



DokumentID
1396769

Ärende

Strålsäkerhetsmyndigheten
Att: Ansi Gerhardsson
171 16 Stockholm

Handläggare
Jens-Ove Näslund
Er referens
SSM2011-2426-107
Kvalitetssäkrad av
Olle Olsson
Allan Hedin
Saida Engström
Godkänd av
Martin Sjölund
Kommentar
Granskning, se SKBdoc id 1387259

Sida
1(13)
Datum
2013-05-17
Ert datum
2013-03-15
Kvalitetssäkrad datum
2014-09-30
2014-09-30
2014-09-30
Godkänd datum
2014-09-30

Svar till SSM på begäran om komplettering angående klimatfrågor

Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, har i skrivelse till Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, begärt komplettering av ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle angående klimatfrågor på följande fyra områden:

- 1. En redovisning av felgränser inom det antagna klimatscenarioet. Dessa felgränser bör sedan ligga till grund även för andra beräkningar såsom för vattenflöden, erosion och permafrost.*
- 2. En redovisning av varför den glaciala erosionen betraktas som försumbar i Forsmarksområdet.*
- 3. SKB bör tydligt redovisa hur beräkningarna för permafrost har gått till samt lägga till rimliga felgränser för ingångsdata. Även ett scenario rörande permafrost där även hänsyn tas till en tiofald högre glacial erosion bör redovisas.*
- 4. Ett förtydligande om varför maximal istjocklek är satt till 3400 m i Forsmark samt vad som räknas som extremfall gällande framtida istjocklek.*

SKB:s svar på frågeställning 1,2 och 3 lämnades i juni 2013. I juni 2013 gavs även en statusrapport på fråga 4. I nedanstående besvaras nu frågeställning 4. Därmed är alla frågor besvarade.

- 1. En redovisning av felgränser inom det antagna klimatscenarioet. Dessa felgränser bör sedan ligga till grund även för andra beräkningar såsom för vattenflöden, erosion och permafrost.***

SKB:s svar (svar lämnat i juni 2013)

Felgränsen för temperaturkurvan för klimatscenarioet baserat på rekonstruktionen av den senaste glaciala cykeln finns redovisad i SKB (2010), appendix 1 avsnitt A1.5.3. Osäkerheten anges här till ± 6 grader för perioderna med störst osäkerhet, upp till 4-5 grader för större delen av kurvan, och för vissa delar av kurvan till mindre än 4 grader. I den fortsatta analysen av permafrost i SR-Site antas pessimistiskt att hela kurvan har en osäkerhet på ± 6 grader. Resonemanget och informationen som resulterar i denna feluppskattning finns redovisat i detalj i SKB (2010),

Svensk Kärnbränslehantering AB
Box 250, 101 24 Stockholm
Besöksadress Blekholmstorget 30
Telefon 08-459 84 00 Fax 08-579 386 10
www.skb.se
556175-2014 Säte Stockholm

appendix 1. Dessutom genomförs i permafrostsimuleringarna ett flertal känslighetsstudier där ännu större variation i lufttemperatur analyseras (Hartikainen et al. 2010 avsnitt 4.2.2, SKB 2010, avsnitt 3.4.4, SKB 2011, avsnitt 12-3-2).

I SSM:s begäran om komplettering beskrivs inte den metodik som kring framtagandet av en temperaturkurva för senaste glaciala cykeln helt korrekt. SSM skriver att SKB använt en inlandsismodell med syftet att förbättra en temperaturkurva. Så var inte fallet. Inlandsismodellen användes med det enda syftet att simulera isutbredning under Weichselperioden. I denna process behöver modellen kalibreras för att bättre matcha geologisk information om isutbredningar under olika faser av istiden. Denna kalibrering gjordes genom ett fåtal systematiska förändringar av lufttemperaturkurvan, se SKB (2010, avsnitt A1.2). SSM skriver ”När då resultaten av is-modelleringen nyttjas för att kalibrera temperaturkurvan så krävs en avancerad analys av hur osäkerheter förs vidare genom beräkningarna.” Detta är inte korrekt. Inlandsismodellen användes inte för att kalibrera temperaturkurvan utan temperaturkurvan användes för kalibrering av inlandsismodellen. Från det lufttemperaturfält som blev resultatet av kalibreringen av isen, och dess variation över tiden, har sedan data extraherats för Forsmarksområdet, och denna kurva valdes att användas som temperaturkurva för Forsmarksområdet för senaste glaciala cykeln. Denna process gör att man i viss mån kan anse kurvan vara regionalt anpassad, t ex till den altitud som platsen har.

Att det finns en stor osäkerhet i övergång från syreisotoper i den grönländska iskärnan till lufttemperatur är välkänd kunskap, och denna finns redovisad i TR-10-40 appendix 1 avsnitt A1.5. Även att inlandsismodellen innehåller osäkerheter är väl känt, vilket redovisas i SKB (2010, avsnitt 3.1.7). SKB bedömer dock att det förmodligen inte vore möjligt, eller ens rättvisande, att försöka genomföra en meningsfull överföring av osäkerheter ända från iskärnans syreisotoper till en lufttemperatur i Forsmark, även om de flesta av dessa osäkerheter finns redovisade i SKB (2010). Resultat skulle i sämsta fall till och med kunna inge en falsk bild av noggrannhet. Ett annat angreppssätt som bedömts som bättre (och som inte noterats i SSM:s begäran om komplettering), är att genomföra en validering av den resulterande temperaturkurvan från inlandsismodellen mot oberoende paleodata och klimatmodelldata på lufttemperatur i Skandinavien under olika perioder av Weichselglaciationen. En sådan validering presenteras i SKB (2010, avsnitt A1.5.2). Liksom redovisat i SKB (2010) är det här viktigt att inse att även paleodata och modelldata har sina osäkerheter. Slutsatsen från jämförelsen var att den temperaturkurva som erhållits via simuleringen av inlandsisen under Weichsel är samstämmig med, eller ligger något under, temperaturerna från paleodata och modelldata. Denna jämförelse, samt hänsyn tagen till sättet som temperaturkurvan konstruerats på, resulterade i en uppskattning av osäkerheten i temperaturkurvan såsom beskrivet nedan från SKB (2010, avsnitt A1.5.3 ”*Estimated temperature uncertainty and treatment of this uncertainty in SR-Site*”). Här beskrivs även vilka andra delar av beräkningarna i SR-Site som påverkas av denna osäkerhet. Denna skrivning, tillsammans med förtydligandena ovan, bedöms svara på SSM:s begäran.

”Based on how the air temperature curve has been constructed, on the comparison against Fennoscandian last glacial cycle stadial and interstadial proxy data, and on remaining uncertainties associated with the temperature curve that have not been quantified above, it is here pessimistically estimated that the uncertainty in the reconstructed Forsmark region temperature curve (Figure A1-3) is not larger than 6°C for the periods with largest uncertainties. Furthermore, an uncertainty of up to c. 4–5°C is estimated for the major part of the curve, and for some parts of the curve, such as for the Holocene and the Eemian, smaller than 4°C.

In SR-Site, the uncertainties in the reconstructed temperature curve for the Forsmark region mainly affect the permafrost modelling, see /Hartikainen et al. 2010/ and Section 3.4.4 and 5.5.3 and /Vidstrand et al. 2010/. In the permafrost simulations performed for Forsmark, see /Hartikainen et al. 2010/, Section 3.4.4 and 5.5.3, the uncertainties in the air temperature curve are covered by a

range of sensitivity tests specifically on the air temperature curve and on surface conditions (for the calculation of ground surface temperatures). In some of the sensitivity tests, the entire air temperature curve reconstructed for the last glacial cycle (Figure A1-3) was lowered (and raised) by 6°C, in accordance with the estimated maximum uncertainty. This was also done in combination with uncertainties in other parameters of importance for the development of permafrost, see /Hartikainen et al. 2010/ and Section 3.4.4. Other sensitivity tests on the air temperature curve for permafrost simulations covered a temperature range significantly wider than the estimated uncertainty described in this section, up to a 16°C lowering of the air temperature curve in Figure A1-3, see /Hartikainen et al. 2010/ and Section 3.4.4.

Uncertainties in the original GRIP temperature curve have a direct effect only on the ice sheet modelling (Section 3.1.4), but the uncertainty is here to a large extent taken care of by the ice sheet modelling process (in which the ice sheet configurations during stadials periods, when the error is largest, were calibrated against known ice-marginal positions)."

I tillägg till detta kan nämnas att temperaturkurvan, och dess skattade osäkerhet, i SR-Site inte används vid beräkningarna av erosion eller vattenflöden.

2. En redovisning av varför den glaciala erosionen betraktas som försumbar i Forsmarksområdet.

SKB undersökte tidigare möjligheten att göra en kompletterande GIS-studie för att illustrera det som förs fram i svaret nedan. Dock visade det sig att detta inte var genomförbart på det sätt som planerats, varför denna tidigare aviserade studie inte kommer att genomföras. Svaret nedan, vilket lämnades i juni 2013, utgör därför SKB:s slutliga svar på fråga 2..

SKB:s svar (svar lämnat i juni 2013)

Denna fråga är delvis besvarad under svaret till fråga 3 nedan. Där summeras huvudargumenten för att den glaciala erosionen förväntas vara låg i Forsmarksområdet (med referenser till relevanta delar i SR-Site). Under svaret till fråga tre redovisas även vad en tio gånger så hög glacial erosionshastighet än den som SKB redovisat i SR-Site skulle ha för konsekvenser i termer av frysning av kärnbränsleförvaret.

Resultatet av glacial erosion från åtskilliga omfattande nedisningar återfinns i landskapet vid Forsmark idag. Områdets berggrundsmorfologi präglas fortfarande av en gammal subkambrisk denudationsyta, bara till mindre grad påverkad av glacial erosion från Kvartära nedisningar (Olvmo 2010). Den flacka topografin i området gör att glacial erosion inte varit en effektiv process under kvartärperioden fram till idag, och fortsatt flack topografi i framtiden skulle betyda samma sak. Vid platsen för kärnbränsleförvaret finns inga större topografiska sänkor eller större sprickzoner vilka skulle gynna en högre glacial erosionshastighet.

SKB anser att det inte är direkt tillämpligt att överföra erosionshastigheten från glaciärer i alpina miljöer till förhållanden under en inlandsis i Forsmark. Det första fallet innebär en väsentligt annan erosionsmiljö med bl.a. brantare topografi vilket påverkar isrörelsens storlek och därmed erosionshastigheten.

SKB har redovisat förväntad storlek på glacial erosion vid platsen för Kärnbränsleförvaret (SKB 2010, avsnitt 3.5.4). Eftersom förvaret är lokaliserat på en urbergsyta med låg relief, och dessutom inte i en lokal sänka eller större sprickzon, förväntas erosionen på platsen vara låg, 1-2 m per glacial cykel. I linje med detta uppskattades den totala sänkningen av berggrundsytan under de kommande 1 miljon åren till omkring 20 m. Det närmaste området med kraftigare glacial erosion ligger idag ca 15 km sydost om förvarsplatsen. I topografiska sänkor förväntas den glaciala

erosionen, i detta område, kunna uppgå till mer än 10 m per glacial cykel (SKB 2010, avsnitt 3.5.4, Olvmo 2010). Mot bakgrund av avsaknaden av topografiska sänkor och större sprickzoner vid förvarsplatsen, samt den hittills mycket låga denudationen i denna del av Sverige under de senaste årmiljonerna (några få tiotal m), se SKB (2010, avsnitt 3.5.4) och referenser däri, menar SKB att ett fall med en tiofalt högre glacial erosion vid förvarsplatsen från första framtida glaciala cykel bör ses som hypotetiskt.

Om landskapet hade varit mer kuperat kunde situationen ha varit annorlunda. Detta kan ses t ex i det område som ligger 15 km sydost om förvarsplatsen där den framtida glaciala erosionen i vissa delar av SKB uppskattats kunna uppgå till mer än 10 m per glacial cykel (SKB 2010 avsnitt 3.5.4, Olvmo 2010). Även om man skulle tänka sig att detta område med högre glacial erosion i framtiden skulle växa mot förvarsplatsen genom bakåtgripande glacial erosion, så är sträckan detta skulle behöva ske över, för att förvarsplatsen skulle nås, omfattande. Det är sannolikt att åtskilliga glaciala cykler skulle behövas för att detta skulle kunna ske. Om detta område skulle växa och nå förvaret efter ett flertal glaciala cykler, skulle berggrunden vid förvarsplatsen inte börja påverkas av den kraftigare glaciala erosionen förrän vid denna tidpunkt. Det skulle ta ytterligare flera glaciala cykler innan denna kraftigare glaciala erosion skulle påverka t ex frysdjup på ett sätt som påverkar förvaret (se svar på fråga 3). I detta avseende, och mot bakgrund av en även i detta fall initialt förväntad låg erosionshastighet vid själva förvarsplatsen, ser SKB det efterfrågade och redovisade fallet med tiofalt högre glacial erosion vid förvarsplatsen (fråga 3) från första framtida glaciala cykel som mycket osannolikt.

3. SKB bör tydligt redovisa hur beräkningarna för permafrost har gått till samt lägga till rimliga felgränser för ingångsdata. Även ett scenario rörande permafrost där även hänsyn tas till en tiofalt högre glacial erosion bör redovisas.

SKB:s svar (svar lämnat i juni 2013)

Redovisning av beräkningar av permafrost

SKB har i detalj redovisat hur 2D beräkningarna av permafrost är genomförda i Hartikainen et al. (2010). Den konceptuella uppsättningen av modellen, inklusive modellomän och grundläggande indata, redovisas i kapitel 2. Den numeriska modellen presenteras i kapitel 3 och de olika numeriska simuleringarna i kapitel 4. Delar av innehållet och resultaten från denna rapport användes sedan som underlag till permafrostavsnitten i SR-Sites Klimatrapport (SKB 2010, avsnitten 3.4.4, 4.5.3, 5.1.4 och 5.5.3), och i nästa steg i analysen av buffertfrysning i Huvudrapporten (SKB 2011, avsnitt 12.3). I SKB (2010, avsnitt 3.4.4) redovisas även de permafrostsimuleringar som genomförts i 1D. Anledningarna till att vi har tilltro till den använda permafrostmodellen har förtydligats i ett separat svar på SSM:s begäran om komplettering rörande dokumentation och kvalitetssäkring av koder (SKBdoc 1396660).

Felgränser på indata

Indata till permafrostmodellen kommer dels från platsundersökningsprogrammet i Forsmark, dels från klimatforskningsprogrammet och dels från programmet för ytekosystem. Alla dessa indata, inklusive dess felgränser, presenteras i Hartikainen et al. (2010 appendix A till J) med referenser på varifrån de är hämtade. Indata på lufttemperatur, samt dess uppskattade felgräns, redovisas även i detalj i SKB (2010, appendix 1).

I Hartikainen et al. (2010) presenteras sedan systematiska känslighetsstudier på felgränserna av de indata som påverkar temperaturfältet och bildningen av permafrost, dels enskilt och dels i olika kombinationer. Känslighetsstudierna inkluderar ett fall där alla indata valts, inom osäkerhetsgränserna, så att de maximalt gynnar uppkomst av permafrost, se Hartikainen et al. (2010, avsnitt 5.2). Resultatet från detta fall användes i analysen av buffertfrysningsscenarioet i SR-Site (SKB 2011, avsnitt 12.3).

Permafrost med tiofalt högre glacial erosion

Som komplettering till ansökan redovisas en värdering av permafrostdjup för den mycket pessimistiska situationen med tio gånger högre glacial erosion, vilket innebär 10-20 m glacial erosion ovan förvaret per glacial cykel istället för 1-2 m. Detta skulle kunna uttryckas som att det maximala permafrostdjupet når 10-20 m djupare per cykel. I tabell 1 redovisas resulterande maximala djup för referensutvecklingen, inklusive deras maximala osäkerhet, i det fall permafrosten skulle nå 20 m djupare per glacial cykel.

Det första som kan noteras här är att den tio gånger högre glaciala erosionen inte påverkar de maximala djupen under den första kommande glaciala cykeln av referensutveckling (de första 120 000 åren), eftersom den mäktigaste permafrosten under en glacial cykel uppnås *före* första perioden med inlandsis och glacial erosion över förvaret, se SKB (2010, figur 4-34). Efterföljande perioder med permafrost under denna första glaciala cykel har ett ca 60 m grundare permafrost- och frysdjup (SKB 2010, figur 4-27), och skulle därför, trots en hypotetisk glacial erosion på upp till 20 m, inte resultera i djupare permafrost än den som rådde före perioden med glacial erosion. För efterföljande sju glaciala cykler (Tabell 1), har markytan i detta fall däremot sänkts 20 m per glacial cykel vid varje tillfälle av maximalt permafrostdjup. Mot slutet av den analyserade perioden på 1 miljon år skulle därför permafrost tränga ner ca 140 m djupare än under den första glaciala cykeln (Tabell 1).

Slutsatserna av att anta en tio gånger högre glacial erosion blir enligt Tabell 1:

- i) Ingen påverkan på maximala permafrostdjup, frysdjup eller djup för -4°C isotermin under den första framtida glaciala cykeln jämfört med vad som redovisats i SR-Site.
- ii) För efterföljande glaciala cykler når frysning av grundvatten och buffertleran 20 m närmare förvaret per glacial cykel.
- iii) Vid det mycket pessimistiska antagandet att alla osäkerheter satts i läget mest gynnsamt för permafrost innebär detta att frysning av grundvatten skulle kunna ske på förvarsdjup från och med glacial cykel nummer 3.
- iv) Vid samma pessimistiska antagande innebär det även att -4°C -isotermin (fryskriteriet för buffertleran) skulle kunna nå förvarsdjup, och buffertleran runt kapslarna skulle frysa, i slutet av analysperioden på 1 miljon år (under glacial cykel nummer 8).

Värt att notera i sammanhanget är att i det fall grundvatten i bufferterosionskaviteter fryser så beräknas ett maximalt tryck på 26-27 MPa uppstå (SKB 2011, avsnitt 12.3, SKB 2010, appendix 3), vilket är avsevärt lägre än det kritiska tryck för kapselkollaps som beskrivs i scenariet för kapselkollaps på grund av isostatiskt tryck (SKB 2011, avsnitt 12.7.2). Ytterligare värt att notera är att buffertleran återfår sina egenskaper efter att den utsatts för frysning och tining (Birgersson et al. 2010).

Analysen ovan innebär att den osäkerhet som uppskattats för temperaturkurvan för referensutvecklingen, baserad på den senaste glaciala cykeln, och analyserats vid permafrostsimuleringarna, tillämpas på en mycket lång framtida period. Denna enkla analys ger dock en generell bild av vad som förväntas vid en hypotetisk tio gånger högre glacial erosion vid själva förvarsplatsen.

I tillägg till den verifikation av permafrostmodellen som redovisats i Hartikainen et al. (2010) avsnitt 3.6, planeras ytterligare utvärdering av den version av modellen som användes i SR-Site att genomföras vid platsen för Greenland Analogue Project (GAP). Resultaten från denna utvärdering planeras vara tillgängliga under första halvåret 2014.

Tabell 1. Djup för permafrost, frusen mark och -4°C -isotermer (fryskriteriet för bentonit) med en hypotetisk glacial erosion på 20 m per glaciationscykel ovan kärnbränsleförvaret. Osäkerhetsintervallet på djupen baseras på ett mycket pessimistiskt valt fall där alla osäkerheter är satta i läget mest gynnsamt för permafrosttillväxt, se texten samt SKB (2010, avsnitt 4.5.3). Eftersom ingen glacial erosion sker innan tidpunkten för maximalt permafrostdjup under första glaciala cykeln, se texten, så är data i första raden desamma som redovisats i SKB (2010, tabell 5-11). Siffror i fetstil motsvarar förvarsdjup eller djupare.

Glaciala cykel nr (tusental år efter nu)	Max permafrostdjup (0°C graders isotermer) (m) [osäkerhetsintervall]	Max frysdjup grundvatten (m) [osäkerhetsintervall]	Max djup för -4°C -isotermer (fryskriterium för bentonit) (m) [osäkerhetsintervall]
1 (0-120)	259 m [463 m]	246 m [422]	148 m [316]
2 (120-240)	279 [483]	266 [442]	168 [336]
3 (240-360)	299 [503]	286 [462]	188 [356]
4 (360-480)	319 [523]	306 [482]	208 [376]
5 (480-600)	339 [543]	326 [502]	228 [396]
6 (600-720)	359 [563]	346 [522]	248 [416]
7 (720-840)	379 [583]	366 [542]	268 [436]
8 (840-960)	399 [603]	386 [562]	288 [456]

4. Ett förtydligande om varför maximal istjocklek är satt till 3400 m i Forsmark. SSM önskar även ett förtydligande angående på vilket sätt Saale-glaciationen används för att kvantifiera osäkerheter i referensscenariot med Weichsel-glaciationen, och hur det osannolika fallet förhåller sig till det extrema. SSM undrar vidare huruvida extrema fall kan påverka konstruktionsförutsättningar.

SKB:s svar

SKB gav i juni 2013 en statusrapport som delvis besvarade frågan. Statusrapporten återges nedan (avsnitt A). Därefter ges en sammanfattning av resultaten av den kompletterande studie som nu genomförts (avsnitt B) och slutligen SKB:s slutsatser kring maximal istjocklek och associerad ökning av hydrostatiskt tryck vid Forsmark för de kommande en miljon åren (avsnitt C).

A. Statusrapport lämnad i juni 2013

Förtydligande om varför maximal istjocklek är satt till 3400 m i Forsmark

Den i SR-Site redovisade maximala förväntade istjockleken över Forsmark, 3400 m, baseras på den största inlandsis som täckt Skandinavien under de senaste drygt 2 miljoner åren, se SKB (2010 avsnitt 5.4) samt SKB (2011, avsnitt 12.7.2). Siffran kommer från simuleringar av inlandsisen under Saale-perioden (Lambeck et al. 2006) samt från SKB:s simuleringar av denna inlandsis (SKB 2010, avsnitt 5.4.2). Rekonstruktionen av Lambeck et al. (2006) gav en något större istjocklek och värdet från denna simulering valdes därför för den vidare analysen (SKB 2010, tabell 5-6, SKB 2011, tabell 12-2).

I illustrativt syfte redovisades i SR-Site även observerade maximala istjocklekar från Östantarktis och maximala istjocklekar på andra platser erhållna från modellsimuleringar. Båda dessa ger värden på omkring 4500 m. I simuleringarna av Saale-isen (Lambeck et al. 2006) gäller detta värde dock inte för Forsmarksområdet, utan för ett helt annat område i Arktis. Det är här viktigt att

konstatera att det är de lokala förhållandena vid förvaringsplatsen som ska användas i analysen, och inte förhållanden vid andra platser.

Förtydligande angående på vilket sätt Saale-glaciationen används för att kvantifiera osäkerheter i referensscenariot med Weichsel-glaciationen

I SR-Site redovisas en simulerad maximal istjocklek under Weichselglaciationen på 2900 m (SKB 2010, tabell 5-6, SKB 2011, tabell 12-2). För att täcka in tänkbara framtida fall med mycket stora inlandsisar anser SKB att inlandsisen under Saale-perioden är lämplig att använda som analog situation, eftersom detta är den största is man känner till som täckt Skandinavien. I analysen av kapselkollaps orsakad av höga isostatiska tryck används därför inte den maximala istjockleken under Weichselperioden, utan istället den maximala istjockleken under Saaleglaciationen. Istjockleken under Saale-glaciationen har därför *inte* strikt använts för att kvantifiera osäkerheten i referensscenariot med Weichsel-glaciationen, utan istället använts som ett eget mått på tänkbara maximala istjocklekar som kan uppstå i ett en miljon års perspektiv. Detta är i enlighet med metodiken för SR-Site, där osäkerheter som inte fullt ut hanteras i referensutvecklingen tas om hand i de olika scenarieanalyserna.

Kan extrema fall påverka konstruktionsförutsättningarna?

Denna fråga diskuteras i SKB:s svar på fråga 8 i SSM:s begäran om kompletterande information om konstruktionsförutsättningar (SKBdoc 1395038).

Planerad kompletterande studie

I och med att Saale-glaciationen utgör en god analog för framtida maximala istjocklekar över Forsmarksområdet, planeras en kompletterande kombinerad klimat- och inlandsismodellstudie av denna glaciation. Studien kommer att utföras under delar av 2013 och 2014, och fokuserar på fasen av maximal Saalenedisning under marina isotopstadium 6, för 140 000 år sedan. Ett huvudsyfte är att med klimat- och inlandsissimuleringar beskriva realistiska maximala istjocklekar under denna period, för hela Saale-isen inklusive Forsmarksområdet. Ett annat huvudsyfte är att i detalj analysera och beskriva osäkerheten i dessa maximala istjocklekar med avseende på osäkerheter i klimat, utbredning av inlandsis över Nordamerika, glacial hydrologi hos Saale-isen, m m. Den globala klimatmodell (AOGCM) som kommer användas är CCSM4 medan den 3D termomekaniska inlandsismodellen är GRISLI. Studien kan även ses som en för SKB:s frågeställningar anpassad fortsättning på de simuleringar av Saale-glaciationen som genomförts av Colleoni et al. (2010, 2011). Studien, vilken utförs vid Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (cmcc) i Bologna, kommer att komplettera den bild av istjocklekar under Saaleglaciationen (Lambeck et al. 2006, SKB 2010, avsnitt 5.4.2) som användes i SR-Site.

B. Resultat av kompletterande studie genomförd 2013-2014 kring istjocklekar under Saale-glaciationen inklusive osäkerhetsanalys

Summering av studien

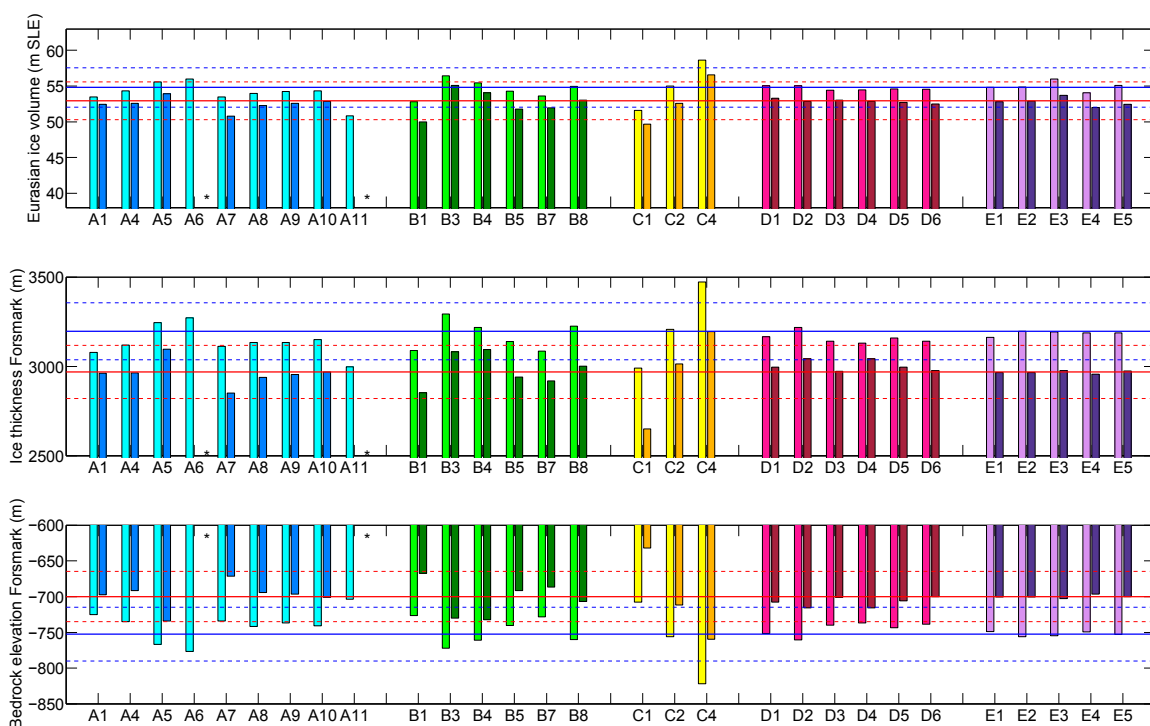
Studien analyserade istjocklekar över Forsmark för maxskedet av Saaleglaciationen (140 000 år BP), vilken utgör den största kända glaciationen över Eurasien. Vid maxskedet hade den Eurasiska inlandsisen åtminstone dubbelt så stor utbredning som under senaste glaciala maximum vid Weichsels maxskede (~21 kyrs BP, LGM). Utbredningen och tjockleken hos inlandsisen bestämdes i två steg. Först sattes en kopplad Atmosfär-Hav-Havsis-Land-modell upp med stationära randvillkor (jordens banparametrar samt växthusgaskoncentration i atmosfären) för att representera förhållandena vid det maximala glaciala skedet under sen Saale. I nästa steg användes det simulerade klimatet som ingångsdata till en inlandsissimulering.

I klimatsimuleringarna gjordes olika antaganden för utbredning och tjocklek hos inlandsisar på Norra halvklotet. Utbredningen och tjockleken hos den nordamerikanska inlandsisen under Saale-glaciationen är osäker. För att undersöka känsligheten hos klimatet över Eurasien för osäkerheten i utbredning och tjocklek hos den nordamerikanska isen genomfördes två olika klimatsimuleringar. I

båda simuleringarna ansattes en Eurasisk inlandsis för den aktuella perioden, baserad på en tidigare inlandsissimulering (Peyaud 2006). I den första simuleringen ansattes en nordamerikansk inlandsis med en stor utbredning och tjocklek (Topo1, ca 4000 m hög is), medan det i den andra simuleringen ansattes en nordamerikansk inlandsis med mindre utbredning och tjocklek (Topo2, ca 1500 till 2000 m hög). Isvolymen för båda dessa fall ryms inom den globala vattenbudgeten för den aktuella perioden.

För var och ett av de simulerade klimatet för den aktuella perioden (Topo1 och Topo2) utfördes en grupp känslighetsstudier.

I hela uppsättningen av känslighetsstudier varierar istjockleken över Forsmark från 2991 (2650) meter till 3472 (3195) meter vid användande av klimatrandvillkoret från Topo1 (Topo2), se Figur 1. Den totala isvolymen hos inlandsisen vid jämvikt i referenssimuleringarna för Topo1 och Topo2 skiljer sig med 2 meter havsytteekvivalenter. Vid platsen för Forsmark är skillnaden i istjocklek mellan dessa två simuleringar 230 m. Ytterligare detaljer ges i Colleoni et al. (2014).



Figur 1. Total isvolym hos Eurasiska inlandsisen (överst), istjocklek över Forsmark (mitten) och markytans nivå i Forsmark (nederst) från känslighetsstudierna med klimatet Topo1 (stor is över Nordamerika) (ljusa färger) och Topo2 (liten is över Nordamerika) (mörka färger). Resultaten är från slutet av simuleringarna när isen uppnått jämvikt med det rådande klimatet. De heldragna blå och röda linjerna indikerar isvolymen hos referenssimuleringarna REF_Topo1 och and REF_Topo2 (Figur 1). De sträckande blå och röda linjerna visar +/-5 % variation från respektive referenssimulering. Små svarta stjärnor visar känslighetsstudier som inte kunde slutföras med en upplösning på 20 km pga. numeriska instabiliteter. Dock kunde de genomföras med upplösningen 40 km. Se Colleoni et al. (2014) för ytterligare detaljer och förklaringar.

Jämförelser med andra rekonstruktioner av Saale-nedisningen

Istjocklekarna för perioden MIS6 (140 000 år sedan) erhållna av Colleoni et al. (2014) kan jämföras med istjocklekarna för samma tidsperiod från en rekonstruktion av Lambeck et al. (2006), vilken användes i SR-Site. Lambeck et al. (2006) rekonstruerade en tjocklek över Forsmarksområdet på omkring 3400 m. Denna rekonstruktion av Lambeck är baserad på en fundamentalt annorlunda modelleringsmetod, baserad på *sea-level equation*, än den termodynamiska inlandsismodellering som tillämpades av Colleoni. Trots detta uppvisar resultaten från de två studierna liknande istjocklekar då Colleoni et al. (2014) rekonstruerade istjocklekar över Forsmark i det ungefärliga intervallet 3000 till 3500 meter med en stor inlandsis över Nordamerika (Figur 2). I simuleringarna med en liten is över Nordamerika var tjocklekarna något lägre (2600 meter till 3200 meter). Den generella samstämmigheten i resultaten indikerar att detta är rimliga uppskattningar på den maximala istjockleken över Forsmark under maxskedet av Saale-glaciationen.

Utvärdering av metoden att använda paleo-rekonstruktionen av Saale-nedisningen som ett mått på framtida maximal istjocklek

För att argumentera kring den största tänkbara framtida nedisningen i Forsmark i tidsperspektivet en miljon år använder SKB den största kända historiska nedisningen under de senaste två miljoner åren (Saaleglaciationen). En utvärdering av denna metodik kan göras genom att jämföra den nya rekonstruktionen av denna nedisning (Colleoni et al. 2014) med en modellstudie där framtida nedisningar på Norra halvklotet explicit simulerats för de kommande en miljon åren (Huybrechts 2010).

Det övergripande resultatet från Huybrechts (2010) ses i figur 2. Det mest slående resultatet är att ingen av de simulerade nedisningarna under de kommande en miljon åren har en omfattning som är signifikant större än nedisningen under senaste glaciala maximat (LGM) under Weichselglaciationen. Framtida glaciala maxima inträffar om 60 000, 102 000, 419 000, 433 000, 467 000, 694 000 samt 890 000 år. Dessa är alla av ungefär samma omfattning som vid senaste glaciala maximat (LGM) under Weichsel. Den enda nedisning som är något större inträffar om 890 000 år. Dock har inte detta någon signifikant påverkan på den maximala isutbredningen över nordvästra Europa (Huybrechts 2010, Figure 9).

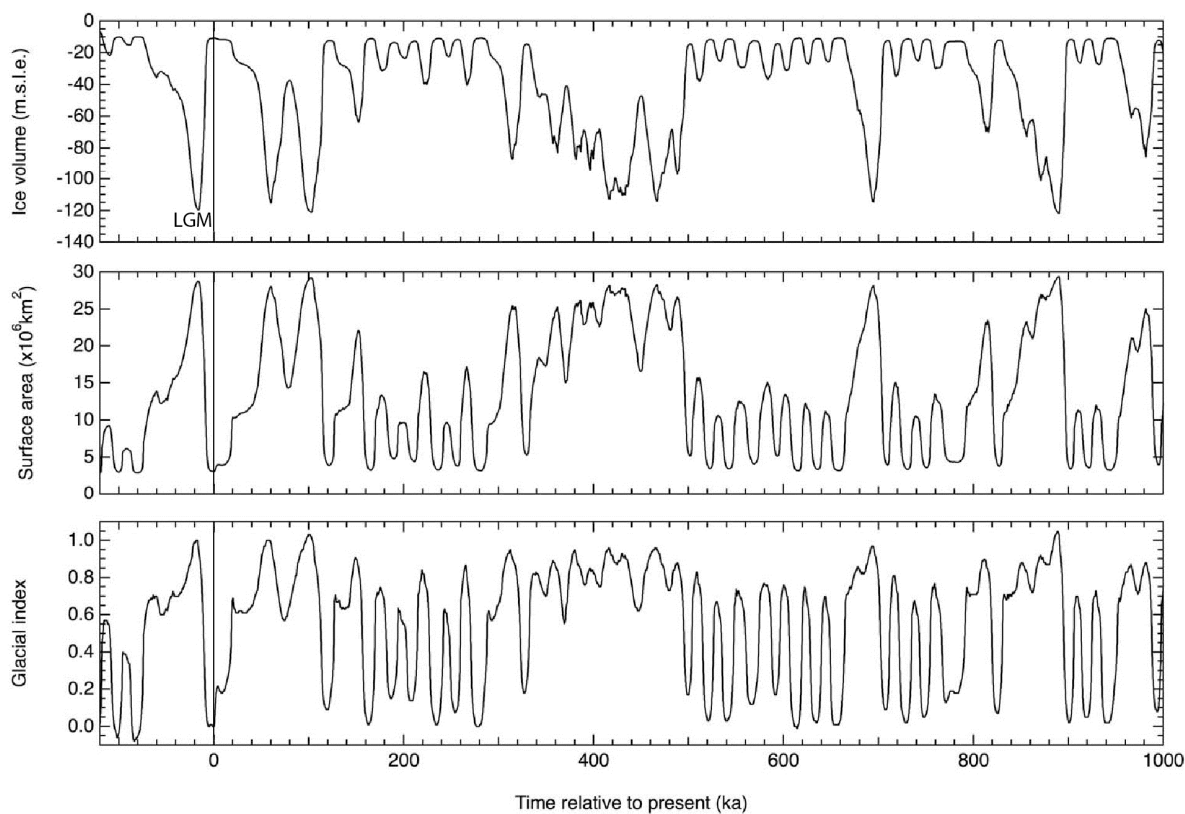
Den mest uppenbara förklaringen till avsaknaden av framtida mycket stora nedisningar, kraftigare än under Weichsel, i denna studie är det klimat som styr inlandsissimuleringen. Klimatkurvan som användes som indata till simuleringarna består av en uppskattad CO₂-kurva för de kommande en miljon åren från BIOCLIM (2003). Kurvan konstruerades genom ett samband mellan instrålningsvariabler och CO₂-koncentration i atmosfären etablerad från iskärnan från Vostok, Östantarktis, för de senaste 125 000 åren (Burgess 1998). I den resulterande klimatkurvan är nedkylningen av klimatet under framtida perioder med glaciala maxima alltid mindre eller lika omfattande som under senaste glaciala maximat LGM (Huybrechts 2010, Figure 8, nedre panelen). Vissa framtida glaciationer varar under längre tid än under Weichsel, men inte tillräckligt länge för att hinna motverka effekten av att klimatet inte kylts av lika mycket som under LGM.

Resultaten i figur 2 erhöles genom att applicera den kallaste framtida klimatutvecklingen från BIOCLIM (2003) (scenario A3). Alla övriga framtida scenarier i BIOCLIM med enbart naturlig variabilitet i klimatet (A4a och A4b) resulterade i mindre omfattande nedisning på Norra halvklotet (Huybrechts 2010). Detta hade även blivit fallet för återstående klimatscenarier i BIOCLIM, vilka inkluderar inverkan av högre koncentrationer av växthusgaser i atmosfären (scenarierna A1, A2, samt alla scenarier i grupperna B och C), och därför resulterar i ännu varmare framtida klimat.

Uppskattningar av framtida klimat i dessa mycket långa tidsperspektiv innehåller oundvikligen stora osäkerheter. Ett huvudantagande i Huybrechts (2010) är att det framtida klimatet kommer att fungera på samma sätt som vår förståelse av klimatet under sen Kvartär (senaste 800 000 åren). Klimatstyrningen av inlandsismodellen antar med andra ord att klimatsystemet under kommande

en miljon år betar sig på samma sätt som vår förståelse av hur det betett sig under de senaste miljoner åren, samt att den samtida antropogena påverkan på systemet inte har någon effekt på den mycket långsiktiga responsen hos klimatet.

En jämförelse mellan rekonstruktionen av den största kända historiska nedisningen, från Saales maxskede (Colleoni et al. 2014), och simuleringen av framtida nedisning i ett miljonårsperspektiv (Huybrechts 2010) visar att den rekonstruerade nedisningen under Saale är betydligt större än någon av de framtida nedisningarna. Saalenedisningen är betydligt större än nedisningen under Weichsel, medan de simulerade framtida nedisningarna är mindre eller obetydligt större än densamma. Detta indikerar starkt att metoden att använda den rekonstruerade inlandsisen för Saaleglaciationens maxskede (Colleoni et al. 2014, SKB 2011) för att bedöma en maximal tjocklek hos en framtida inlandsis i ett miljonårsperspektiv, inklusive den associerade höjningen av det hydrostatiska trycket i berget, är ett giltigt tillvägagångssätt.



Figur 2. Resultat från transienta simuleringar av nedisning på Norra halvklotet under den senaste glaciationen, Weichsel, samt för de kommande en miljon åren (modifierad från Huybrechts 2010). Figuren visar resultat från de simuleringar som gav de största inlandsisarna. Isvolymen (överst) anges i havsyteförändring jämfört med dagens nivå. För metodik, se Huybrechts (2010). Resultaten visar återkommande framtida nedisningar och att ingen av dessa är signifikant större än den under Weichselperioden (LGM).

C. Slutsats kring maximal istjocklek och associerad ökning av hydrostatiskt tryck vid Forsmark för de kommande en miljon åren

Maximal istjocklek och resulterande ökning av hydrostatiskt tryck

Baserat på osäkerhetsanalysen i den nya studien genomförd efter SR-Site (Colleoni et al. 2014) är den maximala förväntade istjockleken över Forsmark under de kommande en miljon åren 3500 m. Detta är i linje med analysen i SR-Site, där den största istjockleken sattes till 3400 m. En istjocklek på 3500 m ger upphov till en ökning av det hydrostatiska trycket på 31 MPa.

Tänkbar tidpunkt för framtida period med maximal istjocklek

En förnyad detaljerad analys av den tänkbara klimatutvecklingen under kommande 100 000 år, med fokus på Forsmark, har nyligen genomförts för säkerhetsanalysen SR-PSU. Resultaten visar att sannolikheten för omfattande glaciation, med inlandsis över Forsmark, under denna första 100 000-årsperiod är låg (denna typ av klimatutveckling åskådliggjordes även i två av klimatscenarierna i SR-Site (TR-10-49 avsnitt 5.1 och 5.2)). Orsaken är dels den kända framtida variationen i solinstrålning mot jorden, dels den förväntade utvecklingen hos jordens klimat under antropogen påverkan, med höga koncentrationer av växthusgaser i atmosfären.

Huybrecht (2010) argumenterar att det kallaste klimatet under de kommande en miljon åren skulle kunna inträffa under perioden med lägst solinstrålning, om runt 890 000 år. Den glaciation som simulerats för denna period är av betydligt mindre omfattning än Saaleglaciationen och obetydligt större än Weichselglaciationen över nordvästra Europa. Alla övriga simulerade glaciationer under den kommande miljonen åren är liknande eller mindre än Weichselglaciationen.

Även om studien av Huybrechts innehåller stora osäkerheter, indikerar den nya genomgången av tänkbara klimatutvecklingar för de kommande 100 000 åren, samt studien av Huybrechts (2010), att glaciation med en maximal istjocklek likande den som rekonstruerats över Forsmark för Saaleperioden av Colleoni et al. (2014), med en maximal istjocklek på knappt 3500 m över Forsmark, är mycket osannolik under de kommande 100 000 åren, och eventuellt även för de kommande en miljon åren.

Påverkan på konstruktionsförutsättningar

SKB överväger fortsatt konstruktionsförutsättningen vad avser isostatisk last för kapseln och kommer att redovisa utfallet i december 2014, som en uppdatering av svaret på fråga 8 på SSM:s begäran om komplettering avseende konstruktionsförutsättningar.

Med vänlig hälsning

Svensk Kärnbränslehantering AB
Avdelning Kärnbränsleprogrammet

Helene Åhsberg
Projektledare Tillståndsprövning

Referenser

Referenser i ansökan

Birgersson M, Karnland O, Nilsson U, 2010. Freezing of bentonite. Experimental studies and theoretical considerations. SKB TR-10-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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.

Lambeck K, Purcell A, Funder S, Kjær K H, Larsen E, Möller P, 2006. Constraints on the Late Saalian to early Middle Weichselian ice sheet of Eurasia from field data and rebound modelling. *Boreas* 35, 539–575.

Olmo M, 2010. Review of denudation processes and quantification of weathering and erosion rates at a 0.1 to 1 Ma time scale. SKB TR-09-18, 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.

Övriga referenser

BIOCLIM, 2003. Deliverable D3. Global climatic features over the next million years and recommendation for specific situations to be considered. Work package 2: Simulation of the future evolution of the biosphere system using the hierarchical strategy. Châtenay-Malabry: Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs (ANDRA).

Burgess P, 1998. Future climatic and cryospheric change on millennial timescales: an assessment using two-dimensional climate modelling studies. PhD thesis. Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK.

Colleoni F, Jakobsson M, Krinner G, 2010. The role of an Arctic ice shelf in the climate of the MIS 6 glacial maximum (140 ka). *Quaternary Science Reviews* 29, 3590–3597.

Colleoni F, Liakka J, Krinner G, Jakobsson M, Masina S, Peyaud V, 2011. The sensitivity of the Late Saalian (140 ka) and LGM (21 ka) Eurasian ice sheets to sea surface conditions. *Climate Dynamics* 37, 531–553.

Colleoni F, Wekerle C, Masina S, 2014. Long-term safety of a planned geological repository for spent nuclear fuel in Forsmark, Sweden: estimate of maximum ice sheet thicknesses. Application and numerical scenarios. SKB TR-14-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Huybrechts P, 2010. Vulnerability of an underground radioactive waste repository in northern Belgium to glaciotectionic and glaciofluvial activity during the next 1 million years. Report 10/01, Departement Geografie VUB.

Peyaud V, 2006. Role of the ice sheet dynamics in major climate changes. PhD thesis. Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement, Université Grenoble I.

Opublicerade dokument

SKBdoc 1395038 ver 1.0. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande konstruktionsförutsättningar. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1396660 ver 1.0. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande dokumentation och kvalitetssäkring av koder. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Revisionsförteckning

Version	Datum	Revideringen omfattar	Utförd av	Kvalitetssäkrad	Godkänd
2.0	Se sidhuvud	Svar på fråga 4.	Jens-Ove Näslund	Se sidhuvud	Se sidhuvud
1.0	2013-06-27	Svar på fråga 1, 2 och 3. Statusrapport på fråga 4.	Jens-Ove Näslund	Saida Engström, Allan Hedin, Olle Olsson	Anders Ström