

R-07-60

Långtidsstabilitet till följd av frysning och tining av betong och bentonit vid förvaring av låg- och medelaktivt kärnavfall i SFR 1

Mats Emborg, Jan-Erik Jonasson, Sven Knutsson
Luleå tekniska universitet, Institutionen för Samhällsbyggnad

Oktober 2007

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864
SE-102 40 Stockholm Sweden
Tel 08-459 84 00
+46 8 459 84 00
Fax 08-661 57 19
+46 8 661 57 19



Långtidsstabilitet till följd av frysning och tining av betong och bentonit vid förvaring av låg- och medelaktivt kärnavfall i SFR 1

Mats Emborg, Jan-Erik Jonasson, Sven Knutsson
Luleå tekniska universitet, Institutionen för Samhällsbyggnad

Oktober 2007

Nyckelord: dokID 1088437, SFR 1 SAR-08, Betong, Bentonit.

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

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från www.skb.se.

Preface

This document describes the effect of freezing on the concrete and bentonite barriers in SFR 1. The document constitutes one of the references describing the degradation of barriers in a long-time perspective and is used in the safety analysis SFR 1 SAR-08.

Mats Emborg, Jan-Erik Jonasson and Sven Knutsson at Luleå University of Technology have compiled the report.

This document has been reviewed and all comments have been documented in accordance with SKIFS 2004:1.

Stockholm, November 2007

Anna Gordon

Project leader, SFR 1 SAR-08

Innehåll

1	Allmänt	7
2	Orientering	9
3	Underlag för bedömningar	11
4	Lastfall	13
5	Generella egenskaper hos betong, speciellt frostbeständighet	15
5.1	Inverkan av porer	15
5.2	Frostbeständighet	15
5.3	Inre frostangrepp	16
6	Beräkning av risk för frostsprängning av betong i SFR-silo	19
6.1	Förutsättningar	19
6.2	Beräkningsmetod	20
6.3	Resultat	22
7	Effekter av frysning och tining på bentonit som omger SFR-silon	27
7.1	Ren bentonit	27
7.2	Sand/bentonitblandning	31
7.3	Ren sand	31
8	Slutsatser	33
9	Referenser	35

1 Allmänt

Betong lämpar sig mycket väl som byggnadsmaterial till konstruktioner för säker förvaring av bl a kontaminerande och emitterande ämnen på grund av sin dokumenterade hållfasthet, täthet, beständighet och långtidsstabilitet. När frågeställningen lyfts fram huruvida en betongkonstruktion för kärnavfallsförvaring kan uppfylla den önskade funktionen efter ett antal framtida flertusenåriga permafrostcykler i ett mer än hundratusenårsperspektiv kan dock inte ett entydigt svar ges med en gång.

Med syfte att utreda frågan har föreliggande rapport utarbetats på uppdrag av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB). Utöver bedömningen av betongens funktion i detta scenario har även en bedömning av bentoniten som omger silon och fyller mellanrummet mellan denna och kringliggande berg genomförts.

De bedömningar och analyser som görs i denna rapport baseras på den dokumentation rörande SFR-silon som varit tillgänglig för oss, referens /5, 6, 7/.

Arbetet är till sin helhet rapporterat i denna rapport.

2 Orientering

I berggrunden utanför Forsmark har det etablerats en anläggning för förvaring av låg- och medelaktivt kärnavfall. I olika konstruktioner på ca 60 m bergdjup (mellan ca 40 och 110 m) förvaras kärnavfall i betongblock som placerats i celler i en betongsilo. Därutöver har även betongblock placerats i ett antal bergrum.

Den största mängden av det aktiva avfallet (90 %) kommer att vara placerat i silon och analysen här är därför primärt inriktad på hur denna konstruktion påverkas av nedfrysningsscyklerna.

Den omgivande skyddsbetongen består av en silovägg av armerad betong med tjockleken 0,8 m. Tak- och golvtjockleken är 1 m. Silon är uppbyggd i ett utsprängt bergrum och mellanrummet mellan betongsilo och bergyta är fyllt med granulerad bentonit. Den bentonitfyllda slitsen är ca 1,2 m bred utanför siloväggen. Under golvet finns motsvarande utrymme som är fyllt med en blandning av sand/granulerad bentonit. Här är tjockleken cirka 1,5 m. Över silon finns ett utrymme som närmast silotaket är fyllt med ett 1,5 m tjockt lager av sand/granulerad bentonit samt över detta cirka 12 m sand. Detta ansluter i sin tur till ovanliggande berg.

3 Underlag för bedömningar

De bedömningar som görs i detta arbete bygger på information vi hämtat från olika rapporter och skrifter. Dessa finns listade i avsnittet rörande referenser. Vi har inte haft tillgång till materialprov och inte heller kunnat göra egna tester av frysegenskaperna hos betong och bentonit. Vi har således bara kunnat göra analyser baserade på de uppgifter vi har kunnat erhålla från i huvudsak skrivet material.

Utöver det material som finns tillgängligt via rapporter av olika slag, har information om materialdata rörande den aktuella betongen, byggmetoder mm. ställts till vårt förfogande via SKB. Detta material beskriver tänkta belastningsscenarier, ritningar och olika data om konstruktionerna.

Detta material finns beskrivet bland referenserna.

4 Lastfall

Studien avgränsas till lastfallet nedfrysning och efterföljande upptining under framtida permafrostperioder. Rapporterna /1/ och /2/ ger information om det termiska lastfallet genom omfattande analyser och beräkningar rörande den termiska situationen för anläggningen vid Forsmark. Ett antal scenarier har studerats och alla studier visar att långvariga permafrostperioder kan uppträda på djupet 60 m (ca 40–110 m) under markytan. Detta djup sammanfaller med det djup där avfallet förvaras.

I rapporterna /1/ och /2/ redovisas tre scenarier:

- i) Basvariant.
- ii) Växthusvariant.
- iii) En variant gynnsam för permafrost. Alla tre fall visar på att permafrostperioder kommer att uppträda. Längden på perioderna beräknas variera mellan ca 2 000 och 20 000 år för de redovisade fallen.

Det konstateras i rapporterna att det är mycket sannolikt att Forsmarksanläggningen på djupet 40–110 m djup kommer att utsättas för ett antal flertusenåriga permafrostperioder med temperaturer ned mot -5 °C till -10 °C .

5 Generella egenskaper hos betong, speciellt frostbeständighet

Beskrivningen som följer och som avser betongs frostbeständighet avser en tämligen ny, ”jungfrulig” betong. När betong åldras förändras dess egenskaper. I det scenario med glaciation, som behandlas i denna rapport, kommer första nedfrysningen att ske efter många tusen år. Betongen i silon är vid detta tillfälle inte identisk med den vi har idag, som är en ung betong. Cementpasta, som är den sammanhållande fasen i betong, är i grunden ett metastabilt material som sannolikt gradvis kommer att förändras med tilltagande ålder. Möjliga strukturförändringar av betongen behandlas i /25/. De viktigaste förändringarna är att betongen kommer att:

- uppvisa en ökad hydraulisk konduktivitet (kanske en faktor 100),
- genomgå en kemisk omvandlingsprocess som medför minskad förmåga att motstå frostangrepp.

5.1 Inverkan av porer

Betong är ett poröst material där porerna i cementpastan (det med vatten reagerade cementet) inverkar starkt på egenskapsprofilen. Vid reaktionen med vatten bildas s k gelpartiklar, cementgel, och mellan dessa gelpartiklar utbildas utomordentligt fina porer som benämns gelporer. Efter några månaders reaktion har cementgelen fyllt ut nästan allt utrymme i cementpastan. Resterande utrymme utgörs av kapillärporer, som är betydligt grövre än gelporerna. Dessutom finns i betong alltid bearbetningsporer. Genom att betongen vibreras försvinner de större av dessa, men det kvarstår alltid ca 1,5–2 % porer som vanligen kallas komprimeringsporer.

Porfördelningen, dvs porernas storleksfördelning, varierar under betongens hårdnande. I tidig ålder, dvs under de första dygnens hårdnande, utgör gelporerna en mycket liten andel av totala porvolymen medan kapillärporerna utgör närmare 60 % av porerna. Gelporernas andel ökar för att vid färdighydratiserad betong (mer än ca ett år efter blandningen) utgöra ca 20 % av totala andelen porer. Porstorleksfördelningen beror även på vattencementtalet (relationen mellan vatten och cement), cementmängd och en mängd andra faktorer.

Porvolymen och porfördelningen påverkar flera betongparametrar och processer. Betongens hållfasthet och andra mekaniska egenskaper är t ex starkt beroende av porvolymen. Fuktbinding, fukttransport och uttorkning, liksom transport av klorider och andra kemiska ämnen, påverkas kraftigt av porerna. Krympningen, dvs betongens kontraktion när den torkar ut, är ytterligare en parametrar som styrs av porstrukturen.

5.2 Frostbeständighet

Frostbeständighet eller motstånd mot frostsprängning är en egenskap som beror på porstrukturen i betongen. Gelporerna och kapillärporerna fylls mycket snabbt av vatten vid en normal utomhusanvändning av betongen. Vid vattenabsorption under lång tid fylls även de grövre porerna (luftinblandningsporerna mm) med vatten. När betongen fryser övergår en viss del av porvattnet till is, och den uppkomna expansionen kan åstadkomma så stora spänningar inne i betongen att den skadas allvarligt.

Vattnets fryspunkt sjunker med minskad porstorlek. Exempelvis fryser inte vatten i en por med diametern 150 Å förrän vid $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vid den normala frystemperaturen, strax under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, är därför vatten i gelporerna och i de finaste kapillärporerna fortfarande inte fruset. Förutom porstorleken är den frysbara vattenmängden även beroende av om betongen först varit helt eller delvis uttorkad innan porerna återfylls med vatten.

Särskilt utsatt för frostsador är betong som saknar luftinblandning, betong som är ung och betong vars yta exponeras för svaga saltlösningar t ex från tölsalter och från havsvatten. Skaderisken ökar med ökad fuktbelastning.

Den främsta åtgärden för att öka frostbeständigheten hos en betong är att med tillsatsmedel åstadkomma ett luftporsystem så att utrymme skapas för expansionen vid isbildningen. Det är önskvärt med en extra luftinblandning dvs hög lufthalt och fina porer så att inbördes avstånden mellan porerna är litet. Luftinblandningen påverkar emellertid flertalet mekaniska egenskaper negativt, vilket gör att det finns en konflikt mellan hög frostbeständighet och goda mekaniska egenskaper (hållfasthet och elasticitetsmodul). Här kan framhållas att inblandning av tillsatsmedel för att skapa luftporsystem så att frostbeständigheten ökar gäller främst för betong vid normal användning, dvs utsatt för fukt och frystemperaturer under normala klimatförhållanden. I ett slutförvar av typen SFR-silo är fuktbelastningstiden så lång att inte ens det mest effektiva luftporsystem torde kunna skydda betongen i detta avseende, eftersom förvaret kommer att vara vattenfyllt när frysning sker.

Frostbelastad betong utsätts för två typer av frostangrepp:

- a) saltfrostangrepp som är ett rent ytangrepp förorsakat av frysning och tölsättning, eller frysning och havsvatten. Skador uppträder i form av avflagnad betong,
- b) inre frostangrepp och uppsprickning av gelen förorsakat av att det bildas för höga sprängande tryck i betongens inre delar orsakad av expansionen när det frysbara vattnet övergår till is. För att detta ska ske måste betongen vara vattenmättad över en kritisk nivå.

I dagens val av betongkvaliteter måste båda nedbrytningstyperna beaktas. För betong till krävande konstruktioner i saltfrostutsatt miljö, t ex broar, krävs sedan ett par decennium ett högsta tillåtet vattencementtal på 0,40 samt extra luftinblandning. Värdet på detta vattencementtal (vct) 0,40, baseras på armeringskorrosionen. För rena frostangrepp kan ett något högre vct accepteras i betongen om den nyttjas i ”normal miljö” och under ”normala tidsrymder”. Detta vct är av storleksordningen 0,45–0,50. Det krävs dessutom att betongen förprovas till dessa krävande typer av konstruktioner. Betongprover blir därvid utsatta för fryscyklar i speciella kylskåp och ev. ytavflagning dokumenteras efter 56 fryscyklar (alternativt 112 cykler för vissa betongblandningar) och jämförs med krav enligt normhandlingar.

5.3 Inre frostangrepp

I permafrostbelastning är det aktuellt med fallet inre frostangrepp. Vattnet i anläggningen kommer inte att vara helt rent från salt utan kommer att ha en viss salthalt beroende på den geokemiska miljön. En salthalt i vattnet sänker frystemperaturen och medför här att expansionen av vattnet vid en viss frystemperatur blir lägre än om man räknar med helt rent vatten. För att inte underskatta frysriskerna har den följande analysen haft som förutsättning att rent vatten fryser och att detta absorberas från material utanför konstruktionen. Detta antagande innebär alltså att fryskonsekvenserna överskattas.

Angreppet sker i betongens inre delar. För inre frostangrepp observeras skador genom att betongen visar tecken på expansion. Betongytorna får ett tätt mönster av grova och djupa sprickor vilka löper i alla riktningar. Ytorna kan däremot vara helt fria från avflagningar. Skador av inre frostsprängning kan även detekteras genom förlust i hållfasthet och elasticitetsmodul, vilket är en följd av att porositeten ökat.

De inre frostangreppen förekommer t ex i fristående konstruktioner som under längre tid står i vatten eller är grundlagda under grundvattenytans nivå. Vatten transporteras då hela tiden in i betongen och vattenmättnadsgraden ökar successivt. Om aktuell vattenmättnadsgrad i konstruktionens inre är större än den kritiska fuktnivån då betongen fryser sker skador på grund av expansionen vid frysningen.

Följande parametrar styr det inre frostangreppet:

- Porsystemet generellt; dvs porvolym, porstorleksfördelning och poravstånd.
- Porernas diameter.
- Vattencementtal hos betongen.
- Fuktmättnad i porerna.
- Mängd frysbart vatten.
- Tillgång till vatten.
- Tiden dvs tillgänglig tid för att fylla porsystemet till den högsta (kritiska) fuktmättnadsgrad som kan accepteras om frostsador ska undvikas. Denna kan vara betydligt lägre än 100 %.
- Om det finns mikrosprickor på grund av tidigare torkning eller tidigare frostsada.

6 Beräkning av risk för frostsprängning av betong i SFR-silo

6.1 Förutsättningar

Materialet betong

Enligt dataprotokollen för levererad betong till glidformsgjutningen av silobyggnaden, se /4/, kan följande sammanställning göras av betongens materialbeskrivning:

- Avsedd betongklass: K40.
- Provad tryckhållfasthet = 43–58 MPa (medel 48 MPa).
- v_{ct} = vattencementtal = 0,44–0,50 (medel ca 0,47).
- Cement = Degerhamn Std P (anläggningscement).
- C = cementhalt = 350 kg/m³.
- Tillsatsmedel: vattenreducerare och retarder av fabrikat SIKA.

Denna materialbeskrivning representerar en sk vattentät betong, som uppfyller kraven på betongklass K40, se t ex dåvarande betongnormen BBK 79. Denna betongtyp kan exempelvis användas vid gjutning av järnvägstunnlar där inte risk för frysning föreligger. Begreppet vattentät betong innebär att betongen har ett visst minsta motstånd mot vatteninträning enligt ett speciellt provningsförfarande. Detta har mindre betydelse i det aktuella sammanhanget, vilket är motståndet mot frysning vid höga vattenmättnadsgrader. Det man däremot noterar är att betongen formellt inte kan anses vara frostbeständig, eftersom luftporbildande tillsatsmedel inte har tillförts.

Att anläggningscement har använts tillsammans med relativt låg cementhalt innebär att risken för tidiga temperatursprickor med stor sannolikhet har varit liten. Man kan förvänta sig att man efter tillverkningen av aktuell silo har fått en bra och sprickfri konstruktion i enlighet med vad som avsetts.

Konstruktion

Den konstruktionsdel som i första hand analyseras här är silobyggnadens väggar av betong. De har en tjocklek av 0,8 m, se /3/. Utanför väggarna finns ca 1,2 m granulerad bentonit, vars påverkan av frysning/upptining analyseras separat, se vidare kapitel 7. Silon ligger på ett djup under markytan på ca 40–110 m.

Klimatförhållanden

Betongen förutsätts vara belastad med fritt vatten i kontakt med yttre siloväggen, vilket formellt kan beskrivas med att relativa fuktigheten är 100 %.

I det utredningsmaterial som predikterar temperaturklimatet, se /1, 2, 3/ i ett tidsperspektiv av ca 120 000 år, framgår att man på aktuellt djup under markytan (40 till 110 m) i de tre valda varianterna av scenarios (basvarianten, växthusvarianten respektive gynnsamt för permafrost) får en första permafrostperiod med temperaturerna ca –5 till –10 °C, enligt följande förenklade beskrivning:

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| i) Basvarianten: | Första frostperioden om ca 45 000 år |
| ii) Växthusvarianten: | Första frostperioden om ca 90 000 år |
| iii) Gynnsamt för permafrost: | Första frostperioden om ca 45 000 år |

Antalet permafrostcykler under en period av ca 120 000 år är minst i variant ii); något flera för variant i) och flest för variant iii). För analysen av frostnedbrytningen på betongen behöver vi sannolikt inte skilja mellan dessa tre olika scenarios, eftersom huvudmekanismen för betongen förväntas vara effekterna av frysning vid fullständig vattenmättnad redan vid ”första nedfrysningen” i respektive scenario, se vidare nedan.

6.2 Beräkningsmetod

Fuktvandring

Första tiden efter gjutningen får betongen en viss egenuttorkning (autogen uttorkning) som uppskattningsvis kan ge en inre relativ fuktighet i betongen av ca 98 %. Beroende på förhållandena den närmast efterföljande tiden, kan man även tänka sig att en diffusionsuttorkningsprocess pågår som strävar efter att uppnå jämvikt för den relativa fuktigheten som finns i luften kring silon och porfuktigheten i betongen.

Ett rimligt antagande rörande den relativa fuktigheten i de aktuella bergrummen är att man har en relativ fuktighet nära 100 %. Relativa fuktigheten (RF) i luft över en vattenyta (med samma temperatur som vattnet) är 100 %. För betongen i silon kan ett rimligt antagande vara att relativa fuktigheten (RF) i betongsilons yttre delar, som är i kontakt med bentonit och sand, har en relativ fuktighet på 100 %. Vid silons inneryta kan 95 % vara ett rimligt värde. Detta medför att ”medel RF” i betongen är nära 100 % redan när driftstiden är slut, trots att grundvattnet dräneras bort under drift- och inspektionsperioden.

Så småningom upphör dräneringen och grundvattnet tillåts omsluta konstruktionen. Start-situationen för silon kan då beskrivas med att man har haft en viss uttorkning i betongen till ca 90–95 % och att konstruktionen är i kontakt med vatten. Detta innebär att siloväggens yttre yta är i jämvikt med fuktigheten 100 %. Till följd av detta förhållande startar en uppfuktning-process, som innebär att betongen strävar efter att komma i jämvikt med de yttre randvillkoren. Dessa utgörs dels av belastningen $RF = 100 \%$ och dels av det yttre hydrostatiska vattentrycket som beror av avståndet till den fria vattenytan (grundvattenytan).

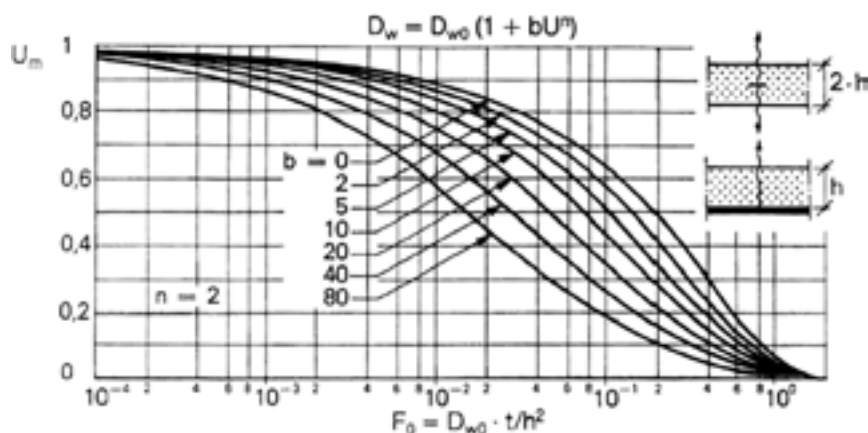
Fuktuptygningen i betongen kan principiellt beskrivas med fyra olika mekanismer:

- vattentransport till följd av gradient i vattentryck,
- kapillärtransport,
- diffusion,
- vattenupptagning i komprimeringsporer genom gradvis upplösning och borttransport av instängd luft i dessa.

Sannolikt beskrivs fukttransporten i den aktuella situation med hjälp av alla fyra mekanismerna, vilket komplicerar en modellbeskrivning. Dessutom försvåras situationen av att luft kommer att stängas in i betongen, varför även processen med att luft löses i vatten och transporteras däri måste beaktas.

Med en viss konservatism (fuktutjämningen går sannolikt snabbare i verkligheten) kan man betrakta ett diffusionsförlopp, där man tillämpar en lösning av diffusionsekvationen uttryckt i relativ fuktnivå (U), se figur 6-1, vilken är hämtad från /8/.

En total fuktutjämning enligt figur 6-1 innebär att man startar vid relativa fuktnivån 1 ($U = 1$) och går till jämvikt vid relativa fuktnivån 0 ($U = 0$), vilket enligt figur 6-1 kräver Fo -talet ≈ 2 . (”dimensionslös tid” ≈ 2). Formellt anger figur 6-1 en uttorkningssituation, men speciellt för



Figur 6-1. Lösning till diffusionsekvationen uttryckt i relativ fuktändring som funktion av "dimensionslös tid" (Fouriertalel F_0), enligt /8/.

parametern $b \approx 0$, vilket med god approximation kan anses vara giltigt för höga fuktigheter, är förloppet även giltigt för uppfuktningsförlopp. Figur 6-1 för $b \approx 0$ beskriver således en generell lösning av diffusionsekvationen antingen det gäller uttorkning eller uppfuktning. Genom att sätta in relevanta parametrar för diffusivitet och geometri ger figur 6-1 tiden för detta förlopp.

Det man behöver kontrollera, för att den föreslagna metodiken ska vara tillämplig som uppskattning av erforderlig tid att fylla betongens porer med vatten, är att luften i porerna löser sig i vattnet snabbare än vad vatten tränger in i betongen till följd av diffusionsprocessen. Om så är fallet kommer vattnets diffusion i betongen att vara den styrande processen. Om så inte är fallet blir hastigheten med vilken luft löser sig i vatten och diffunderar bort i detta, den avgörande processen. I detta senare fall kommer inestängd luft i porerna att utgöra ett hinder för vattnet att tränga in. Vattnet kan då bara fylla porerna i den takt med vilken luften löses och diffunderar bort i vattnet.

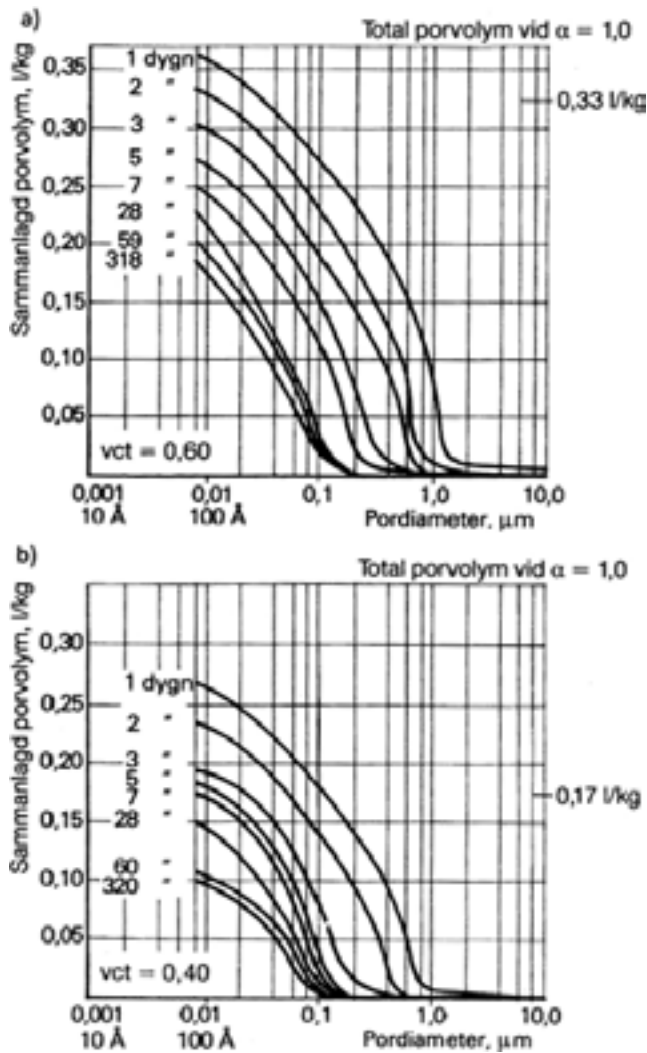
I denna analys har vi enbart valt att studera diffusionsprocessen. Detta är den långsammaste processen av de fyra aktuella mekanismerna som vi tidigare beskrivit.

Frysbar vattenmängd

För att uppskatta när vatten fryser kan man använda metodiken som finns beskriven i /9/, där man utgår från porvolymen i betongen bestämd med kvicksilverporosimeter, se figur 6-2, samt sambandet mellan frysning av vatten och pordiameter, se tabell 6-1.

Tabell 6-1. Samband mellan frystemperatur och pordiameter enligt /9/.

Frystemperatur (°C)	Pordiameter (Å)
-2	1 270
-6	440
-10	270
-15	190
-20	150
-30	110
-40	90



Figur 6-2. Porstorleksfördelning bestämd med kvicksilverporosimeter, enligt /8/. a) visar förhållandet vid $vct = 0,60$ och b) visar förhållandet vid $vct = 0,40$.

6.3 Resultat

Tid för uppfuktning

För att uppskatta erforderlig tid för att fylla porerna med vatten i den aktuella siloväggen kan parametrarna i uttrycken (6.1), (6.2) och (6.3) användas. Dessa är valda baserade på /10, 11, 12, 13, 14/ och /15/.

$$D_{w0} = \approx 2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s} \quad (6.1)$$

$$h = 0,8 \text{ m (tjockleken på siloväggen)} \quad (6.2)$$

$$F_0 \approx 2 \text{ (enligt figur 6-1)} \quad (6.3)$$

Den nödvändiga tiden för fullständig vattenmättnad av siloväggen kan då beräknas enligt uttrycket på abscissan i figur 6-1:

$$t = 2 \cdot \left(\frac{0,8^2}{2 \cdot 10^{-11}} \right) = 6,4 \cdot 10^{10} \text{ sek} \approx 2 \text{ 000 år} \quad (6.4)$$

Denna beräkning visar att betongen kan fuktas upp till fullständig vattenmättnad inom ca 2 000 år. Detta förhållande gäller dock bara om den inneslutna luften hinner lösas i vattnet och transporteras bort i detta. Enligt /11/ kan tiden för att fylla en luftfylld por uppskattas som funktion av porens storlek (radien), luftens densitet och diffusiviteten av luften i porvattnet. Diffusiviteten av luft i porvattnet kan antas vara 10^{-11} à 10^{-12} m²/s, enligt /11/. För att inte över-skatta snabbheten väljer vi här det lägre värdet 10^{-12} m²/s. För de porstorlekar som är aktuella i denna analys, se tabell 6-1, blir tiden för att lösa luften i porvattnet och att den diffunderar bort i detta av storleksordning sekunder och delar av detta. Av detta kan man dra slutsatsen att det är vattnets diffusion in i betongen som kommer att avgöra tiden för vattenmättnad och att luften i betongen kan lösas och diffundera bort inom ramen för den tid som en fullständig uppfuktning av konstruktionen tar till följd av diffusion enligt ekvation (6.4).

Ovanstående analys baseras på att tillräcklig mängd vatten finns tillgängligt vid siloväggens yttre begränsningsyta. Utanför siloväggen finns en 1,2 m bred spalt som är fylld med granulerad bentonit. Innan vatten kan nå betongsilons yttervägg måste bentoniten vattenmättas. Allt medan bentoniten suger upp vatten sväller den och tätar till håligheter. Slutresultatet blir en homogen lerstruktur med mycket låg hydraulisk konduktivitet. Vattentransporten genom denna massa kommer att bli mycket liten och till inte ringa del styras av diffusionsprocesser. Tiden till fullständig vattenmättnad av bentoniten kan uppskattas med ledning av arbete som utförts inom ramen för SR-Can, se /16/. Beroende på en mängd faktorer av typen: typ av bentonit, bentonitens densitet, blandningsförhållande mellan sand och bentonit, omgivande bergs sammansättning och sprickighet etc varierar tiden till vattenmättnad av bentoniten från några år till ca 500 år. I SFR-silon torde därför tiden till fullständig vattenmättnad av den omgivande bentoniten vara av storleksordningen 10² år.

Tiden för att uppnå fullständig vattenmättnad av betongkonstruktionen uppgår enligt ovan till maximalt något tusental år och bentoniten kommer därmed inte att förlänga tiden för konstruktionens fullständiga vattenmättnad.

Betongen kommer alltså att vara vattenmättad till 100 % vid tidpunkten för nästa glaciation och eventuella håligheter mellan betongblocken kommer att vara vattenfyllda.

Frysbar vattenmängd och dess påverkan på betongen

Som framgår av tabell 6-1 är frystemperaturen en funktion av pordiametern i betongen. För betong innebär det således att den frysbara vattenmängden blir en funktion av temperaturen och mängden porer. Detta gäller ner till en viss pordiameter.

Mängden porer i betong kan bestämmas med hjälp av porvolymen bestämd genom kvicksilverporosimetri, se figur 6-2. Figur 6-2a gäller för $v_{ct} = 0,6$ och figur 6-2b för $v_{ct} = 0,4$. Enligt avsnitt 6.1 kan den aktuella betongen anses ha ett v_{ct} i medeltal på 0,47 varför ett medelvärde av värdet i figur 6-2a respektive i figur 6-2b kan betraktas som ett relevant värde för den aktuella betongen.

Under den tid som hydratationen i betong med portlandcement fortgår är den frysbara vattenmängden även beroende av hydratationsgraden. I detta fall kan de lägre kurvorna (ca ett års härdning) i figur 6-2 anses vara representativa. Kalkylen genomförs här för temperaturnivåerna -5 °C respektive -10 °C.

Temperatur (°C)	Frysbar vattenmängd (l/kg)	Cementhalt (kg/m ³)	Frysbar vattenmängd (l/m ³)	
-5	0,05	350	$0,05 \cdot 350 = 17$	(6.5)
-10	0,09	350	$0,09 \cdot 350 = 30$	(6.6)

Den vattenmängd som fryser och bildar is expanderar ca 9 %. Betong är inte ett helt styvt material utan tåler en viss expansion av porerna utan att ta skada. En uppskattning av denna möjliga expansion kan göras genom att betrakta den expansion av betongen som ger upphov till en makroskada (genomgående spricksystem). Betongens dragkapacitet blir härvid av centralt intresse. Vid snabb belastning är dragkapaciteten ca $0,1 \cdot 10^{-3}$ (0,1 ‰). I det studerade fallet är belastningen långsam och värdet kan då ökas med ca 50 % (dvs 0,15 ‰). Orsaken till detta är att betongen uppvisar en rad krypeffekter som minskar spänningskoncentrationer mm, vilket sammantaget gör att dragkapaciteten ökar.

När betongens dragkapacitet uppnåtts innebär det att betongen har erhållit makrosprickor i hela volymen. Inträffar detta har betongkonstruktionen tappat en stor del av sin hållfasthet och täthet.

En linjär skadeexpansion på 0,15 ‰ i alla tre riktningar motsvarar en volymökning av $3 \cdot 0,15 \text{ ‰} = 0,45 \text{ ‰}$. Den minsta frysbara vattenmängden i 100 % vattenmättad betong för att skada ska uppkomma (W_{\min}) kan nu beräknas som den volym vatten vars expansion vid frysning (ca 9 %) ger en volymökning på 0,45 ‰. Detta ger uttryck (6.7).

$$W_{\min} \cdot 0,09 = \frac{(0,15 + 0,15 + 0,15)}{1000} \text{ eller } W_{\min} = 5 \text{ l/m}^3 \quad (6.7)$$

Uttryck (6.7) visar alltså att om det finns 5 l frysbar vatten per m^3 betong kommer betongen att erhålla makroskador. Detta är dock bara giltigt om det inte finns något expansionsutrymme alls för isen i betongen samt att isen betraktas som helt inkompressibel i relation till gelen. Detta är inte helt korrekt och i praktiken kan därför ovanstående värde behöva ökas något. Detta gäller även vid full vattenmättnad, och ett $W_{\min} = 5 \text{ l/m}^3$ kan därför vara en ”säker” uppskattning av vilken av volymen frysbar vatten som kan innehållas i betongen utan att frysskador med makrosprickor ska uppkomma vid fuktmetnad. Genom att ta betongens draghållfasthet i beaktande, dess deformationsegenskaper och fryshastigheten under frysförloppet kan man nog anta att gränsvattenmängden kan vara något högre än ovan angivna värde på 5 l/m^3 . Detta gäller främst vid temperaturer nära 0. Här kanske gränsvattenmängden är av storleksordningen 5–10 l/m^3 . Vi har valt att arbeta med den lägre siffran på grund av alla osäkerheter som det högre värdet är omgärdat av.

Jämför vi nu hur mycket frysbar vatten vi har i betongen vid olika temperaturer under 0 °C och jämför detta med det gränsvärde som beräknats ovan erhåller vi tabell 6-2.

Som framgår av beräkningarna ovan och tabell 6-2, ger en frystemperatur av –5 °C upphov till en frysbar vattenmängd som är mer än tre gånger större än den minsta erforderliga frysbara vattenmängden för uppkomst av makrosprickor. Vid temperaturen –10 °C är den frysbara vattenmängden 6 gånger högre än den som krävs för att makrosprickor ska uppkomma.

Här ska påpekas att ovanstående analys är en enkel analys som kraftigt torde underskatta mängden frysbar vatten i betongen. Tar man i beaktande resultat som publicerats i /24/ kan den frysbara mängden vatten beräknas vara så hög som 20–60 l/m^3 för de temperaturer som anges i tabell 6-2. Mängden frysbar vatten beror av en mängd faktorer, bland annat betongens vct, hur den torkat, hur den återuppfuktats, torkningsålder, hydratiseringsgrad etc. Väsentligt är att slutsatsen är densamma som ovan. Mängden frysbar vatten i betongen är så hög att betongen får skador då den fryser.

Tabell 6-2. Mängd frysbar vatten i relation till den vattenmängd som ger makroskador i aktuell betong (gränsvattenmängd).

Frystemperatur (°C)	Frysbar vattenmängd (l/m^3)	Gränsvattenmängd (l/m^3)
–5	17	5
–10	30	5

Slutsatsen blir således, att temperaturerna i det studerade intervallet är tillräckligt låga för att ge upphov till makrosprickor i betongen och därmed ”luckra upp” denna. Ett viktigt skäl till att detta kan anses rimligt är att betongen är fullständigt vattenmättad då frysningen inleds.

Uppluckring av detta slag medför så stor strukturell påverkan på betongen att den inte efter frysning och tining längre kan antas hålla samman. Dess funktion som barriär för diffunderande ämnen kan därför bedömas vara liten och av samma storleksordning som vad man kan finna i naturliga sand/grus strukturer. Relationen mellan hur ämnen sprids med diffusion respektive konvektion, kan efter frys/tinings uppluckring bedömas vara densamma som det som gäller för naturliga sand/grusstrukturer. Orsaken är att betongen efter frysning och upptining har så många och så djupgående sprickor att den mest kan karakteriseras som en sand/grus formation.

7 Effekter av frysning och tining på bentonit som omger SFR-silon

I utrymmet mellan silo och bergvägg finns en cirka 1,2 m vid spalt som är fylld med granulerad bentonit. I utrymmet över respektive under silon finns ett lager med sand/bentonit och upptill är utrymmet upp till berg fyllt med sand. Sand/bentonitblandningen är sammansatt av 90 % sand och 10 % bentonit. Ett huvudskäl för den stora sandmängden i blandningen är egentygden hos silon. Silon vilar på sand/bentonit blandningen och denna måste således ha både tillräcklig bärförmåga och tillräcklig styvhet för att inte ge upphov till skadliga sättningar i silon. Typiska värden för materialen finns beskrivna i /3/.

7.1 Ren bentonit

Enligt /3/ varierar torrdensiteten i slitsen mellan 0,95 t/m³ vid silons topp och 1,12 t/m³ vid silons botten. När bentoniten vattenmättats ökar densiteten till 1,60 t/m³ vid silons topp och 1,8 t/m³ vid botten. Beräknad porositet baserat på dessa värden blir 0,65–0,68.

Vattenkvoten vid vattenmättnad kan beräknas och uppgår till 40–70 % beroende på den vattenmättade densiteten.

Andel vatten som fryser i bentonit

På motsvarande sätt som för betong fryser inte allt vatten i en lera vid 0 °C utan andelen vatten som fryser ökar med sjunkande temperatur. I fallet leror beror detta till största delen på lerpartiklarnas yteffekter. Med ökande partikelyta sjunker andelen vatten som fryser för en given temperatur. Ytan mäts i ”specifik yta” vilket utgör ett tal som beskriver den totala partikelytan per massenhet torrt material. För ren bentonit ligger den i storleksordningen 800 m²/gram. Variationerna är stora och beror på typ av lermineral struktur, renhet mm. Den mängd vatten som inte fryser vid en given temperatur benämns vattenkvot ”ofruset vatten” (w_u). Vid en given temperatur under noll fördelas alltså det totala vatteninnehållet mellan sådant vatten som är fruset (is) och sådant som är ofruset.

Tabell 7-1 visar vattenkvoten ofruset vatten som funktion av temperaturen för några olika värden på den specifika ytan.

Den specifika ytan för bentoniten i SFR-silon kan antas ligga i intervallet 600–800 m²/g. Det medför att en del vatten kommer att frysa för de aktuella temperaturerna. När vatten bildar is sker en expansion. Volymökningen kommer att medföra en tryckökning i systemet, som kommer att vara beroende av expansionsmöjligheterna. Ju mera trycket ökar ju mindre

Tabell 7-1. Vattenkvot ofruset vatten som funktion av temperatur och specifik yta, efter /17/.

Temperatur (°C)	Vattenkvot ofruset vatten, w_u (%)		
	600 m ² /g	800 m ² /g	1 000 m ² /g
- 1	44	52	59
- 2	37	44	50
- 5	29	35	40
- 10	24	29	34

is kan bildas. Detta innebär att om expansionsmöjligheterna är små, vilket är fallet för ett fyllt och slutet förvar, byggs tryck upp som sänker frystemperaturen. Fryspunktsnedsättningen är omkring 1 °C per 13,5 MPa i ett helt slutet system. Det maximala tryck som kan byggas upp i förvaret är det som motsvarar överlasten. Med ett djup under markytan på 60 m blir trycket ca 1,6 MPa, vilket motsvarar en fryspunktsnedsättning på ca 0,1 °C. Detta kommer inte att ha betydelse i sammanhanget.

Den expansion som uppkommer genom att en del av vattnet som finns i bentoniten successivt fryser kommer inte att orsaka någon nämnvärd volymökning av bentoniten. Volymökningen klaras genom att vatten successivt pressas ut ur bentoniten, allt efter det att frysfronten passerar förvaret och is bildas. Frysfronten kommer till största delen att vara horisontell under passagen av förvaret och röra sig så långsamt att denna utpressning är möjlig. Med ledning av /1/ kan frysfrontens hastighet under en glaciationstillväxt uppskattas till ca 5 cm/år. Med en maximal vattenvolym i bentonitens övre delar på 70 % kommer en vattenvolym av maximalt ca 0,035 m³/år, m² att pressas ur bentoniten. Med de hydrauliska konduktiviteterna som är aktuella för bentoniten enligt /16/ kommer detta inte att orsaka segregation av is och att ovanliggande berg lyfts.

Det vatten som pressas ut ur bentoniten under frysförloppet måste såväl ut ur bentoniten som ut i omgivande berg. Är bergets hydrauliska konduktivitet avsevärt lägre än bentonitens kommer en tryckuppbyggnad att ske i förvaret enligt ovan. Tryckökningen kommer inte att ha betydelse för fryspunktsnedsättningen. Silon kommer sannolikt att påverkas, men även detta är ointressant eftersom vi tidigare visat att betongen kommer att disintegreras till följd av frysningen.

Det kan vara värt att nämna att när en frysfront passerar bentoniten kan de vid frysfronten anrikade salterna påverka bentoniten på ett sätt som beskrivs i /26/. Påverkan kan vara dels en möjlig omvandling av en svällande lera till en icke svällande och dels en möjlig cementering av lerpartiklarna genom utfällning av svårösliga föreningar av i första hand kisel. Om detta sker kommer det dock inte att ha betydelse i sammanhanget, eftersom den kemiska omvandlingen av bentoniten bara sker ytligt under den aktuella tidsperioden.

Islinsbildning (tjällyftning) i bentoniten

Utöver att det vatten som finns i bentoniten till viss del fryser när temperaturen sjunker under 0 °C och därvid expanderar, och i detta fall successivt pressas ur bentoniten, sker även den omvända processen. Denna process innebär att vatten sugas in i den frysande bentoniten där det ansamlas i isskikt som successivt växer i tjocklek. Isskikten växer normalt i en riktning parallellt med värmeflödet. I detta fall, där vi kan räkna med en i stort sett horisontell frysfront, kommer alltså isskikten att växa i tjocklek vertikalt. Drivkraften för denna process kommer från det ofrusna vattnet som har en potential som är lägre än den i omgivande fritt vatten. Denna lägre potential är en följd av att vattnet inte fryser vid 0 °C utan vid en lägre temperatur. Fenomenet är vanligt i naturliga jordlager och benämns då tjällyftning.

Tjällyftningens storlek beror av flera faktorer. De viktigaste är:

- temperaturgradienten och därmed frysfrontens hastighet,
- vattentillgången,
- sammansättning av jordmaterialet som fryser,
- överlagringstryck,
- tillgänglig tid för frysning,
- med mera.

Ett sätt att beskriva jords tjällyftningsegenskaper är att använda begreppet ”segregationspotential” (SP). Detta värde är beroende av jordmaterial, dess hydrauliska konduktivitet, undertryck vid frysfronten, överlagringstryck mm. En del uppskattningar av SP kan göras med ledning av bland annat /18/ och /19/. Bentoniten är i detta sammanhang ett extremt material som utsätts

för mycket långa frystider. Enligt /1/ kan tiden för frysfronten att passera förvaret med höjden 53 m uppskattas till ca 2 000 år. Under denna tidsrymd kan bentoniten suga upp vatten och bilda islinser. Samtidigt som detta sker måste en volymökning ske. Då förvaret är fyllt och förseglat kan i detta fall enbart en volymökning ske uppåt mot markytan. Det innebär att islinserna som bildas kommer att lyfta den överliggande volymen och utsättas för tyngden av denna. På 60 m djup i berget är det vertikala trycket av storleksordningen 1,6 MPa. Islinserna utsätts alltså för denna spänning då de växer till.

Tryckberoendet för SP beskrivs oftast med uttrycket (7.1), se t ex /18, 19/ och /20/.

$$SP = SP_0 e^{-a\sigma} \quad (7.1)$$

där

SP segregationspotentialen vid aktuellt tryck

SP₀ segregationspotentialen utan överlast

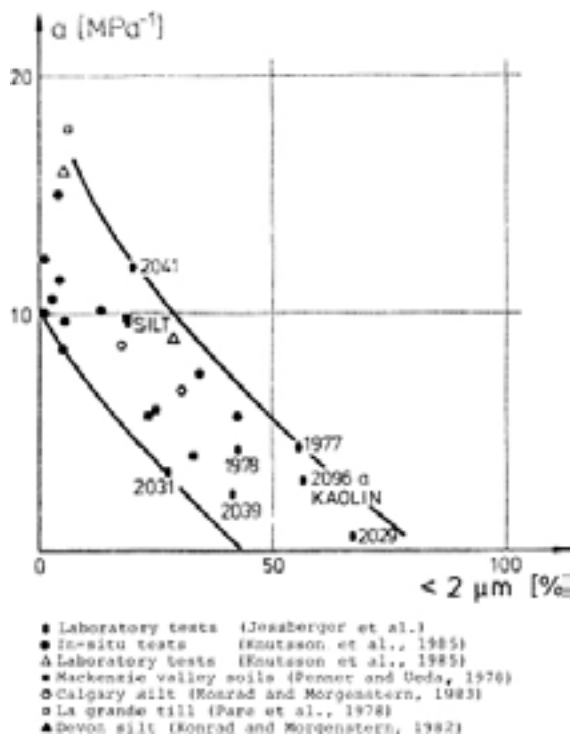
a tryckkänslighetsparametern

σ överlasten

Lermaterial är vanligen att betrakta som måttligt tjällyftningsbenägna, eftersom de har mycket låg hydraulisk konduktivitet. Ett representativt värde för SP₀ i bentoniten är svårt att uppskatta, men andra täta leror har ett värde motsvarande 10⁻³ mm²/sekund, °C. Värdet för den aktuella typen av bentonit torde ligga i intervallet 0,5–5·10⁻³ mm²/sekund, °C.

Tryckberoende faktorn **a** i uttryck (7.1) beror av lerhalten. Ju högre lerhalt är, desto mindre känslig är tjällyftningen för överlagringstrycket. Enligt /18/ och /19/ kan denna parameter antas ligga i intervallet 1–4 MPa⁻¹ vid mycket höga lerhalter. Detta samband visas i figur 7-1 och är hämtat från /19/.

Med dessa värden torde segregationspotentialen (SP) i bentoniten variera mellan 10⁻³ och 8·10⁻⁷ mm²/sekund, °C.



Figur 7-1. Parameter "a" som beskriver tjällyftningens tryckberoende som funktion av andelen ler i jordmaterialet, enligt /19/.

Inflödet av vatten (v) till frysfronten beräknas med (7.2), där grad T_f är temperaturgradienten i frusen zon.

$$v = SP \cdot \text{grad } T_f \quad (7.2)$$

där

SP segregationspotentialen vid aktuellt tryck ($\text{mm}^2/\text{sekund}$, $^\circ\text{C}$)

grad T_f temperaturgradienten i fruset område närmast frysfronten (grader/mm)

v vattenflödet in i det frusna området (mm/s); räknat per ytenhet parallellt med värmeflödets riktning

Med ledning av /1/ kan temperaturgradienten i den frusna zonen under glaciationsperioden uppskattas till ca $0,05 \text{ }^\circ\text{C/m}$. Antar vi vidare att tiden det tar för frysfronten att passera förvaret är cirka 2 000 år kan den insugna vattenmängden uppskattas. Denna ger därmed volymökningen till följd av islinnsbildning och den lyftning som kan tänkas ske på grund av detta. Även om glaciationsperioden är längre än 2 000 år kommer detta inte ha betydelse för tjällyftningarna, så länge som frysfronten inte går genom förvaret. Transporten av vatten långt in i det frusna området är försumbar på grund av den utomordentligt låga hydrauliska konduktiviteten i material som är fruset.

Med de ovan angivna värdena som grund, kan den totala lyftningen under hela glaciationsperioden uppskattas. Den bedöms ligga i intervallet några cm till någon meter totalt. Här ska dock påpekas att resonemanget bygger på att berget har tillräckligt mycket sprickor för att bergmassan ska kunna lyftas utan att först brytas sönder. Eventuell friktion i sprickorna har inte medtagits i kalkylen. Effekten av denna är att de totala lyftningarna reduceras. Det väsentliga här är att risken för tjällyftningar inte kan negligeras. Förekomst av tjällyftningar måste tas med i en bedömning av effekten av en glaciation av området med SFR-silon.

Det viktiga här är inte tjällyftningens absoluta värde utan insikten att man måste ta i beaktande möjligheten att tjällyftning inträffar i förvaret och att bergmassan över förvaret kan lyftas. Detta kan öppna såväl nya som gamla sprickor i bergmassan. Under glaciationen fylls dessa med is och torde inte öka spridningsmöjligheterna runt silon. När permafrosten tinar smälter isen. I detta skede är det inte troligt att alla sprickor sluts fullständigt. Det kommer att medföra att de inte har samma utseende, tjocklek och konduktivitet som innan frysningen.

Att föremål förblir lite lyfta efter att ha tjällyfts och sedan endast till viss del återtar sin gamla position är ett mycket vanligt fenomen i tjällyftande jord. Detta är en av förklaringarna till lyftande stenblock och andra tjällyftningsfenomen. Fenomenet får man räkna med kan uppkomma i såväl själva SFR-silon, som i dess närområde. Här handlar det om att själva silon kan lyftas en del samt att sprickor i omgivande berg blir större och tjockare efter att permafrosten tinat.

Vad gäller själva bentoniten kommer dess funktion sannolikt inte nämnvärt att förändras på grund av att den frusit och därpå tinat. Erfarenheterna av hur bentonitens svällande egenskaper påverkas av frysning och tining är dock begränsade, men den lilla erfarenhet som trots allt finns tyder på detta. När bentoniten tinar återtar den sin gamla förmåga att suga upp vatten och svälla. Erfarenheterna kommer från mycket begränsade förstudier rörande bentonits svällande förmåga efter frysning och tining /22/. Något fler studier finns rörande leror med något mindre uttalade svällningsegenskaper och hur dessa påverkas av frysning och tining /21/ och /23/. Lerornas struktur förändras i samband med en frysning och tining. Lerorna konsolideras och storheter som hydraulisk konduktivitet påverkas. Denna minskar som regel efter en genomgången frys-cykel. Lerorna har en tendens till att bli "kornigare" och partiklarna aggregeras i regel till följd av frysningen /21/ och /23/. Däremot finns inga tecken på att ytaktivitet och förmåga att bygga in vatten i partikelstrukturen påverkas av frysning och tining /21/. Det är denna process som avgör materialets svällande förmåga. Det ska dock påpekas att de erfarenheter som finns om denna sak är baserade på korta frysperioder. Frysperiodens längd har sannolikt ingen betydelse, men medför naturligtvis viss osäkerhet i bedömningen.

Vår bedömning är att bentoniten kommer att svälla efter frysning och tining och därmed täta alla de håligheter som uppkommit till följd av islinser som bildats under glaciationen. Bentoniten kan sannolikt även täta merparten av de öppnade sprickorna, men förmågan att täta sprickor avtar sannolikt med ökande antal glaciationer. I denna bedömning är dock osäkerheten stor.

7.2 Sand/bentonitblandning

Blandningen av sand och bentonit som underlagrar respektive överlagrar silon kommer inte att uppvisa tjällyftningsfenomen. Orsaken till detta är att halten bentonit är låg, ca 10 %. Detta ger en faktor "a" i (7.1) som är över 5, se figur 7-1. Detta ger helt försumbara tjällyftningar (delar av mm) med hänsyn tagen till att de båda lagren endast är drygt en meter mäktiga. I övrigt kommer beteendet att vara likartat med det för ren bentonit.

Sand/bentonitblandningens hydrauliska konduktivitet påverkas inte av att den genomgår en fryscykel, med frysning och efterföljande upptining. Det finns dock mycket erfarenhet rörande lerors hydrauliska konduktivitet och att denna kan påverkas av att leran genomgår en fryscykel. Detta gäller särskilt om materialet består av en struktur av relativt grovt material där de mellanliggande porerna är fyllda med lerpartiklar, se /21/. En sådan blandning motsvarar en struktur som ligger nära sand/bentonitblandningen som underlagrar respektive överlagrar SFR-silon. Den ökade hydrauliska konduktiviteten efter frysning och tining i sådant material orsakas av att en konsolideringsprocess initieras till följd av att leran fryser och tinar /21/. Frysningen medför att ett undertryck utbildas i det ofrusna vattnet och därvid ökar effektivspänningarna och konsolideringen äger rum.

Om lermaterialet inte består av svällande material, kommer lermatrisen att förbli konsoliderad även efter upptiningen. Detta skapar en ökad porvolym mellan de grövre kornen, vilket medför en ökad hydraulisk konduktivitet.

I det aktuella fallet med SFR-silon består lermatrisen av bentonit, som bibehåller sin svällande förmåga även efter frysning och tining. Detta medför att även om lerstrukturen konsolideras i samband med frysningen, kommer lermaterialet att svälla ut och åter fylla utrymmet mellan sandpartiklarna när tiningen inleds. Påverkan blir därmed negligerbar på den hydrauliska konduktiviteten.

Sammantaget innebär detta att den hydrauliska konduktiviteten efter frysning och tining inte kommer att förändras nämnvärt.

7.3 Ren sand

Ren sand är vad man kallar "inte tjällyftningsbenägen". Med detta avses att sand är alltför grovkornigt för att ha de egenskaper som gör att vatten och därmed is, successivt byggs in i de partier som fryser i en tjällyftningsbenägen jord. Ytaktiviteten hos sand är alltför liten och den hydrauliska konduktiviteten är alltför hög för att isanrikning ska äga rum. Sammantaget medför detta att inga islinser och ingen isanrikning sker i sand och grövre material. Vattnet som finns i porsystemet fryser naturligtvis när temperaturen är under fryspunkten, men till följd av den höga hydrauliska konduktiviteten sker expansionen av det frysande vattnet i sandens porsystem. Ingen volymökning sker således i sand som fryser. Detta är oberoende av frystidens längd.

8 Slutsatser

Från de överväganden och beräkningar som gjorts inom ramen för detta arbete kan en del slutsatser dras rörande barriärfunktionen hos betong och bentonit efter frysning och tining. Slutsatserna baseras på teoretiska överväganden baserat på sådant skrivet material som funnits tillgängligt för oss i olika former. Inga materialstudier eller andra tester av betong eller bentonit har utförts inom arbetets ram.

Följande slutsatser kan dras utifrån arbetet:

- Betongen i silon kommer redan vid första permafrostcykeln att ha ett vatteninnehåll som överskrider det kritiska värdet för att undvika inre frysning.
- Vid den första frysningen kommer betongen att få inre frostangrepp, som kommer att bryta upp materialet i sådan grad att dess barriärfunktion till stor del upphör. Det kvarvarande materialet har en barriärfunktion som liknar den hos naturliga sand/grus strukturer.
- Efter frysning och upptining kan man inte påräkna någon funktion som diffusionsspärr utöver den som finns i sand/grus strukturer hos den sönderfrysta betongen. Betongen har i detta läge en sand/grus liknande struktur.
- Bentoniten kommer efter frysning och tining att ha kvar sina svällande egenskaper och denna kommer att fungera som en diffusionsspärr under de tidsrymder området inte är fruset.
- Bentoniten i den vertikala spalten mellan silo och berg kommer att uppvisa tjällyftningsfenomen.
- Tjällyftningarna kan medföra öppning av sprickor i det omgivande berget.
- De öppnade sprickorna medför att svällande bentonit pressas ut i sprickorna i berget i samband med upptiningen. Detta kan medföra en viss materialförlust och minskad densitet hos bentoniten.
- Den totala tjällyftningen av förvarets övre del kommer under en permafrostcykel att ligga i intervallet 0,1–1 m. Finns en expansionsmöjlighet på grund av håligheter över återfyllningens överyta minskar lyftningen av berget. Tjällyftningarna blir dock större än de möjliga hålrummen, varför berget kommer att påverkas.
- Permafrostens längd i tiden kommer inte att ha betydelse för tjällyftningarna. Det som är avgörande för lyftningarnas storlek är tiden det tar för frysfronten att passera förvaret. Denna är tämligen lika mellan de studerade scenarierna.
- Sand/bentonitblandningen, som ligger under respektive över SFR-silon, kommer inte att uppvisa tjällyftningsfenomen. Lerhalten är alltför låg.
- Sand/bentonitblandningen, som ligger under respektive över SFR-silon, påverkas inte av frysning och tining vad gäller kompression och hydraulisk konduktivitet. Dessa funktioner påverkas inte av att materialet fryser och därefter tinar.

9 Referenser

- /1/ SKB, 2006. Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-23. Hedin et al. 170 sidor. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /2/ Vidstrand P, Näslund J-O, Hartikainen J, Svensson U, 2007. Hydrogeological flux scenarios at Forsmark – Generic numerical flow simulations and compilation of climatic information for assessment in SFR 1 SAR-08, Draft version 07-03-19, 92 p.
- /3/ Database for the radionuclide transport calculations for SFR, Progress Report SFR 87-09, Wiborgh, Lindgren, december 1987, 63 sidor, bl a tekniska beskrivningar och ritningar samt skisser av anläggningar för förvaring av kärnbränsleavfall.
- /4/ Data (provningsprotokoll) beträffande levererad betong siloanläggning 1987, 33 provningsprotokoll. Materialet har tillhandahållits av SKB.
- /5/ Detaljritningar anläggningar för förvaring av kärnbränsleavfall, 13 ritningar. Materialet har tillhandahållits av SKB.
- /6/ Provningsprotokoll och petrografisk utredning ballast. Vattenfall Utveckling/Trias Geologi, 2005-04-25.
- /7/ Datablad beträffande grundvattenbeskaffenhet, betong, m m, Swedpower dokument 2005-06-14, 5 sidor.
- /8/ Betonghandboken, 1994. Material, utgåva 2, 1994: Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm.
- /9/ Betonghandboken, 2000. Högpresterande betong – Material och utförande, 2000. Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- /10/ Fagerlund G, 2004. A Service Life Model for Internal Frost Damage in Concrete. Report TVBM-3119, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund.
- /11/ Fagerlund G, 2000. Frost Attack as a Moisture Mechanisms Problem. 14. Internationale Baustofftagung 20–23 September 2000. Reprint nr 00.09, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund.
- /12/ Fagerlund G, 1997. Internal Frost Attack – State of the Art, Suggestions for Future Research. Contribution to the International Workshop on Resistance of Concrete to Freezing and Thawing, Essen September 22.23, 1997. Report TVBM-7110, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund.
- /13/ Fridh K, 2005. Internal Frost Damage in Concrete – Experimental Studies of Destruction Mechanisms. Doctoral Thesis, report TVBM-1023, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund.
- /14/ Jonasson J-E, 1994. Modelling of Temperature, Moisture and Stresses in Young Concrete. Doctoral Thesis, Report 1994:153D, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Luleå.
- /15/ Nordström K, Fagerlund G, 1999. Effect of Water Storage Time on Frost Resistance of Concrete. In Proceedings of Building Materials and Components 8, Vancouver, Canada, May 30–June 3, 1999. Reprint No. 99.16, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund.

- /16/ SKB, 2006. Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- /17/ Anderson D M, Tice A R, 1972. Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements. Highway Research Record, No. 393, pp 12–18.
- /18/ Knutsson S, Domaschuk L, Chandler N, 1985. Analysis of large scale laboratory and in situ frost heave tests, Proc. Fourth Int. Symp. On Ground Freezing, Sapporo, Japan, pp 65–71.
- /19/ Jessberger H L, Jagow R, 1995. Determination of Frost Susceptibility of Soils, Proc. First Int. Symp. in Frost in Geotechnical Engineering, Saariselkä, Finland, 13–15 March, 1989, VTT, pp 449–469.
- /20/ Andersland O B, Ladanyi B, 1994. An Introduction to Frozen Ground Engineering, Chapman & Hall, ISBN 0-412-98201-3.
- /21/ Chamberlain E J, Gow A J, 1979. Effect of Freezing and Thawing on the Permeability and Structure of Soils, Engineering Geology, vol 13 (1979), pp 73–92.
- /22/ Börgesson L, 2007. Muntlig referens. Seminarium på Clay Technology AB, 2007. Effekter av frysning och tining på svällande leror.
- /23/ Knutsson S, 1984. Inverkan av cyklisk frysning på lerors konsistensgränser, Proc. 9:e Nordiska Geoteknikermötet (NGM), Linköping, Juni 1984, (Ed.: Svenska geotekniska föreningen), SGI, Linköping, pp 337–345.
- /24/ Vuorinen J, 1982. Inverkan av uttorkningscykel vid provning av betongens frostbeständighet, Nordiskt Forskningsseminarium 23 oktober 1982, ”Betongs frostbeständighet”, CBI Rapport 2.83, Stockholm.
- /25/ Bergström S-G, Fagerlund G, Rombén L, 1977. Bedömning av egenskaper och funktion hos betong i samband med slutlig förvaring av kärnbränsleavfall i berg”. KBS, Teknisk Rapport 12, 1977, Stockholm.
- /26/ Vogt T, Larqué P, 1998. Transformations and neoformations of clay in the cryogenic environment: examples from Transbaikalia (Siberia) and Patagonia (Argentina), European Journal of Soil Science 49, 367–376 (1998).