



SKB rapport

R-97-11

September 1997

Vad betyder en istid för djupförvaret?

En delrapport från projektet
”Beskrivning av risk”

Thomas Wallroth

Bergab

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co

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

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

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

VAD BETYDER EN ISTID FÖR DJUPFÖRVARET?

EN DELRAPPORT FRÅN PROJEKTET ”BESKRIVNING AV RISK”

Thomas Wallroth

Bergab

September 1997

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarens(nas) egna och behöver nödvändigtvis inte sammanfalla med SKB:s.

Förord

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

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

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

Delrapporter – ”Beskrivning av risk”

I projektet ”Beskrivning av risk” ingår följande delrapporter:

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

Innehåll

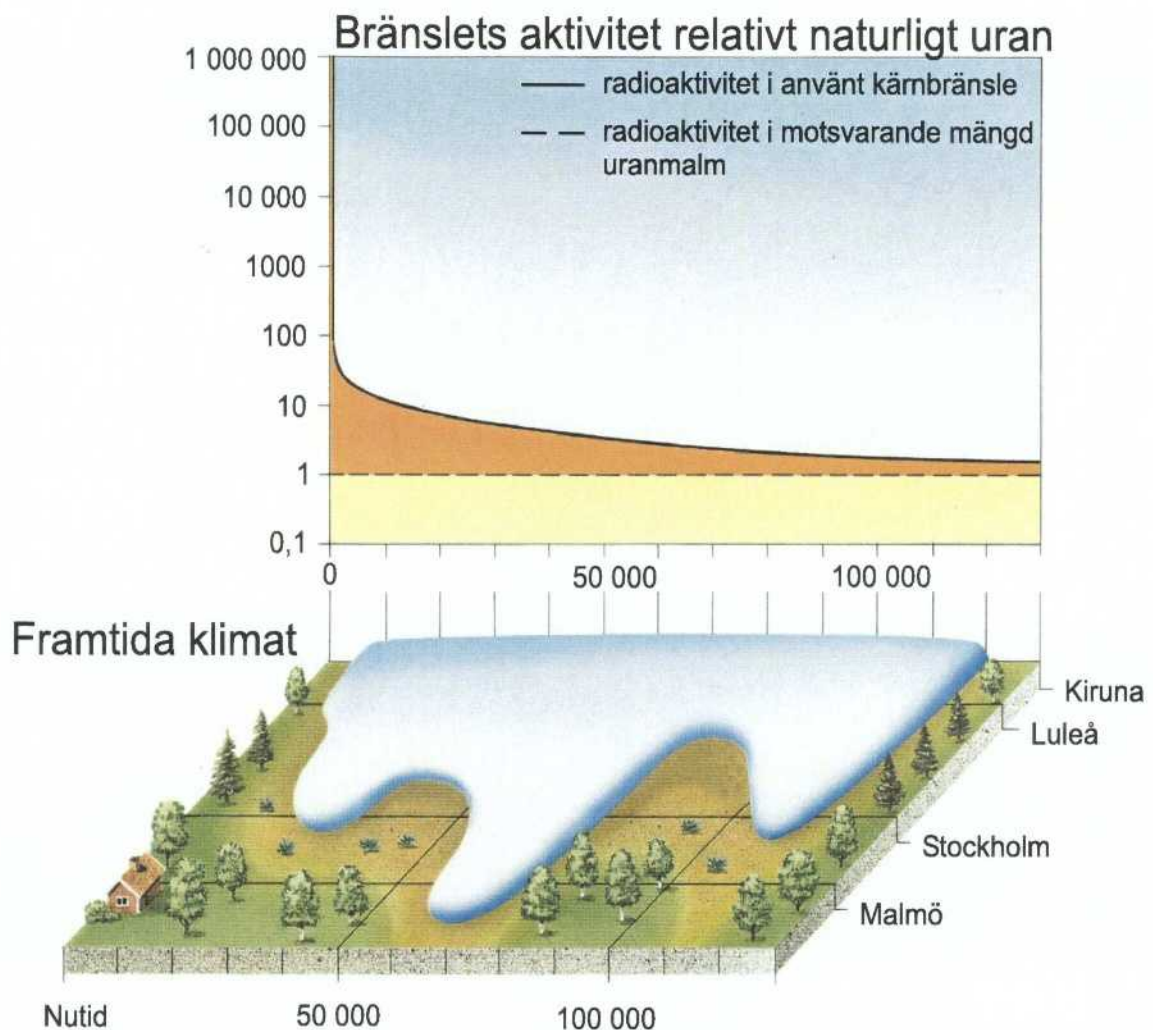
1	Inledning	1
	1.1 Farlighet	1
	1.2 Geologiska tidsperspektiv	2
	1.3 Principen för förvaret	4
2	Klimatvariationer	8
	2.1 Klimatvariationer i förfluten tid	8
	2.2 Klimatvariationer i framtiden	10
3	Effekter vid markytan	12
	3.1 Permafrost	12
	3.2 Glaciärer och inlandsisar	14
	3.3 Havsnivåförändringar och landhöjning	15
	3.4 Växtlighet och djurliv	17
4	Effekter på förvarsdjup	19
	4.1 Permafrosttillstånd	20
	4.2 Glacialt tillstånd	21
	4.3 Marint tillstånd	25
	4.4 Tempererat/borealt tillstånd	25
5	Konsekvenserna av framtida istider	26
	5.1 Säkerhetsanalys	26
	5.2 Forskning om klimat, glaciationer och paleohydrogeologi	27
	Referenser	29

1 Inledning

1.1. Farlighet

Risken med radioaktivt avfall definieras som en produkt av farlighet och möjlig exponering /1-1/. Farligheten beror dels på aktiviteten hos det radioaktiva ämnet, dels på vilken typ av strålning som det radioaktiva avfallet ger upphov till.

Karakteristiskt för radioaktiva ämnen är att farligheten avtar med tiden i takt med att ämnet sönderfaller. Figur 1-1 visar hur radioaktiviteten hos det använda kärnbränslet avklingar med tiden. Efter ca 100 000 år har radioaktiviteten reducerats till nivåer motsvarande den hos det naturliga materialet.



Figur 1-1. Bränslets aktivitet relativt naturligt uran som funktion av tiden. Figuren visar även hur det framtida klimatet i Sverige förväntas variera under motsvarande tidsrymd.

Det radioaktiva avfallets tillgänglighet måste begränsas i proportion till farligheten - detta sker i djupförvaret. Vi måste härvid kunna förstå och bedöma konsekvenserna av förändringar som sker i den miljö som avfallet ska deponeras i under en tidsrymd av ca 100 000 år in i framtiden. Farligheten är dock störst i början. Redan efter mellanlagringstiden (ca 40 år) då avfallet ska förflyttas till djupförvaret, har radioaktiviteten och farligheten reducerats med mer än 90 procent.

I ett mänskligt perspektiv är 100 000 år en oerhört lång tid. Jämfört med jordens ålder och många geologiska processers hastighet är dock denna tidsrymd att betrakta som mycket kort. Vi vet att människoliknande varelser har funnits på jorden i två till tre miljoner år, först i Afrika och betydligt senare i Europa. Det är bara ca 10 000 år sedan de första jägarfolken invandrade till landets sydligaste delar efter inlandsisens bortdragande.

Under de senaste århundradena har vår civilisation utvecklats snabbt, på gott och ont, och olika tekniska framsteg har gjorts som ändrar våra levnadsförhållanden. Det är i princip omöjligt att sia om den framtida utvecklingen av vårt samhälle under tidsrymder av 1 000 - 100 000 år. Sådana bedömningar ligger helt utanför ramen av denna rapport. I det följande avsnittet redovisas däremot mycket översiktligt vad tidsrymden 100 000 år representerar i ett geologiskt tidsperspektiv.

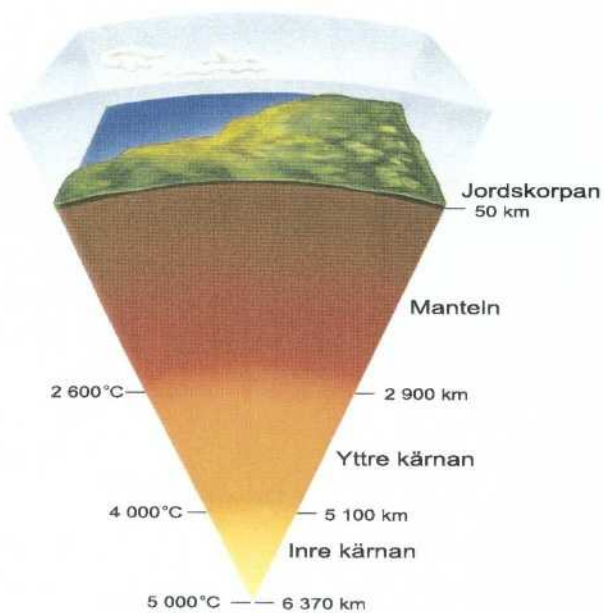
1.2 Geologiska tidsperspektiv

Figur 1-2 visar förenklat jordklotets uppbyggnad. Litosfären, vilken utgörs av jordskorpan och de övre delarna av manteln, delas in i ett antal så kallade kontinentalplattor (se figur 1-3). Nästan all geologisk aktivitet i form av aktiv vulkanism och jordskalv förekommer i anslutning till plattgränserna. Dessa gränser mellan plattorna är av tre olika slag; spridningszoner där plattorna nybildas, kollisionzoner där plattorna kolliderar och bryts ned samt förkastningszoner utefter vilka plattorna glider i förhållande till varandra. Kontinenternas rörelser orsakas av värmen i jordens inre vilken ger upphov till konvektionsströmmar. Hastigheten hos plattornas relativa rörelser uppgår till några centimeter per år.

Det svenska urberget, vilket tillhör den baltiska urbergsskölden, bildades för mellan 3 000 och 900 miljoner år sedan. Berggrunden har uppkommit genom så kallade orogener, då sedimentära och vulkaniska bergarter veckats och omvandlas på olika djup i jordskorpan. I samband med dessa orogener har stora mängder magma trängt upp. Den berggrund vi kan se idag har därefter under årmiljoners lopp blottlagts genom erosion.

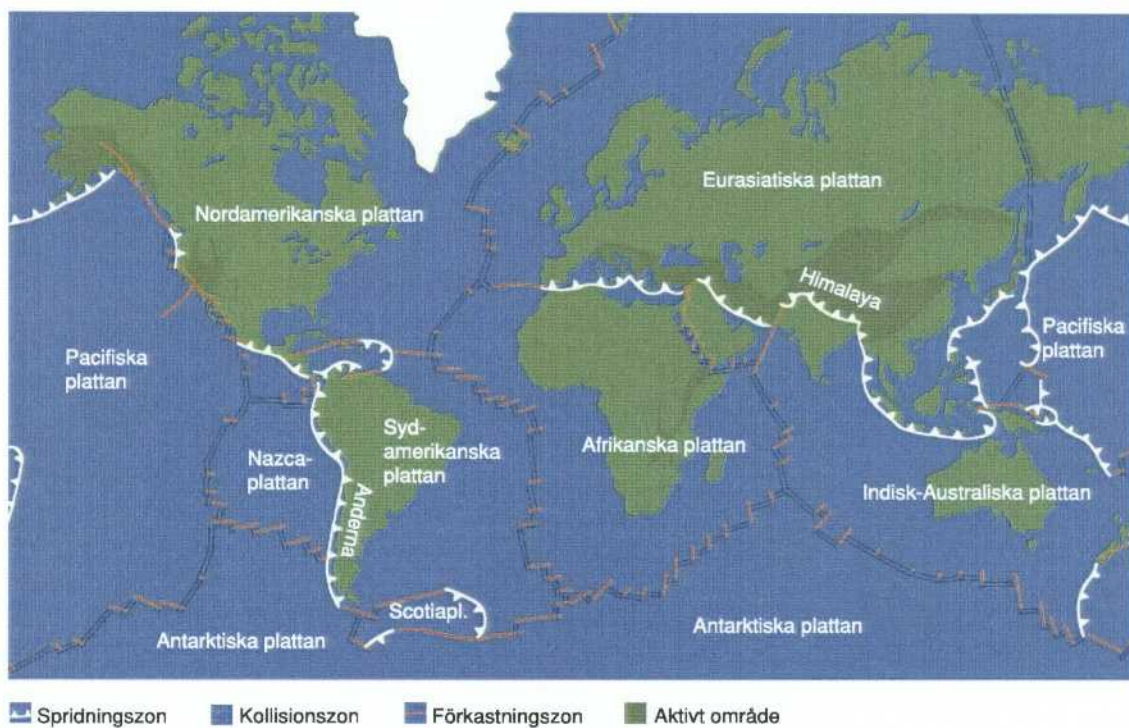
Genom studier av paleomagnetism, dvs mätningar i bergartsprover av de magnetiska polernas lägen vid olika tidpunkter kan man avläsa hur den baltiska sköldens läge på jordklotet har ändrats i geologisk tid. Latituden har under 2,7 miljarder år förändrats från mer än 60°N till 60°S och tillbaka igen.

Jordklotets uppbyggnad



Figur 1-2. Jordskorpan och de övre delarna av manteln bildar litosfären. Därunder finns astenosfären.

Tektoniska plattor



Figur 1-3. Litosfären delas in i ett antal plattor som skiljs åt av olika typer av plattgränser

Under de senaste 100 000 åren har inga plattetektoniskt orsakade förändringar skett inom vår berggrund. Under de kommande 100 000 åren kommer inte heller de plattetektoniska förhållandena att ändras nämnvärt i förhållande till dagens situation. De största förändringarna av förhållandena i Sverige under en sådan tidsrymd, vilket alltså motsvarar avfallets farlighet enligt ovan, kommer att vara associerade till uppkomsten av inlandsisar. Som diskuteras mer utförligt i kapitel 2 kan vi förvänta oss långa kallperioder med permafrost och inlandsis över Sverige. På vetenskapliga grunder kan man visa att landet under ca 85 procent av de senaste 700 000 åren varit utsatt för ett flertal omfattande glaciationer.

Figur 1-4 visar schematiskt den påverkan som bergmassan inom en vilken ett djupförvar planeras att förläggas utsätts för under en glaciation. De processer som bedöms påverka förvaret väsentligt under ett 100 000 års perspektiv behandlas utförligt i kapitel 4.

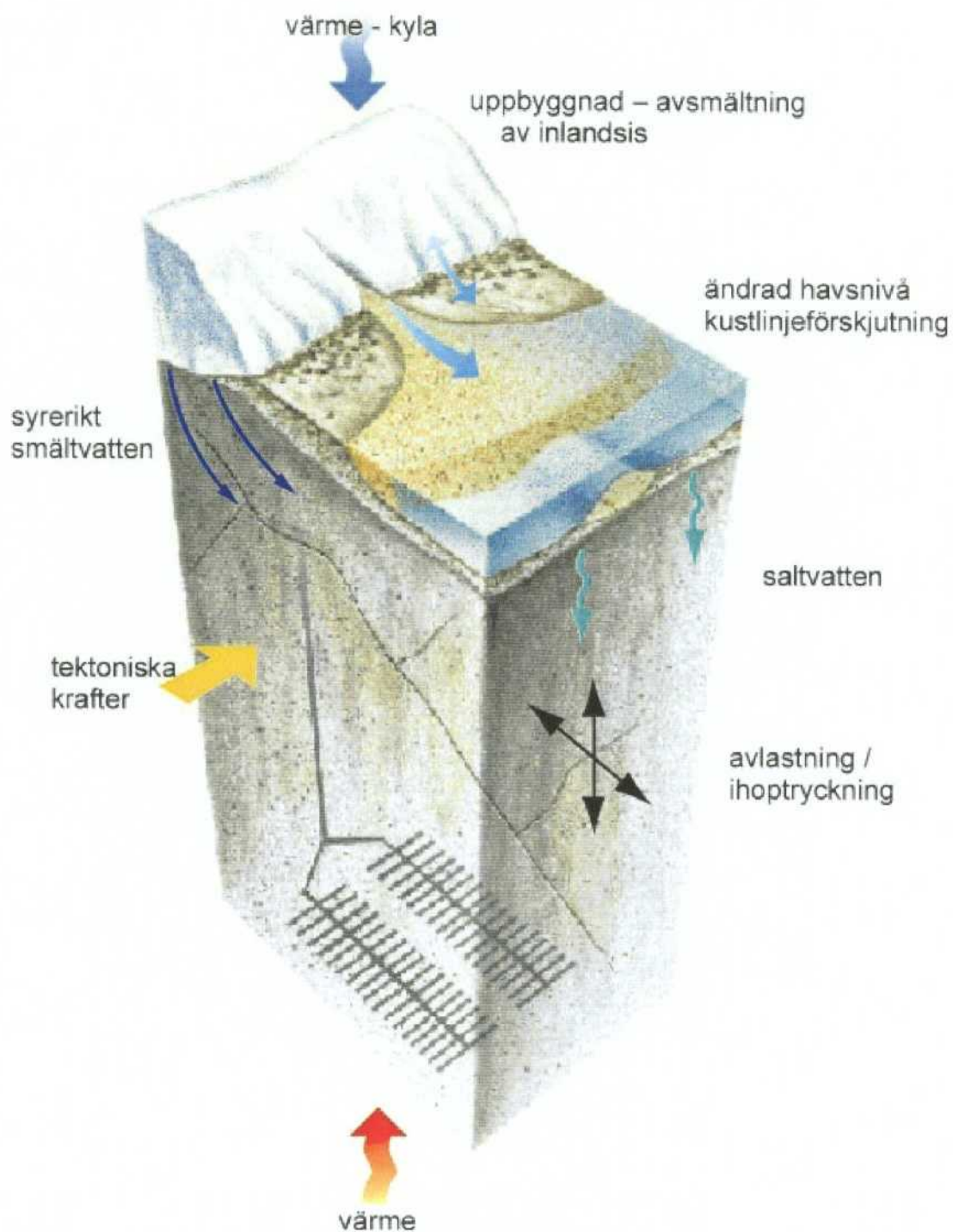
1.3 Principen för förvaret

För att förvaret ska vara säkert under lång tid krävs att den sammantagna funktionen av förvarets komponenter ger tillfredsställande verkan. Djupförvarssystemets delar och dess viktigaste säkerhetsfunktioner visas i figur 1-5. Säkerhetstänkandet för djupförvaret bygger på en flerbarriärprincip, vilken innebär att säkerheten inte enbart får vara avhängig av att en ensam barriär fungerar tillfredsställande.

Förvarssystemet utformas för att isolera det använda kärnbränslet från biosfären genom att bränslet inneslutas i täta kapslar deponeras djupt ner i den kristallina berggrunden på en noga utvald plats och omges av ett plastiskt lermaterial med låg genomsläpplighet för grundvatten. Förvarssystemet utformas för att isolera det använda kärnbränslet från biosfären genom att bränslet inneslutas i täta kapslar och deponeras djupt ner i den kristallina berggrunden på en noga utvald plats. Runt kapseln finns ett lermaterial med låg genomsläpplighet för grundvatten.

Berggrundens viktigaste funktion i förvarssystemet är att den ska kunna erbjuda en mekaniskt och kemiskt stabil miljö under lång tid. Om isoleringen skulle brytas genom att någon kapsel skadas, ska förvaret kunna hålla kvar radionukliderna och *fördröja* deras transport. Via platsvalet och en lämplig anpassning av förvaret till lokala förhållanden kan spridningsvägarna längs vilka eventuella frigjorda radionuklider når människan påverkas genom bl a *utspädning*.

Som ett resultat av de globala klimatförändringar som leder till en istid kommer berggrunden att påverkas på olika sätt. De mekaniska, kemiska och hydrologiska egenskaper hos berget som den erforderliga stabila miljön bygger på, är i hög grad kopplade till varandra. Den kemiska sammansättningen hos grundvattnet kan komma att förändras under loppet av en glaciationscykel, genom att flödes hastighet och flödesvägar förändras. Smältvatten från en glaciär har en avvikande vattenkemi från det grundvatten som finns i berggrunden idag. Vidare kan förändringar i bergmassans hydrauliska genomsläpplighet exempelvis ske på grund av förändringar i bergspänningar orsakade av en överlagrande inlandsis.



Figur 1-4. Påverkan i ett 100 000-årsperspektiv på den bergmassa inom vilken ett djupförvar förlagts.

FÖRVARSSYSTEMET

A. BIOSFÄREN

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

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

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

B. BERGET

Isolering;

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

Hålla kvar och fördröja;

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

C. BUFFERTEN AV BENTONITLERA

Isolering;

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

Hålla kvar och fördröja;

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

D. KAPSELN AV KOPPAR OCH STÅL

Isolera;

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

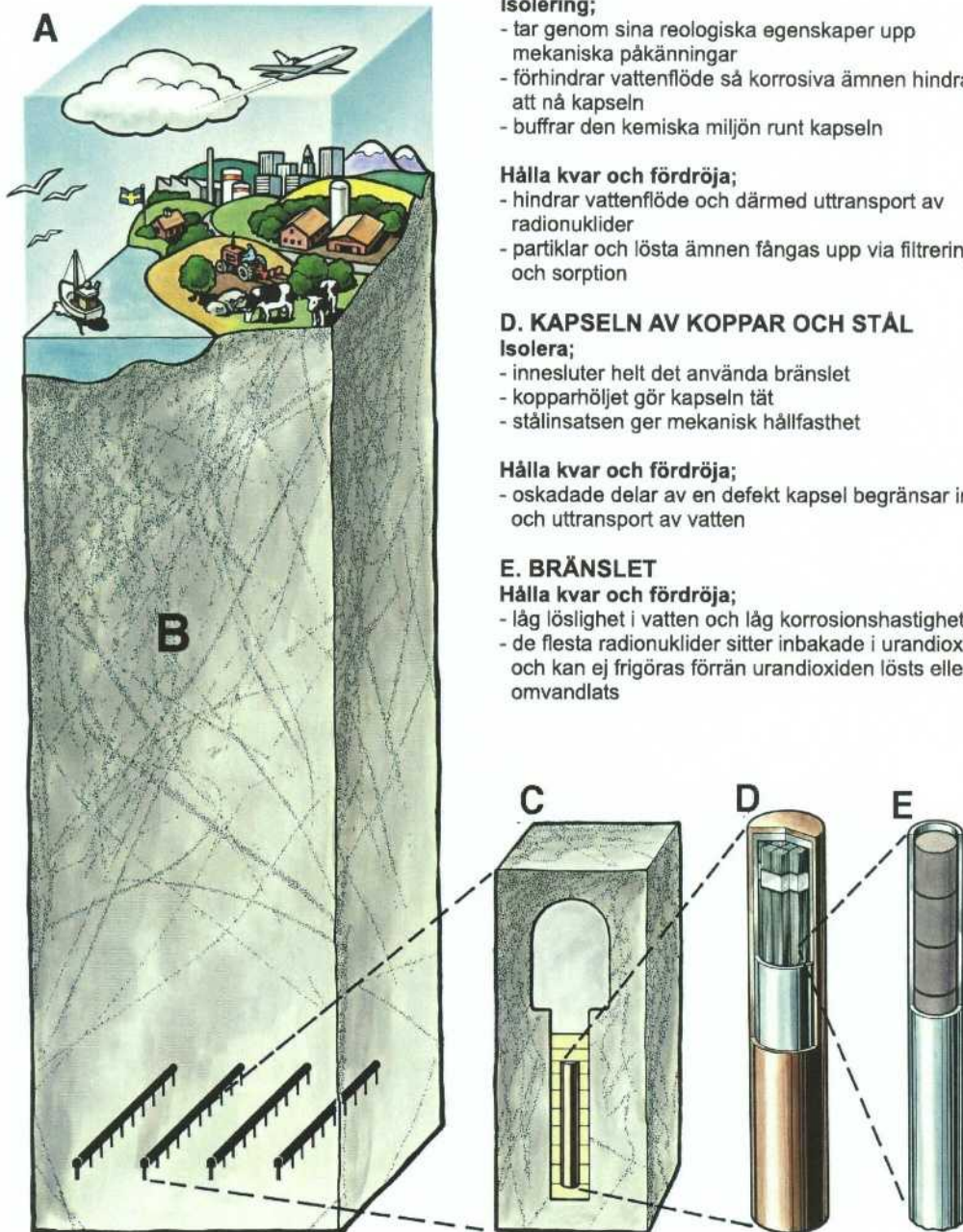
Hålla kvar och fördröja;

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

E. BRÄNSLET

Hålla kvar och fördröja;

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



Figur 1-5. Djupförvarets delar och deras säkerhetsfunktioner

De spänningsförändringar som successivt sker under det att inlandsisens front passerar fram och tillbaka över Sveriges berggrund kan resultera i att tidigare mekaniskt stabila förhållanden blir instabila och att rörelser sker utefter existerande förkastningar. Då inlandsisen dragit sig tillbaka kan man härigenom förvänta sig en förhöjd jordskalvsaktivitet.

Temperaturförändringarna i luften leder till att även bergets temperatur ändras. Om marken fryser bildas ett i princip ogenomsläppligt täcke som kommer att tvinga ytligt grundvatten att söka sig nya flödesvägar.

2 Klimatvariationer

2.1 Klimatvariationer i förfluten tid

Det klimat vi har på jorden idag är ett resultat av ett komplext samspel mellan fysikaliska, kemiska och biologiska processer, vilka hålls igång av den energi som i form av solstrålning kommer till jorden

Genom naturen själv kan vi få mycket information om klimatets växlingar långt tillbaka i tiden. Små pollenkorn som man hittar i jorden berättar vilka växter som funnits under olika tider. Med kännedom om under vilka klimatbetingelser olika växter trivs kan vi rekonstruera vilket klimat som rått på olika platser vid olika tidpunkter i det förflutna. För stora delar av Europa och Nordamerika har man kartlagt vegetationens vandring mot norr efter den senaste istiden, vilket motsvarar en period av ungefär 10 000 år.

För att kunna beskriva temperaturvariationer under 100 000-tals år kan vi studera resterna av kiselalger och kalkskaliga djur (foraminiferer) i bottensediment på havsbotten. Förekomsten av dessa beror på vattentemperaturen som i sin tur står i relation till lufttemperaturen. Av speciellt intresse är att studera innehållet av syreisotoper i foraminiferernas skal. Ju kallare vattnet har varit, desto mer tungt syre (^{18}O) finns i skalet. Genom att mäta förhållandet mellan ^{18}O och ^{16}O på olika djup av en sedimentpropp från oceanbotten, kan man vanligen upprätta en kurva över hur klimatet varierat i det förflutna.

Ett annat sätt att utnyttja syreisotopsanalys är att använda sig av isprover från stora djup i Grönlands och Antarktis istäcken. Ju kallare klimatet var när isen bildades, desto lägre halt av den tyngre syreisotopen kan förväntas i isen. På detta sätt har klimatforskarna rekonstruerat temperaturen mer än 100 000 år tillbaka i tiden.

Man vet att det globala klimatet på jorden har varierat så att en rad istider har inträffat, den första av dessa sannolikt redan för ungefär 2 300 miljoner år sedan /2-1/. Orsakerna till det starkt varierande klimatet i jordens förflutna står bl a att finna i kontinenternas lägen relativt polerna, kontinenternas rörelser vilka har påverkat de värmetransporterande havsströmmarna samt naturlig växthuseffekt orsakad av högt koldioxidinnehåll i atmosfären. Periodvisa ökningar i koncentrationen av koldioxid kan härröra från omfattande vulkanisk aktivitet kopplad till kontinenternas rörelser.

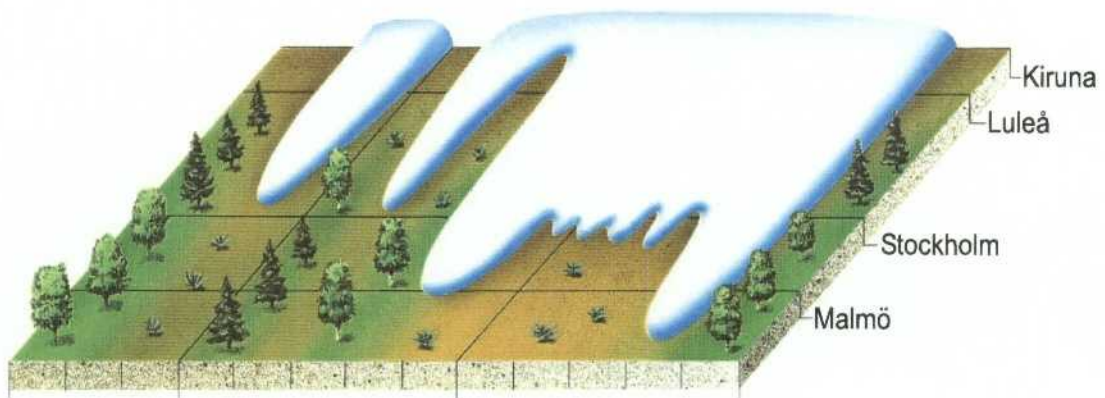
För perioden mellan 600 och 1 000 miljoner år sedan inträffade en serie omfattande glaciationer där sannolikt orsakerna går att finna i kontinenternas läge på jordytan. Efter denna glaciationsperiod blev klimatet på jorden varmare innan en istid åter inträffade för ca 450 miljoner år sedan.

Geologiska bevis för denna glaciationsperiod har hittats inom en stor del av norra Afrika och den arabiska halvön. Den afrikanska kontinenten befann sig under denna tid nära Sydpolen.

Under kvartärtiden, som började för ca 2,5 miljoner år sedan, förstärktes mönstret med kraftiga svängningar mellan kallare och varmare perioder. De kallare perioderna kallas glacialer och de varmare interglacialer. Även under glacialer har man kallare och varmare skeden, vilka kallas stadialer respektive interstadialer.

Under de senaste 350 000 åren har jorden upplevt fyra interglacialer. Den senaste av dessa inleddes för ungefär 10 000 år sedan och bestämmer våra levnadsförhållanden idag. Senast som Sverige upplevde ett klimat liknande dagens var under den så kallade Eem-glacialen för mer än 115 000 år sedan (se figur 2-1). Denna interglacial följdes av Weichsel-glacialen, som av naturliga skäl är den bäst kända av de inträffade istiderna. Weichsel avbröts vid ett par tillfällen av relativt varma interstadialer för 100 000 respektive 70 000 - 80 000 år sedan för att sedan nå sin maximala utbredning för ca 18 000 år sedan.

Inlandsisens utbredning över Sverige



Figur 2-1. Inlandsisens utbredning över Sverige under de senaste 130 000 år sedan. Figuren visar den senaste istiden Weichsel samt den förra interglacialen Eem.

Pollenstudier visar att för ca 11 000 år sedan hade landets sydligaste delar blottlagts efter inlandsisens avsmältning. Därpå följde en successiv tillbakagång av isen mot norr. I samband med inlandsisens smältning återfördes stora mängder vatten till oceanerna. Härmed, och på grund av att jordskorpan trycktes ned av inlandsisen, hamnade stora delar av Sveriges kustland under vatten.

För ungefär 5 000 år sedan nådde temperaturen på jorden sitt senaste maximum, och vi är nu åter på väg mot ett kallare klimat.

De flesta klimatforskare är idag relativt ense om att de globala klimatförändringarna ytterst beror av förändringar i intensiteten hos den infallande solstrålningen. Väsentligast är den integrerade effekten av ändringar i jordbanans form samt jordaxelns rotation och lutning. Detta beskrivs som något som kallas Milankovitchkurvan, uppkallad efter den serbiske astronom som presenterade teorin. Kurvan redovisar klimatets växlingar som ett cykliskt förlopp.

2.2 Klimatvariationer i framtiden

Det finns goda skäl att tro att de krafter som fått klimatet att växla i det förflutna också ska dominera i framtiden. Under dessa förutsättningar kan klimatet i framtiden beskrivas med hjälp av någon form av statistiskt baserad extrapolation.

De senaste årtiondena har stort intresse fokuserats på den så kallade växthuseffekten och dess potential att drastiskt störa de naturliga klimatfluktuationerna genom att höja temperaturen på jorden.

Växthuseffekten innebär att en del av den långvågiga strålning som strålar ut från jordytan fångas upp av de så kallade växthusgaserna som finns i den lägre atmosfären och därmed omvandlas till värme. En del av denna värme återstrålas till jorden. Härigenom är klimatet på jorden ca 30° varmare än vad det skulle ha varit utan växthuseffekt. De viktigaste naturliga växthusgaserna är vattenånga och koldioxid, men även metan, dikväveoxid och ozon är betydelsefulla.

Genom människans verksamhet de senaste 150 år sedan, har luftens halt av koldioxid, metan och dikväveoxid ökat väsentligt och därigenom har den naturliga växthuseffekten förstärkts. Framförallt är det förbränningen av fossila bränslen som har accelererat under denna tid. Till en viss del kan överskottet av koldioxid i luften tas upp av haven men även av växtlighet och i marken. Det anses i allmänhet bevisat idag att effekterna av mänsklighetens aktiviteter på jorden har nått en sådan omfattning att vi kan vara på väg att påverka vårt eget klimat /2-2/.

Osäkerheterna är dock relativt många vad gäller klimatets utveckling i ett kortare perspektiv. Redan de naturliga klimatvariationerna är stora och genom att omställningstiderna för en av mänskligheten orsakad klimatförändring är långa är det mycket svårt att bedöma om en förändring redan har inträffat. Argument har exempelvis framförts /2-3/ att en global uppvärmning av jordklotet på grund av förstärkt växthuseffekt, för Skandinavien del kan innebära ett kallare klimat på grund av att Golfströmmen skulle kunna byta riktning vid en smältning av ismassorna på Grönland.

Om vi tittar på det framtida klimatet i Sverige i ett länge tidsperspektiv, är det alltså troligt att klimatet på sikt kommer att bli kallare. Effekterna av en förstärkt växthuseffekt kan innebära att den nuvarande, relativt varma perioden förlängs. Inom några hundra år kommer emellertid de naturliga klimatvariationerna att dominera i stort och ta över. I tabell 2-1 sammanfattas förutsägelser av det framtida klimatet gjorda med hjälp av olika klimatmodeller /2-4, 2-5/.

Tabell 2-1. Förutsägelser av framtida klimatutveckling i Sverige (baserade på /2-6/). Se även figur 1-1.

0 - 10 000 år	Klimatet i Sverige blir gradvis kallare. En glacial inleds om ca 5000 år och ett istäcke börjar växa till i fjällkedjan. Havsnivåerna sjunker. Under huvuddelen av perioden kommer det att vara permafrost i norra Sverige. Landet är beboeligt.
10 000 - 30 000 år	Efter en kortare interstadial med något varmare klimat kommer åter temperaturerna att sjunka och fullt stadiala förhållanden råder om ungefär 20 000 år från nu. Istäcket förväntas täcka Sverige ända ner till Stockholmstrakten. Permafrostförhållanden råder i södra Sverige. Landet är beboeligt utanför istäcket.
30 000 - 50 000 år	En interstadial med torrt och kallt väder. Glaciärer finns kvar inom fjällkedjan och det är permafrost i norra Sverige. Landet är beboeligt.
50 000 - 70 000 år	Glaciation över hela Sverige, vilken antas kulminera om ca 60 000 år. Istäcket når ända ner till norra Tyskland. 70 000 - 80 000 år En snabb deglaciation leder till interstadiala förhållanden med ett relativt mildt klimat om ca 75 000 år. Delar av södra Sverige kan åter erbjuda förhållanden lämpliga för jordbruk. Landet är beboeligt.
80 000 - 120 000 år	Återgång till kallare klimat med maximala stadiala förhållanden om ca 100 000 år. Vidsträckt istäcke över Sverige.
120 000 - 130 000 år	Interglacial. Nästa varma period med ett klimat liknande vår tids.

3 Effekter vid markytan

I det kommande 100 000-årsperspektivet förväntas långa kallperioder med permafrost och inlandsis i Sverige, oavsett inverkan av växthuseffekten. Under en glaciationscykel utsätts både biosfär och geosfär för omfattande påverkan.

Viktigt i detta sammanhang är att beakta att påverkan på en specifik plats i Sverige ej enbart är ett resultat av klimatstyrda händelser utan i hög grad av den lokala topografin och geologin. Vidare bestäms varaktigheten och frekvensen av klimatbestämda händelser av platsens geografiska läge. Exempelvis påverkas fjälltrakterna mest av inlandsisen i sig eftersom varaktigheten av glaciationer är stor i dessa trakter. I nuvarande kusttrakter kommer däremot havsnivåförändringar kopplade till inlandsisens tillväxt och avsmältning att ha större betydelse.

3.1 Permafrost

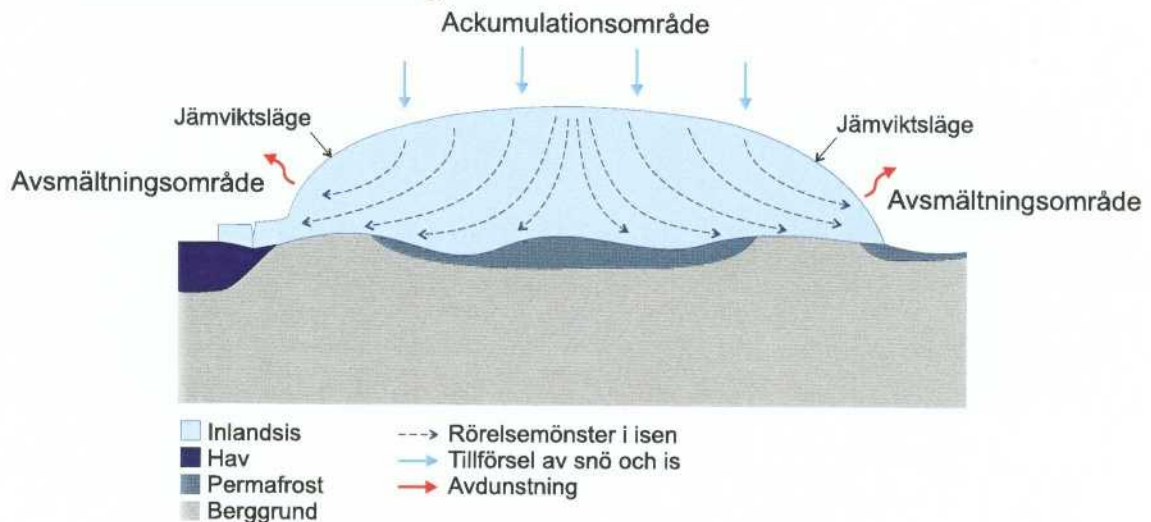
Permafrost definieras som jord och berg med temperaturer ständigt under 0°C under mer än två år. Uppkomsten av permafrost styrs av temperaturen vid markytan och påverkas bl a av marklutning, vegetation, snötäcke och typ av jord- och bergarter. Överst i områden där permafrost råder finns vanligen ett markskikt med några meters mäktighet vilket är utsatt för säsongvariationer i tinande och frysning.

I allmänhet föregås uppkomsten av en glaciär av tundraförhållanden och permafrost. För att det ska bildas permafrost krävs torra och kalla förhållanden med årmedeltemperaturer lägre än ungefär -2°C /3-1/. För uppkomst av kontinuerlig permafrost krävs emellertid ytterligare lägre temperaturer. Sådana förhållanden kan förväntas under det inledande skedet av en glaciation. Resultatet av det torra, kalla klimatet är en betydande minskning i grundvattenbildning.

Sjöar och floder har stor betydelse för var och hur permafrosten uppkommer, eftersom vattendrag har en stor förmåga att lagra värme och tenderar att bryta utbredningen av permafrosten. Detta resulterar i ett diskontinuerligt permafrosttäckte. Skillnader i värmeproduktion från berggrunden inom olika delar av Sverige förväntas ha försumbar effekt på permafrostens utbredning och mäktighet.

Det radioaktiva avfallet som deponeras i förvaret avger värme. Maximala temperaturer i de centrala delarna av deponeringsområdet kommer att nås efter 100-400 år. Därefter sjunker temperaturen långsamt. Beräkningar har visat att temperaturen är något förhöjd relativt ostörda temperaturer ännu efter tusentals år (se exempelvis /3-2/). Flera studier av effekterna av värmeutvecklingen från förvaret på bildningen av permafrost har genomförts /3-3, 3-4/. Resultatet visar i allmänhet att närvaron av djupförvaret leder till en viss, dock inte särskilt stor, reduktion av permafrostens mäktighet direkt ovanför förvaret.

Schematisk bild av en stor glaciär



Figur 3-1. Permafrost finns under isens högsta delar, den så kallade isdelarzonen, och kan även finnas i ett område vid isfronten. Framför isdelarzonen, i den så kallade avsmältningssonen, smälter isen vid kontaktytan berg/is. Rörelsen i glaciären är riktad från isytans högsta delar ut mot periferin. Tillväxt sker om nederbörden som faller på de övre delarna är större än summan av avsmältning och avdunstning i de nedre delarna.

Permafrosten finns både under inlandsisen och i ett område framför isfronten (se figur 3-1). utbredningen av kontinuerlig permafrost som föregår tillväxten av en inlandsis kan uppgå till många hundra kilometer framför isfronten. Djupet på permafrosten reflekterar variationerna i lufttemperatur och beror därmed även på topografien. Beräkningar visar att permafrostens djup eller mäktighet i området framför en framväxande inlandsis kan uppgå till ca 300 meter [3-5].

Förutom denna typ av permafrost finner vid som tidigare nämnts permafrost även under själva glaciären. Inom isdelarzonen, motsvarande glaciärens högsta delar (se figur 3-1), leder transport av kall is mot glaciärens botten till en obruten permafrostutveckling. Maximala djup på permafrosten kan förväntas uppgå till 400-500 meter. Framför isdelarzonen uppkommer en avsmältningsszon på grund av värme resulterande från isens inre deformation i kombination med glaciärens isolerande effekt och reduktionen av trycksmältpunkten genom den ökande lasten. Längst framme vid isfronten kan permafrost uppträda inom ett några tiotal kilometer brett område.

Förhållandena under inlandsisen behandlas i övrigt i sektion 3.2.

3.2 Glaciärer och inlandsisar

Det råder en viss osäkerhet om hur inlandsisarna över Sverige har börjat växa till. Den vanligaste föreställningen är dock att lokala glaciärer har uppkommit inom den skandinaviska fjällkedjan i samband med att lufttemperaturen börjat sjunka. Dessa glaciärer har så småningom vuxit samman och brett ut sig över låglandet utanför fjällkedjan.

Glaciärer kan emellertid dessutom uppkomma genom så kallade areell nedisning, vilket innebär att snön som faller under vintern inte hinner smälta under sommaren, utan byggs på år från år.

En glaciär kan ses som en is- och snömassa som rör sig på grund av krafter orsakade av glaciärens egen tyngd och som har en årlig omsättning av snö och is. Genom experiment och detaljerade studier av vår tids stora glaciärer har forskarna skapat en god förståelse för hur inlandsisar fungerar.

Rörelsen i glaciären sker genom inre deformation och är riktad från isytans högsta del, den så kallade isdelaren, och ut mot periferin (se figur 3-1). Genom sin egen tyngd flyter isen från högre till lägre nivåer. Tillväxten av isen sker genom att den nederbörd som faller på de övre delarna av glaciären, ackumulationsområdet, är större än den massa som smälter bort i de nedre delarna och vid isfronten. Det inre isflödets hastighet är som lägst under isdelaren och ökar sedan gradvis utåt mot periferin.

Isens inre förhållanden påverkas, förutom av lufttemperaturen, även av reliefen hos det landskap över vilket isen drar fram, samt av värmeflödet från underliggande berggrund. När glaciärens mäktighet över ett område ökar förändras bergets temperaturfördelning genom att värmetransporten ut i luften förhindras.

Som nämnts i avsnitt 3.1, växlar förhållandena under en inlandsis. En glaciär kan vara antingen ”kall”, dvs frusen ner till sin botten, eller ”tempererad”, då smältning sker vid botten. Smältvatten som uppkommer vid isens botten reducerar friktionen mot marken och utöver den inre deformationen uppkommer vid tempererade förhållanden även en rörelse genom att isen kan glida mot sitt underlag.

Avsevärda mängder smältvatten produceras från en inlandsis, både vid glaciärens yta (supraglacialt) och vid glaciärens botten (subglacialt). Smältvattnet som uppstår vid ytan letar sig vanligtvis ned mot botten på glaciären genom sprickor.

Isens inre temperaturförhållanden är med andra ord viktiga både för hur isflödet sker och för hur isen påverkar sitt underlag. Temperaturen är i sin tur beroende av isens inre deformation, vilket innebär en återkoppling.

Isens rörelse över sitt underlag orsakar en deformation och sammanpressning av det befintliga jordtäcket samt en viss erosion. Olika typer av löst material fångas upp av isen. Detta material utgörs framförallt av redan existerande sediment, men även material från ras, frostsprängning och isens nötning av underlaget transporteras med. Material i isens

bottenskikt släpas med och hjälper till att nöta bergytorna som isen överlagrar. Den totala erosionen av berggrunden i Skandinavien under Weichselistiden är dock svår att uppskatta med säkerhet. Vanligen brukar den anges till i genomsnitt några meter.

Då klimatet åter blir varmare börjar inlandsisen att smälta bort. Denna avsmältning sker dels från ytan, dels vid isfronten och har ett mycket långsamt förlopp. Deglaciationen efter den senaste istiden i Sverige (Weichsel) tog i runda tal 10 000 år. Iskantens tillbakaryckning avbröts vid flera tillfällen, framförallt orsakat av svängningar i klimatet men även på grund av lokala topografiska förhållanden.

När isen smälter frigörs det uppsamlade lösa berg- och jordmaterialet. Material som avlagras direkt ur isen kallas morän. Denna är en sorterad jordart vilken kan ha en sammansättning bestående av alla kornstorlekar, från stora block till lerpartiklar. Vid iskanten uppkommer olika typer av randbildningar. Där iskanten är stationär under längre tid kan stora ryggar, så kallade randmoräner, bildas.

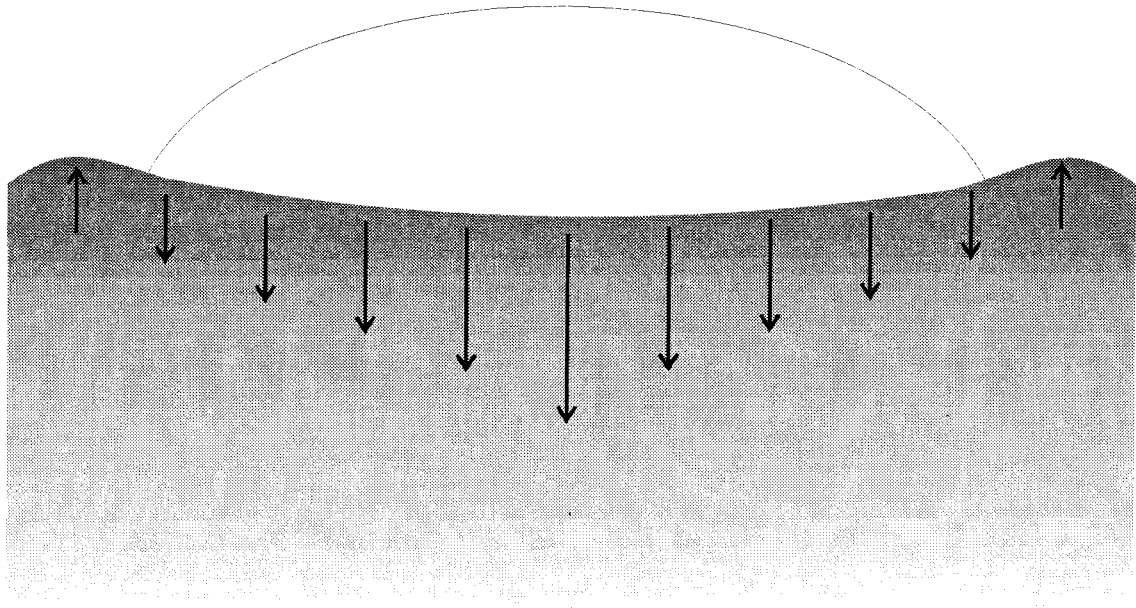
Material som frigörs vid isens smältning och sedan tas om hand av och transporteras med det rinnande smältvattnet brukar benämnas isälvsavlagringar. Avlagringen i vatten får till följd att en viss sortering sker. De tyngsta kornen sedimenterar först och med avtagande flöde hastighet kommer successivt lättare och finkornigare partiklar att sedimentera. Grus och sand som avsatts i tunnlar under isen kommer efter det att den omgivande isen smält bort att ligga kvar som långsträckta ytformer i terrängen, så kallade åsar.

3.3 Havsnivåförändringar och landhöjning

Närvaron av glaciären ger upphov till en förhöjd belastning på den underliggande berggrunden. De övre 150-200 km av berggrunden kallas för litosfären (se figur 1-2) och deformeras i princip elastiskt (figur 3-2). Under litosfären finns astenosfären som reagerar på belastningen i form av ett segt flöde. Genom belastningen trycks berggrunden ned i området under istäcket medan omgivningarna buktar upp.

Denna förhöjning av berggrunden framför isfronten antas fortplanta sig framåt allt eftersom inlandsisen breder ut sig. Det sega, långsamma flödet i astenosfären vilket uppkommer då litosfären trycks ned, får som främsta resultat att tiden för att nå jämviktsförhållanden blir oerhört lång under både på- och avlastning. Geologiska studier tyder på att denna *isostatiska* nedtryckning av berggrunden under de centrala delarna av den senaste inlandsisen uppgick till mer än 800 m.

När isens avsmältning inleds, börjar berggrunden att återgå till sin ursprungliga nivå, vilket resulterar i en landhöjning. Förloppet efter den senaste istiden pågår fortfarande. Landhöjningen i trakten kring Umeå, där den är som snabbast, uppgår till ca 90 cm på 100 år. Därifrån avtar landhöjningen både åt norr och söder.



Figur 3-2. Litosfären under istäcket trycks ned elastiskt på grund av den höga belastningen medan den närliggande omgivningen buktar upp.

Glaciärernas tillväxt och avsmältning påverkar även havsytans nivå genom att vatten som binds i ismassorna minskar havens volym. Dessa förändringar av havsnivåerna kallas *eustatiska*. Under den senaste istiden bands så mycket vatten i de skandinaviska och nordamerikanska inlandsisarna att havsnivåerna sänktes med drygt 100 m.

Den eustatiska havsnivåsänkningen är i absoluta tal avsevärt mindre än den isostatiska nedtryckningen av berggrunden. I samband med deglaciation kommer därför de områden varifrån isen successivt försvinner att delvis dränkas av haven.

Efter den senaste nedisningen nådde havet härvid en högsta nivå som brukar kallas högsta kustlinjen eller marina gränsen. Denna högsta kustlinje (HK) ligger på olika nivåer i olika delar av landet, beroende på skillnader i isostatisk nedtryckning och vid vilken tidpunkt isen försvann från området. Den högsta observerade HK-nivån i Sverige finns i Ångermanland och ligger ca 285 m över havet.

Med successiv isostatisk landhöjning kommer efter det att HK nåtts strandlinjen att förskjutas nedåt. Detta förlopp motverkas delvis av den eustatiska havsnivåhöjningen. Inom de yttre delarna av området som varit istäckt kan havsnivåhöjningen dominera under vissa perioder vilket då leder till en förskjutning uppåt av stranden. Studier av strandlinjernas relativa förskjutningar utgör en viktig källa till information om landhöjningens hastighet under tiden från glaciationen och fram till vår tid och möjliggör även extrapolation framåt i tiden (se exempelvis /3-6, 3-7/).

Den pågående landhöjningen kan även mätas med hjälp av upprepade avvägningar av markytan med mycket hög precision samt med hjälp av satelliter /3-8/.

3.4 Växtlighet och djurliv

Vi vet relativt lite om hur förhållandena i Sverige var vid kvartärtidens början för ca 2,5 miljoner år sedan, eftersom nedisningarna har förstört de flesta spåren. Då landet till största delen hade legat ovanför havsytan i flera hundra miljoner år, kan man förvänta sig en mycket djupgående vittring och att berggrunden var täckt av vittringsjordar.

Under de senaste 250 000 åren har tre mellanistider med skogvegetation avlöst tre istider. Under istiderna har vissa korta perioder med gynnsammare klimat (interstadialer) inträffat vilka möjliggjort viss arktisk växtlighet, såsom örter, ris och buskar. I övrigt vet man från studier av växtfossil att det under interglacialerna funnits flera trädsorter som inte förekommer i dagens vegetation.

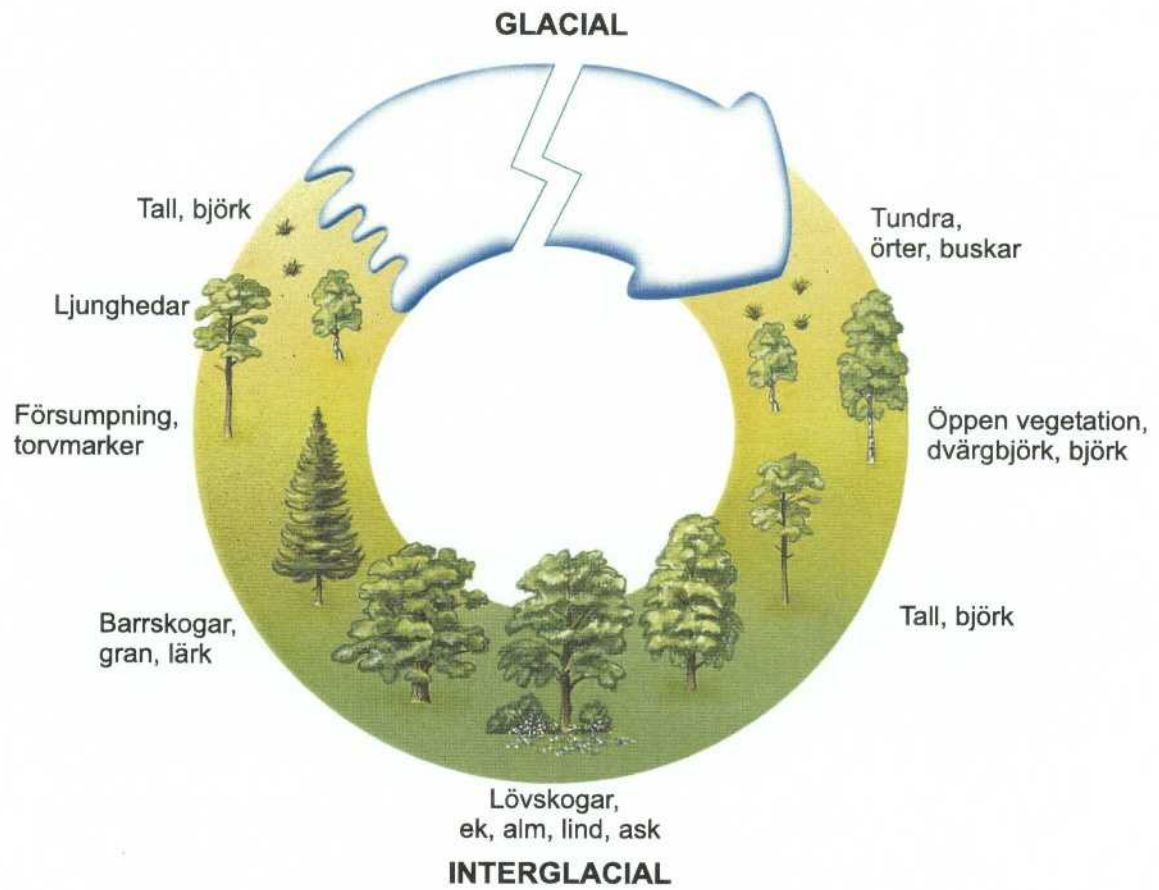
Under Eem-interglacialen, som inträffade före den senaste istiden, bestod Sveriges skogar av ungefär samma trädslag som idag. Viss typ av växtlighet fanns under denna tid betydligt längre norrut än den någonsin funnits efter denna tid. Genom fossilfynd vet man att exempelvis mammuten var vanlig i Norden både under den förra interglacialens kallperioder och under Weichselistidens interstadialer.

Under inledningen av Weichselglacialen, för ca 115 000 år sedan, försköts vegetationsgränserna söderut och tundraförhållanden rådde i den ännu isfria delen av Sverige. När sedan nedisningen avbröts av varmare förhållanden (först interstadialer och därefter vår nuvarande interglacial) invandrade växter och djur åter ganska snart liksom med tiden även skogar.

Närmast iskanten fanns en tundrazon med örter och buskar. De första trädsorterna som invandrade var björk och tall och därefter följde ädlare lövträd. Genom studier av lagerföljderna i myrar och sjösediment har man kunnat följa vegetationens förändring efter den senaste istiden.

Vi vet att klimatet efter istiden blev varmt och torrt vilket bl a resulterade i sjunkande vattenstånd i sjöar och myrar. Därefter övergick förhållandena till ett klimat med större nederbörd och högre medeltemperatur än vad vi har idag.

Den ovan beskrivna klimat- och vegetationsutvecklingen kan beskrivas som ett cykliskt förlopp där de olika vegetationsfaserna avlöser varandra. I figur 3-3 redovisas detta schematiskt. Viktigt i detta sammanhang är att betona att vegetationsutvecklingen i hög grad påverkar markens infiltrationskapacitet. Dessutom är grundvattnets sammansättning även påverkad av biologiska och kemiska processer då vattnet filtreras genom jordlager på markytan.



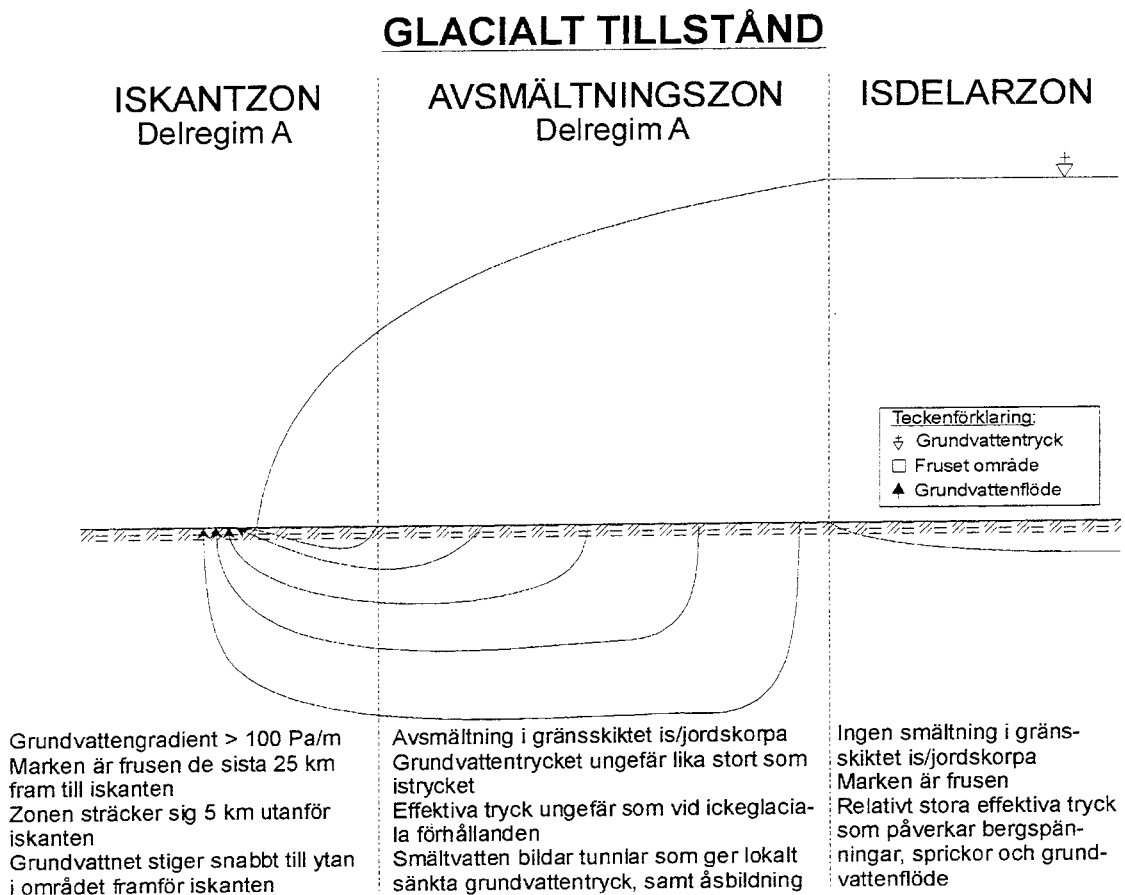
Figur 3-3. Liksom varmare perioder följs av kallare, avlöser olika vegetationsfaser varandra. Deras längd varierar från omkring 100 år till mer än 10 000 år.

4 Effekter på förvarsdjup

De förändringar som inträffar på markytan under olika skeden av glaciationscykeln kan även innebära förändringar i miljön på förvarsdjupet. Sådana effekter kan delas in med hänsyn till vilka egenskaper hos berggrunden som förändras, t ex termiska, mekaniska, hydrologiska och kemiska effekter. Dessa effekter är inte fristående från varandra, utan i hög grad kopplade på ett ofta komplext sätt.

I syfte att kunna bedöma klimatförändringarnas påverkan på berget och förvaret på ett systematiskt sätt, har tre olika situationer med karakteristiska förhållanden vilka avviker från dagens relativt varma, interglaciala förhållanden definierats /4-1, 4-2/. För en glaciationscykel kan därmed fyra klimatstyrda processtillstånd särskiljas;

- *permafrosttillstånd*,
- *glacialt tillstånd*,
- *marint tillstånd*, och
- *tempererat / borealt tillstånd*.



Figur 4-1. Randvillkoren för grundvattenflöde bestäms av isens närvaro. De mer exakta förhållandena bestäms av rådande regim och delregim.

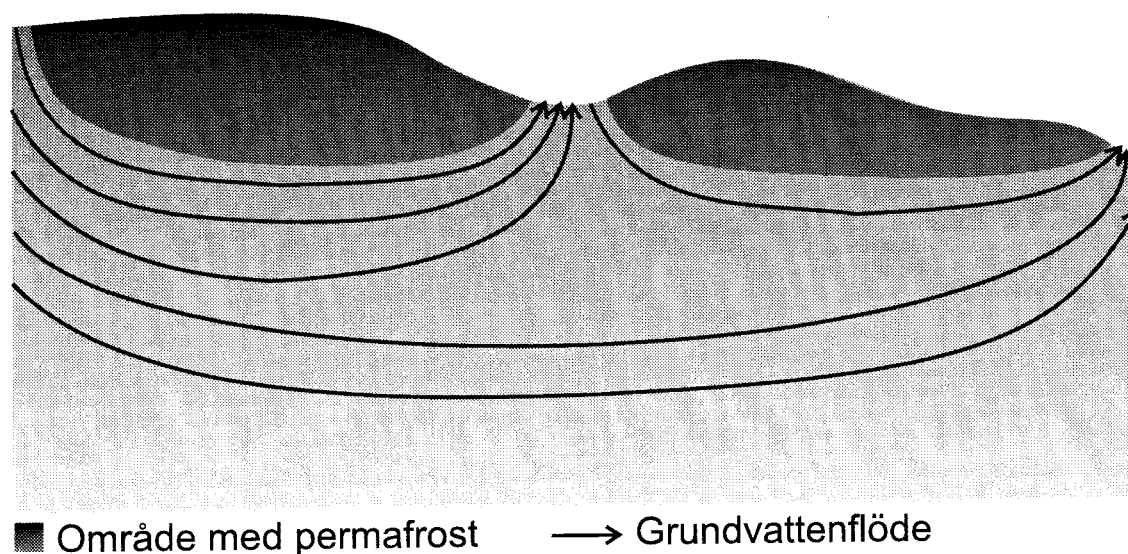
Emellertid är inte de karakteristiska förhållandena för de olika processtillstånden konstanta utan varierar väsentligt inom desamma. Av den anledningen kan de olika process-tillstånden efter behov delas in i olika regimer och ibland även delregimer (se figur 4-1). Indelningen återspeglar olika kombinationer av de grundläggande processer och egenskaper som kan anses typiska för respektive processtillstånd. De olika processtillstånden, regimerna och delregimerna bestämmer de termiska, mekaniska, hydrologiska och kemiska förhållandena, vilka kan betraktas som yttre belastningar på förvaret.

4.1 Permafrosttillstånd

Temperaturökningen mot djupet i det svenska urberget är förhållandevis liten vilket får till följd att permafrosten inom ett icke-nedisat område kan nå relativt djupt, ca 300 m.

Permafrost i de övre delarna av det geologiska mediet innebär ett, hydrauliskt sett, mer eller mindre ogenomsläppligt lock. Under permafrosttillståndet, vilket uppträder inom ett område dit ej glaciärens front nått, är inte grundvattenflödet påverkat av glaciären. Däremot kommer det täta locket att tvinga ner grundvattenflödet till betydligt större djup än idag, genom att grundvattnets naturliga strömningsvägar störs (se figur 4-2).

Om någon kapsel i förvaret läcker kan det uppstå en hög koncentration av radionuklider under den täta permafrosten. Samtidigt innebär de förändrade nederbördsförhållandena och den minskade infiltrationsmöjligheten att grundvattenbildningen generellt blir låg.



Figur 4-2. Närvaron av permafrost påverkar grundvattnets naturliga strömningsvägar och tvingar ner flödet till större djup.

Frysningen av vatten i sprickor och de längre uppehållstiderna för grundvatten under den frusna berggrunden kan även påverka den kemiska sammansättningen hos grundvattnet i form av bl a högre salthalter. Den högre densiteten hos det salta vattnet kan medföra att vatten transporteras mot djupare nivåer framförallt via större brantstående sprickzoner.

Då grundvattnet i bergets spricksystem fryser ökar vattnets volym, vilket kan leda till att sprickorna vidgas. Då isen återigen smälter minskar sprickvidden, men troligen ej till sitt ursprungliga värde eftersom deformationen ej är helt elastisk och dessutom en del bergfragment bryts loss. En del forskare har hävdad att den förhöjda vattengenomsläpplighet som vi vanligen mäter inom de övre 100-300 m av vårt kristallina berg kan vara en sekundär effekt av tidigare permafrostperioder.

Sammanfattningsvis kan sägas att permafrosten sannolikt ej kommer att påverka förvaret genom frysning på förvarsdjup. Däremot kommer grundvattnets flödesvägar på ytligare nivåer att påverkas väsentligt och grundvattnets kemiska sammansättning kan förändras.

4.2 Glacialt tillstånd

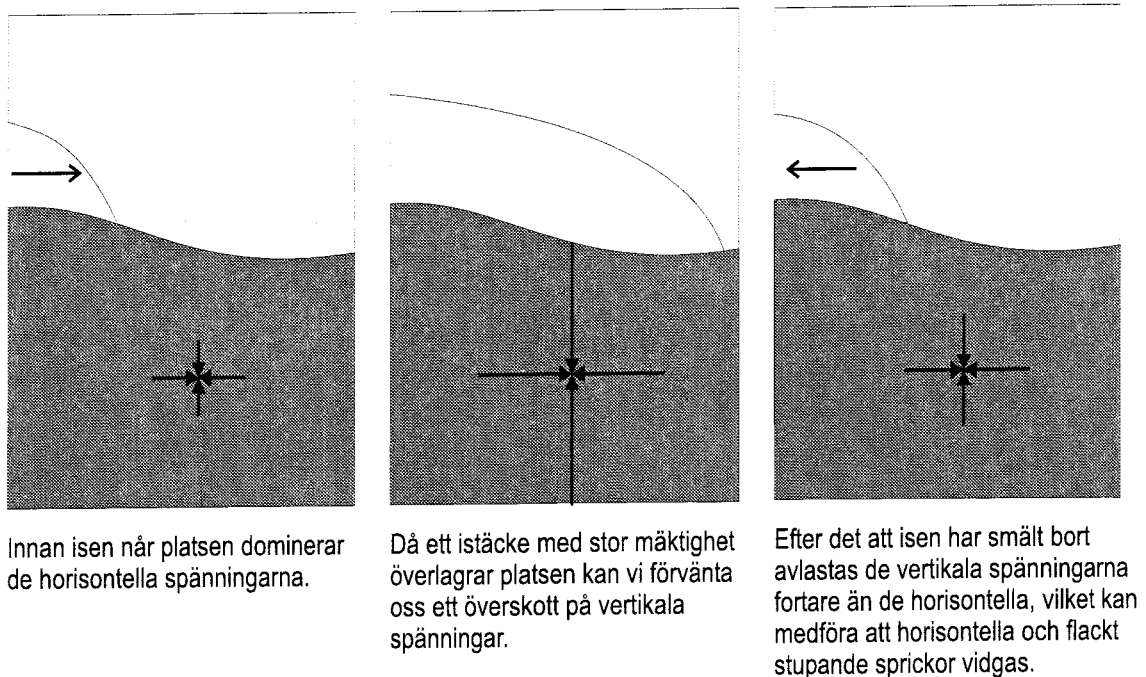
Den storskaliga effekten av inlandsisen är en nedtryckning av litosfären, vilket får till följd att hela förvaret med omgivande bergmassa förflyttas nedåt.

En inlandsis som passerar över en plats påverkar även de rådande bergspänningarna, genom samverkan mellan islast och vätsketryck. Framförallt påverkas storleken på spänningarna medan riktningarna endast påverkas i mindre grad. Vid växlingen från isfria till istäckta förhållanden sker en successiv förändring av spänningstillståndet (se figur 4-3).

Under nuvarande förhållanden (liksom vid tiden före nästa istid) kan vi förvänta oss att den största huvudspänningen är horisontell ner till åtminstone 400-500 m djup. Då en mäktig inlandsis överlagrar förvarsplatsen, erhåller vi framförallt ett stort tillskott i vertikalspänningen men också de horisontella spänningarna kommer att öka.

Vid isavsmältningen kommer sedan den vertikala spänningen att återgå till ursprunglig storlek relativt snart, medan de horisontella spänningstillskotten kommer att verka under betydligt längre tid. Vattentrycket under isen kan som mest motsvara isens hela höjd, vilket medför att trycket på förvarsdjup kan motsvara ett par kilometer vattenpelare.

Dessa storskaliga spänningsförändringar ger sannolikt upphov till att olika orienterade bergsprickor reagerar på olika sätt avseende elastisk stängning/öppning under glaciationsförloppet. Detta resulterar sekundärt i att bergets genomsläpplighet för vatten kommer att variera i tiden både till storlek och riktning.



Figur 4-3. Spänningarna i berget varierar under olika skeden av glaciationscykeln.

De förändringar i totala och effektiva spänningar (totalspänning reducerad med vattentryck) som induceras i berget under och framför inlandsisen kan även ge upphov till permanenta mekaniska effekter genom skjuvning och/eller spjälkning av befintliga sprickor.

Sprickskjuvning kan inträffa både på grund av ökade skjuvspänningar och på grund av minskad skjuvhållfasthet då vattentrycket i sprickan ökar. Hydraulisk spjälkning av en spricka sker då vattentrycket i sprickan är lika stort som normalspänningen mot sprickan. Observationer som gjorts av sedimentfyllda sprickor, både horisontella och vertikala, i den kristallina berggrunden, har förklarats som ett resultat av hydraulisk spjälkning i samband med den senaste glaciationen /4-3, 4-4/.

Man kan generellt förvänta sig att deformation orsakad av glaciation och deglaciation i första hand tas upp i befintliga strukturer och svaghetszoner. Bland annat har resultat som visar på detta erhållits från numeriska beräkningar genomförda för SKBs typområde Finnsjön i Uppland /4-5, 4-6/.

En del forskare har även hävdats att man under speciella omständigheter kan förvänta sig att nya sprickor uppstår som ett resultat av hydraulisk uppspräckning orsakad av mycket höga vätsketryck vid iskanten. En modell har exempelvis föreslagits /4-7/ där spänningsökning - uppspräckning - permeabilitetsökning ses som en tidsberoende, kopplad process.

Dragsprickor orsakade av hydraulisk uppspräckning leder till en ökad hydraulisk genomsläpplighet och vätsketrycken reduceras därmed vilket i sin tur leder till att uppspräckningen upphör. Problemet är emellertid komplext och effekterna svåra att kvantifiera.

Som framgår av ovanstående beskrivningar kommer de spänningsförändringar som sker under glaciations- / deglaciationsförloppet att på olika sätt påverka berggrunden kring förvaret. Framförallt är det fråga om indirekt påverkan på bergmassans genomsläpplighet, genom att olika sprickor och sprickzoner öppnas /stängs under olika skeden.

Den landhöjning som startade efter deglaciationen och fortfarande pågår bedöms vara en relativt kontinuerlig process både i tiden och rummet. Inom den yta som täcks av ett djupförvar är därför eventuella skillnader i landhöjningstakten helt försumbara för förvarets mekaniska stabilitet. Detaljerade geologiska studier kan ge svar på om lokala rörelser skett längs befintliga sprickor och sprickzoner efter den senaste istiden. Sedan länge har det varit känt att sådana förkastningsrörelser skedde i den norra delen av den Baltiska skölden i samband med deglaciationen.

Slutsatserna av ett omfattande forskningsprojekt genomfört i Lansjärv, norr om Luleå, var att rörelserna utefter tidigare existerande förkastningar sannolikt var orsakade av deglaciationsprocessen i kombination med plattetektoniskt orsakad horisontell kompression /4-8/. Det har inte kunnat påvisas att dessa förkastningar fortfarande är aktiva. Det är emellertid viktigt att kunna avgöra hur sådana rörelser sker och om rörelserna kan leda till ny sprickbildning eller andra förändringar av de hydrogeologiska eller kemiska förutsättningarna för ett djupförvar.

Omedelbart efter avsmältningen av en inlandsis kan man förvänta sig en kraftigt förhöjd frekvens av jordskalv. En speciell utvärdering av de seismotektoniska förhållandena i Sverige idag och under den senaste glaciationen/deglaciationen har betonat effekterna av landhöjningen /4-9/. I denna studie hävdas även att de jordskalv vi registrerar idag beror på följderna av landhöjningen.

Som ett resultat av jordskorpan återhämtning under och efter deglaciationen ökar den tidigare belastade berggrundens porositet generellt och färskvatten kan förväntas tränga ned till flera hundra meters djup /4-9/. Grundvattenflöde under en glaciär kan drivas av två olika processer:

- Sammantryckning av berggrunden på grund av islasten, vilket resulterar i en utdrivning av grundvatten från berget. Detta sker oberoende av om smältning sker under glaciären eller ej.
- Infiltration av smältvatten i berggrunden. Det genererade flödet fortgår så länge som det sker smältning.

För det glaciala processtillståndet kommer grundvattenbildningen att vara beroende på en samverkan mellan smältvattenflöden från glaciären, hydrauliska trycknivåer starkt styrda av nivån på isens överyta, samt geometrin hos flödesvägarna vid ytan. Inom israndzonen, till exempel (se figur 3-1), kan marken vara frusen, vilket tvingar smältvatten som härrör från en position under isen att ta sig till ytan i området framför isen under inverkan av en hög tryckgradient.

Det finns goda skäl att anta att nivån på isens överyta ger en begränsning för tryckgradienten hos det subglaciala vattenflödet inom avsmältningszonen. De mycket stora flöden som genereras genom smältning kan inte infiltreras i den generellt ganska

lågkonduktiva berggrunden i Sverige. Då tryckhöjden når en nivå lika med isens överyta kan man räkna med att överskottsvattnet dräneras genom tunnlar i isens underkant, vilka ger upphov till lokala sänkor i trycknivå /4-1/. Frånsett dessa lokala effekter kan man inom avsmältningssonen förvänta sig att islasten ej reducerar berggrundens genomsläpplighet. Inom isdelarzonerna, å andra sidan, sker ingen smältning vid isens botten som alltså här är frusen. Då det inte sker något grundvattenflöde här kommer tryckytan att vara horisontell och betydligt lägre än istrycket. Detta kan ge upphov till relativt höga effektiva spänningar från isen (se beskrivning ovan).

Frågeställningar som är av stor vikt för säkerhetsanalysen av ett djupförvar är hur djupt det glaciala smältvattnet transporteras liksom hur lång tid det tar för vatten (innehållande radionuklider) att transporteras från förvarsdjupet till markytan. Numeriska beräkningar av grundvattenflöden under inflytande av en inlandsis som passerar över ett område indikerar att smältvatten teoretiskt skulle kunna nå flera kilometers djup /4-10/. Beräkningarna visade samtidigt på resultatens känslighet för ansatta värden på hydraulisk konduktivitet och salinitet mot djupet. Platsspecifik information är därför av stor vikt.

För att vi skall kunna förstå vilka effekter den senaste glaciationen har haft på hydrogeologin inom ett potentiellt förvarsområde, är analyser av grundvattenkemin ett viktigt verktyg. I borrhålen kring Äspö och Laxemar, Oskarshamns kommun, har grundvatten provtagits systematiskt ner till 1700 m djup.

Den kemiska sammansättningen hos grundvattnet representerar en blandning av olika proportioner av grundvatten av olika ålder och ursprung /4-11/. Genom avancerad statistisk analys har man klassificerat olika ursprungsvatten i berggrunden inom detta område. Vattnet på förvarsdjup har beskrivits som en blandning av bl a modernt sötvatten, glacialt smältvatten och gammalt, mycket salt vatten.

Glacialt smältvatten antas ha en sammansättning motsvarande syrerikt regnvatten när det infiltreras ner i berggrunden. Baserat på experimentella erfarenheter kan man förvänta sig att syret i vattnet kommer att förbrukas och att därför förhållandena med tiden och med ökat djup kommer att bli reducerande.

Kolloider, d v s mycket små partiklar av exempelvis kisel och järnhydroxid, som finns i grundvattnet kring förvaret kan under speciella omständigheter ta upp och transportera radionuklider som kommit ut från en trasig kapsel. Innehållet av kolloider i grundvattnet kommer sannolikt att inledningsvis öka kraftigt i och med infiltrationen av glacialt smältvatten som ett resultat av öppnandet av nya flödesvägar, introduktion av blandningsprocesser, ökad erosion i sprickor m m /4-12/. Efter dessa inledande händelser tror man att kolloidkoncentrationen drastiskt kommer att sjunka. Utspädningen av existerande grundvatten med glacialt smältvatten antas därmed leda till en sammanlagd reduktion av mängden kolloider relativt förhållandena före glaciationen.

4.3 Marint tillstånd

Relativa havsnivåförändringar representerar viktiga ändringar i randvillkoren för grundvattenflöde i kustnära områden. När havet stiger översvämmas låglänta områden. Saltvatten kommer då att tränga undan det lättare söta grundvattnet. På motsvarande sätt kommer en sjunkande havsnivå att föra med sig att salt grundvatten ersätts med sött. Som ett resultat av det marina tillståndet kommer komplexa grundvattencirkulationsmönster att bildas och grundvattnet kommer att få en karakteristisk kemisk sammansättning.

Relativt stora strandlinjeförändringar sker både vid inledningen av en istid i och med att världshavens vatten binds i isar och efter deglaciationen då isen smälter och den isostatiska landhöjningen är som snabbast. Effekterna på förvarsdjup blir olika beroende på den aktuella platsens geografiska läge och förhållandet till inlandsisen.

4.4 Tempererat/borealt tillstånd

Detta processtillstånd motsvaras väsentligen av det som största delen av Sverige idag befinner sig i, dvs ett tillstånd som är karakteristiskt för interglaciala perioder. Såväl havsnivåförändringarnas isostatiska (orsakade av landhöjning) som dess eustatiska komponenter (orsakade av global förändring av havsnivån) har i stort sett avtagit helt. Rådande nederbördsförhållanden och topografiska effekter styr grundvattenbildning och grundvattenflöde men skillnader i salthalt hos grundvattnet, vilka delvis är ett kvarvarande effekt av tidigare glaciala perioder, påverkar även strömningsbilden.

5 Konsekvenserna av framtida istider

5.1 Säkerhetsanalys

I funktions- och säkerhetsanalyser studerar SKB förvarets funktion under både förväntade och mindre vanliga förhållanden. Förvarets funktion måste uppfylla ställda krav på säkerhet såväl under byggandet som under det långsiktiga förvarsskedet. En viktig del av säkerhetsanalysen är att sammanställa information om förvarets egenskaper samt att identifiera de tillstånd som bör analyseras.

Som framgår av ovanstående beskrivningar utsätts både geosfär och biosfär för omfattande förändringar under en glaciationscykel. Ett av de scenarier som SKB har valt att analysera i säkerhetsanalyser är ett sådant istidsscenario /5-1/. Metodiken för analys av scenariot är fortfarande under utveckling.

En systematisk beskrivning av klimatstyrda förhållanden under en glaciationscykel har gjorts och en metodik för hur istidsscenarier kan utvecklas har föreslagits /5-2/. Tre dominerande klimatstyrda processtillstånd som avviker från dagens klimat och som antas ha störst påverkan på förvarets säkerhet, har identifierats; glacialt tillstånd, permafrost och marint tillstånd (se kapitel 4).

Dessa tillstånd ger de yttre förutsättningarna för ett istidsscenario. Emellertid måste även en plats specificeras för att ett scenario skall kunna utvecklas, vilket innebär att geografiska och geologiska förhållanden vägs in.

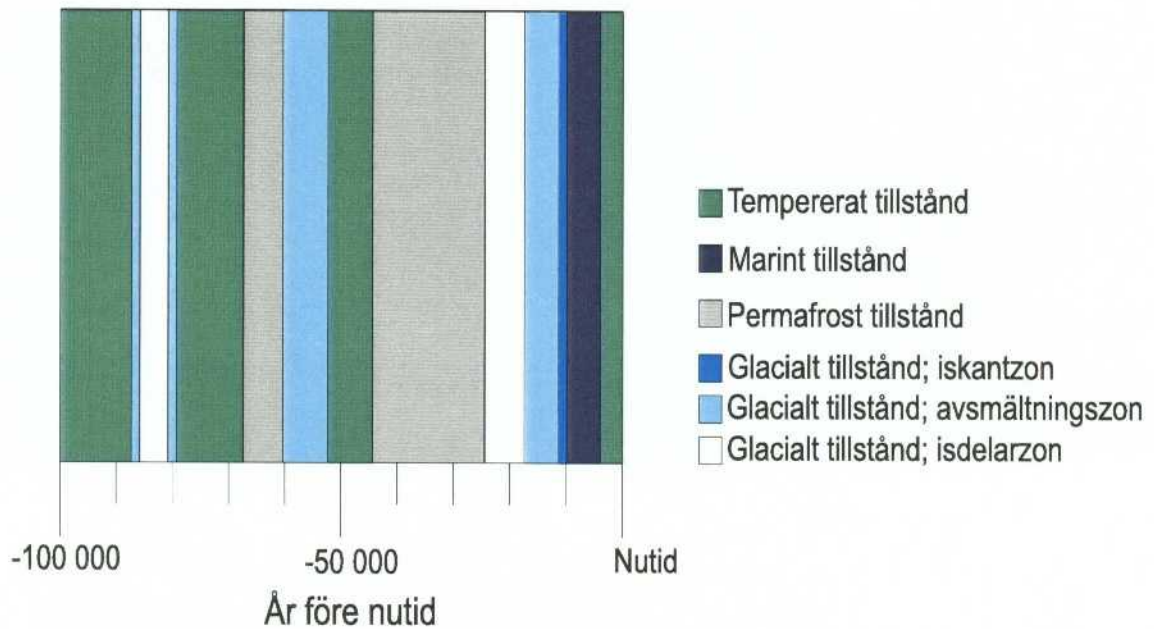
Exempelvis utsätts en kustnära förvarsplats för andra påfrestningar under en glaciationscykel än en plats belägen någonstans i inlandet. Den förra kommer endast att vara täckt av en inlandsis under relativt kort tid, medan å andra sidan stigande och sjunkande havsnivåer kommer att påverka grundvattnets rörelse och sammansättning i hög grad.

Ifall platsspecifika data är begränsade kan emellertid olika geografiska lägen diskuteras i allmänna ordalag. Ett sätt att beskriva en långsiktig klimatutveckling är att koppla ihop flera processtillstånd till en serie och analysera förvarets integrerade säkerhet. På motsvarande sätt kan förvaret bedömas i förhållande till olika tidsskeden av glaciationscykeln.

Ett exempel på hur de klimatstyrda randvillkoren förändrats för en enskild plats under de senaste 100 000 åren visas i figur 5-1. I detta fall är det en plats vid Östersjökusten som studeras. Vi kan se att glaciala, permafrost- och marina tillstånd avlöst varandra och mellanliggande tempererade / boreala tillstånd.

Eftersom det kan anses osannolikt att människor lever i Sverige under den tid då inlandsisen täcker hela landet, innebär säkerhetsanalysen gällande ett istidsscenario i första hand en analys av de radiologiska riskerna för människor, djur och vegetation som efter isens bortdragande åter kan ta mark och vatten i besittning /5-1/. Som framgår av avsnitt 1.1, har

Klimatstyrda processtillstånd



Figur 5-1. De klimatstyrda processtillstånden under de senaste 100 000 åren för en plats vid Östersjökusten.

radioaktiviteten hos det använda kärnbränslet avklingat till relativt låga nivåer vid denna tid. Säkerhetsanalyserna måste emellertid dessutom behandla de tidigare perioder under vilka de norra delarna av landet täcks av is medan södra Sverige ännu erbjuder klimatförhållanden som möjliggör för människor att leva där.

5.2 Forskning om klimat, glaciationer och paleohydrogeologi

Den kemiska vattensammansättning vi idag kan ta prov på i djupa borrhål, liksom de långsamma grundvattenflöden som kan mätas på stora djup i bergmassan, är till stor del påverkade av händelser som inträffat och pågående processer som startat för mycket länge sedan.

Begreppet paleohydrogeologi, där prefixet paleo innebär ”gammal” eller ”gången tid”, omfattar en kombination av observationer rörande kemi och isotopsammansättning i olika grundvattenszoner, mineralogiska data samt hydrauliska egenskaper. Dessa observationer kan tillsammans användas för att tolka utvecklingen av det integrerade bergvattensystemet under långa tidsrymder /5-3/.

SKB bedriver sedan ungefär fem år forskning rörande paleohydrogeologi /5-4/. Målen för forskningen är:

- att identifiera och skapa en förståelse för de processer orsakade av framtida klimatförändringar som kan påverka funktionen hos ett djupförvar, och
- att skapa ett underlag för funktions- och säkerhetsanalyser av förvaret i ett långt framtida tidsperspektiv (se avsnitt 5.1).

Som en del i det paleohydrogeologiska forskningsprogrammet har SKB låtit utveckla en numerisk glaciationsmodell med vilken effekterna av förflutna och framtida klimatförändringar kan studeras /5-2, 5-5/. Modellen är två- alternativt tredimensionell och möjliggör simulering av tillväxten av en inlandsis som funktion av tiden. Indata till glaciationsmodellen är en modell av klimatförändringarna (se avsnitt 2.1-2.2), vilken styr glaciationsförloppet, samt topografiska och geologiska randvillkor. För att kontrollera modellens giltighet har modellsimuleringar av den senaste istiden gjorts och resultaten har jämförts med den information vi har om isutbredningens variation baserad på geologiska observationer.

Med hjälp av glaciationsmodellen studeras och beräknas temperaturförändringar i is och mark, isutbredning, smältvattenflöden, sedimentbildning samt isostatisk påverkan på underliggande jord och berg orsakad av belastningen. För att beskriva grundvattenflödet under olika faser av glaciationen har hydrogeologiska modeller där berget beskrivs som ett poröst medium använts /5-2, 5-6, 5-7/.

Inom det paleohydrogeologiska forskningsprogrammet har modellering genomförts från en skala i storleksordningen 1 000 km till 10 km. Utdata från storskalig modellering har använts som randvillkor till de mer detaljerade studierna. Speciellt för området kring Äspö, norr om Oskarshamn, genomförs omfattande simuleringar av effekter på berggrunden orsakade av en glaciationscykel. De genomförda undersökningarna i och kring Äspölaboratoriet samt borrhningen av ett 1 700 m djupt borrhål i närheten av Äspö erbjuder väsentliga indata till de paleohydrogeologiska studierna. Utdata från grundvattenmodelleringen jämförs med hydrogeokemiska data och modeller.

Referenser

1-1 Hedin A, 1997

Använt kärnbränsle - Hur farligt är det? En delrapport från projektet "Beskrivning av risk". SKB rapport R-97-02. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

2-1 Eronen M & Olander H, 1990

On the world's ice ages and changing environments. Report YJT-90-13, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki.

2-2 Bolin B, 1993

Hotet om klimatförändring. Scandinavian University Press.

2-3 Forskning och Framsteg, 1/96

Golfströmmen kan byta riktning, pp. 28-29.

2-4 Kukla G, 1979

Probability of expected climatic stresses in North America in the next 1 M.Y. In: Scott, Craig, Benson & Harwell (eds.), A summary of FY-1978 consultant input for scenario methodology development. Pacific Northwest Laboratory of Battelle Memorial Inst., PNL-2851.

2-5 Imbrie J & Imbrie J Z

1980, Modelling the climatic response to orbital variations. Science, 207, 943-953.

2-6 Ahlbom K, Äikäs T & Ericsson L O, 1991

SKB/TVO ice age scenario. SKB Technical Report 91-32, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

3-1 McEwen T & de Marsily G, 1991

The potential significance of permafrost to the behaviour of a deep radioactive waste repository. SKI Technical Report 91:8, Statens Kärnkraftinspektion, Stockholm.

3-2 Claesson J & Probert T, 1996

Temperature field due to time-dependent heat sources in a large rectangular grid. Derivation of analytical solution SKB Technical Report 96-12, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

3-3 King-Clayton L M, Chapman N A, Kautsky F, Svensson N-O, de Marsily G & Ledoux E, 1995

The central scenario for SITE-94: A climate change scenario. SKI Report 95:42, Statens Kärnkraftinspektion, Stockholm.

3-4 Vallander P & Eurenus J, 1991

Impact of a repository on permafrost development during glaciation advance. SKB Technical Report 91-53, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

- 3-5 Boulton G S & Payne A, 1992
Simulation of the European ice sheet through the last glacial cycle and prediction of future glaciation. SKB Technical Report 93-14, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 3-6 Björck S & Svensson N-O, 1992
Climatic changes and uplift patterns - past, present and future. SKB Technical Report 92-38, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 3-7 Påsse T, 1996
A mathematical model of shore level displacement in Fennoscandia. SKB Technical Report 96-24, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 3-8 Scherneck H-G, Johansson J M & Elgered G, 1996
Application of space geodetic techniques for the determination of intraplate deformations and movements in relation with the postglacial rebound of Fennoscandia. SKB Technical Report 96-19, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 4-1 Boulton G S, Hulton N & Wallroth T, 1996
Impacts of long-term climate change on subsurface conditions: Time sequences, scenarios and boundary conditions for safety assessments. SKB Utveckling Progress Report U-96-19, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 4-2 SKB, 1995
SR 95. Mall för säkerhetsrapporter med beskrivande exempel. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 4-3 Pusch R, Börgesson L & Knutsson S, 1990
Origin of silty fracture fillings in crystalline bedrock. Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar, Vol. 112, 209-213.
- 4-4 Talbot C J, 1990
Problems posed to a bedrock radwaste repository by gently dipping fracture zones. Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar, 112, 355-359.
- 4-5 Rosengren L & Stephansson O, 1990
Distinct element modelling of the rock mass response to glaciation at Finnsjön, central Sweden. SKB Technical Report 90-40, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 4-6 Israelsson J, Rosengren L & Stephansson O, 1992
Sensitivity study of rock mass response to glaciation at Finnsjön, central Sweden. SKB Technical Report 92-34, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 4-7 Boulton G S, Caban P E & van Gijssel K, 1995
Groundwater flow beneath ice sheets. Part 1 - Large scale patterns. Quaternary Science Reviews.

- 4-8 Stanfors R & Ericsson L O (eds.), 1993
Post-glacial faulting in the Lansjärv area, northern Sweden. Comments from the expert group on a field visit at the Molberget post-glacial fault area, 1991. SKB Technical Report 93-11, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 4-9 Muir Wood R, 1993
A review of the seismotectonics of Sweden. SKB Technical Report 93-13, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 4-10 Svensson U, 1996a
SKB palaeohydrogeological programme. Regional groundwater flow due to an advancing and retreating glacier - scoping calculations. SKB Utveckling Progress Report U-96-35, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 4-11 Laaksoharju M, Smellie J, Nilsson A-C & Skärman C, 1995a
Groundwater sampling and chemical characterisation of the Laxemar deep borehole KLX02. SKB Technical Report 95-05, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 4-12 Laaksoharju M, Degueldre C & Skärman C, 1995b
Studies of colloids and their importance for repository performance assessment. SKB Technical Report 95-24, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 5-1 Se 4-2
- 5-2 Se 4-1
- 5-3 Chapman N & McEwen T, 1992
The application of palaeohydrogeological information to repository performance assessment. NEA Workshop on palaeohydrogeological methods and their applications for radioactive waste disposal. Paris, Nov. 9-10, 1992.
- 5-4 Wikberg P, Ericsson L O, Rhén I, Wallroth T & Smellie J, 1995
SKB Framework for regional groundwater modelling including geochemical-hydrogeological model integration and palaeohydrogeology. SKB Äspölaboratoriet Progress Report 25-95-11, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- 5-5 Se 3-5
- 5-6 Se 4-10
- 5-7 Svensson U, 1996b
SKB palaeohydrogeological programme. Simulations of regional groundwater flows, as forced by glaciation cycles. SKB Utveckling Progress Report U-96-36, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.