

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

Innehåll

1	Inledning	2
2	Klimatutveckling i Forsmark och möjlig första tidpunkt för frysning	2
2.1	Bakgrund till frågan om klimatutveckling	2
2.2	Vad representerar SKB:s klimatscenarier och hur används de i säkerhetsanalyser?.....	3
2.3	Första framtida tidpunkt för permafrost i Forsmark och frysning av SFR:s betongbarriärer analyserad i SR-PSU	4
2.3.1	Tänkbara framtida perioder med kallt klimat.....	4
2.3.2	Simulering av klimat och permafrost och SR-PSU:s slutsatser kring tidigaste tidpunkt för frysning	4
2.3.3	Antaganden och hantering av osäkerheter i analysen	8
2.3.4	Kommentarer kring SSM:s beskrivning i kompletteringsbegäran.....	9
2.4	Hur frågan om tidpunkt för första frysning hanterades i SAR-08 och varför denna hantering inte var adekvat	9
2.4.1	SAR-08:s referensutveckling med ”Weichselvariant” och ”Växthusvariant”	9
2.4.2	Scenarierna med <i>Tidig frysning av förvaret</i> och <i>Talik</i>	10
2.4.3	Resultat av scenarioanalysen i SAR-08	10
2.4.4	Beskrivning av varför metodiken i SAR-08 inte var adekvat för att svara på frågan om när frysning tidigast kan ske	11
2.4.5	Bemötande av SSM:s beskrivning	11
2.5	Vetenskapligt stöd för SKB:s metodik och hantering av osäkerheter i analysen av tidpunkt för tidig frysning i SR-PSU	12
2.6	Summering av klimathanteringen i SR-PSU och SAR-08	13
3	Effekter på betong till följd av frysning	15
3.1	Frysning av betong: översikt	15
3.2	Åldring av betong genom lakning	16
3.2.1	Förändringar av betongen kemiska och mineralogiska egenskaper vid lakning.....	16
3.2.2	Lakningsfrontens utsträckning och form	17
3.3	Effekt av frysning på betongbarriärerna i 1BMA och 2BMA.....	18
3.3.1	Frysning av icke lakad betong	18
3.3.2	Frysning av betong som åldrats genom lakning.....	19
3.4	Summering av effekter på betong till följd av frysning.....	22
4	Dos för ett hypotetiskt fall med tidig permafrost och sönderfrysning av barriärer	23
4.1.1	Beskrivning av beräkningsfallet för hypotetisk permafrost	23
4.1.2	Resultat av radionuklidtransportberäkningen	25
4.1.3	Summering av radionuklidtransportberäkningen.....	27
	Referenser	28

1 Inledning

I detta PM beskrivs i kapitel 2 kunskapsläget om framtida klimat i Forsmarksområdet och möjliga tidpunkter för frysning. Kunskapsläget för frysning av betong redovisas i kapitel 3. Slutligen beskrivs beräkningar för en sönderfrysning av SFR 10-15 000 år efter förslutning i kapitel 4. Detta beräkningsfall utförs trots att SKB i detta PM visar att frysning av betongbarriärer på försvarsdjup inte kommer att ske före tidigast ca 56 000 e Kr, samt att betongbarriärerna i SFR inte skulle frysa sönder vid en frysning. Detta beräkningsfall görs för att tillmötesgå ett önskemål från SSM och visa på förvarets robusthet mot klimatpåverkan.

2 Klimatutveckling i Forsmark och möjlig första tidpunkt för frysning

I detta kapitel beskrivs SKB:s hantering av klimatutvecklingen i Forsmark med fokus på första framtida tidpunkt för kallt klimat och frysning. En bakgrund till hur frågan hanterats tidigare av SKB och SSM ges i avsnitt 2.1. Avsnitt 2.2 beskriver hur SKB:s klimatscenarier används i säkerhetsanalyser och vad dessa klimatscenarier representerar. Avsnitt 2.3 beskriver den första möjliga tidpunkten för framtida kallt klimat och frysning i Forsmark såsom framtaget inom SR-PSU, samt hur *klimatfallet med tidigt periglacialt klimat* i SR-PSU på vetenskapligt grund hanterar osäkerheten i frågan kring tidpunkten för första frysning. I avsnitt 2.4 beskrivs den tidigare hanteringen av frågan kring tidig frysning i SAR-08, samt anledningen till varför denna hantering inte var adekvat. Metodiken som användes i SR-PSU för analys av frågan kring tidpunkt för första frysning har granskats vetenskapligt, bland annat av två internationellt mycket välrenommerade klimatforskare. Resultaten av denna granskning, samt granskning av sakinnehåll och hantering av SKB:s klimatscenarier, beskrivs i avsnitt 2.5. I avsnitt 2.6 summeras huvudpunkterna från avsnitten 2.1 till 2.5.

2.1 Bakgrund till frågan om klimatutveckling

I SAR-08 genomfördes en analys av effekten av tidig frysning baserad på ett rudimentärt klimatunderlag från säkerhetsanalysen SR-Can. Eftersom frågan om *när* ett förvar i Forsmark tidigast skulle kunna frysa inte fanns med som frågeställning i SR-Can, utan enbart *hur djupt* det skulle kunna frysa vid kärnbränsleförvaret, så var det klimatologiska underlaget till denna nya fråga bristfälligt i SAR-08. Efter SAR-08 identifierade SKB därför ett tydligt behov av en förbättrad, dedikerad metodik kring hanteringen av tidpunkten för första framtida frysning av SFR. SKB:s klimatrelaterade studier i SR-PSU fokuserade därför specifikt på analys av frågan kring den första möjliga tidpunkten för permafrosttillväxt och frysning av barriärerna i SFR. Detta var viktigt eftersom frysning ansågs vara en kritisk aspekt givet det relativt grunda försvarsdjupet, avfallets radioaktivitet och SFR-barriärernas egenskaper (*Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR, Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU*, avsnitt 6.5). Dedikerade modellerings- och litteraturstudier genomfördes i SR-PSU för att analysera frågan. I detta arbete lades stort fokus vid hanteringen av osäkerheter.

I mars 2016 inkom SSM med en begäran om ett förtydligande om hanteringen av klimatscenarierna i SR-PSU. I denna begäran önskade SSM även att SKB förtydligade varför effekterna av en klimatutveckling enligt Weichselcykeln inte utvärderas med hänsyn tagen till den tidiga utvecklingen av permafrost, dvs varför SKB inte använde sig av den äldre metodiken från SAR-08. I juni 2016 inkom SKB med ett förtydligande av denna fråga (*"Kompletterande information om hantering av klimatscenarierna i ansökan om utbyggnad av SFR"* SKBdoc 1550211). Förtydligandet beskriver i detalj varför hanteringen av första framtida tidpunkt för frysning, såsom den gjordes i SR-PSU, utgjorde ett betydligt bättre vetenskapligt

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

underlag för frågan när ett förvar i Forsmark tidigast fryser, än det klimatunderlag som användes i SAR-08.

Därefter inkom SSM med den nu aktuella kompletteringsbegäran i samma fråga, utan att i denna begäran omnämna SKB:s förtydligande. Istället anser SSM att SKB bör använda den äldre metodiken från SAR-08. SSM hävdar vidare att hanteringen i SAR-08 till och med på ett *bättre sätt* skulle belysa osäkerheterna i det framtida klimatet gällande tidig permafrost än de studier som genomfördes inom SR-PSU. SKB delar inte denna uppfattning och förstår inte heller grunden för SSM:s inställning. De nya dedikerade studierna av specifikt denna fråga, inklusive den robusta hanteringen av osäkerheten kring tidpunkt för första frysning, som genomfördes inom ramen för SR-PSU, utgjorde en omfattande och viktig förbättring jämfört med den rudimentära hanteringen i SAR-08. En del av beskrivningen av klimatutvecklingen i detta PM utgörs därför av samma information som SSM fått i det tidigare förtydligandet. Från SSM:s text i kompletteringsbegäran framgår även att det verkar finnas missuppfattningar kring vad klimatscenerierna representerar och hur de använts i säkerhetsanalysen. En del av detta kapitel utgörs därför av en vidare förklaring av vad klimatscenerierna representerar, i relation till frågan om tidig frysning.

2.2 Vad representerar SKB:s klimatscenerier och hur används de i säkerhetsanalyser?

Det första som konstateras i SKB:s säkerhetsanalyser, oavsett om analysen rör Kärnbränsleförvaret med en analysperiod på en miljon år eller SFR med en analysperiod på 100 000 år, är att klimatet inte är förutsägbart på dessa tidsskalor på den detaljeringsgrad som krävs för en säkerhetsanalys. Osäkerheten i framtida klimatutveckling på dessa tidsskalor är alltför stor. Dock konstateras att spannet inom vilket klimatet kan komma att utvecklas i Sverige och Forsmark under dessa perioder går att identifiera och beskriva. SKB:s angreppssätt är därför att, i var och en av SKB:s säkerhetsanalyser, identifiera och beskriva en uppsättning klimatscenerier (eller klimatfall) som tillsammans rymmer hela osäkerheten i framtida utveckling. Antalet klimatscenerier, och vilka de individuella scenarierna är, skiljer sig mellan de olika säkerhetsanalyserna beroende på avfallstyp, förvarskoncept och förvarsplats (Näslund et al. 2013). SKB:s klimatscenerier utgör inte prediktioner av vad som kommer att ske. De är istället antingen i) exempel på tänkbara framtida utvecklingar, eller ii) tänkbara gränssättande fall, där en viss parameter eller process av vikt för förvarets funktion analyseras och beskrivs på ett för förvarssäkerheten pessimistiskt sätt. Denna metodik beskrivs i detalj i SR-Sites (SKB 2010) och SR-PSU:s (SKB 2014a) klimatrappporter.

SSM skriver i sin kompletteringsbegäran: ”SSM bedömer att modelleringarna av det framtida klimatet bör användas kvalitativt, som indikationer av det framtida klimatet och inte ses som kvantitativa förutsägelser.”

SKB använder klimatfallen för att antingen exemplifiera hur klimatutvecklingen kan komma att te sig, eller identifiera och beskriva gränssättande fall. I båda dessa användningsområden kan klimatfallen beskrivas i hög detaljeringsgrad, och meningsfulla kvantitativa data kan beräknas. Till exempel kan man, med processkunskap och genom att göra pessimistiska antaganden på alla de ställen där osäkerheter förekommer, beräkna en maximal istjocklek över Forsmark under nedisning (Colleoni et al. 2014, Quiquet et al. 2016), eller beräkna det största djup som permafrost kan nå vid denna förvarsplats (Hartikainen et al. 2010, SKB 2010). I den här typen av studier utgör hanteringen av osäkerheter den övervägande delen av studien, och den behöver i alla delar förankras i den vetenskapliga litteraturen och kunskapen. Meningsfulla kvantitativa data kan inte bara beräknas för historiska händelser utan även vid modelleringar av det framtida klimatet. Till exempel är det fullt möjligt att få fram meningsfull information om när frysning av grundvatten och betongbarriärer i SFR tidigast skulle kunna ske givet pessimistiska antaganden om växthusgasers koncentration i atmosfären och egenskaper hos mark och berg. Resultaten från den här typen av beräkningar *kan* med andra ord användas till beskrivningar av gränssättande fall, om de osäkerheter som ingår i beräkningarna har hanterats systematiskt och på ett ur förvarssäkerhet pessimistiskt sätt.

2.3 Första framtida tidpunkt för permafrost i Forsmark och frysning av SFR:s betongbarriärer analyserad i SR-PSU

2.3.1 Tänkbara framtida perioder med kallt klimat

För att kunna bedöma potentialen för kallt klimat och förekomst av permafrost i Forsmark under analysperioden genomfördes en dedikerad modelleringsstudie inom SR-PSU (Brandefelt et al. 2013). Jordens klimat styrs ytterst av storleken på solinstrålningen mot jordytan där lägre solinstrålning ger kallare klimat. Utöver detta finns komplicerade samband och återkopplingsmekanismer mellan processer i hav, atmosfär, kryosfär, geosfär och vegetation, vilka också är med och bestämmer hur klimatet utvecklas (se till exempel SKB 2010 och 2014a, och referenser däri). Framtida variationer i inkommande solstrålning kan predikteras med god noggrannhet (se till exempel Berger och Loutre 1991).

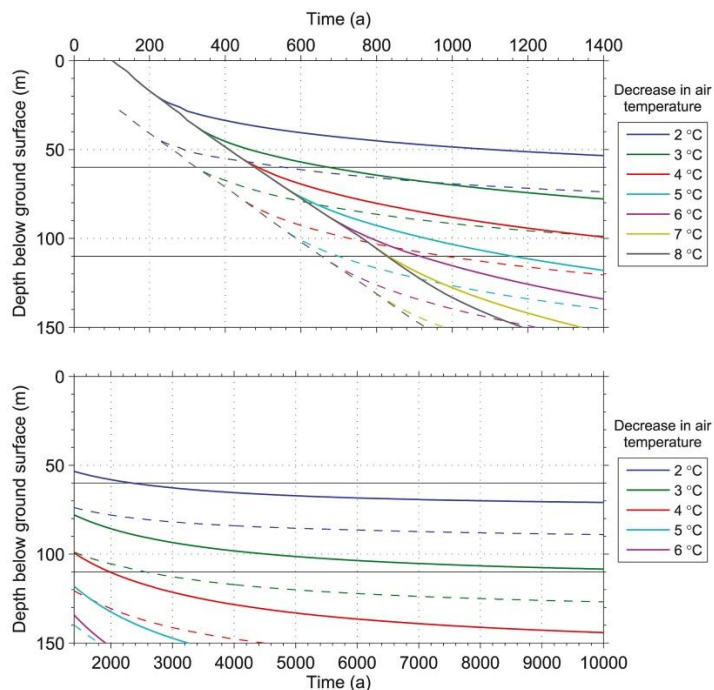
2.3.2 Simulering av klimat och permafrost och SR-PSU:s slutsatser kring tidigaste tidpunkt för frysning

Baserat på prediktionen att de två första minima inkommande solstrålning på sommaren inträffar om runt 17 000 och 54 000 år, fokuserade studien på de första 60 000 åren efter förslutning av SFR. I syfte att uppskatta det potentiella klimatet under dessa två perioder av solinstrålningsminimum användes två välkända globala klimatmodeller (LOVECLIM och CCSM4) och en stor uppsättning simuleringar genomfördes för analys och hantering av osäkerheter.

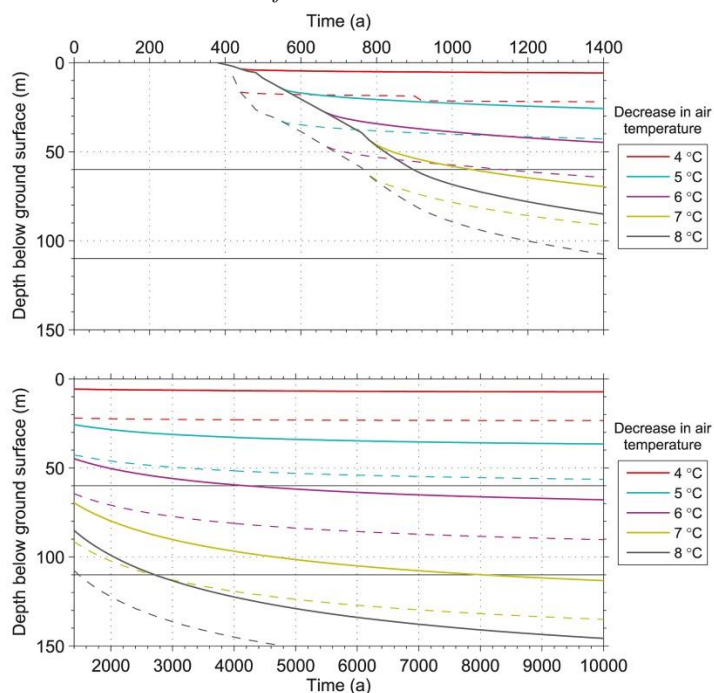
Koldioxidkoncentrationen i atmosfären antogs vara mellan 180 ppmv (vilket motsvarar koncentrationen vid den senaste istidens maximum för ca 20 000 år sedan) och 400 ppmv (vilket motsvarar dagens koncentration). I syfte att uppskatta den *lägsta möjliga* lufttemperaturen i Forsmark under de två perioderna av låg solinstrålning på sommaren, beräknades osäkerheten i resultaten från klimatmodell-simuleringarna (se avsnitt 2.1.4 i SKB 2014a, 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 kärnbränsleförvaret, SR-Site (Hartikainen et al. 2010).

I figurerna 2-1 till 2-3 visas de maximala djup som 0, -3, respektive -5°C isothermerna når om den simulerade lufttemperaturen för perioden om 54 000 år (den kallaste av de två kommande perioderna med låg solinstrålning simulerad med den lägsta CO₂-koncentrationen 180 ppmv) sänks med ytterligare 2 till 8°C. I SR-PSU var fryskriteriet för betongbarriärerna i SFR satt till -3°C. Figurerna visar resultatet över själva SFR samt det maximala djupen längs den 15 km långa 2D-permafrostmodellområden.

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

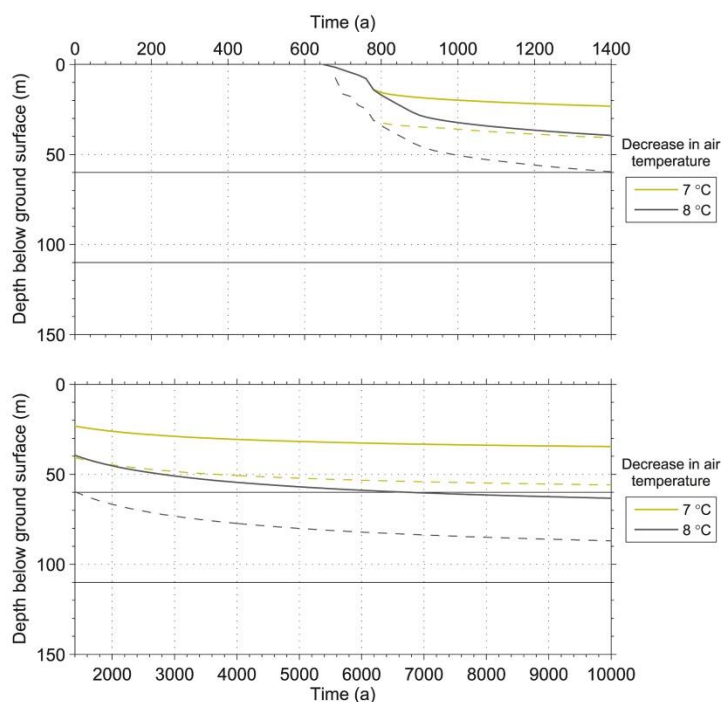


Figur 2-1. Resultat från simuleringar med permafrostmodellen i Brandefelt et al. (2013). Figuren visar utvecklingen hos det maximala djupet (m) för 0°C isotermin över SFR (heldragna linjer) och längs hela den 15 km långa 2D-modelldomänen (streckade linjer) när medellufttemperaturen för perioden om 54 000 år från klimatmodellen LOVECLIM (simulering LC_54k_180) sänktes med 2, 3, 4, 5, 6, 7 och 8°C. Övre panelen visar data på tidsskalan 0-1400 år och den nedre från 1400 till 10 000 år.



Figur 2-2. Fryskriteriet för betong var satt till -3°C i SR-PSU. Figuren visar utvecklingen hos det maximala djupet (m) för -3°C isotermin över SFR (heldragna linjer) och längs hela den 15 km långa 2D-permafrostmodelldomänen (streckade linjer) när medellufttemperaturen för perioden om 54 000 år från klimatmodellen LOVECLIM (simulering LC_54k_180) sänktes med 4, 5, 6, 7 och 8°C. Enbart simuleringar som resulterade i temperaturer -3°C eller lägre är inkluderade i figuren. Övre panelen visar data på tidsskalan 0-1400 år och den nedre från 1400 till 10 000 år. Från Brandefelt et al. (2013).

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

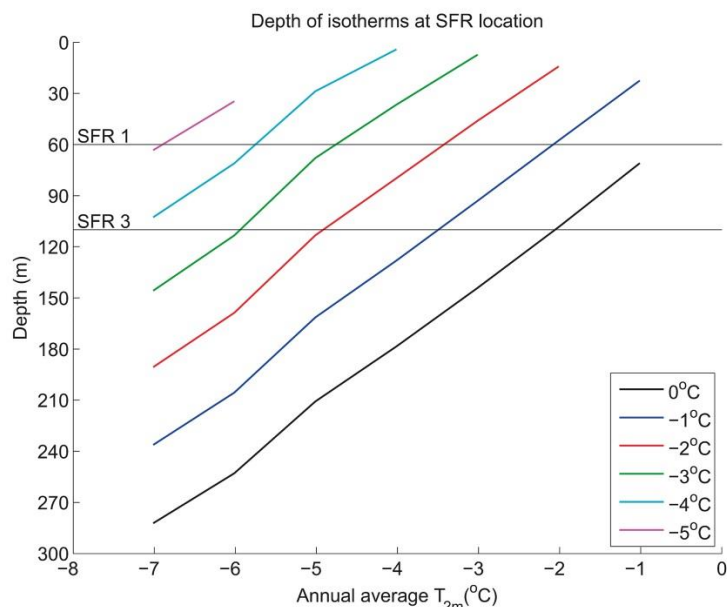


Figur 2-3. Resultat från simuleringar med permafrostmodellen i Brandefelt et al. (2013). Figuren visar utvecklingen hos det maximala djupet (m) för -5°C isotermer över SFR (heldragna linjer) och längs hela den 15 km långa 2D-modelldomänen (streckade linjer) när medellufttemperaturen för perioden om 54 000 år från klimatmodellen LOVECLIM (simulering LC_54k_180) sänktes med 7 och 8°C . Enbart simuleringar som resulterade i temperaturer -5°C eller lägre är inkluderade i figuren. Övre panelen visar data på tidsskalan 0-1400 år och den nedre från 1400 till 10 000 år.

Vad krävs för att -3°C isotermer ska nå förvarsdjup vid SFR?

Resultaten av permafrostsimuleringarna, vilka beskrivs i detalj i avsnitt 3.4 i Brandefelt et al. (2013), summeras i figur 2-4. Figuren visar det maximala djupet för 0, -1, -2, -3, -4 och -5°C isotermerna vid förvarsplatsen för SFR efter 10 000 år av permafrostsimulering som funktion av årsmedeltemperaturen i luften (lufttemperaturen på två m höjd, T_{2m}) simulerad för den kalla perioden om 54 000 år. Figur 2-4 visar att det skulle krävas en årsmedeltemperatur i luften (T_{2m}) på $-4,7^{\circ}\text{C}$ för att -3°C isotermer ska nå ner till djupet för befintlig del av SFR och $-5,9^{\circ}\text{C}$ för att den ska nå planerad utbyggnad. Om dessa lufttemperaturer skulle råda skulle det ta runt 4000 år för -3°C isotermer att nå befintligt SFR 1 och 8000 år för att den ska nå planerad utbyggnad (Brandefelt et al. 2013). Dessa slutsatser gäller under de pessimistiska antagandena att det inte finns någon inlandsis över platsen, inget vintersnötäckte, ingen vegetation, inga havstäckta förhållanden, samt med torra marktyteförhållanden.

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong



Figur 2-4. Maximala djupet (m) för 0, -1, -2, -3, -4 och -5°C isothermerna som funktion av årsmedeltemperaturen i luften (T_{2m}) i Forsmark. Djupet för det existerande förvaret (SFR 1, ca 60 m) och den planerade utbyggnaden (SFR 3, ca 110 m) visas med svarta linjer.

För att studera om -3°C isoterma skulle kunna nå dessa djup under de kommande 60 000 åren eller inte, så gjordes sen en jämförelse mellan den temperatur som krävs för att -3°C isoterma ska nå ner till SFR (T_{2m} runt -5°C enligt ovan) och de lägsta årsmedeltemperaturerna (T_{2m}) erhållna för Forsmark för de två perioderna (om 17 000 och 54 000 år) från klimatsimuleringarna, med alla osäkerheter i klimatsimuleringarna adresserade (tabell 3-3 och 3-4 i Brandefelt et al. 2013). Jämförelsen visar att det för perioden om 17 000 år krävs en CO₂-koncentration i atmosfären på 210 ppm eller lägre för att få en årsmedeltemperatur i luften (T_{2m}) i Forsmark lägre än -5°C. På samma sätt visar jämförelsen att det för perioden om 54 000 år krävs en CO₂ koncentration i atmosfären på 250 ppm eller lägre för att årsmedeltemperaturen i luften (T_{2m}) i Forsmark ska vara lägre än ca -5°C. Tänkbara framtida koncentrationer av CO₂ i atmosfären diskuteras i avsnitt 2.3.2 i Brandefelt et al. (2013). Här visas att det inte kan uteslutas att CO₂-koncentrationen skulle kunna vara ca 250 ppmv eller lägre vid perioden om 54 000 år, medan det för perioden om 17 000 år visas att det inte är sannolikt att CO₂-koncentrationen i atmosfären skulle kunna vara runt 210 ppmv eller lägre. Slutsatserna från den kombinerade klimat- och permafrostmodelleringsstudien (Brandefelt et al. 2013) var därför följande:

- Vid nästa solinstrålningsminimum, om 17 000 år, kan det under pessimistiska klimatologiska och hydrologiska antaganden, inte uteslutas att temperaturen på förvarsdjup (både för befintligt SFR, ca 60 m, och för planerad utbyggnad, ca 110 m) når 0°C och att grundvattnet fryser. Temperaturen på förvarsdjup kan dock inte nå -3°C (fryskriteriet som användes för betong i SR-PSU) under denna period. Porvattnet i betongen i barriärerna antogs i SR-PSU därför *inte* kunna frysa i en sådan omfattning att betongen spricker sönder under denna första period med kallt klimat.
- Vid efterföljande solinstrålningsminimum om 54 000 år kan det under pessimistiska klimatologiska och hydrologiska antaganden, däremot *inte uteslutas* att temperaturen på förvarsdjup (både för befintligt SFR och planerad utbyggnad) når -3°C. Porvattnet i betongen i barriärerna antogs i SR-PSU därför kunna frysa i en sådan omfattning att betongen spricker sönder under denna senare period med kallt klimat.

Som en jämförelse kan nämnas att det krävs en årsmedeltemperatur i luften (T_{2m}) på ca -1 och -2°C för att 0°C isoterma ska nå befintligt SFR respektive planerad utbyggnad (Brandefelt et al. 2013, figur 3-22). Med denna årsmedeltemperatur tar det runt 2 000 respektive 10 000 år för 0°C isoterma att nå

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

förvarsdjup för befintligt SFR respektive planerad utbyggnad. Liksom i fallet för -3°C isotermer ovan, gäller dessa slutsatser under de pessimistiska antagandena att det inte finns någon inlandsis över platsen, inget vintersnötäcke, ingen vegetation, inga havstäckta förhållanden, samt med torra marktyteförhållanden.

Vad hade krävts för att frysa betongbarriärerna i SFR vid perioden om 17 000 år?

För slutsatsen att betongen inte kan frysa om 17 000 år i SFR är en viktig faktor de antaganden som görs om hur snabbt atmosfärens koldioxidkoncentration kan minska från dagens nivå 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°C vid perioden om 17 000 år. För att nå en så låg koncentration skulle det krävas att i) människans utsläpp av kol till atmosfären helt slutar i en nära framtid, samt ii) att naturliga processer minskar koncentrationen av koldioxid med nästan 200 ppmv på 17 000 år. (människan skulle eventuellt kunna bidra till en viss del av denna mycket stora minskning genom tekniska lösningar). Den minskningstakt som i så fall skulle krävas, från dagens förhöjda nivåer, motsvarar ungefär dubbla den takt som registrerats i iskäror för den senaste övergången från ett interglacialt till ett glacialt klimat för ungefär 100 000 år sedan (se kapitel 4 i Brandefelt et al. 2013). Detta bedöms därför inte rimligt att anta, varför frysning av betong utesluts för perioden om 17 000 år.

För mer detaljerade beskrivningar och diskussion av resultaten, se Brandefelt et al. (2013).

2.3.3 Antaganden och hantering av osäkerheter i analysen

Det är viktigt att notera att syftet med studien av Brandefelt et al. (2013) var att uppskatta den *tidigaste* tidpunkten vid vilken temperaturen på förvarsdjup kan nå -3°C genom att göra pessimistiska antaganden om den *lägsta möjliga* lufttemperaturen i Forsmark för de två perioderna, samt anta förhållanden gynnsamma för permafrosttillväxt (bl a torra klimatförhållanden, i form av avsaknad av vintersnö, och torra marktyteförhållanden). Syftet var inte att beskriva en sannolik klimatutveckling, utan att i detalj beskriva ett tänkbart förlopp som kunde ligga till grund för SR-PSU:s *klimatfall med tidigt periglacialt klimat*, vilket enligt resonemanget i avsnitt 2.2 utgör ett, för frysfrågan, gränssättande fall.

För *klimatfallet med tidigt periglacialt klimat* i SR-PSU är valet av tidsperiod (de kommande 60 000 åren) gjort så att den inkluderar de två nästkommande framtida perioder då man kan förvänta sig ett kallare klimat, eftersom vi vet att solinstrålningen mot jordytan kommer att minska under dessa perioder (t ex Berger och Loutre 1991). Vidare inkluderades simuleringar där halten av växthusgaser i klimat-simuleringarna sattes till lägsta, vetenskapligt motiverade, nivå för att gynna ett kallt klimat och permafrosttillväxt under dessa perioder. På samma sätt ansattes markförhållanden som sedan tidigare konstaterats vara gynnsamma för låga bergtemperaturer och permafrosttillväxt i Forsmark (Hartikainen et al. 2010) i de efterföljande permafrostsimuleringarna (Brandefelt et al. 2013). Hela detta angreppssätt säkerställer i) att den stora osäkerheten i framtida klimat är hanterad på ett sätt som maximalt gynnar tidig permafrosttillväxt, d.v.s. att resultaten blir pessimistiskt framtagna, samt ii) att angreppssättet vilar på en vetenskapligt solid grund eftersom det baseras på det vetenskapliga kunskapsläge vi har kring de processer som påverkar bergtemperaturer och frysning. Hanteringen av osäkerheter är med andra ord omhändertagen i och med att pessimistiska val gjorts genom hela kedjan av antaganden och val av parametrar i de klimat- och permafrostmodellsimuleringar som genomfördes. På detta sätt utgör enligt SKB:s mening *klimatfallet med tidigt periglacialt klimat* i SR-PSU ett *vetenskapligt välmotiverat, pessimistiskt analyserat, gränssättande fall* för tidigaste tidpunkt för kallt klimat och permafrost i Forsmark.

2.3.4 Kommentarer kring SSM:s beskrivning i kompletteringsbegäran

SSM skriver i sin kompletteringsbegäran: ”I SKB:s analys antas inte i något scenario att betongbarriärerna fryser sönder. Detta är en skillnad till analysen i SAR-08 där det antogs att betongbarriärerna fryser sönder, vilket bedömdes inträffa vid ca 25000 år e.Kr. (Säkerhetsredovisning SFR-1 allmän del 2 avsnitt 8.4.4). Denna bedömning baserades dels på ett fryskriterium för betongkonstruktioner på -5°C dels på en framtida upprepning av Weichsel där flera antaganden gynnsamma för permfrosttillväxt gjordes.”

Denna beskrivning är inte korrekt. I SR-PSU anger SKB att frysning av betongbarriärerna i SFR, under pessimistiska antaganden, kan uteslutas vid den första framtida kalla period som inträffar om ca 17 000 år, men att frysning av barriärerna inte kan uteslutas under den förväntat kallare klimatperioder om ca 54 000 år, se ovan. Dessutom baserades fallet med sönderfrysning vid 25 000 år e Kr i SAR-08 inte på klimatfallet med en upprepning av Weichselglaciationen, utan på ett separat klimatfall framtaget för att vara extra gynnsamt för permafrosttillväxt. Detta klimatfall saknade den för Weichselglaciationen nödvändiga Weichselisen, och var utan såväl snötäcke under vintern, som vegetation och havstäckta förhållanden. En upprepning av Weichselglaciationen är därmed inte ett lämpligt fall för att besvara frågan om tidig frysning. Dessutom var klimatfallet med sönderfrysning vid 25 000 år e Kr ett fall som inte grundade sig på kunskap om framtida klimat, varför detta fall inte kan ses som lämpligt för att besvara frågan om tidig frysning.

2.4 Hur frågan om tidpunkt för första frysning hanterades i SAR-08 och varför denna hantering inte var adekvat

I SAR-08 ingick en referensutveckling baserad på en rekonstruktion av förhållanden under Weichselglaciationen (*huvudscenariots Weichselvariant*) samt en variant med växthuseffekt (den så kallade *Växthusvarianten*). Dessutom ingick ett scenario kallat *Tidig frysning av förvaret*. Det senare ansågs mindre sannolikt men på grund av svårigheten att ansätta en sannolikhet utvärderades scenariot med en sannolikhet 1. Scenariot användes bl.a. för en analys av effekten av frysning av befintligt SFR. I avsnitt 2.4.1 till 2.4.3 nedan beskrivs först de analyser som gjordes i SAR-08 vad gäller frysning, varefter en beskrivning ges av varför den metodik som användes inte var adekvat för att svara på frågan om första tidpunkt för frysning (avsnitt 2.4.4).

2.4.1 SAR-08:s referensutveckling med ”Weichselvariant” och ”Växthusvariant”

I analysen av säkerhet efter förslutning för befintliga SFR som gjordes i SAR-08 (SKB 2008), utgjordes säkerhetsanalysens referensutveckling av två alternativ, ett där en rekonstruktion av den senaste istidscykeln upprepades (den s.k. *Weichselvarianten*) och ett där hänsyn togs till en antropogent ökad växthuseffekt (den s.k. *Växthusvarianten*). 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). Det bör noteras att permafrostutvecklingen som togs fram för Kärnbränsleförvaret över huvud taget inte var ämnad för en detaljerad analys av *tidpunkten* när permafrost tidigast skulle kunna bildas i Forsmark (se vidare även avsnitt 2.4.4 nedan). Den huvudsakliga frågeställningen för Kärnbränsleförvaret var istället *hur djupt* permafrost maximalt skulle kunna nå under de kommande en miljon åren. Man behöver här notera att trots att båda frågeställningarna rör permafrost, så utgör dessa två fundamentalt olika frågeställningar.

Baserat på Emborg et al. (2007) antogs i SAR-08 att porvattnet i betongen som använts i siloförvaret och 1BMA fryser om temperaturen i förvaret sjunker under -5 °C. Vid sådana förhållanden antogs materialet

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

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 (se dock resultat från nya studier av effekter på betong till följd av frysning, redovisade i kapitel 3). I *huvudscenariots Weichselvariant* antogs sönderfrysning ske 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, bl a scenariot *Tidig frysning av förvaret*.

2.4.2 Scenarierna med *Tidig frysning av förvaret och Talik*

Scenariot *Tidig frysning av förvaret* hanterade påverkan på säkerhetsfunktionen ”Begränsad advektiv transport” till följd av antagandet i SAR-08 att betongen i 1BMA och silon spricker när den fryser i samband med tillväxt av permafrost. Permafrostutvecklingen i detta scenario definierades av en utveckling, 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 1BMA 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.

SAR-08 innehöll även ett scenario kallat *Talik*. Detta scenario hanterade påverkan på säkerhetsfunktionen ”låg flöde i förvarsdelar” av ett ökat flöde i geosfären under en period av diskontinuerlig permafrost och förekomst av talikar. Scenariot ansågs kunna inträffa närhelst periglaciala förhållanden råder i den klimatutveckling som antogs i referensutvecklingen.

2.4.3 Resultat av scenarioanalysen i SAR-08

Den högsta risken för *huvudscenariots Weichselvariant* beräknades till $9 \cdot 10^{-7}$ per år och inträffade vid år 5 000 e Kr. Scenarierna *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 barriärerna i 1BMA 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 1BMA 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 och analyser 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 faktorer 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).

2.4.4 Beskrivning av varför metodiken i SAR-08 inte var adekvat för att svara på frågan om när frysning tidigast kan ske

För att ge underlag till analyser av den spännvidd inom vilken framtida klimat och klimatrelaterade processer kan variera på en tidsskala upp till en miljon år rekonstruerade SKB förhållandena under Weichsel i Forsmark (SKB 2006, 2010, 2014a). Denna rekonstruktion baseras bland annat på kunskap om inlandsisens utbredning vid olika tidpunkter. I samband med en simulering av inlandsisens utbredning och topografi togs en lufttemperaturutveckling fram för den senaste istidscykeln 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).

Den lufttemperaturkurva som rekonstruerades för Forsmark för Weichselperioden, som till stor del styr permafrostrekonstruktionen för Forsmark, har sitt ursprung i en paleotemperaturkurva som rekonstruerats från en iskärna (GRIP) borrhård ur den grönländska inlandsisen. Dessa temperaturdata utgör alltså rekonstruktioner av lufttemperaturer för den förra istiden. Den detaljerade tidsutvecklingen hos permafrosttillväxten i SKB:s klimatfall baserat på upprepningen av Weichsel, styrs därför av hur detaljerna i lufttemperaturkurvan ser ut i början av förra istiden. Här är det nödvändigt att inse att det inte finns någon koppling, över huvud taget, mellan de rekonstruerade variationerna i lufttemperatur i början av Weichsel och hur utvecklingen i lufttemperatur kommer att se ut under de kommande tiotusen talet åren. Därför har den rekonstruerade permafrostutvecklingen i början av Weichsel *ingen relevans* för frågan om *när* permafrost tidigast skulle kunna uppträda i Forsmark i framtiden.

Weichselrekonstruktionen och dess permafrostutveckling utgör, som beskrivs i SR-Sites klimatrapport (SKB 2010), en vetenskaplig startpunkt för analysen av maximala permafrostdjup. För att på ett vetenskapligt underbyggt sätt svara på den andra frågan, om *när* det tidigast kan bli tillräckligt kallt på förvarsdjup för SFR så att porvattnet i betongen kan frysa, krävs en annan metodik anpassad till just frågan om när frysning kan komma att ske. Denna metodik behöver innehålla information om vetenskapligt plausibla tidpunkter för framtida perioder med kallt klimat, samt information om hur kallt klimatet skulle kunna bli under dessa perioder.

Det faktum att olika säkerhetsanalyser till delar kan kräva olika specialanpassade studier av möjliga klimaturvecklingar, för att belysa och besvara specifika frågor som hänger ihop med förvarskoncept eller plats, beskrivs i SKB (2014a) och i Näslund et al. (2013).

2.4.5 Bemötande av SSM:s beskrivning

SSM:s skriver i kompletteringsbegäran: ”I SAR-08 ingick ett klimatfall baserat på en upprepning av Weichsel, samt, en klimatvariant gynnsam för permafrosttillväxt, fallet extrem permafrost. Dessa klimatfall belyste på ett bättre sätt osäkerheterna i det framtida klimatet gällande tidig permafrost.”

SKB efterfrågar på vilka vetenskapliga argument SSM baserar påståendet att klimatfallen i SAR-08 på ett bättre sätt belyser osäkerheten i tidpunkten för frysning än de dedikerade klimatfall som i SR-PSU tagits fram för att besvara just denna fråga. SSM har inte angett några referenser eller övrigt vetenskapligt underlag som stöder detta påstående. I linje med beskrivningen i avsnitt 2.4.4 är det inte korrekt att klimatfallen *huvudscenariots Weichselvariant* och *Tidig frysning av förvaret* i SAR-08 på ett bättre sätt belyste osäkerheterna i det framtida klimatet gällande tidig permafrost, än de studier som genomfördes inom ramen för SR-PSU (avsnitt 2.3).

Eftersom dessa två klimatfall var framtagna i SR-Can, med andra frågeställningar (bland annat för att svara på frågan om *hur djupt* permafrost maximalt kan nå), är de inte adekvata när det gäller att besvara

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

frågan om *när* tidigast permafrost kan komma att växa till i Forsmark. För denna specifika fråga (vilken inte fanns med i SR-Can) krävs kunskap om den förväntade klimatutvecklingen under de kommande tio tusentålet åren i Forsmark, vilken togs fram inom ramen för SR-PSU (Brandefelt et al. 2013, SKB 2014a).

SSM:s skriver i kompletteringskravet: ”SSM har inget att erinra mot detta men anser med utgångspunkt från resonemangen i allmänna råden till SSMFS 2008:37 5 – 7 §§ att klimatutvecklingarna bör väljas så att de tillsammans belyser de mest betydelsefulla och rimligt förutsägbara sekvenserna av framtida klimattillstånd och deras påverkan på slutförvarets skyddsförmåga och omgivningskonsekvenser.”

I den hantering av klimatfall som SKB gjorde i SR-PSU är det just de mest betydelsefulla och rimligt förutsägbara klimatutvecklingarna som SKB fokuserar på. Det finns en stor mängd möjliga klimatutvecklingar inom det spann som klimatet skulle kunna utvecklas under de kommande 100 000 åren. Ett av de mest betydelsefulla gränssättande fallen som SKB identifierat, beskrivit och analyserat effekten av i säkerhetsanalysen är det som beskrivs i SR-PSU:s *Klimatfall med tidigt periglacialt klimat* (avsnitt 2.3).

SSM:s skriver i kompletteringskravet: ”SSM anser att SKB ytterligare bör beakta osäkerheter i framtida klimatutvecklingen tillsammans med de osäkerheter som föreligger i beräkning av permafrostdjup och frystemperaturen för betong.”

Genom den metodik som SKB använt vad gäller val av klimatscenarier (SKB 2014a) kombinerat med metodiken som användes för att analysera potentiella framtida perioder med frysning (Brandefelt et al. 2013) har SKB på ett vetenskapligt förankrat och korrekt, och genomtänkt sätt beaktat de osäkerheter som påverkar den framtida klimatutveckling, med speciell fokus på tidpunkten för första frysning i Forsmark. Detta inkluderar osäkerheterna i klimatutveckling, där pessimistiska antaganden gjorts vad gäller koncentrationen av växthusgaser i atmosfären och hastigheten på återgången till lägre koncentrationer. Metodiken inkluderar även hantering av de osäkerheter som har att göra med permafrosttillväxt och permafrostdjup (givet ett visst klimat), i och med att pessimistiska antaganden genomgående gjorts i permafrostsimuleringarna vad gäller hydrologiska förhållanden hos marken, vegetationsmängd, vintersnömängd och havstäckta förhållanden Brandefelt et al.(2013). SKB:s hantering av osäkerheter har även fått mycket goda omdömen av oberoende ledande klimatforskare inom området, se avsnitt 2.5.

2.5 Vetenskapligt stöd för SKB:s metodik och hantering av osäkerheter i analysen av tidpunkt för tidig frysning i SR-PSU

Studien av periglacialt klimat och potential för framtida permafrost i Forsmark (Brandefelt et al. 2013) har inom SR-PSU sakgranskats av två internationellt mycket välrenommerade klimatforskare inom området: Dr. Guido Vettoretti (Department of Physics, University of Toronto, Kanada) och Dr. Marie-France Loutre (Université catholique de Louvain Earth and Life Institute, Georges Lemaître Centre for Earth and Climate Research (TECLIM), Belgien). Granskningen innebar att granskarna läste SKB:s rapport i detalj och bedömde den utifrån en rad vetenskapliga kriterier. Båda dessa forskare anser att studien är väl genomförd och väl lämpad att användas för det syfte SKB ämnade ha den till, nämligen att studera när, under de kommande 60 000 åren, det tidigast finns potential för permafrost och frysning i Forsmark. De anser även att hanteringen av osäkerheter i frågan är väl hanterad.

Dr. Guido Vettoretti: “*Understanding the uncertainties in modelling the long term evolution of the temperatures over the next 60,000 years (60ka) in South Central Sweden requires a detailed knowledge of the physical process studied under the multidisciplinary aspects of Earth System science. My general impression of the report is that the authors have addressed the relevant processes that may impact the climate in South Central Sweden over the next 60ka. In particular, consideration is taken of the impact of the anthropogenic influence of long lived levels of carbon dioxide that are expected to evolve over many millennia as well as cooling periods that may occur under the influence of orbital forcing.*”

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

“The authors demonstrate a current understanding of the generally accepted scientific basis with regards to understanding the processes involved on the timescales which are relevant to this study. A detailed understanding of these issues has been evaluated based upon current literature that is cited and the accuracy of the facts that are attributed to the cited references. The references are generally complete. The conclusions reached in this report are fully supported by the analysis given the uncertainties that are assessed from the analysis conducted with the models used in this study. Furthermore, the conclusions are reported in a manner that the stated objective is reached. In particular, section 4 gives a concise review of the temperature and depth space of for the potential for permafrost in the fuel repository location.”

Dr. Marie-France Loutre: *“As far as the LOVECLIM simulations are concerned, enough information is provided so that the simulations could be rerun for similar climate situation. Although I am not a user of CCSM4, it seems to be the case for that model, as well. A lot of equilibrium simulations and very long transient simulations were performed. This gives strong scientific basis to this report.”*

“The purpose of the report is to provide temperature evolution over the next 60ka for the Forsmark site in order to identify the potential for permafrost at the depth of the repository site for nuclear waste. All the process leading to the identification for permafrost is well documented, clearly identified and presented in detail in the report. The conclusions are supported by the analysis provided in the report.”

Även sammanställningen och urvalet av klimatfall för SR-PSU, inklusive *klimatfallet med tidigt periglacialt klimat*, har gott stöd av världsledande klimatforskare, då klimatrapporten (SKB 2014a) sakgranskats av bland annat Prof. Andrey Ganopolski vid Potsdam Institute for Climate i Tyskland.

Andrey Ganopolski: *The document “is based on advanced modelling and observational data analysis in different disciplines of geoscience. It employs a broad variety of possible future climate scenarios. I believe, the document objectively represents potential climate-related risks and relevant uncertainties associated with incomplete knowledge of many processes in the Earth system. The document is scientifically sounding and well-written and requires only minor corrections.”*

“The report is based on results of state-of-the-art modelling and data analysis. It correctly represents current understanding of possible long-term future climate scenarios. Critical assessment of most relevant publications and exhaustive uncertainties analysis makes main findings of the report robust.”

SKB menar att dessa uttalanden visar att SKB:s metodik att hantera frågan kring tidpunkt för första frysning i Forsmark, inklusive hanteringen av osäkerheter (Brandefelt et al. 2013), och SKB:s hantering av klimatfall i SR-PSU:s klimatrapport (SKB 2014a), är lämpade för syftet samt väl förankrade i dagens vetenskapliga kunskapsläge.

2.6 Summering av klimathanteringen i SR-PSU och SAR-08

Följande punkter summerar de viktigaste slutsatserna i kapitel 2:

- De kommande 100 000 åren kommer med stor sannolikhet att domineras av ett varmt klimat. Under de kommande 60 000 åren finns två perioder med lägre solinstrålning, om runt 17 000 och 54 000 år, under vilka ett kallare klimat skulle kunna förekomma.
- Enligt dagens vetenskapliga kunskapsläge skulle, under pessimistiska klimatologiska och hydrologiska antaganden, frysning av grundvatten kunna ske på SFR:s förvarsdjup (ca 60 m för befintligt SFR och ca 110 m för planerad utbyggnad) under perioden om 17 000 år, men frysning av betongbarriärerna i SFR skulle inte kunna ske (givet ett fryskriterium på betongen på $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Under den kallare perioden om 54 000 år skulle både grundvatten och betongbarriärer kunna frysa på SFR:s förvarsdjup (ca 60 m för befintligt SFR och ca 110 m för planerad utbyggnad), under

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

pessimistiska klimatologiska och hydrologiska antaganden (givet ett frysriterium på betongen på $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

- Den äldre metodiken som användes i SAR-08, baserad på en säkerhetsanalys av kärnbränsleförvaret med för permafrost andra frågeställningar, är inte lämpad för en analys av frågan om *när* frysning tidigast skulle kunna ske i Forsmark. Det är däremot den nya metodik som användes i SR-PSU.
- SKB:s angreppssätt i SR-PSU för frågan om tidig frysning säkerställer i) att den stora osäkerheten i framtida klimat är hanterad på ett sätt som maximalt gynnar tidig permafrosttillväxt, samt ii) att angreppssättet vilar på en vetenskapligt solid grund eftersom det baseras på det vetenskapliga kunskapsläge vi har kring de processer som påverkar bergtemperaturer och frysning. Hanteringen av osäkerheter är omhändertagen i och med att pessimistiska val gjorts genom hela kedjan av antaganden och val av parametrar i klimat- och permafrostsimuleringarna. I SR-PSU utgör *klimatfallet med tidigt periglacialt klimat* ett vetenskapligt motiverat, pessimistiskt analyserat, *gränssättande fall* för tidigaste tidpunkt för kallt klimat och permafrost i Forsmark.
- Den metodik som SKB använt i SR-PSU för att studera frågan kring första tidpunkt för frysning i Forsmark, inklusive den omfattande hanteringen av osäkerheter, är enligt ledande forskare inom området lämpad för ändamålet och väl förankrad i dagens vetenskapliga kunskapsläge. Det är även SKB:s identifiering och beskrivning av klimatfallen i SR-PSU.

3 Effekter på betong till följd av frysning

I detta kapitel beskrivs de förändringar av betongens sammansättning och struktur som kan förväntas orsakas av interaktion med kringliggande grundvatten under perioden efter förslutning av förvaret samt den effekt detta kan förväntas ha på betongens frysningsegenskaper. Kapitlet inleds med en genomgång av frysningsprocessen (avsnitt 3.1.). Därefter följer en genomgång av lakningsprocessen (avsnitt 3.2.). I avsnitt 3.3 redovisas sedan frysningsegenskaperna hos färsk (avsnitt 3.3.1) respektive lakad betong (avsnitt 3.3.2). Slutligen diskuteras i avsnitt 3.4 resultat och slutsatser redovisas.

3.1 Frysning av betong: översikt

Betongens motstånd mot frostsprängning beror på dess porstruktur och vattenmättnadsgrad. I detta arbete antas att fuktbelastningstiden fram till solinstrålningens första sommar-minima (om 17 000 år, avsnitt 2.3.2) är tillräcklig lång för att samtliga porer i betongen har hunnit vattenfyllas innan en eventuell permafrost når förvarsdjup.

När porvattnet fryser till is sker en expansion vilken kan orsaka uppkomst av sprickor i betongen. Ju större andel av det totala porvattnet som är fruset vid en viss temperatur desto större är risken för att betongen ska skadas.

En förutsättning för att skador ska orsakas av frysning är dock att den tillgängliga mängden vatten är tillräckligt stor vid aktuell temperatur. Den exakta temperaturen vid vilken en tillräckligt stor mängd porvatten har frusit för att orsaka sprickbildning i betongen är dock beroende av vattnets sammansättning samt betongens porstruktur. Denna är i sin tur beroende av hur betongen har tillretts samt dess ålder och de kemiska processer som den tidigare utsatts för. Tabell 3-1 visar sambandet mellan porstorlek och det i poren inneslutna vattnets frystemperatur (Emborg et al. 2007).

Tabell 3-1. Samband mellan porstorlek och frystemperatur.

Pordiameter (Å)	Frystemperatur (°C)
1270	-2
440	-6
270	-10
190	-15
150	-20
110	-30
90	-40

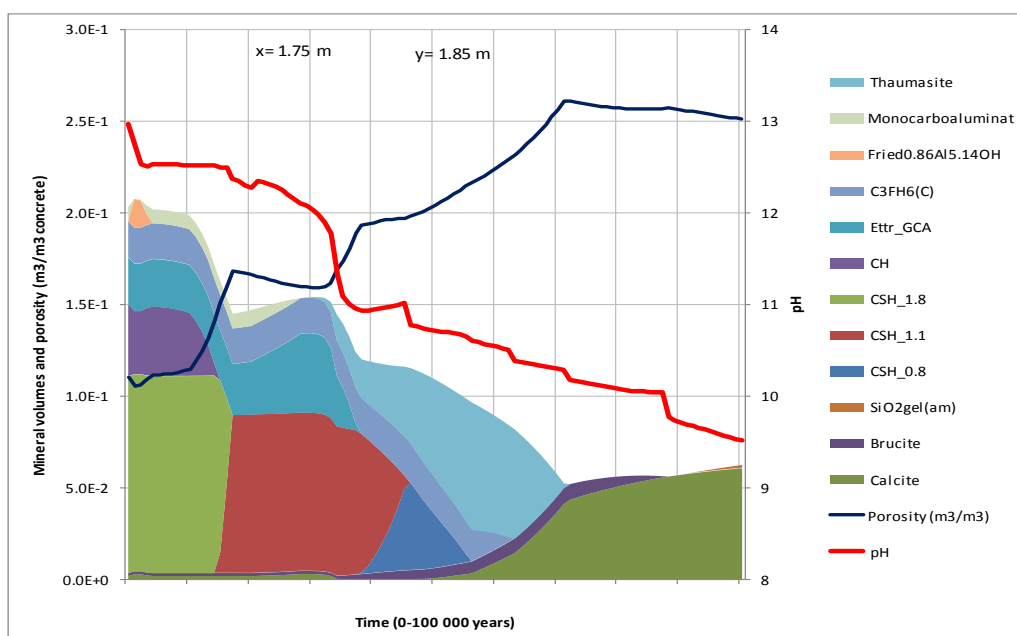
Data i tabell 3-1 kan jämföras med figur 10.3:23 i (Svensk byggtjänst 2017). Där visas att för färsk och välhydratiserad och betong med ett vct på 0.60 (motsvarande den som använts i 1BMA) med en ålder av ett knappt år utgör andelen porer med en porstorlek överstigande 1000 Å mindre än 10 % av den totala porositeten. Detta innebär att andelen porer i vilka porvattnet frusit vid -2°C är mycket låg och risken för skador vid denna temperatur redan baserat på endast detta underlag kan förväntas vara begränsade. Detta diskuteras vidare i kommande avsnitt.

3.2 Åldring av betong genom lakning

3.2.1 Förändringar av betongen kemiska och mineralogiska egenskaper vid lakning

Lakning av betong kan översiktligt beskrivas utgöras av en kombination av processerna i) upplösning av de ingående cementmineralerna i betongens porvatten och ii) transport av joner lösta i porvattnet ut ur betongen. Den senare processen kan antingen vara advektiv, d.v.s. transport sker genom att vatten rör sig genom betongen, eller diffusiv där jonerna påverkade av en koncentrationsgradient rör sig ut ur betongen i ett stillastående medium. I sprickfri betong, exempelvis ej sönderfusen betong, sker uttransporten endast genom diffusion i ett stillastående medium.

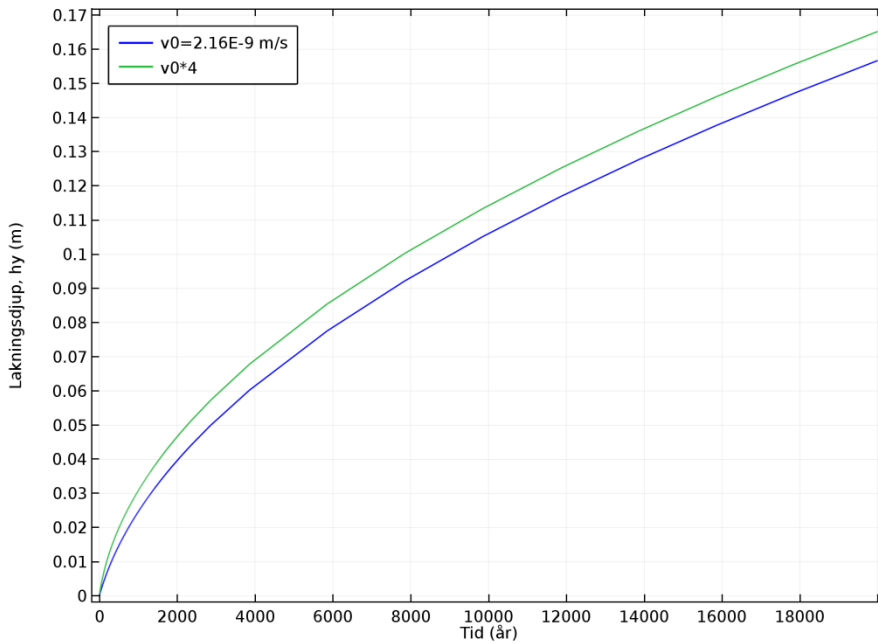
Inverkan av lakning av betong på dess kemiska och mineralogiska utveckling har studerats ingående och god kunskap om de inblandade processerna och mineralomvandlingsstegen finns idag tillgänglig. Översiktligt sker lakningen i en stegvis process där först de mycket lösliga alkalihydroxiderna lakas ut. Detta följs av lakning av portlandit och slutligen av CSH-gelen. De olika lakningsstegen är förknippade med en stegvis sänkning av betongens pH, en ökning av dess porositet samt vissa andra förändringar i betongens mineralsammansättning (se figur 3-1 för ett exempel). För en mer utförlig beskrivning av lakningsprocessen hänvisas till (Höglund 2014).



Figur 3-1. Exempel på hur resultat från en modellering av betongdegradering kan presenteras. Notera hur lakning av portlandit och de olika CSH-faserna förknippas med en sänkning av pH och en ökning av betongens porositet. Notera även att denna figur gäller under vissa specifika förutsättningar och tidsskalan bör därför bortses från (Höglund 2014).

I von Schenck (2017) redovisas beräkningar av hastigheten för portlanditlakning i en betongkonstruktion placerad i en bergsal genom vilken ett grundvatten sakta rör sig. Beräkningarna visar att portlanditlakningen över längre tidsperioder approximativt är 1 cm/1000 år. I de inledande skedena är den dock högre då diffusionsvägarna är kortare (figur 3-2).

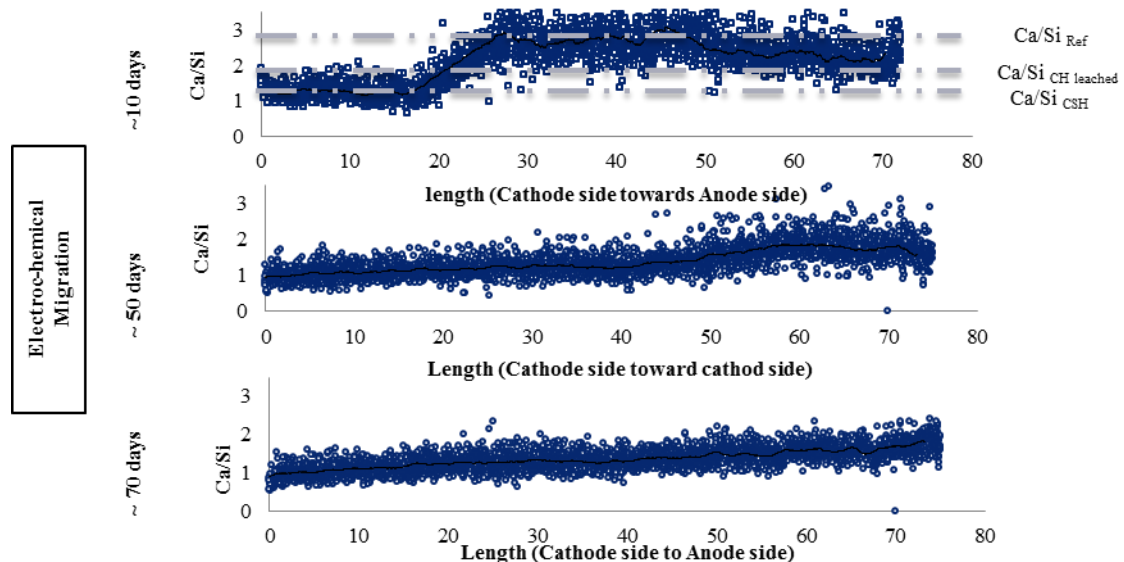
Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong



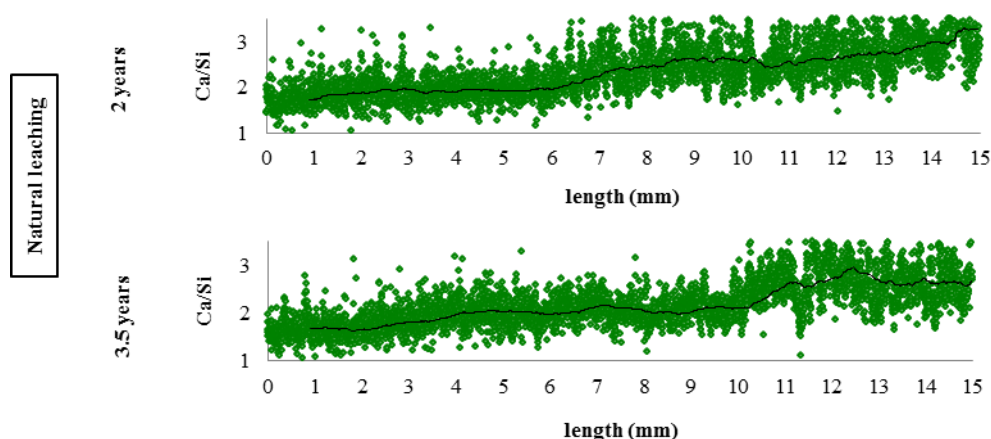
Figur 3-2. Lakat djup av portlandit (m) som funktion av tid (år).

3.2.2 Lakningsfrontens utsträckning och form

Det faktum att lakningsprocessen till allra största delen är diffusionsstyrd kommer att innebära att lakningen kommer att ske med en betydande fördröjning i de inre delarna av betongkonstruktionen jämfört med i de yttre och en sammansättningsprofil med framförallt ett varierande Ca:Si-förhållande kommer att utvecklas. Studier genomförda av Babaahmadi (2015) har visat att prover som lakats både på elektrokemisk och naturlig väg i ett rinnande vatten utvecklar en sammansättningsprofil av denna typ (figur 3-3 och 3-4).



Figur 3-3. Prover av cementpasta som lakats på elektrokemisk väg.



Figur 3-4. Prover av cementpasta som lakats på naturlig väg under 2 respektive 3,5 år i ett flödande grundvatten i Äspölaboratoriet.

Detta innebär att de yttre delarna av betongkonstruktionen efter en tid kan vara helt degraderade (här innebärande en betydande sammansättningsförändring samt tydligt förhöjd porositet) medan samtidigt andra delar av betongkonstruktionen är helt opåverkade. Detta innebär även att betongens porositet kommer att skilja sig mellan inre och yttre delar vilket i sin tur leder till att betongens frysningsegenskaper kommer att variera över konstruktionens tvärsnitt.

3.3 Effekt av frysning på betongbarriärerna i 1BMA och 2BMA

3.3.1 Frysning av icke lakad betong

Ett antal olika studier har genomförts i syfte att klargöra vilken inverkan en permafrost på förvarsdjup kan ha på betongkonstruktionerna i 1BMA och 2BMA. För silon är inte betongkonstruktionen den primära flödesbarriären och silon har därför inte inkluderats i studierna.

I en teoretisk studie av Emborg et al. (2007) presenteras den huvudsakliga slutsatsen att betongen i 1BMA kommer att frysa sönder vid en temperatur mellan 0 och $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ och att betongen efter frysning och tining kan förväntas ha en hydraulisk konduktivitet motsvarande den för grus.

Under 2011 genomfördes försök med frysning av betongkärnor från 1BMA (Thorsell 2013). Vid denna undersökning vilken innehöll två olika frysningssyklar, vardera omfattande 10 prover, frös betongen sönder mellan -3 och $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ och majoriteten av provkropparna frös sönder vid $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kritik har dock framförts mot den metod som användes för torkning av proverna innan dessa vattenmättades, innebärande att den höga temperaturen som användes vid torkningen (105°C under flera dagar) har förstört betongen och därmed påverkat provernas frystemperatur (Tang 2013, personlig meddelande). Det bör dock noteras att trots den omilda torkningen så klarade samtliga prover i en provserie där proverna cykliskt frös till allt lägre temperaturer för att sedan tinas inför mätningen nedfrysning till -4°C utan detekterbara skador.

SKB har även låtit genomföra ytterligare en modellering av konsekvenser av frysning av betong i ett geologiskt slutförvar. I denna studie (Tang och Bager 2013) är de övergripande slutsatserna att betongen som använts i konstruktionerna i SFR inte kommer att spricka sönder på det sätt som beskrivits av Emborg et al. (2007). I stället förutspår Tang och Bager (2013) att det endast kommer att uppkomma mikrosprickor i de inre delarna av materialet men att betongen i övrigt kommer att behålla sin integritet.

I syfte att verifiera de slutsatser som drogs av Tang och Bager (2013), genomfördes en experimentell undersökning av frysning av betong (Pålbrink och Rydman 2013). I denna studie genomfördes

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

frysningsexperiment med betongprover vilka var inneslutna i en kraftig stålcylander och omgivna av vattenmättat grus i syfte att efterlikna 1BMA efter förslutning, figur 3-5. För att erhålla en något tydligare porstruktur i proverna och på så sätt lite mer efterlikna en åldrad betong användes en betong med ett vatten-cement-tal på 0.7. Detta att jämföra med 0.45 och 0.63 vilket är vct för betongen i silon respektive 1BMA. Proverna frystes i samtliga experiment ner till minst -10°C men inte i något fall observerades den strukturella kollaps som förutspått i Emborg et al. (2007) eller observerats i Thorsell (2013).

Pålbrink och Rydman (2013) redovisar gångtiden för en ultraljudspuls genom provet för proverna före och efter frysning (tabell 3-2). Ur tabell 3-2 framkommer att gångtiden ökar efter frysning jämfört med icke fruset material. Detta tyder på att det i överensstämmelse med förutsägelserna gjorda av Tang och Bager (2013) har uppkommit mikrosprickor (vilka inte leder ljud) i materialet vid frysning men utan att några större skador uppkommit. Notera även att materialet frystes ner till minst -10°C vilket är betydligt lägre än vad som kan förväntas på förvarsdjup vid en eventuell permafrost (avsnitt 2.3.2).

Tabell 3-2. Gångtid för en ultraljudspuls genom 4 olika prover före och efter frysning.

Provnummer	Före frysning (μs)	Efter frysning (μs)
12	25,3	27,1
13	25,4	45,3
14	25,9	26,0
15	25,9	30,7

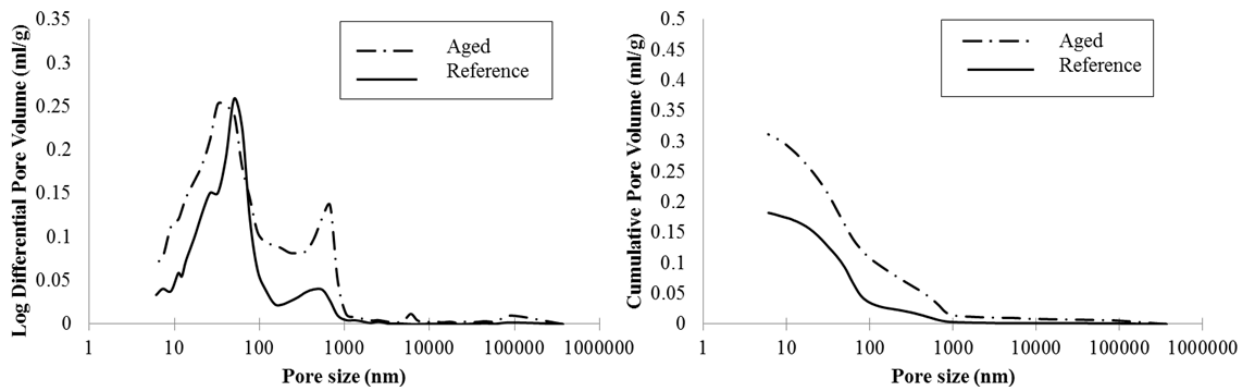


Figur 3-5. Försökupställning vid frysning av betongprover under inverkan av tvång. Bilden till vänster visar hur provet placerats i behållaren på en bädd av grus medan den högra visar behållaren helt fylld med vatten och grus innan locket skruvades fast.

3.3.2 Frysning av betong som åldrats genom lakning

Som nämndes i avsnitt 3.1 påverkas den temperatur vid vilken porvattnet i betong fryser av storleken på den por som vattnet är inneslutet. SKB har därför som en del i det arbete som genomfördes vid Chalmers tekniska högskola under 2010-2015 låtit undersöka förändringar i porstrukturen hos betong orsakade av lakning samt betongens frysningsegenskaper efter lakning (Babaahmadi 2015).

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong



Figur 3-6. Porstorleksfördelning hos färsk och åldrad cementpasta. Figuren är återgiven från Babaahmadi (2015).

Som fram går av figur 3-6 ökar andelen porer i storleksordningen 1000 nm vid portlanditlakning liksom porer i intervallet under cirka 50 nm.

De preliminära studier av betongens frysningsegenskaper som genomfördes av Babaahmadi (2015) visade att mängden frysbart vatten var större i lakade prov än i färskt material, vilket är i överensstämmelse med porositetsmätningarna. Studien kunde dock inte visa vid vilken temperatur som tillräckligt mycket vatten har fryst för att skador ska uppstå i betongen. Det bör här noteras att metoden mäter mängden frysbart vatten ner till -80°C vilket innebär att även det vatten som finns i de allra minsta porerna har frusit (tabell 3-1).

I syfte att ytterligare klargöra frysningsegenskaperna hos portlanditlakad betong genomfördes ytterligare studier vid Lunds tekniska högskola (Karlsson 2017, Fridh 2017). Vid dessa arbeten studerades mer utförligt frysningsegenskaperna hos prover som hade genomgått portlanditlakning enligt den av Babaahmadi (2015) beskrivna metoden.

Karlsson (2017) visade genom studier av frysning i slutna behållare enligt metod tidigare utvecklad av Pålbrink och Rydman (2013) att isbildning i portlanditlakade prover sker i temperatintervallet 0 till -3°C . Detta är förenligt med tidigare kända data vad gäller frystemperatur i relation till storleken på den por i vilken vattnet är inneslutet. Då den lägsta temperatur som studerades av Karlsson (2017) är -10°C är det dock inte möjligt att bestämma hur mycket ofruset vatten som finns kvar i provet och inte heller i vilken omfattning vatten omfördelats i porsystemet under frysningen. Tydligt var dock att betongproverna var visuellt oskadade av frysning ner till -10°C bortsett från viss yttlig avskalning på den ena kortsidan (figur 3-7). Denna avskalning kan troligtvis förklaras av att denna sida utgör den del som lakats kraftigast och att porstruktur såväl som hållfasthet varit kraftigt påverkade av den elektrokemiska processen.

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong



Figur 3-7. Prov som lakats och sedan frysts ner till -10 °C. Notera ytavskalningarna i toppen av provet. Denna del motsvarar den kraftigast lakade delen av provet.

I syfte att undersöka effekten av frysningen på betongens integritet genomfördes ultraljudsundersökningar där tiden för en ljudvåg att passera genom provet mättes för färska, lakade samt lakade och frysta betongprover. Resultaten, vilka redovisas i tabell 3-3, visade att gångtiden för ultraljudsvågen ökar dels efter lakning och del ytterligare efter frysning. Detta tyder på att det har bildas försvagningszoner (genom vilka ej ultraljud kan passera) i materialet både under lakning men även efter frysning. Trots detta var betongens integritet oförändrad och provet fortfarande höll väl ihop även efter frysning. Detta verifierar observationerna i Pålbrink och Rydman (2013) samt bekräftar slutsatserna i Tang och Bager (2013).

Tabell 3-3. Gångtid med för en ultraljudsvåg genom prover som genomgått lakning och frysning.

Provkropp (dagar urlakade)	Efter urlakning, före frysning (μs)	Differens från starttid innan frysning (μs)	Efter urlakning och frysning (μs)	Differens på grund av frysning (μs)	Differens från urlakade och frysta provkroppar från starttid (μs)*
0	13,8	1,7	16,3	2,5	4,2
20	15,6	3,5	16,4	0,8	4,3
25	19,6**	7,5	17,3	-2,3	5,2
30	18,6	6,5	19,2	0,6	7,1

* En referenstid hade tidigare uppmätts till 12,1 μs för färskt och opåverkat material.

** Denna mätning bedömdes av Karlsson (2017) som troligen behäftad med mätfel och därför inte korrekt.

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

Mätning av den hydrauliska konduktiviteten hos lakade och frysta prover bekräftar bilden från ultraljudsmätningarna att de interna skador som uppstår på betong som fryser under en permafrost är begränsade (tabell 3-4). Värdena i tabell 3-4 kan jämföras med de värden på hydraulisk konduktivitet som används vid radionuklidtransportberäkningarna (SKB 2015b). De uppmätta värdena i tabell 3-4 ligger vid tiden för en första möjlig permafrost (56 000 e Kr, kapitel 2) flera 10-potenser under de i radionuklidtransportberäkningarna använda värdena vilket indikerar att gjorda antaganden i radionuklidtransportberäkningarna är pessimistiska.

Tabell 3-4. Hydraulisk konduktivitet för olika prover.

Prov	Längd (mm)	Diameter (mm)	Hydraulisk konduktivitet (m/s)
Referens	29,8	51,5	Mätningen misslyckades. Provet för tät.
Fryst	30,8	51,5	$2,7 \cdot 10^{-11}$
Lakat och fryst	30,3	51,5	$6,3 \cdot 10^{-10}$

3.4 Summering av effekter på betong till följd av frysning

I detta kapitel har en sammanställning av studier av relevans för frågeställningen rörande i vilken omfattning frysning av betongens porvatten i samband med en permafrost kan orsaka allvarliga skador på betongkonstruktionernas förmåga att begränsa utsläpp av radionuklider presenterats.

Följande punkter summerar de viktigaste slutsatserna:

- Den temperatur vid vilken betongens porvatten fryser beror på storleken på den por i vilken vattnet är inneslutet.
- Lakning av betong kommer att leda till att porstrukturen och därmed frysningsegenskaperna till viss del kommer att skilja sig över betongens tvärsnitt.
- Vid frysning av betongens porvatten i samband med en permafrost uppstår interna mikrosprickor men betongens strukturella integritet förblir opåverkad.
- Den hydrauliska konduktiviteten hos lakad och fryst betong är flera 10-potenser lägre än vad som antas i analysen av förvarets säkerhet efter förslutning vid tidpunkten för en första möjlig frysning, vilket visar att säkerhetsanalysen är pessimistisk i detta avseende

Den övergripande slutsatsen är därför att frysning av åldrad betong i samband med en eventuell framtida permafrost inte kommer att orsaka skador i en sådan omfattning att betongkonstruktionerna helt förlorar sin integritet eller att dess hydrauliska konduktivitet överstiger det värde som antas i analyserna av förvarets säkerhet efter förslutning.

4 Dos för ett hypotetiskt fall med tidig permafrost och sönderfrysning av barriärer

I detta kapitel beskrivs beräkningar för ett fall med en hypotetisk permafrost 10 000 -15 000 år efter förslutning som leder till sönderfrysning av betongbarriärerna. Detta beräkningsfall utförs trots att SKB i detta PM visar att frysning på förvarsdjup inte kommer att ske före ca 56 000 e Kr, samt att betongbarriärerna i SFR inte skulle frysa sönder vid en sådan frysning. Detta beräkningsfall görs för att besvara en fråga från SSM och visar på förvarets robusthet mot klimatpåverkan.

Beräkningsfallet sätts upp med en extra hypotetisk permafrost mellan 12 000 – 17 000 e Kr. I övrigt antas samma klimat som i huvudscenariot i SR-PSU (SKB 2015a). Betongen i de olika förvarsdelarna antas frysa sönder till följd av den extra permafrosten. Denna beräkning benämns här **hypotetisk permafrost (HP)**.

Som jämförelse används beräkningsfallet för global uppvärmning från SR-PSU. Resultatet för detta beräkningsfall har dock justerats jämfört med vad som beskrivs i huvudrapporten för SR-PSU (*Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR*) efter att fel nyligen upptäckts i de modeller som användes i SR-PSU. Effekten av dessa fel visades vara små (Åstrand et al. 2017a, b), men felen är ändå åtgärdade i beräkningarna för detta PM både för hypotetisk permafrost och för global uppvärmning. Beräkningsfallet för global uppvärmning benämns här **huvudfallet (CCM_GW)**.

4.1.1 Beskrivning av beräkningsfallet för hypotetisk permafrost

Vattenflöden

I beräkningsfallet HP påverkar permafrost vattenflödet i geosfären och förvaret så att vattenflöden stoppas helt under de 5000 år som det är permafrost och därefter ökar flödet i förvaret till följd av att betongbarriärerna antas frysa sönder. Detta görs genom att vattenflöden för fullständigt degraderad betong används. I tabell 4-1 visas vilka vattenflöden från de hydrologiska beräkningarna för närzonen (Abarca et al. 2013) som används för att ta hänsyn till förändringen av vattenflödet med tiden.

Tabell 4-1. Förändring av vattenflödet i närzonen för beräkningsfallet med hypotetisk permafrost. Inget flöde (svart), måttligt degraderad betong $K=10^{-7}$ m/s (blå), väsentligt degraderad betong $K=10^{-5}$ m/s (gul), fullständigt degraderad betong $K=10^{-3}$ m/s (orange) och basfall för BLA (grön). "F" betecknar sprickflödesmodell.

Tid e Kr	2000–3000	3000–12 000	12 000–17 000	17 000–52 000	52 000–56 000	56 000–67 000	67 000–76 500	76 500–78 000	78 000–81 500	81 500–86 500	86 500–102 000
BMA	Black	Blue	Black	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Black
Silo	Black	Yellow	Black	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Black
BTF, BRT	Black	Yellow	Black	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Black
BLA	Black	Green	Black	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Black

* Angivna konduktiviteter gäller för betong, för andra material se Abarca et al. (2013).

Diffusivitet och porositet

Vid den hypotetiska permafrosten antas att diffusivitet och porositet för cementbaserade material ändras så att de får samma värden som efter permafrosten i huvudscenariot (56 000 e Kr), se tabell 4-2 och 4-3.

Tabell 4-2. D_e -värden (m^2/s) för cementbaserade material i beräkningsfallet med hypotetisk permafrost.

Tid (e Kr)	Konstruktionsbetong			Betongbehållare			Kringjutningsbruk		
	1-2BMA*	Silo*	1-2BTF	1-2BMA	Silo	1-2BTF	1-2BMA	Silo	1-2BTF
2000-2100	3.50E-12	3.50E-12	3.50E-12	3.50E-12	3.50E-12	3.50E-12	3.50E-10	3.50E-10	3.50E-10
2100-2500	5.00E-12	1.00E-11	2.00E-11	2.00E-11	2.00E-11	5.00E-11	4.00E-10	3.50E-10	3.50E-10
2500-3000	5.00E-12	1.00E-11	2.00E-11	2.00E-11	2.00E-11	5.00E-11	4.00E-10	3.50E-10	3.50E-10
3000-12 000	5.00E-12	1.00E-11	2.00E-11	2.00E-11	2.00E-11	5.00E-11	4.00E-10	3.50E-10	3.50E-10
12 000-102 000	2.00E-10	1.00E-10	5.00E-10	5.00E-10	1.00E-10	8.00E-10	1.00E-09	1.00E-09	1.00E-09

* Fördelningsfunktioner används för konstruktionsbetong i 1-2BMA och silon (se SKB 2014b). För övriga material används deterministiska värden.

Tabell 4-3. Porositeter för cementbaserade material i beräkningsfallet med hypotetisk permafrost.

Tid (e Kr)	Konstruktionsbetong			Betongbehållare			Kringjutningsbruk		
	1-2BMA	Silo	1-2BTF, BRT	1-2BMA	Silo	1-2BTF	1-2BMA	Silo	1-2BTF
2000-2100	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,3	0,3	0,2
2100-2500	0,14	0,11	0,11	0,14	0,11	0,11	0,4	0,3	0,2
2500-3000	0,14	0,16	0,11	0,14	0,11	0,11	0,4	0,3	0,2
3000-12 000	0,14	0,16	0,2	0,14	0,11	0,2	0,4	0,3	0,4
12 000-102 000	0,5	0,25	0,5	0,5	0,11	0,5	0,5	0,3	0,5

Kd-värden

Förändringen av pH och därmed Kd-värden sker långsamt, men kan förväntas ske snabbare i det hypotetiska permafrostfallet än i huvudfallet. I beräkningarna antas för de olika förvarsdelarna:

1-2BMA: I huvudscenariot antogs att cementbaserade material degraderade från degraderingstillstånd I-II vid 7000 e Kr och att degraderingen inte nådde nästa steg under analysperioden (SKB 2015b, tabell 4-4). Det innebär att pH inte förändrades under perioden med flöde för fullständigt degraderad betong, vilken varade 46 000 år (56 000 -102 000 e Kr, SKB 2015b, tabell 4-1). I beräkningsfallet med accelererad betongdegradering började perioden med flöde för fullständigt degraderad betong vid 22 000 e Kr (SKB 2015b, tabell 4-7) utan att degraderingen nådde nästa steg under analysperioden. Således bibehölls steg II under 80 000 år (22 000 e Kr till 102 000 e Kr). Utifrån detta antas det i det hypotetiska fallet att cementbaserade material degraderar från I-II vid 7000 e Kr och att steg IIIa uppnås 80 000 år efter slutet av permafrosten, dvs vid 95 000 e Kr. Steg IIIb antas inte uppnås under analysperioden.

Silo: I huvudscenariot antogs att cementbaserade material degraderade från degraderingstillstånd I-II vid 34 000 e Kr och att degraderingen inte nådde nästa steg under analysperioden. I det hypotetiska fallet antas degradering från steg I-II ske 10 000 år efter slutet av permafrosten, dvs vid 27 000 e Kr. Det

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

bedöms som ett mycket pessimistiskt antagande att specier som ingår i lakningen av betongen transporteras med diffusion även efter en permafrost. Degradering från steg II-IIIa antas ske 80 000 år efter degraderingen från I-II (samma tid som för BMA, trots att en långsammare degradering kan förväntas eftersom flödet begränsas av bentoniten även efter permafrost) dvs steg IIIa uppnås efter analysperiodens slut.

1-2BTF, BRT: I huvudscenariot antogs att cementbaserade material degraderade från degraderings-tillstånd I-II vid 4000 e Kr, II-IIIa vid 22 000 e Kr och IIIa-IIIb vid 58 000 e Kr. Vattenflöde för fullständigt degraderad betong började vid 12 000 e Kr. Det innebär att pH förändrades från II-IIIa efter 10 000 år med vattenflöde för fullständigt degraderad betong och från IIIa-IIIb efter ytterligare 36 000 år. I det hypotetiska fallet är det fruset under perioden 12 000 till 17 000 e Kr, vilket innebär att man skulle kunna ansätta en långsammare degradering än i huvudscenariot. Trots det används pessimistiskt samma tidpunkter för övergång mellan olika degraderingstillstånd som i huvudscenariot.

I tabell 4-4 redovisas en sammanställning av tidsperioderna med olika betongdegraderingstillstånd (avseende kemisk degradering).

Tabell 4-4. Tidsperioder med olika betongdegraderingstillstånd för beräkningsfallet med hypotetisk permafrost. Initialt befinner sig alla cementbaserade material i steg I (upplösning av natrium- och kaliumhydroxider och pH är högre än 12.5). Därefter följer steg II (upplösning av portlandit pH≈12.5), steg IIIa (inkongruent upplösning av CSH-faser, förekommer av Ca-aluminater pH≈12) and steg IIIb (inkongruent upplösning av CSH-faser, avsaknad av Ca- aluminater pH≈10.5).

Tid (e Kr)	2000– 4000	4000– 7000	7000– 22 000	22 000– 27 000	27 000– 58 000	58 000– 95 000	95 000– 102 000
BMA1	I	I	II	II	II	II	IIIa
BMA2	I	I	II	II	II	II	IIIa
Silo	I	I	I	I	II	II	II
BTF1	I	II	II	IIIa	IIIa	IIIb	IIIb
BTF2	I	II	II	IIIa	IIIa	IIIb	IIIb
BRT	I	II	II	IIIa	IIIa	IIIb	IIIb

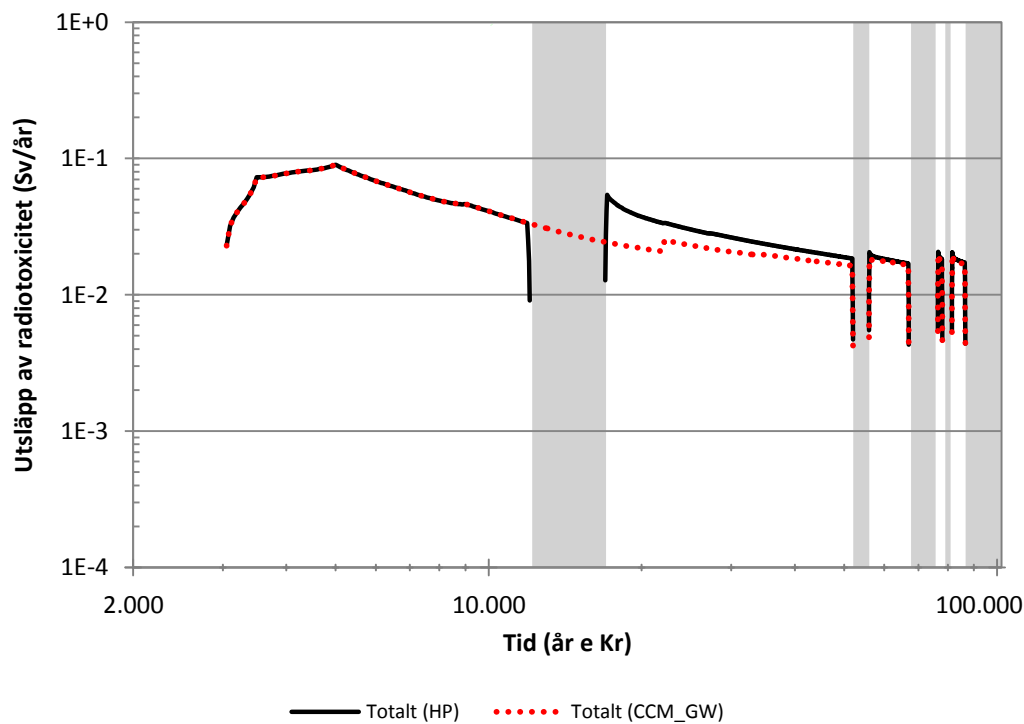
4.1.2 Resultat av radionuklidtransportberäkningen

Som ses i figur 4-1 ökar radiotoxicitetsutsläppet¹ från geosfären efter 17 000 e Kr signifikant i beräkningsfallet med hypotetisk permafrost jämfört med i huvudfallet. Eftersom betongdegraderingen vid den hypotetiska permafrosten (fullständigt degraderad betong vid 17 000 e Kr) är kraftigare än i huvudfallet (väsentligt degraderad betong vid 22 000 e Kr) så blir ökningen av utsläppet på grund av barriärdegraderingen kraftigare i fallet med hypotetisk permafrost. Tabell 4-5 visar de högsta doserna från enskilda förvarsdelar och hela SFR i huvudfallet. Tabell 4-6 visar de högsta doserna från enskilda förvarsdelar och hela SFR i fallet med hypotetisk permafrost. Vid en jämförelse mellan tabell 4-5 och 4-6 kan man se att för 1BMA och 2BMA sker en markant ökning av doserna efter en hypotetisk permafrost som inträffar mellan 12 000 och 17 000 e Kr. Dock inträffar maximalt radiotoxicitetsutsläpp även i beräkningsfallet med hypotetisk permafrost omkring 5 000 e Kr, det vill säga innan permafrosten. Maximalt radiotoxicitetsutsläpp påverkas alltså inte av permafrosten.

¹ Radiotoxicitetsutsläpp är aktivitetsutsläpp (Bq/år) multiplicerat med doskoefficienten för födoing.

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

Figur 4-2 visar total dos över tid för beräkningsfallet med hypotetisk permafrost och huvudfallet. Som ses i figuren kommer inte den kraftiga ökningen i radiotoxicitetsutsläppet direkt efter permafrosten att slå igenom direkt på dos. I stället sker dosökningen efter permafrosten vid en senare tidpunkt, främst på grund av det ökade utsläppet av Ni-59 (som fördröjs något både i geosfären och regolitlagren vid ytan).



Figur 4-1. Radiotoxicitetsutsläpp från hela SFR i beräkningsfallet med hypotetisk permafrost (svart heldragen linje). Resultat från huvudfallet är inlagd som jämförelse (rödprickad linje).

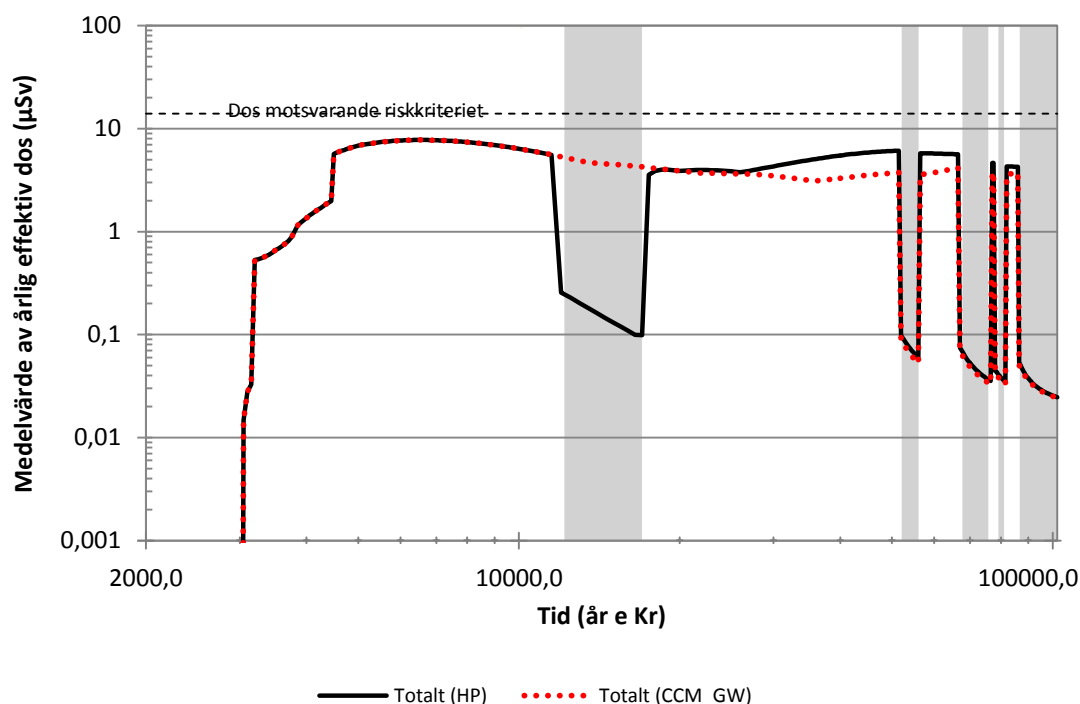
Tabell 4-5. Högsta doser från olika förvarsutrymmen i huvudfallet (CCM_GW).

Förvars-utrymme	Årlig dos [µSv]	Tidpunkt [år e Kr]	Biosfärs objekt	Exponerad grupp	Bidrag från radionuklid (%)
Silo	3,64	7 150	157_2	DM	Mo-93 (49,3)
1BMA	1,81	66 500	157_2	DM	Ni-59 (65,8)
1BLA	1,34	24 000	157_1	DM	U-238 (30,5)
1BTF	0,42	4 950	157_2	DM	Mo-93 (68,5)
2BTF	0,52	4 800	157_2	DM	Mo-93 (74,0)
BRT	0,37	5 450	157_2	DM	Mo-93 (98,7)
2BMA	1,08	28 500	157_1	DM	Ca-41 (56,6)
2BLA	0,11	21 000	157_1	DM	Ca-41 (39,1)
3BLA	0,10	6 050	157_2	DM	Mo-93 (43,3)
4BLA	0,12	20 000	157_1	DM	Ca-41 (39,9)
5BLA	0,13	22 500	157_1	DM	Ca-41 (34,8)
Totalt SFR	7,76	6 550	157_2	DM	Mo-93 (58,0)

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

Tabell 4-6. Högsta doser från olika förvarsutrymmen med hypotetisk permafrost.

Förvarsutrymme	Årlig dos [μSv]	Tidpunkt [år e Kr]	Biosfärs objekt	Exponerad grupp	Bidrag från radionuklid (%)
Silo	3,64	7 150	157_2	DM	Mo-93 (49,3)
1BMA	3,12	51 500	157_2	DM	Ni-59 (75,1)
1BLA	1,29	7 150	157_2	GP	U-238 (47,8)
1BTF	0,42	4 950	157_2	DM	Mo-93 (68,5)
2BTF	0,52	4 800	157_2	DM	Mo-93 (74,0)
BRT	0,37	5 450	157_2	DM	Mo-93 (98,7)
2BMA	1,46	19 500	157_2	DM	Mo-93 (48,0)
2BLA	0,11	17 500	157_1	DM	Ca-41 (43,9)
3BLA	0,10	6 050	157_2	DM	Mo-93 (43,3)
4BLA	0,12	17 500	157_1	DM	Ca-41 (43,0)
5BLA	0,12	17 500	157_1	DM	Ca-41 (41,8)
Totalt SFR	7,76	6 550	157_2	DM	Mo-93 (58,0)



Figur 4-2. Total dos från hela SFR i beräkningsfallet med hypotetisk permafrost (svart heldragen linje). Resultat från huvudfallet är inlagd som jämförelse (rödprickad linje).

4.1.3 Summering av radionuklidtransportberäkningen

Trots att dosen efter en hypotetisk permafrost ökar signifikant för beräkningsfallet med en tidig hypotetisk permafrost vid 12 000 - 17 000 e Kr, så inträffar maximal dos även med hänsyn tagen till en hypotetisk tidig permafrost innan permafrosten. Således är den maximala dosen med en hypotetisk permafrost mellan 12 000 och 17 000 e Kr samma som för huvudfallet.

Referenser

- Abarca E, Idiart A, de Vries L M, Silva O, Molinero J, von Schenck H, 2013.** Flow modelling on the repository scale for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Babaahmadi A, 2015.** Durability of cementitious materials in long-term contact with water. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.
- Berger A, Loutre M F, 1991.** Insolation values for the climate of the last 10 million years. Quaternary Science Reviews 10, 297–317.
- Brandefelt J, Zhang Q, Hartikainen J, Näslund J-O, 2013.** The potential for cold climate conditions and permafrost in Forsmark in the next 60,000 years. SKB TR-13-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Colleoni F, Wekerle C, Masina S, 2014.** Long-term safety of a planned geological repository for spent nuclear fuel in Forsmark – estimate of maximum ice sheet thicknesses. SKB TR-14-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Emborg M, Jonasson J-E, Knutsson S, 2007.** Långtidsstabilitet till följd av frysning och tining av betong och bentonite vid förvaring av låg- och medelaktivt kärnavfall i SFR 1. SKB R-07-60, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Fridh K, 2017.** Frysegenskaper hos kalciumurlakad betong – hur kan SFR påverkas av långvarig kontakt med grundvatten och de temperaturer som kan råda vid en permafrost. TVBM-7220, Avdelningen för byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.
- 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.
- Höglund L O, 2014.** The impact of concrete degradation on the BMA barrier functions. SKB R-13-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Karlsson K, 2017.** Urlakning av betong med elektrisk migration och frysning under tvång. TVBM-5109, Lunds tekniska högskola.
- Näslund J-O, Brandefelt J, Claesson Liljedahl L, 2013.** Climate considerations in long-term safety assessments for nuclear waste repositories. Ambio 42, 393–401.
- Pålbrink L, Rydman O, 2013.** Frysning av betong under inverkan av tvång: en experimentell studie av frostens inverkan på betongkonstruktionerna i slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall efter en permafrost. TVBM-5091, Lunds tekniska högskola.
- Quiquet A, Colleoni F, Masina S, 2016.** Long-term safety of a planned geological repository for spent fuel in Forsmark, Sweden and Olkiluoto, Finland. Phase 2: impact of ice sheet dynamics, climate forcing and multi-variate sensitivity analysis on maximum ice sheet thickness. SKB TR-16-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2006.** Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2008.** SFR 1. Slutlig säkerhetsrapport, pärm 2. (Safety analysis SFR 1. Long-term safety). 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.

Information om klimat och effekter på SFR till följd av frysning av betong

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

SKB, 2014b. Data report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

SKB, 2015b. Radionuclide transport and dose calculations for the safety assessment SR-PSU. Revised edition. SKB TR-14-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Svensk byggtjänst, 2017. Betonghandbok. Material. 3. utg. Solna: Svensk byggtjänst.

Tang L, Bager D, 2013. A study of consequences of freezing of concrete structures for storage of nuclear waste due to permafrost. SKB TR-12-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

von Schenck H, 2017. Vattenflöde genom 2BMA – känslighet för parametrisering av bergets egenskaper. Komplettering PSU – Hydrogeologi. Kompletteringsfråga 7. SKBdoc 1564134 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Åstrand P-G, Lindgren M, Ekström P-A, 2017a. Corrected implementation of fracture model used for 1BMA and 2BMA in SR-PSU. SKBdoc 1585173 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Åstrand P-G, Lindgren M, Ekström P-A, 2017b. Corrected waste volumes in radionuclide transport models used in SR-PSU. SKBdoc 1585177 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.