

KASAM

STATENS RÅD FÖR
KÄRNAVFALLSFRÅGOR
National Council for Nuclear Waste



STATENS OFFENTLIGA
UTREDNINGAR



Tid för slutförvaring av kärnavfall

– samhälle, teknik och natur

En fördjupning till KASAM:s rapport om kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2007 (SOU 2007:38)



STATENS OFFENTLIGA
UTREDNINGAR

Statens råd för kärnavfalls-
frågor (KASAM) M 1992:A

Tid för slutförvaring

Samhälle, teknik och natur

En fördjupning till KASAM:s rapport om kunskapsläget på
kärnavfallsområdet 2007 (SOU 2007:38)

Statens råd för kärnavfallsfrågor (M 1992:A), KASAM
Miljödepartementet
Kv. Spektern, 103 33 Stockholm
Tel: 08-405 24 37; Fax 08-20 10 66, www.kasam.org

Rapporten kan beställas från KASAM:s kansli
kasam@environment.ministry.se

Omslag: Miljöinformation AB
Foto omslag: Jens Karlsson

EDITA VÄSTRA AROS
Stockholm maj 2007
ISSN 1653-820 X

Förord

Statens råd för kärnavfallsfrågor (KASAM) har funnit det lämpligt att i en fördjupning till 2007 års rapport om kunskapsläget på kärnavfallsområdet (SOU 2007:38) lägga tidsaspekten som ett genomgående tema vid behandlingen av ett antal olika frågor. Rapporten har därför getts titeln *Tid för slutförvaring av kärnavfall – samhälle, teknik och natur*.

Denna fördjupningsrapport innehåller bidrag från dels personer som är verksamma inom KASAM, dels några forskare som särskilt har ombetts att medverka.

Rapporten har utarbetats inom en arbetsgrupp där ledamoten Willis Forsling, KASAM, fungerat som sammanhållande. De personer med anknytning till KASAM som också medverkat är Lena Andersson-Skog (ledamot), Hannu Hänninen (sakkunnig), Gert Knutsson (ledamot), Sören Mattsson (ledamot), Jimmy Stigh (ledamot) och Olof Söderberg (konsult). Dessutom har professor em. Bert Bolin och professor Erling Nordlund bidragit med avsnitt kring sina respektive specialområden (klimatfrågan respektive bergbyggnadsteknik).

KASAM har inte tagit ställning i detalj till innehållet i de olika bidragen, men finner att de sammantaget ger en både komplex och fascinerande bild av problematiken kring kärnavfallet.

Stockholm i maj 2007

Kristina Glimelius
Ordförande

Innehåll

1	Inledning.....	9
2	Kärnavfallsfrågan och samhällsutvecklingen under efterkrigstiden – några perspektiv	13
2.1	1945-1972: Nationell mobilisering för kärnkraft och välfärd	14
2.2	1972–2006: Politisk sprängkraft – kärnavfall, ekonomi och miljömobilisering	22
2.3	2006–2060: Kanske ett omställt energisystem – men kärnavfallshanteringen måste fortsätta	40
2.4	Referenser.....	43
3	Anläggning och drift av slutförvar	47
3.1	Inledning.....	47
3.2	Krav och förutsättningar	47
3.3	Detaljundersökning av vald plats (tidsperspektiv 5-10 år).....	48
3.4	Design av förvaret (tidsperspektiv \approx 5 år)	49
3.5	Byggande av förvaret (tidsperspektiv 5–10 år).....	51
3.6	Drift av förvaret (tidsperspektiv 50-60 år)	53
3.7	Sammanfattning	55

4	Tekniska barriärer	57
4.1	Inledning.....	57
4.2	Kapseln i ett tidsperspektiv	58
4.2.1	Krav på kapseln (tidsperspektiv > 100 000 år).....	58
4.2.2	Tillverkningsfrågor (tidsperspektiv 1–50 år).....	61
4.2.3	Beständighet av kapseln (tidsperiod > 100 000 år).....	63
4.2.4	Sammanfattning	66
4.2.5	Referenser.....	67
4.3	Bentonitbufferten i ett tidsperspektiv	67
4.3.1	Bentonitbuffertens uppgifter (tids- perspektiv > 100 000 år)	67
4.3.2	Bentonitens egenskaper (tidsperspektiv > 100 000 år).....	68
4.3.3	Vattenmättnadsförloppet och dess betydelse (tidsperspektiv 10–200 år).....	70
4.3.4	Omvandling till illit (tidsperspektiv 100– 100 000 år)	71
4.3.5	Omvandling till kalcium-bentonit (tids- perspektiv 10–200 år).....	72
4.3.6	Porvattnets inverkan (tidsperspektiv 1–200 år)	73
4.3.7	Transportmekanismer (tidsperspektiv 1 000–100 000 år)	73
4.3.8	Isotopfraktionering (tidsperspektiv 1 000–100 000 år)	74
4.3.9	Sammanfattning	75
4.3.10	Referenser.....	76
4.4	Återfyllningen i ett tidsperspektiv	77
4.4.1	Krav på återfyllningen (tidsperspektiv > 100 000 år).....	77
4.4.2	Olika koncept för återfyllningen (tids- perspektiv 1–100 år).....	78
4.4.3	Vattenmättnadsförloppets betydelse och hastighet (tidsperspektiv 1–1 000 år).....	79

4.4.4	Återfyllningens hydrauliska egenskaper * och svälltryck (tidsperspektiv 1–100 000 år)	80
4.4.5	Geokemiska förlopp (tidsperspektiv 1–10 000 år)	82
4.4.6	Mekanismer för jontransport (tidsperspektiv 10–100 000 år)	82
4.4.7	Sammanfattning	83
4.4.8	Referenser	84
5	Naturliga analogier	85
5.1	Inledning, tidsperspektiv	85
5.2	Oklo-”reaktorerna” och deras ”avfall”	88
5.3	Övriga analogier	89
5.3.1	Sierra Peña Blanca, Mexiko	89
5.3.2	Cigar Lake, Kanada	89
5.3.3	Palmottu, Finland	90
5.3.4	Coles Hill, USA	90
5.4	Kvantitativa data beträffande läckage av radioaktiva ämnen från uranmineraliseringar och historiska ”reaktorer”	91
5.5	Slutsatser	91
6	Geologisk utveckling	93
6.1	Inledning	93
6.2	Berggrundsgeologiska tidsperspektiv	95
6.3	Kvartärgeologiska tidsperspektiv	101
6.3.1	Kvartärtiden som helhet	101
6.3.2	Kvartärtidens senaste del – drygt 100 000 år tillbaka i tiden	103
6.3.3	Förändringar i landskapet under och efter den senaste istiden	107
6.3.4	Förändringar i hav och sjöar under och efter den senaste istiden	109
6.3.5	Sammanfattning	113
6.4	Referenser	116

7	Framtida klimatutveckling	119
7.1	Några inledande kommentarer	119
7.2	Alternativa utvecklingsscenarier under de närmaste hundra åren	120
7.3	Vad kan hända under årtusendet bortom 2100-talet?	126
7.4	Klimatförändringar under de närmaste ca 100 000 åren	128
7.5	Sammanfattning.....	133
7.6	Referenser	134
8	Avslutande reflektioner.....	135

1 Inledning

Denna fördjupningsrapport består av ett antal fristående bidrag som behandlar skilda aspekter av kärnavfallsfrågan, men med tidsperspektivet som en gemensam utgångspunkt. De frågeställningar som belyses gör inte anspråk på att täcka hela området. Men de utvalda frågeställningarna är sådana som bedöms ha ett större allmänt intresse.

Först (kapitel 2) ges en allmän översikt av hur kärnavfallsfrågan har behandlats i Sverige sedan planerna på användning av kärnkraft började ta form i mitten av 1940-talet. Problematiken kring kärnavfallsfrågan är kopplad till vår naturliga skräck och avsky för utveckling av kärnvapen under de senaste 60-70 åren, men även den fredliga användningen av kärnkraften som har skett under de senaste 30-40 åren är långt ifrån okontroversiell. Detta har speglats i synen på kärnkraften och kärnavfallet bland politiker och i den allmänna opinionen och måste ses mot bakgrund av vårt ökande behov av elenergi och debatten kring det globala hotet mot vårt klimat genom förbränning av fossila bränslen. Åsikterna om kärnkraften och kärnavfallet som är en oundviklig följd av dess användning har varierat över tid i Sverige. Framställningen avslutas med några reflektioner om det arbete som förestår fram till 2060-talet. Tidsperspektivet är alltså drygt 100 år.

I kapitel 3 är tidsperspektivet betydligt kortare, ca 20 år. Här behandlas anläggningstekniska frågeställningar under förutsättning att ett slutförvar av KBS-3-typ ska byggas. Anläggning och drift av ett underjordiskt slutförvar har många likheter med att etablera en underjordsgruva och det finns många erfarenheter att ta vara på.

I kapitel 4 tas frågor om de tekniska barriärerna upp, alltså kopparkapseln, bentonitbufferten och återfyllnaden. Kopparkapseln och bentonitbufferten har båda nyckelroller i förvaret genom att förhindra att grundvatten kommer i kontakt med kärnbränslet och att radioaktiva ämnen transporteras ut till omgivningen. De

måste båda kunna fullgöra sina uppgifter under den tidsperiod som bränslet är farligt, dvs. över 100 000 år. På lång sikt påverkas förvaret av olika processer, vissa verkar under en kortare tidsperiod medan andra verkar under flera 10 000-tals år. För att fånga in denna tidsaspekt har vi i kapitel 4 valt att ange specifika tidsintervall (från 10 år och upp till 100 000 år) som är relevanta för sådana processer. Startpunkten för de tidsperspektiv som är aktuella i det avsnittet har nästan alla det gemensamt att de börjar i och med att kapslarna deponeras.

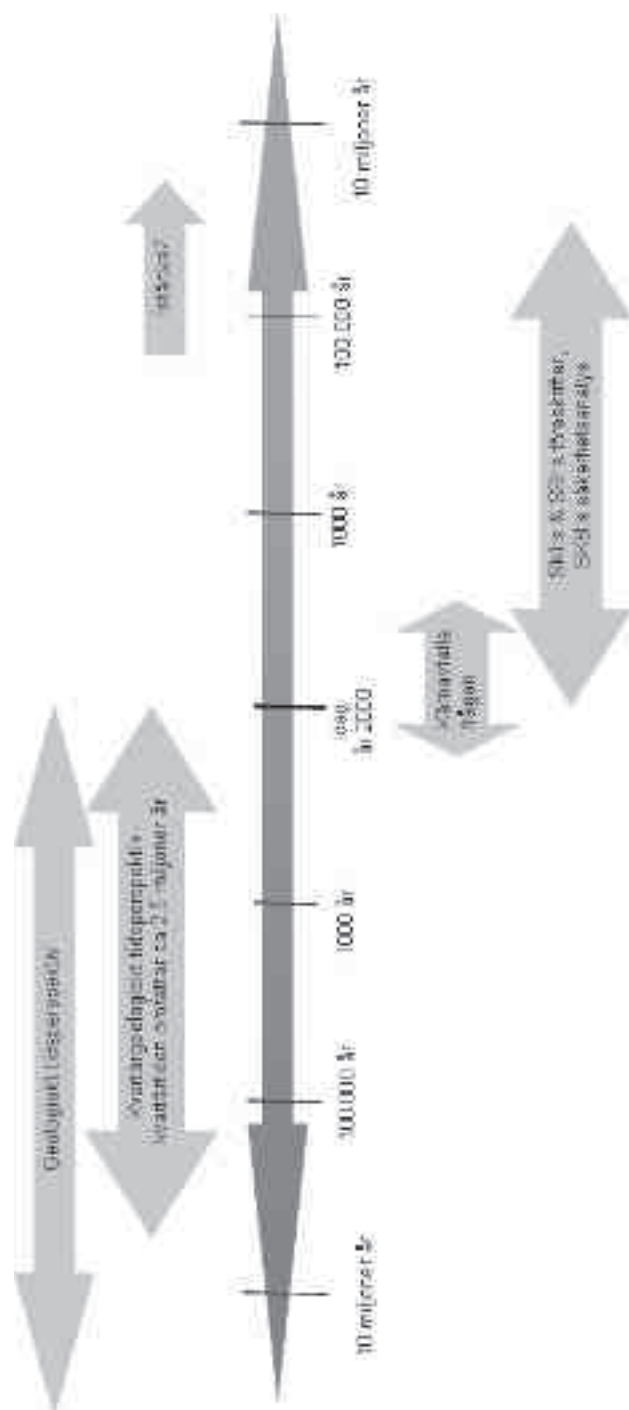
Möjligheten att hämta erfarenheter för framtiden från naturliga analogier behandlas i kapitel 5. Naturliga analogier innebär förekomst av material och processer i naturen som kan förväntas i ett slutförvar. De kan ses som ett långvarigt experiment i naturliga system där en reaktorzon kan ha varit aktiv i mer än 100 000 år. Tidsperspektivet sträcker sig i detta kapitel miljontals år bakåt i tiden.

Också i kapitel 6, Geologisk utveckling, rör man sig med tidsrymder på miljoner år bakåt. Kristaller som bildats för mer än 1 700 miljoner år sedan kan vi hålla i och studera i dag.

Den framtida klimatutvecklingen är en alltmer central fråga i debatten. Klimatets framtida karaktär styrs av ett samspel mellan astronomiska faktorer som varierar på tidsskalor från 10 000-100 000 år och förändringar av atmosfärens koldioxidkoncentration som sker på tidsskalor från 100 till några tusen år, och som är orsakade av människan och/eller av naturen.

Figur 1.1 på följande sida – av utrymmesskäl måste en logaritmisk skala användas – illustrerar hela det tidsperspektiv som täcks av de olika bidragen.

Figur 1.1 Tidsperspektiv på kärnavfall



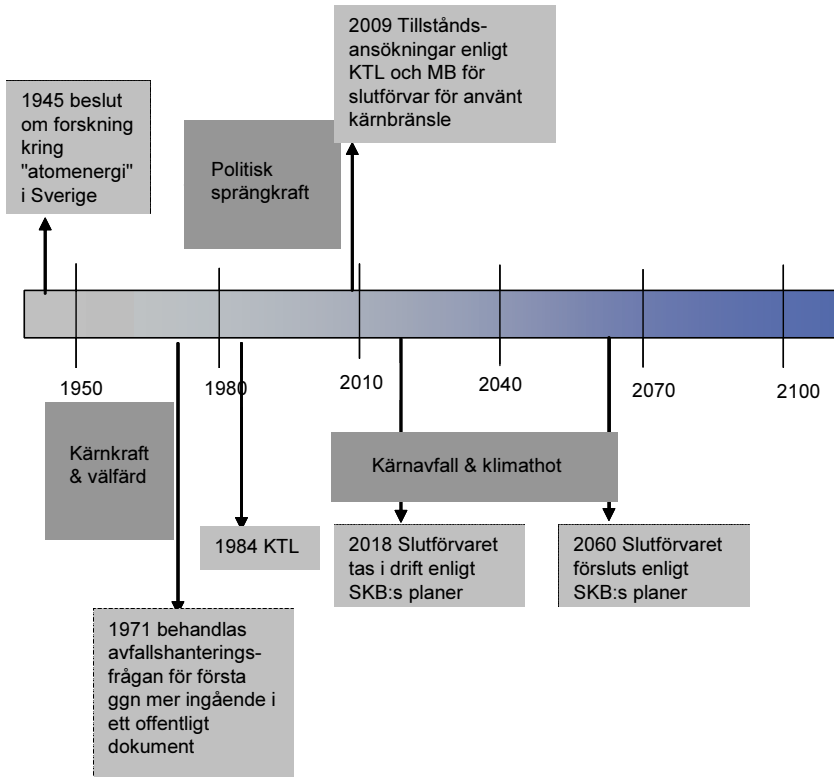
2 Kärnavfallsfrågan och samhällsutvecklingen under efterkrigstiden – några perspektiv

Lena Andersson-Skog och Olof Söderberg

I detta kapitel redovisas några viktigare händelser under den tid som arbetet med slutförvaring av använt kärnbränsle från de svenska kärnkraftverken har pågått. Därefter redovisas viktigare årtal i den planering som Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har för sitt fortsatta arbete. Det bör understrykas att det är fråga om *bolagets* tidsplanering och att samhällets organ (riksdag, regering, statliga myndigheter, kommuner) inte har tagit ställning till dessa planer. Denna händelseutveckling bör sättas in i den samhällsekonomiska utvecklingen. Några av efterkrigstidens mest centrala drag i den svenska utvecklingen har varit framväxten av en i många stycken unik politisk välfärdssatsning som finansierats av en industriell expansion. En framgångsrik bas- och verkstadsindustri har utgjort av en förutsättningarna för denna tillväxt. Den underliggande förutsättningen var den tekniska och vetenskapliga utveckling som sedan 1800-talets slut drivit fram nya material, bättre maskiner och mer effektiv energianvändning.

Figur 2.1 illustrerar ett tidsperspektiv på hur kärnavfallsfrågan behandlas i Sverige.

Figur 2.1 Tidsperspektiv på kärnavfallsfrågans behandling i Sverige



2.1 1945-1972: Nationell mobilisering för kärnkraft och välfärd

Vid mitten av 1800-talet var Sverige ett land präglad av jordbruk, råvaruexport och enkel industriproduktion. Industrialiseringsprocessen bidrog till att det svenska samhället omvandlades både ekonomiskt, politiskt och socialt. Vid 1900-talets mitt var Sverige ett av världens rikaste länder, efter en sekellång tillväxt av BNP med i genomsnitt 2% per år.¹ Viktiga drivkrafter i utvecklingen var den snabba tekniska, industriella och organisatoriska omvandlingen av hur varor och tjänster producerades och fördelades mellan olika samhällsskikt. En vanlig bild är att manuell arbetskraft och hantverk ersattes av maskiner och olika slag av fysisk infrastruktur.

¹ Schön (2007).

Dessa sammanhängande sociala och tekniska förändringarna brukar ibland kallas utvecklingsblock, eftersom de utgör en grund för samhällets produktionsvillkor.² Ofta anses transport- och energiteknikerna vara avgörande i denna omvandlingsprocess, eftersom energiförbrukningen ökat nästan lika mycket som kapitalinvesteringarna. Industrialiseringen kan ses som en period där energianvändningen, från att ha varit baserad på ved och biomassa, blir baserad på olja, stenkol, vattenkraft och, under efterkrigstiden, kärnkraft.³

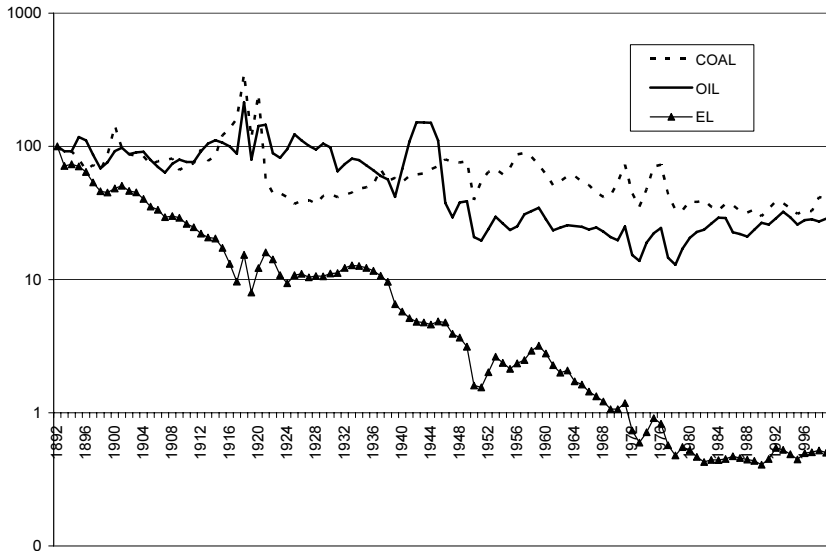
En av de viktiga faktorerna under industrialiseringen har varit en framgångsrik kraftteknisk utveckling. Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA) specialiserade sig på elektrisk överföring och hade en central roll i utbyggnaden av den svenska kraftindustrin och för övergången till elektricitet inom process- och tillverkningsindustrin. ASEA och Vattenfall – som då var ett statligt affärsverk – blev ett starkt utvecklingspar som drev på utvecklingen av elektrifieringen.

I figur 2.2 visas den relativa prisförändringen mellan ved, olja och el under perioden 1892-1999. Tydligt är att det sker en snabb och kontinuerlig prisminskning för framför allt elkraft relativt vedpriserna ända från 1900-talets början. Först under 1990-talet bromsas den relativa prissänkningen upp, vilket sammanfaller med avregleringen och internationaliseringen av elmarknaderna.

² Dahmén (1950), Schön (2007).

³ Wrigley (2004).

Figur 2.2 Priser för kol, olja och elektricitet relativt ved i Sverige 1892-1999
Index 1892 = 100



Källa: Lindmark och Gustavsson-Bergqvist (2007).

Omkring år 1950 hade elkraften slagit igenom som en bärande infrastruktur både för hushållens välfärdsutveckling och industrins produktionsförutsättningar. Denna utveckling gick hand i hand med den ekonomiska tillväxten. I internationell ekonomisk-historisk forskning brukar perioden mellan 1945 och 1970 kallas för *the golden age; en period med stark internationell välfärdsökning*. Sverige var en av välståndsvinnarna under denna period. Initialt skapade återuppbygganden av det raserade Europa en stark efterfrågan på svenska råvaror som trä, papper och stål, vilket gynnade den svenska tillväxten. Det var också en tid med snabba och genomgripande förändringar av det svenska samhället. Det var först nu som en reellt integrerad svensk nationell marknad för varor och tjänster växte fram, en process kraftigt stimulerad av rationalisering och produktivitetshöjning inom jordbruk och industri.

Urbaniseringen skapade samtidigt en förtätning av de orter som blev kvar på landsbygden och befolkningsrörelserna bidrog till att stadsområdena och de stora städernas förorter växte. Den andra sidan av detta var en snabb avflyttning från glesbygder och skogs-länen. Under 1950-talet ökade också realinkomsterna för de flesta

befolkningsgrupper. Konsumtionen av kapitalvaror ökade tack vare stigande realinkomster för breda folkgrupper i och med att hushållsmaskinerna gjorde sitt intåg i de svenska hemmen och att massbilismen fick sitt genombrott.

Utvecklingen var delvis en följd av den ekonomiska politik som den socialdemokratiska regeringen drev när det gällde investeringspolitik, sysselsättning, regionalpolitik och sociala frågor. Under 1960- och 1970-talet växte också vad man idag brukar kalla den svenska modellen fram.⁴ I denna politik låg fokus på en nationell utbyggnad och ambitionshöjning inom hälso- och sjukvård, barnomsorg och skola, och samtidigt en satsning på sociala transfereringar som barnbidrag, socialförsäkringar, bostadsbidrag etc. Detta finansierades genom de ökande skatteintäkter som den ekonomiska tillväxten gav. Klart är att det socialdemokratiska partiet såg den industriella utvecklingen som samhällsomvandlingens motor.⁵ Detta krävde en konstant ökande energitillgång för industrier och hushåll. I Sverige kom vattenkraften tidigt att bli den inhemska energiresurs som exploaterades på nationell nivå. Så tidigt som under 1940-talet började dock diskussionerna om hur det framtida energibehovet skulle täckas, och en snabbt växande import av olja ansågs nödvändig för att tillgodose såväl industrins som hushållens efterfrågan på el.

Vid sidan av vattenkraften fanns också en annan inhemska energikälla, de omfattande uranfyndigheterna.⁶ Med denna energireserv som en potentiell bas betraktades kärnkraften som ett komplement och/eller alternativ till oljeimporten och den vattenkraftsproducerade elen. Även om de inhemska uranfyndigheterna hittills inte har tagits i anspråk i stor skala, har från 1975 en allt större del av elen producerats av kärnkraftverken, se tabell 2.1.

⁴ Magnusson (1996).

⁵ Andersson (2003), Friman (2002).

⁶ Andersson-Skog (2005).

Tabell 2.1 Den inhemska nettoproduktionen av elkraft (TWh) fördelad på produktionsslag (%) år 1970–2000

Produktionsslag	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
Nettoproduktion (TWh)	59,1	78,6	94,0	132,3	141,7	144,1	141,8
Import minus export (TWh)	4,3	1,3	0,5	-1,5	-1,8	-1,7	4,7
Vattenkraft (%)	69,0	72,5	61,7	52,8	50,4	46,7	54,9
Kärnkraft (%)	-	14,5	26,9	42,2	46,0	46,5	38,6
Kraftvärme i industrin (%)	5,2	4,2	4,2	1,8	1,9	2,7	3,0
Kraftvärme i fjärrvärmesystem (%)	4,3	4,2	5,9	2,8	1,7	4,1	3,2
Kondenskraft (%)	20,3	4,4	1,1	0,4	0,0	0,0	0,0
Gasturbiner (%)	1,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Vindkraft (%)	-	-	-	0,0	0,0	0,0	0,3

Källa: Bearbetning från Andersson-Skog (2005).

Redan år 1945 hade den svenska staten och näringslivet i samverkan beslutat sätta igång forskning kring vad som då kallades ”atomkraften” eller ”atomenergin”. Det var fråga om en satsning där forskningspolitiska och industripolitiska motiv blandades med förhoppningar om att resultatet skulle kunna få både militär och civil användning. Verksamheten bedrevs inom ramen för det år 1947 bildade AB Atomenergi, ett bolag som då ägdes till 57 % av staten och till resterande del av svenska kommunala och privata kraftföretag samt industriföretag.

Kärnkraftsreaktorer för värme- och elproduktion hade börjat utvecklas i USA, Storbritannien och Sovjetunionen under början av 1950-talet. Vissa konstruktioner var avsedda såväl för el- och värmeproduktion som för tillverkning av vapenplutonium.

En första forskningsreaktor i Sverige byggdes vid Kungliga Tekniska Högskolan, förlades inom dess område i Stockholm och togs i bruk år 1954 och ur drift år 1970. En andra forskningsreaktor lokaliserades några år senare till Studsvik (norr om Nyköping), som från mitten av 1950-talet etablerats som ett svenskt kärntechniskt forskningscentrum⁷.

⁷ Denna forskningsreaktor startades år 1960 och användes fram till år 2005. En andra forskningsreaktor i Studsvik användes också under åren 1960-2005. Beslut har fattats om

Under detta första decennium av ”atomenergiprogrammet” förekom i Sverige ingen offentlig diskussion om hur man skulle ta hand om det högaktiva avfall som verksamheten gav upphov till.

År 1956 kom att bli ett viktigt årtal för utvecklingen av atomkraft för civila ändamål i Sverige. Av största betydelse var att Förenta Nationernas konferens 1955 i Genève om kärnkraftens fredliga utveckling hade skapat en stark optimism om möjligheterna att med god effektivitet och ekonomi utnyttja kärnenergin. Det berodde bl.a. på att USA vid konferensen hade deklarerat att man var beredd att ge andra länder tillgång till tidigare hemlig teknisk information. Av betydelse var också att USA hade antytt möjligheten att sälja anrikningstjänster för användning i kraftreaktorer.

På basis av förslag från flera olika utredningar beslutade riksdagen år 1956 om ett program och ett regelverk på atomenergiområdet⁸. Programmet innebar bl.a. att AB Atomenergi skulle ha ett avgörande inflytande över konstruktionsarbetet och att detta skulle inriktas på att använda naturligt uran med tungt vatten som moderator. I programmet (”den svenska linjen”) ingick också inhemsk bränsleförsörjning samt upparbetning av använt bränsle.⁹ Regelverket kom i första hand till uttryck i en ny lag (1956:306) om rätt att utvinna atomenergi m.m. (atomenergilagen). Lagen innehöll bestämmelser om krav på tillstånd för uppförande, innehav eller drift av atomreaktorer och anläggningar för bearbetning av atombränsle.

I propositionen om riktlinjer för utvecklingsarbetet på atomenergiområdet finns vissa uppgifter om avfallets farlighet (prop. 1956:176 s. 5 och 19). Men dessa uppgifter står i referatet av det underliggande utredningsmaterialet och nämns inte i den del av

rivning av båda dessa reaktorer. Bränslet från forskningsreaktorerna i Studsvik kommer att återsändas till Department of Energy i USA under år 2007 och reaktorkomponenter med hög inducerad aktivitet kommer att nedmonteras inom ett par år och förvaras inom Studsviksanläggningen i avvaktan på slutförvar. Forskningsreaktorn vid Kungliga Tekniska Högskolan har rivits och all radioaktivitet har avlägsnats från det utrymme där reaktorn fanns. Utrymmet kan sedan år 1985 användas för andra verksamheter.

⁸ Jfr prop. 1956:176 angående riktlinjer för utvecklingsarbetet på atomenergiområdet, 3LU22 respektive prop. 1956:178 med förslag till lag om rätt att utvinna atomenergi m.m., 3LU 23.

⁹ Under det föregående utredningsarbetet hade skisserats planer på att uppföra ca fem kärnvärmereaktorer fram till 1965 och några kärnkraftsreaktorer fram till år 1970. Av dessa kom endast kraftvärmeaktorn i Ågesta till utförande. Riksdagen godkände år 1958 planer på att förlägga en kärnkraftsreaktor till Marviken (norr om Norrköping). Den anläggningen började byggas 1964 men arbetet avbröts år 1969 när det stod klart att det var nödvändigt att bygga om viktiga säkerhetssystem. Eftersom den tekniska utvecklingen hade gjort tungvatnenlinjen ointressant ansågs ombyggnadskostnaderna för höga och anläggningen lades ned.

propositionen där regeringens förslag redovisas (s. 34-43). Inte heller under utskottsbehandlingen av propositionen verkar frågan om avfallens farlighet ha tilldragit sig särskilt intresse (jfr 3LU 1956:22).

Det första tillfället när avfallsfrågorna uppmärksammades offentligt i Sverige var sannolikt i början av 1960-talet. Vid denna tid pågick planeringen av vad som blev kraftvärmereaktorn i Ågesta¹⁰ (som under perioden 1964-1974 försörjde södra Stor-Stockholm med värme). De boende i närområdet misstrodde atomexpertisens försäkringar om att vissa låghaltiga utsläpp av radioaktiva restprodukter var ofarliga. Men protesterna hade i hög grad lokal karaktär och utvecklades aldrig till en mer principiell diskussion om avfallsfrågan.¹¹

År 1966 kan användas som en markör av en ny milstolpe i utvecklingen av det svenska atomenergiprogrammet. Av olika skäl hade sedan slutet av 1950-talet såväl de privata kraftproducenterna och den elintensiva industrin som det dåvarande Statens vattenfallsverk börjat intressera sig mer för ett helt annat koncept för reaktorer för elproduktion, nämligen lättvattenreaktorer. En föregångare till dagens OKG AB ansökte år 1959 hos regeringen om koncession för en mindre lättvattenreaktor som skulle förläggas till Simpevarpshalvön, norr om Oskarshamn. Planerna på det projektet ändrades emellertid och år 1965 ansökte företaget om koncession för den reaktor som kom att bli den första kärnkraftsreaktorn i Sverige (O 1). Den togs i kommersiell drift år 1972.

Under hela 1960-talet hade det, både internt bland kärnkraftsexperter och i offentliga sammanhang, förts en debatt om säkerhet och ekonomi i Marviken-projektet¹² och om satsningen på ”den svenska linjen”, alltså tungvattenreaktorer. År 1966 tillsatte regeringen en ny atomenergiutredning för att se över organisationen och finansieringen av det industriella utvecklingsarbetet kring kärnkraften. Detta utvecklingsarbete fick en alltmer tydlig näringspolitisk inriktning, varvid det något år senare nybildade Industridepartementet fungerade som en viktig aktör. Resultatet blev att stora delar av AB Atomenergi från år 1968 slogs samman med delar

¹⁰ Ågesta-reaktorn försörjde under åren 1964-1974 södra Stor-Stockholm med värme. Använt kärnbränsle och högaktivt kärnavfall fördes därefter från anläggningen till Studsvik, där det fortfarande förvaras. Avsikten är att riva reaktorn när den plats har identifierats dit rivningsavfall från dagens kärnkraftsreaktorer kommer att föras.

¹¹ Anshelm (2006) s. 25-26.

¹² Om detta projekt, se not 9.

av det privata ASEA till ett halvstatligt bolag, Asea-Atom, med viktigaste uppgift att konstruera kärnkraftsreaktorer.¹³ Under åren 1969–1972 beställde ägarna till de blivande kärnkraftverken i Oskarshamn, Ringhals, Barsebäck och Forsmark ytterligare sju lättvattenreaktorer, de flesta av Asea-Atom. Riksdagen medverkade i denna utbyggnad endast i den mån det var nödvändigt att anslå investeringsmedel för sådana projekt där Statens vattenfallsverk var engagerat. Något ifrågasättande av utbyggnaden skedde inte från något politiskt partis sida. Inte heller tog – före år 1972 – något parti upp kärnavfallsfrågorna till debatt.

Flera medverkande under denna tid har vittnat om att frågan om hur avfallet från de nya kärnkraftsreaktorerna skulle tas om hand närmast var en "icke-fråga". På frågor från allmänheten i de trakter där kärnkraftverken skulle lokaliseras försäkrade industrins företrädare att det inte fanns anledning till oro och att frågan skulle få sin lösning.

Det finns här anledning att understryka att experterna inom kärnkraftsindustrin ända fram till in på 1980-talet utgick från att det använda kärnbränslet från de svenska reaktorerna skulle upp- och omarbetas och eventuellt i stor utsträckning kunna användas på nytt i särskilda reaktorer. Använt kärnbränsle betraktades sålunda inte som avfall utan i första hand som en resurs. Vad man skulle behöva ta hand om för långtidsförvaring skulle alltså vara högaktiva avfallsprodukter från upp- och omarbetningen. Volymerna sades vara förhållandevis små.¹⁴

Åren kring 1970 började emellertid – under inflytande av en diskussion som hade sitt ursprung främst i USA – uppmärksamheten i den offentliga debatten att riktas mot kärnavfallsfrågan. Diskussionen kring den frågan kom att spela en avgörande roll i den energipolitiska debatt om kärnkraftens roll som nu startade och som till stora delar kommit att präglade svensk inrikespolitik fram till våra dagar. En debatt om kärnkraften som fördes i Dagens Nyheter våren 1970 kan ses om en inledande första utmaning av vad som senare kallats atomeufori och teknikoptimism.¹⁵

¹³ Leijonhufvud (1994).

¹⁴ Det var först i början av 1980-talet som det i Sverige stod klart att inriktningen skulle vara att slutförvara det använda bränslet utan föregående upp- och omarbetning. Se vidare nedan.

¹⁵ Uttrycket används av Anshelm (2006) s. 17.

Första gången som avfallshanteringsfrågorna behandlas mer ingående i ett offentligt tillgängligt dokument är år 1971. Dokumentet publicerades av Industridepartementet under titeln *Upparbetning av använt kärnbränsle*¹⁶. Det utgör resultatet av en studie som utförts av en arbetsgrupp med tjänstemän från olika departement, vilken hade tillsatts i april 1970 med uppgift att undersöka förutsättningarna för en svensk upparbetningsanläggning. Bakgrunden var att staten hade köpt in ett landområde vid Sannäs i Bohuslän. Detta område bedömdes vara tänkbart för lokalisering av en svensk upparbetningsanläggning och även som plats för slutförvaring av avfallet från en sådan anläggning. Planerna hade mött kraftigt lokalt motstånd år 1969 och i början av år 1970. I studien, som är daterad mars 1971, konstaterades att möjligheter att upparbeta det använda kärnbränslet erbjöds utomlands, men att ansvaret för avfallet från upparbetningen måste ligga hos ursprungslandet. Att det fanns metoder för en säker slutförvaring av upparbetningsavfallet ifrågasattes inte i arbetsgruppens rapport.¹⁷

Det fanns emellertid åtminstone inom ett politiskt parti, centerpartiet, några personer som började känna tveksamhet om teknikernas och vetenskapsmännens förmåga att hantera kärnavfallsfrågorna. Denna tveksamhet kom till uttryck i ett smärre tillägg till ett förslag till partiprogram som partistyrelsen hade lagt fram vid partiets stämma i Göteborg i mars 1970. Tillägget ledde emellertid inte till någon omedelbar kursändring i den fortfarande klart kärnkraftspositiva attityd som centerpartiet visade i riksdagen år 1971. En total kursomläggning kom först år 1972.

2.2 1972–2006: Politisk sprängkraft – kärnavfall, ekonomi och miljömobilisering

Omsvängningen i synen på kärnkraften sammanföll – kanske något paradoxalt – med den internationella strukturkris som blivit märkbar från 1960-talets slut och som ledde fram till den världsomfattande ekonomiska krisen 1973-1976. I centrum stod basindustrierna – gruvor, stålindustri, varv – och energitillgången. Både 1973 och 1976 kännetecknades av oljekriser, vilket innebar att

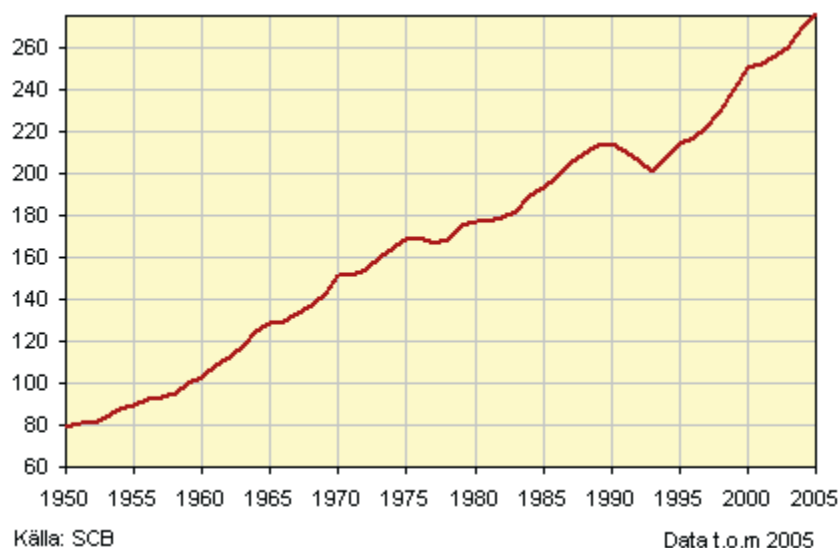
¹⁶ Ds I 1971:1.

¹⁷ Inom AB Atomenergi hade man sysslat med upparbetningsteknik under senare delen av 1960-talet. Det kan också nämnas att OKG år 1969 tecknade avtal med det statliga British Nuclear Fuel Limited (BFNL) om upparbetning av använt kärnbränsle, varvid förutsattes att det högaktiva avfallet efter upparbetningen skulle slutförvaras i Storbritannien.

olja- och energipriserna steg kraftigt. Stigande energipriser för processindustrin höjde snabbt prisnivån även på varorna i konsumentleden. Inflation och arbetslöshet skapade stora problem. Den ekonomiska expansionen bromsade upp kraftigt, och BNP-tillväxten sjönk från den tidigare periodens höga tal. Tillväxten var t.o.m. negativ under några år, se figur 2.3.

Figur 2.3 Bruttonationalprodukt (BNP) per capita 1950-2005

Tusen Kronor, fasta priser, 2000 års prisnivå



I Sverige blev problemen tydliga såväl i gruvindustrin som i stål- och varvsindustrin. Arbetslösheten ökade i vissa branscher och regioner till mellankrigstidens nivåer.¹⁸ Särskilt Norrlandslänen var utsatta, och olika regionalpolitiska och arbetsmarknadspolitiska insatser gjordes för att lindra effekterna. Det var dock inte bara basindustrin som drabbades. Under denna tid slogs stora delar av den svenska konsumtionsvaruproduktionen ut när exempelvis textil- och skoindustrin lades ner och flyttades till låglöneländer i Europa.¹⁹ Detta bromsade dock inte satsningen på offentliga välfärdslösningar. Under 1970-talet tog Sverige avgörande steg mot

¹⁸ Olofson (2002).

¹⁹ Gråbacke (2002).

ett mer jämlikt samhälle, med införandet av lagar kring familjerätt och jämställdhet liksom på arbetsmarknaden med LAS och MBL.

Nu växte också ett ideologiskt motstånd fram mot den satsning på storskalighet och tillväxt som präglade samhällsomvandlingen under 1900-talet. Småskalighet, decentralisering och medbestämmande var trender som hade förespråkare både i gröna vågrörelsen och i delar av vänsterrörelsen vilka båda aktiverades från 1960-talets mitt. Trots de stora skillnader som fanns mellan dessa sociala rörelser, ställde de båda krav på en alternativ ekonomisk agenda.

Men i stället kom den svenska ekonomin under 1980-talet att i allt högre grad internationaliseras. En internationell konjunkturuppgång under 1980-talet, liksom en svensk devalvering år 1982, bidrog till att lönsamheten för den energikrävande exportindustrin ökade. Samtidigt tog en omvandling mot mer tjänsteinriktad och kunskapsintensiv produktion fart. Under 1980-talet genomfördes också viktiga förändringar av den ekonomiska politiken i Sverige. Kreditmarknaden avreglerades, skattesystemet reformerades och en av hörnstenarna i den svenska modellen, den solidariska lönepolitiken, skrotades. Samtidigt genomfördes s.k. avregleringar av tidigare politiskt kontrollerade branscher inom transport- och kommunikationssektorn. Dessa avregleringar interagerade med en växande internationell handel. I Europa påverkades också ekonomi och samhälle av den Europeiska unionens expansion och det s.k. östblockets politiska upplösning från 1989.

Detta ritade om kartan när det gäller ägande, internationellt företagande och utvecklingen av den svenska ekonomin. Ett exempel är att de svenska direktinvesteringarna ökade kraftigt under 1980-talets andra del.²⁰ Denna bild förändrades vid 1990-talets början, särskilt efter en nedskrivning av den svenska kronans värde hösten 1992. Inflödet av utländskt kapital ökade under 1990-talet, och internationella fusioner och uppköp av svenska företag ledde till att stora delar av exportföretagen förlorade sin svenska bas. Ett exempel är Asea Atom, som år 1988 bildade ABB med det schweiziska Brown-Boweri.²¹

Inom elkraftindustrin har det korsvisa internationella ägandet funnits länge inom både de statliga och privata sfärerna. Här kan några exempel ges. Svenska staten hade redan i och med Vattenfalls

²⁰ Schön s. 418.

²¹ Företaget köptes år 2000 av British Nuclear Fuel Ltd (BNFL) och heter numera Westinghouse Electric Sweden AB.

etablering kring sekelskiftet 1900 varit en dominerande aktör inom svensk elkraftproduktion och som sådan pådrivande inom den krafttekniska utvecklingen under 1900-talet.²² Vattenfall distribuerade framför allt el till industrin; SJ, gruv- stål- och skogsindustrin blev tidigt viktiga kunder. Även den privata elindustrin expanderade vid 1900-talets början, och redan 1915 sammanbands exempelvis det regionala danska och svenska eldistributionsnätet genom Öresundskabeln. Sydsvenska kraftaktiebolaget bildades 1906, och bytte 1977 namn till Sydkraft. Under efterkrigstiden förvärvade företaget flera regionala kraftbolag, bland andra Graningeverken och Örebro energi. Genom det svenska EU-inträdet 1995, och EU:s direktiv om öppen handel på elmarknaden, infördes konkurrens i den svenska elmarknaden 1996. Det innebär att elkunderna nu kan välja distributör. Också elproducenternas affärsmöjligheter har förändrats. Vattenfall har exempelvis sedan 1997 gått in på främst den nordiska, tyska och polska elmarknaden. 2001 köptes också Sydkraft upp av tyska E.ON-koncernen. Dess verksamhet i Sverige bedrivs inom ramen av E.ON Sverige AB med norska Statkraft som en stor minoritetsägare. Det internationella ägandet av kraftproduktionen i olika länder innebär att de nationella elpriserna idag långt ifrån bestäms av produktionskostnaderna i respektive land. I stället kommer den internationella efterfrågan på elenergi att vara drivande för prisutvecklingen tillsammans med nationella skattesatser. Här kommer också olika miljöhänsyn att spela en ökande roll för nationella beslut kring energianvändningen och dess olika miljöeffekter.

Sedan FN:s miljökonferens i Rio 1992, har uttrycket *hållbar utveckling* (sustainable development) fått ett allt tydligare genomslag. Från början var det ett uttryck för en politisk vision, men efterhand något som uppfattas som ett reellt behov. 1980-talets expansiva globala ekonomiska processer kom från 1990-talets mitt att ackompanjeras av en växande global social och ekologisk motrörelse. Inom ramen för denna motrörelse kom inte minst de långsiktiga hoten mot mänsklighetens överlevnad att tolkas i termer av energianvändning. Detta påverkade också tydligt attityderna till kärnavfallet.

Hur kärnavfallsfrågan utvecklades under dessa drygt 30 år kan delas in i fyra ganska tydliga perioder, 1972-1978, 1979-1984, 1985-1992 samt 1992-2006.

²² Jörnmark (2004).

1972-1978

Under perioden 1972-1978 kom – relativt plötsligt – frågan om hanteringen av det använda kärnbränslet att bli en central politisk tvistefråga med sådana dimensioner att den starkt bidrog till två regeringskiften (den socialdemokratiska valförlusten 1976 och sprängningen 1978 av den borgerliga trepartiregering som hade tillträtt efter valet). Kärnkraftsindustrin startade projekt Kärnbränslesäkerhet (KBS) med syfte att åstadkomma en säker slutförvaring av det högaktiva avfallet från kärnkraftverken. Projektet var inriktat på en metod för slutförvaring av i första hand avfallet från upparbetat kärnbränsle.

En av de mest namnkunniga kritikerna av kärnkraftsprogrammet i Sverige var nobelpristagaren i fysik Hannes Alfvén. I ett föredrag sommaren 1972 vid en alternativ parallellkonferens (Folkets forum) till FN:s miljökonferens i Stockholm hävdade han bl.a. att någon acceptabel metod för att omhänderta kärnkraftens radioaktiva avfall inte stod till buds.

Inom centerpartiets riksdagsgrupp hade Birgitta Hambræus börjat intressera sig för kärnkraftsfrågorna och blev under år 1972 alltmer skeptiskt inställd, bl.a. efter kontakter med Alfvén och kärnkraftskritiker från USA i samband med FN:s miljökonferens. Hon menade att de svar som hon fick av olika specialister på frågor om avfallshanteringen var långtifrån tillfredsställande och att förespråkarna för kärnkraften inte ägnade avfallsfrågorna tillräcklig uppmärksamhet. I oktober 1972 tog hon i en interpellation i riksdagen upp frågorna kring det högaktiva kärnkraftsavfallet och begärde att industriministern (Rune Johansson) skulle klargöra regeringens inställning. En av hennes frågor gällde om det var moraliskt försvarbart ”att producera ämnen som måste övervakas och skötas med tekniskt komplicerade metoder av kommande generationer i oöverskådlig framtid”. En annan fråga var om de ökande mängderna högaktivt avfall från kärnkraftverken utgjorde ett tillräckligt stort problem för att regeringen skulle hänskjuta frågan om fortsatt kärnkraftsutbyggnad till riksdagens prövning. Hennes interpellation innebar det första ifrågasättandet i riksdagen av kärnkraftsutbyggnaden, och då med avfallsproblematiken som främsta argument.²³

²³ Vedung (2005).

Det bör här erinras om att det avfall som Birgitta Hambraeus främst hade i tankarna var avfallet från uppberedning av det använda kärnbränslet. Alternativet med direktdeponering av använt kärnbränsle hade vid denna tid ännu inte någon aktualitet.

Industriministern anförde i sitt svar på interpellationen i slutet av november 1972 att avfallsproblematiken inte föranledde någon omprövning av det svenska kärnkraftsprogrammet. Svaret innehöll samtidigt ett erkännande av att det ännu inte fanns någon internationellt accepterad slutlig lösning på avfallsproblemet. Men industriministern räknade med att "helt tillfredsställande metoder" skulle stå till buds i framtiden när slutförvaring av avfallet blev aktuellt. I svaret aviserade industriministern också att en parlamentariskt sammansatt utredning om kärnavfallsfrågorna skulle tillsättas.

Utredningen "rörande högaktivt avfall från kärnkraftverk", den s.k. AKA-utredningen, tillsattes någon månad senare. Dess arbete kom att lägga grunden för ett program för att ta hand om avfallet från de svenska kärnkraftverken. Utredningen arbetade mot bakgrund av en tilltagande opinionsbildning kring och samtidigt en partipolitiserings av kärnkrafts- och kärnavfallsfrågorna. Några viktigare händelser i detta politiska skeende var följande.

I statsverkspropositionen 1973 redovisade regeringen planer på en sådan utbyggnad av den svenska kärnkraftsproduktionen att den år 1985 skulle motsvara hälften av den svenska elproduktionen. Birgitta Hambraeus betonade i en motion riskerna i samband med avfallshanteringen. Hon yrkade på förbud mot vidare utbyggnad om det vid riksdagens prövning skulle visa sig att utbyggnadsprogrammet skulle medföra risker som inte kunde accepteras från säkerhets- och miljösynpunkt. Motionen hänvisades till näringsutskottet som anordnade en hearing med experter och forskare, bl.a. Hannes Alfvén. Utskottet avstyrkte visserligen motionen och den avslogs av riksdagen. Men på förslag av utskottet uttalade riksdagen samtidigt "som sin mening" att inga beslut om ytterligare utbyggnad av kärnkraften "bör fattas förrän ett nytt, allsidigt beslutsunderlag, innefattande bl.a. information om forskningsresultat och utvecklingstendenser, har förelagts riksdagen" (NU 1973:49 s. 19). Centerpartiet och vänsterpartiet reserverade sig till förmån för en mer kärnkraftsrestriktiv skrivning och markerade här för första

gången i riksdagen en bestående politisk motsättning rörande kärnkraftspolitiken, bl.a. med hänvisning till avfallsproblematiken.²⁴

Det nyss citerade uttalandet av riksdagen kan tolkas som en växande insikt om att kärnkraftens avfallsproblematik i fortsättningen måste uppmärksammas mer än vad som dittills hade varit fallet. Avfallsfrågorna hade slutligt flyttats ut från experternas och de högsta politiska beslutsfattarnas relativt slutna rum för att bli en del av det offentliga samtalet. Men inte heller den kärnkraftskritiska minoriteten inom riksdagen gick vid denna tidpunkt så långt som att kräva en avveckling av kärnkraften.

Våren 1975 lade regeringen i en proposition fram förslag till riktlinjer inom det energipolitiska området. Dessa innebar bl.a. ”en fortsatt försiktig utbyggnad av kärnkraften” med två reaktorer utöver de elva som det dittills fanns beslut om. En majoritet i riksdagen ställde sig bakom riktlinjerna, men motsättningarna mellan centerpartiet och vänsterpartiet på den ena sidan och övriga partier på den andra hade nu blivit ännu tydligare. I de två kärnkraftskritiska partiernas motiveringar nämndes avfallsproblematiken, men tonvikten låg på risker i samband med driften av kärnkraftverk och på risken för bidrag till kärnvapenspridning (NU 1975:30).

Resultatet av AKA-utredningens arbete förelåg våren 1976²⁵. Utredningen föreslog bl.a. att det använda kärnbränslet skulle förvaras i en central lageranläggning i avvaktan på upparbetning samt att förberedande arbete skulle starta för att bygga en svensk upparbetningsanläggning och en slutförvarsanläggning i urberg för det högaktiva avfallet efter upparbetningen. Undersökningar av berggrundens lämplighet borde utföras nära kärnkraftverken i Forsmark och Simpevarp och på ”alternativa platser”. Även om utredningen i första hand förordade upparbetning av det använda kärnbränslet, menade man att studier också borde påbörjas för att närmare klargöra förutsättningarna för direkt deponering av bränslet. Utredningen pekade också på möjliga lösningar av frågan om slutförvaring av det låg- och medelaktiva avfallet från den kärntekniska verksamheten.

²⁴ Den nuvarande borgerliga fyrtiparegeringen kommer enligt regeringsförklaringen den 6 oktober 2006 inte att ta några politiska beslut under mandatperioden 2006-2010 om avveckling av kärnkraftsreaktorer. Företrädare för vänstern och miljöpartiet har i december 2006 uttalat sig för en avveckling av kärnkraften till år 2025 respektive inom 12 år (näringsutskottets betänkande 2006/07:NU3).

²⁵ Använt kärnbränsle och radioaktivt avfall – betänkande av AKA-utredningen, SOU 1976:30-31 samt 41.

AKA-utredningen tog också upp frågor kring organisation och finansiering av arbetet med kärnkraftens restprodukter. Utredningen utgick från att ansvaret för att ta hand om radioaktivt avfall i första hand vilar på det företag eller den institution där avfallet uppstår. I de direktiv för utredningsarbetet som regeringen hade utfärdat angavs ”att det skall ankomma på staten att ombesörja den verksamhet som rör den slutliga förvaringen av högaktivt avfall”.²⁶ Utredningen föreslog att en särskild statlig organisation skulle bildas för ”all långsiktig hantering av radioaktivt avfall och därmed sammanhängande arbetsuppgifter”. En särskild organisationsutredning borde tillsättas för att närmare precisera dessa uppgifter. Utredningen menade också att det företag, Svensk Kärnbränsleförsörjning AB (SKBF), som år 1973 hade skapats av kärnkraftsföretagen för att gemensamt inköpa bränsle till dessa²⁷, skulle få en central roll i det fortsatta forsknings- och planeringsarbetet med avfallshanteringsfrågorna. Kostnaderna för alla nödvändiga åtgärder borde enligt utredningen bäras av dem som producerade avfallet, dvs. i praktiken i första hand kärnkraftsindustrin. Dessa borde åläggas att ta med framtida beräknade kostnader för avfallshanteringen i sina kostnads kalkyler och varje år avsätta medel i sina bokslut för att kunna täcka sådana kostnader. Utredningen pekade dock samtidigt på en alternativ form av finansiering, nämligen att staten lägger en särskild avgift på den elenergi som levereras från kärnkraftverken och samtidigt åtar sig att täcka kostnaderna.²⁸

Under valrörelsen 1976 kom kärnavfallsfrågan och kärnkraftsutbyggnaden att bli en av valets huvudfrågor. Centerledaren Torbjörn Fälldin hävdade i TV-dueller med dåvarande statsministern Olof Palme att AKA-utredningen visat att avfallsproblemen inte kunde lösas, medan Palme menade att utredningen på punkt efter punkt visat på möjliga lösningar.²⁹ De undersökningar som gjordes efter valet visade att kärnkraftsfrågan starkt bidragit till den socialdemokratiska valförlusten. Den borgerliga trepartiregering som under Torbjörn Fälldins ledning tillträdde efter valet innehöll emellertid partier med starkt divergerande åsikter i kärnkraftsfrågan. De var tvungna att hitta en kompromiss att enas kring. I regeringsförklaringen aviserade man att vissa villkor skulle ställas

²⁶ Direktiven finns återgivna i SOU 1976:31 s. 187-192.

²⁷ Enligt avtalet om SKBF skulle styrelsens ordförande utses av regeringen. Uppgiften kom i praktiken att anförtros statssekreteraren i Industridepartementet. Företaget hade alltså en särskild relation till statsapparaten.

²⁸ SOU 1976:30 s. 95-97.

²⁹ Anshelm (2006) s. 63-64.

upp för att kärnkraftsbolagen skulle få ta i drift de kärnkraftsaggregat som då var under byggnad. Vidare skulle en särskild kommission tillsättas för att ta fram underlag för ett nytt energipolitiskt beslut, bl.a. avseende kärnkraftens roll.

Den s.k. villkorslagen (1977:140) trädde i kraft i maj 1977. Huvudbestämmelsen i den lagen tog sikte på de kärnkraftsreaktorer som hade uppförts, men som ännu inte fått slutligt driftstillstånd. För att få ett sådant tillstånd av regeringen måste reaktorinnehavaren uppfylla endera av två förutsättningar. Den ena var att visa upp avtal som på ett betryggande sätt tillgodosåg behovet av upparbetning av använt kärnbränsle. Den andra förutsättningen var att reaktorinnehavaren hade visat hur och var en "helt säker" slutlig förvaring av använt, icke upparbetat, kärnbränsle kunde ske.

Den parlamentariskt sammansatta s.k. energikommissionen lade fram sitt huvudbetänkande i februari 1978.³⁰ En majoritet inom kommissionen förordade att pågående kärnkraftsutbyggnad skulle fullföljas men begränsas till högst 11 reaktorer.

Den nya regeringen var negativt inställd till att staten, som AKA-utredningen föreslagit, skulle engagera sig i avfallshanteringen. Ansvar för denna borde tydligt ligga hos kraftindustrin. En tidigare ordning med statssekreteraren i Industridepartementet som ordförande i SKBF upphörde. I stället övertogs ordförandeskapet i bolaget av Vattenfall, i egenskap av största delägare. Bolagets verksamhet inriktades nu nästan helt på arbete med avfallshanteringsfrågan och delägarna ställde ekonomiska resurser till förfogande. Det s.k. Projekt Kärnbränslesäkerhet, KBS, startades under hösten 1976 och presenterade i november 1977 en rapport (KBS-1) som behandlade säkerheten vid slutförvaring av förglasat upparbetningsavtal. Denna rapport kom att ligga till grund för regeringens första provningar år 1978 om driftstillstånd enligt villkorslagen.

Motsättningarna kring kärnkraftsfrågan inom regeringen – vilka också innebar olika uppfattningar om hur villkorslagens bestämmelser om "helt säker" slutförvaring skulle tolkas – ledde till att regeringen avgick i oktober 1978. Den avlöstes av en folktopartistisk minoritetsregering fram till valet hösten 1979.

Den avgående regeringen hade inte tagit ställning till de organisations- och finansieringsfrågor som AKA-utredningen hade

³⁰ SOU 1978:17.

aktualiserat. Den nya regeringen tillsatte i slutet av år 1978 en utredare med uppgift att föreslå en lösning.³¹

Redan under AKA-utredningens arbete – och på dess förslag – hade emellertid en mindre organisation, Programrådet för radioaktivt avfall (PRAV), skapats. PRAV hade en formell anknytning till Industridepartementet, men dess verksamhet – bl.a. vissa geologiska undersökningar inklusive provborrningar – finansierades i huvudsak av kraftindustrin via SKBF.³²

Inom industrin fortsattes KBS-projektet och resulterade år 1978 i rapporten KBS-2, vilken behandlade möjligheterna till direktdeponering av det använda kärnbränslet.

1979-1984

Avgörande för kärnkraftsfrågan politiska hantering under denna period blev reaktorhavariet i Harrisburg i mars 1979 och den följande rådgivande folkomröstningen i Sverige våren 1980 om kärnkraften. År 2010 sattes som slutpunkt för kärnkraften. Ur ett avfallsperspektiv innebar beslutet om år 2010 att det blev möjligt att med större säkerhet bedöma de volymer av olika sorters kärnavfall som skulle behöva tas om hand. Frågan om upparbetning av det använda kärnbränslet blev i början av 1980-talet inaktuell för svensk del och arbetet inriktades i stället mot slutförvaring av använt kärnbränsle utan föregående upparbetning, s.k. direktdeponering. Byggandet av en anläggning för slutförvaring av låg- och medelaktivt kärnavfall påbörjades, liksom en central anläggning för mellanförvaring av det använda kärnbränslet. Geologiska undersökningar – med sikte på att finna en plats som var lämplig för slutförvaring av använt kärnbränsle – påbörjades, men på vissa platser kunde de inte genomföras på grund av protester från demonstrerande motståndare. Ett finansieringssystem i statlig regi skapades, baserat på inkomster från avgifter som belastade produktionen av kärnkraftsel. En klar rollfördelning mellan staten och industrin växte fram och kom till uttryck i den nu gällande 1984 års kärntekniklag.

³¹ Utredaren lämnade år 1980 betänkandet Kärnkraftens avfall – organisation och finansiering (SOU 1980:14).

³² PRAV:s verksamhet upphörde helt år 1981 efter det att verksamheten med geologiska undersökningar successivt förts över till SKBF.

Reaktorhaveriet i Harrisburg i mars 1979 ledde till att partierna enades om att skjuta upp alla avgöranden om kärnkraftens framtid till dess att en rådgivande folkomröstning hade anordnats. Omröstningen ägde rum i mars 1980. När resultatet från folkomröstningen förelåg hamnade frågorna på nytt i rikspolitiken och i riksdagen. En borgerlig trepartiregering (Fälldin II) hade tillträtt efter 1979 års val. Den regeringen lade några veckor efter folkomröstningen fram en proposition med förslag till riktlinjer för energipolitiken. Dessa riktlinjer innebar bl.a. högst 12 kärnkraftsreaktorer skulle byggas och att dessa skulle användas under sin tekniska livslängd som bedömdes vara 25 år från idrifttagningen. Under näringsutskottets behandling av propositionen tillkom ytterligare en riktlinje – på grundval av en socialdemokratisk partimotion – att den sista kärnkraftsreaktorn skulle stängas år 2010.

Även om de riktlinjer rörande kärnkraften som riksdagen hade beslutat om inte uttryckligen formulerades i lagtext³³, blev de i praktiken styrande för verksamheten med avfallsfrågorna under närmare två decennier. Som nämnts i det föregående blev det nu möjligt att någorlunda exakt beräkna de volymer av olika sorters avfall som kärnkraftsproduktionen skulle komma att ge upphov till och på grundval av de uppgifterna också med ökad säkerhet bedöma de framtida kostnaderna.

De första åren av 1980-talet präglades arbetet kring kärnavfallsfrågorna av att det nu under påverkan av såväl internationella säkerhetspolitiska överväganden som företagsekonomiska bedömningar hade vuxit fram en samsyn mellan staten och kraftindustrin om hur använt kärnbränsle borde tas om hand. Samsynen innebar att använt kärnbränsle från de svenska kärnkraftverken inte skulle uppgrävas. I stället skulle forsknings- och utvecklingsarbetet inriktas på slutförvaring av det använda bränslet, s.k. direktdeponering. SKBF, som år 1983 bytte namn till Svensk Kärnbränslehantering AB, (SKB) presenterade samma år rapporten KBS-3. Rapporten utgjorde en vidareutveckling av tankarna från KBS-2. Den nya rapporten utgjorde underlag för ansökningar till regeringen att – enligt bestämmelserna i villkorslagen – få ta de två sista

³³ Senare lagstiftning har dock inneburit ett faktiskt lagfästande av restriktionen "högst 12" reaktorer. Det skedde indirekt genom den bestämmelse om förbud att uppföra nya kärnkraftsreaktorer som infördes genom en ändring i kärntekniklagen år 1986. Även lagen (1997:320) om kärnkraftens avveckling kan nämnas i detta sammanhang, eftersom den lagen ger regeringen befogenhet att föreskriva stängning av kärnkraftsreaktorer "till följd av omställningen av energisystemet i Sverige". Regeringsbesluten om stängningen av de två reaktorerna i Barsebäck har fattats med stöd av den lagen.

reaktorerna i det svenska kärnkraftsprogrammet (Forsmark 3 och Oskarshamn 3) i drift. Denna ansökan beviljades i juni 1984, dock med tillämpning av bestämmelserna i den nya kärntekniklag som hade trätt i kraft i februari 1984 (se vidare nedan).

De geologiska undersökningar som PRAV påbörjat i slutet av 1970-talet fortsattes från början av 1980-talet av SKBF, senare SKB. Det var fråga om djupborrningar och mätningar av bergets egenskaper i ett tiotal områden, senare benämnda typområdesundersökningar, i olika delar av Sverige. På flera håll möttes undersökningarna av protester från ortsbefolkningen och ibland fick de avbrytas. Det mest kända exemplet var kanske Kynnefjäll i Bohuslän som vaktades oavbrutet av ortsbefolkningen under ca 20 år från 1980.

Ett experimentellt arbete, med internationellt deltagande, pågick i SKBF/SKB:s regi i den nedlagda järnmalmsgruvan i Stripa.

Parallellt med industrins arbete med geologiska undersökningar och med KBS-3-projektet var statliga utredningar sysselsatta med att ta fram förslag till lösningar av organisations- och finansieringsfrågor. Av största betydelse var utredningsarbetet om förslag till en ny lagstiftning med klart angivna ansvarsområden för kraftindustrin och för staten inför det fortsatta arbetet med kärnavfallsfrågorna.

Slutresultatet blev två lagar som fick stor betydelse för den fortsatta utvecklingen.

Genom lagen (1981:669) om finansiering av framtida utgifter för använt kärnbränsle m.m. skapades ett finansieringssystem i statlig regi, vilket fortfarande finns kvar i sina huvuddrag.³⁴ Principerna bakom detta finansieringssystem kan sammanfattas enligt följande.³⁵

- Kostnaderna för omhändertagande av använt kärnbränsle och rivning av kärntekniska anläggningar ska täckas av intäkterna från den produktion av energi som har givit upphov till dem. Utgifter kommer att uppstå långt efter det att produktionen vid kärnkraftsreaktorer har upphört. Därför måste medel för att bekosta framtida utgifter fortlöpande tas ur intäkterna från energiproduktionen och hållas samlade på ett säkert sätt för att successivt kunna disponeras för sitt ändamål.

³⁴ Lagen ersattes år 1992 av en ny lag (1992:1537) med samma namn och år 2006 av lagen (2006: 647) om finansiella åtgärder för hanteringen av restprodukter från kärnteknisk verksamhet.

³⁵ Jfr prop. 1980/81:90 bilaga 1 s. 319.

- Den som bedriver kärnteknisk verksamhet som ger upphov till kärnavfall har att svara för att detta tas om hand på ett säkert sätt. Det innebär att företag m.fl. inte bara har att bekosta behövliga åtgärder utan även har att svara för att åtgärderna faktiskt kommer till stånd.
- Staten har ett övergripande ansvar för det radioaktiva avfallet. ”Det långsiktiga ansvaret för hantering och slutförvaring bör ligga hos staten. Ansvaret för verksamheten bör således fördelas mellan kraftföretagen och staten...”

Vidare tillkom den lag (1984:3) om kärnteknisk säkerhet som ännu gäller. Förslag till lagen hade arbetats fram inom en parlamentariskt sammansatt kommitté som hade tillsatts år 1979, den s.k. atomlagstiftningskommittén. I lagen fastslås tydligt reaktorinnehavarnas ansvar för bl.a. avfallshanteringen. Det framgår att detta ansvar innefattar ansvaret såväl för att utföra alla behövliga åtgärder som för att bekosta dessa. Av intresse i detta sammanhang är dels att den nya lagen ställer krav på en ”säker” slutförvaring (villkorslagens formulering om ”helt säker” har alltså försvunnit ur lagtexten), dels på att reaktorägarna – i praktiken SKB – vart tredje år ska presentera en plan för det fortsatta forsknings- och utvecklingsarbetet kring kärnavfallsfrågorna och att denna plan ska granskas av olika myndigheter och slutligen godkännas av regeringen. Det första av dessa program skulle enligt den nya lagen avlämnas år 1986, något som också skedde.

Lagen innehåller också definitioner av begreppen ”kärnämne” och ”kärnavfall”. Använt kärnbränsle utgör enligt denna definition ”kärnavfall” först när det har placerats i slutförvar – dessförinnan definieras det som ”kärnämne”. Det finns också anledning att framhålla att kärntekniklagen inte innehåller någon bestämmelse som föreskriver direktdeponering av det använda kärnbränslet. Lagen håller alltså öppet även för möjligheten av slutförvaring av avfall efter uppberedning av det använda kärnbränslet, även om företrädare för både staten och för industrin för närvarande finner denna väg olämplig.

Som redan nämnts hade kärnkraftsindustrin under år 1983 presenterat rapporten KBS-3 om direkt deponering i svensk berggrund av det använda kärnbränslet. Regeringens beslut i juni 1984 att reaktorerna F 3 och O 3 skulle få tas i drift baserades bl.a. på innehållet i den rapporten samt en handling kallad FoU-Program 84, som SKB hade färdigställt och som granskades av de två närmast

berörda myndigheterna Statens kärnkraftinspektion (SKI) och Statens strålskyddsinstitut (SSI).

1985–1992

Med utgångspunkt i 1984 års kärntekniklag skapades under perioden en delvis ny myndighetsorganisation. SKB avstod från fortsatta geologiska undersökningar i fält och övergick i stället till studier av landets geologi på basis av befintligt kartmaterial m.m. En anläggning för central lagring av använt kärnbränsle (Clab) togs i bruk. SKB utarbetade vidare två FoU-program (1986 och 1989). I dessa, vilka granskades av tillsynsmyndigheter och godkändes av regeringen, presenterade man planer för ett berglaboratorium i Äspö (nära kärnkraftverket i Oskarshamn), vidareutvecklade KBS-3-metoden samt belyste alternativa förvaringsmetoder.

Under år 1985 tillkom en delvis ny myndighetsstruktur inom staten för kärnavfallsfrågorna. SKI och SSI skulle som tidigare svara för säkerhets- och strålskyddsfrågor och ge de tillstånd för kärnteknisk verksamhet som krävdes (i den mån det inte var regeringen som utfärdade tillstånd). En ny myndighet, Statens kärnbränslenämnd (SKN) fick i uppgift att dels administrera finansieringssystemet,³⁶ dels granska det forsknings- och utvecklingsprogram kring avfallshanteringsfrågorna som industrin i fortsättningen skulle lägga fram vart tredje år. En Samrådsnämnd för kärnavfallsfrågor (KASAM) skulle sörja för informationsutbyte mellan SKI, SSI och SKN i fråga om deras forskningsverksamhet kring avfallshanteringsfrågorna samt också varje år förse regeringen med en bedömning av kunskapsläget på kärnavfallsområdet. År 1990 ombildades KASAM till ett vetenskapligt råd under SKN.

Som redan antytts hade SKB:s arbete med geologiska undersökningar i skilda delar av landet under första delen av 1980-talet på sina håll mött ett växande motstånd bland de boende i närområdena. När SKB, kort efter riksdagsvalet i september 1985, avsåg genomföra borrhningsarbeten i närheten av Almunge (Uppsala kommun) blev det omfattande protester och arbetsplatsen blockerades av närboende. En omorientering av arbetet blev nödvändig.

³⁶ Uppgiften att administrera finansieringssystemet hade sedan dettas tillkomst legat hos en myndighet kallad Nämnden för hantering av använt kärnbränsle (NAK). Inom ramen för den myndigheten hade man också följt industrins forsknings- och utvecklingsarbete kring kärnavfallsfrågorna samt initierat visst ytterligare arbete.

SKB hade sommaren 1985 kunnat visa upp den första färdigbyggda centrala anläggningen i världen för mellanförvaring av använt kärnbränsle, Clab i Oskarshamn. Anläggningen dimensionerades för de volymer som det svenska kärnkraftsprogrammet beräknades kräva och innebar att lagringsproblemet kunde anses löst för de närmaste ca 40–60 åren.³⁷ Någon akut brådska med att hitta en plats för slutförvaring av det använda kärnbränslet kunde knappas anses föreligga.

Studierna av de geologiska förhållandena i Sverige baserades de närmaste åren helt på material som redan hade tagits fram av Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) och som var offentligt tillgängligt.³⁸ Några fältstudier ägde alltså inte rum. Parallellt härmed utarbetades åren 1986 och 1989 FoU-Program, vilka granskades av tillsynsmyndigheter och godkändes av regeringen. I dessa aviserades de senare genomförda planerna att anlägga Äspö-laboratoriet i nära anslutning till Oskarshamnsverket. SKB vidareutvecklade KBS-3-metoden samtidigt som man – på uppmaning av myndigheter och regeringen – belyste alternativa metoder och lösningar för slutförvaring av använt kärnbränsle i berggrunden.

1992–2006

Under perioden 1992 fram till våra dagar har SKB genomfört en platsvalsprocess som byggt på frivillig samverkan med ett antal kommuner där s.k. förstudier genomfördes under 1990-talet. Med utgångspunkt från resultatet av förstudierna, inklusive överväganden om inställningen till SKB:s verksamhet inom berörda kommuner påbörjade SKB år 2002 s.k. platsvalsundersökningar på två platser, en i Oskarshamns och en i Östhammars kommun. Vid sammanlagt sju tillfällen (1992, 1994, 1995, 1998, 2000, 2001 och 2004) har SKB presenterat Fud-program (inklusive begärda kompletteringar), vilka har granskats av tillsynsmyndigheter m.fl. och godkänts av regeringen. En naturlig slutpunkt för denna period utgör den ansökan som SKB i november 2006 lämnade till SKI om tillstånd enligt kärntekniklagen att uppföra en inkapslingsanläggning för använt kärnbränsle.

³⁷ Man räknade med att använt bränsle, sedan det tagits ut ur en reaktor och förts till Clab, skulle behöva ligga där ca 40 år innan värmeavgivningen och radioaktiviteten skulle tillåta inkapsling inför slutförvaring.

³⁸ Resultatet av dessa studier redovisades av SKB först 1995 i en s.k. Översiktsstudie.

Från år 1992 inträdde ett nytt skede i SKB:s verksamhet. Man menade att arbetet med de geologiska översiktsstudierna visat att det i Sverige fanns åtskilliga områden som från geologiska utgångspunkter kunde vara lämpliga som plats för ett slutförvar för använt kärnbränsle. Företaget ville därför komma i kontakt med kommuner som var intresserade att medverka i arbetet med att närmare utreda förutsättningarna för lokalisering av ett sådant. I det s.k. Fud-program 92 hade SKB skisserat en konkret plan för hur man skulle kunna realisera byggandet av ett slutförvar för det använda bränslet. Några månader senare – i slutet av år 1992 – skickade SKB ett brev till alla kommuner i landet och inbjöd till samarbete om s.k. förstudier.

Slutresultatet blev, efter åtskilliga turer som mer i detalj har redovisats i andra sammanhang³⁹:

- att förstudier genomfördes i åtta olika kommuner,
- att två av dessa anordnade folkomröstningar efter vilka fortsatt arbete avbröts (Storuman och Malå),
- att SKB år 2000 identifierade tre platser som lämpliga för fortsatta studier och bad om kommunens tillåtelse att bedriva s.k. platsundersökningar,
- att SKB på två av dessa platser år 2002 fick respektive kommuns tillstånd. De platser som nu undersöks ligger nära Forsmarks kärnkraftverk i Östhammars kommun och vid Laxemar nära kärnkraftverket i Oskarshamn. I båda kommunerna hade nästan enhälliga fullmäktige ställt sig bakom.

Under perioden 1992–2006 har SKB presenterat sammanlagt sju Fud-program, 1992, 1994 (begärd komplettering av 1992 års program), 1995, 1998, 2000 (begärd komplettering av 1998 års program), 2001 och 2004. I vart och ett av programmen har de flesta förekommande problemställningar behandlats, men programmens fokus har skiftat.

Det program som SKB presenterade år 1992 utgjorde en första konkretisering av hur man avsåg gå till väga för att välja ut en plats

³⁹ Se t.ex. Förstudiekommuner i dialog med allmänheten: exemplen Nyköping, Oskarshamn och Tierp (KASAM:s rapport Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2001, SOU 2001:35 s. 15-42), Plats för slutförvaring av kärnavfall – förstudier i åtta kommuner (SOU 2002:46), Kommunerna – en av huvudaktörerna i kärnavfallsfrågan (KASAM:s rapport Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2004, SOU 2004:67 s. 79-135), Kärnavfall – demokrati och vetenskap (Rapport från ett KASAM seminarium 2003, SOU 2004:99). Skeendet och den allmänna debatten har också fått en utförlig belysning och tolkning av Sundquist (2002) och av Anshelm (2006).

där ett slutförvar skulle kunna anläggas. Vidare presenterades för första gången företagens planer på att anlägga en inkapslingsanläggning i anslutning till Clab i Oskarshamn. SKB argumenterade för en fortsatt satsning på att utveckla KBS-3-metoden, och redovisade samtidigt de utredningar som hade gjorts kring alternativa slutförvaringsmetoder såsom djupa borrhål, långa tunnlar från land under Östersjöns botten och medellånga tunnlar. Företaget tog också upp en idé som ursprungligen förts fram av SKN i dess granskning av Fud-program 89 och som gick ut på att ett slutförvar borde byggas stegvis och i en första etapp för demonstrationsdeponering av ca 400 kapslar. Först efter ett sådant steg genomförts och utvärderats borde man fatta beslut om fortsättningen.

Granskningen av Fud-program 92 ledde till att regeringen begärde att programmet skulle kompletteras. Kompletteringen förelåg år 1994 och innehöll bl.a. en redovisning av de kriterier och metoder som skulle användas i lokaliseringsarbetet.

I Fud-program 95 låg tonvikten på hur SKB planerade att genomföra de planer på inkapsling och på lokalisering av ett slutförvar som redovisats i 1992 års program. Viktiga underlagsrapporter var bl.a. redovisningar av då pågående två förstudier, en översiktsstudie av berggrunden i hela landet och en mall för den blivande säkerhetsanalysen.⁴⁰

Fud-program 98 var inriktat på att ge en överblick av SKB:s verksamhet och planer. Det innehöll dels en utförligare argumentering än tidigare för en fortsatt inriktning på KBS-3-metoden, dels redovisningar av fem avslutade och pågående förstudier i fråga om lokaliseringen av ett slutförvar samt för arbetet med teknik och säkerhetsanalys. Programmet innehöll också ett första förslag till innehållsförteckning för en kommande miljökonsekvensbeskrivning.

Regeringens granskning ledde till krav på kompletteringar. Dessa presenterades av SKB i slutet av år 2000 under rubriken "Samlad redovisning av metod, platsval och program inför platsundersökningar". Redovisningen av metod innehöll en analys av alternativa strategier och system för omhändertagande av använt kärnbränsle. En samlad bild presenterades av de förstudier i totalt åtta kommuner som SKB hade genomfört och SKB:s slutsatser av dessa. Den viktigaste slutsatsen var att bolaget hade identifierat tre olika områden där man önskade genomföra platsundersökningar. Dessa områ-

⁴⁰ Om säkerhetsanalyser, se KASAM-rapporten 2007:2.

den var belägna i Oskarshamns, Tierps och Östhammars kommuner.

När SKB presenterade Fud-program 2001 pågick fortfarande granskningen av 2000 års komplettering av 1998 års program. Diskussioner fördes samtidigt mellan SKB och de nämnda kommunerna om genomförandet av de föreslagna tre platsundersökningarna. Fud-program 2001 fokuserade på frågor som relaterade till forskning och teknikutveckling. Följande rubriker ur programmet antyder de olika frågeställningar som behandlades: Säkerhetsanalyser, Forskning kring långsiktig säkerhet, Bränsle, Kapsel, Buffert, Återfyllning, Geosfär, Biosfär, Klimatutveckling, Naturliga analogier, Äspölaboratoriet, Instrument och metoder för platsundersökningar, Djupförvaret⁴¹, Inkapsling, Alternativa metoder (här behandlades Separation och transmutation samt Deponering i djupa borrhål), Rivning, Annat långlivat avfall.

Fud-program 2004 var främst inriktat på att belysa utvecklingen av tillverkning och förslutning av kapslar för slutförvaring av använt kärnbränsle. Denna inriktning motiverades med att SKB avsåg att, inom ramen för den närmaste treårsperioden, lämna in en ansökan om tillstånd att uppföra en inkapslingsanläggning.⁴² Programmet innehöll därutöver ett huvudavsnitt om Säkerhetsanalyser och forskning med bl.a. underrubrikerna Bränsle, Kapseln som barriär, Buffert, Återfyllning, Geosfär, Biosfär, Klimat, Samhällsforskning och Alternativa metoder. Under den sist nämnda rubriken behandlades, liksom i 2001 års Fud-program, frågeställningarna ”Separation och transmutation” samt ”Deponering i djupa borrhål”. Programmet innehöll även ett kortare huvudavsnitt om låg- och medelaktivt avfall. Avsnittet om samhällsforskning var en nyhet. Det motiverades med att flera remissinstanser, i samband med granskningen av Fud-program 2001, hade framfört önskemål om att programmets tekniska och naturvetenskapliga del skulle kompletteras med en samhällsvetenskaplig del med forskning om exempelvis attityder, beslutsfattande i komplicerade samhällsfrågor och samhällsutveckling på längre sikt.⁴³

⁴¹ SKB använde vid denna tidpunkt ofta beteckningen ”djupförvar” i stället för termen ”slutförvar”.

⁴² Så skedde också, i november 2006, se vidare nedan.

⁴³ Behovet av en satsning på samhällsvetenskaplig forskning kring kärnavfallsfrågan hade framhållits i bl.a. KASAM:s yttrande över Fud-program 2001 (SOU 2002:63 s. 115-124). SKB har därefter utvecklat ett ”samhällsprogram”. Sammanfattande redovisningar av olika forskningsprojekt har publicerats av SKB i skrifterna Samhällsforskning 2005 och Samhällsforskning 2006. En ytterligare redovisning är aviserad till senare delen av år 2007.

SKB har aviserat att Fud-program 2007 kommer att ge en central plats åt djupförvarstekniken och det fortsatta arbetet med alternativa deponeringsmetoder. Avsikten är att i Fud-program 2010 redogöra för SKB:s system för att ta hand om låg- och medelaktivt avfall.

På den statliga sidan genomfördes under 1990-talet en del förändringar i myndighetsstrukturen. SKN lades ner år 1992 och större delen av dess verksamhet överfördes till SKI. KASAM omvandlades då till en fristående vetenskaplig kommitté under dåvarande Miljö- och energidepartementet med namnet Statens råd för kärnavfallsfrågor. Uppgiften – som fortfarande gäller – är att ge regeringen råd i frågor som hänger samman med kärnavfallshandling. I uppgiften ingår att självständigt vart tredje år granska SKB:s forsknings- och utvecklingsprogram (utöver den granskning som åligger SKI), att vart tredje år belysa kunskapsläget på kärnavfallsområdet samt att erbjuda ett forum för dialog i kärnavfallsfrågan. År 1996 tillkom en särskild myndighet, Kärnavfallsfondens styrelse, med ansvar för förvaltningen av de medel som har fonderats inom ramen för finansieringssystemet.

2.3 2006–2060: Kanske ett omställt energisystem – men kärnavfallshandlingen måste fortsätta

Den rapport om den naturvetenskapliga grunden för klimatförändringar som FN:s klimatpanel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) lämnade i februari 2007 målade upp en tydlig hotbild för framtidens klimatutveckling. Om vi inte förändrar den globala resursanvändningen, främst minskar utsläppet av koldioxid, kan stora delar av jordens befolkning tvingas lämna sina nuvarande bosättningar på grund av att vattennivån höjs och temperaturökningar gör delar av landområdena i första hand kring ekvatorn obeboeliga.

Beslutet år 1980 att avveckla kärnkraften i Sverige relaterades till att ett rimligt alternativ ska finnas – rimligt ur perspektivet att inte industriproduktion, sysselsättning och välfärdsutveckling hotas på kort och medellång sikt. Bara ett kvartssekel senare är vår energiproduktion integrerad i en internationell industriell struktur, där den nationella arenan förlorat mycket av sin möjlighet att styra ens den inhemska utvecklingen. En första fråga är här vilka tillgängliga energisystem som kan motsvara de behoven hos en växande global

befolkning med stigande realinkomster har. Hur ska en omställning från en fossil oljeekonomi till andra energisystem se ut? Kan vi idag se några alternativ som är kommersiellt användbara? Vilka risker medför de i så fall?

Paradoxalt nog kan miljöpolitikens utveckling mot långtgående internationella överenskommelser som medel för att hantera exempelvis de ökande utsläppen av växthusgaser, leda till en potentiell konflikt mellan nationella politiska mål – som att avveckla kärnkraften eller att inte bygga ut fler älvar – och internationella mål att hålla förbränningen av fossila bränslen på en bestämd nivå. Hur en sådan konflikt – om den aktualiseras – kommer att hanteras, beror till stor del på vilka tekniska systemlösningar vi väljer och vilka politiska och ekonomiska val som görs. I Sverige har exempelvis olika ekonomisk-politiska styrmedel lett till att fjärrvärmesystem baserade på biobränsle vuxit. Dessutom har elcertifikat lett till en introduktion av förnybar elproduktion. Trots att medvetna satsningar görs på att uppnå olika miljömål, kan vi aldrig bortse från att dessa val görs i ett samhälle där resurserna inte är oändliga. Våra val idag inverkar på utvecklingen både på kort och lång sikt. Det finns exempelvis en målkonflikt på global nivå mellan att å ena sidan fullfölja FN:s beslut att satsa stora resurser på att öka välfärden för stora delar av världens nuvarande befolkning och att å andra sidan använda resurserna för att utveckla energi- och kraftteknik som kan väntas få effekter för klimat och välfärd först om 30-40 år. Oavsett dessa svåra övergripande prioriteringar kommer energianvändningen och hanteringen av de energisystem som finns, att under överskådlig framtid vara dagliga, konkreta frågor att hantera och lösa på nationell nivå.

I november 2006 lämnade SKB in en ansökan om tillstånd enligt kärntekniklagen att bygga en inkapslingsanläggning för använt kärnbränsle i direkt anslutning till Clab i Oskarshamn. Ansökan är inlämnad till SKI, men det är regeringen som slutligt avgör om ansökan ska bifallas eller inte. Därmed har frågorna om kärnavfallet kommit in i en mer formell beslutsprocess och ett nytt skede i händelseförloppet har inletts.

Inkapslingsanläggningen är ett led i det system för slutförvaring av använt kärnbränsle – alltså KBS-3 – som SKB planerar. I systemet ska också ett slutförvar ingå. För att anlägga både en inkapslingsanläggning och ett slutförvar för använt kärnbränsle krävs tillstånd

enligt främst två lagar, kärntekniklagen och miljöbalken. Bolaget planerar att lämna in de ytterligare ansökningar som behövs enligt dessa lagar i slutet av år 2009. I praktiken blir det en fråga om dels en ansökan enligt kärntekniklagen om att anlägga ett slutförvar för använt kärnbränsle i antingen Oskarshamn eller Östhammar, dels ansökningar enligt miljöbalken för inkapslingsanläggningen och slutförvaret. Ansökningar enligt kärntekniklagen lämnas till SKI och ansökningar enligt miljöbalken till miljödomstolen.

Genom den nu inlämnade ansökan har en beslutsprocess inletts, som kommer att ta åtskilliga år. Några hållpunkter för det fortsatta skeendet är följande.

SKB har för sin del bedömt att ett regeringsbeslut med anledning av ansökningarna om olika tillstånd till slutförvarssystemet tidigast kan föreligga under år 2011.

Under förutsättning av ett för SKB positivt beslut skulle bygget av anläggningarna komma igång snabbt. Dessa skulle kunna tas i bruk år 2018.

Efter en inledande provdrift med deponering av mindre kvantiteter inkapslat kärnbränsle skulle driften kunna ske i full skala från början av 2020-talet. Med en takt om ca 200 deponerade kapslar per år skulle allt bränsle från det nuvarande svenska kärnkraftsprogrammet kunna vara deponerat under 2050-talet.

Vid den tidpunkten förutsätts ett särskilt beslut bli fattat om förvaret ska förseglas slutligt eller om det ska hållas tillgängligt i någon form ytterligare en tid. Genomförandet av en förslutning kommer alltså att ske tidigast omkring år 2060.

Avslutningsvis bör påpekas att planeringen för ett slutförvar för använt kärnbränsle i Sverige hittills har utgått från förutsättningen att det finns en sluttidpunkt för det svenska kärnkraftsprogrammet. Från år 1980 och fram till de riktlinjer för energipolitiken som riksdagen beslutade om år 1997 på grundval av en energipolitisk överenskommelse mellan socialdemokraterna, centern och vänsterpartiet) var årtalet 2010 en sådan sluttidpunkt. De år 1997 beslutade energipolitiska riktlinjerna innebar att något årtal för kärnkraftens avveckling inte längre skulle fastställas, samtidigt som avvecklingen av kärnkraften inleddes (genom de senare beslutade stängningarna av de båda reaktorerna vid Barsebäcks kärnkraftverk).

SKB har därefter – bl.a. i samband med sina årliga beräkningar av de framtida kostnaderna för slutförvaring av använt kärnavfall och för rivning av reaktorer – efter hand utgått från att de återstående

reaktorerna har en livslängd av 40 år. Detta innebär att volymerna av använt kärnbränsle blir något större än vad som antogs när utgångspunkten för all planering var årtalet 2010. Ett klart stöd för denna planering finns för övrigt också i den nyligen beslutade lagen (2006:647) om finansiella åtgärder för hanteringen av restprodukter från kärnteknisk verksamhet. I dagsläget utgår SKB från att det nuvarande svenska kärnkraftsprogrammet kommer att resultera i ca 9 000 ton använt kärnbränsle som behöver slutförvaras.

Det kan emellertid inte uteslutas – av skäl som antytts i början av avsnitt 2.3 – att inställningen till fortsatt användning av kärnkraft i Sverige kommer att ändras framöver. I så fall måste givetvis planeringen av åtgärder för slutförvaring av använt kärnbränsle, liksom åtgärder för slutförvaring av annat kärnavfall (inklusive rivningsavfall), ske från reviderade utgångspunkter.

2.4 Referenser

Framställningen bygger på en genomgång av kommittébetänkanden, riksdagstryck och författningar under den aktuella perioden. En genomgång har också skett av de sammanlagt åtta program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall som Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har presenterat åren 1986-2004, de yttranden över dessa som KASAM har avgett samt de regeringsbeslut som har fattats med anledning av dessa s.k. Fud-program. Även SKB:s ansökan i november 2006 om tillstånd enligt kärntekniklagen avseende ”inkapslingsanläggning och centralt mellanlager för använt kärnbränsle vid Simpevarp i Oskarshamns kommun” har tjänat som ett underlag. Viktigare källor av denna typ anges i texten eller i fotnoter. Övriga referenser är:

Andersson, Jenny (2003), *Mellan tillväxt och trygghet : idéer om produktiv socialpolitik i socialdemokratisk socialpolitisk ideologi under efterkrigstiden*, Uppsala Studies in Economic History 67, Uppsala universitet, Uppsala.

Andersson-Skog, Lena (2005), "Från ren energi till farligt avfall – kärnkraftsfrågans reglering i det svenska välfärdsbyggandet . En ekonomisk-historisk översikt", i Mats Andrén och Urban Strandberg (red.), *Kärnavfallens politiska utmaningar*, Hedemora: Gidlunds.

- Anshelm, Jonas (2006), *Bergsäkert eller våghalsigt? Frågan om kärnavfallens hantering i det offentliga samtalet i Sverige 1950-2002*, Lund: Arkiv.
- Det svenska kärnavfallsprogrammet – Informationsskrift utgiven av Svensk Kärnbränslehantering AB, December 2000.
- Dahmén, Erik (1950), *Svensk industriell företagarverksamhet. Kausalanalys av den industriella utvecklingen 1919-1939*. Bd 1-2, Stockholm: Industrins utredningsinstitut.
- Friman, Eva (2002), *No limits: the 20th century discourse of economic growth*, Umeå universitet, Umeå.
- Fjaestad, Maja (2001), *Sveriges första kärnreaktor. Från teknisk prototyp till vetenskapligt instrument*, SKI Rapport 01:01.
- Gimstedt, Olle (1985), *Från Atom till Kärnkraft. Bilder ur OKG:s historia*, OKG.
- Gråbacke, Carina (2002), *Möten med marknaden. Tre svenska fackförbunds agerande under perioden 1945-1976*. Meddelanden från Ekonomisk-historiska institutionen vid Göteborgs universitet 85, Göteborg.
- Jörnmark, Jan (2004), *Skogen, staten och kapitalisterna. Skapande förstörelse i svensk basindustri 1810-1950*. Lund: Studentlitteratur.
- Leijonhufvud, Sigfrid (1994), *Parentes? En historia om svensk kärnkraft*. Västerås: ABB Atom.
- Lindmark, Magnus & Gustavsson-Bergqvist, Ann-Kristin (2007), *Biobränslen i ekonomiskt-historiskt perspektiv*. FORMAS-rapport (kommande 2007).
- Magnusson, Lars (1996), *Sveriges ekonomiska historia*. Stockholm: Rabén & Prisma.
- Olofsson, Jonas (2002,) "Arbetslöshetsfrågan under 1900-talet: från arbetslöshetspolitik till utbildning och socialt partnerskap", i Lena Andersson-Skog och Olle Krantz (red.) *Omvandlingens sekel. Perspektiv på svensk ekonomisk historia under 1900-talet*. Lund: Studentlitteratur.
- Schön, Lennart (2007) *En modern svensk ekonomisk historia : tillväxt och omvandling under två sekel*. Stockholm: SNS-förlag.
- Sundquist, Göran (2002), *The Bedrock of Opinion. Science, Technology and Society in the Siting of High Level Nuclear Waste*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht.
- Vad har statsmakterna bestämt om kärnkraft och kärnavfall? i Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 1995, Rapport av KASAM (SOU 1995:50).

- Vedung, Evert (2005), "Det högaktiva avfallets väg till den rikspolitiska dagordningen", i Mats André och Urban Strandberg (red.), *Kärnavfallets politiska utmaningar*, Hedemora: Gidlunds.
- Wikdahl, Carl-Erik, *Marvikens kärnkraftverk. Industripolitiskt utvecklingsprojekt i otakt med tiden*. SKI Rapport under publicering. (Ett sammandrag är publicerat i Nucleus 2007:1).
- Wrigley, E. A (2004), *Poverty, Progress, and Populatio.*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Östman, Alvar (2002), *Erfarenheter av den svenska linjen tungt vatten och naturligt uran i Ågesta kraftvärmeverk*, SKI Rapport 02:54.

3 Anläggning och drift av slutförvar

Erling Nordlund

3.1 Inledning

Tiden för att bygga en första etapp av ett slutförvar för använt kärnbränsle kommer att uppgå till å 5-10 år (anläggningstid). Förvaret kommer sedan att vara drift under minst 50 år. Under denna driftsperiod sker dels deponering av använt kärnbränsle i färdigställda delar av förvaret, dels en successiv utbyggnad av förvaret.

I detta avsnitt ges en översiktlig bild av viktigare anläggningstekniska frågeställningar som blir aktuella under denna period.

Erfarenheterna är hämtade från etablering av gruvor vilket är en verksamhet som till stor del liknar anläggningen av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Den anläggningstid och driftstid som gäller vid etablering av en ny underjordsgruva är av samma storleksordning som för slutförvaret. De svårigheter och överraskningar man möter vid en gruvetablering bör kunna användas som en kunskapsbank inför den utmaning som anläggningen av ett slutförvar innebär.

I detta kapitel har några av dessa kunskaper och erfarenheter under olika tidsskeden av byggandet och den påföljande sammanställts och diskuterats.

3.2 Krav och förutsättningar

Enligt SKB:s Fud-program 2004 (s. 113) ska valet av bergbyggnadsteknik göras mot bakgrund av att:

- Byggande och drift ska ge begränsad påverkan på bergets och de övriga barriärernas säkerhetsfunktioner.

- Tekniska egenskaper beträffande bärförmåga och stadga, brand-säkerhet, hälsa och miljö och olycksrisk ska ge säkerhet för brukare och besökare.
- Undersökningar av berget, bergarbeten och drift ska kunna pågå parallellt, men inom separata områden.
- Utbyggnad ska kunna ske i önskad takt och på ett kostnads-effektivt sätt med viss flexibilitet.
- Miljöpåverkan ska vara begränsad.
- Närboende ska störas i så liten utsträckning som möjligt.

Byggandet av djupförvaret kan delas in följande steg:

- Detaljundersökning av vald plats.
- Placering.
- Design.
- Byggandet.
- Drift.

3.3 Detaljundersökning av vald plats (tidsperspektiv 5-10 år)

En s.k. platsvalsundersökning ligger tillsammans med andra aspekter till grund för val av den exakta placeringen av slutförvaret i berget. I denna undersökning identifieras faktorer som är viktiga för berganläggningens stabilitet. När platsen valts utförs mer detaljerade förundersökningar för att slutligen bestämma förvarets placering och utformning samt för insamling av data till analyser. Design av underjordsanläggningen baseras på data från den del av bergmassan där anläggningen ska ligga.

Erfarenheter från etableringar av gruvor kan vara intressanta att studera för att dra lärdom inför de svårigheter och överraskningar man kan ställas inför. Etablering av en underjordsgruva beror på malmens läge framför allt i vertikalled, dvs. om malmen utgörs av en ytlig eller en djupt liggande fyndighet. Även om ett stort antal gruvor har etablerats under de senaste 50 åren, saknas i princip dokumentation av erfarenheterna. De två senaste gruvorna som etablerats i Sverige där dagbrottsbrytning inte föregått underjordsbrytningen är Bolidens gruva i Petiknäs samt Lundin Minings gruva i Storliden. Den huvudsakliga skillnaden mellan dessa båda gruvor är att malmkroppen i Petiknäs var större och på större djup än i Storliden. Detta innebär att Storlidenmalms geometri och läge

hade fastställts med god noggrannhet innan rampen påbörjades. I Petiknäs kunde bara en grov uppskattning av malmkroppens geometri och läge göras innan byggandet av infrastrukturen i gruvan påbörjades. Från orter i gruvan borrades sedan prospekteringshål för att bestämma malmens läge med sådan precision att brytningslayouten kunde bestämmas. Detta bör man ha i åtanke när man planerar slutförvarets läge och utformning. Rampens och undersökningsorternas placering skall bestämmas så att undersökningsborrning kan utföras för att ge underlag till den planerade anläggningen

Detaljundersökningarna som också görs under anläggningstiden är avgörande för möjligheten att förutsäga områden med speciella geologiska förhållanden som t.ex. krosszoner, zoner med omvandlat berg (t.ex. lera, klorit, talk) och konduktiva zoner. Eftersom sådana zoner är kritiska för stabiliteten och vatteninläckningen i berget, är det viktigt att i förväg veta vilka bergförhållanden rampen och andra underjordsanläggningar kommer att drivas genom, så att bergmassan kan tätas och stabiliseras och rätt förstärkning utformas.

3.4 Design av förvaret (tidsperspektiv \approx 5 år)

När berget avlägsnas för att skapa undermarkskonstruktionerna sker en spänningsomlagring. Spänningsnivåerna ökar i vissa delar av bergmassan medan spänningen minskar i andra delar. Spänningsomlagringen sker inte omedelbart utan är en funktion av salvlängden (längden på borrhålen som laddas med sprängmedel och detoneras). Den ökande spänningen kan leda till brott på grund av höga tryckspänningar. Låga spänningar kan också innebära ökad risk för utfall, då i form av block och kilar som bildas av naturliga sprickor. Design av förvaret omfattar beräkning av spänningar och deformationer, identifiering av områden inom vilka hållfastheten överskrids, potentiella bergutfall samt design av bergförstärkning (t.ex. bultar och sprutbetong).

Det primära spänningstillståndet i Sverige karakteriseras av höga horisontalspänningar. Om underjordskonstruktionerna placeras på ett avstånd motsvarande mer än tre diametrar (om tunneln är cirkulär) eller spännvidder (om tunnlarna har annan form) från varandra, påverkar inte tunnlarna varandra. Den sekundära spänningen kommer då att vara störst (största tryckspänningen) i taket medan

spänningen kommer att bli lägre i väggarna i den ostörda berggrunden (dvs. väggarna avlastas). På de djup som ett slutförvar kommer att byggas på (500 m) kan en skadad zon bildas runt tunnarna som består av såväl drivningsrelaterade skador (sprängskador) som skador som uppkommit på grund av att de sekundära spänningen överskrider bergets hållfasthet. Den största skadezonen kan därför komma att bildas i taket. En likartad skadezon kommer att bildas i tunnelns sula. Kombinationen av skadat berg och den spänningsminskning som sker i väggarna som ett resultat av utbrytningen ökar risken för gravitativa utfall i väggarna. Det är därför viktigt att ha en förståelse för hur den skadade och den störda zonen beter sig mekaniskt och hydrogeologiskt. Skadat berg innehåller fler sprickor vilket innebär att styvheten och hållfastheten har reducerats. De studier som gjorts hittills har varit fokuserade på att definiera olika typer av zoner, men ingen har kunnat bestämma och beskriva hur styvheten och hållfastheten varierar i den skadade zonen. Det finns ett antal scenarier:

- (i) Styvheten minskar mer än hållfastheten. Detta innebär att spänningen (belastningen) minskar mer än hållfastheten jämfört med oskadade förhållanden och konstruktionen är alltså stabilare än om berget är oskadat.
- (ii) Om hållfastheten minskar mer än styvheten kommer spänningen att minska mindre än hållfastheten jämfört med det oskadade fallet. Risken för instabiliteter har alltså ökat.
- (iii) Om styvheten och hållfastheten minskar lika mycket kommer väggar och tak vara avlastade jämfört med ett fall utan skador.

Forskning har visat att den hydrauliska konduktiviteten (vattenledningsförmågan) i den sprängskadade zonen ökar jämfört med det naturliga tillståndet och att risken för inläckage ökar på grund av att ett stort antal nya sprickor bildas och de naturliga sprickorna öppnas som ett resultat av sprängningen. I det skadade berget skulle det därför finnas fler möjliga flödesvägar för grundvattnet. Det finns dock studier som har visat att de hydrauliska egenskaperna förändras så att inläckaget i stället minskade. En ökad kunskap om bergets egenskaper och beteende i den skadade/störda zonen är viktig för att kunna göra en så bra dimensionering av slutförvaret som möjligt.

Under drivningen säkras berget med en driftförstärkning som senare kompletteras så att en permanent förstärkning erhålls. Vidare är inläckage av vatten under drivningen och i driftfasen ett problem som måste beaktas. Det eventuella inläckaget av vatten förhindras genom tätning av bergmassan. Detta sker genom att t.ex. cementslurry pumpas ut i bergmassan via borrhål (injektering). För att kunna föreslå en driftförstärkning och en injekteringsplan krävs ett omfattande förundersökningsprogram. Oavsett hur bra detta program är, kan oförutsedda beteenden hos bergmassan inträffa. En plan för hur olika typer av svårigheter ska åtgärdas bör finnas färdig vid byggstarten. Designen av underjordskonstruktionerna bör ske med hjälp av ingenjörsmässiga och numeriska metoder.

En ny Euronorm för dimensionering av bergkonstruktioner skall vara fullt införd i Sverige inom några år. Inom ramen för SveBeFo:s¹ ramprogram pågår ett större forskningsprogram där sannolikhetsbaserad dimensionering studeras speciellt med beaktande av den nya Euronormen. SKB är en av huvudfinansiärerna. Den kunskap och de metoder som detta program resulterar i bör beaktas vid dimensioneringen av slutförvaret. SKB har också via bl.a. SveBeFo initierat forskningsprojekt vars mål har varit att öka förståelsen för injekteringens mekanismer, vilka materialegenskaper som efterfrågas (partikelstorlek) samt hur injekteringen ska genomföras praktiskt. Eftersom Sverige är ett av de länder som ligger i forskningsfronten inom kunskapsområdet injektering, finns sannolikt den kunskap som krävs för att åtgärda vattenproblem som kan uppstå i samband med byggandet. Det finns dock fortfarande problem som är svåra att bemästra. Exempel på sådana svårigheter är om man under drivningen korsar en starkt vattenförande zon med extrema tryck och flöden. Ett exempel är Hallandsåstunneln.

3.5 Byggnad av förvaret (tidsperspektiv 5–10 år)

Drivningen av tunnlar, ramper (tunnlar som går från markytan till förvaret) och de andra undermarkskonstruktionerna kan ske med hjälp konventionella metoder, dvs. borrhning och sprängning eller med mekanisk brytning (fullborrningsmetoder). Båda metoderna skadar det kvarvarande berget, men skadans omfattning är betyd-

¹ Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning.

ligt mindre med mekanisk brytning. Brytningsmetodens påverkan på berget har studerats i bland annat Äspölaboratoriet. Kompetens för utförande av båda metoderna finns i Sverige. Ett flertal framgångsrika fullborrningsprojekt har genomförts i Sverige, exempelvis Klippens kraftstation i Umeälven. Den konventionella metoden med borrhning/sprängning fungerar i de flesta typer av berg som förekommer i Sverige.

Nackdelarna med att använda sig av fullborrningsmetoden är att den generellt är betydligt dyrare än konventionell drivning. Dessutom är den begränsad med avseende på geometri (kurvor i tunnelsträckningen) samt tvärsnitt. Fördelarna är att driften kan ske kontinuerligt, utan stopp för t.ex. utvädring av spränggaser, och en jämn hög indrift erhålls. Vidare kan metoden innebära ett mindre behov av förstärkningsåtgärder.

Forskning med syfte att undersöka orsaker till förseningar och fördringar vid tunnelbyggnationer pågår på uppdrag av SveBeFo, men är i ett tidigt skede och har inte gett några resultat ännu. Generellt kan dock sägas att flaskhalsar vid tunneldrivning ofta är relaterade till oväntade behov av förstärkningsåtgärder, varför vikten av en adekvat förundersökning av bergmassan än en gång betonas.

Vid etableringen av en gruva används endast ramp om brytningsdjupet är litet. Kostnaden för att sänka ett schakt är så hög att detta inte är ekonomiskt försvarbart. Om däremot gruvans djup är flera hundra meter bestäms systemet för uppfordring (ramper och/eller schakt) av traditionen. Eftersom stora bergvolymmer ska uppfordras vid byggandet av slutförvaret, är troligen den tekniskt och ekonomiskt mest fördelaktiga lösningen att börja med att driva rampen. Schaktet kan sedan drivas med fullborrnings. Denna metod innebär att ett pilothål (ett hål som kan vara någon decimeter i diameter) borrar. Därefter monteras en stor borrhkrona i änden på pilotborrsträngen. Upprymningsborrnings (Eng. raise boring) sker sedan genom att pilotborrsträngen drar upprymningskronan genom berget, varvid ett hål med mycket större diameter skapas. När schaktet är färdigt sker i princip all uppfordring via schaktet eftersom detta är det billigaste alternativet. Schaktet kan senare användas för att transportera återfyllningsmaterialet till canisterhålen och förvarstunnlarna.

3.6 Drift av förvaret (tidsperspektiv 50-60 år)

I en gruva dimensioneras inte alla underjordskonstruktioner för samma livslängd. De orter som är närmast brytningen, t.ex. brytningsrum i en igensättningsgruva eller en tväror i en skivrasgruva, har en livslängd på månader till något år, medan snedbanor och uppfordringsschakt i princip har samma livslängd som gruvan. När tunnlar för vägtrafik och tågtrafik byggs eftersträvas en livslängd på omkring 120 år. Erfarenheter från undermarksanläggningar för infrastruktur bör alltså studeras.

En bergkonstruktion påverkas/skadas redan under anläggningskedet (av t.ex. sprängningen). Den kommer därefter att under hela sin livslängd att påverkas av processer som kan påverka stabiliteten. Den lokala strukturgeologin tillsammans med konstruktionens orientering är viktiga faktorer för stabiliteten. Det är inte bara berg som ingår i en bergkonstruktion, tunnlar är ofta även förstärkta med bult och sprutbetong som genomgår en nedbrytningsprocess. Bultarna rostar medan sprutbetongen urlakas. Om sprutbetongen är armerad med stålfibrer eller stål nät kan dessa också rosta. Kraftigt rostangripna bultar tappar sin lastbärande förmåga och bultförstärkningen måste kompletteras med nya bultar. Urlakning av sprutbetong innebär att betongen tappar sin hållfasthet. Denna sprutbetong bör då avlägsnas innan nytt material kan sprutas på igen.

Konstruktioner i berg kräver därför underhåll för att erhålla en tillräcklig livslängd och för att säkra förhållanden ska upprätthållas. Ett kostnadseffektivt underhåll av en bergkonstruktion kräver att man kan bedöma dess tillstånd, dvs. om det är nödvändigt att vidta åtgärder eller ej. Denna bedömning kan resultera i en rekommendation om eventuella stabilitetsförhöjande åtgärder som t.ex. förankring av potentiella instabiliteter med hjälp av bergförstärkning (bultning, nätning och betongsprutning). En annan rekommendation kan vara att berget ska skrotas för att avlägsna det lösa berget och urlakad sprutbetong. Därefter vidtas åtgärder för att minimera effekten av nedbrytningsprocesserna eller åtminstone förhindra att dessa processer leder till utfall och ras som äventyrar säkerheten. Även om stabilitetsförhöjande åtgärder kan förhindra potentiella ras och utfall kan det ändå vara för sent ur kostnadseffektivitetssynpunkt. Om åtgärder sätts in tidigare kan nedbrytningen av konstruktionen begränsas, kostnaden för åtgärden kan minskas och ytterligare nedbrytning av konstruktionen reduceras.

Eftersom inga generella metoder är tillgängliga för bedömning av bergkonstruktioners tillstånd (innan en synlig skada kan observeras) med avseende på stabilitet repareras/förstärks troligen ett antal stabila konstruktioner medan ett antal instabila konstruktioner inte upptäcks förrän ras har skett. Även en relativt harmlös initiell skada kan så småningom i vissa fall resultera i omfattande skador och ras. Generella metoder för tillståndsbedömning som möjliggör tidig upptäckt av skador är därför en nödvändighet för att kunna bedriva ett kostnadseffektivt underhåll av undermarkskonstruktionerna.

Bränder kan få katastrofala följder

Under de senaste tio åren har det inträffat en rad bränder i tunnlar runt om i världen där människor fått sätta livet till. Exempel från Europa är Mont Blanc-tunneln 1999 där 39 människor dog, Kaprun 2000 med 155 döda, samt Gotthard-tunneln 2001 med 11 döda. Ett antal bränder utan dödsoffer har också inträffat bland annat i tunneln under Engelska kanalen 1996. Skadorna som orsakades av bränderna var bitvis mycket omfattande och har lett till en het debatt och intensiv forskning om tunnelsäkerhet i Europa. Skadornas omfattning beror bl.a. på den starka värmeutvecklingen, samt på de aggressiva brandgaserna.

Ett flertal faktorer medverkar till att tunnelbränder ofta blir katastrofala. Brandutvecklingen är ofta väldigt snabb. En lastbil som börjar brinna kan vara övertänd inom ett par minuter, vilket också gör att värmespridningen blir snabb. Bränder i tunnlar leder till en enorm värmeutveckling som kan ge temperaturer på över 1 000°C. Detta orsakar stora skador på tunnelarnas betongförstärkning. Tester har utförts både i liten och i stor skala, men gemensamt är att det är påverkan på betongen som studerats. Samtliga bränder som nämndes ovan skedde i tunnlar med betonglining med en tjocklek på mellan 30 och 50 cm. I Sverige används inte betonglining i någon större utsträckning. De flesta tunnlar har ett skikt av sprutbetong med maximal tjocklek på 20 cm. I en sådan tunnel är det troligt att berget bakom betongen skulle påverkas av de höga temperaturerna som utvecklas under en brand. Den troliga brottmekanismen är att skivor av berg spjälkas lös från väggar och tak allteftersom temperaturförhöjningen sprider sig in i bergmassan. Dessutom föreligger risk för att det berg som utsatts för höga temperaturer påverkas så att de fysikaliska och mekaniska

egenskaperna förändras. Om berget innehåller kvarts är spjälkningsbenägenheten större och dessutom undergår kvarts en omvandling vid ca 600°C . Tester har också visat att glimmer kan motverka avspjälkning.

3.7 Sammanfattning

Design och byggande av förvaret kommer att kräva ett väl genomtänkt förundersökningsprogram, metoder för att bemästra starkt vattenförande zoner samt en bättre kunskap om den störda zonen och den skadade zonen mekaniska och hydrogeologiska egenskaper. För områden i bergmassan som karakteriseras av låg hållfasthet och där stabilitetsproblem i form av utfall kan förväntas bör erfarenheterna och resultaten från SveBeFos forskningsprogram "Sannolikhetsbaserad dimensionering speciellt med beaktande av den nya Euronormen" användas. Under bygg- och driftfasen är det viktigt att kunna hantera de problem som en eventuell brand kan orsaka i form av utfall och förändrade bergegenskaper. Vidare finns det ett behov av att kunna tillståndsbedöma bergkonstruktioner så att rätt åtgärd sätts in vid rätt tillfälle.

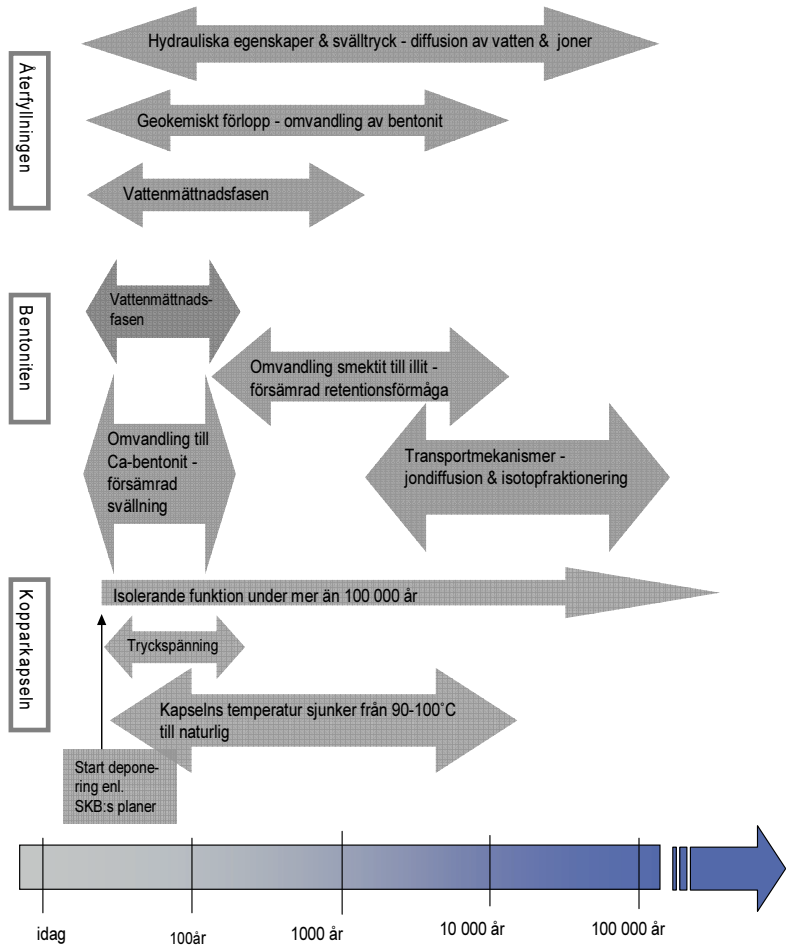
4 Tekniska barriärer

Willis Forsling och Hannu Hänninen

4.1 Inledning

Figur 4.1 illustrerar olika tidsperspektiv som är aktuella för de processer som förväntas äga rum i slutförvaret när det gäller kapseln, bentonitbufferten och återfyllnaden. Som framgår av figuren har processerna mycket olika utsträckning i tiden men många av dem har ett stort inflytande på förvarets långsiktiga säkerhet. För återfyllningen gäller att SKB hittills inte har meddelat vilken metod man beslutat sig för att använda, men de viktigaste förloppen är oberoende av detta.

Figur 4.1 Tidsberoende processer med avseende på kapseln, bentonitbufferten och återfyllnaden



4.2 Kapseln i ett tidsperspektiv

4.2.1 Krav på kapseln (tidsperspektiv >100 000 år)

Kapseln, som består av olika delar (figur 4.2), är en viktig barriär i förvaret eftersom kapseln förhindrar grundvattnet att komma i kontakt med det radioaktiva använda bränslet och isolerar det från omgivningen. Både i Sverige och i Finland har därför SKB och dess

finska motsvarighet (Posiva) ställt upp speciella krav på kopparkapseln (Fud-program 2001/2004, TKS-2003/2006). Kapseln ska sålunda:

- Innesluta bränslet.
- Vara tät vid deponering.
- Vara kemisk beständig under förvarets livstid.
- Vara mekanisk beständig under förvarets livstid.
- Ha liten inverkan på övriga barriärer.
- Säkerställa att kriticitet inte uppstår.

Ytterst i kapseln finns ett hölje av koppar och insatsen är av segjärn, dvs. yttre korrosionsbeständighet förenas här med inre hållfasthet för långsiktigt säker förvaring. Båda delarna är därför viktiga för att isolera det använda bränslet från grundvattnet under extremt lång tid (>100 000 år), vilket är mycket längre än någon annan industriellt tillverkad produkts verksamhetstid. För att förhindra att radioaktivitet kommer ut från kapseln krävs tillverkningstekniker som ger en felfri kapsel med garanterade materialenskaper hos koppar och segjärn, vilka är optimerade mot alla relevanta skademekanismer, såsom olika former av korrosion, krypning, brott, osv.

Metoderna för långsiktigt säker förvaring av använt kärnbränsle har undersökts av SKB under mer än 25 år. Den preliminära tekniska dokumentationen för kapseln har utarbetats inom ramen av det s.k. Dokap-projektet, som behandlar konstruktionen och de system och processer som utvecklats för tillverkning och förslutning av kopparkapseln (SKB Rapport R-06-1). Redovisningen ger också en kvalificering av tillverkning och förslutning av kapseln för använt bränsle. Dokumentationen innehåller beskrivningar av tillverkningsmetoder i produktionssystemet, kvalitets- och miljöledningssystemet för kapseltillverkning samt kapselfabriken, beskrivning av svets tekniken vid förslutning av kapseln samt bakgrunden till valet av referensmetod för svetsning, beskrivningar av provningstekniken för kvalitetskontroll av förslutnings- och botten-svetsar samt kapselns komponenter. Enligt kvalificeringsprogrammet fortsätter forsknings- och utvecklingsarbetet med grundläggande materialstudier, hållfasthetsberäkningar och skadetålig-hetsanalyser. De kapselkomponenter som tillverkas är kopparrör, kopparlock och kopparbotten, insats av segjärn samt insatslock av stål (figur 4.2).

Figur 4.2 Exempel på tillverkade kapselkomponenter: kopparrör, segjärn, insats och kopparlock



Källa: SKB:s Fud-program 2001 (s. 273).

Kopparkapseln (50 mm väggjocklek) skyddar det använda bränslet mot korrosion. Kopparkapseln planeras att bestå av extruderade sömlösa kopparrör (jämn mikrostruktur och fin kornstorlek som krävs för acceptabla långtidsegenskaper och oförstörande provning) och smidda kopparlock och botten. Två andra alternativ för produktion av sömlösa rör är smidning och dornpressning, som också möjliggör en integrerad botten. Förslutning och svetsning av botten görs med Friction Stir Welding (FSW), som är den valda referensmetoden (en annan möjlig teknik är elektronstrålesvetsning). Tillförlitligheten hos FSW-processen har visat att den minsta intakta kopparkapseln i förslutningssvetsen förväntas att vara 40 mm. Arbetet med att ytterligare förbättra FSW tekniken pågår. Efter att bränslet har deponerats i kapseln försluts insatsen med ett stållock som skruvas fast. Därefter svetsas kopparlocket på kopparhöljet och tätheten kontrolleras med oförstörande provning.

Kopparmaterialet måste först och främst uppfylla kraven enligt standarderna ASM UNS C10100 (Cu-OFE) eller EN133/63:1994 Cu-OF1. Utöver dessa krav erfordras att syre < 5 ppm, fosfor 30-70 ppm, väte < 0,6 ppm och svavel < 8 ppm. Dessutom gäller att

kornstorleken ska vara $<360 \mu\text{m}$ (provbarhet med ultraljud kräver möjligen ännu mindre kornstorlek) för alla tillstånd efter tillverkningen (Andersson, 2002). Kapselns insats tillverkas i form av en kassett av kvadratiska stålrör för bränslekanalerna. Därefter tillverkas innerbehållare och botten genom att gjuta in kassetten i segjärn. Segjärnet måste uppfylla kraven enligt standarden EN-GJS-400-15U.

Tre metoder av oförstörande provning används för att testa kapseln. Med röntgenradiografi upptäcks pordefekter, med ultraljud påvisas defekter som inte upptar volym, t.ex. bindfel och med virvelströmprovning avslöjas ytnära defekter. Eftersom svetsytan måste motstå korrosion är det viktigt att det inte finns några ytdefekter i en färdig kapsel. Acceptanskriterier kommer att fastställas för kapselns alla delar inklusive svetsarna. För att kvalificera oförstörande provningsmetoder måste man kunna avgöra om acceptanskriterierna uppfyllts med provmetoderna. För att säkerställa att de kapslar som tillverkas och försluts uppfyller de krav som ges av konstruktionsförutsättningarna behövs kvalificeringsprogram för tillverkning, svetsning och oförstörande provning.

4.2.2 Tillverkningsfrågor (tidsperspektiv 1–50 år)

Eftersom de mekaniska egenskaperna hos segjärn är starkt beroende av den gjutna kroppens dimensioner, måste materialprovning utföras på de färdiga insatserna. Hittills har dessa studier visat på en stor spridning i töjning och brottseghet, vilket beror på både gjutdefekter och inhomogenitet i mikrostrukturen. De mekaniska egenskaperna har hittills inte helt motsvarat uppställda krav. Sannolikheten att en defekt av kritisk storlek uppkommer ökar med komponentens storlek. Antagandet att den största defekten styr kapselns lastbärande kapacitet minskar således den maximala tillåtna lasten i större komponenter, s.k. storlekseffekt. Gjutprocessen liksom segjärnets specifikation, EN-GJS-400-15U (EN 1563), måste optimeras på grund av ovannämnda begränsningar. Tillförlitliga materialdata för gjutjärnsinsatsen behövs som ingångsdata vid hållfasthetsberäkningar, t.ex. när effekter av klimat och geologiska förändringar analyseras.

Efter alla tillverkningskedan - formning, bearbetning och svetsning – uppkommer plasticeringar och restspänningar i materialet. Dessa plasticeringar och restspänningar måste mätas och modelle-

ras, därför att båda kan ha en stor inverkan på krypning och spänningskorrosion när kapseln har placerats i ett slutförvar. Det högsta tillåtna värdet för restspänningar, vilket bör vara mindre än hälften av sträckgränsen, måste bestämmas. Dessutom måste behovet av olika tekniker för att kontrollera restspänningar, t.ex. genom avspänningsglödning eller mekaniska ytbehandlingsmetoder, utvärderas. Plasticering sker speciellt i och runt svetsområdet och kan påverka den lokala krypduktiliteten och korrosions-egenskaperna negativt.

Syftet med oförstörande provning (OFP) är att kontrollera att komponenterna inte har avvikelser och diskontinuiteter i materialstrukturen, som kan påverka kapselns långsiktiga funktion vid hantering och i slutförvar. Kopparkapseln har defekter efter tillverkningen, men bara ett fåtal (0,1%) kapslar får ha större fel än vad acceptanskriterierna för den oförstörande provningen tillåter (Fud-program 2001). Acceptanskriterierna är inte ännu specificerade. Ett antagande är att dessa oacceptabla defekter kan orsaka vattenläckage i kapseln inom 100 000 år.

Bowyer (2000) har gjort en sammanställning av alla tänkbara material- och tillverkningsdefekter samt restspänningar, som kan uppträda i kopparkapslar och segjärnsinsatser. Framför allt är defekter i kapselns locksvets viktiga att kartlägga. Ur korrosionssynpunkt är det viktigt att minimera uppkomsten av denna typ av defekter. Storlek och form av olika initialdefekter måste mätas så noggrant som möjligt. Här är också krav på maximal kornstorlek viktiga för att underlätta ultraljudsprovning. Acceptanskriterierna för initialdefekter måste baseras på bästa tillgängliga OFP-metoder. Känsligheten hos OFP-metoderna måste verifieras med hjälp av metallografi och mikroskopiska undersökningar av diverse defekter, och vidare måste POD-diagram (probability of detection) för defekter av olika storlek, form och läge genereras. Probabilistisk analys av kapselns hållfasthet vore värdefull för att bestämma och utvärdera dess beständighet mot de belastningar som uppkommer i slutförvaret och som då påverkar den långsiktiga säkerheten. Ytterligare kvalificering av de OFP-metoder som kommer att användas i den slutliga processen vid tillverkning och förslutning av kapslar måste utföras både för både koppar- och segjärnskomponenter.

4.2.3 Beständighet av kapseln (tidsperiod >100 000 år)

Konstruktionsförutsättningarna utgörs av dels krav på säker hantering och lyftning (upp till 100 lyft utan risk) av kapseln vid inkapsling och deponering (belastningar), dels grundläggande krav på den långsiktiga säkerheten i slutförvaret. Processer som är relevanta för slutförvarets långsiktiga utveckling och funktion, liksom klimat och geologiska förändringar, måste identifieras. Efter deponering kommer kapseln att stå i luft med hög fuktighet vid en temperatur av 90-100°C, som är kopparkapselns maximala temperatur i slutförvaret, innan vattenmättnad av omgivande bentonit skett inom 10-15 år (initialtillstånd). Saltdeponeringar förväntas inte uppkomma på kapselns yta. Den termiska konduktiviteten hos metall är hundratals gånger högre än i bentoniten och berget. Därför förväntas kapseln att ha en jämn temperatur som sjunker långsamt och till omgivningen temperatur inom 10 000 år.

Korrosionsegenskaper

I slutförvaret kommer kopparkapslarna att exponeras för både allmän och lokal korrosion av olika typ i komplexa kemiska, mikrobiella och mekaniska miljöer, som dessutom varierar med tid och rum. Tre karakteristiska klimattillstånd väntas förekomma under slutförvarets livstid, vilka påverkar kapselns korrosionsbeständighet på olika sätt. Under s.k. tempererat tillstånd är grundvattnets sammansättning aerob (syresatt) under de första 200 åren och därefter blir miljön syrefri. Under permafrosttillstånd kan utfrysning och låg vattenomsättning leda till en betydande ökning av salthalten i grundvattnet. Under ett glacialt tillstånd kommer smältvatten att nå förvarsdjupet, men bergets redox-buffrande förmåga leder till att endast syrefritt vatten når slutförvaret. Under syrefria förhållanden förväntas den anaeroba (syrefria) korrosionen att vara styrd av tillförseln av löst sulfid till kapseln. Enligt den nu tillämpade beräkningsmodellen beräknas korrosionsangreppet att vara mindre än 6 mm i kopparhöljet. Sannolikheten för att korrosionen ska penetrera kapseln är därför låg i ett 100 000-årsperspektiv, även med hänsyn till initiala svetsdefekter.

För att spänningskorrosion ska ske krävs speciella förhållanden med avseende på dragspänning, aerob miljö med vissa föroreningar (ammonium, nitrit, osv.) samt mycket långsam töjningshastighet.

Under de första 100 eller 200 åren deformeras kopparhöljet under tryckspänning. Under samma tid uppkommer oxiderande korrosionsförhållanden i förvaret. Risken för spänningskorrosion under detta skede måste utvärderas mycket noggrant. Tröskelvärden för initiering och spricktillväxt vid spänningskorrosion hos koppar måste mätas i slutförvarsmiljö under olika typer av belastning. För andra korrosionsmekanismer, såsom allmän och lokal korrosion (punktangrepp och spaltkorrosion), har man en betydligt bättre kännedom tack vare laboratorieundersökningar och naturliga och arkeologiska kopparfynd. Framsteg har även gjorts när det gäller modellering av dessa korrosionsformer. Bedömningarna av korrosionshastigheterna är emellertid baserade på korttidsexperiment (från timmar till några år). Därför är det oklart om dessa resultat är relevanta för att säkerställa att kritiska korrosionsmekanismer inte skulle kunna förekomma under mycket långa tidsperioder. Korrosionsegenskaper av svetsgods, där mikrostrukturerna varierar och är ganska olika jämfört med grundmaterialet, har hittills undersökts i begränsad utsträckning.

När kopparhöljet har penetrerats av någon korrosions- eller brottmekanism, kommer grundvatten in i den skadade kapseln och tränger in i spalten mellan kopparhöljet och segjärnsinsatsen. Eftersom koppar och segjärn är i kontakt med varandra uppkommer galvanisk korrosion i segjärnet. Detta leder till vätgasutveckling och ökat tryck på grund av både gastryck och tillväxt av magnetit inne i kapseln. Under anaeroba förhållanden är korrosion av segjärn ändå mycket låg, mindre än $1 \mu\text{m}/\text{år}$. Verifierande experiment bör ändå utföras för att visa att galvanisk korrosion inte är sannolik i förvarsmiljön för den aktuella kapselkonfigurationen. Vatten kommer efter en tid i kontakt med det använda bränslet och tubmaterialet av zirkonium. Därför kommer också själva bränslematerialet att angripas av korrosion. I detta skede är ett antal korrosionsmekanismer aktiva och modellering av olika förlopp måste baseras på många olika antaganden. På grund av komplexiteten och den möjliga interaktionen mellan olika mekanismer måste empiriska studier under realistiska förhållanden göras i framtiden för att bättre modellera hur korrosionsskador utvecklar sig i den skadade kapseln.

Krypegenskaper

Den konsekutiva utvecklingen av mekaniska påkänningar på kopparkapseln kan delas i fyra faser: vattenmättnadsfasen, tempererade och permafrostfasen, glaciala fasen och post-glaciala fasen. Vattenmättnadsfasen inträffar snart efter förslutning av förvaret. Isostatisk tryckuppbyggnad runt kapseln sker på grund av grundvattentryck och svällning av bentonit. Tryckjämnheter i kapseln kan uppstå till följd av ojämn svällning av bentoniten eller densitetsskillnader i den, vilket orsakar böjspänningar på kapseln, upp till 55 MPa. Under den glaciala fasen orsakar isbildningen en långsam isostatisk tryckuppbyggnad i förvaret, upp till 45 MPa. Enligt hållfasthetsberäkningarna motstår kapseln ett yttre tryck på 110 MPa. Därför bedöms sannolikheten för en kapselkollaps att vara liten, men oväntade tidsberoende effekter kan uppstå genom krypning av segjärn och koppar under det mycket långa tidsperspektivet. Ett tillförlitligt kollapskriterium måste demonstreras genom laboratorieförsök och hållfasthetsberäkningar. Under det post-glaciala tillståndet sker en långsam trycksänkning i förvaret och jordbävningar kan uppstå, vilket kan påverka kapseln mekaniskt när befintliga sprickor i deponeringshål aktiveras och orsakar skjuvningar.

Efter tillverkningen finns ett mellanrum som uppgår till 1,75 mm mellan kopparhöljet och segjärnsinsatsen. Det betyder att kopparn måste kunna deformeras med ungefär 4-5 % i slutförvaret. Långsam deformation i temperaturområdet 75-90°C, som råder i förvaret under restspänningar tillsammans med tryck orsakat av svällning av bentonitbufferten, leder till krypning i kopparhöljet ända in till segjärnsinsatsen. Koppar som används måste ha en krypduktilitet (maximal töjning före sprickning) på minst 10 % även efter långa tidsperioder både i grundmaterial och svetsgods. Krypduktilitet bör också mätas i grundvattenmiljö med ytterst låga töjningshastigheter. Också i samband med post-glaciala jordbävningar kan skjuvrörelser orsaka plastisk töjning i kopparhöljet som ska uppfylla krav på en plastisk töjning av 7 % och en kryptöjning av 7,7 %. Utöver grundmaterialet måste också svetsens krypduktilitet och kryplivslängd vara tillfredställande. I segjärnsinsatsen krävs en duktilitet upp till 11 %, som är ett högt värde för nuvarande material. Sannolikheten för kapselbrott genom skjuvrörelser i berget vid deponeringshålen måste utvärderas. Under dessa förhållanden är kapselns temperatur densamma som omgivningstemperaturen. Be-

tydelsen av fosforlegering (50 ppm) för krypbrotthållfastheten av ren koppar måste förklaras mekanistiskt. Mekanismerna behövs också för långtidsextrapolering av tillgänglig krypdata. Det är också viktigt att klarlägga krypegenskaperna hos svetsar, vilka kan ha annorlunda krypegenskaper jämfört med grundmaterialet på grund av varierande kornstorlek och plasticeringar. När krypdata för alla kapseldelar är tillgängliga, är det möjligt att göra finita elementberäkningar av deformationen i hela kapseln.

4.2.4 Sammanfattning

Insatsen som är av nodulärt segjärn har ännu inte visat acceptabla mekaniska egenskaper och därför måste gjutningsprocessen analyseras och kontrolleras bättre eller så måste någon annan typ av material användas. Gjutdefekter måste analyseras noggrannare i framtiden och olika OFP-metoder bör utvecklas för att upptäcka defekter.

Under alla omständigheter måste en mycket djupgående förståelse byggas upp med avseende på de mekanismer som orsakar svetsdefekter i koppar. För detta fordras en utvärdering av olika OFP-metoder för att detektera defekter och verifiera kapslarnas kvalitet. Det är också mycket viktigt att inga makrodefekter som snabbt kan genombryta kapseln uppkommer vid tillverkningen.

Det behövs mer forskningsarbete inriktat på kopparkapslarnas långtidsegenskaper för att bättre förutsäga framtida scenarier. Korrosionsforskning med speciell inriktning på mekanismer av spänningsskorrosion och mikrobiell korrosion av kopparkapseln behöver i ett första skede utföras under laboratorieförhållanden, men i ett längre perspektiv om möjligt också på plats i slutförvaret. Också mekaniska egenskaper inklusive krypning, plastisk deformation och brottseghet bör utredas och dokumenteras.

För att garantera tillförlitligheten under hela kapseltillverkningen och slutförvarsperioden måste acceptanskriterier för kapselns alla delar inklusive svetsar utvecklas. Dessa kriterier bör beakta materialegenskaper och defekter, både ytdefekter och defekter inne i materialet, i såväl kopparhöljet som i gjutjärnsinsatsen. Till sammans måste konsekvensanalyser göras för att förutsäga möjliga förlopp när kapseln inte uppfyller uppställda krav. Det är också viktigt att acceptanskriterier kan verifieras med OFP-metoder och att ett kvalitetssystem för kapseltillverkningen formuleras.

4.2.5 Referenser

- Fud-program 2001/2004, Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. SKB, September 2001/2004.
- TKS-2003/2006, Nuclear Waste Management of the Olkiluoto and Loviisa Power Plants: Programme for Research, Development and Technical Design for 2004-2009. Posiva Oy, December 2003/November 2006.
- C.-G. Andersson, Development of Fabrication Technology for Copper Canisters with Cast Inserts. Status Report in August 2001. Technical Report TR-02-07, SKB, April 2002.
- W.H. Bowyer, Defects which Might Occur in the Copper-Iron Canister Classified According to their Likely Effect on Canister Integrity. SKI Report 00:21, June 2000.
- SKB Rapport R-06-01, Kapsel för använt bränsle. Tillverkning och förslutning. September 2006. (+ 6 delrapporter).

4.3 Bentonitbufferten i ett tidsperspektiv

4.3.1 Bentonitbuffertens uppgifter (tidsperspektiv > 100 000 år)

Bentonitbufferten som omger kapseln har en nyckelroll för förvarets säkerhet och ska svara för en lång rad uppgifter. De viktigaste är följande:

- Att hålla kopparkapseln på plats i mitten av borrhålet för att förhindra att kapseln kommer i direkt kontakt med omgivande berg och samtidigt äga en viss grad av elasticitet för att kunna absorbera små rörelser i berget.
- Att leda bort det inneslutna bränslets återstående värmeenergi, dvs. den energi som frigörs vid radioaktivt sönderfall och som omvandlas till värme i kapseln och dess omgivning.
- Att förhindra transport av radioaktiva ämnen och kolloider.
- Att hindra grundvatten som ofta innehåller korrosiva ämnen att fritt flöda till kopparkapseln.
- Att upprätthålla en mycket låg vattenledningsförmåga (hydraulisk konduktivitet) och därigenom endast tillåta transport av olika lösta ämnen genom diffusion.

- Att genom att suga upp (absorbera) omgivande grundvatten skapa ett svällningstryck, som är stort nog för att tillsluta håligheter i bufferten och täta mellanrum mot kapsel och omgivande berg.
- Att utgöra en fientlig miljö för bakterier.
- Att ändå tillåta att gaser (t.ex. H_2) som uppkommit vid eventuell korrosion av järninsatsen i kapseln ska kunna diffundera utan att skapa permanenta transportvägar och håligheter.

4.3.2 Bentonitens egenskaper (tidsperspektiv > 100 000 år)

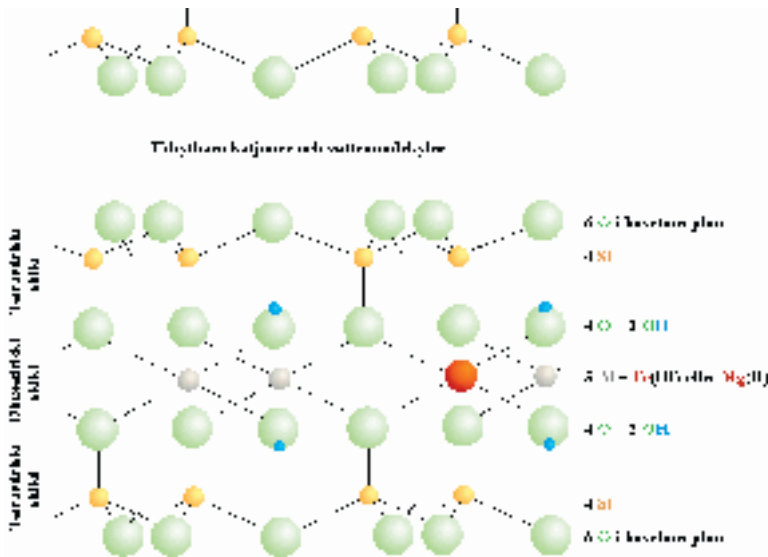
Bentonitens roll som teknisk barriär i förvaret bygger på dess unika kemiska och fysikaliska egenskaper. Den kan svälla till många gånger sin ursprungliga volym när den placeras i vatten och kan därigenom bilda trögflytande (tixotropa) geler med vatten även vid ganska små substansmängder.

Det har visats att leran har bildats genom en naturlig omvandling av vulkanisk aska för många hundra miljoner år sedan vilket betyder att den under normala förhållanden kan förväntas vara kemiskt stabil under den tidsperiod som är aktuell i förvaret (>100 000 år).

Mineralpartiklarna är mycket små ($\leq 2\mu\text{m}$) och naturligt sammanfogade (agglomererade) till större enheter. För att få önskad elasticitet måste bentoniten därför malas innan den pressas ihop till block som ska omge kopparkapseln i förvaret. Dessa block, t.ex. i form av stora "ananasringar", måste vara tillräckligt hållfasta för att kunna transporteras till förvaret och placeras runt kopparkapseln utan att gå sönder. Denna process kräver mycket stora och effektiva pressverktyg och SKB har hittills inte på ett tillfredsställande sätt visat hur detta kan åstadkommas.

För att bufferten ska få alla önskvärda egenskaper måste alltså bentoniten absorbera vatten mellan kiseloxidskikten så att leran sväller till flera gånger sin ursprungliga volym. (se figur 4.3).

Figur 4.3 Strukturen av smektit (montmorillonit), som är det huvudbeståndsdelen i bentonit



Huvudbeståndsdelen i bentonit är smektit (montmorillonit) som är ett lermineral med en struktur som visas ovan. Den innehåller kiseloxid i form av tetraedriska skikt (SiO_4) och aluminiumoxid i form av oktaedriska skikt (AlO_6).

Källa: KASAM:s kunskapslägesrapport 2001 (SOU 2001:35 s. 197).

Överst i figur 4.3 visas nedre delen av det tetraedriska skiktet hos en angränsande mineralpartikel. Vattenmolekyler och joner finns mellan partiklarna och joner med positiv laddning (katjoner) sitter bundna på partiklarnas ytor som är negativt laddade genom att aluminiumjoner (Al^{3+}) i det oktaedriska skiktet delvis har utbytt mot magnesiumjoner (Mg^{2+}).

Densiteten (tätheten) för torr lera är ca $1,6 \text{ kg/dm}^3$ och den önskvärda densiteten för bentonitbufferten i förvaret efter vattenmättnad är ca $2,0 \text{ kg/dm}^3$. Det är den högre densiteten som ger bufferten de egenskaper som gör att den kan svara upp mot sina uppgifter i säkerhetsanalysen.

4.3.3 Vattenmättnadsförloppet och dess betydelse (tidsperspektiv 10–200 år)

Den process som leder till vattenmättnad kallas hydratisering (vätning av mineralytorna) och är mycket viktig för förvarets säkerhet. Hur lång tid den tar är naturligtvis beroende på hur snabbt grundvatten kommer i kontakt med bentoniten.

Processen finns beskriven i detalj i en tidigare rapport från KASAM (SOU 2001:35).

Vattenmättnaden (hydratiseringsprocessen) av bufferten kommer att påbörjas redan under anläggningsperioden av förvaret allt eftersom kapslarna placeras ut, vilket betyder att bentoniten kommer i kontakt med vatten som är i jämvikt med atmosfären vid normalt lufttryck. Vattnet innehåller därför både löst syrgas och koldioxid.

Beroende på hur torrt omgivande berg är kan hydratiseringen ta mellan några tiotal år upp till *flera hundra år*. Om berget är mycket torrt och huvuddelen av vattnet tillförs via återfyllningen finns det enligt KASAM:s mening en risk för att vattnet innehåller en rad icke önskvärda föroreningar från den malda blandningen av bergkross/bentonit eller från Friedlandleran (se 4.3.2) beroende på vilken återfyllningsmetod SKB väljer. Dessa föroreningar kan påverka bufferten negativt och ge den sämre egenskaper på lång sikt.

En mycket lång hydratiseringsprocess innebär också att under den period när strålningen från restbränslet i kapseln är som störst (dvs. *de första 100-1 000 åren*) och den därtill hörande värmeutvecklingen är förhållandevis hög, kan bufferten vara delvis omättad och har därför inte fått alla önskvärda egenskaper.

Beroende på hur snabbt och på vilket sätt vattnet tillförts till mättnaden och svällningen av bentonitbufferten kommer förloppet att se mycket olika ut, vilket gör det svårare att bedöma buffertens funktion på kort och lång sikt.

Om vattnet å andra sidan tillförs alltför snabbt t.ex. genom strömmande grundvatten finns det risk för att kolloidala partiklar (mindre än $0,1 \mu\text{m}$) rivs loss från bufferten och kan i värsta fall transporteras vidare med radioaktiva ämnen från en eventuellt skadad kapsel på partikelytorna.

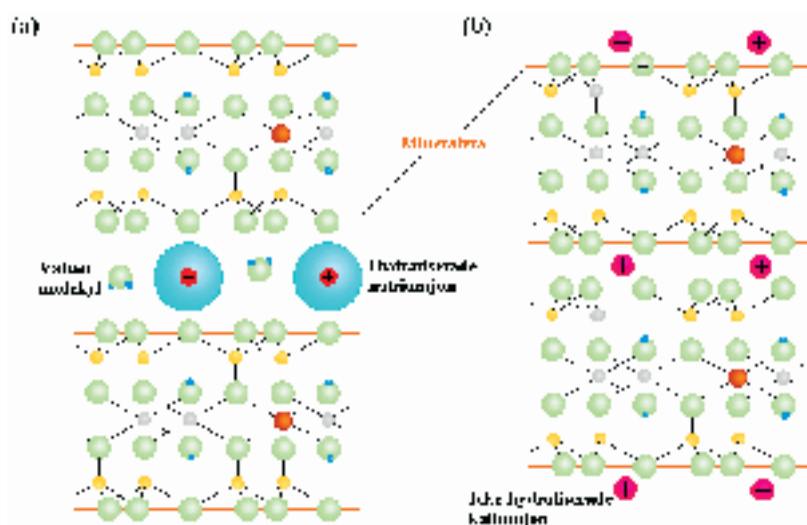
En hög strömningshastighet uppträder dock troligen endast under de första månaderna eller åren.

4.3.4 Omvandling till illit (tidsperspektiv 100–100 000 år)

En annan process som har diskuterats i olika sammanhang och av flera kritiker framförts som en osäkerhet på lång sikt är omvandlingen av smektit (montmorillonit) till illit i bentonitbufferten. Illit är ett lermaterial som inte har lika önskvärda egenskaper som smektit. Illit har t.ex. en mycket sämre förmåga att absorbera vatten och svälla.

En sådan omvandling innebär att många av buffertens egenskaper försämras och att den inte längre kan svara upp mot kraven i säkerhetsanalysen (se figur 4.4).

Figur 4.4 En jämförelse mellan lermineralen (a) smektit (montmorillonit) och (b) illit



Källa: KASAM:s kunskapslägesrapport 2001 (SOU 2001:35 s. 213).

I MX 80 (natriumbentonit från Wyoming, USA) (a) är natriumjoner hydratiserade (omgivna av vattenmolekyler) och bundna till ytorna för att neutralisera laddningen. Den relativt stora jonradien hos dessa joner hjälper till att upprätthålla avståndet mellan skikten i smektit, vilket gör att vattenmolekyler får plats. Detta är orsaken till natriumbentonitens stora kapacitet för svällning och vattenadsorption. Avståndet mellan mineralpartiklarna växer när mer

vatten adsorberas. Bildning av illit innebär att en del kisel ersätts av aluminium i det tetraedriska skiktet, vilket ger upphov till en negativ ytladdning (b). I kontakt med kaliumhaltigt grundvatten kommer ytladdningen att neutraliseras av kaliumjoner (K^+). Dessa joner avger lätt de vattenmolekyler, som finns runt alla joner i vattenlösning. De på detta sätt "avvattnade" kaliumjonerna införlivas effektivt i hålrummen mellan de tetraedriska skikten hos angränsande partiklar. Illit bildar tätpackade staplar där utrymmet är för litet för vattenmolekyler.

En nyckelparameter i sammanhanget är alltså tillgången på kaliumjoner i jämvikt med bufferten och en annan kritisk faktor är temperaturen. Beräkningar har visat att vid en temperatur på ca 100°C och med kaliumhalten 200 ppm kan omvandlingsprocessen ta *100–100 000 år* beroende på vilken kinetikmodell som används.

Det är dock troligt att processen är tydligt märkbar redan efter ett antal hundra år. I de fall då vattnet som åtgår till vattenmättnaden av bentoniten i huvudsak tillförs via återfyllningen (om berget är torrt) finns det risk för att utlakade kaliumjoner och andra lösta ämnen påskyndar processen. Eftersom återfyllningen består av finfördelat material med stor yta kommer upplösning, jonbyte och adsorption vara centrala processer vid vattentransporten (se vidare avsnittet om återfyllningen).

4.3.5 Omvandling till kalcium-bentonit (tidsperspektiv 10–200 år)

En mindre dramatisk men betydligt snabbare process är jonbytet mellan natriumjoner (Na^+) i bentoniten och kalciumjoner (Ca^{2+}) i grundvattnet, vilket föranleder en omvandling från Na- till Ca-bentonit och en avsevärt försämrade absorption av vatten och därmed en minskad densitet i bufferten.

Skillnaden i vattenledningsförmågan mellan Na- och Ca-montmorillonit är dock betydande, särskilt vid densiteter lägre än $1,6\text{--}1,8\text{ kg/dm}^3$. Barriärens retentionsförmåga (förmåga att fördröja transport) försämras genom att transport av vissa joner kan öka ända upp till 10 gånger.

Under anläggningsperioden av förvaret (ca 40–50 år) påverkas många av processerna i bentonitbufferten (vattenmättnad, jonbyte etc.) av de förhållandevis höga syre- och koldioxidhalterna i vatten, som står i jämvikt med omgivande atmosfär.

Till detta kommer de möjliga föroreningar som kommer från aktiviteter i samband med anläggningen av förvaret dvs. avgaser från motorer, oljespill etc.

4.3.6 Porvattnets inverkan (tidsperspektiv 1–200 år)

Luftens koldioxidtryck, $p\text{CO}_2$, påverkar karbonathalten (CO_3) i vattnet och kan leda till komplexbildning med metalljoner och utfällning av svårslösliga karbonater t.ex. CaCO_3 (kalciumkarbonat) i bufferten.

En ökad mängd löst syre i vatten ($\text{O}_2(\text{aq})$) höjer den oxiderande förmågan (pe-värdet) och i kontakt med bentoniten kommer sulfidhaltiga (S^{2-}) föroreningar som pyrit (FeS_2) att oxideras och sänka pH-värdet. Den bildade syran kan då reagera med och neutraliseras av kalciumkarbonat i bufferten eller karbonatjoner i vattnet.

Det är viktigt att pH-värde i buffertens provvatten hålls på en konstant nivå eftersom partikelytornas adsorptionsförmåga är starkt pH-beroende. De konditionella (lokala) adsorptionskonstanterna (egentligen fördelningskonstanter, K_d -värden) för olika radionuklider som används i SKB:s modeller gäller dessutom inom ett mycket snävt pH- och koncentrationsintervall.

Enligt modellberäkningar ska pH-värdet nå ett maximalt värde på 7,6 efter 100 år orsakat av upplösning av kalcit (CaCO_3). Efter detta förutsäger modellen en minskning av pH-värdet i hela bufferten med ett minimum på 6,35 efter 1 000 år.

Det finns anledning att ta pH-förändringar i bufferten på stort allvar eftersom låga (eller alltför höga) pH-värden medför en rad icke önskvärda konsekvenser som ökad korrosion av kopparkapseln, ökad löslighet av kiseloxid och omvandlingar i bufferten (t.ex. bildning av illit).

4.3.7 Transportmekanismer (tidsperspektiv 1 000–100 000 år)

En huvuduppgift för bufferten är att förhindra eller i varje fall fördröja transport av radionuklider från en eventuellt skadad kopparkapsel till omgivningen. Det finns ett stort antal publicerade

arbeten gällande transporthastigheten av olika isotoper vid transport genom bufferten.

Transportmekanismen för positivt laddade joner (katjoner) bör vara principiellt olik den för negativa joner (anjoner) eftersom partikelytorna i bufferten i allmänhet är negativt laddade, vilket betyder att anjonerna repelleras medan katjonerna attraheras. Dessutom tillkommer olika utfällnings- och jonbytesreaktioner, redoxreaktioner etc.

Diffusionskoefficienter för olika radioaktiva ämnen är konditionella, dvs. de beror av buffertens densitet, pH-värde, temperatur m.m.

Om bentoniten är fullständig vattenmättad ($\rho = 2,13 \text{ kg/dm}^3$) är de konditionella transporthastigheterna ofta av storleksordningen 10^{-11} – $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, vilket gör det möjligt att göra en grov uppskattning av den tid det tar för ett radioaktivt ämne att diffundera genom bufferten som är ca 0,35 m tjock (avståndet mellan kopparkapseln och omgivande berg) med hjälp av formeln $x^2 = 2Dt$ där x står för sträckan, D är diffusiviteten (specifik transporthastighet) och t är tiden.

Om D sätts till $2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ och $x = 0.35 \text{ m}$ blir $t \approx 1\,000$ år, vilket får anses vara relativt betryggande.

Man måste dock komma ihåg att detta värde gäller endast för maximalt gynnsamma förhållanden och vid ett lägre svällningstryck blir diffusionstiden genom bufferten betydligt kortare.

4.3.8 Isotopfraktionering (tidsperspektiv 1 000–100 000 år)

En konsekvens av den långa diffusionstiden ($\approx 1\,000$ år) är att processen med stor sannolikhet ger upphov till isotopfraktionering, dvs. en separation av det diffunderande grundämnetts olika isotoper.

I allmänhet transporteras elementets lättare isotoper transporteras fortare än de tyngre vare sig de är radioaktiva eller stabila.

Skillnaderna i transportshastighet blir generellt större för lättare grundämnen, eftersom en viss skillnad i massa blir procentuellt större. Men hastigheten påverkas också av transportmekanismen, dvs. adsorption, jonbyte, komplexbildning, utfällningar etc., vilka bidrar till att göra diffusionstiderna längre för tyngre isotoper av samma grundämne.

4.3.9 Sammanfattning

Bentonitens roll som teknisk barriär i slutförvaret av högaktivt använt kärnbränsle är väl utredd genom ett stort antal undersökningar och rapporter.

De allra flesta undersökningarna behandlar egenskaperna hos vattenmättad natriumbentonit (MX 80) från Wyoming, USA. MX 80 har mycket goda svällningsegenskaper i vatten. Det innebär att bentonitbufferten kan bli mycket kompakt med låg genomsläpplighet av radioaktiva ämnen, även när dessa är i form av joner och gaser.

En nackdel är dock att natriumbentoniten i kontakt med grundvatten kan omvandlas så att den delvis får sämre egenskaper. Det beror t.ex. på att natriumjoner i bentoniten kan bytas ut mot kalciumjoner från grundvattnet (genom en jonbytesreaktion). Resultatet är bildning av kalciumbentonit som har sämre svällningsegenskaper. Bentonitbarriären blir då inte lika tät. Som beskrivits ovan kan denna reaktion ske relativt snabbt – kanske inom en tvåhundraårsperiod. Denna process är mer eller mindre oundviklig om bentoniten kommer i kontakt med grundvatten när den är vattenomättad. Det rör sig dock inte om någon katastrofal förändring av barriärens egenskaper, även om tiden för transport av radioaktiva ämnen genom bufferten förkortas.

En annan reaktion som har en negativ påverkan på bentoniten i dess roll som teknisk barriär är att huvudbeståndsdelen i bentonit (smektit) kan omvandlas till illit. Detta kan ske genom att natriumjonerna i bentonit byts mot kaliumjoner från omgivande vatten. Kaliumjonerna kan t.ex. komma från lakning av berg och bergkross (kalifätspater) eller från cement som används i anläggningen och jonerna kan transporteras med strömmande vatten eller genom diffusion. Denna omvandlingsprocess tar mycket längre tid upp till 10 000 år eller mer - se diskussionen ovan - men innebär också en mer genomgripande försämring av buffertens egenskaper med avseende på svällning, elasticitet och retention (fördröjande) av radioaktiva ämnen.

Eftersom denna reaktion tar mycket lång tid har bränslets radioaktivitet till stor del hunnit avklinga. Processen kan därför inte bedömas vara ett hot mot den långsiktiga säkerheten. Men en långvarig kontakt med kaliumhaltigt vatten i ett tidigt skede bör undvikas.

Svällningen av bentoniten – och därmed barriärens egenskaper och funktion – påverkas också av hur fort och på vilket sätt vattnet kommer i kontakt med bentoniten samt av vad vattnet innehåller i form av lösta ämnen (t.ex. dess salthalt).

De flesta av buffertens positiva egenskaper är knutna till en vattenmättad bentonit, men som beskrivits ovan har det stor betydelse vilken sammansättning vattnet har (t.ex. halten kalium- och kaliumjoner). Det har också stor betydelse hur jämnt fördelat vattnet är i bufferten. En ojämn fördelning innebär att bufferten får olika egenskaper i olika riktningar. En helt torr bentonit har t.ex. inte den täthet, elasticitet och övriga fysikaliska egenskaper man önskar. Det är alltså viktigt att bentoniten får en så jämn tillförsel av vatten som möjligt under de första ca 100 åren efter det att kapslarna har deponerats och att vattnet inte innehåller några för bufferten skadliga ämnen.

SKB har inte visat hur man ska åstadkomma tillräckligt mekaniskt stabila block av bentonit (t.ex. i form av ”ananasringar”) som kan transporteras och sättas ner runt kopparkapseln. Bentonitblocken kommer säkert att väga hundratals kilo per styck och tillverkningen av block kräver mycket stora och kraftiga pressar som knappast finns tillgängliga idag.

4.3.10 Referenser

- Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2001; KASAM, Bentonitens roll som teknisk barriär vid slutförvar av använt kärnbränsle (SOU 2001:35).
- Kärnavfall – forskning och teknikutveckling; KASAM:s yttrande över SKB:s Fud-program 2001 (SOU 2002:63).
- Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2004; KASAM, Analys och fraktionering av olika isotoper (SOU 2004:67).
- Kärnavfall- barriärerna, biosfären och samhället; KASAM:s yttrande över SKB:s Fud-program 2004 (SOU 2005:47).
- Clay colloid formation and release from MX-80 buffer (TR-99-31).
- The microstructure of MX-80 clay with respect to its bulk physical properties under different environmental conditions (TR-01-08).
- SR-Can Data and uncertainty assessment; Migration parameters for the bentonite buffer in the KBS-3 concept (TR-04-18).
- Rd&D-Programme 2004 (TR-04-21).

Montmorillonite stability with special respect to KBS-3 condition (TR-06-11).

Water saturation phase of the buffer and backfill in the KBS-3V concept (TR-06-14).

Geochemical evolution of the near field of a KBS-3 repository (TR-06-16).

Geosphere process report for the safety assessment SR-Can (TR-06-19).

4.4 Återfyllningen i ett tidsperspektiv

4.4.1 Krav på återfyllningen (tidsperspektiv > 100 000 år)

Återfyllningen av alla deponeringstunnlar och andra håligheter i berget som åstadkommit i samband med byggandet av förvaret är en kritisk process för förvarets fortsatta funktion.

De krav som ställs på återfyllningen kan formuleras i ett antal satser:

- Återfyllningen ska ha en styvhet som minimerar buffertens expansion uppåt för att upprätthålla buffertens densitet.
- Återfyllningen ska ha en hydraulisk konduktivitet som är jämförbar med det omgivande bergets. Deponeringstunnlar och tillfartsvägar kan annars utgöra vägar för vatten- och gastransport i och ut ur förvaret.
- Återfyllningen ska ha en svällande förmåga så att det kan uppnå ett tillräckligt svälltryck mot tak och golv som kan täta eventuella effekter av kanalbildning och kryprorelser.
- Diffusionen av radionuklider, radioaktiva gaser, kolloidala partiklar och andra skadliga ämnen ska vara låg.
- Återfyllningen får inte ha någon negativ påverkan på barriärerna i förvaret, vilket ställer krav på den kemiska sammansättningen.

4.4.2 Olika koncept för återfyllningen (tidsperspektiv 1–100 år)

Enligt Fud-program 2004 studerar SKB tillsammans med sin finska motsvarighet, Posiva, ett antal olika koncept för återfyllning av tunnlar. De koncept som är aktuella för analys i SR-Can är an-

tingen en 30/70 blandning av buffertmaterial och bergkross som kompakteras direkt i förvaret eller blockpressad Friedlandlera (se nedan).

I en nyligen utgiven rapport från SKB (R-06-71) uppdelas materialet i återfyllningen i tre olika kategorier:

1. Bentoniter som består av olika typer höggradiga och låggradiga Na- och Ca-bentonitleror från USA, Indien och Europa. De höggradiga lerorna ska användas tillsammans med ballast (bergkross).
2. Smektitrika blandleror från Tjeckien och Tyskland (Friedlandlera)
3. Blandningar av bentonit och ballast som innehåller 30, 40 eller 50 % bentonit och bergkross med olika partikelstorleksfördelning, alternativt sand.

Vid sidan om långsiktiga säkerhetsaspekter blir slutligen den totala kostnaden säkert en faktor som SKB kommer att ta stor hänsyn till eftersom det är frågan om stora mängder material.

En 30/70-blandning (30 % bentonit plus 70 % bergkross) har den fördelen att en del av berget från tunnelbygget kan återanvändas, vilket har en positiv miljöeffekt. Detta koncept ställer dock vissa krav på mineralsammansättningen hos den använda ballasten. Den exponerade ytan hos mald bergkross kommer ju att öka miljontals gånger jämfört med det ursprungliga berget, vilket får kemiska och fysikaliska konsekvenser. Kalium och kisel som lakas ut från kalifältspater kan orsaka omvandling till illit eller cementering av bufferten, medan andra mineral som t.ex. karbonater och pyrit (FeS_2) kan ge upphov till cementering eller korrosion.

Cementering betyder i detta sammanhang att en svårlöslig förening (utfällning) bildas på bekostnad av att en mer löslig förening löses upp.

För att åstadkomma en så tät packning som möjligt mellan bentonit och bergkross krävs en optimal partikelstorleksfördelning som innebär att ballasten (bergkrosspartiklarna) har malts till storleksordningen -5 mm, vilket kommer att kräva mycket energi.

För närvarande undersöks två principiellt olika metoder att applicera återfyllningen i tunnlarna. Det ena sättet innebär att materialet först kompakteras till block ($\approx 0,24 \text{ m}^3$) som tillsammans med pellets används för återfyllning av tunnlar med en hastighet av ca 6 m/dygn.

Den andra metoden går ut på att fylla och kompaktera materialet på plats i tunnarna.

En svårighet är att åstadkomma tillräckligt hög densitet i återfyllningen närmast taket i tunnarna och metoden kommer att vara känslig för läckande vatten.

4.4.3 Vattenmättnadsförloppets betydelse och hastighet (tidsperspektiv 1–1 000 år)

Vid vattenmättnad (hydratisering) kommer bentoniten att svälla och partiklarna från det finmalda berget ska då bidra till den styvhet som eftersträvas för att motstå bentonitbuffertens expansion när den sväller. Mineralpartiklarnas egenskaper med avseende på vattenabsorption i samband med svällning - men även lakning, laddning och adsorptionsförmåga - kommer att ha stor betydelse för återfyllningens funktion. Växelverkan mellan ballast och bentonit på molekylär nivå är också kritisk. Man vill åstadkomma en mycket tät koppling mellan bentonit och ballast, vilket bl.a. innebär att mineralpartiklarna ska vara hydrofila (ha hög vätbarhet) för att minimera inneslutningar av luft som skulle försämra egenskaperna.

Återfyllningens egenskaper beror i likhet med bentonitbufferten i hög grad på förhållandena under vattenmättnadsfasen. Hur bergförhållandena påverkar vätningsfasen hos återfyllningen i förvarstunnarna har undersökts för tre olika koncept och resultaten redovisas i SKB:s rapport TR-06-14. I beräkningarna har variationer gjorts av bergmatrisens vattenledningsförmåga, avståndet till vattenförsörjningsgränsen samt närvaron av en genomsläpplig zon vid gränssytan mot berget.

Resultaten visar att tiden till total vattenmättnad varierar från 0,5 år för 30/70 återfyllningen med 1 m mellan sprickorna i omgivande berg till mer än 150 år för Friedlandlera och 25 m mellan sprickorna.

Om berget är helt torrt (extremfall) varierar tiden till vattenmättnad för 30/70 blandningen mellan 250 och 2000 år och för Friedlandlera mellan 250 och flera tusen år.

Det är vattenledningsförmågan hos olika typer av återfyllning som kontrollerar vätningshastigheten. Skillnaden i tid för att uppnå full vattenmättnad hos Friedlandlera är ca 10 ggr längre än för 30/70 återfyllningen. Det är det omgivande bergets sprickfrekvens

som betyder mest, eftersom vattentransporthastigheten i berg-matrisen är mycket låg, $\approx 10^{-13}$ m/s.

Om bergets genomsläpplighet ökar till 10^{-12} m/s vattenmätas båda typerna av återfyllning inom tidsrymd av ca 80 år.

Det total hydrauliska samspelet mellan berg, buffert och återfyllnad har modellerats i en 3D-modell som simulerar ett oändligt förvar som genomskärs av bergsprickor. Beroende på hur mycket och på vilket sätt vattnet tillförs (genom horisontella eller vertikala sprickor) så tar det mellan 10 och 600 år att vattenmätta hela bufferten och 1 till 1 100 år att vattenmätta (99 %) hela återfyllningen.

Modellereringen visar också att kopparkapseln's maximala temperatur (ca 90°C) uppnås efter ungefär 20 år.

Återfyllningens egenskaper är alltså starkt beroende på mättningsgraden av vatten som kan variera under tusen år. Det betyder att de krav man ställer på återfyllningen inte är uppfyllda under motsvarande tidsrymd, vilket bör tas med i beräkningen.

Om vätningen av olika delar i återfyllningen går olika fort (vilket är ett troligt scenario) leder det till att de hydromekaniska egenskaperna varierar. Vad detta betyder är inte helt klarlagt.

Återfyllningen närmast en spricka i omgivande berg kan vattenmätas relativt snabbt och svälla medan materialet längre in är förhållandevis torrt och således inte sväller lika mycket.

KASAM har tidigare – vid granskning av SKB:s Fud-program 2004 - poängterat vikten av att återfyllningen i första hand kan upprätthålla buffertens täthet när bentoniten runt kapseln vattenmätas, dvs. etablera ett motstånd mot de expansionskrafter som uppstår vid svällningen.

4.4.4 Återfyllningens hydrauliska egenskaper och svälltryck (tidsperspektiv 1–100 000 år)

Återfyllningens förmåga att leda vatten kommer också att vara starkt beroende av det tillförda vattnets kvalitet. Dessa aspekter har undersökts och beskrivits i en doktorsavhandling (Clement, 2003).

Den uppmätta hastigheten för transport av vatten i återfyllningen varierar mellan $4.5 \cdot 10^{-12}$ m/s och $3 \cdot 10^{-11}$ m/s där det högre värdet står för en högre salthalt i det inströmmande vattnet (16 g/L).

I SKB:s rapport TR-06-71 redovisas några nya kriterier för att indikera en godkänd funktion av återfyllningen:

1. Svällningstrycket i återfyllningen får inte understiga 0.2 MPa. Ett lägre svällningstryck att tätningen mot väggar och tak inte blir tillräckligt bra för att förhindra ett eventuellt flöde av vatten.
2. Den hydrauliska konduktiviteten får inte överstiga 10^{-10} m/s. Ett högre värde medför en alltför hög hastighet på vatten-transporten genom återfyllningen.
3. Återfyllningen måste kunna stå emot svällningen av bentonitbufferten så att densiteten vid toppen på kopparkapseln inte understiger 1.95 kg/dm³.

En vattenledningsförmåga på 10^{-10} m/s motsvarar att vattnet rör sig en sträcka på ungefär 3.2 mm/år. Man kan förvänta sig att diffusionen av joner och radionuklider är av ungefär samma storleksordning (eller kanske något högre) och i bästa fall motverkar dessa processer varandra, men de kan i värsta fall samverka. I så fall sker transporten av radioaktiva ämnen genom återfyllningen genom jondiffusion såväl som genom hydraulisk diffusion.

Svälltrycket tycks inte vara lika beroende av vattnets salthalt men är beroende av hur kompakterad återfyllningen är i torrt tillstånd, dvs. högre specifik vikt leder till högre svälltryck. Vid låg kompaktering tycks ett salthaltigt vatten vara fördelaktigt för att åstadkomma ett högt svälltryck.

Återfyllningen var i dessa studier av 30/70 typ, dvs. 30 % natriumbentonit och 70 % bergkross (granit) med en maximal partikelstorlek på 20 mm.

De relativt stora granitpartiklarna i bergkrossen i förhållande till bentonitpartiklarna gör det vanskligt att förutsäga återfyllningens egenskaper med avseende på en rad för förvaret kritiska parametrar och det är mycket angeläget att utföra experiment i full skala.

En slutsats som redovisas i den ovan citerade doktorsavhandlingen (Clement, 2003) är att man bör placera rena bentonitblock nära golv och tak i de återfyllda tunnlarna för att försäkra sig om en tillräckligt stor svällningskapacitet i de områden där man fortsättningsvis kan förvänta sig och vill förhindra ett fritt vattenflöde.

4.4.5 Geokemiska förlopp (tidsperspektiv 1–10 000 år)

Kemisk analys av vatten som samlats under mättnadsfasen i återfyllningen visar att det är tre huvudreaktioner som kontrollerar de geokemiska egenskaperna nämligen jonbytet mellan natrium och kalcium i bentoniten, tillsammans med upplösning av gips (CaSO_4) och kalcit (CaCO_3). Det betyder att en omvandling från Na-bentonit till Ca-bentonit i stort sett sker i takt med vattenmättnaden i återfyllningen och upplösningsreaktionerna tillsammans med jonbytet ger upphov till förändringar av det hydrauliska beteendet, t.ex. återfyllningens svällningsegenskaper.

Som tidigare nämnts i avsnittet om bentonitbuffertens långsiktiga funktion kan man förvänta sig en omvandling av mineralet montmorillonit i bentoniten till illit. Denna process är starkt beroende både av temperatur och kaliumhalt i vattnet. Hög temperatur och kaliumhalt leder till snabbare omvandling. Temperaturen i återfyllningen är lägre än i bufferten eftersom den befinner sig längre från kopparkapseln, men man kan å andra sidan förvänta sig en högre kaliumhalt i vattnet beroende på utlakning från bergkross och annat ballastmaterial.

Bentoniten i återfyllningen befinner sig också i mycket nära kontakt med ballastmaterialet varför det finns risk för en mycket snabb transport av kaliumjoner och ett relativt hastigt förlopp.

4.4.6 Mekanismer för jontransport (tidsperspektiv 10–100 000 år)

Även vid den tidpunkt när återfyllningen är vattenmättad kommer mekanismerna för transport av joner och andra ämnen att vara delvis olika förhållandena i bentonitbufferten.

Man kan förvänta sig att den huvudsakliga transportmekanismen genom återfyllningen av radioaktiva och andra lösta ämnen är genom diffusion. Till detta ska den hydrauliska konduktiviteten läggas, dvs. eventuella vattentransport genom materialet. Mekanis- men består dessutom av en rad andra parametrar som jonbytes- reaktioner, komplexbildning, sorptions- och utfällningsreaktioner etc. De inbördes storleksförhållandena mellan de olika paramet- rarna påverkas av förhållanden i återfyllningen som densitet, par- tikelstorleksfördelning, antalet reaktiva ytplatser (sites) på be-

fintliga mineral, de olika partiklarnas ytladdning, interaktionen mellan olika typer av partiklar i återfyllningen etc.

Den temperaturgradient som kan förekomma i återfyllningen där de ytligaste delarna kan ha mycket låg temperatur (under vissa klimatförhållanden under fryspunkten,) medan återfyllningen närmare bufferten kommer att ha en betydligt högre temperatur på grund av värmeutvecklingen från kapseln påverkar också processen.

Under tider med permafrost kommer vattnet i återfyllningen att frysa långt ned i förvaret, vilket kommer att innebära ett ökat avstånd mellan partiklarna genom bildning av is.

När temperaturen åter stiger kan därigenom helt nya flödesvägar uppstå.

4.4.7 Sammanfattning

KASAM har i flera yttranden över SKB:s Fud-program poängterat att återfyllningen är en mycket kritisk del av hela KBS-3-konceptet. Det gäller att åstadkomma en tät massa som har en förmåga att leda vatten som är jämförbar med omgivande berg. Vatten får alltså inte hitta fria flödesvägar ner till buffert och kapsel. Återfyllningen ska också ha en tillräcklig styvhet för att kunna stå emot den expansion av bentonitbufferten som sker när den vattenmättas. Detta är viktigt för att densiteten (tätheten) i bufferten ska upprätthållas. KASAM har i tidigare yttranden påpekat att denna styvhet bör vara en av de egenskaper som man prioriterar hos återfyllningen.

SKB arbetar för närvarande med en rad olika koncept för återfyllning av deponeringstunnlar och tillfartsvägar i slutförvaret av använt kärnbränsle. De alternativ som är aktuella för analys i SR-Can är antingen en blandning av 30 % bentonit och 70 % bergkross som kompakteras på plats i förvaret eller Friedlandlera som tillförs i form av kompakterade block. KASAM ser fram emot att SKB gör sitt slutliga val av koncept och anger hur man motiverar detta val.

Materialet i återfyllningen kan indelas i ett antal olika kategorier, nämligen hög- och låggradiga natrium- och kalcium-bentonitleror från olika länder, smektitrika blandleror (Friedlandleror; smektit är ett lermineral) av olika ursprung samt blandningar av bentonit och bergkross med olika blandningsförhållanden.

Vilket koncept och vilka materiel som slutligen väljs i återfyllningen påverkar naturligtvis förhållandena i förvaret vid olika tid-

punkter, och man måste därför i detta läge arbeta med flera olika scenarier.

Olika blandningar av bentonit och bergkross liksom ren Friedlandlera kommer att svälla i kontakt med vatten. Om expansionen kan begränsas ökar densiteten och materialet blir tätare. Hur lång tid detta tar är naturligtvis helt beroende på hur mycket vatten som tillförs och vilken typ av material som använts. I avsnittet om återfyllningen ovan har vi gjort ett försök att beskriva olika vattenmättnadsscenarioer ur ett tidsperspektiv.

Att materialet i återfyllningen är finfördelat innebär att det finns risk för att inte önskvärda metalljoner eller andra föroreningar lakas ut från partikelytorna och kommer i kontakt med bentonitbufferten. Konsekvenserna av detta är att svällningsegenskaperna och retentionsförmågan (fördröjande förmågan) för radioaktiva ämnen kan försämrats.

Det finns alltså stor anledning för SKB att kontrollera och sätta gränsvärden för vissa typer av föroreningar i materialet för återfyllningen.

4.4.8 Referenser

Kärnavfall - barriärerna, biosfären och samhället.

KASAM:s yttrande över SKB:s Fud-program 2004;(SOU 2005:47).

Deep repository – engineered barrier systems; Assessment of backfill materials and methods for deposition tunnels (R-06-71).

Water saturation phase of the buffer and backfill in the KBS-3V concept (TR-06-14).

Hydraulic behaviour of bentonite based mixtures in engineered barriers: The Backfill and Plug Test at the Äspö HRL by Mataena Clement, PhD thesis 2003.

5 Naturliga analogier

Sören Mattsson

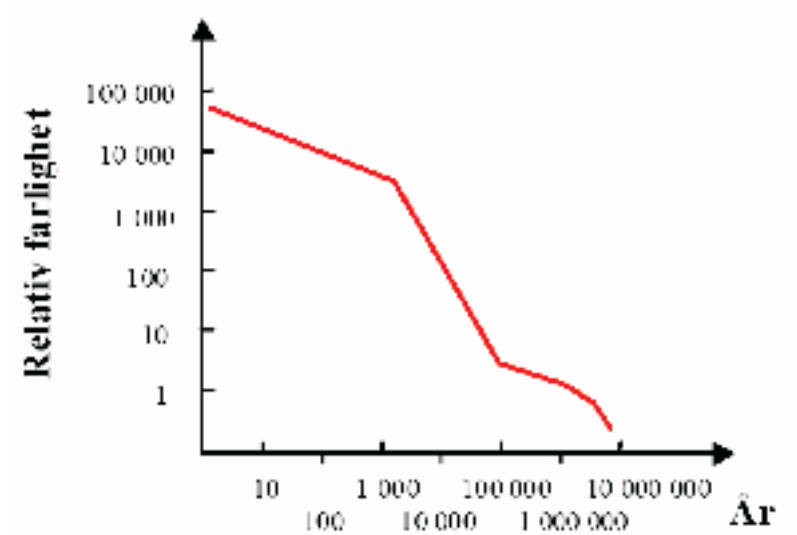
5.1 Inledning, tidsperspektiv

Ett slutförvar för använt kärnbränsle och högaktivt reaktoravfall måste konstrueras så att de långlivade radioaktiva ämnena kvarhålls på ett sådant sätt att de inte kan nå människor eller annat levande. Det är framför allt via läckage till grundvattnet och i någon mån via gasformiga utsläpp som aktivitet skulle kunna transporteras ut från förvaret. Därför är det viktigt att ha bra modeller för dessa transportvägar. Sådana modeller måste täcka långa tider (tusentals till hundratusentals år).

Figur 5.1 ger en grov bild av avfallets farlighet i relation till farligheten hos den uranmalm som använts vid framställningen av kärnbränslet och figur 5.2 redovisar innehållet av ett antal olika radionuklider, allt vid olika tillfällen efter uttaget från reaktorn.

Självfallet finns inga modeller som är testade för dessa tidsperioder. De modeller och data som används i dag är ett resultat av de senaste årtiondens laboratorie- och fältmätningar.

Figur 5.1 Farligheten hos använt kärnbränsle i förhållande till det naturliga uran som kärnbränslet framställs av (uttryckt i år efter uttaget från en reaktor)

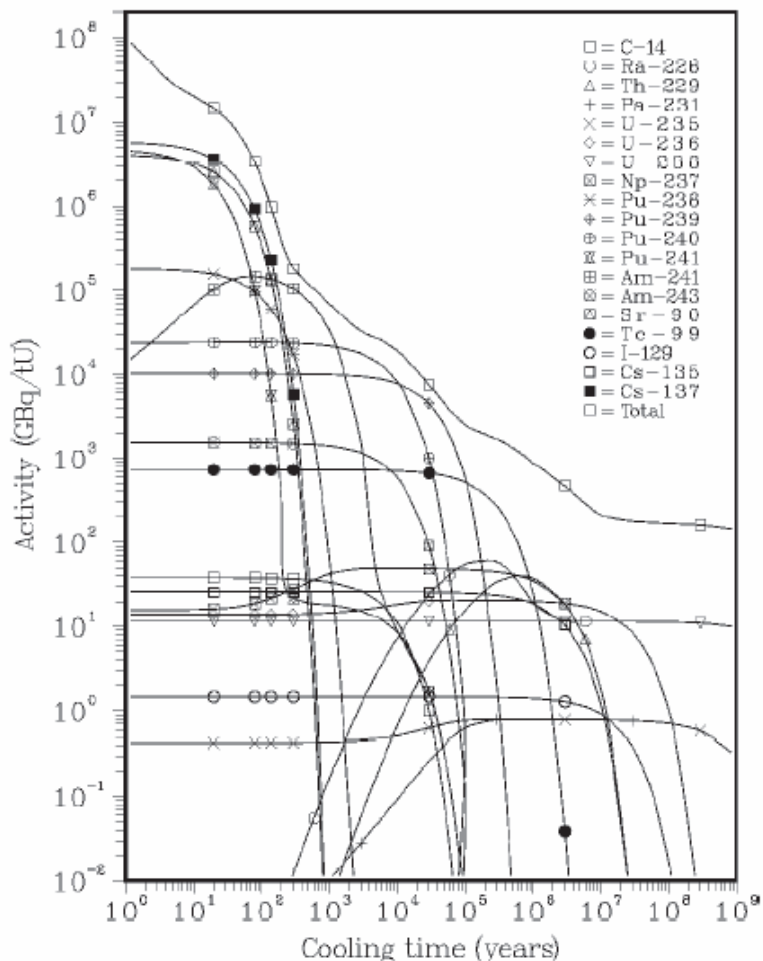


Källa: L. Högberg, S. Norrby och B. Dverstorp, Hur slutförvara kärnavfall i hundratusentals år? SKI synar problematiken kring kärnavfallet. Nucleus 16 (2), 1998, SKI. Stockholm.

Ett sätt att kontrollera de modeller och de ingångsdata som används i säkerhetsanalysen för ett förvar är att studera s.k. naturliga analogier. Med naturliga analogier menas förekomst av material och processer som liknar dem som förväntas i ett förvar. De möjliggör studier av förvarslika system vilka utvecklats under geologisk tid. De kan ses som långtida experiment i naturliga system och med naturliga processer, som liknar de som förekommer i ett avfallsförvar. Sådana studier är mycket värdefulla när det gäller att

1. identifiera och förstå geokemiska processer och mekanismer som liknar de som kan förekomma i eller i närheten av ett förvar – och då sett över realistiskt långa tider samt
2. få fram resultat som kan användas för att förbättra sådana modeller, som bygger på laborierdata och resultat av kortvariga fältförsök. Möjligheten till jämförelser mellan avfallsförvaret och naturliga analogier spelar en viktig roll när det gäller informationen till beslutsfattare och allmänhet.

Figur 5.2 Aktivitetsinnehållet per ton uran vid olika tidpunkter efter uttaget ur reaktorn (Kokarreaktorbränsle, utbränningsgrad 50 MWd/kgU)



Källa: M. Antilla. Radioactiv Characteristics of the Spent Fuel of th Finnish Nuclear Power Plants. Working Report 2005-71, Posiva Oy, FI-27160 Olkiluoto, Finland).

Naturliga analogier kan vara studier av uranmineraliseringar, gruvverksamhet, geologiska "reaktorer", arkeologiska och historiska föremål, gamla byggnader, nedfall från kärnvapenprov och utsläpp av radioaktiva ämnen från den havererade Tjernobyl-

reaktorn. Intresset gäller såväl processer i förvarets närområde, som på längre avstånd.

Som naturliga analogier till förvar för använt kärnbränsle har man använt uranmineraliseringar i t ex Cigar Lake (Canada), Palmottu (Finland), Pena Blanca (Mexico) och Oklo (Gabon) – den senare har även visat sig vara en förhistorisk naturlig kärnreaktor och är därför av speciellt stort intresse.

5.2 Oklo-”reaktorerna” och deras ”avfall”

De s.k. Oklo-”reaktorerna” är förhistoriska naturliga ”kärnreaktorer” som har varit igång vid Oklo i Gabon i Västafrika. Att ”naturliga reaktorer” kunnat uppstå beror på att halten uran av den för kärnklyvningen gynnsammaste isotopen U-235 för 2 miljarder år sedan utgjorde 3,6 % i stället för som nu 0,7 % av uranet. En så hög halt är tillräcklig för en kedjereaktion av kärnklyvningar, om uran och vatten finns i tillräcklig mängd och om starkt neutronabsorberande ämnen saknas. 1972 upptäckte man vid uranbrytning att halten U-235 var lägre (0,7171 %) än den normala (0,7202 %), vilket tolkades så att U-235 förbrukats på något sätt. Man kunde sedermera också påvisa förekomst av långlivade klyvningsprodukter. Allt eftersom brytningen och undersökningarna fortskred upptäckte geologerna ytterligare femton liknande ”reaktorer” i området.

Utöver de 16 naturliga ”reaktorerna” i Oklo finns en ”reaktor” i Okélobondo, som är en förlängning av fyndigheten i Oklo, och en annan 35 kilometer söderut i Bangombé. En typisk reaktorzon är ca 10 m i diameter och ca 50 cm tjock.

Alla ”reaktorerna” har uppstått på platser där ett lager av uranhaltig sandsten mött ett ovanpåliggande skikt av lerskiffer. I gränsområdet koncentrerades uranet i långsam takt genom att syrerikt grundvatten trängde upp genom sandstenen underifrån och förde med sig uran. Till slut blev mängderna av uran så stora att kärnreaktionen blev självunderhållande, precis som i ett kärnkraftverk.

En ”reaktorzon” kan ha varit aktiv i mer än 100 000 år, kanske ända upp till en miljon år. Effekten var låg, ett par hundra kilowatt. De långa tidsperioderna gjorde emellertid att hela sex ton U-235 förbrukades och bildade en ungefär lika stor mängd reaktionsprodukter.

Reaktionsprodukterna är desamma som i använt kärnbränsle. Där finns bl.a. långlivade radioaktiva isotoper av grundämnena plutonium, strontium, cesium och krypton.

Undersökningar i omgivningen visar att plutoniet förflyttat sig mindre än 3 m, genom att det tämligen omgående bundits vid skiffern. Strontiet är något mera rörligt, men har ändå stannat nära reaktorn. Det är troligt att det förekommit vissa utsläpp till omgivningen av de mera lätttrörliga ämnena cesium och krypton. Uranet har praktiskt taget inte rört sig alls.

5.3 Övriga analogier

Det finns som redan nämnts också ett antal andra naturliga analogier som kan ge kunskap om hur uran – som utgör huvuddelen av det högaktiva avfallet – uppför sig i naturliga miljöer.

5.3.1 Sierra Peña Blanca, Mexiko

En plats som undersöks är en uranförekomst, Nopal I, i *Sierra Peña Blanca* nära Chihuahua, Mexiko. Naturlig uraninit som den i Nopal I är till sin sammansättning och struktur väldigt lik använt kärnbränsle. Man kartlägger förekomsten av uraniniten och följer hur den förändras med tiden och utför kontroller av grundvatten och mineralförekomst i detta.

5.3.2 Cigar Lake, Kanada

Samma typ av uraninit-förekomster finns vid *Cigar Lake* i norra delen av provinsen Saskatchewan i Kanada. Dess ålder uppskattas till över 1 000 miljoner år och mineraliseringen tycks vara en av de allra största nu kända. Dess djup (400-500 m) gör att vi får ett grundvattenflöde och en grundvattensammansättning (syrefattigt vatten) samt en omgivning av lera som liknar fyllningen runt avfallskapslarna i det svenska programmet. En viktig iakttagelse är att det inte finns några spår av radioaktiva ämnen vid markytan utöver de som normalt finns där. Fyndigheten hittades i samband med elektromagnetiska mätningar som visade att det fanns grafit i berggrunden. Att geologerna sökte efter grafit beror på att där det finns grafit finns det ofta också uran.

Man uppskattar att uranfyndigheten bildades för 1,3 miljarder år sedan. Den är två kilometer lång och mellan 50 och 100 meter bred. Tjockleken varierar mellan 1 och 20 meter.

Uranhalten i malmen är i medeltal 14 %, men kan på sina ställen nå upp till hela 55 %.

Runt malmkroppen finns ett mellan 1 och 20 meter tjockt lager lera, som på ett effektivt sätt stoppar de radioaktiva ämnena från att sprida sig i omgivningen med grundvattenströmmarna. Malmkroppen ger på ytan inga spår av radioaktivitet som går att skilja från den naturliga bakgrundsstrålningen. Då har ändå leran i Cigar Lake större förmåga att leda vatten än vad bentonitleran i slutförvaret har.

Till skillnad från uranfyndigheten i Oklo har det aldrig skett någon naturlig reaktoraktivitet i Cigar Lake. Där finns för mycket av ämnen som absorberar de fria neutroner som behövs för att driva kärnklyvningsprocessen.

5.3.3 Palmottu, Finland

Även vid uranmineraliseringen i Nummi-Pusula i *Palmottu* i västra Nyland i Finland har man funnit att radioaktiva ämnen rör sig ytterst långsamt inne i berget. Man konstaterar att det för närvarande verkar osannolikt att sådana omständigheter skulle framkomma som skulle innebära att man inte kan förvara använt kärnbränsle i berget på ett säkert sätt.

5.3.4 Coles Hill, USA

Det finns också en mycket stor uranfyndighet i *Coles Hill* i Pittsylvania County i södra Virginia, USA. Någon uranbrytning har aldrig kommit igång, men fyndigheten är noggrant kartlagd med avseende på geologi, struktur och geokemi. Här finns förutsättningar för att ytterligare öka våra kunskaper om hur dagens och morgondagens radioaktiva avfall kan transporteras i berggrunden.

5.4 Kvantitativa data beträffande läckage av radioaktiva ämnen från uranmineraliseringar och historiska "reaktorer"

Som exempel på resultat av studierna kan nämnas Curtis (1996) undersökning av grundämnet teknetium (Tc-99) vid Cigar Lake och Oklo.

Vid Cigar Lake produceras Tc-99 kontinuerligt i mätbara kvantiteter genom spontan fission i de massiva uranklumparna. Utsläppshastigheten för Tc-99 under reducerande grundvatten-förhållanden uppskattades till $1,1 \cdot 10^{-6}$ per år (dvs. 1 miljontedel av innehållet om året). Vid Oklo har man studerat hur mycket Tc-99 som bildades under den tid som "reaktorn" var igång genom att analysera grundämnet rutenium (Ru-99). Man fann då att ca en tredjedel lämnade uranet, medan två tredjedelar fixerades direkt. Man uppskattar utsläppsraten till $1,5 \cdot 10^{-6}$ per år, vilket är mycket likt värdet för Cigar Lake trots i övrigt mycket olikartade förhållanden.

5.5 Slutsatser

Naturliga analogier kan vara av stor hjälp för att vi ska förstå de olika fenomen som kan uppstå i ett slutförvar under de ofantligt långa tidsperioder som det rör sig om. De gör det också möjligt för oss att pröva om de beräkningsmodeller som vi använder när vi gör säkerhetsanalyser för djupförvaret stämmer med verkligheten.

De är därför angeläget att fortsätta och intensifiera studierna av naturliga analogier och till fullo utnyttja såväl de naturliga reaktornas som uranmineraliseringarnas unika karaktär som underlag i arbetet med säkerhetsanalyser.

6 Geologisk utveckling

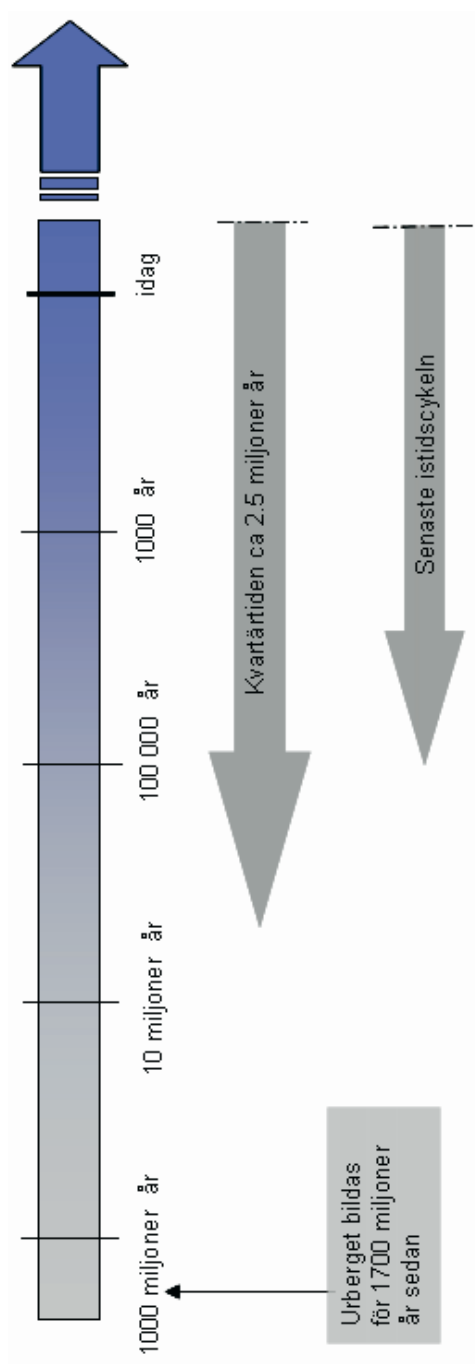
Gert Knutsson och Jimmy Stigh

6.1 Inledning

Den geologiska utvecklingen inrymmer tidsperspektiv av mycket olika dimensioner, alltifrån bildningen av det äldsta urberget i nordligaste Sverige för ofattbara ca 2,3 miljarder år sedan till den yngsta lavabädden från Heklas senaste utbrott år 2000 på Island. Vad gäller jordlager blir tidsspannet inte lika hissnande. Dock avsatte den äldsta landisen i vårt land morän för ca 250 000 år sedan, men Klarälven sitt senaste deltaskikt efter årets vårflod. Grundvattnet ifrån de djupaste sandstenslagren på Kristianstadsslätten bildades under bronsåldern, medan vattnet i en liten moränkälla på sluttningen av Linderödsåsen endast är någon månad gammalt.

De geologiska processerna är sålunda ofta cykliska, men med helt olika tidsmått beroende dels på typen av process, dels på dimensionen. Vissa processer verkar under lång tid och ger mycket beständiga resultat, t.ex. bildningen av urberget. Andra processer är kortvariga och lämnar föga bestående avtryck för framtiden. En del processer kan dock påverkas av människan genom t.ex. försurning av luft, mark och vatten eller utsläpp av växthusgaser med klimatförändringar som följd. För förståelsen av den långsiktiga förvaringen av kärnavfall måste dessa olika processer och tidsperspektiv beaktas. Ett tidsperspektiv på de olika processerna illustreras i figur 6.1.

Figur 6.1 Tidsperspektiv på geologisk utveckling



6.2 Berggrundsgeologiska tidsperspektiv

Ett stort steg i utvecklingen av begreppet geologisk tid kom med den skotske läkaren James Hutton (1726-1797). Hutton utvecklade tanken på att de processer vi observerar i bergmassan idag också var verksamma när bergarterna bildades. Nutiden är nyckeln till det förflutna. Geologer har arbetat med att utveckla sätt att indela och beskriva geologisk tid. Man strävar efter att både beskriva den geologiska historien i relativa åldrar och i absolut ålder (dateringar). Relativa åldrar kan beskrivas med händelser i kronologisk följd. Tanken är att om vi lägger dagstidningar i en bunt, så ligger den äldsta tidningen underst och sedan ligger de i den ordning som de kommit till oss i brevlådan. Vissa dagar kom det ingen tidning, men bunten tidningarna beskriver ändå det relativa förhållandet mellan tidningarna, när de ligger i ordningsföljd. Vi kan läsa rubrikerna och bilda oss en uppfattning om vad som har hänt i stora drag. Vill vi exakt veta tidpunkten måste vi titta på utgivningsår och utgivningsdag. Detta kan jämföras med en absolut datering. Den geologiska dateringsmetodiken har med isotopstudier utvecklats snabbt de senaste tjugofem åren och precisionen på dagens dateringar av olika bergarter är mycket bra.

Att förstå geologisk tid är mycket svårt eftersom vi ständigt relaterar till historisk tid. Låt oss försöka tänka oss tillbaka till romartiden för ca 2 000 år sedan då akvedukterna anlades (se figur 6.2).

Figur 6.2 Akvedukt nära Via Appia Rom



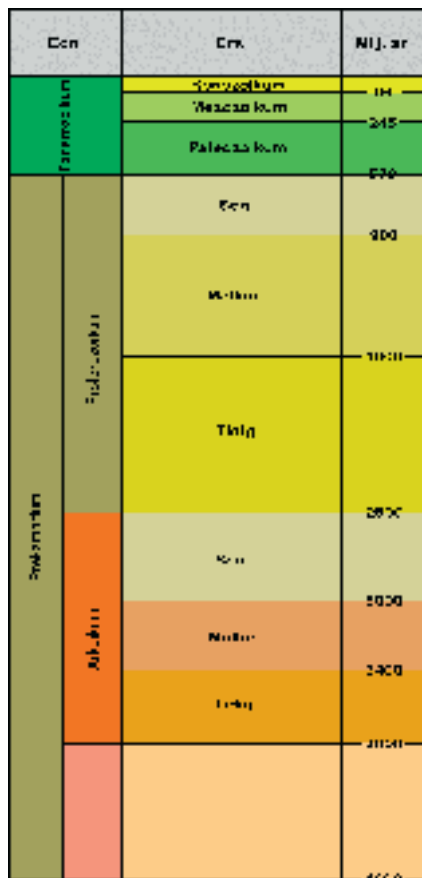
Den ursprungliga vattenledningen, formad som en rektangulär tunnel, har senare byggts på med en öppen vattenränna.

Källa: Källor i Sverige (2006) s. 111.

Om vi stannar upp och försöker förstå alla de händelser som skett sedan romartiden fram till i dag upptäcker vi att den tidsrymd som omfattas beskriver oerhört många och stora händelser. Går vi sedan från romartiden för 2 000 år sedan till tiden för 20 000 år sedan finner vi att vårt land var täckt av en stor inlandsis i stil med Grönlandsisen. Isen smälter bort och växter, djur och även människan vandrar in. Förflyttar vi oss från 20 000 år till 100 000 år kan vi knappast tankemässigt hänga med längre. Men om 100 000 år är det använda kärnbränslet fortfarande farligt och måste förvaras säkert. Från 100 000 år till en miljon år är ett ytterligare stort steg. Geologisk tid anges ofta i miljoner år.

Jordens ålder beräknas vara ca 4 600 miljoner år och indelas i prekambrium med arkeikum (4 600-2 500 miljoner år sedan), proterozoikum (2 500-570 miljoner år sedan) och fanerozoikum (570 miljoner år sedan - nutiden). Se figur 6.3.

Figur 6.3 Jordens åldrar och indelning



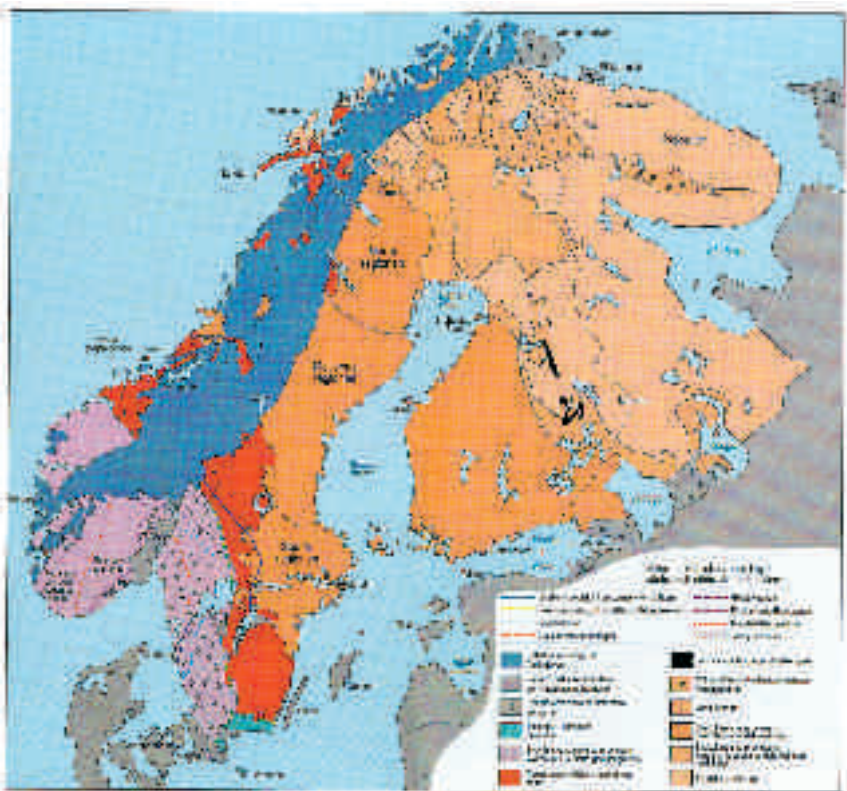
Källa: KASAM:s kunskapslägesrapport 2001 (SOU 2001:35 s. 102).

Övergången mellan tiden före kambrium (pre-kambrium) och kambrium skedde för 570 miljoner år sedan. Denna gräns kan vi idag se i Västgötaberget, där det s.k. urberget överlagras av de kambrika sandstenarna. Urberget här är i sig dock mycket äldre med en ungefärlig ålder på 1 700 miljoner år. Således har yngre delar av urberget här eroderats bort under mer än en miljard år. Gränsytan mellan urberget och den underkambrika sandstenen representerar mer än dryga miljarden år av jordens historia och denna historia kan vi inte läsa här. För att få kunskap om denna tidsperiod måste

vi gå till andra områden. På så sätt kan vi genom att studera berggrunden i hela vårt land och i resten av världen få en bild av jordens geologiska historia. Denna samlade geologiska historia ligger till grund för vår kunskap om jordklotet och dess uppbyggnad.

Vårt land domineras av bergarter som bildats för mer än 1 500 miljoner år sedan (stora delar av prekambrium). Sveriges berggrund med sina olika åldrar är schematiskt redovisade i figur 6.4.

Figur 6.4 Sveriges berggrund och dess åldersförhållanden



Källa: KASAM:s kunskapslägesrapport 2001 (SOU 2001:35 s. 101).

För att få en bild av geologisk tid kan vi tänka oss att jordens ålder (4 600 miljoner år) överförs till klockans urtavla på tolv timmar. Jordklotet bildas och under de två första timmarna får vi jordens atmosfär. Ca kl. 01.30 uppträder de äldsta kända bergarterna och ca kl. 03.00 de äldsta fossilen i form av stromatoliter (encelliga organismer). I Sverige bildas de första kända bergarterna strax efter kl. 06.00 och övriga delar av det svenska urberget fram till ca kl. 09.00. Från ca kl. 06.00 till kl. 10.30 utvecklas också först ozonskiktet och senare den första superkontinenten. Därefter uppträder istider och ett stort massutdöende av biologiska arter sker.

Från kl. 10.30 till kl. 12.00 (nutid) utvecklas arter i snabb takt, men med stora geologiska förändringar, t.ex. bergskedjebildningar, följer också en utslagning av arter. Dessa massutdöenden sker strax före kl. 11.00, men också ca kl. 11.30 då exempelvis dinosaurierna dör ut. Kvarterstiden startar inte förrän en knapp halv minut före kl. 12.00 på vår urtavla. Människans tid på vårt klot kan inte placeras på urtavlan som visar timtid utan vi får gå över på sekundtid. Vi kan säga att människan varit med de sista 15 till 10 sekunderna och att människan började vandra in till Sverige 0,1 sekund före kl. 12.00 (se figur 6.5).

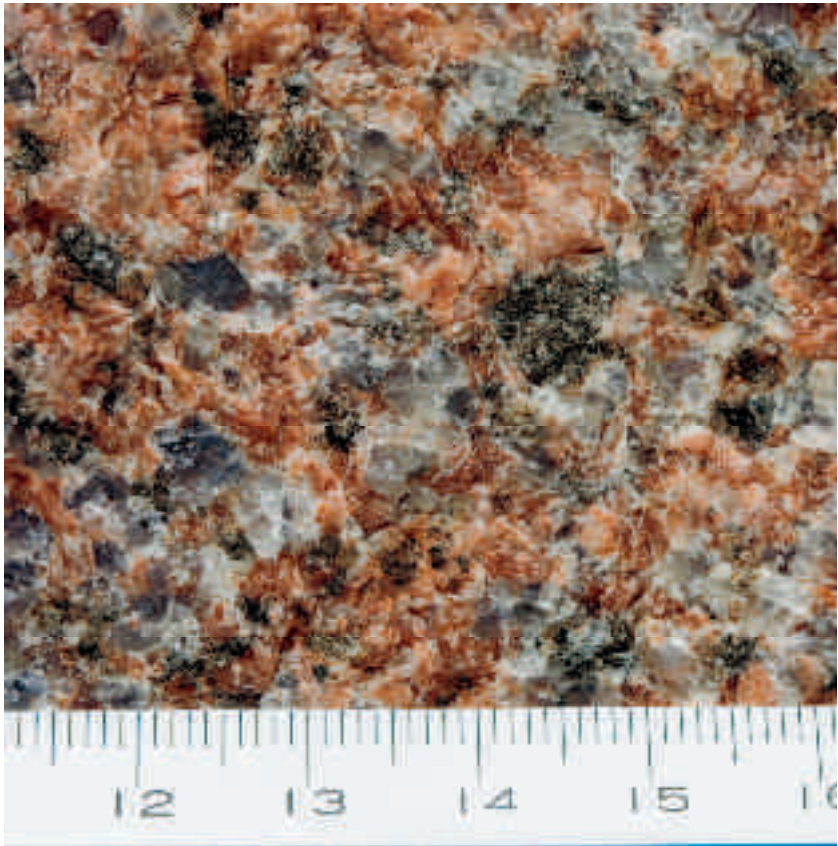
Figur 6.5 Geologisk tid



Källa: Mansfeld 2005, idé Jimmy Stigh, teckning av Anders Damberg 2007.

En svindlande tanke i tid är att titta på t.ex. Smålandsgraniternas kristaller av olika mineral. Dessa kristaller bildades för mer än 1 700 miljoner år sedan och det är samma kristaller som vi efter denna obegripliga tidsrymd fortfarande kan hålla i vår hand (se figur 6.6).

Figur 6.6 **Detaljbild av Smålandsgranit**



Källa: SGU:s arkiv; *Foto:* Anders Damberg, 2007.

Sveriges geologiska historia sett i ett förvarsperspektiv för använt kärnbränsle har mer utförligt beskrivits i KASAM:s kunskapslägesrapport 2001 (SOU 2001:35 s. 95-112).

6.3 Kvartärgeologiska tidsperspektiv

Kvartärtiden är den yngsta av de geologiska tidsperioderna och omfattar som helhet ca 2,5 miljoner år. Det är emellertid endast de senaste 100 000 årens "istidscykel", som är relativt väl känd här i landet vad gäller klimat-, landskaps- och nivåförändringar samt tidsförlopp. Det är därför möjligt att få begrepp om vad som kan komma att hända under en tänkbar "istidscykel" de kommande 100 000 åren, vilka är relevanta för lagring av kärnavfall. I det följande redovisas först mycket kortfattat utvecklingen under hela perioden och orsakerna till denna; därefter något mer ingående vad som hänt under den senaste istiden och tiden därefter.

6.3.1 Kvartärtiden som helhet

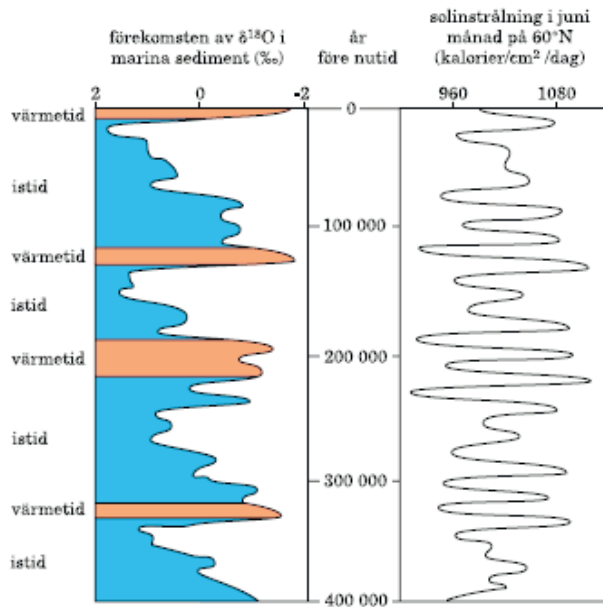
Kvartärtiden anses numera ha inletts för mellan 2 och 3 miljoner år sedan, då medeltemperaturen sjönk kraftigt. De första stora landisarna uppkom i bl.a. norra Europa för ca 2,7 miljoner år sedan, men något senare i andra världsdelar, varför den globala gränsen för kvartärtiden anges till för 2,5 miljoner år sedan. Den kännetecknas som helhet av ett tämligen kallt klimat men med stora, relativt regelbundna växlingar mellan istider (glacialsider) och värmetider (interglacialsider). Under den senare delen av kvartärtiden finns belägg för upp emot 8 istider med en längd om vardera ca 100 000 år och mellanliggande värmetider om vardera 10 000–20 000 år (Nationalencyklopedin 1993). Klimatet under värmetiderna har varit minst lika mildt som nutidens och vegetationen likartad med nutidens. I Skandinavien finns det säkra spår efter tre istider och fyra värmetider, men det har sannolikt funnits betydligt fler. Den näst sista istiden hade störst omfattning och efterföljdes av en kort värmetid på drygt 10 000 år.

Den stora klimatförändringen vid kvartärtidens början berodde sannolikt på geografiska förändringar av stora mått såsom bergskedjehöjningar och andra tektoniska företeelser, vilka påverkade såväl cirkulationen i atmosfären (och initierade nedisningar) som omläggning av havsströmmar t.ex. Golfströmmen, främst i polarhaven. För att en landis skall uppstå och utvecklas krävs en temperatursänkning på ca 5°C och att betydande mängder snö ansamlas från år till år, så att en glaciär bildas i ett höglandsområde. Snö – och ismassor reflekterar mer av det inkommande solljuset än bar-

mark, varigenom klimatet efterhand blir kallare, glaciären växer ut över lägre liggande landområden och övergår i en landis.

Växlingarna mellan istider och värmetider orsakades främst av astronomiska faktorer med olika tidscykler, som styr instrålningen från solen till jorden. De är främst ändringar i jordbanans form från nästan rund till mer avlång (100 000 års cykel), jordaxelns lutning (41 000 års cykel) och jordaxelns vridning, som påverkar solinstrålningens fördelning – i samspel med ändringar i jordbanans form – under olika årstider (23 000–19 000 års cykel) (Nationalencyklopedin 1993). Dessa faktorer påverkar varandra och ger variationer i instrålningen (figur 6.7). Under den senare delen av kvartärtiden har 100 000-årscykeln dominerat. Växlingar i solinstrålningens intensitet är en annan verksam faktor, liksom globala växlingar i atmosfärens sammansättning, som påverkas av bl.a. vulkanutbrott.

Figur 6.7 Växlingen mellan värmetider och istider samt intensitet i solstrålningen



Källa: Nationalencyklopedin, band 10, s. 3 (1993).

Växlingarna mellan istider och värmetider har givetvis också medfört att vattenmängden i havet – och därmed strandnivåerna i kustområdena – förändrats många gånger under kvartärtiden. Det har beräknats att mellan 5 och 6 % av allt vatten på jorden var bundet i landisar under deras maximala utbredning. Tidvis var då stora, grunda havsområden torrlagda. Men på grund av landisarnas enorma tyngd (3 km:s tjocklek) pressades jordskorpan ned, vilket innebar att stora kustområden dränktes vid landisarnas avsmältning för att efterhand åter torrläggas, när jordskorpan sakta återtog sin ursprungliga form, den s.k. landhöjningen.

Klarlägganden av såväl temperaturväxlingarna som vattenmängdsförändringarna har blivit möjliga framför allt genom mätningar av förhållandena mellan de stabila syreisotoperna O-18 och O-16 i skal av mikrofossil (foraminiferer) i djuphavssediment. Relationen mellan O-18 och O-16 ger information dels om havsvattnets temperatur, dels om hur mycket vatten som är bundet i landisar (figur 6.7). Syreisotopmetoden har också använts för undersökningar av djupa borrhärdar på landisarna på Grönland och Antarktis för att få ett direkt mått på temperaturväxlingarna under den senaste delen av kvartärtiden. Undersökningarna visar att dessa växlingar under de senaste 50 000 åren har varit såväl omfattande som snabba, men oväntat nog motsatta i de bägge områdena, den s.k. gungbrädeseffekten (Rundgren och Björk 2007).

6.3.2 Kvartärtidens senaste del – drygt 100 000 år tillbaka i tiden

Den senaste delen av kvartärtiden inleddes för ca 115 000 år sedan med en komplex istid (Weichsel), som avslutades för ca 12 000 år sedan, när den nu pågående värmetiden (Holocen) började.

Åldersbestämningar av den senaste delen av kvartärtiden kan göras med flera, relativt säkra metoder. De är av två typer: relativa och absoluta metoder. Med de relativa metoderna klarläggs de inbördes åldersrelationerna mellan olika lager på en viss fyndplats. Detta kan främst göras med hjälp av fossil, t.ex. pollen, vilka kan jämföras med och kanske överensstämmer med fossiluppgifter från andra fyndplatser. De ”absoluta” metoderna avser att ge en direkt ålder på ett lager eller ett fynd.

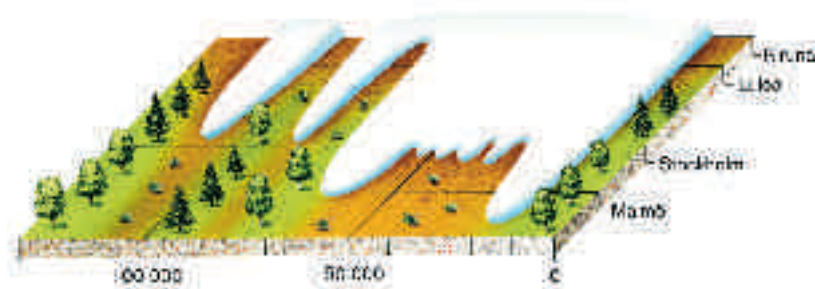
Den äldsta ”absoluta” metoden, *lervarvs-kronologin* utvecklades i Sverige under slutet av 1800-talet av Gerhard De Geer, som 1912

presenterade en tidsskala för den senaste landisens avsmältning från Skåne till Norrland under 12 000 år. Metoden baseras på att det varje år under inlandsisens avsmältning bildades ett lervarv. Uppmätningar av en lerlagerföjd på en viss plats ger ofta ett karakteristiskt diagram på grund av växlingar i lervarvens tjocklek, som speglar förändringar i klimat, vattenföring och sedimenttransport. Detta gör det möjligt att sammankoppla diagrammet från denna plats med en typisk del av ett diagram av lervarven på en annan plats, belägen längre norrut och närmare den då avsmältande landisen.

Metoden har dock en viss osäkerhet och räknas inte längre som en "absolut" metod till skillnad från senare utvecklade radiometriskta dateringsmetoder, främst *kol-14-metoden*. Den bygger på att levande organismer tar upp kol ur luftens koldioxid med en liten del av den radioaktiva isotopen C-14. När organismen dör, upphör upptaget av kol och C-14 börjar sönderfalla med en känd halveringstid. Teoretiskt sett kan man datera organiskt material med en ålder av upp till 60 000–70 000 år. Men då det framkommit att koldioxidhalten i atmosfären varierat och andra felkällor är stora vid mycket låga halter har man ofta begränsat dateringarna till ca 20 000 år. En annan absolut dateringsmetod är att mäta årsringar i ännu levande mycket gamla träd och fossila trädstammar (dendrokronologi) med vilken metod man kommit 12 000 år tillbaka i tiden i Centraleuropa. Härigenom kan årsringsmetoden användas för att kalibrera kol-14-metoden (Lindström m.fl. 2000).

Den senaste istiden hade – som sagt – ett komplext förlopp med växlingar mellan kallare s.k. stadialer, då landisen växte till och varmare s.k. interstadialer, då landisen smälte bort. Minst tre stadialer med landis över delar av eller hela Norden har urskiljts med mellanliggande nästan isfria interstadialer (se figur 6.8).

Figur 6.8 Klimatväxlingarna under den senaste istidscykeln



Källa: Wallroth 1997 (SKB-rapport R-97-11 s. 9).

Dessa stadier kan ha orsakats av de kortare astronomiska cyklerna (se ovan). Det intressanta är också, att landisarna tilltog i omfattning och längd efterhand. Den senaste stadialen hade störst utbredning och längd. Den inleddes för ca 70 000 år sedan, då glacärerna i fjällkedjan växte ut till en landis, som så småningom täckte större delen av Norden. Kustrakterna i västra Norge och Sverige liksom sydligaste delarna av Sverige var dock sannolikt isfria under kortare tider med något mildare klimat. Landisen nådde sin maximala utbredning så sent som för 22 000-18 000 år sedan (Andréasson 2006 s. 431). Den hade då sitt centrum långt öster om fjällkedjan, kanske ut över Bottenhavet och sin sydgräns, ungefär där Berlin nu ligger. Intressant i detta sammanhang är, att det på grund av hög nederbörd och snöackumulation i landisens randområde, i södra Östersjön, kan ha utbildats lokala iscentra, isdamer, varifrån isen rört sig åt olika håll. Detta skulle kunna förklara de komplicerade moränavlagringarna i Skåne (Lagerlund 1987). Den senaste istidens utbredning illustreras i figur 6.9.

Figur 6.9 Landsisens maximala utbredning i Europa under den senaste istiden

Landområden som idag ligger under havsytan är markerade med grönt.

Källa: Heijkenskjöld (1988) s. 53.

Landisens avsmältning inleddes för 18 000 år sedan och betingades av en markant klimatförbättring. Den första delen av Sverige, som smälte fram var nordvästra Skåne för ca 16 000 år sedan. Avsmältningstiden kännetecknades av snabba temperaturväxlingar med tre kallare s.k. Dryasstadialer (benämnda efter fjällsippan *Dryas octopetala*) och två varmare interstadialer. Dryasstadialerna innebar, att isavsmältningen stannade upp och att landisen t.o.m. rörde sig framåt, varvid stora randbildningar av morän och isälvs-material avsattes. Den mest markanta randbildningen, som uppstod under den mycket kalla Yngre Dryasstadialen, kan följas i ett stråk av bildningar från södra Norge över Mellansverige till södra Finland. Därefter kom emellertid en kraftig temperaturhöjning som innebar en mycket snabb avsmältning av landisen. Denna tidpunkt, för ca 12 000 år sedan, definieras därför som slutet på den senaste istiden och början till den nuvarande värmetiden. Landisen beräknas ha varit helt bortsmält för 8 500 år sedan – möjligen kan lokala glaciärer ha funnits kvar i de högsta fjällen (Lindström m.fl. 2000).

6.3.3 Förändringar i landskapet under och efter den senaste istiden

Landisens utbildning och framväxt innebar stora förändringar i berg, jord och vatten, både under och utanför landisen. Den växande landisen var i och för sig plastisk och rörde sig sakta framåt, men var till en början kall i sitt bottenskikt, vilket innebar att grundvattnet frös till is. Detta ledde dels till att sprickor och porer i berget vidgades, dels till att såväl nybildning av grundvatten som grundvattenströmning upphörde. Efter hand som landisen blev allt mäktigare blev det ett så stort tryck på bottenskiktet att detta började smälta. En del smältvatten från ytan sökte sig också ned i isens sprickor. Grundvattenbildningen kom sålunda åter igång och det förekom grundvattenströmning ut mot isranden. Men utanför denna tvingades grundvattenströmningen ned på stort djup. Landskapet utanför landisen präglades nämligen av ständig tjäle (permafrost) och tundra. Permafrosten under nedisningen hade utbildats under lång tid vid olika faser och därigenom till stort djup (flera hundra meter). Detta hade fått som följd att marken kom att innehålla stora volymer fruset och orörligt grundvatten, som fungerade som ett tätt lock, samt att nybildningen av grundvatten reducerades kraftigt eller upphörde helt. Även grundvattnets sammansättning påverkades på grund av att salterna i grundvattnet ”frös ut” och tillfördes det icke frusna grundvattnet. Den ständiga tjälen medförde också att frostsprickor utbildades i ytliga delar samt att bergtrycket ökade, vilket vidgade sprickorna i berget.

Den storskaliga förändringen på berget åstadkom dock landisen genom sin stora tyngd. Följden blev att jordskorpan trycktes ned elastiskt under isen, men också att jordskorpan utanför landisen ”vällde upp”. Störst var nedtryckningen i de centrala delarna vid den s.k. isdelaren. Men landisen och det tidvis höga vattentrycket påverkade även de aktuella bergspänningarna, framför allt ökade den vertikala spänningen. Förändrade spänningsförhållanden gjorde att befintliga bergsprickor reagerade på olika sätt – en del öppnades, en del tillslöts – vilket i sin tur påverkade bergets vattengenomsläpplighet i olika riktningar. Vissa sprickor, som anses ha uppkommit genom s.k. hydraulisk spjälkning, kan nu observeras som sedimentfyllda sprickor i de ytliga delarna av berget, t.ex. i Forsmark (KASAM 2004 s. 177). Det mycket höga vattentrycket vid isranden kan också ha medverkat till nybildning av sprickor.

Landisens rörelse ut från sitt centrum innebar att isen vanligen förde med sig löst jord- och vittringsmaterial från underlaget, slipade av berggrunden på stötsidan och bröt loss block och stenar från läsidan. Med andra ord eroderade landisen markytan och skapade materialet till landisens mest typiska avlagring, moränen. I början av ett landisskede med glaciärtungor var erosionen kraftig i dalgångar i fjällen, varvid s.k. U-dalar bildades, vilka tom. blev överfördjupade, t.ex. i de svenska fjällrandsjöarna (Hornavan 221 m djup, Torneträsk 168 m djup) och i norska fjordar. Erosionen tycks däremot ha varit mycket måttlig eller obefintlig i andra områden, särskilt under vissa kalla faser av den senaste landisfasen. Det finns nämligen kvar såväl vittrat berg som äldre moränformer och moräntäckta lösa avlagringar, framför allt i norra Skåne (vittrat berg), centrala och östra Småland samt i det inre av Norrland (Lokrantz och Sohlenius 2006). En del avlagringar i Norrland härrör från den första landisstadialen och en mörk, lerig morän, som påträffats i skyddade lägen ända ner i Mälardalen, tolkas vara från den andra landisstadialen (Lindström m.fl. 2000). Åtskillig information av detta slag finns troligen dold under senare tids avlagringar.

Landisens avlagringar utgörs i strikt bemärkelse av olika typer av morän, som beräknas täcka ca tre fjärdedelar av Sveriges berggrundsytan och därmed vara den vanligaste jordarten i landet. Morän består av det upptagna berg- och jordmaterialet, som blandats, krossats och malts ner under kortare eller längre transport i landisen. Ju längre det transporterades, desto mer maldes det sönder – hur mycket berodde på bergmaterialets hårdhet. Mjuka bergarter som lerskiffrar och kalkstenar gav upphov till hög lerhalt och leriga moräner som t.ex. moränlera i Skåne och lerig morän i vissa delar av Uppland; hårda bergarter som kvartsit och porfyr däremot till en stenig, grusig morän, som finns i det inre av östra Småland samt i norra Dalarna och Härjedalen. Medan landisen ännu var i rörelse avsattes ett några meter tjockt lager av hårt packad och tät s.k. bottenmorän, som ställvis också utformades i speciella höjdförmer t.ex. avlånga drumlinhöjder. I samband med tillfälliga isframstötter sköt landisen ihop vallar av morän s.k. ändmoräner och vid större framstötter s.k. randmoräner (se nedan). Vid den slutliga, snabba avsmältningen på land avsnördes ofta stora mängder is från den aktiva isen, t.ex. genom ett höjdområde. I denna ”dödis” avsattes det kvarvarande materialet i form av oregelbundna kullar med en löst packad morän, som ofta innehöll linser av vattensorterad sand

från små smältvattenströmmar; sålunda en mer vattengenomsläpplig jordart.

Snabb avsmältning av landisen medförde också en plötslig avlastning av jordskorpan från trycket av landisen, vilket gjorde att frekvensen av jordskalv ökade. Rörelser i jordskorpan i form av förkastningar har också dokumenterats på flera ställen i norra Skandinavien, där avsmältningen var särskilt snabb, och möjligen också längre söderut (KASAM 2004 s. 192).

Stora smältvattenvolymer samlade sig i tunnlar eller kanaler i landisen som isälvar, vilka förde med sig mycket material, som rundades under transporten och sorterades vid avsättningen nära iskanten i form av grusåsar eller strax utanför iskanten som sanddeltan eller sandfält. I dessa mäktiga avlagringar bildas nu de största grundvattenmagasinen, som är av stor betydelse för vattenförsörjningen i vårt land. Utanför landisen avsattes finkornigare avlagringar av finsand, silt och lera, som nu utgör odlingsvärda slättområden eller fyller ut djupa dalar.

De stora smältvattenmassorna innebar emellertid också en omfattande grundvattenbildning i underliggande jordlager och berggrund. Det stora vattentrycket från högt belägna vattensamlingar i den ännu mäktiga landisen gjorde att nybildningen med syresatt vatten trängde ned på djupet i berggrunden. Det finns spår av sådant s.k. meteoritiskt vatten ned till ca 1 000 m i Sverige och till ca 2 000 m eller t.o.m. mer på Kolahalvön (Smellie 2004).

6.3.4 Förändringar i hav och sjöar under och efter den senaste istiden

Nedisningarna effekt på förändringar av vattenmängden i havet och strandnivåerna har tidigare kortfattat berörts. När landisen under den senaste istiden hade sin största utbredning låg havsytan 100-120 m under nutida nivå. Samtidigt var jordskorpan nedpressad minst 800 m under landisens centrala delar, men med avtagande värden såväl mot söder som mot norr. När landisen började smälta för 18 000 år sedan tillfördes omgivande hav betydande volymer smältvatten, varvid havsytan steg, en s.k. eustatisk höjning. Samtidigt minskade landisens tryck på jordskorpan, som sakta började återta sin förutvarande nivå, en s.k. isostatisk höjning eller landhöjning (minst i söder). Det uppkom ett komplicerat växelspel mellan dessa två processer och den mot norr avsmältande landisen

samt omgivande land- och havsområden. På vissa ställen uppkom isdämda issjöar, t.ex. på Sydsvenska Höglandet och i Norrlands inland.

Förloppet i Östersjösänkan blev särskilt komplicerat, då det dessutom blev en växling mellan sött, salt och bräckt vatten. Först utbildades en stor isdämd sjö, Baltiska issjön, med utlopp åt sydväst genom Öresundsområdet. Detta grundades upp genom landhöjningen, varvid utloppet kom att gå över Mellansvenska sänkan. Där kom nivån så småningom – efter vissa omläggningar i samband med landisframstöten under Yngre Dryasstadiet - att ligga i nivå med Västerhavets och ett kort saltvattenstadium, Yoldiahavet, inleddes för ca 11 600 år sedan (Björk 2002). Landhöjningen tog dock snart över och efter ca 1 000 år fick Östersjön sött vatten med benämningen Ancylussjön, som från början hade utlopp åt väster, bl.a. genom Göta älvdalen. Den allt större landhöjningen i norr innebar emellertid att sunden åt väster torrlades och Ancylussjöns vatten började förskjutas åt söder med en strandlinjehöjning som följd och förbindelse med Västerhavet genom Stora Bält. Under ett övergångsskede, 10 000-8 500 år före nutid, var det en svag inströmning av bräckt vatten genom de danska sunden. Vid slutet av detta skede hade större delarna av landisarna smält bort, vilket förorsakade en kraftig havsytestigning, så att salt vatten trängde in genom de danska sunden och Öresund. Ett relativt salt stadium, Littorinahavet, uppstod därigenom i Östersjösänkan för ca 8 500 år sedan. Det innebar en strandlinjestigning i de södra delarna av sänkan samt på Västkusten, där stigningen var större än landhöjningen. Under denna tid var också medeltemperaturen ett par grader högre än nu. Efterhand avtog havsytestigningen och genom den fortgående landhöjningen utbildades den nuvarande Östersjön med bräckt vatten. Det här skildrade förloppet illustreras i figur 6.10. Medeltemperaturen började avta för ca 5 000 år sedan och nådde sina lägsta värden under den s.k. Lilla istiden på 1500–1700-talen, vilket bl.a. möjliggjorde ”Tåget över Bälten” 1658.

Figur 6.10 Huvudstadierna i Östersjöns utveckling under och efter den senaste istiden

Baltiska issjön



Yoldia-havet



Ancylussjön



Littorinahavet

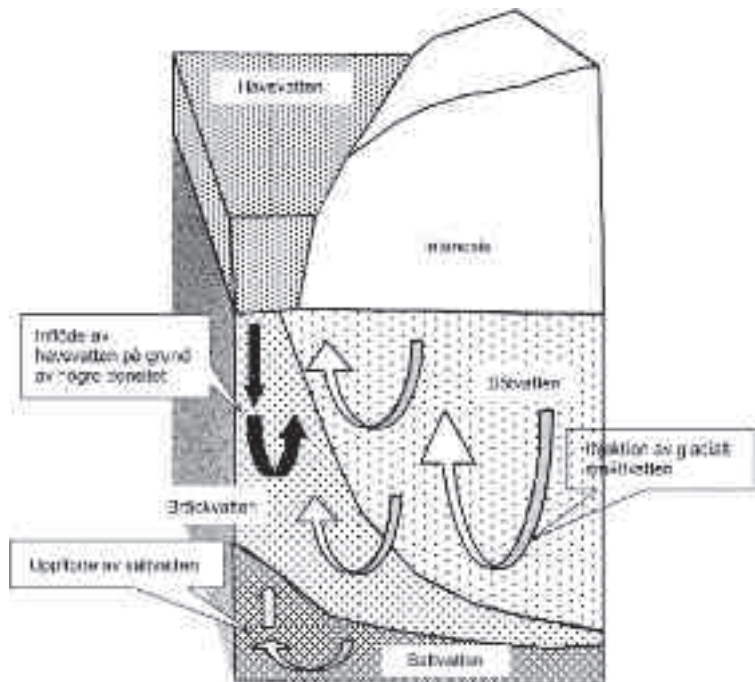


Källa: Berg och jord (s. 138-141, Sverige nationalatlas 1994).

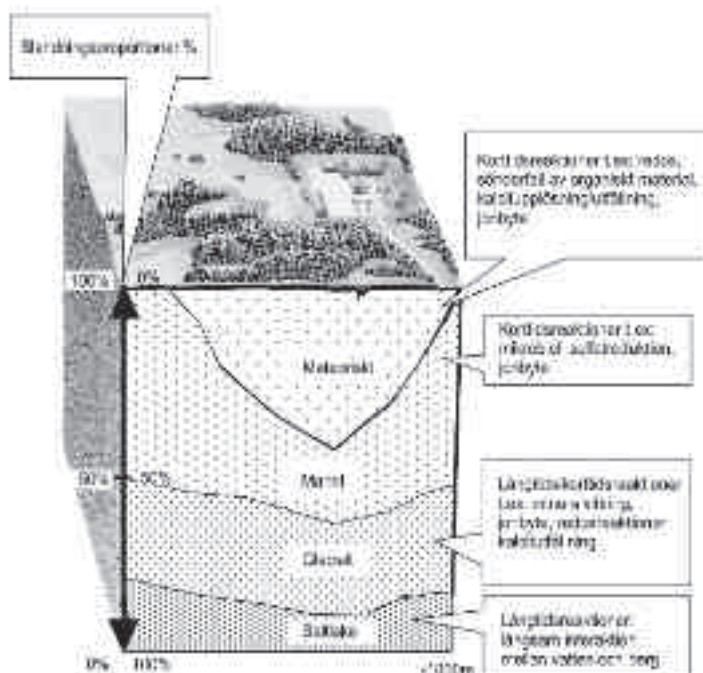
Strandlinjens förskjutning är också resultatet av växelspelet med de ovan nämnda processerna och terrängförhållandena. Den högsta kustlinjen (HK) i södra Östersjöområdet utbildades under Baltiska issjöns tid. Genom den olikstora landhöjningen är siffrorna lägst i söder, där de ligger nära den nuvarande kustlinjen, för att vara ca 100 m.ö.h. i norra delen av Oskarshamns kommun och ca 200 m.ö.h. väster om Gävle. HK-värdena stiger sedan successivt mot norr för att nå det högsta värdet, 285 m.ö.h. i Skuleskogen i Ångermanland, varefter värdena sjunker mot norr till ca 200 m.ö.h. nordväst om Luleå. Lokala avvikelser förekommer dock (KASAM 2004 s. 196-197).

I kusttrakterna från norra Svealand och hela Norrland har sedan dess en strandlinjesänkning varit förhärskande genom den fortgående stora landhöjningen. Det som måste beaktas i området söder därom är, att det där varit strandlinjestigning under vissa senare stadier av Östersjön, varav en del med relativt salt vatten. Detta har påverkat grundvattenkemin i kustområdena, t.ex. i Oskarshamnstrakten, vilket utretts i detalj genom hydrokemisk modellering i kombination med kvartärgeologiska data (figur 6.11).

Figur 6.11a Begreppsmodell över olika händelser i den geologiska utvecklingen sedan istiden, vilka har påverkat grundvattenkemin på Äspö



Figur 6.11b Beräkning av blandningsproportioner mellan olika typer av vatten på Åspö samt dominerande massbalansreaktioner med hjälp av den s.k. M-3-modellen (efter Laaksoharju, 1999 i Knutsson & Morfeldt 2002)



Källa: KASAM:s kunskapslägesrapport 2004 (SOU 2004:67 s. 237-238).

6.3.5 Sammanfattning

Kvartärtiden omfattar ca 2.5 miljoner år och kännetecknas av ett tämligen kallt klimat med stora, relativt regelbundna växlingar mellan istider och värmetider. Dessa växlingar orsakas främst av astronomiska faktorer med olika tidscykler, som styr instrålningen från solen till jorden och som påverkar varandra, vilket ger variationer i instrålningen med typiska tidsintervall. Under den senaste delen av kvartärtiden har 100 000-årscykeln dominerat. Under samma del finns belegg för åtta istider med en längd om vardera ca 100 000 år och mellanliggande värmetider om vardera 10 000–20 000 år; i Skandinavien säkra spår av tre istider och fyra värmetider.

Det är emellertid endast den senaste "istidscykeln", som är relativt väl känd vad gäller klimat-, landskaps- och nivåförändringar. Den inleddes för ca 115 000 år sedan och avslutades för ca 12 000 år sedan, när den nuvarande värmeperioden började. Istidscykeln hade ett komplext förlopp med växlingar mellan kallare s.k. stadialer (minst tre), då landisen växte till och varmare s.k. interstadialer, då landisen smälte av. Den senaste stadialen började för ca 70 000 år sedan och landisen hade störst utbredning för ca 20 000 år sedan, då den omfattade större delen av Norden och med sydgräns ungefär vid nuvarande Berlin. Landisens avsmältning inleddes för 18 000 år sedan på grund av en markant klimatförbättring. Avsmältningstiden kännetecknades av snabba temperaturväxlingar, men efter en mycket kall stadial, då isranden låg över Mellansverige, följde för ca 12 000 år sedan en kraftig temperaturhöjning, som innebar en mycket snabb avsmältning av landisen. Den tidpunkten räknas därför som slutet på den senaste istiden. Landisen beräknas ha varit helt bortsmält för ca 8 500 år sedan.

Förändringarna i landskapet under och efter den senaste istiden var mycket omfattande. Under landisens centrala delar pressades jordskorpan elastiskt ner ca 800 m. Genom isens tyngd och det tidvis höga vattentrycket ökade också bergspänningarna, särskilt den vertikala spänningen, vilket påverkade sprickbildning och vattengenomsläpplighet i berget. Grundvattnet var till en början fruset under den kalla landisen, men när den blev mäktigare och började smälta i bottenskiktet kom grundvattenbildning och strömning i gång ut mot isranden. Där fanns dock stora områden med ständig tjäle till stort djup, som tvingade ned grundvattenströmningen från landisen under den nivå, där det lokala grundvattnet var fruset och grundvattenbildningen mer eller mindre obefintlig. Den ständiga tjälen medförde också att frostsprickor utbildades i ytliga delar samt att bergtrycket ökade, vilket vidgade sprickorna i berget.

Landisens rörelse från isdelaren ut mot isranden innebar att isen tog upp löst jord- och vittringsmaterial från underlaget, slipade av eller bröt loss berget, krossade och blandade de olika materialen till landisens mest typiska avlagring, moränen, som beräknas täcka ca tre fjärdedelar av Sveriges bergyta. Vid landisens avsmältning bildades isälvar, som transporterade, sköljde ur och sorterade material från landisen samt avsatte materialet i form av grusåsar, sandfält och lerslätter. De stora smältvattenmängderna medförde också en omfattande grundvattenbildning i underliggande jord- och berg-

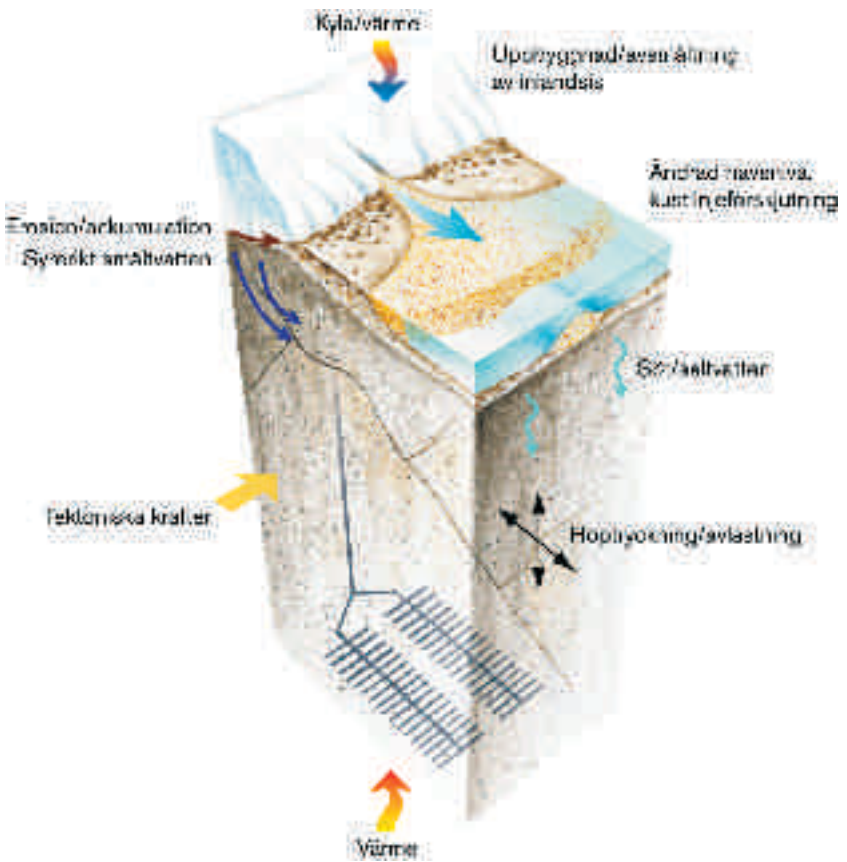
lager. Det stora vattentrycket uppifrån den mäktiga landisen gjorde att nybildningen med syresatt vatten trängde ned på ett par tusen meters djup.

Förändringarna i sjöar och hav var också mycket omfattande. När landisen var som störst och mäktigast – och band stora vattenmassor – låg havsytan 100-120 m under nutida nivå och samtidigt var då jordskorpan nedpressad. När avsmältningen satte igång tillfördes havet åter stora vattenmängder, varvid havsytan steg relativt snabbt. Den plötsliga avlastningen av jordskorpan förorsakade jordskalv och förkastningar, i varje fall i norra Sverige. Men i övrigt återtog jordskorpan sakta sin form, den s.k. landhöjningen. Det uppkom ett komplicerat växelspel mellan denna process och havsytstigningen samt den mot norr avsmältande landisen och omgivande land- och havsområden. Förloppet i Östersjösänkan blev särskilt komplicerat, då det dessutom blev en växling mellan sött, salt och bräckt under fem olika stadier. Strandlinjens förskjutning är också resultatet av nämnda processer och terrängförhållandena. Längst i söder ligger den högsta kustlinjen nära den nuvarande kustlinjen, i norra delen av Oskarshamns kommun ligger den ca 100 m.ö.h., väster om Gävle ca 200 m.ö.h. för att nå sitt högsta värde 285 m.ö.h i Ångermanland, varefter den sjunker norrut till ca 200 m.ö.h. nordväst om Luleå. I södra och mellersta Sverige kom kustområdena och grundvattnet där att påverkas av de växlande nivåerna och salthalterna i Östersjösänkan, varigenom olika typer av "blandvatten" uppkommit.

En nedisning medför sålunda mycket stor påverkan på berg, jord och vatten även på stort djup. Förändringarna pågår under lång tid och upprepas sannolikt i sina huvuddrag även vid en tänkbar ny istid. Det finns därför all anledning att noga analysera händelseförloppet under gångna istider för att kunna bedöma vilka konsekvenser en ny istid kan få för ett kärnavfallsförvar.

Följande principskiss (figur 6.12) sammanfattar på ett åskådligt sätt några väsentliga processer som kan påverka de geologiska och hydrologiska förhållandena omkring ett slutförvar av KBS-3-typ.

Figur 6.12 Tänkbar påverkan i ett 100 000-årsperspektiv på den bergmassa inom vilket ett djupförvar förlagts



Källa: Efter Wallroth 1997 (SKB Rapport R-97-11 s. 5).

6.4 Referenser

- Andréasson, P-G. (red.) 2006: Geobiosfären en introduktion. Studentlitteratur.
 Berglund, B. 2007: Skriftligt meddelande.
 Björk, S. 2002: Baltic sea history, plansch, ej publicerad.
 Heijkensöld, R. 1988: Istiden, i "Jord, berg, luft, vatten". Utbildningsradion/Brevskolan/SNF.

- KASAM 2001: Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2001. SOU 2001:35 s. 95-112.
- KASAM 2004: Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2004. SOU 2004:67 s. 177, 196-197, 237-238.
- Knutsson, G. & Morfeldt, C-O. 2002: Grundvattenteori och tillämpning. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm, s. 46.
- Källakademien 2006: Källor i Sverige. AB Svensk Byggtjänst, Stockholm, s. 111.
- Laaksoharju, M. 1999: Groundwater characterisation and modelling: problems, facts and possibilities, Dissertation, Division of Land and Water Resources. Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Lagerlund, E., 1987: An alternative Weichselian glaciation model, with special reference to the glacial history of Skåne, South Sweden, *Boreas* 16 s. 433-459.
- Lindström, M., Lundqvist, J. Lundqvist, Th., 2000: Sveriges geologi från urtid till nutid. Studentlitteratur, Lund s. 313-322, 424-429.
- Lokrantz, H. & Sohlenius, G., 2006: Ice marginal fluctuations during the Weichselian glaciation in Termoscanda, a literature review. SKB Technical Report TR-06-36, Stockholm, s. 35-40.
- Mansfeld, J. 2005: 4 600 miljoner år på 144 sidor. Geologiskt forums tidsaxel (Geologiskt Forum 2005 nr 45-48). Stockholm.
- Nationalencyclopedin 1993: Band 10 s. 3-4 (istider), band 11 s. 572-576 (kvartärtiden), Bra Böcker, Höganäs.
- Rundgren, M & Björk, S. 2007: Klimatet under kvartärtiden – vinglig resa, många förare (Geologiskt Forum 2007 nr 53 s. 10-15). Stockholm.
- Smellie, J., 2004: Recent geoscientific information relating to deep crustal studies. SKB rapport R-04-09 s. 9.
- Sveriges Nationalatlas 1994: Berg och jord. Band 6. Bra Böcker, Höganäs s. 138-141.
- Wallroth, Th. 1997: Vad betyder en istid för djupförvaret? SKB rapport R-97-11 s. 9, Stockholm.

7 Framtida klimatutveckling

Bert Bolin

7.1 Några inledande kommentarer

Det har varit känt sedan flera decennier att kvartärtiden har karaktäriserats av ganska regelbundna växlingar mellan istider och värmetider (interglacialer), vilka återkommit i intervaller om 100 000 till 130 000 år under ca 2½ miljoner år. Denna kunskap är baserad på observationer av lagerföljden i djuphavssediment och isprover från inlandsisarna på Grönland och i Antarktis och en rad andra observationer av förändringar i naturen. Avsnitt 6.3 innehåller en beskrivning av vad vi idag vet om dessa förändringar i mer detalj och i synnerhet de omfattande förändringar som ägde rum i Norden när den senaste istiden försvann för 10 000 till 15 000 år sedan.

Mer specifika studier för att försöka ge svar på den centrala frågan om och när en ny istid eventuellt skulle kunna förväntas, började för 30–40 år sedan (se t.ex. Kukla och Kukla, 1972). På basis av analyser av de senaste mellanistidernas längd (ca 10 000 år), förfäktade några att en ny istid kanske var ganska nära förestående. Andra hävdade att människans utsläpp av växthusgaser och en gradvis uppvärmning av jorden i stället kanske skulle kunna senarelägga en ny istid, men försök att analysera denna fråga mer i detalj har låtit vänta på sig. Jag vill i det följande belysa dessa centrala frågor och ge svar på basis av teoretiska beräkningar med hjälp av klimatmodeller som utvecklats i första hand för att försöka förstå orsakerna till den pågående klimatförändringen. De har emellertid nu också funnit en vidare användning i studiet av möjliga naturliga framtida klimatförändringar på längre sikt (Berger m.fl. 2003, IPCC 2007, chapters 10.6 och 10.7). Det är emellertid uppenbart att det inte är möjligt att beskriva framtida förändringar med den detalj-

kännedom som vi i dag har om den senaste avsmältningen av den Skandinaviska inlandsisen.

Det är till hjälp att skilja mellan tre skilda tidsskalor i den följande diskussionen:

- 1900- och 2000-talens klimatförändring, som huvudsakligen människan förorsakar, och då framför allt att beakta alternativa scenarier i försöken att hejda den under det närmast halvsekle för att nå en långsiktigt hållbar utveckling på jorden.
- De följande ca 1 000 åren och då i synnerhet konsekvenserna av den kraftiga störning som det globala klimatsystemet nu har utsatts för och kommer att utsättas för under flera århundraden.
- Följande ca 100 000 år, då klimatvariationer så vitt man kan bedöma återigen i första hand kommer att bestämmas av de astronomiskt betingade variationerna av solinstrålningen. Det kan dock inte uteslutas att klimatet i denna tidsskala också till viss del kan vara påverkat av en kvardröjande förstärkt växthuseffekt.

7.2 Alternativa utvecklingsscenarier under de närmaste hundra åren

Den inkommande solstrålningens styrka och dess variationer från årstid till årstid, liksom dess fördelning över jorden, förändras inte nämnvärt under ett århundrade eller två och förutsätts inte spela annat än en marginell roll i de studier som har gjorts av den nu pågående klimatförändringen och dess vidare utveckling under innevarande århundrade. Det finns en rikhaltig litteratur kring den mångfald scenarier som beräknats med hjälp av klimatmodeller och som tjänar som bas för våra nuvarande kunskaper om den pågående klimatförändringens dynamik. Jag inskränker mig till de viktigaste slutsatserna, som nyligen har sammanfattats i IPCC:s fjärde utvärderingsrapport, Assessment Report No.4, AR4 (IPCC, 2007), och som är under publicering, och jag kommer då att fokusera på det som är av intresse i ett längre tidsperspektiv. AR4, som bygger på tre tidigare utvärderingar och nya forskningsresultat under 2000-talets första sex år bekräftar i allt väsentligt tidigare slutsatser, vilket givetvis ökar dess trovärdighet (IPCC, 2001; IPCC, 1996; IPCC, 1990).

Framför allt understryker rapporten att den helt övervägande delen av forskarsamhället nu anser att *det är mycket troligt att den*

uppvärmning som nu observerats under de senaste ca 40 åren huvudsakligen beror på människans utsläpp av växthusgaser. Ännu i en rapport från IPCC år 1996 uttrycktes en betydande osäkerhet i frågan om människans roll, men den nu aktuella rapporten AR4 visar ovedersägligt vad som bara anades för tio år sedan.

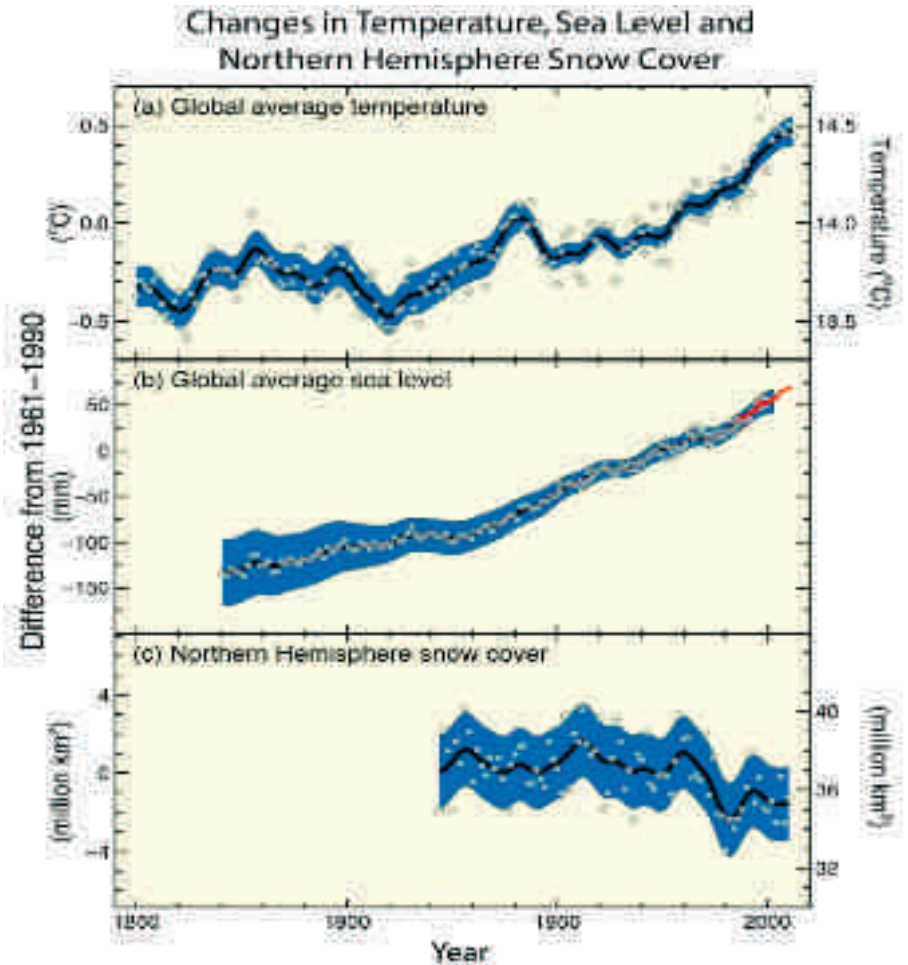
Bilden på nästa sida (figur 7.1) illustrerar förändringar i några viktiga parametrar.

Några centrala slutsatser är vidare:

- Den globala medeltemperaturen har ökat med $0.8 \pm 0.2^\circ\text{C}$ från slutet av 1800-talet fram till 2006 (figur 7.1), i genomsnitt med närmare 1.0°C över land och uppemot ca 0.7°C till havs. Uppvärmningen har varit större över nordpolsområdet och angränsande landområden än över land och på lägre breddgrader. Den har ökat mer på norra halvklotet än det södra.
- Världshavens nivå har stigit med ca 20 cm från 1870 tills i dag och snötäckets utbredning kring de norra polartrakterna i mars-april har minskat med ca 4 miljoner km^2 (ca 10 %) sedan 1920 (jfr figur 7.1).
- Det är framför allt utsläppen av koldioxid (CO_2) som är den viktigaste orsaken till den pågående uppvärmningen, men metan, dikväveoxid och en rad andra växthusgaser bidrar tillsammans med ca $\frac{1}{3}$ av den totala förstärkta växthuseffekten. Denna motverkas däremot av rök och stoft (aerosoler), som människan också släpper ut.
- De totala utsläppen av växthusgaser till atmosfären hittills (2006) har lett till en ökning av koldioxidens koncentration från 280 (för ca 200 år sedan) till ca 380 ppmv^1 , och deras samlade förstärkning av växthuseffekten motsvarar en ökning av koldioxidens koncentration till ca 440 ppmv , dvs. en ökning med ca 55 %.
- Det klimatiska systemet är trögt, framför allt på grund av de stora värmemängder som krävs för att värma upp haven. Det innebär att vi ännu inte kan se mer än kanske $\frac{1}{2}$ till $\frac{2}{3}$ av den uppvärmning som redan utsläppen hittills av växthusgaser och aerosoler så småningom kommer att leda till.

¹ ppmv = parts per million (volume).

Figur 7.1 Observerade förändringar av
 a) den globala medeltemperaturen,
 b) den globala genomsnittliga höjningen av havsytanivån enligt mätningar med vattenståndsmätare (blått) och satellit (rött),
 c) snötäckets utbredning på norra halvklotet i mars/april.
 Alla förändringar är givna i förhållande till jämförbara genomsnitt för perioden 1961-1990



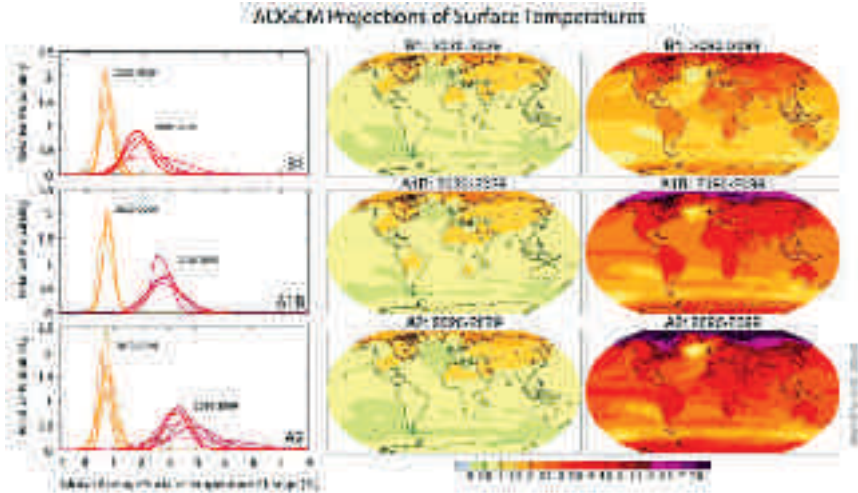
Källa: IPCC (2007).

- Det är också troligt att nederbörden ökar på höga breddgrader, vilket redan har kunnat observeras vara fallet i de nordliga delarna av Skandinavien, medan ökad risk för torka väntas på breddgraderna 30°-50°, exempelvis i Medelhavsområdet. Över huvud taget ökar risken för torka inom torrområden, och risken för häftigare nederbörd ökar där klimatet redan nu är nederbördsrikt.

En förändring av klimatet påverkar givetvis ytavrinningen och bildningen av grundvatten liksom vegetationsförhållandena på jorden. Möjligheterna för nyetablering av lövskog kommer således troligen att öka i södra Skandinavien och trädgränsen flyttas norrut och till högre höjd i bergsområden.

Det är tidskrävande och fortfarande politiskt kontroversiellt att ställa om det globala energisystemet till att använda icke-fossilbränsle baserad primäre energi. En av orsakerna är u-ländernas påtagliga ambitioner att så småningom komma i kapp industriländerna i sin ekonomiska utveckling. Det blir därför svårt att hejda ökningen av den förstärkta växthuseffekten och nå en stabilisering på en lägre nivå än vad som skulle innebära en fördubbling av CO₂ koncentrationen från tidigt 1800-tal, dvs. till ca 560 ppmv . Därtill kommer inflytandet av övriga växthusgaser, vars koncentrationer dock ökar långsamt. Den globala temperaturhöjningen beräknas då bli ca 2½°C fram till nästa sekelskifte, vilket innebär att EU:s ambition från 1998 att den globala temperaturhöjningen sedan 1800-talets slut skulle kunna begränsas till +2°C troligen inte kommer att kunna realiseras. Det är troligt att uppvärmningen också i framtiden kommer att bli större över Norra Ishavet än på lägre breddgrader, vilket kan komma att medföra ett nästan isfritt Arktiskt hav under en kortare tid på sensommaren redan mot slutet av detta århundrade. För en illustration av dessa bedömningar hänvisas till figur 7.2.

Figur 7.2 Projektioner av förändringar av den globala medeltemperaturen tills i början (2020- 2029) och i slutet av 20-hundratalet (2090-2099) jämfört med förhållandena 1980-1999



Bilderna i mitten och till höger visar genomsnittsprjektioner enligt AOGCM (Atmosphere Ocean General Circulation multi-Model) for scenarierna B1 (högst upp), A1B (i mitten) och A2 (längst ner) för åren 2020-2029 och 2090-2099. De tre scenarierna är från det mest gynnsamma av IPCCs scenarier (B1) till ett med fortsatt omfattande användning av fossila bränslen (A2) och speglar alltså framför allt osäkerheten i frågan om framtida utsläpp av växthusgaser.

Källa: IPCC (2007).

Om kraftfulla insatser för att hejda en klimatförändring inte kommer till stånd snabbt eller om klimatsystemets känslighet är större än i allmänhet har antagits vara fallet och om luftföroreningar i form rök och damm reduceras, kan växthusgasernas koncentration öka kraftigt och motsvara 750 ppmv CO₂ eller t.o.m. mer, vilket skulle kunna medföra en global temperaturstegring med upp till kanske 5°C. Osäkerheten i dessa slutsatser framgår av figur 7.2, där de två alternativa utvecklingarna ungefärligen motsvarar scenarierna B1 och A2. Osäkerheten i projektionen av framtida temperaturhöjningar i dessa två fall framgår också av den spridning

av resultaten från den serie beräkningar med olika globala klimatmodeller som också visas i figur 7.2².

IPCC konstaterar vidare att ett varmare klimat kommer att öka takten för den nu pågående avsmältningen av alla bergsglaciärer på jorden. De flesta kommer att ha försvunnit inom några årtionden till ett halvt sekel. Det är däremot fortfarande svårt att avgöra i vilken utsträckning den ökande avsmältningen från Grönlandsisen i dess lägre delar nu och i framtiden kommer att kompenseras av ackumulation av snö in över den grönländska högplatån.

Hansen (2007) varnar dock för både snabbare och större förändringar än vad som IPCC förutser, men osäkerheten är fortfarande stor trots ökade forskningsinsatser. IPCCs slutsatser är utgångspunkten för mina bedömningar i fortsättningen.

- Det är enligt IPCC inte troligt att den Antarktiska inlandsisen kommer att påverkas nämnvärt av den förstärkta växthuseffekten ännu under många århundraden. Det pågår ingen nämnvärd avsmältning in över den landbaserade inlandsisen, utan en ganska nära balans är sedan årtusenden etablerad mellan nederbörd i form av snö in över kontinenten och en långsam rörelse av ismassorna ut mot omgivande hav, där kalvning sker. Systemets tröghet är stor och endast mycket speciella förhållanden kan tänkas ändra detta.

Även i denna fråga hävdar Hansen (2007) att riskerna är betydande för att vattenståndet kan stiga med en meter före nästa sekelskifte och baserar detta på risken att delar av isen i Västantarktis, som till en stor del vilar på havsbotten, skulle kunna glida iväg från den övärld som för närvarande håller den på plats. Dess vatteninnehåll ovanför dagens havsnivå är ungefär av samma storlek som Grönlandsisens.

Det är alltså troligt att luftens halt av koldioxid kommer att åtminstone fördubblas fram till det kommande sekelskiftet. Detta kommer också att ha betydande konsekvenser för de terrestra och marina ekosystemen. Ett varmare klimat ökar de terrestra ekosystemens produktivitet under förutsättning av att tillgången på vatten och näringsämnen är tillräcklig, men bara till en gräns. Ökad torka inom framför allt subtropiska områden är det kanske mest betydande hotet. En mer omfattande anpassning till nya klimatiska

² Det ska påpekas att de siffror som angivits ovan refererar till förändringar sedan 1900-talets början, medan figur 7.1 visar förändringar från IPCC:s referensperiod 1980-1999, då en ökning av den globala medeltemperaturen med 0,4-0,5°C redan hade inträffat.

förhållanden tar också tid. Att förändringar är på gång har kunnat konstateras framför allt i form av höjning av trädgränsen i vissa bergstrakter. På en tidsskala över 50 à 100 år kan emellertid mer destruktiva förändringar bli betydande också med risk för ett återflöde (netto) av koldioxid från de terrestra systemen till atmosfären (Cramer, 2001). Förändringar av klimatzonernas utbredning kan också ske ganska snabbt om mer ihållande torra drabbar områden som i dag är produktiva. Risker finns också att ett varmare klimat ökar takten i nedbrytning av markens organiska innehåll, vilket likaså innebär ett återflöde av koldioxid till atmosfären.

Flödet av koldioxid in i världshaven sänker långsamt havsvattnets pH. Det förindustriella värdet var ca 8,20. Fram tills i dag har detta minskat med ca 0,10 enheter och en fortsatt utveckling som den som skisserats ovan leder troligen till en ytterligare minskning med ca 0,20 enheter. Detta kan få betydande konsekvenser för många marina ekosystem, ett ytterligare hot vid sidan om den utarmning av havens levande resurser som pågår bl. a. på grund av överfiskning. Organismer som bildar kalkskal och korallreven är redan påtagligt påverkade, de senare också på grund av höjningen av temperaturen i kustnära och grunda områden. En minskning av havens produktivitet reducerar också transporten ner till havens djupare delar av den koldioxid som tas upp från luften vid havsytan. En minskande mängd döda plankton singlar ner, vilket i sin tur kan minska havens roll som en sänka för den ökande mängden koldioxid i atmosfären.

7.3 Vad kan hända under årtusendet bortom 2100-talet?

Som redan tidigare påpekats förändras solinstrålningen som når jorden, liksom dess fördelning över jordklotet, endast långsamt och kommer i stort sett att vara oförändrad också under de närmaste tusen åren. Det innebär att den värmetid som nu råder troligen skulle ha fortsatt ännu en tid även om en förstärkt växthuseffekt inte skulle ha kommit in i bilden av framtiden. Men hur länge den kommer att bestå förblir den centrala frågan.

Slutsatsen av diskussionen i föregående avsnitt är emellertid att det finns en betydande risk för att mängden av koldioxid i atmosfären kan komma att öka snarare än att minska även en tid efter det att människans utsläpp till atmosfären har minskat

kraftigt. En stabilisering eller en minskning av växthusgasernas koncentration i atmosfären bortom år 2100 kommer rimligtvis att vara Klimatkonventionens långsiktiga målsättning även om inte formella beslut i detta avseende har träffats. Men den förändring till ett varmare klimat som sker under innevarande århundrade kommer troligen ändå inte att försvinna inom loppet av något århundrade eller två, utan kan möjligen bestå under en betydande del av innevarande millennium, i synnerhet om mängden koldioxid i luften i början av nästa århundrade når upp till 750 ppmv eller mer, men osäkerheten i en sådan bedömning är betydande.

IPCC har analyserat alternativa klimatscenarier bortom år 2100 systematiskt på basis av det ökande antal publicerade studier som nu finns att tillgå. Utgångspunkten bör rimligen vara kolcykelns karaktär under 1800-talet och århundradena dessförinnan³. En naturlig omfördelning mellan atmosfären, de terrestra systemen och haven av de minst ca 1 000 miljarder ton (gigaton, Gt) C (dvs. ca 4 000 Gt CO₂), som troligen kommer att ha tillförts atmosfären fram till år 2100, kommer att gå långsamt, tidskalan är 100–500 år, och det är de förhållandevis stora förråden av kol i de terrestra systemen, framför allt marken, och djuphavet som är slutstationerna för människans utsläpp. Det varmare, och i nederbördsrika områden i genomsnitt fuktigare, klimat som är på väg att etableras under innevarande århundrade kommer därför troligen att bli kvar under senare århundraden. En bättre precisering än så är knappast möjlig för närvarande.

Klimatförändringar under detta millenium kan emellertid vara av avgörande betydelse för frågan om Grönlandsisens vara eller inte vara under de närmaste tusentals åren. En mindre kontrollerad utveckling av klimatet med en global uppvärmning på 3–4°C, eller kanske t.o.m. mera, skulle troligen leda till en betydande avsmältning och så småningom en sänkning av höjden på Grönlandsisens högplata som nu når ca 3 000 m över havsytans nivå. Möjligen

³ Under århundradena före människans massiva användning av fossila bränslen var mängden kol i atmosfären, de terrestra ekosystemen och oceanerna:

Atmosfären, som koldioxid	ca 600 Gt C
Terrestra systemen	
vegetationen	ca 500 Gt C
mark och jord, ner til ½ å 1 m.	ca 2000 Gt C
Haven, som CO ₂ , H ₂ CO ₃ , HCO ₃ ⁻¹ , CO ₃ ⁻²	
ytskikten, 1-100 m	ca 1 000 Gt C
termoklinen, 100 m–1000 m	ca 10 000 Gt C
djuphavet, 1 000 m – botten	ca 28 000 Gt C

skulle också "the point of no return" nås, följt av en snabbare avsmältning före millenniets slut.

Riskerna för en katastrofal kollaps av isen i Väst-antarktis skulle givetvis också öka. Utöver dessa mycket osäkra bedömningar kommer uppvärmningen av haven under alla förhållanden att fortsätta under en stor del av årtusendet med till en början betydande höjning av världshavens vattenstånd, dvs. i ungefär den takt som enligt IPCC kan förväntas under innevarande århundrade, dvs. 20–60 cm. Om, å andra sidan, världssamhället lyckas att stabilisera växthusgasernas ökning till ca 550 ppmv(ekv) skulle dessa förändringar så småningom gå betydligt långsammare.

En sammanfattande *subjektiv* bedömning av denna situation leder till slutsatsen att havsytan kan komma att stiga med 1–2 (5) m under innevarande årtusende, där (5 m) indikerar en snabbare avsmältning av Grönlandsisen och möjligen ökad avsmältning i Väst-Antarktis. Situationen skulle vid millenniets slut i så fall kunna påminna om den som rådde under varmetiden Eem för ca 120 000 år sedan, då vattenståndet troligen var ca 6 m högre än idag. Men denna slutsats är osäker och uppfattas endast som en osäker möjlighet i IPCC:s slutsatser.

7.4 Klimatförändringar under de närmaste ca 100 000 åren

Kommer ett varmare klimat bli bestående tusentals år och en ny istid skjutas på framtiden eller återkommer ett kallare klimat ändå inom en relativt snar framtid? Detta är uppenbarligen den nyckelfråga som måste penetreras vidare.

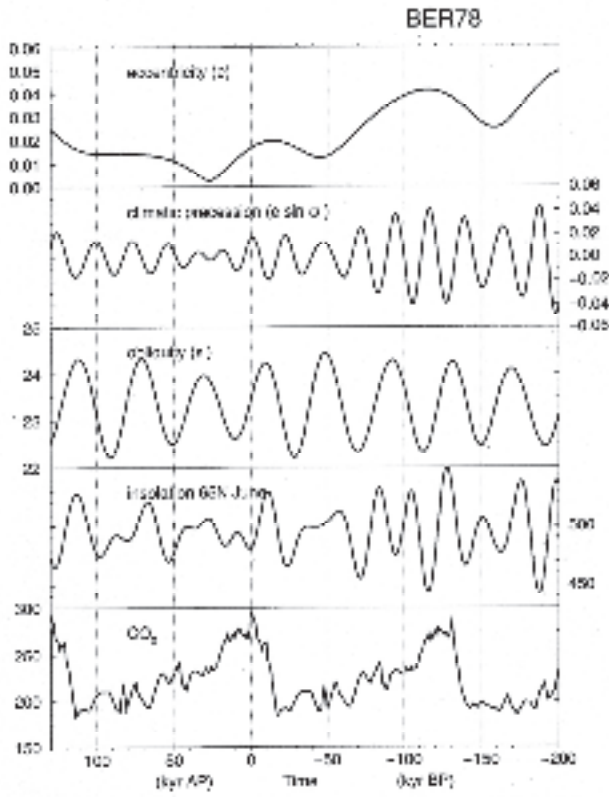
De komplexa klimatmodeller som byggts för att studera klimatvariationer under 1900-hundratalet och några århundraden framåt i tiden är inte tekniskt möjliga att använda för beräkningar av förändringar under kommande hundratals år. I stället har betydligt enklare modeller utvecklats och kalibrerats med hjälp av dels observerade klimatförändringar under det senaste århundradet, dels beräkningar med komplexa klimatmodeller under den tid som den nu pågående klimatförändringen har vuxit fram.

Berger och medarbetare beräknade redan tidigt den inkommande solstrålningens variationer och fördelning över jorden under hela kvartärtiden på grund av astronomiska faktorer och har senare utsträckt dessa beräkningar till att också omfatta hundratals

är in i framtiden. Forskargruppen har sedan utvecklat en förhållandevis ganska enkel klimatmodell och studerat de framtids-scenarier som växer fram under olika antaganden om samspelet mellan de faktorer som i huvudsak bestämmer jordens framtida klimat. Förutom förändringar av astronomiska förhållanden och koldioxidens variationer inrymmer klimatmodellen viktiga processer såsom:

- sambandet mellan luftens halt av vattenånga och temperaturen,
- kopplingen mellan atmosfärens temperatur och jordens albedo, dvs. dess förmåga att reflektera solstrålningen tillbaka ut i rymden,
- samspelet mellan klimat och vegetation, exempelvis förändringar av snötäckt tundra till taiga,
- förändringar av inlandsisarnas mäktighet beroende på ökad nederbörd,
- isostatiska förändringar av landytans topografi beroende på inlandsisarnas mäktighet.

Figur 7.3 Variationer av excentricitet, precision och jordaxelns lutning mot ekliptikan samt solstrålningens styrka vid sommar solståndet på 65°N latitud under tiden 200 000 år före nutid fram till 130 000 år in i framtiden. Vidare visas koldioxidens koncentration under de senaste 200 000 åren och samma variationer anges även fr.o.m. i dag och 130 000 år framåt i tiden (se vidare texten)



Källa: Berger m.fl., 2003.

De tre översta graferna i figur 7.3 visar tidsförändringarna av de tre astronomiska parametrar som bestämmer solstrålningens variationer i tid och rum på jorden (excentricitet, precision och jordaxelns lutning mot ekliptikan). Precisionen bestämmer variationerna av tidpunkt då jorden befinner sig nära eller långt ifrån solen i dess elliptiska bana runt solen, vilket påverkar förutsättningen av inkommande solstrålning som funktion av årstid och latitud. Den

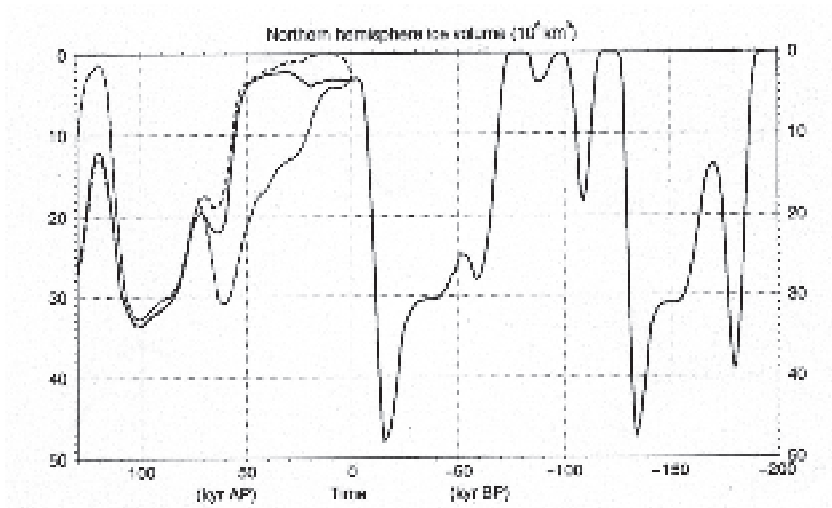
fjärde grafen visar således solinstrålningens variationer (i Wm^{-2}) på $65^{\circ}N$ bredd i juni under de senaste 200 000 åren och även 130 000 år in i framtiden. Dessa variationer är av primärt intresse för att bedöma klimatets förändringar över Nordkalotten i ett längre perspektiv.

Den senaste värmetiden initierades uppenbarligen av kraftigt ökande solinstrålning över nordkalotten för 15 000 till 10 000 år sedan och man kan också se en mycket kraftig ökning av instrålningen också för ca 130 000 år sedan, då värmetiden Eem växte fram. Å andra sidan karaktäriseras de kommande ca 50 000 åren av förhållandevis små variationer av de astronomiska faktorer som bestämmer den inkommande solstrålningen. Redan detta ger en fingervisning om att variationer mellan istider och värmetider kanske skulle kunna bli annorlunda under åtskilliga tiotusentals år framåt i tiden jämfört med förhållandena under tidigare värmetider.

Vi vet att koldioxidens koncentration har varierat markant under den senaste istiden (Petit et al., 1999). Mätningar av dess koncentration i de små luftbubblor, som successivt inneslutits när den Antarktiska inlandsisen bildats, visar på en successivt avtagande koncentration från ca 280 ppmv under Eem-värmetiden till endast ca 210 ppmv fram till för ca 15 000 år sedan (se figur 7.3, den femte grafen). Vi vet att dessa variationer på något sätt är relaterade till den gradvisa avkylningen, men känner inte till de mer precisa orsakerna.

Berger och medarbetare har sökt simulera klimatförändringar under de senaste 200 000 åren med hänsyn tagen till de faktorer som nämnts ovan. För att testa klimatsystemets känslighet har de gjort två olika antagande om variationerna av solinstrålningen och koldioxidens koncentration under denna tid (Berger et al., 1998). Slutsatsen av dessa beräkningar är att även om koldioxidens koncentration antas ha varit konstant, ca 230 ppmv (dvs. den genomsnittliga koncentrationen som rått under denna tid) visar modellen tydliga variationer mellan istider och värmetider. Koldioxidens variationer är otillräckliga för att primärt generera observerade klimatförändringar, men de förstärker de astronomiska drivkrafterna.

Figur 7.4 Mängden is på norra halvklotet beräknad med hjälp av LLN 2-D modellen under inverkan av solstrålningens och koldioxidens variationer från 200 000 år före nutid till 130 000 år efter nutid



Den heldragna kurvan (som visar ca 3 000 km³ under närmast kommande ca 50 000 år) är beräknad under antagande av att mängden koldioxid varierat som i figur 7.1. Den prickade kurvan (som visar ökande mängder is redan inom några få årtusenden) är härledd under antagande om en koldioxidmängd i atmosfären på 210 ppmv, medan den streckade kurvan ger resultaten om mängden koldioxid antas vara ca 750 ppmv. Mängden is ökar nedåt i figuren.

Källa: Berger m.fl. 2003.

I sina senare arbeten har gruppen gjort liknande alternativa experiment för att nå större klarhet om alternativa framtida förändringar (Berger et al., 2003), jfr figur 7.4. Koldioxidens koncentration har under de närmaste 130 000 åren antagits vara 1) konstant 210 ppmv, 2) varierat som under senaste 130 000 åren, och 3) konstant 750 ppmv. I det förstnämnda fallet börjar en återgång till istidsförhållanden inom en ganska nära framtid, i det andra fallet fortsätter nuvarande värmetid under de närmaste ca 50 000 åren. Det sistnämnda antagandet innebär att en kraftigt förstärkt växthuseffekt under något eller några årtusenden skulle leda till Grönlandsisens avsmältning i en relativt nära framtid, men ändå inte hejda en övergång till istidsförhållanden om ca 50 000 år.

7.5 Sammanfattning

Sammanfattningsvis visar dessa beräkningar att en instrålningsnivå på ca 480 Wm^{-2} , och med relativt små variationer, kommer att vara förhärskande över norra Skandinavien under de närmaste ca 50 000 åren. Det klimatiska systemet är under dessa förhållanden relativt känsligt för förändringar av den växthuseffekt som människan redan har förorsakat och kan komma att ytterligare förstärka. Men det är viktigt att också understryka att de astronomiska faktorer som bestämmer klimatets karaktär varierar på tidsskalor från några tiotusentals år till ca 100 000 år (eller mera), medan naturliga förändringar av atmosfärens koldioxidkoncentration (exempelvis anpassningar till människans utsläpp av växthusgaser) sker på tidsskalor från något hundratals till några tusentals år. Våra kunskaper om kolcykelns anpassning till den situation som människan skapat genom sina utsläpp hittills och kan komma att göra under de närmaste århundradena, är otillräckliga för att kunna avgöra om exempelvis Grönlandsisen kommer att försvinna eller ej, eller om den väst-Antarktiska inlandsisen eventuellt kommer att glida till havs. Men det finns en något ökad risk att detta kan hända om koldioxidens koncentration i atmosfären mer än fördubblas under de närmaste hundratals åren och att ökningen varar under kanske tusentals år.

De förändringar som har skisserats ovan kommer att märkas i Skandinavien på olika sätt. Det stigande vattenståndet i havet och en långsamt sjunkande landmassa kring södra Östersjön och kontinentalområdena längre söderut möjliggör ett ökat vattenutbyte mellan Nordsjön och Östersjön och möjligen också ökad salthalt i Östersjön. Det kan också innebära en långsamt stigande vattennivå kring södra Götaland under i varje fall årtusenden. Landhöjningen i Bottenhavet bör dock fortfarande kunna hålla jämna steg med höjningen av vattenståndet i världshaven ännu under årtusenden, i varje fall så länge inte islossning och smältning av isen i Väst-Antarktis och på Grönland blir snabbare.

Ett i förhållande till idag relativt varmt klimat är troligen förenat med ökad nederbörd, kanske framför allt över norra Skandinavien, med åtföljande förändringar av dessa områdens hydrologi och växtlighet. Det är dock näst intill omöjligt att analysera effekten av sådana förändringar i relation till en framtida befolkning i dessa (och även andra närbelägna) områden, då vi knappast kan föreställa

oss hur en framtida samhällsutveckling kan komma att utvecklas under kommande årtusenden.

Vad som kan komma att hända på än längre sikt under en värmetid, som varar i kanske 50 000 år, blir nödvändigtvis mest lösa spekulationer.

7.6 Referenser

- Berger, A., Loutre, M. F. and Gallée, H., 1998. Sensitivity of the LLN Climate Model to the Astronomical and Carbon Dioxide Forcing over the last 200 kyr. *Climate Dynamics*, 14, 615 – 629.
- Berger, A., M. F. Loutre and M. Crucifix, 2003. The Earth's climate in the next hundred thousand years (100 Kyr), *Surveys in Geophysics*.24, 117-138.
- Cramer, W., A. Bondeau, F. I. Woodward, I. C. Prentice, R. A. Betts, V. Brovkin, P. M. Cox, V. Fischer, A. D. Friend, C. Kucharik, M. R. Lomas, N. Ramankutty, S. Wtich, B. Smith, A. Q. White and C. Young-Molling (2001). Global response of terrestrial ecosystem structure and function to carbon dioxide and climate change. *Global Change Biology*, 7, pp. 357-373.
- Hansen, J., 2007. Scientific Reticence and Sea Level Rise. Draft manuscript, 4 March 2007.
- Kukla, G. J. and H. J. Kukla, 1972. Insolation regimes of interglacials. *Quaternary Res.* 2(3), 412 – 424.
- IPCC, 1990. *Climate Change. The IPCC Scientific Assessment.* Cambridge University Press. 365 pp.
- IPCC, 1996. *Climate Change 1995. The Science of Climate Change.* Cambridge University Press. 572 pp.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001. The Scientific Basis.* Cambridge University Press. 881 pp.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report.* 925 pp. Cambridge University Press.

8 Avslutande reflektioner

När vi planerar vår dagliga kalender måste vi veta inte enbart vad vi ska göra utan också var vi ska vara och framför allt när vi ska vara där. Vi har utvecklat verktyg för att mäta tid och en formell skala för att bestämma den. Vi använder en sekund som en basenhet för att mäta tiden. Exakt vad är en sekund? Från år 1900 till 1968 definierade vi en sekund som $1/31\,556\,925\,947$ -del av år 1900. Numera definieras en sekund som ”varaktigheten av $9\,192\,631\,770$ perioder av den strålning som motsvarar övergången mellan de två hyperfinnivåerna i grundtillståndet hos atomen cesium 133”. Denna tidsenhet mäts av ett atomur, den s.k. cesiumklockan¹. Vi summerar sextio sekunder till en minut, sextio minuter till en timma, tjugofyra timmar till ett dygn, vilket är ungefär den tid det tar för jorden att rotera ett varv runt sin axel.

Vi talar om tid i generationer och om vi i genomsnitt betraktar tjugo år som en generation, kan vi säga att den kända historien började för tvåhundra till fyrahundra generationer sedan. Den geologiska tiden började däremot i samband med jordens tillkomst från ca 4 600 miljoner år sedan. Det kan tilläggas att många kulturer betraktar geologisk tid på ungefär samma sätt som historisk tid.

I all diskussion om slutförvaring av kärnavfall spelar tidsdimensionen en stor roll. Radioaktiviteten hos det använda kärnbränslet avtar med tiden, men med mycket olika hastigheter för olika grundämnen och för deras olika isotoper. Målet är ju att – när det gäller omhändertagandet av högaktivt avfall och använt kärnbränsle – åstadkomma en förvaring som fyller högt ställda krav på säkerhet under hundratusentals år framåt i tiden. Först då har radioaktiviteten kommit ner till samma nivå som den omgivande naturen. Detta är ett tidsperspektiv som vi människor har svårt att ta till oss.

Men också det arbete som har lagts ner och kommer att läggas ner på att finna och konkret genomföra någon form av slutför-

¹ Citatet från Nationalencyklopedin (1994) band 13 s. 572.

varing av använt kärnbränsle omfattar en ur mänskligt perspektiv lång tidsperiod, i storleksordningen ett sekel eller mer. För att ge perspektiv på längden av en sådan period kan den jämföras med livslängden på större investeringar i samhällets infrastruktur (vägar, järnvägar, el- och telenät). Också dessa kräver för projektering och byggande ofta tidsrymder som är i samma storleksordning. En viktig skillnad är dock att det är svårt att ange en exakt slutpunkt för arbetet med investeringar, eftersom de oftast blir föremål för fortgående ombyggnads- och förbättringsarbeten. Däremot kan "slutförvaring av använt kärnbränsle" ses som ett industriprojekt med en given slutpunkt. Denna kan anges som den tidpunkt när allt det material som avses bli slutförvarat har förts till ett sådant förvar och detta har förseglats på ett sätt som har planerats i förväg.

Det hundratusenårsperspektiv framåt som nyss antytts för avklingningen av radioaktiviteten hos det använda kärnbränslet måste samtidigt ses mot bakgrund av vad som har skett i naturen under motsvarande tid bakåt. Vi bör då komma ihåg att, som redan nämnts, jordens geologiska historia sträcker sig ca 4 600 miljoner år bakåt i tiden och att den senaste geologiska tidsperioden, kvartär-tiden, anses ha börjat för 2–3 miljoner år sedan.

Vilka processer i naturen har varit styrande fram till våra dagar och vilka skeenden kan vi förutse under framtiden? Kan vi över huvud taget förutse hur ett slutförvar för använt kärnbränsle kommer att utvecklas fram till den tidpunkt när den radioaktiva strålningen avtagit till den naturliga nivån?

Vilka samhällsförändringar har skett under de senaste ca 50 åren, dvs. från den tid när kärnkraften började utvecklas för att utnyttjas för fredliga ändamål? Och hur långt in i framtiden kan vi göra förutsägelser om hur det samhälle kommer att utvecklas som beslutar om och genomför en slutförvaring av använt kärnbränsle?

Statens råd för kärnavfallsfrågor (KASAM) har följande sammansättning:

Kristina Glimelius (ordf.), professor, genetik och växtförädling, SLU
Carl Reinhold Bråkenhielm (vice ordf.), professor, teologi, Uppsala universitet
Lena Andersson-Skog, professor, ekonomisk historia, Umeå universitet
Yvonne Brandberg, professor, beteendevetenskap, Karolinska Institutet
Willis Forsling, professor, kemi, Luleå tekniska universitet
Tuija Hilding-Rydevik, docent, mark o vattenresurser med inriktning på MKB, SLU
Gert Knutsson, professor emeritus, hydrogeologi, KTH
Inga-Britt Lindblad, professor, media och kommunikation, Umeå universitet
Sören Mattsson, professor, radiofysik, Lunds universitet
Jimmy Stigh, professor, geologi, Göteborgs universitet
Clas-Otto Wene, professor emeritus, energisystemteknik, CHT

Sakkunnig: **Hannu Hänninen**, professor, Tekn. högsk. Helsingfors, maskinteknik
Expert: **Torsten Carlsson**, f.d. kommunalråd
Kanslichef: **Björn Hedberg**
Sekreterare: **Eva Simic**
Bitr. sekr.: **Siv Milton**
Konsulter: **Kjell Andersson**, fil. dr. (genomlysningsprojektet)
Sören Norrby, fil. mag.
Olof Söderberg, fil. dr.

Statens råd för kärnavfallsfrågor – KASAM – är en fristående vetenskaplig kommitté inom Miljödepartementet. Uppgiften är att ge regeringen råd i frågor om kärnavfall samt avställning och rivning av kärntekniska anläggningar. Ledamöterna representerar oberoende sakkunskap inom olika områden som har betydelse för slutförvaringen av radioaktivt avfall, inom såväl teknik och naturvetenskap som etik, humaniora och samhällsvetenskap.

I KASAM:s verksamhet ingår att vart tredje år beskriva kunskapsläget inom kärnavfallsområdet i en så kallad kunskapslägesrapport. 2007 års rapport om kunskapsläget på kärnavfallsområdet är den nionde på detta tema. I år består rapporten av dels en huvudrapport med titeln *Kunskapsläget på kärnavfallsområdet 2007 – nu levandes ansvar, framtida generationers frihet* (SOU 2007:38), dels fyra fördjupningsrapporter. Dessa är

- *Slutförvaring av använt kärnbränsle – regelsystem och olika aktörers roller under beslutsprocessen* (KASAM Rapport 2007:1),
- *Säkerhetsanalys av slutförvaring av kärnavfall – roll, utveckling och utmaning* (KASAM Rapport 2007:2),
- *Tid för slutförvaring av kärnavfall – samhälle, teknik och natur* (KASAM Rapport 2007:3) samt
- *Riskperspektiv på slutförvaring av kärnavfall – individ, samhälle och kommunikation* (KASAM Rapport 2007:4).

Denna rapport om tid för slutförvaring av kärnavfall utgör alltså en av fördjupningsrapporterna. Syftet är att ge läsaren en förståelse för de olika tidsperspektiv som är relevanta för ett slutförvar av kärnavfall beroende på om det är samhället, tekniken eller naturen som står i centrum.

Samtliga rapporter finns tillgängliga på www.kasam.org. De kan även beställas hos kasam@environment.ministry.se.

KASAM

STATENS RÅD FÖR
KÄRNAVALLSFRÅGOR
National Council for Nuclear Waste



STATENS OFFENTLIGA
UTREDNINGAR