En stråldos på 5 000 mSv anses direkt dödlig om den erhålls vid ett och samma tillfälle. Så höga momentana stråldoser till människor har bara förekommit vid några få enstaka extrema händelser som atombombsfällningarna över Hiroshima och Nagasaki samt vid släckningsarbetet efter reaktorolyckan i Tjernobyl. Lägre stråldoser kan orsaka cancer och skador på arvsmassa. Hur stor stråldos krävs då för att orsaka cancer? Det finns inget säkert svar på den frågan. Att stora stråldoser är farliga vet man genom faktiska observationer. Vetenskapliga belägg för att strålning från radioaktiva ämnen kan orsaka cancer finns för doser överstigande ca 100 mSv. Internationellt används uppskattningen att om en grupp personer får en dos av 1 000 mSv vardera kommer ca 5 procent av personerna i gruppen att få cancer till följd av denna stråldos. Det finns inga vetenskapliga belägg för att stråldoser under ca 100 mSv skulle ge förhöjd risk för cancer. Det är inte heller visat att så inte skulle vara fallet. Försiktigtvis antar man därför i strålskyddsarbetet att det inte finns någon tröskeldos och att risken för cancer är linjärt proportionell mot stråldosen även vid mycket små doser. Det innebär att om 100 000 personer får dosen 1 mSv vardera så räknar man med att fem stycken kan få cancer på samma sätt som att fem stycken får cancer om 100 personer får dosen 1 000 mSv vardera. Flertalet forskare anser detta vara en betydande överskattning av cancerrisken vid lågdosstrålning.

I Tabell 1 ställs ovanstående siffror i relation till en ungefärlig årlig stråldos som några olika kategorier människor erhåller i andra sammanhang.

Tabell 1: Erhållen stråldos för några olika kategorier människor [(källa: Lindblom och Birgersson (1994)).

Kategori	Stråldos per år (mSv)
Bränslebytare vid kärnkraftverk	5-9
Pilot på grund av kosmisk strålning på hög höjd	7
Medelsvensk på grund av radon i hus	3
Värst utsatta på grund av radon i hus	15
Medelsvensk på grund av medicinska undersökningar	0,6

Ett grundläggande kriterium för all verksamhet med radioaktiva ämnen är att den ska ge ett mycket ringa bidrag till en genomsnittlig persons i övrigt erhållna stråldos. Använt kärnbränsle är mycket radioaktivt; vid hanteringen måste olika strålskyddsåtgärder vidtas för att ingen ska skadas. En kärnteknisk anläggning i Sverige ska utformas så att högsta stråldos från anläggningen till en person bland allmänheten inte kommer att överskrida 0,1 mSv/år. I praktiken innebär detta krav att det verkliga dosbidraget till personer som vistas nära kärntekniska anläggningar ligger långt under denna dosnivå.

Referenser:

Joniserande strålning – grundkurs, SSI utbildning.

Bilaga 2: Bergarter och tektonik

Bergarter

I den fasta jordskorpan bildar grundämnena i olika kombinationer mineral. Några av dessa mineral bygger upp våra bergarter. En bergarts sammansättning och egenskaper beror på var och hur den har bildats. Med hänsyn till bildningssättet tillhör bergarterna en eller flera av följande grupper:

- magmatiska, med undergrupperna
 - vulkaniska,
 - djupbergarter,
 - gångbergarter,
- sedimentära,
- ytbergarter,
- metamorfa.

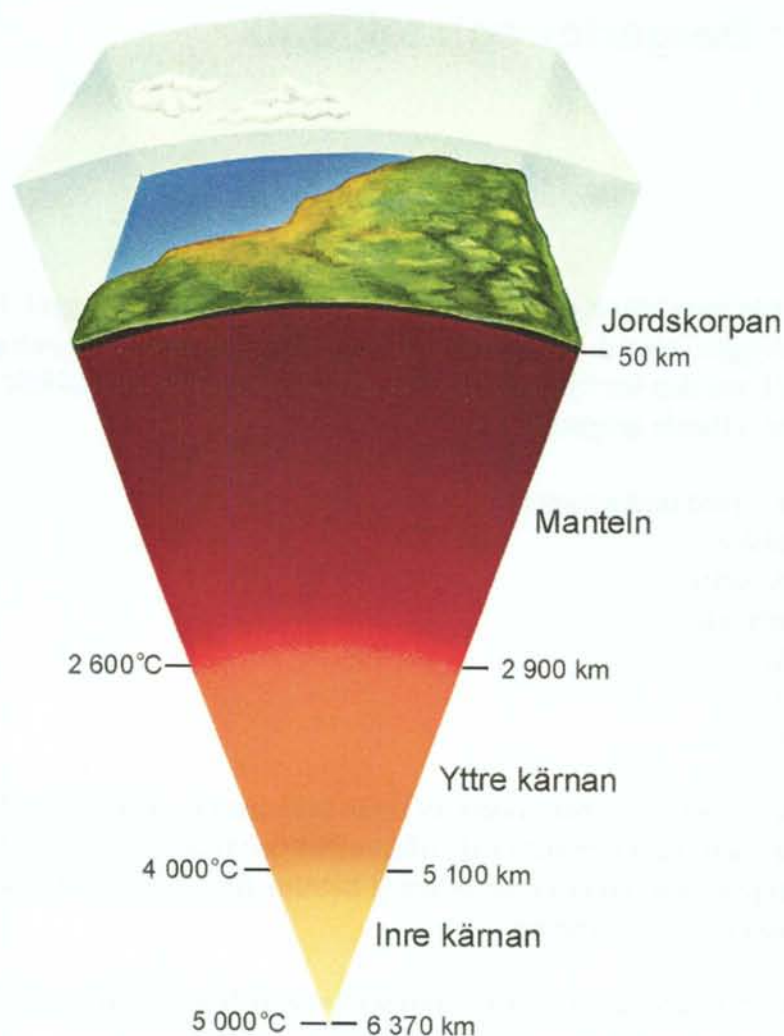
De *magmatiska bergarterna* har bildats av smält bergmassa, s k magma. De vulkaniska magmatiska bergarterna har bildats vid vulkanutbrott som lava eller vulkanaska, s k tuff. Undergruppen *djupbergarter* har bildats i hålrum, medan *gångbergarter* har bildats i gångar eller tunnlar i jordskorpan.

De sedimentära bergarterna har bildats som sediment och avlagringar på botten av hav och sjöar.

Ytbergarter är ett gemensamt namn för bergarter som bildats på jordens yta. I denna grupp ingår alltså sedimentära och vulkaniska bergarter.

Ordet metamorf kommer från latinets metamorphosis som betyder förvandling. Både sedimentära och magmatiska bergarter utsätts under utvecklingens gång för påfrestningar, t ex i samband med bergskedjeveckningar. Under påverkan av tryck och värme genomgår de en omvandling eller metamorfos och bildar *metamorfa bergarter*.

Bergarterna ingår i en geologisk utvecklingsprocess, ett kretslopp, där berg, land och jordlager ständigt byggs upp och bryts ned. I denna s k geologiska cykel pågår jordens skapelse och förintelse parallellt, nu och ständigt. Just nu bildas Anderna och Himalaya. På likartat sätt som Himalaya bildas nu, veckades för 510–400 miljoner år sedan den Skandinaviska fjällkedjan. Delar av den vittrar idag sönder under Grönlands inlandsisar. För ytterligare 2 500–500 miljoner år sedan bildades de bergarter som ingår i den Baltiska urbergsskölden, under påverkan av krafter som liknar dem som bildar Anderna idag.



Figur 1: Jorden delas inifrån och ut in i kärnan, manteln och skorpan.

Det svenska urberget utgörs av metamorfa bergarter. De bildades för 3 000–900 miljoner år sedan. Vissa delar med sedimentärt ursprung och andra med magmatiskt. Några exempel på bergarter i urberget är ådergnejs med sedimentärt ursprung, leptitgnejs med vulkaniskt ursprung och gnejsgranit som utgörs av omvandlade djupbergarter. De äldsta delarna av urberget finns i nordligaste Sverige (den s k Arkeiska provinsen) och består huvudsakligen av omvandlade djupbergarter.

Tektonik

Tektonik är den del av geologin som behandlar den storskaliga uppbyggnaden av jordklotets yttre skikt. Jorden delas inifrån och ut in i kärnan, manteln och skorpan (se Figur 1). Den inre delen av kärnan är fast och den yttre flytande. Manteln är förutom i en tunn zon vid ytan fast. Skorpan är jordens yttersta skal. Den delas in i en kontinental

och en oceanisk del. Den kontinentala delen är 25–90 km tjock och den oceaniska 6–11 km. De båda delarna har olika egenskaper. Kontinenterna har t ex lägre densitet än de oceaniska delarna.

Formerna på Afrika och Sydamerika antyder att de en gång suttit ihop. I början av seklet lade en tysk vetenskapsman fram teorin om kontinentaldriften. Han menade att alla kontinenter en gång hängt ihop. Under 60- och 70-talen utvecklades möjligheterna undersöka jordskorpan t ex via rymdsonder och djuphavsundersökningar. Bland annat tack vare dessa mätmöjligheter utvecklades teorin om kontinentaldrift till teorin om platttektonik. Enligt den platttektoniska teorin är jordens yta indelad i ett antal plattor som rör sig i förhållande till varandra. Platttektoniken gav kontinenternas rörelser en drivkraft, och förklarar på ett logiskt sätt både pågående geologiska förändringar och de fenomen vi ser spår av i berggrunden.

Inom platttektoniken finns ytterligare två begrepp för att beskriva jordklotets yttre delar. De är litosfären och astenosfären. Litosfären består av skorpan och de yttre delarna av manteln. Den är relativt stel och bildar materialet i plattorna. Astenosfären kan deformeras plastiskt och ligger under litosfären. Huvuddelen av de platttektoniska rörelserna sker i astenosfären.

Jordens indelning i plattor redovisas i Figur 2. Plattorna roterar runt sin egen axel och rör sig i förhållande till varandra. Man tror att rörelserna orsakas av konvektionsströmmar i jordens inre och jordens rotation. På Island, som ligger vid en plattgräns, kan plattornas rörelser lätt observeras. Så gott som all vulkanisk aktivitet och de flesta jordbävningar äger rum i anslutning till plattgränserna.

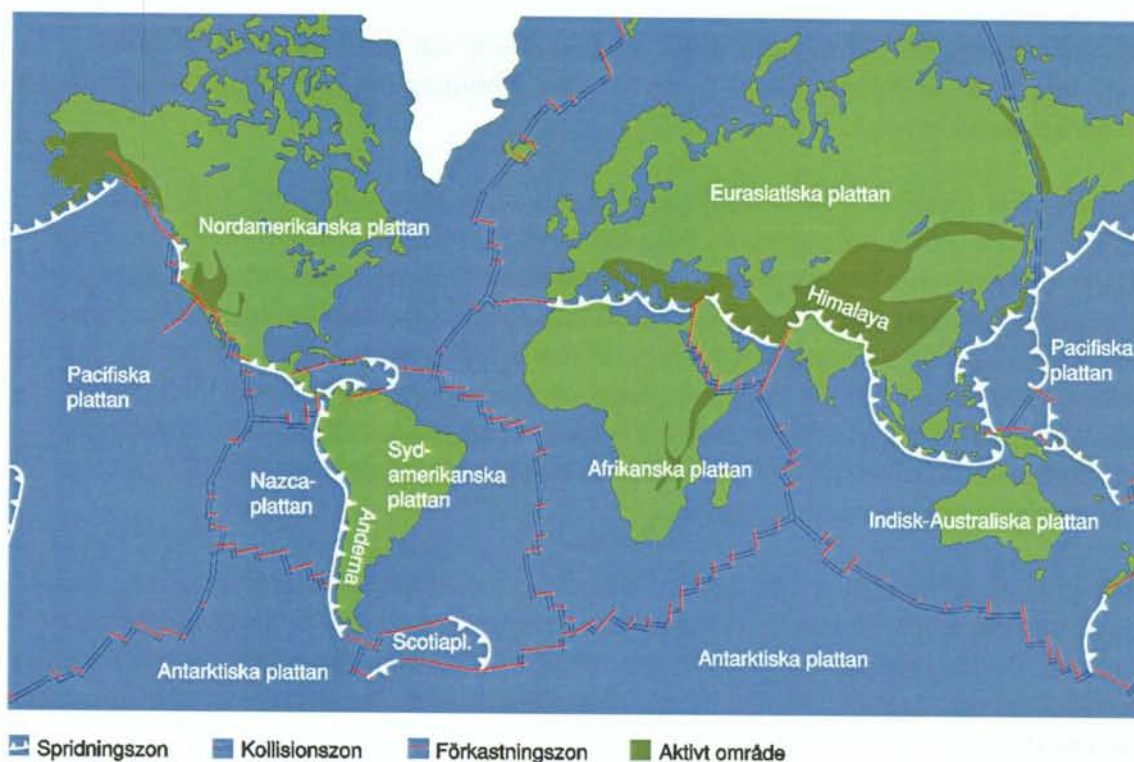
Gränserna mellan plattorna är av tre olika slag:

- förkastningszoner,
- spridningszoner,
- kollisionszoner.

Vid *förkastningszonerna* glider plattorna i förhållande till varandra.

Vid *spridningszonerna*, som även kallas centrala spridningsryggar, växer oceanbottnarna. Längs spridningszonerna dras plattorna isär och jordmantelns övre delar smälter upp. Smältan tränger upp i spalten mellan plattorna och ett symmetriskt mönster med de yngsta bergarterna närmast plattgränsen bildas. Den vertikala uppbyggnaden blir karakteristisk med lavar på ytan, under dem matargångar som kontinuerligt trängt in i äldre gångar och underst djupbergarter som aldrig nått ytan. Lavarna på ytan får vid avkyllningen av havsvattnet en kuddliknande struktur. Rester av oceanskorpa finns i nästan alla bergskedjor, t ex i Sulitelmaområdet i den svenska fjällkedjan.

Eftersom jordens yta inte ökar måste tillväxten vid spridningszonerna kompenseras med en minskning någon annanstans. Minskningen av ytan sker vid kollisionszonerna. Kollisionszonerna är av olika slag. De kan vara destruktiva där plattorna bryts ned. Det är framförallt i de destruktiva zonerna som ytillväxten kompenseras. De destruktiva



Figur 2: Jordens olika plattor och gränserna mellan dem. Inom de områden där aktiva rörelser pågår utanför plattgränserna kan man tänka sig att nya gränser kan komma att skapas.

zonerna finns i oceanernas djupgravar. Där dras oceanisk skorpa tillsammans med pålagrade vattenhaltiga sediment ned i jordens inre. Kontinenterna följer på grund av sin lägre densitet inte med ned i djupet utan "flyter" på litosfärens underlag. Mot kontinentens kant kan sediment skrapas av. I kollisionszonerna kan också bergskedjor veckas. Kontinenterna ny- och ombildas i kollisionszonerna. Där Nazcaplattan dras ned under den sydamerikanska plattan bildas Anderna. Om de båda kolliderande plattdelarna är kontinentala kilas de in under varandra och bergskedjor veckas. Detta sker idag då den Indisk-Australiska plattan kilas in under den Eurasiatiska plattan och Himalaya skjuter i höjden.

Vid kollisionerna frigörs stora mängder energi. Ett uttryck för det är att man i så gott som alla bergskedjor, såväl unga som gamla, finner granitiska bergarter. De har omvandlats ur smältor under höga tryck och temperaturer. Granitiska bergarter är den dominerande beståndsdel i kontinenterna. På många ställen är de granitiska bergarterna täckta av sedimentära bergarter.

Bergarternas sammansättning och strukturer är en följd av de mineral de byggts upp av och de påfrestningar de utsatts för. Påfrestningarna orsakas av platttektoniska rörelser och av klimatet.

Under årmiljonernas gång har kontinenter bildats, bergskedjor veckats och eroderats, kontinenter brutits upp och nya spridningszoner och därmed oceaner bildats. Under varje skede har plattornas lägen och rörelser, både egna och i förhållande till varandra, lett till att de belastats på något sätt. Lasterna bygger upp spänningar i berggrunden. De olika last-spännings-tillstånden eller plattektioniska förhållandena kan på grund av den långsamma utvecklingstakten betraktas som konstanta under långa tidsperioder. Om de plattektioniska förhållandena förändras på ett påtagligt sätt säger man att man går från en tektonisk regim till en annan. Förändringarna i plattektioniska förhållanden sker i miljonårsperspektiv.