

# Kompletterande information om hantering av klimatscenarierna i ansökan om utbyggnad av SFR

## 1 Inledning

I följande promemoria redovisar SKB bemötanden på ”Begäran om förtydligande av ansökan om utökad verksamhet vid SFR”, SSM referens: SSM2015-725, daterad 2016-03-16. SSM begär i dokumentet ett förtydligande med avseende på klimat:

*”... Specifikt önskar SSM att SKB förtydligar motiven till att glaciationsscenario behandlas som ett restscenario och därmed inte ingår i riskutvärderingen. SSM önskar vidare att SKB förtydligar varför effekterna av en klimatutveckling enligt Weichselcykeln inte utvärderas med hänsyn tagen till den tidiga utvecklingen med permafrost redan efter ca 7000 år.”*

Utgångspunkten för SKB:s säkerhetsanalyser för förvar för radioaktivt avfall är att klimatet inte är förutsägbart på de tidsskalor som ska analyseras (100 000 år och mer). En spännvidd inom vilken framtida klimat och klimatrelaterade processer kan variera kan däremot beskrivas. Spännvidden beskriver osäkerheten i framtida klimatutveckling på dessa långa tidsskalor. För att analysera effekterna av denna spännvidd identifieras och beskrivs ett antal framtida klimatutvecklingar (klimatfall) med hjälp av kunskap om förntida och framtida klimatutveckling. Klimatfallen väljs för att:

- representera spännvidden inom vilken framtida klimat och klimatrelaterade processer kan variera, samt,
- möjliggöra en utvärdering av egenskaper, händelser och processer i förvaret och i dess omgivning som påverkas av klimatutvecklingen på ett sådant sätt att en viss typ av klimat och/eller en succession av olika klimattillstånd potentiellt påverkar förvarets säkerhet efter förslutning och därigenom eventuellt också beräknad dos och risk.

Den uppsättning klimatfall som inkluderas i analysen av säkerhet efter förslutning för ett givet förvarskoncept och en given plats skiljer sig därför åt mellan olika analyser (Näslund et al. 2013). Då kunskapsnivån förbättras med tiden kan även uppsättningen klimatfall, och/eller detaljer i den framtida utvecklingen som beskrivs, behöva skilja sig mellan olika analyser, och i vissa fall även mellan olika analyser av ett visst förvar på en viss plats.

Detta dokument syftar till att svara på SSM:s begäran om förtydligande av ansökan om utökad verksamhet vid SFR och beskriver hanteringen av klimat i ansökan med tonvikt på tidpunkten för permafrost och hantering av klimatscenarier i risksummeringen.

## 2 Lärdomar från SAR-08

### 2.1 Referensutveckling med "Weichselvariant" och "Växthusvariant"

I den tidigare analysen av säkerhet efter förslutning för befintliga SFR, SAR-08 (SKB 2008), utgjordes referensutvecklingen av två alternativ, ett där en rekonstruktion av den senaste istidscykeln upprepades ("Weichselvariant") och ett där hänsyn togs till antropogent ökad växthuseffekt ("Växthusvariant"). Dessa valdes för att representera en del av den spännvidd inom vilken framtida klimat och klimatrelaterade processer kan variera. Dessa kompletterades även med andra alternativa klimatutvecklingar för specifika beräkningsfall, se nedan.

Permafrostutvecklingen i huvudscenariots Weichselvariant var densamma som den som togs fram i säkerhetsanalysen SR-Can för Kärnbränsleförvaret (SKB 2006, Figur 4-8), senare även använd i SR-Site (SKB 2010). Redan här ska noteras att permafrostutvecklingen som togs fram för Kärnbränsleförvaret inte var ämnad, eller lämpad, för en detaljerad analys av när permafrost tidigast skulle kunna bildas i Forsmark (se även avsnitt 3 nedan). Den huvudsakliga frågeställningen för Kärnbränsleförvaret var istället hur djupt permafrost maximalt skulle kunna nå under de kommande 1 miljon åren.

Baserat på Emborg et al. (2007) antogs i SAR-08 att porvattnet i betongen som använts i siloförvaret och BMA fryser om temperaturen i förvaret sjunker under  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vid sådana förhållanden antogs materialet brytas upp i sådan grad att dess funktion som diffusionsbarriär upphör, men den antogs fortfarande fungera som sorptionsbarriär och i begränsad omfattning som advektiv barriär. I Weichselvarianten av huvudscenariot sker detta för första gången år 45 000 e Kr.

Utöver analysen av de två alternativa klimatutvecklingarna i huvudscenariot, togs mindre sannolika scenarier och restscenarier fram utifrån alternativa förvarsutvecklingar. Dessa identifierades genom att undersöka vilka händelser, processer och dataosäkerheter som kan medföra att säkerhetsfunktionerna inte kan upprätthållas. Två av dessa scenarier definierades utifrån osäkerheter kring den framtida utvecklingen av klimat och klimatrelaterade processer.

### 2.2 Scenariot Tidig frysning av förvaret

Scenariot Tidig frysning av förvaret hanterade påverkan på säkerhetsfunktionen "Begränsad advektiv transport" till följd av att betongen i BMA-förvaret och silon spricker när den fryser i samband med tillväxt av permafrost. Permafrostutvecklingen i detta scenario definierades av en rekonstruktion av Weichselglaciationen, där klimatet antagits vara mycket torrare än i Weichselvarianten av huvudscenariot. Det medförde att det inte förekom någon tillväxt av inlandsis, vilket gynnar tillväxten av permafrost. Någon snö, vegetation eller havstäckta förhållanden förekom inte heller, vilket ytterligare gynnar permafrosttillväxt. På samma sätt som i Weichselvarianten av huvudscenariot antogs betongens funktion i BMA påverkas om temperaturen sjönk under  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . I scenariot Tidig frysning av förvaret skedde detta för första gången år 25 000 e Kr.

### 2.3 Scenariot Talik

Scenariot Talik hanterar påverkan på säkerhetsfunktionen "låg flöde i förvarsdelar" av ett ökat flöde i geosfären under en period av diskontinuerlig permafrost och talikar. Scenariot ansågs kunna inträffa närhelst periglaciala förhållanden råder i den klimatutveckling som antogs i referensutvecklingen.

Kompletterande information om hantering av klimatscenerierna i ansökan om utbyggnad av SFR

## 2.4 Resultat av scenarioanalysen

Den högsta risken för huvudscenariots Weichselvariant beräknades till  $9 \cdot 10^{-7}$  per år och inträffade vid år 5 000 e Kr. Scenerierna Tidig frysning av förvaret och Talikar representerades av totalt fyra beräkningsfall. I det beräkningsfall som gav upphov till den högsta dosen, *Extrem permafrost*, antogs kontinuerlig permafrost samt att degradering av BMA-förvarets barriärer och betongstrukturen i silon sker vid år 22 000 e Kr. Motsvarande beräkningsfall med talikar gav en lägre dos. Den högsta risken för scenariot Tidig frysning av förvaret beräknades till  $1 \cdot 10^{-6}$  per år och infaller år 39 000 e Kr. Den beräknade toppen i dos berodde på att barriärerna i BMA antogs ha degraderats under permafrostperioden som startar vid 22 000 e Kr (SKB 2008). Detta antagande baserades i sin tur på de antaganden som gjordes om den temperatur vid vilken porvattnet i betongbarriärerna kan frysa (Emborg et al. 2007).

Resultaten av scenarioanalysen i SAR-08 visar på betydelsen av de antaganden som görs gällande:

- Den temperatur vid vilken porvattnet i betongbarriärerna kan frysa.
- Den framtida utvecklingen av temperaturen på förvarsdjup, kopplad till klimatutveckling.

Sammantaget avgör dessa antaganden när frysning av förvaret kan inträffa för första gången. Eftersom radioaktiviteten och radiotoxiciteten i avfallet i SFR avtar med tiden är tidpunkten då porvattnet i betongbarriärerna fryser för första gången viktig för att bedöma potentiell dos och risk från förvaret.

Baserat på SKB:s egen bedömning och på SSM:s kommentarer på SAR-08 valde SKB att se över motiveringen till och beskrivningen av alla klimatfall, inklusive de som rör permafrost, i efterföljande säkerhetsanalys för SFR (SR-PSU).

## 3 Rekonstruktion av den senaste istidscykeln Weichsel

För att ge underlag att analysera den spännvidd inom vilken framtida klimat och klimatrelaterade processer kan variera på en tidsskala upp till 1 miljon år har SKB rekonstruerat den senaste istidscykeln i Forsmark (SKB 2006, 2010, 2014). Denna rekonstruktion baseras bland annat på nuvarande kunskapsläge om inlandsisens utbredning vid olika tidpunkter. I samband med en simulering av inlandsisens utbredning och topografi togs en lufttemperaturutveckling för den senaste istidscykeln fram för Forsmark. Därefter har den permafrostutveckling som en sådan lufttemperaturutveckling ger upphov till simulerats för Weichselperioden. Osäkerheten i permafrostutvecklingen har sedan analyserats i detalj, både med utgångspunkt från osäkerheten i den framtagna lufttemperaturutvecklingen och från osäkerheter i övriga processer inkluderade i permafrostmodellen, såsom bergets, grundvattnets och markytans egenskaper (Hartikainen et al. 2010). I detta sammanhang är det dock viktigt att påpeka att det saknas data för att verifiera om permafrost förekom i Forsmark under Weichsel, och till vilket djup denna i så fall sträckte sig. Noteras kan också att verifiering av permafrostmodellen nu pågår vid platsen för Greenland Analogue Project (GAP) på Grönland där permafrostdjupet och bergrundens temperaturfördelning är delvis känd.

Den rekonstruerade permafrostutvecklingen för den senaste glaciala cykeln utgör ett underlag för att utvärdera om porvattnet i bentonitleran i slutförvaret för använt kärnbränsle kan frysa någon gång under den kommande miljonårsperioden (SKB 2011). Den rekonstruerade permafrostutvecklingen för den senaste glaciala cykeln har dock *ingen relevans* för frågan om *när* permafrost tidigast skulle kunna uppträda i Forsmark i framtiden. Därför utgör permafrostutvecklingen rekonstruerad för Weichselperioden inte ett relevant underlag för den

Kompletterande information om hantering av klimatscenerierna i ansökan om utbyggnad av SFR

viktigaste frågeställningen kopplad till framtida klimatutveckling i analysen av säkerhet efter förslutning för SFR, nämligen frågan om när det tidigast kan bli tillräckligt kallt på förvarsdjup för SFR så att porvattnet i betongen kan frysa. För att besvara denna fråga krävs ett vetenskapligt underlag anpassat till just denna fråga, där bl.a. de sannolika tidpunkterna för, och längden på, perioder med kallt klimat under de kommande 100 000 åren utreds, samt hur kallt klimatet skulle kunna bli under dessa perioder. Att olika säkerhetsanalyser till delar kan kräva olika specialanpassade studier av möjliga klimatutvecklingar, för att belysa och besvara specifika frågor som hänger ihop med förvarskoncept eller plats, beskrivs i SKB (2014) och i Näslund et al. (2013).

## 4 SR-PSU: Framtida klimatutvecklingar av relevans för analys av säkerhet efter förslutning för SFR

Utgångspunkten för analysen av säkerhet efter förslutning i ansökan om utökad verksamhet vid SFR (SR-PSU) är densamma som i SKB:s föregående säkerhetsanalys för SFR (SAR-08). Beskrivningen av den spännvidd inom vilken framtida klimat och klimatrelaterade processer kan variera skiljer sig inte ifrån den som beskrevs i SAR-08. Den framtida klimatutvecklingen under de kommande 100 000 åren kan, förutom de tempererade klimatförhållanden vi upplever idag, komma att innefatta perioder av periglaciala förhållanden med permafrost, nedisning, samt övergångar mellan dessa klimatförhållanden.

Som beskrivs i avsnitt 3 ovan, visar resultaten av scenarioanalysen i SAR-08 att den första tidpunkten för frysning av porvattnet i betongkonstruktionerna i SFR är viktig för att bedöma potentiell dos och risk. Av denna anledning har SKB behövt genomföra nya kompletterande analyser för att förbättra kunskapsläget kring den första tidpunkten vid vilken frysning av porvattnet i betongkonstruktionerna i SFR kan ske. Det finns t.ex. inget samband mellan den första tidpunkten med permafrost som fås när man upprepar Weichselrekonstruktionen som ett framtida scenario och de *förväntade* framtida tidpunkterna med kallt klimat och eventuell permafrosttillväxt under de kommande 100 000 åren (se avsnitt 3). För att bedöma när frysning av porvattnet i betongkonstruktionerna i SFR tidigast kan ske måste istället befintlig och ny kunskap om framtida klimatutveckling användas för konstruktion av ett dedikerat klimatfall där tidpunkten för möjliga kalla perioder identifierats. Vid konstruktionen av detta klimatfall behöver man ta hänsyn till två övergripande faktorer: i) variationer i solinstrålning och ii) antropogen inverkan på klimatet. Kommande 100 000-årsperiod kommer inte att följa samma tidsmässiga mönster på variationer av solinstrålning mot jorden som under den senaste istidscykeln, och klimatet förväntas inte enbart påverkas av naturliga klimatvariationer utan initialt även av en antropogen påverkan.

### 4.1 Projicerad framtida klimatutveckling

Som nämnts i avsnitt 1 är inte den framtida utvecklingen av klimatet förutsägbar i detalj på den tidsskala som är aktuell i analysen av säkerhet efter förslutning för förvar för radioaktivt avfall. Däremot finns mycket kunskap och projektioner av framtida klimatutveckling som ger värdefull information och ett spann inom vilket den framtida klimatutvecklingen förväntas ske. I avsnitt 3.3 i SKB (2014) beskrivs den samlade kunskapen om framtida klimatutveckling på tidsskalor från nuvarande århundrade upp till de kommande 100 000 åren. Sammanfattningsvis indikerar det nuvarande kunskapsläget att, på grund av mänskliga aktiviteter i kombination med avsaknad av kraftiga minima i den inkommande solstrålningen, den globala klimatutvecklingen under de närmaste 100 000 åren inte kommer att likna de senaste glaciationscyklerna, se t ex Berger och Loutre (2002) och Ganopolski et al. (2016). Istället väntas den nuvarande perioden av varmt (interglacialt) klimat att fortsätta under de kommande 50 000, eller kanske till och med 100 000 åren.

## 4.2 Frysning av betong

En studie av vilken temperatur som krävs för att porvattnet i betongbarriärerna ska kunna frysa har genomförts (Thorsell 2013). I den studien dras slutsatsen att betongen kan frysa om temperaturen på förvarsdjup sjunker under  $-3\text{ °C}$  (Thorsell 2013). I betong med porer helt fyllda med vatten kan inre frysning orsaka genomgående makrosprickor som luckrar upp betongen. Uppluckring av detta slag orsakar så allvarlig strukturell degradering av betongen att den inte kan förväntas vara intakt efter frysning och tining. Materialet sönderfaller till en sådan grad att dess funktion som diffusionsbarriär förloras, men det fungerar fortfarande som en sorptionsbarriär och, i begränsad omfattning, som en advektiv barriär.

Med utgångspunkt från Thorsell (2013) antas betongens egenskaper påverkas om temperaturen på förvarsdjup sjunker under  $-3\text{ °C}$  i SR-PSU, vilket kan jämföras med SAR-08 där betongen antogs påverkas först när temperaturen på förvarsdjup sjunker under  $-5\text{ °C}$ .

## 4.3 Första tidpunkt för frysning av betong på förvarsdjup

För att kunna bedöma potentialen för kallt klimat och permafrost i Forsmark under analysperioden genomfördes en modelleringsstudie inom SR-PSU (Brandefelt et al. 2013). Framtida variationer i inkommande solstrålning kan predikteras med god noggrannhet (Berger och Loutre 1991). Baserat på dessa prediktioner, där sommar-minima inträffar runt år 19 000 e Kr och 56 000 e Kr, fokuserade studien på de första 60 000 åren efter förslutning. I syfte att uppskatta det potentiella klimatet under dessa två perioder användes två välkända globala klimatmodeller och en stor uppsättning simuleringar genomfördes.

Koldioxidkoncentrationen i atmosfären antogs vara mellan 180 ppmv, vilket motsvarar koncentrationen vid den senaste istidens maximum för ca 20 000 år sedan, och 400 ppmv, vilket motsvarar dagens koncentration. I syfte att uppskatta den lägsta möjliga lufttemperaturen i Forsmark under de två perioderna av låg inkommande solstrålning på sommaren, beräknades osäkerheten i resultaten från klimatmodellsimuleringarna (se avsnitt 2.1.4 i SKB 2014, samt avsnitt 3.3 Brandefelt et al. 2013). För beräkning av potentialen för permafrosttillväxt i Forsmarksområdet, givet den uppskattade lägsta möjliga lufttemperaturen i Forsmark för de två perioderna, användes slutligen samma 2D permafrostmodell som användes i den senaste säkerhetsanalysen för SFK, SR-Site (se t ex Hartikainen et al. 2010).

Slutsatserna från den här studien var följande:

- Vid nästa solinstrålningsminimum, om 17 000 år, kan det inte uteslutas att temperaturen på förvarsdjup för både befintlig del av SFR och utbyggnaden når  $0\text{ °C}$ . Temperaturen på förvarsdjup kan dock inte nå  $-3\text{ °C}$  under denna period. Porvattnet i betongen i barriärerna antas därför *inte* kunna frysa under denna första period med kallt klimat.
- Vid solinstrålningsminimum om 54 000 år kan det inte uteslutas att temperaturen på förvarsdjup för både befintlig del av SFR och utbyggnaden når  $-3\text{ °C}$ . Porvattnet i betongen i barriärerna antas därför kunna frysa under denna senare period med kallt klimat.

I detta sammanhang är det viktigt att förtydliga att syftet med den här studien var att uppskatta den *tidigaste* tidpunkten vid vilken temperaturen på förvarsdjup kan nå  $-3\text{ °C}$  genom att göra antaganden om den *lägsta möjliga* lufttemperaturen i Forsmark för de två perioderna, samt om fördelaktiga förhållanden för permafrosttillväxt (bl a torra klimatförhållanden och torra markyfeförhållanden). En viktig faktor i detta sammanhang är de antaganden som görs om hur snabbt atmosfärens koldioxidkoncentration kan minska från dagens nivå (ca 400 ppmv) till tillräckligt låga nivåer för att permafrosttillväxt ska kunna ske. Dessa antaganden baseras på nuvarande kunskap om den globala kolcykeln (se avsnitt 2.3.2 samt kapitel 4 i Brandefelt et al. 2013). Slutsatsen i studien är att det skulle krävas att atmosfärens koldioxidkoncentration sjunker till 210 ppmv under de kommande 17 000 åren för att temperaturen på förvarsdjup ska kunna nå  $-3\text{ °C}$  vid nästa minimum i inkommande



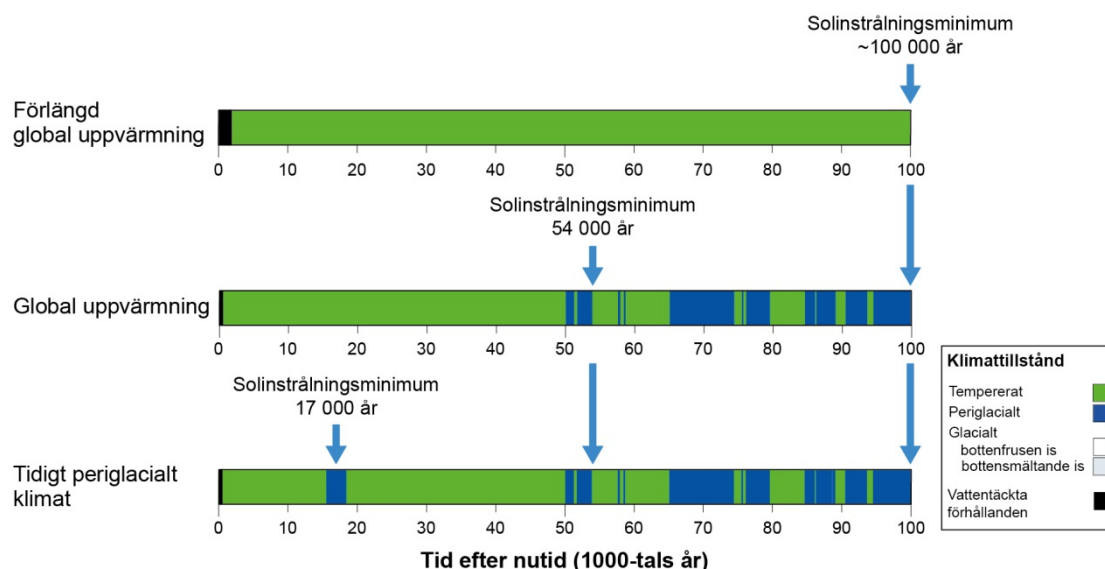
Kompletterande information om hantering av klimatscenerierna i ansökan om utbyggnad av SFR

solstrålning på sommaren. För att nå en så låg koncentration skulle det krävas att människans utsläpp av kol till atmosfären slutar i en närliggande framtid, samt att naturliga processer kan minska koncentrationen med nästan 200 ppmv på 17 000 år. Den minskningstakt som i så fall skulle krävas, från dagens förhöjda nivåer, motsvarar ungefär dubbla den takt som registrerats i iskärnor för den senaste övergången från ett interglacialt klimat för ungefär 100 000 år sedan (se kapitel 4 i Brandefelt et al. 2013). Detta bedöms därför inte rimligt att anta.

## 5 SR-PSU: Hantering av framtida klimatutveckling i scenarier för analysen av säkerhet efter förslutning

### 5.1 Klimatfall

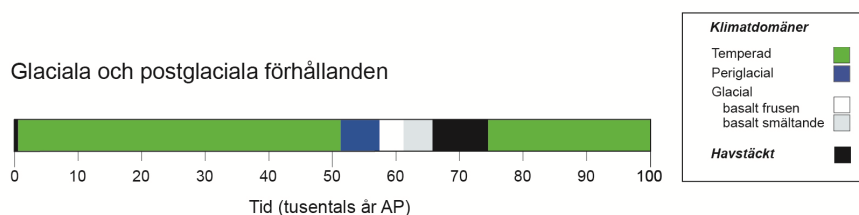
Såsom anges i de allmänna råden till SSMFS 2008:37 §§5-7, valdes de olika klimatutvecklingarna i SR-PSU så att de tillsammans belyser de mest betydelsefulla sekvenserna av klimatdomäner för förvarets säkerhet efter förslutning. Tre framtida klimatutvecklingar som alla baseras på antagandet att den nuvarande interglacialen fortsätter längre än den senaste interglacialen Eem inkluderades i scenarioanalysen (Figur 1). Klimatfallen med *tidigt periglacialt klimat*, *global uppvärmning* och *förlängd global uppvärmning* representerar spannet från ett snabbt till ett långsamt avtagande av den globala förhöjda medeltemperaturen. *Klimatfallet med global uppvärmning* bedöms som det mest troliga av dessa klimatfall. *Klimatfallet med tidigt periglacialt klimat*, vilket representerar ett snabbt temperaturavtagande, definierades med utgångspunkt från de studier av den första tidpunkten för kallt klimat och permafrost i Forsmark som beskrivs i avsnitt 4 ovan. Detta fall inkluderar således den tidigaste periglaciala perioden runt 19 000 e Kr. *Klimatfallet med förlängd global uppvärmning* representerar ett långsamt temperaturavtagande. Detta fall definierades med utgångspunkt från de studier som indikerar att den nuvarande perioden av varmt klimat kan komma att fortsätta under de kommande 100 000 åren om den atmosfäriska koldioxidkoncentrationen fortsätter att vara betydligt högre än 280 ppmv (t ex Loutre och Berger 2000, Archer och Ganopolski 2005, Cochelin et al. 2006 och Ganopolski et al. 2016).



**Figur 1.** Utvecklingen av klimatrelaterade förhållanden i Forsmark som en succession av klimattillstånd och vattentäckta perioder för de klimatfall som ingår i referensutvecklingen.

Kompletterande information om hantering av klimatscenerierna i ansökan om utbyggnad av SFR

Utöver dessa klimatutvecklingar inkluderades en framtida klimatutveckling som inkluderar en inlandsis i Forsmark under de kommande 100 000 åren, *Scenariot med glaciation och postglaciala förhållanden* (Figur 2). Denna klimatutveckling bedöms som mindre sannolik än klimatutvecklingen i de tre fallen med förlängda interglaciala förhållanden, men inkluderas eftersom det inte går att utesluta att en inlandsis bildas under de kommande 100 000 åren. Baserat på befintlig kunskap om framtida klimatutveckling (se kapitel 2 i SKB 2014) antas den första glaciationen inträffa under den senare delen av analysperioden. Scenariot med glaciation och postglaciala förhållanden baseras på *Klimatfallet glaciationscykeln Weichsel*, vilket är SKB:s rekonstruktion av den senaste istidscykeln. Då utvecklingen av permafrost redan vid 9 000 e Kr i detta klimatfall inte är i enlighet med befintlig kunskap och de studier som redovisas i avsnitt 4, inkluderades inte den utvecklingen i *Scenariot med glaciation och postglaciala förhållanden*. En första period av kallt klimat och permafrosttillväxt i Forsmark runt 19 000 e Kr, såsom antas i *Klimatfallet med tidigt periglacialt klimat*, kan inte uteslutas under de förhållanden som antas i *Scenariot med glaciation och postglaciala förhållanden*. Scenariot har dock konstruerats för att renodlat belysa effekten av en glaciation, varför radionuklidinventariet pessimistiskt endast antogs påverkas av radioaktivt sönderfall under tiden från förslutning tills inlandsisen rycker fram över platsen (detta illustrerades felaktigt som en lång period av periglaciala förhållanden i figur 9-44 i SKB 2015). Då analysen av huvudscenariot visat att de högsta doserna fås under tempererade förhållanden antas tempererade förhållanden råda från att inlandsisen har ryckt tillbaka och landhöjningen har lyft markytan ovan förvaret över havsnivån.



**Figur 2.** Utvecklingen av klimatrelaterade förhållanden i Forsmark som en succession av klimattillstånd och vattentäckta perioder för *Scenariot med glaciation och postglaciala förhållanden*.

## 5.2 Granskning av PSU:s klimatfall

Studierna av periglacialt klimat i SR-PSU, Brandefelt et al. (2013), har sakgranskats av två världsledande klimatforskare inom området (Dr. Marie-France Loutre vid Université catholique de Louvain Earth and Life Institute, Georges Lemaître Centre for Earth and Climate Research (TECLIM), Belgien, samt Dr. Guido Vettoretti vid Department of Physics, University of Toronto, Kanada). Detta gäller även sammanställningen och urvalet av klimatfall för SR-PSU, då klimatrapporten (SKB 2014) sakgranskats av fem granskare, däribland Prof. Andrey Ganopolski vid Potsdam Institute for Climate, Tyskland.

## 5.3 Hantering av klimatscenerier i risksummeringen

I huvudscenariot inkluderades två klimatvarianter, *Global uppvärmning* och *Tidigt periglacialt klimat*. Dessa två täcker in de relevanta osäkerheterna i den framtida utvecklingen av permafrost vid SFR. Båda dessa varianter bedömdes som rimliga och den variant som gav högst dos i varje tidssteg användes vidare i risksummeringen (avsnitt 10.3 i SKB 2015).

De två återstående klimatfallen, *Scenariot med förlängd global uppvärmning* och *Scenariot med glaciation och postglaciala förhållanden*, inkluderades som restscenarier i analysen.

Kompletterande information om hantering av klimatscenerierna i ansökan om utbyggnad av SFR

Dessa två klimatfall täcker in extremerna för spännvidden inom vilken framtida klimat och klimatrelaterade processer kan variera och bedöms som mindre sannolika än klimatutvecklingen i huvudscenariots variant med *Global uppvärmning*. Även dessa bedöms dock som rimliga framtida utvecklingar.

Scenariot med glaciation och postglaciala förhållanden har trots att det benämns som restskenario utvärderats mot risk. I *Scenariot med glaciation och postglaciala förhållanden* antogs pessimistiskt att radionuklidinventariet endast påverkas av radioaktivt sönderfall under tiden från förslutning tills inlandsisen rycker fram över platsen. Därför var det inte relevant att kombinera det med andra mindre sannolika scenarier i vilka utsläpp sker tidigare. Utvärdering mot risk för detta klimatscenario beskrivs i avsnitt 10.4 i SKB (2015). Den högsta dosen för detta scenario är 2.8 uSv och är därmed under 14 uSv vilket motsvarar riskkriteriet  $10^{-6}$ .

Dosen i *Scenariot med förlängd global uppvärmning* är lägre än för de två klimatvarianterna i huvudscenariot under de första 50 000 åren när maximala risken inträffar (tabell 1). Eftersom *Scenariot med förlängd global uppvärmning* har tempererade klimatförhållanden under hela analysperioden ger detta scenario högre dos än de två varianterna av huvudscenariot under perioder med periglaciala förhållanden i huvudscenariot (Figur 3). Under dessa periglaciala perioder är dock dosen i *Scenariot med förlängd global uppvärmning* som mest 4,1  $\mu\text{Sv}$ , vilket är lägre än den maximala dosen som inträffar under de första 50 000 åren i *Scenariot med global uppvärmning*. Den summerade risken för de mindre sannolika scenarierna är också störst under de första 50 000 åren av analysperioden (Figur 10-3 i SKB 2015). Att *scenariot med förlängd global uppvärmning* ger högre dos under de senare periglaciala perioderna påverkar alltså inte uppskattningen av den högsta risken för SFR.

Samtliga av de fyra framtida klimatutvecklingarna borde ha ingått i huvudscenariot, och risken borde ha jämförts med riskkriteriet separat för var och en av dessa utvecklingar. Det ska dock noteras att den högsta dosen för de scenarier som hanterades som restskenarier, *Förlängd global uppvärmning* och *Glaciation och postglaciala förhållanden*, inte överstiger den högsta dosen för de två varianterna av huvudscenariot under den del av analysperioden när högst risk erhålls (Tabell 1). Slutsatsen av analysen, att ett utbyggt SFR uppfyller myndighetsföreskrifternas kriterier med avseende på säkerhet efter förslutning, skulle därför inte påverkats även om risk hade beräknats separat för alla klimatscenarier.

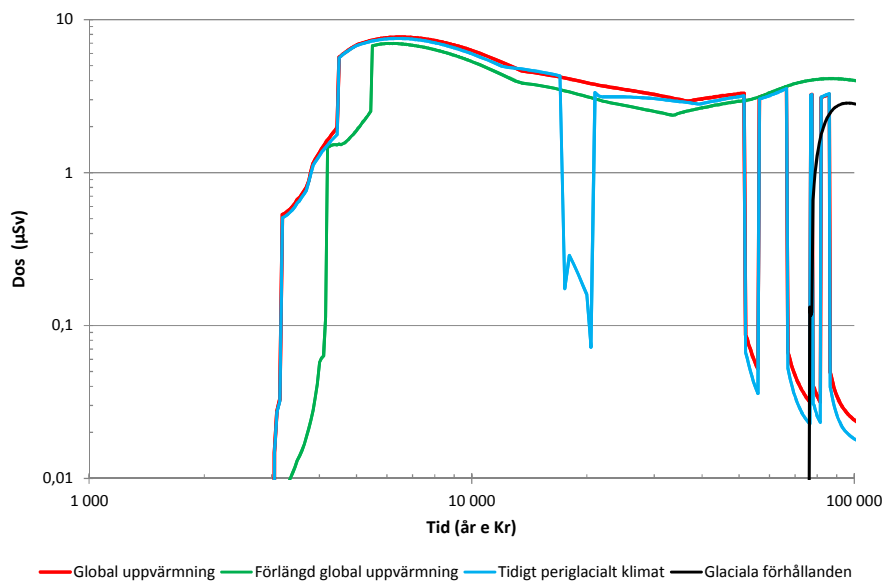
**Tabell 1. Maximal dos för de olika klimatscenerierna, för hela analysperioden och för de första respektive sista 50 000 åren av analysperioden.**

Klimatfall	Global uppvärmning	Förlängd global uppvärmning	Tidigt periglacialt klimat	Glaciala förhållanden
Max dos de första 50 000 åren ( $\mu\text{Sv}$ )	7,7	7,0	7,5	0
Max dos de senare 50 000 åren ( $\mu\text{Sv}$ )	3,6	4,1	3,5	2,8
Max dos hela analysperioden ( $\mu\text{Sv}$ )	7,7	7,0	7,5 <sup>1</sup>	2,8
År (e Kr) då max dos för hela analysperioden inträffar	6500	6 150	6 450	94 400

<sup>1</sup> För klimatfallet *Tidigt periglacialt klimat* presenteras i SKB (2015) dosen enbart för den periglaciala perioden mellan 17 500-20 500. Här presenteras dock resultat för hela analysperioden för att enklare kunna jämföra alla klimatfall.



Kompletterande information om hantering av klimatscenerierna i ansökan om utbyggnad av SFR



**Figur 3.** Dos från de fyra klimatscenerierna i SR-PSU, över tid. För klimatfallet *Tidigt periglacialt klimat* presenteras i SKB (2015) dosen enbart för den periglaciala perioden mellan 17 500-20 500 e Kr, eftersom denna periglaciala period utgör skillnaden mellan scenerierna *Tidigt periglacialt klimat* och *Global uppvärmning*. Här presenteras dock resultat för hela analysperioden för att enklare kunna jämföra alla klimatfall.

## 6 Slutsatser

SKB anser att hanteringen av framtida klimattillstånd i SR-PSU, med hänsyn tagen till den första möjliga tidpunkten för periglacialt och glacialt klimattillstånd, är korrekt ur ett vetenskapligt perspektiv, samt ändamålsenlig för syftet i säkerhetsanalysen. Detta styrks också av världsledande experter som har granskat SKB:s studier. För risksummeringen borde risk för varje klimatfall ha beräknats i SR-PSU, men SKB anser att detta förtydligande klargör att enskilda riskkurvor inte skulle påverka slutsatsen från SR-PSU, då de klimatfall som inte summerats till risk ger lägre dos än de inkluderade klimatfallen under de perioder när maximal risk erhålls.

## Referenser

- Archer D, Ganopolski A, 2005.** A movable trigger: Fossil fuel CO<sub>2</sub> and the onset of the next glaciation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6, Q05003.  
doi:10.1029/2004GC000891
- Berger A, Loutre M F, 1991.** Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews* 10, 297–317.
- Berger A, Loutre M F, 2002.** An exceptionally long interglacial ahead? *Science* 297, 1287–1288.
- Brandefelt J, Näslund J-O, Zhang Q, Hartikainen J, 2013.** The potential for cold climate conditions and permafrost in Forsmark in the next 60,000 years. SKB TR-13-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Cochelin A-S B, Mysak L L, Wang Z, 2006.** Simulation of long-term future climate changes with the green McGill paleoclimate model: the next glacial inception. *Climatic Change* 79, 381–401.

Kompletterande information om hantering av klimatscenerierna i ansökan om utbyggnad av SFR

**Emborg M, Jonasson J-E, Knutsson S, 2007.** Långtidsstabilitet till följd av frysning och tining av betong och bentonit vid förvaring av låg-och medelaktivt kärnavfall i SFR 1. SKB R-07-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Ganopolski A, Winkelmann R, Schellhuber H J, 2016.** Critical insolation–CO<sub>2</sub> relation for diagnosing past and future glacial inception. Nature 529. doi:10.1038/nature16494

**Hartikainen J, Kouhia R, Wallroth T, 2010.** Permafrost simulations at Forsmark using a numerical 2D thermo-hydro-chemical model. SKB TR-09-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Loutre M F, Berger A, 2000.** Future climatic changes: are we entering an exceptionally long interglacial? Climatic Change 46, 61–90.

**Näslund J.O, Brandefelt J, Claesson Liljedahl L, 2013.** Climate considerations in long-term safety assessments for nuclear waste repositories. Ambio 42, 393–401.

**SKB, 2006.** Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2008.** Safety analysis SFR 1. Long-term safety. (SFR 1. Slutlig säkerhetsrapport, pärm 2). SKB R-08-130, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2010.** Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-49. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2011.** Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2014.** Climate and climate related issues for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2015.** Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR. Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Thorsell P-E, 2013.** Studier av frysningsegenskaper hos betong från 1 BMA. SKB P-13-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.