



LUND UNIVERSITY

Frysegenskaper hos kalciumurlakad betong – hur kan SFR påverkas av långvarig kontakt med grundvatten och de temperaturer som råder vid förvaret vid en permafrost?
Experimentella studier.

Fridh, Katja

2017

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Fridh, K. (2017). *Frysegenskaper hos kalciumurlakad betong – hur kan SFR påverkas av långvarig kontakt med grundvatten och de temperaturer som råder vid förvaret vid en permafrost? Experimentella studier*. Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Frysegenskaper hos kalciumurlakad betong – hur kan SFR påverkas av långvarig kontakt med grundvatten och de temperaturer som råder vid förvaret vid en permafrost? Experimentella studier.

Katja Fridh

Avdelningen för Byggnadsmaterial

Lunds Tekniska Högskola

TVBM- 7220 2017

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
1. Inledning	4
2. Frysning under inverkan av tvång (Pålbrink & Rydman, 2013)	6
3. Urlakning av betong med elektrisk migration och frysning under tvång (Karlsson, 2017)	12
3.1. Accelererad urlakning	12
3.2. Ultraljudsmätning - gångtid	13
4. Urlakning av betong med elektrisk migration med efterföljande karakterisering av isbildning med lågtemperaturkalorimetri	16
4.1. Lågtemperaturkalorimetri och ismängdsberäkning.....	17
4.2. Resultat och diskussion.....	22
4.3. Resultat från frysning under tvång	28
4.4. Hydraulisk konduktivitet.....	28
5. Slutsatser	29
6. Fortsatta studier	29
Referenser	30

Bilaga 1 Hydraulisk konduktivitet

Sammanfattning

Svensk Kärnbränslehantering (SKB) har som en av sina uppgifter att skapa kunskap om hur betongen i slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) kommer att åldras och hur det i sin tur kommer att påverka betongbarriärens skyddande förmåga. I tre studier har därför avdelningen för Byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola med olika experimentella undersökningar studerat hur betongens egenskaper påverkas vid frysning under inverkan av tvång (Pålbrink & Rydman, 2013), för betong med olika grad av urlakning (Karlsson, 2017) samt denna rapport. Resultaten visar att då betongen i förvaret kommer att omges av vatten i vilken frysningen kommer initieras, kommer underkylningen i betongen att vara väldigt liten. Det innebär att även om enbart ett par minusgrader kommer att uppnås i förvaret kommer det att ske isbildning i betongen. Då denna kommer att ske efter omgivande vatten fruset kommer tvånget att vara stort. I de försök som skall efterlikna dessa förhållande genom att frysa betong omgiven av grus och vatten i en stålbehållare, erhöles för ej åldrad betong med vattenmättnadsgrader $\geq 0,92$ en sänkning av betongens dynamiska elasticitetsmodul med 85 %. Då samma prover spräcktes erhöles en sänkning av spräckkraften på ca 30 %. För prover med vattenmättnadsgrader kring 0,4 erhöles ingen förändring av betongens dynamiska elasticitetsmodul och inte heller en förändring av spräckkraften. Hur vattenfylld betongen i förvaret kommer att vara när den utsätts för frystemperaturer (permafrost) avgör hur mycket betongens egenskaper påverkas. Observera att dessa resultat erhöles vid studier på ej åldrad betong.

Betongen kommer att vara i kontakt med grundvatten under mycket lång tid innan permafrosten sker vilket innebär betongen kommer att vara påverkad av urlakning. Karlsson (2017) studerade hur en urlakad betong påverkas av permafrost genom att bygga en kopia av urlakningsuppställningen som togs fram i Babaahmadi (2015). Uppställningen innebär att accelererad urlakning av Ca skapas genom elektrisk migration. Mikrobetong (stenmax 8 mm) utsattes för urlakning under olika lång tid och frystestades därefter under inverkan av tvång. Mätningarna visade att enbart accelererad urlakning påverkade betongens dynamiska elasticitetsmodul med 20-60 % beroende på urlakningstid. Efterföljande frysning under tvång innebar en ytterligare sänkning med 15-20 % för proven som urlakats minst. Mätningar visade att urlakning och frysning ökad porositeten med ca 20 % vilket i sin tur hjälper till att öka vattenmättnadsgraden i betongen vilket då ger en större skada vid permafrost (frysning under tvång).

För att försöka kvantifiera urlakningsgraden efter migrationsförsöken för att därigenom försöka kvantifiera hur mycket mer isbildning denna urlakningsgrad ger, gjordes ICP-AES för att se hur relationen Ca/Si hade ändrats i betongen för en viss urlakningstid med efterföljande lågtemperaturkalorimetribestämmning av isbildningen. Mätningarna visade att en minskning av Ca/Si på 30 % gav upp till 50 % mer isbildning vid höga frystemperaturer (-3°C och högre) som predikteras kommer att råda vid förvaret vid permafrost. Slutsatserna för dessa studier blir att frysning av förvaret vid en permafrost kommer att leda till negativ påverkan av betongens mikrostruktur. Hur stor nedbrytningen blir kommer att bero på hur lång tid det dröjer innan permafrosten slår till. Ju längre tid innan permafrosten, ju högre urlakningsgrad och vattenmättnadsgrad desto större skador. Dock pekar ingenting i dessa studier pekar på att betongen kommer att spricka upp helt.

1. Inledning

Frostnedbrytning av betong har studerats sedan 40-talet (Powers (1945), Powers&Helmuth, (1953), Warris (1964), Fagerlund (1973), Bager&Sellevold (1986), Setzer&Auberg (1997), Lindmark (1998), Utgenannt (2004), Fridh (2005), Tange-Jepsen (2002) mfl.) och mycket kunskap finns speciellt vad gäller frostnedbrytning av betong med Portlandcement. Ofta brukar nedbrytningen delas upp i inre frostnedbrytning och ytavskalning. Den inre frostnedbrytningen sker då de inre delarna har en så hög vattenmättnadsgrad att vattnets expansion vid fasomvandlingen till is inte får plats och de dragspänningar som uppstår förstör betongen. Även de omförflyttningar av vatten som sker vid fasomvandlingen samt om det inre har fortsatt tillgång till vatten (tillsammans med fasomvandlingen i sig själv) anses bidra till spänningar så höga att betongen skadas. Mekanismerna bakom ytavskalningar (oftast i närvaro av salt) debatteras fortfarande. Vissa hävdar (Powers, (1965), Lindmark (1998), Utgenannt (2004)) att det bildas islinser i ytan som drar till sig mer vatten och till slut blir vattenmättnadsgraden så hög att när isen bildas spänger den bort ett lager pasta. Andra (Valenza&Scherer (2007)) hävdar att isen som bildas på ytan har en mycket större längd-utvidgningskoefficient än betongen kommer och kommer därför att vilja dra ihop sig mer än betongen när temperaturen sjunker; då kommer isen att spricka och sprickorna propagerar ner i betongytan och skapar avskalningar. Materialegenskaper som är viktiga för de olika föreslagna mekanismerna är betongens permeabilitet, inte bara porstorleksfördelningen utan även hur sammanbundna porerna är, samt materialets isbildningsförmåga som är en funktion av dess porstorleksfördelning.

För att avgöra om en betong är frostbeständig så har det utvecklats olika provningsmetoder som idag är standarder i olika delar av världen. Det gemensamma för många av dessa är att materialet efter en bestämd konditionering utsätts för fryscykler vanligtvis mellan +20 °C – (-20 °C) (1-2 gånger per dygn) samtidigt som de har tillgång till en lösning av avjoniserat vatten eller 3 % NaCl på ytan. Detta ger avskalningar och baserat på erfarenhet avgör mängden avskalningar per m² provyta om betongen skall klassas som frostbeständig eller ej. I Sverige används Boråsmetoden (SS 13 72 44) framförallt för de fall då betongen har krav på att uppfylla saltfrostbeständighet. Även då det handlar om att testa den inre frostbeständigheten sker testerna oftast på liknande sätt om det testas överhuvudtaget. Testerna sker på icke åldrade material. Det finns vissa fenomen som i princip alltid uppstår vid dessa undersökningar, t ex att temperaturen behöver vara lägre än -10 °C för att skador skall uppstå, att ju lägre temperatur materialet utsätts för desto större skador uppstår och en ökad tid vid lägsta temperaturen ger också större skador.

Tidigare studier visar att vattenupptagningen ökar vid upprepad frysning/tining som är fallet vid de flesta provningar och i vissa miljöer (Sandström (2009), Wikström (2012), Jacobsen (1995), Setzer&Auberg (1997), Rosenqvist&Persson (2009)) och till slut är vattenmättnadsgraden över den kritiska och materialet spricker.

I förväret så kommer det enligt prognoserna att vara mycket högre temperaturer än vad betong vanligen frostprovas för och cykeln kommer att vara väldigt lång. Detta ger en mycket långsam fryshastighet och en mycket långsam upptiningshastighet och bara en nollpunkts-passage. Vid tidigare studier av Pålbrink & Rydman (2013) med en försöksupställning som

skulle simulera ett vattenfyllt förvar i ett oeftergivligt berg som utsattes för en långsam frysning till -10 °C erhöles skador i mindre omfattning än förväntat även för en vakuummättad betong. Detta tyder på att i detta fall av frostnedbrytning, med *en* långsam cykel, kan spänningarna eventuellt omfördelas och/eller sker inte isbildningen riktigt på samma sätt som när temperaturen hastigt fortsätter sjunka efter den första isbildningen och vid många upprepade cykler. Inverkan av tvång, inverkan av en hög lägsta temperatur och inverkan av en väldigt långsam fryscykel har ingen studerat systematiskt tidigare.

När permafrosten når förvaret kan det legat omgärdat av grundvatten i ca 15 000 år beroende på vilket klimatscenario som gäller (TR-14-01, (2015)). Detta kommer att ha lakat ur mycket kalcium ur betongen. Att studera urlakningens inverkan på frostbeständigheten är mycket ovanligt. Martin Rosenqvist (2016) visade i sin avhandling frostmätningar på 50 år gammal betong från en vattenkraftsdamm att urlakningen har en mycket stor inverkan på frostbeständigheten i betongytan. Babaahmadi (2015) visade att accelererad urlakning med elektrisk migration påverkade den frysbara vattenmängden i betong. Detta behöver undersökas systematiskt för att skapa mer kunskap om hur urlakningen kommer att påverka betongmaterialet i förvaret vid permafrost.

I tre studier som utförts vid avdelningen för Byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola har hur betongens egenskaper påverkas vid frysning under inverkan av tvång och urlakning studerats. Två av dessa är rapporterade i Pålbrink & Rydman (2013) och Karlsson (2017) Denna rapport innehåller sammanfattningar av de två tidigare studierna samt fler analyser av dess mätningar, lågtemperaturkalorimeträmätningar som visar hur isbildningsegenskaperna ändras vid olika urlakningsgrad samt sammanfattande slutsatser av de tre studierna.

2. Frysning under inverkan av tvång (Pålbrink & Rydman, 2013)

I denna studie togs det fram en frysprovningssmetod för att simulera de yttre delarna av betongförvaret i SFR, se bild 1. Betongcylindrar (diameter 95 mm, längd 100 mm) omslötts av vatten och grus i en stålbehållare (simulerar bergväggen) och som referens testades även cylindrar omsluten av vatten och grus i en plastpåse, se bild 2. Betongen som testades var en vct 0,7 med Anläggningscement och stenmax 12 mm. Cylindrarna borrades när den gjutna plattan var 28 dygn och därefter förvarades de i laboratoriet i +20 °C och 50 % RF fram till konditioneringen påbörjades. Betongcylindrarna konditionerades till tre olika fuktnivåer Detta gjordes genom att vissa prover torkades i +20 °C och vattenlagrares i minst 24 h innan frysningen påbörjades. Dessa prover hade en vattenmättnadsgrad på ca 0,4. Andra prover torkades i +50 °C och därefter vakuummättades de innan frysningen påbörjades. Dessa prover hade en vattenmättnadsgrad på ca 0,92. Den tredje gruppen prover torkades i +105 °C innan de vakuummättades. Dessa prover antogs ha vattenmättnadsgraden 1. Cylindrarna utsattes därefter för en fryscykel där temperaturen sänktes snabbt till +2 °C för att sedan sänkas till -10 °C på 7 dagar. Därefter tinades provet upp så snabbt som möjligt. Betongens egenskaper (egenfrekvens, gångtid, spräck-kraft) testades före och efter frysning.

Med gångtiden kan den dynamiska elasticitetsmodulen E_{dyn} (Pa) beräknas genom ekv 1,

$$E_{dyn} = \frac{\rho \cdot v(1+\nu)(1-2\nu)}{(1+\nu)} \quad (\text{ekv 1})$$

Där ρ är betongens densitet (här antagen till 2350 kg/m³), ν är Poissons tal (här antaget till 0,2) och v är hastigheten (m/s) beräknad med gångtiden från ultraljudsmätningarna. Den dynamiska elasticitetsmodulen är ca 15-20 % högre än den statiska. (Betonghandboken, (1994)). Resultaten visas i tabell 1-3.

Tabell 1. Gångtider, torkning i 20 °C innan vattenlagring.

Inverkan av tvång	Prov-nummer	Före frysning [μs]	Efter frysning [μs]	E _{dyn} före GPa	E _{dyn} efter GPa	kvot E _{dynE} /E _{dynF}
Ja	61*	23,7	24,1	37,7	36,4	0,97
Ja	62	23,6	24,6	38,0	34,9	0,92
Nej	63	23,1	23,2	39,6	39,3	0,99
Nej	64	23	23,2	40,0	39,3	0,98

* Utan tillgång till vatten under frysning

Tabell 2. Gångtider, torkning i 50 °C innan vakuummätning.

Inverkan av tvång	Prov-nummer	Före frysning [μs]	Efter frysning [μs]	E _{dyn} före GPa	E _{dyn} efter GPa	kvot E _{dynE} /E _{dynF}
Ja	01**	25,7	67,5	35,6	5,2	0,14
Nej	02**	25,7	25,7	35,6	35,6	1,00
Ja	21	23,6	34,5	42,2	19,7	0,47
Ja	31	24,8	57,2	38,2	7,2	0,19
Ja	32	24,1	29,4	40,5	27,2	0,67
Nej	33	24	24,9	40,8	37,9	0,93
Nej	34	24,1	25,1	40,5	37,3	0,92
Nej	35	24,7	27,3	38,5	31,5	0,82
Nej	36	25,4	27,6	36,4	30,8	0,85
Nej	37*	24,6	32,3	38,8	22,5	0,58

* Utan tillgång till vatten under frysning

** Cyklad tre gånger

medelvärde alla JA:

0,37

medelvärde alla NEJ:

0,85

Tabell 3. Gångtider, torkning i 105 °C innan vakuummätning.

Inverkan av tvång	Prov-nummer	Före frysning [μs]	Efter frysning [μs]	E_{dyn} före GPa	E_{dyn} efter GPa	kvot E_{dynE}/E_{dynF}
Ja	07***	26,8	– **	29,4		
Nej	11***	24,8	26,4	34,4	30,3	0,88
Ja	16	25,4	54,4	32,8	7,1	0,22
Ja	17	24,8	39,7	34,4	13,4	0,39
Nej	22*	26,3	26,7	30,6	29,7	0,97
Nej	23*	25,8	27,1	31,8	28,8	0,91
Ja	24*	25,4	34,9	32,8	17,4	0,53
Ja	25	25,7	51,9	32,0	7,9	0,25
Nej	26	24,1	25,4	36,4	32,8	0,90
Nej	27	24	28,5	36,7	26,0	0,71

* Utan tillgång till vatten under frysning

** Mätvärden erhöles ej

medelvärde alla JA:

0,35

*** Cyklad tre gånger

medelvärde alla NEJ:

0,87

Resultaten efter frysning visar att i proverna som torkats i 20 °C och erhöles en vattenmättnadsgrad på 0,4 så sker ingen eller en väldigt liten sänkning av den dynamiska elasticitetsmodulen oavsett graden av tvång (för både "ja" och "nej"). För proverna som hade torkats i 50 °C och 105 °C innan vakuummätningen och som erhöles vattenmättnadsgrader på 0,92 och högre, var inverkan av tvång mycket tydlig. Prover som frystestats i stålbehållare ("ja") tappade 65 % av den dynamiska elasticitetsmodulen medan proverna som testats i plastpåse ("nej") enbart tappade 15 % av den dynamiska elasticitetsmodulen.

Vid mätning av vilken spräck-kraft proverna tålde efter frysning så sjönk den med mer än 30 % för proverna som frysts under tvång efter att ha torkats i 50 °C och 105 °C innan vakuummätningen och som då hade vattenmättnadsgrader på 0,92 och högre. Men den sjönk även för de prover som frysts utan tvång och då med 20 %.

Försökupställningarna påverkade tydligt isbildningen, se bild 3. Tiden då fasomvandlingen påverkade provets temperatur var markant längre för proverna som testades i plastpåsar (utan tvång) jämfört med de prover som testades i stålbehållarna (med tvång). Det tyder på att det bildades mer is för uppställningen med plastpåse än för uppställningen med stålbehållare. Trots det blev skadorna betydligt större för proven med vattenmättnadsgrader kring 0,92 och över som testades i stålbehållaren. Slutsatserna blir därför att tvånget har stor betydelse under förutsättning att vattenmättnadsgraderna är tillräckligt höga. Detta ökade tryck pga tvång har även Vidstrand et al. (2007) beskrivit.

Från de försök där prover var fuktisolerade under frysningen kan vi se en påverkan av vid vilken temperatur provets porvatten börjar frysa och i vissa av dessa försök var starttemperaturen för isbildningen så låg som -4 °C. I de försök där provet hade kontakt med omgivande vatten börjar isen bildas vid temperaturer på -2 °C eller högre. Då isen börjar bildas i vattnet runt om betongen först, är sannolikheten mycket hög att denna is kommer att hjälpa

till med isbildningsstarten i betongen. Om permafrosten når förvaret och temperaturen blir så låg som $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ uppstår (TR-14-01, (2015))kommer isbildning ske i betongen. Vattenmättnadsgraderna och graden av tvång kommer att avgöra hur påverkad betongen blir.



Bild 1. Bergrummet IBMA med dess betongkonstruktion (tv) och mellanrummet mellan betongkonstruktionen och berget (th) som kommer att fyllas med makadam. Foto SKB.

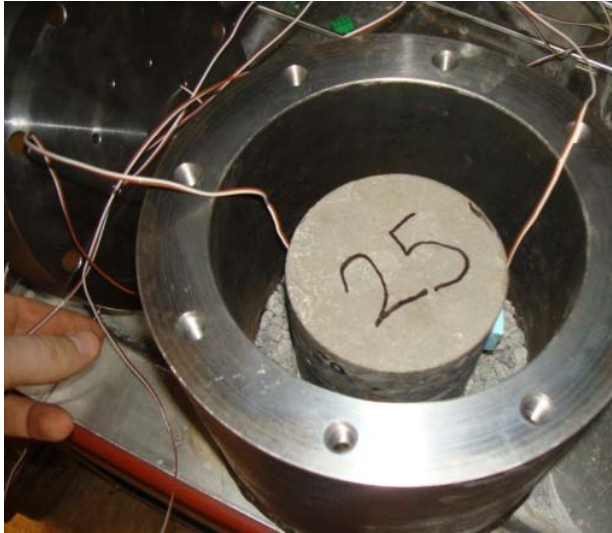


Bild 2. Prover testades i en stålbehållare (tv) eller i en plastpåse (th). I båda fallen var proverna omgärdade av grus och vatten. (Pålbrink & Rydman, 2013)

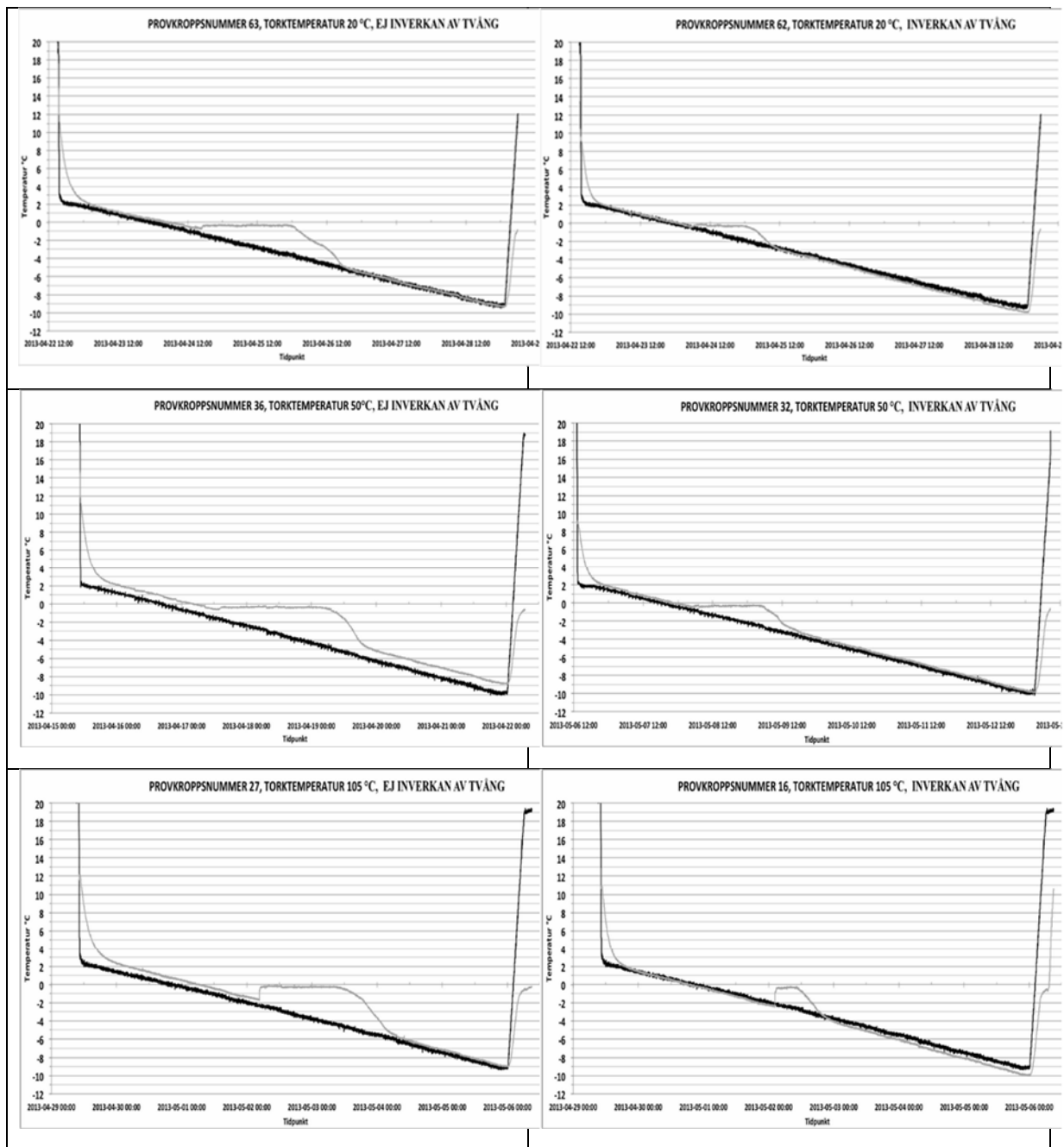


Bild 3. Temperaturökning vid isbildning för några av de olika försöken med eller utan tvång. (Pålbrink & Rydman, 2013)

Dessa mätningar och de bedömningar som gjorts i Pålbrink&Rydman, (2013) baseras på betong som inte är åldrad. En betong som kommer att befinna sig under vatten i flera tusen år kommer att urlakas. En lång urlakning påverkar porositeten och konduktiviteten (Ekström, 2009) och detta gör det möjligt att nå höga vattenmättnadsgrader fortare än om materialet varit intakt. SKB antar att betongen är vattenmättad permafrost när förvaret men urlakningen ökar porositeten och hur det påverkar mängden is som bildas kommer att påverka hur förvaret bryts ner. Därför studerades urlakning i kombination med frysning i nästa studie.

3. Urlakning av betong med elektrisk migration och frysning under tvång (Karlsson, 2017)

I denna studie byggdes en elektrisk migrationsutrustning upp efter en beskrivning av Babaahmadi (2015), för att kunna urlaka mikrobetong (stenmax 8 mm) och därefter frysa den under tvång enligt metoden beskriven under kap 2. Materialet som göts i denna studie skulle användas till efterföljande studie där mikrobetongens isbildningsförmåga efter olika grad av urlakning karakteriserades med en lågtemperturkalorimetrimätning (LTC).

Betongen som studerades skulle representera betongen i BMA och därför valdes Anläggningscement och vct 0,63. Då proverna i LTC-mätningen enbart kan vara 15 mm i diameter valdes en mikrobetong som är en betong med en mindre maximal stenstorlek. Det innebär att mängden ballast > 8 mm ersätts med mer cement och ballast < 8mm vilket gör att receptet blir som i tabell 4.

Tabell 4. Betongrecept för studien.

Komponent	Recept (kg/m ³)
Anläggningscement	460
Vatten	290
Grus 0-8 mm	1438

Det göts en platta 0,5 m x 0,5 m x 0,15 m. Denna härdade i formen under plast i ett dygn innan den lagrades i vattenbad fram tills kärnbörning av prover skedde. För varje cylinder sågades toppen och botten av och så delades resten till två provkroppar med diametern 50 mm och längden 50 mm. Dessa prover vakuummätades och användes till accelererade urlakningsförsök med efterföljande frysning under tvång. Vakuummätningen gjordes på aldrig torkade prover genom att utsätta dem för vakuum (1-5 mbar) i tre timmar innan avjoniserat vatten släpptes på. Därefter förvarades proverna i vatten fram tills provningen påbörjades.

3.1. Accelererad urlakning

För att accelerera urlakningen användes en elektrokemisk migrationsmetod framtagen av Babaahmadi (2015). Provkropparna utsätts då för en konstant ström som driver de positiva Ca-jonerna till katoden av rostfritt stål. Vid katoden finns en 0,3 M NH₄NO₃ lösning för att ytterligare accelerera urlakningen. Vid anoden finns en 2 M LiOH för att förhindra att surt angrepp sker då pH sjunker pga produktion av H⁺. Metoden innebär att kemikalierna måste fyllas på varje dag då de förbrukas under mätningen. Beräkningen över hur mycket kemikalier som skall fyllas på baseras på en konstant ström. De spänningsaggregat som användes under denna studie klarade inte av detta utan strömmen justerades manuellt i princip varje vardag. Strömmen som rekommenderades i Babaahmadi (2015) var 0,25 A och kemikalierna fylldes på varje vardag baserat på detta. Mikrobetongproverna utsattes för urlakning under olika lång tid.

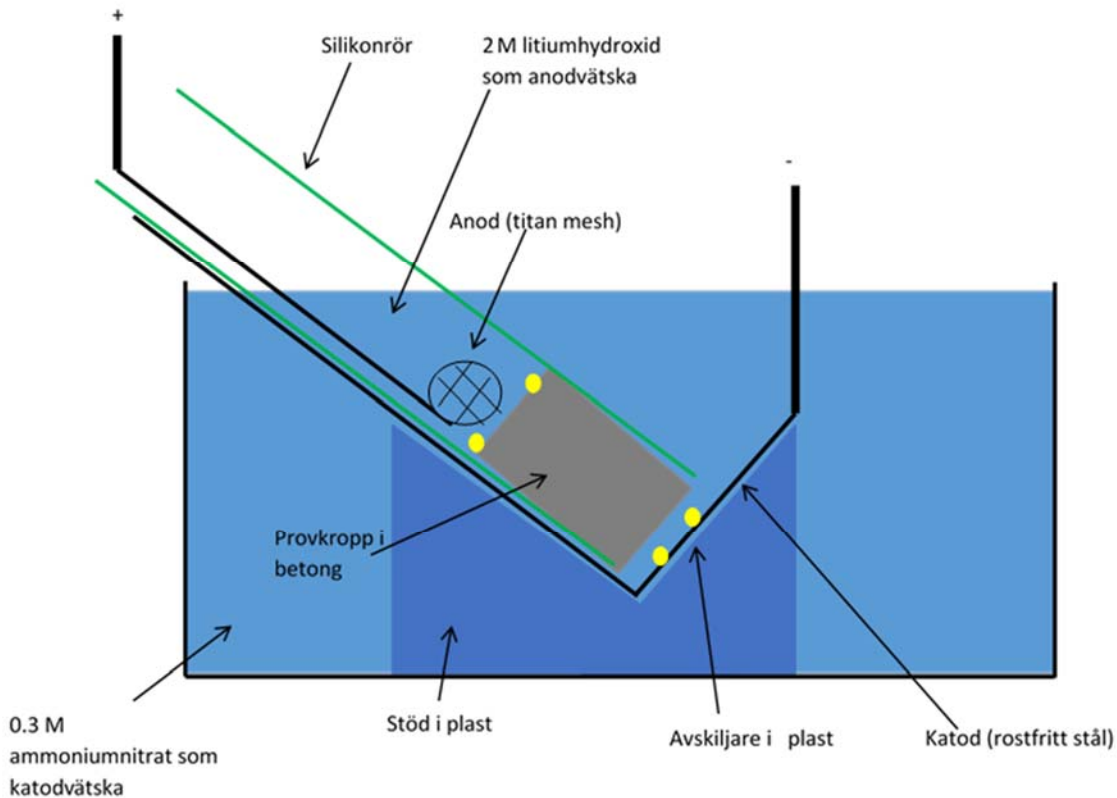


Bild 4. Schematisk bild över urlakningsutrustningen, (Karlsson, 2017).

Babaahmadi (2015) visade hur snabbt en konstant ström på 0,25 A urlakade cementpasta. Den visade att i en provkropp med diameter 50 mm och längd 75 mm urlakades all $\text{Ca}(\text{OH})_2$ på 70 dygn. Då tvärsnittet i mikrobetongen i denna studie enbart består av 44 % pasta (cement+vatten (460/3100+290/1000, se tabell 4)) så borde urlakningen gå 54 % fortare men samtidigt består tvärsnittet av 54 % ballast som ligger i vägen för ny cementpasta. Därför uppskattades det att hastigheten bestämd av Babaahmadi (2015) (75 mm på 70 dygn) utgav ett minimum för frontdjupet och att detta djup delat med 0,44 är det maximala frontdjupet och att det verkliga värdet ligger någonstans inom ytterligheterna, se tabell 5.

Tabell 5. Urlakningstider och uppskattade frontdjup.

Prov	Urlakningstid (dygn)	Ström (A)	Uppskattade frontdjup (mm)
1	10	0,25*	11-25
2	20	0,25*	21-48
3	25	0,25*	27-61 (CSH påverkas i 11 mm)
4	30	0,25*	32-68 (CSH påverkas i 18 mm)

*strömstyrkan justerades manuellt varje vardag

I de två längsta urlakningstiderna kan även Ca i CSH (cementgelen) ha påverkats.

3.2. Ultraljudsmätning - gångtid

För att karakterisera om urlakningen respektive frysningen har ändrat mikrostrukturen har ultraljudsmätning används. Tiden för ljudet att gå från ena sidan av provet till den andra ökar

med ökad mängd sprickor som urlakningen och eller frysningen har skapat. Gångtiden kan räknas om till en dynamisk elasticitetsmodul, se ekv 1.



Bild 5. Gångtid, kalibrering och mätning. (Bild Kristoffer Karlsson)

Efter urlakning och gångtidmätning utsattes provet för frysning under inverkan av tvång enligt metoden som beskrevs i kap 2. Därefter uppmättes gångtid och porositet. Resultaten hittas i tabell 6.

Tabell 6. Gångtid och dynamisk E-modul.

Provkropp (dagar urlakade) (dygn)	Gångtid otestade* (μs)	E_{dyn} otestade GPa	Gångtid efter urlakning, före frysning (μs)	E_{dyn} efter urlakning (GPa)	Gångtid efter urlakning och frysning (μs)	E_{dyn} efter urlakning och frysning (GPa)	E_{dyn} kvot efter urlak.	E_{dyn} kvot efter urlak. och frysning
10	12,1	40,1	13,8	27,8	16,3	19,9	0,77	0,55
20	12,1	40,1	15,6	21,7	16,4	19,7	0,60	0,54
25	12,1	40,1	19,6		17,3	17,7		0,49
30	12,1	40,1	18,6	15,3	19,2	14,3	0,42	0,40

densitet antogs till 2350 kg/m^3 , poissons tal antogs till 0,2.

25 troligtvis mätfel efter urlakning

*det bestämdes gångtider på 6 st otestade provkroppar för att få ett värde på otestat material

Alltså mättes inte just provkropp 10, 20, 25 eller 30 innan de utsattes för urlakning och frysning.

Mätningarna visar tydligt att urlakningen har påverkat mikrostrukturen i allt högre grad ju längre tid urlakningen varat (20-60 %). Efterföljande frysning sänker den dynamiska E-modulen med ytterligare 15-20 % för proverna som är minst urlakade. Undersökningarna visade också att porositeten i proverna som urlakats och frysts ökade med mer än 20 %. Detta öppnar helt klart upp för en snabbare ökning av vattenmättnadsgraderna jämfört med den icke åldrade betongen i kap 2.

I denna studie frystes provkroppar med olika urlakningsgrad i olika delar av provet och provets sammantagna nedbrytning studerades med ultraljud. För att också kunna diskutera vad olika urlakningsgrader i förvaret vid tiden för permafrost innebär betongens isbildning, kompletteras därför ovanstående studier med lågtemperaturkalorimetrimätningar på

mikrobetong med olika urlakningsgrad. Även frysning under tvång för mikrobetong som urlakats på samma sätt gjordes för att kunna koppla ihop dessa mätningar med de två andra studierna.

4. Urlakning av betong med elektrisk migration med efterföljande karakterisering av isbildning med lågtemperaturkalorimetri

För att besvara hur urlakningen påverkar hur mycket is som bildas i betongen vid temperaturer upp till $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ fortsatte studierna på materialet som använts av Karlsson (2017). Nya spänningsaggregat användes och en konstant ström kunde nu säkerställas under de elektriska migrationsförsöken. Beräkningsgången framtagen av Babaahmadi (2015) användes och gav den aktuella strömstyrkan.

1. Beräkna arean, $A\text{ (m}^2\text{)}$, på provkroppen som kommer vara i kontakt med katodvätskan. I denna studie med diametern 50 mm erhålls $0,002\text{ m}^2$.
2. Beräkna den procentuella pastavolymen, % VP, i provkroppen. Med recept enligt tabell 4 erhålls $460/3100+290/1000= 44\%$ där 3100 är densiteten för Anläggningcement i kg/m^3 och 1000 är densiteten för vatten kg/m^3 .
3. Multiplicera $A \times VP = A_p$, för att beräkna hur mycket pasta det finns i tvärsnittet. Med ovanstående erhålls $0,00088\text{ m}^2$ pasta i tvärsnittet.
4. Beräkna den behövda strömmen $I\text{ (A)} = 127 \times A_p$. Det blir i detta fall $0,00088 \times 127 = 0,11\text{ A}$.

Denna ström läggs över betongprovet i försöksuppställningen, se bild 4.

Två vakuummättade prover (50 mm diameter, längd 50 mm) kördes i 14 dagar med strömmen 0,11 A och 0,3 M ammoniumnitrat vid katoden och 2 M Litiumhydroxid vid anoden. Tiden valdes för att behålla urlakningsfronten i provet och inte riskera att Ca innehållet i CSH påverkades. På så sätt kunde tre prover med olika urlakningsgrad erhållas ur cylindrarna. Urlakningsfrontens läge uppskattades mha mätningarna på cementpasta i Babaahmadi (2015) som visade att Ca(OH)_2 urlakades helt efter 70 dygn. Då tvärsnittet i mikrobetongen i denna studie enbart består av 44 % pasta (cement+vatten ($460/3100 + 290/1000$, se tabell 4)) så borde urlakningen gå 54 % fortare men samtidigt består tvärsnittet av 54 % ballast som ligger i vägen för ny cementpasta. Därför uppskattades det att urlakningshastigheten bestämd av Babaahmadi (2015) (75 mm på 70 dygn) utgav ett minimum för frontdjupet och att detta djup delat med 0,44 är det maximala frontdjupet och att det verkliga värdet ligger någonstans inom, se tabell 7.

Därefter borrades tre cylindrar (diameter 10 mm, längd 50 mm) ur prov A och B tvärs dess längdriktning, bild 6. Isbildningen i proverna från A map temperaturen bestämdes sedan med lågtemperaturkalorimetri. För att kontrollera urlakningen av de små cylindrarna bestämdes mängden kalcium och kisel i dessa med ICP-AES efter isbildningsmätningarna (resultaten finns i tabell 7). Prov C och D frystes under tvång med metoden beskriven i kap 2 (avsnitt 4.2) och inverkan av urlakning och frysning i dessa prover karakteriserades med gångtid uppmätt med ultraljud, se tabell 9.

Tabell 7. Strömstyrka, urlakningstid och uppskattat frontdjup för prov A, B, C, D samt Ca/Si för A1-A3.

Prov	Ström (A)	Urlakningstid (dygn)	Uppskattat frontdjup (mm)	Ca g/l	Si g/l	Ca/Si
A	0,11	14	15-34			
A1				3892	969	4
A2				9198	1576	5,8
A3				5917	1074	5,5
B	0,11	14	15-34			
C	0,11	14	15-34			
D	0,11	14	15-34			

Det blir tydligt efter ICP-AES mätningen att Ca har urlakats från delen där A1 borrades och att nivåerna för A2 och A3 är i princip samma. Det tyder på att urlakningsfronten hamnat mer som vänstra delen av bild 6 nedan.

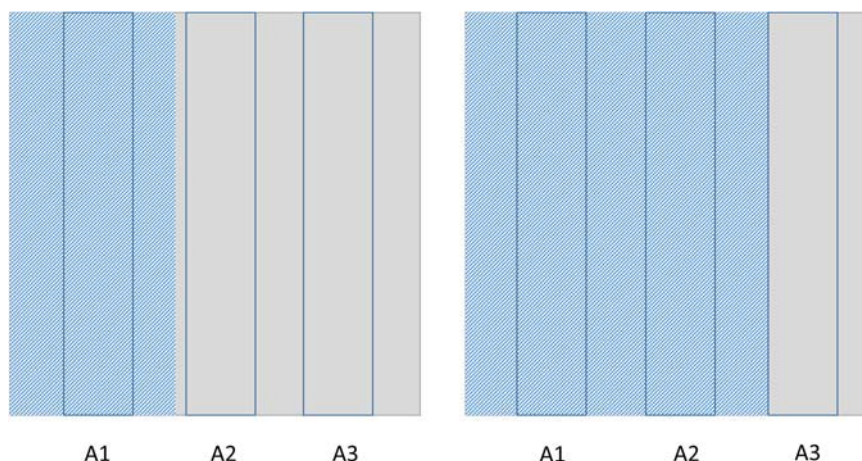


Bild 6. Schematisk bild med minsta (tv) och största (th) uppskattade urlakningsfront (tv) och de tre cylindrarna A1-A3 till lågtemperaturkalorimetrimätningarna.

4.1. Lågtemperaturkalorimetri och ismängdsberäkning

Vid en isbestämning mätning med en lågtemperaturkalorimeter, bild 7 och 8, utsätts ett prov (som maximalt kan vara 15 mm i diameter och 70 mm lång) för en fryscykel från +20 °C till -80 °C till +20 °C med hastigheten 6 °C/h. För att skapa en stabil omgivning fylls den yttre delen av kalorimetern med flytande kväve och sedan värms kalorimetern till rätt temperatur. Varje körning förbrukar 100 l flytande kväve. De känsliga värmeflödescensornerna (bild 8) detekterar hur provet reagerar på temperaturcykeln. I referensen sitter ett torrt prov så att ev förändringar i materialet pga temperaturcykeln tas bort då utdata är differensen mellan provet och referensen, bild 9. Temperaturen mäts inte i provet utan i kalorimeterblocket och det ger en liten eftersläpning i temperaturen som visar sig bl a som en upptining över 0 °C.

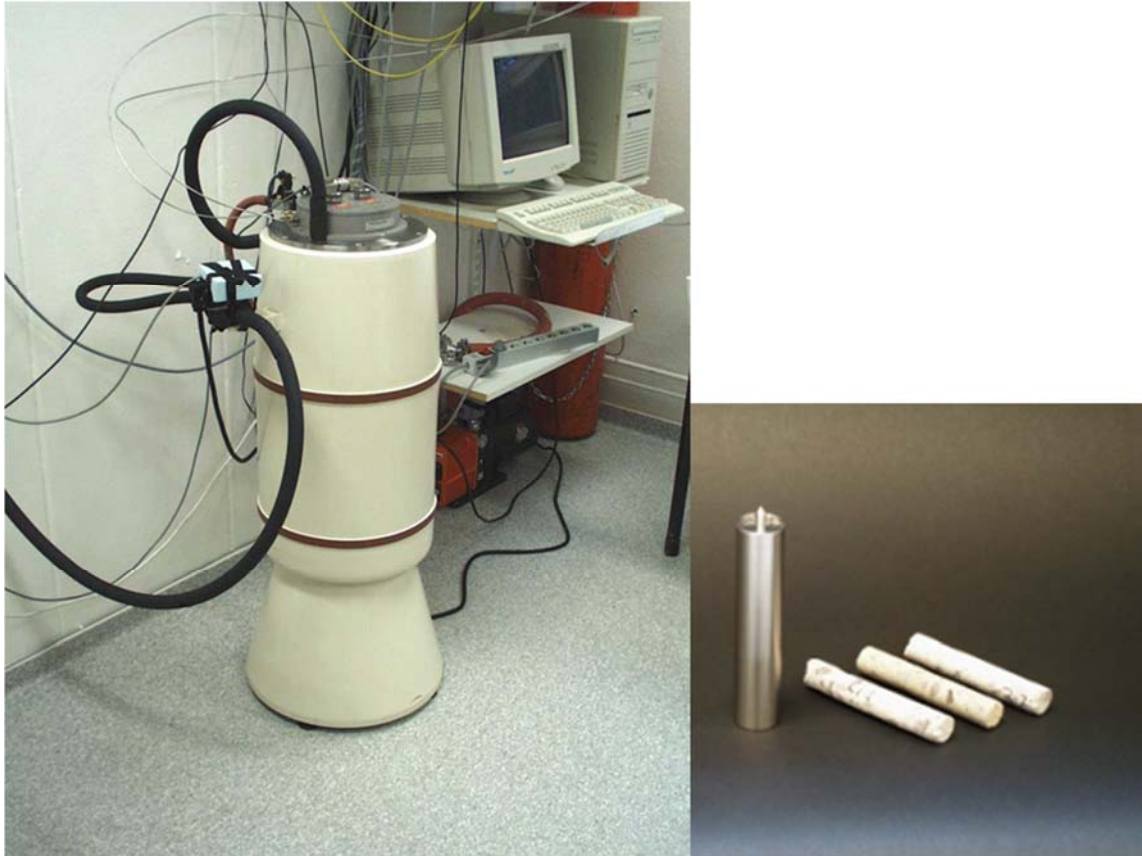


Bild 7. Lågtemperaturkalorimeter Setaram BT 2.15(tv) och provhållaren och prov (th).

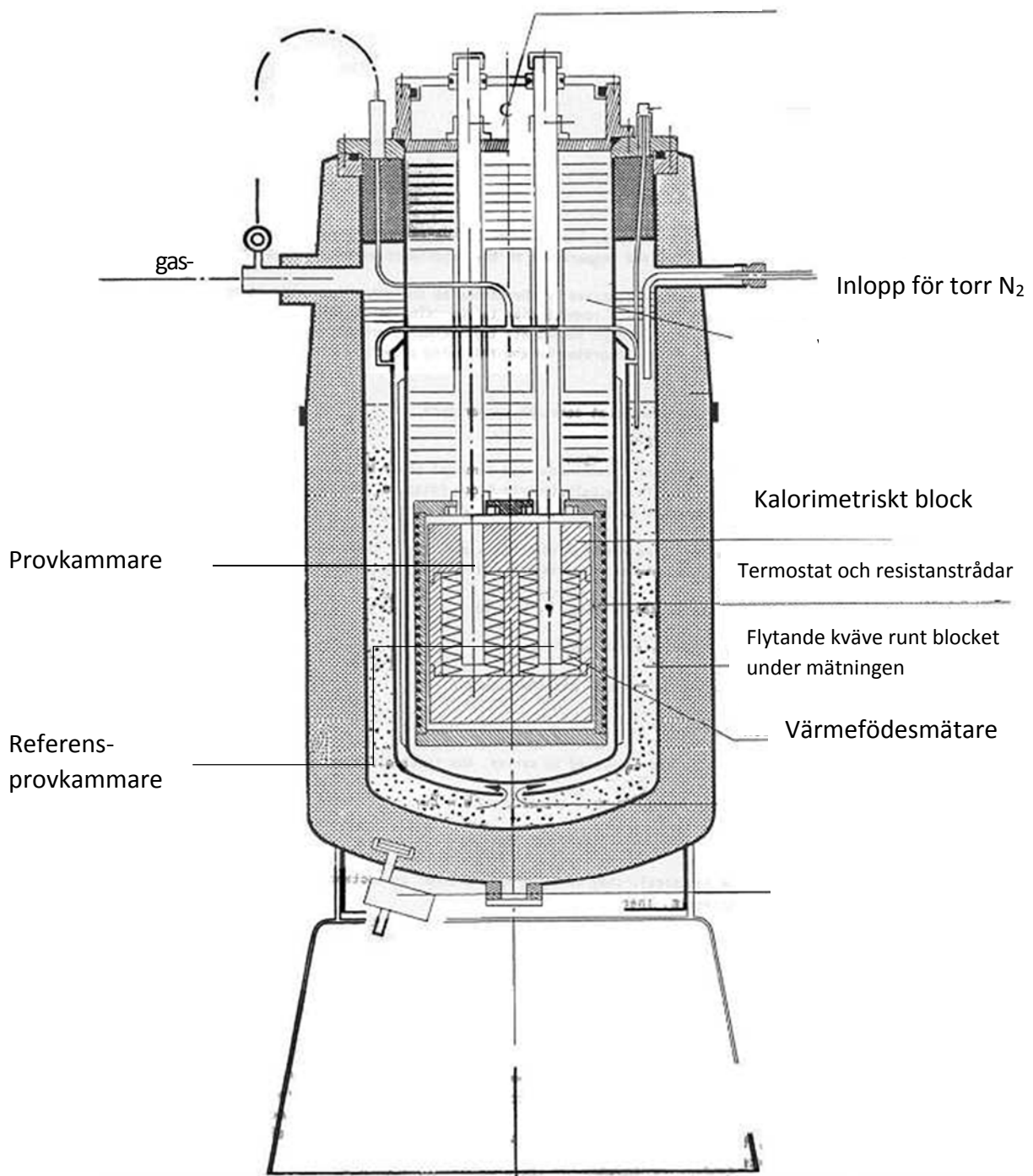


Bild 8. Genomskäring av Setaram BT 2.15.

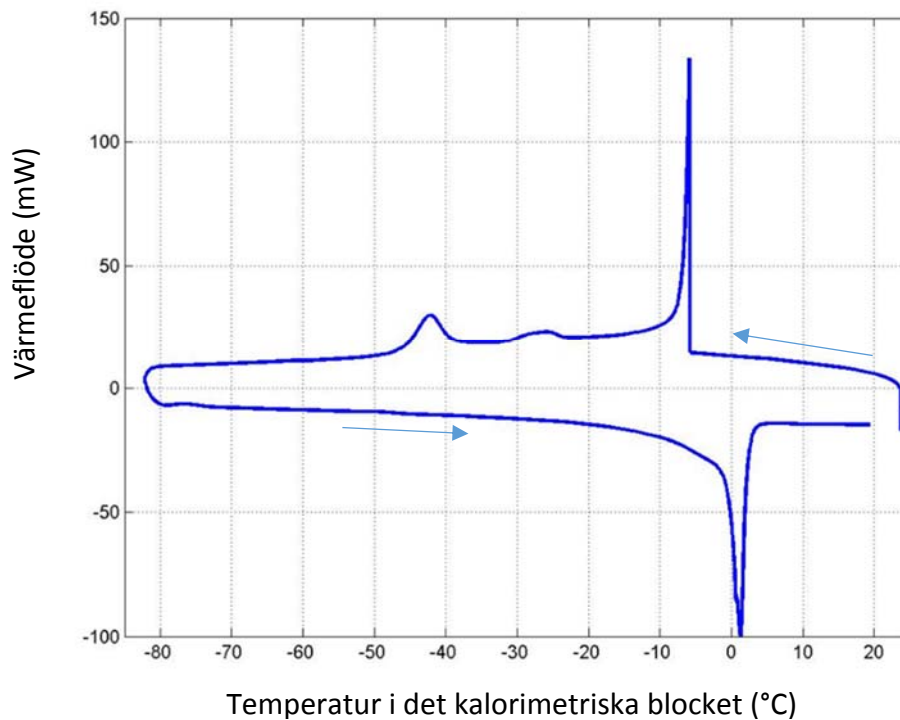


Bild 9. Utdata från en körning i lågtemperaturkalorimetern med ett cementbundet material.

I bild 10 visas utdata från en körning med ett cementbundet material med högt fukttinnehåll i provkammaren och ett torrt prov i referenskammaren. Kurvan visar skillnaden i värmefflöde mellan provkammaren och referenskammaren. Den övre delen av figuren visar hur värmefflödet ändras när temperaturen sänks runt om proven. Vid ca $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ startar isbildningen i provet och de stora porerna fryser först och detta skapar mycket värme vilket ses i den första stora toppen. Efter den går inte värmefflödet ner till samma nivå innan frysningen utan isens värmekapacitet höjer basnivån samtidigt som fler porer fryser allt eftersom temperaturen sjunker. Vid ca $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ syns ytterligare en puckel som representerar att flera porer med samma storlek fryser då och vid ca $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ syns en tredje puckel som representerar homogen isbildning – dvs resterande frysbart vatten fryser där. Ytterligare sänkning av temperaturen ger inte ökad isbildning. Ett cementbundet material kommer alltid att innehålla en del av det förångningsbara vattnet (vattnet som avgår vid $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$) som inte är frysbart. Då nedfrysningskurvan är så väldigt oregelbunden vilket bla uppkommer pga trånga poröppningar, fryspunktsnedsättning pga undertryck i porvattnet och underkylning pga att isbildning är en stokastisk process används inte den för att studera materialets porstruktur utan sägs mer visa porernas konnektivitet. Men den första toppen kan ändå ge en indikation om materialets största porer. Den undre delen av kurvan visar värmefflödet under upptiningen. Denna är mer kontinuerlig och har bara en topp när de stora porerna tinar vilket kräver mycket värme. Denna del anses bäst representera materialets porstorleksfördelning.

För att göra en ismängdsberäkning behövs en baslinje. Det är inte helt enkelt att bestämma baslinjen då värmekapaciteten för de olika delarna av provet inte är kända. I denna studie har baslinjen beräknats med 'J-method' som i princip går ut på att interpolera lutningen när systemet består av prov och vatten, vilken representeras av sträckan A-B i bild 10, samt när systemet består av prov och is, vilket representeras av sträckan C-D och därefter jämnas ut

skillnaderna baserat på hur mycket is som bildats/smält vid respektive temperatur, bild 10. En fullständig beskrivning finns i Min et al. (2014) och Fridh (2005).

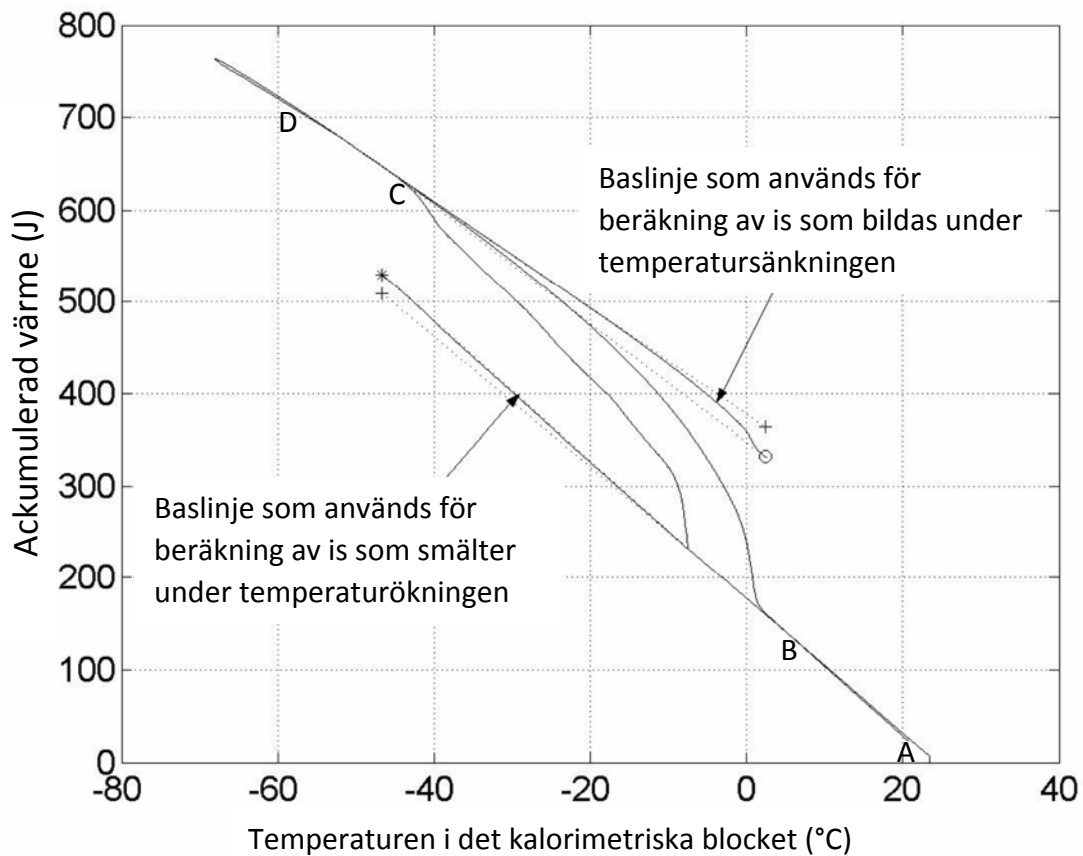


Bild 10 Baslinjer framtagna enligt J-method. (Min, 2014)

Med dessa baslinjer beräknas isbildningskurvan som i bild 11. De undre streckade kurvorna visar isbildning under temperatursänkning och de övre heldragna linjerna visar hur denna is smälter när temperaturen höjs. Mängd is representerar mängd porer av en viss storlek. Normalt fryser ca 50-70 % av det förångningsbara vattnet beroende på hur materialet konditionerats, Fridh (2005).

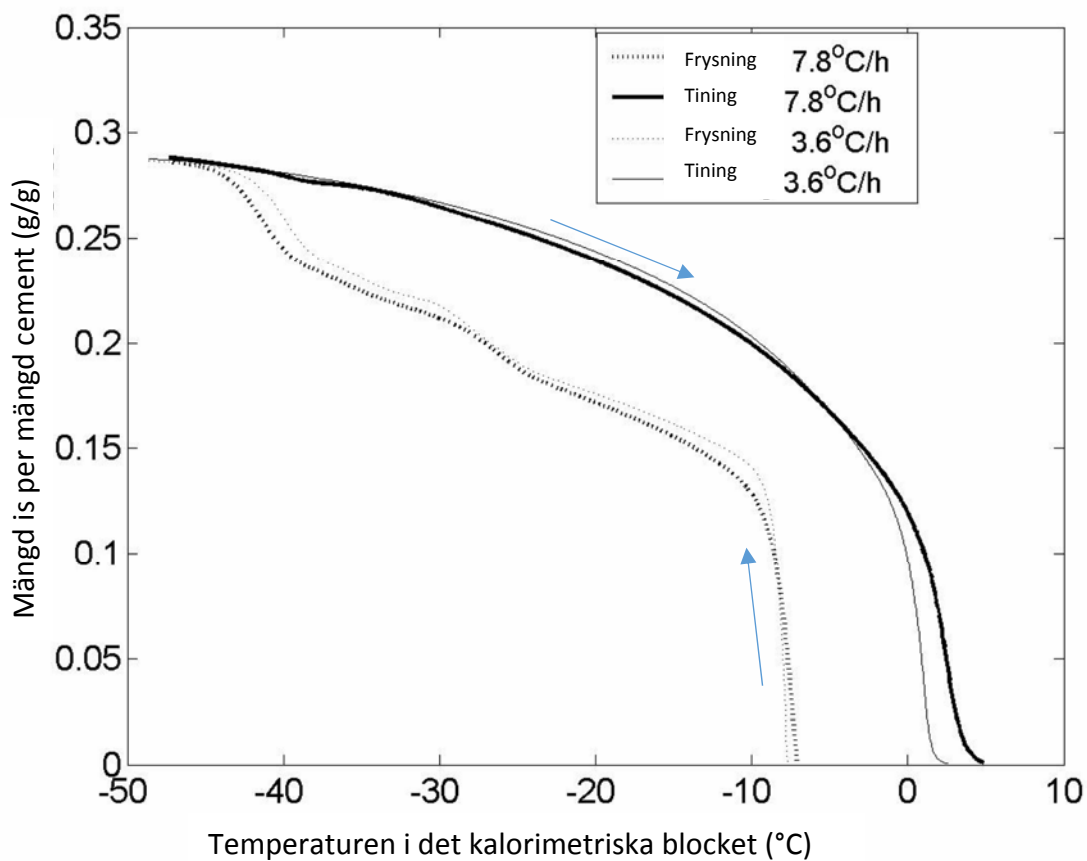


Bild 11. Isbildning beräknad med 'j-method' för betongprover utsatta för olika temperaturhastigheter. Fridh (2005).

4.2. Resultat och diskussion

Ismängdsberäkningar på cylindrarna 1-3 från prov A visas i bild 12-14. Mängd is visas i förhållande till det förångningsbara vattnet. Det är det vatten som avgår när provet torkas i 105 °C. Detta då olika prov kan innehålla olika mängd vatten. Även mängd is i förhållande till torrvikten visas då inte alla prover är exakt lika stora eller innehåller exakt lika mycket ballast.

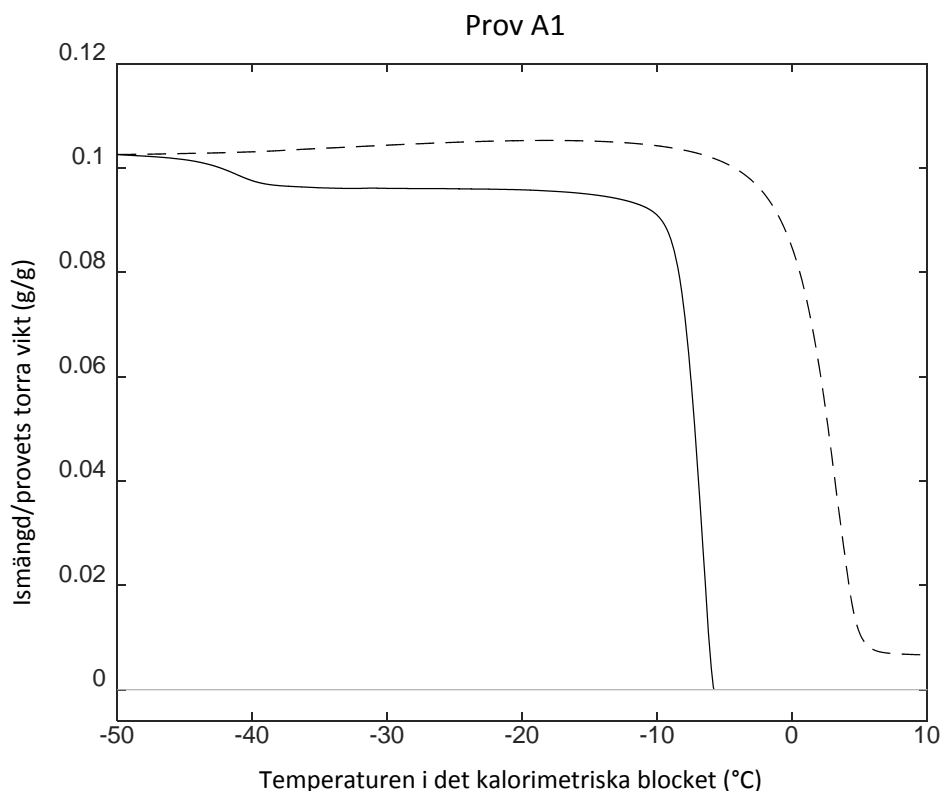
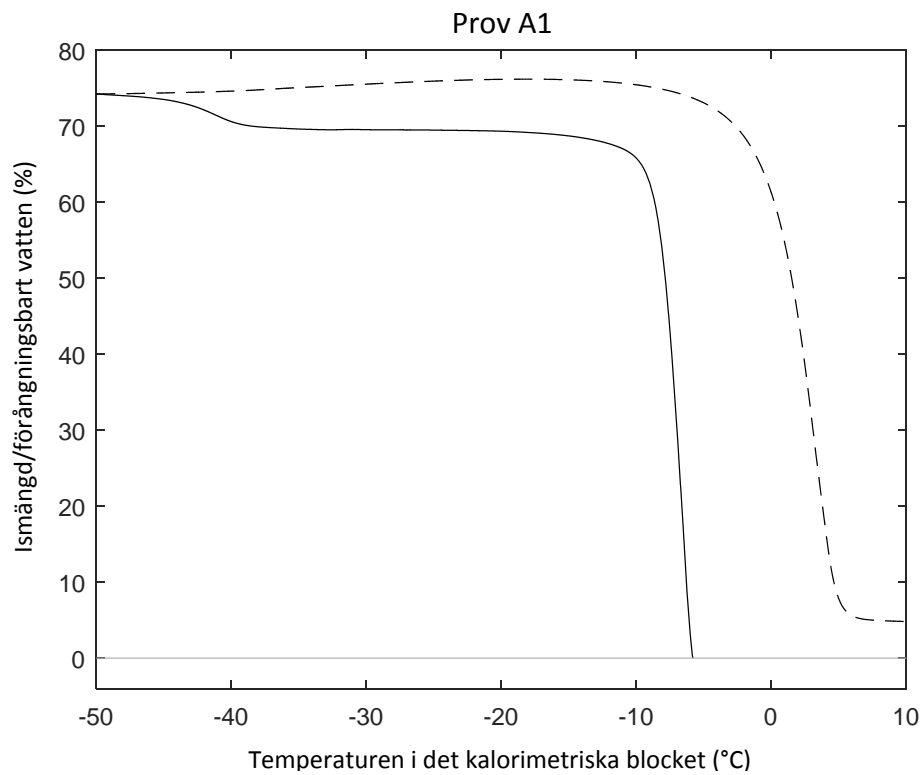


Bild 12. Cylinder A1 närmast den urlakade änden av cylindern A. Ismängd som andel av det förångningsbara vattnet vid olika temperaturer (överst) och ismängd per g torrt material vid olika temperaturer (underst).

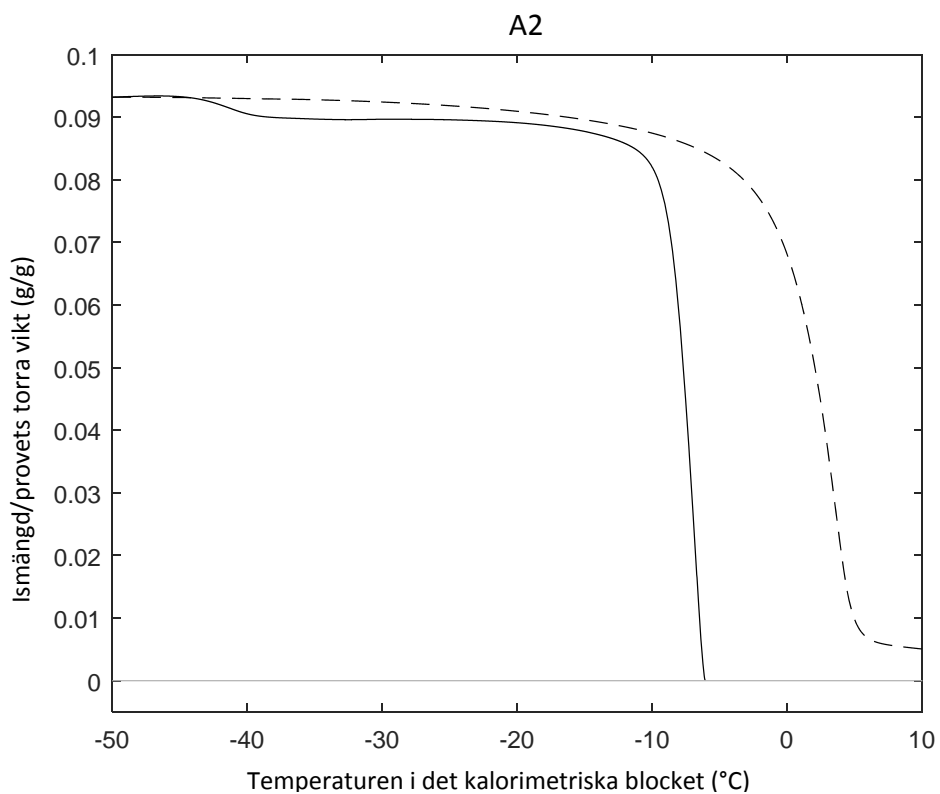
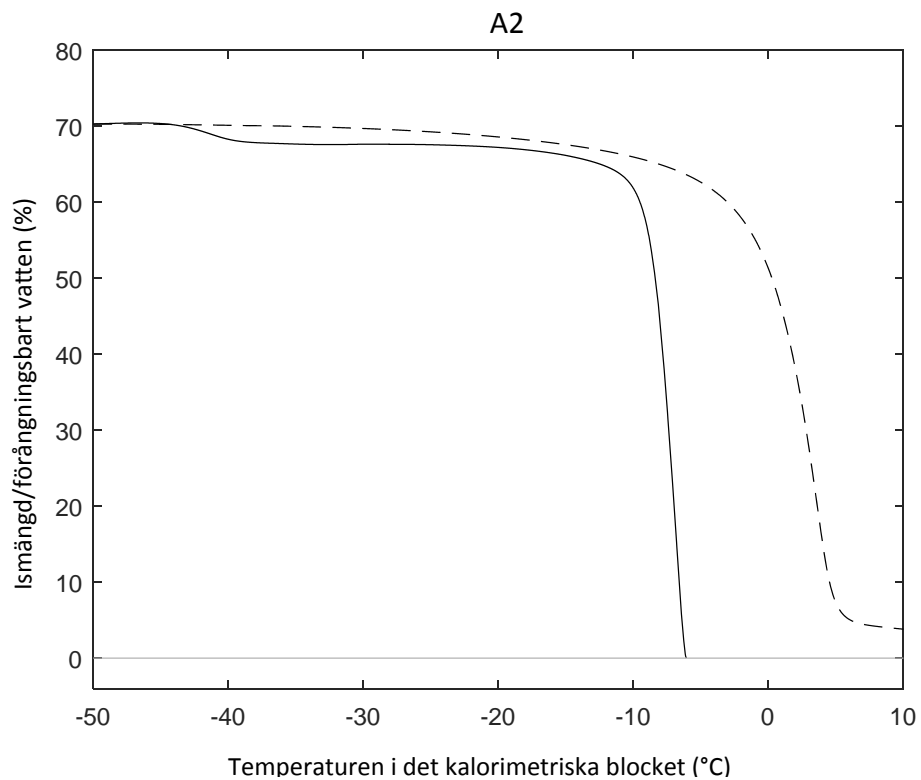


Bild 13. Cylinder A2 från mitten av den urlakade cylindern A. Ismängd som andel av det förångningsbara vattnet vid olika temperaturer (överst) och ismängd per g torrt material vid olika temperaturer (nederst).

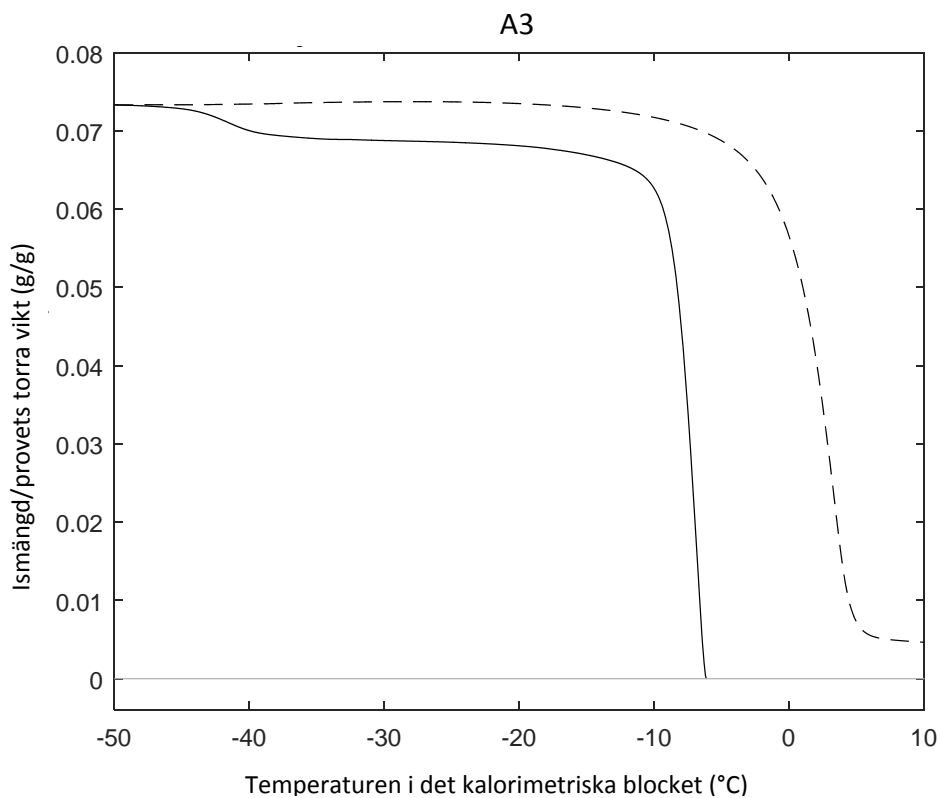
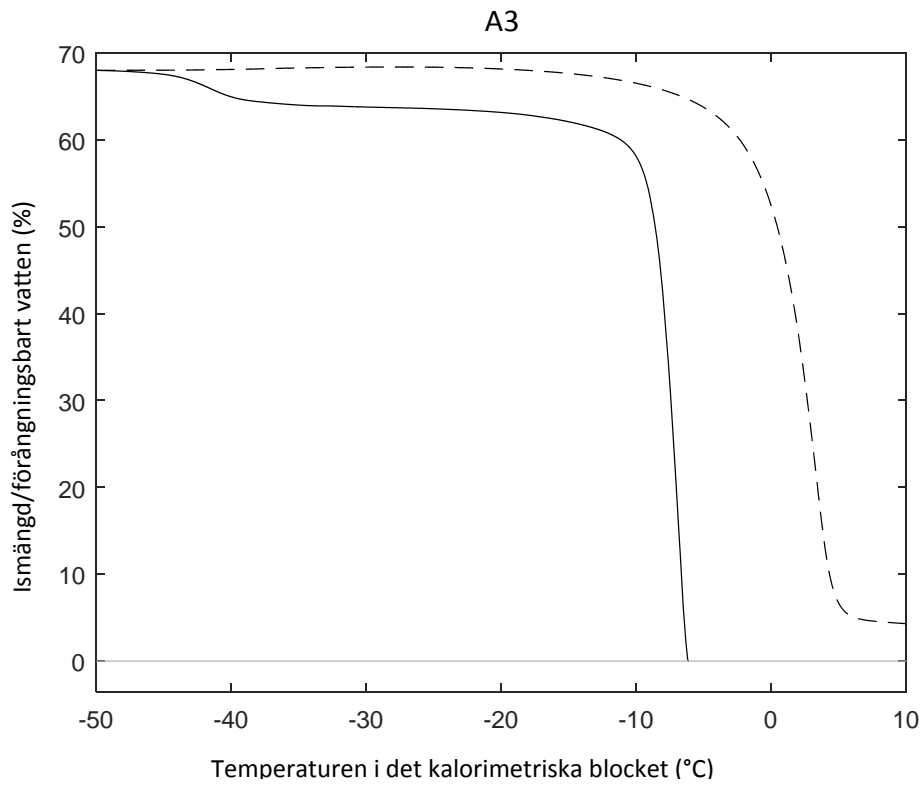


Bild 14. Cylinder A3 närmast den ej urlakade änden av den urlakade cylindern A. Ismängd som andel av det förångningsbara vattnet vid olika temperaturer (överst) och ismängd per g torrt material vid olika temperaturer (nederst).

Den is som bildas vid första isbildningen är ett mått på mängden stora porer i provet. Som syns i bild 15 påverkar urlakningen dessa porer då A1 har 30 % mer is än A3 vid -8 °C och A2 har 15 % mer is än A3 vid -8 °C, och skillnaden mellan A1 och A2 är ökande. Även om ICP-AES-mätningen i princip visade på samma nivåer för Ca/Si för A3 och A2 visar bild 15 att A2 också är påverkad av urlakningsförsöket.

Även om denna första frysning sker vid lägre temperaturer än de som blir aktuell i förvaret så är detta bara en konsekvens av provstorleken och det faktum att provet inte är omgivet av vatten. Frysning under tvång-mätningarna som genomförts tidigare med mer realistiska frysförhållanden (för förvaret) visar på temperaturer precis under noll för första frysningen.

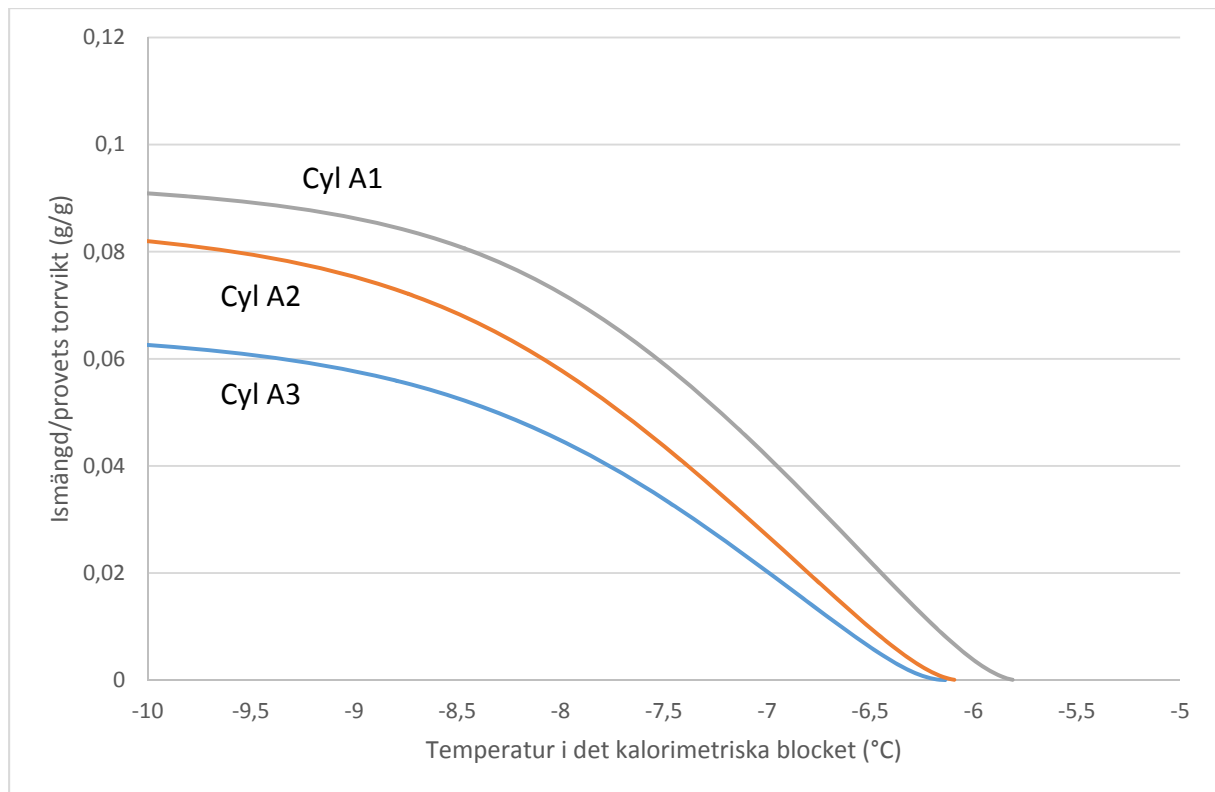


Bild 15. De tre cylindrarnas ismängd per torrsvikt vid olika temperaturer under frysning. Visar på stor inverkan av urlakningen på den initiala ismängden.

När det gäller hur mycket av provens förångningsbara vatten som fryser vid första isbildningen så är skillnaden mindre och här betar sig A2 mer som A3 i början och ökningen är bara kring 5 % för A2 och ca 15 % för A3, bild 16. Samtidigt så är andelen frysbart vatten hög i alla tre cylindrarna och bild 12-14 visar att mycket is bildas vid den initiala isbildningen. Detta kommer att påverka betongmaterialet i förvaret negativt.

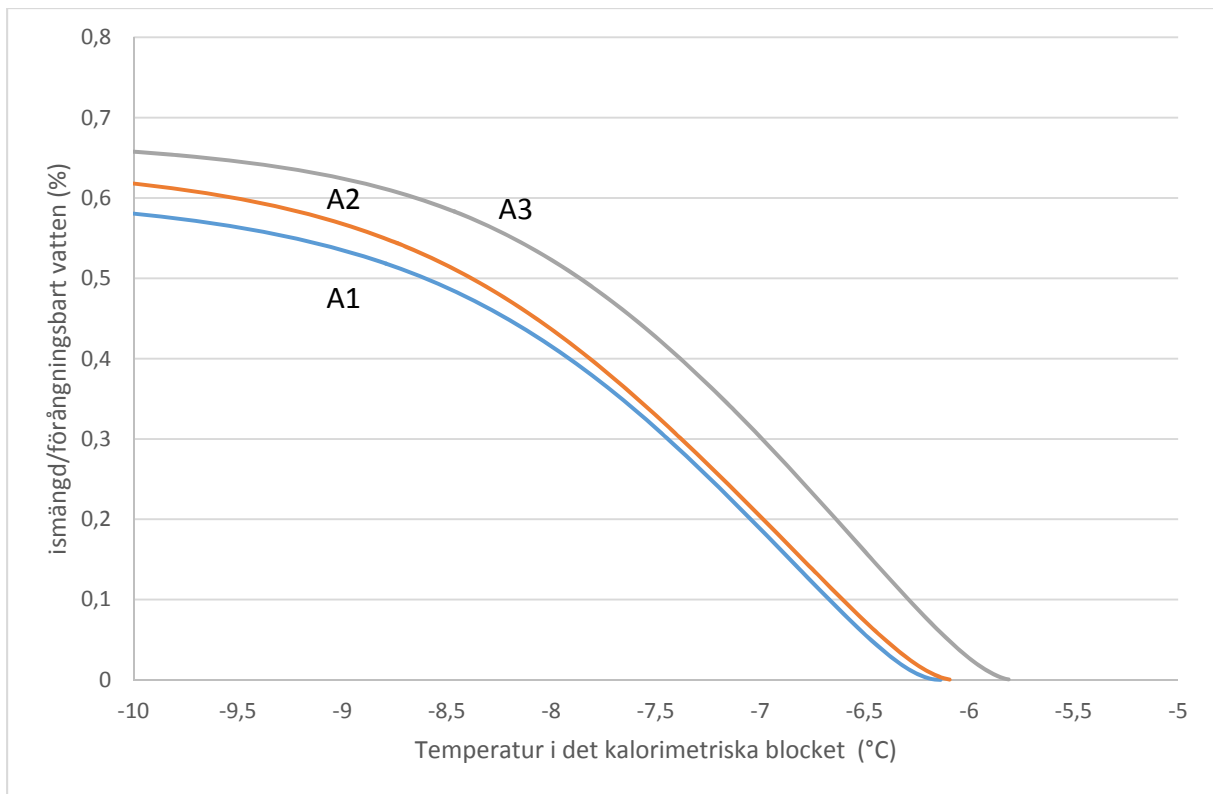


Bild 16. De tre cylindrarnas ismängd som andel av mängd förångningsbart vatten vid första isbildningen.

Bild 17 visar upptiningen för de tre cylindrarna. Ismängderna vid de högsta temperaturerna representerar bäst de olika cylindrarnas andel stora porer. I tabell 8 har värden hämtats från kurvorna i bild 17 för att tydligare visa cylindrarnas ismängder. Även upptiningen visar att urlakningen ökar mängden stora porer framförallt för A1 med 50 % men urlakningsprovningen påverkar även A2 nästan lika mycket. Då ICP-AES visade en sänkning av Ca/Si med 30 % för A1 (tabell 7) kan resultaten ses som en konsekvens av denna urlakning men att jontransporten tydligt har påverkat isbildningen i A2 trots att nivåerna Ca/Si är desamma som för A3. Ca som migrerat sitter eventuellt inte på samma sätt i mikrostrukturen som i ursprungsstrukturen med det krävs andra mätningar för att bekräfta det.

Tabell 8. Ismängder relativt A3 för A1 och A2 för temperaturerna precis total smältning.

Temp	A2	A1
Upptining	0	0
Upptining -1 °C	+95 %	+95 %
Upptining -2 °C	+46 %	+53 %
Upptining -3 °C	+28 %	+56 %

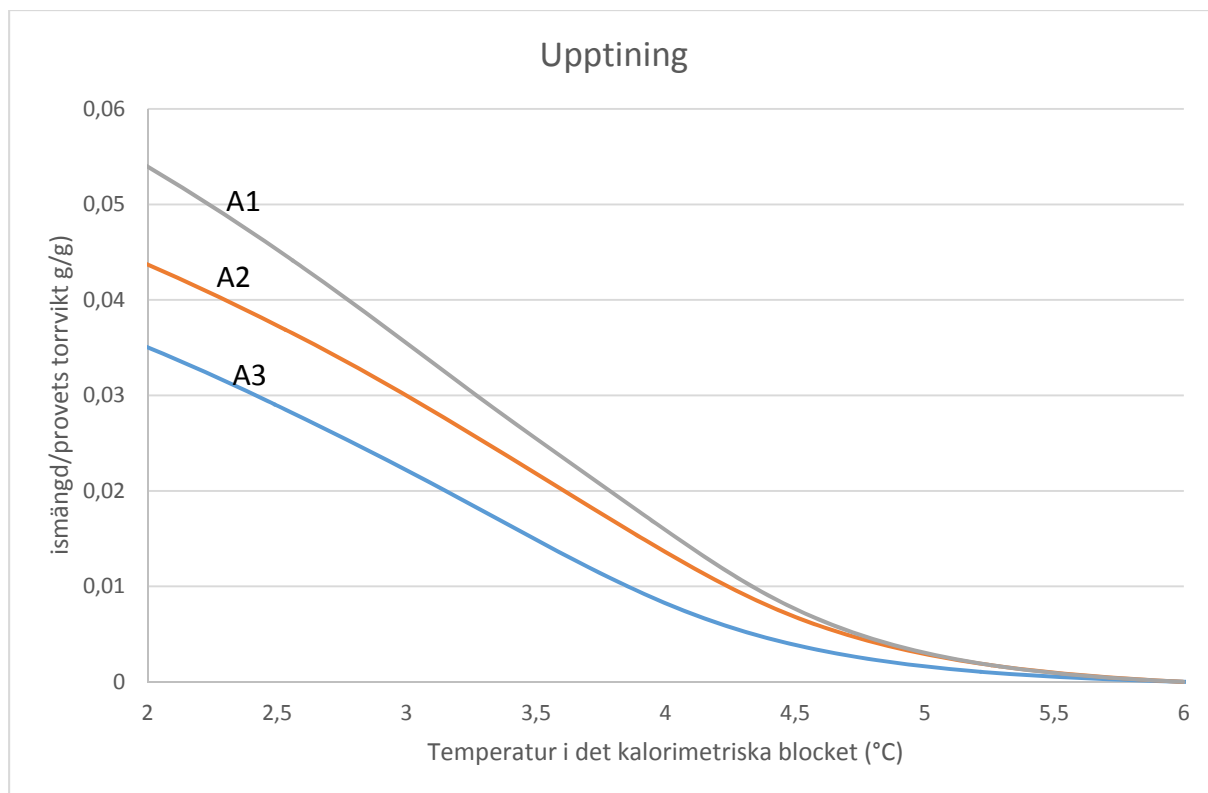


Bild 17. De tre cylindrarnas ismängd per torrvt vid olika temperaturer vid slutet vid total smältning.

4.3. Resultat från frysning under tvång

Två prover (50 mm diameter, $l = 50$ mm) urlakades på samma sätt som proverna som karakteriserades med lågtemperaturkalorimetri. Dessa utsattes sedan för frysning under tvång enligt metoden beskriven i kap 2. Provernas inre strukturförändringar karakteriserades med gångtid och dynamisk E-modul beräknas med ekv 1, se tabell 9.

Tabell 9. Gångtider för prov C och D.

Prov	Urlaknings Tid (dygn)	Ström (A)	Gångtid efter urlakning (μs)	E_{dyn} efter urlakning (GPa)	Gångtid efter urlakning och frysning (μs)	E_{dyn} efter urlakning och frysning (GPa)
C	14	0,11	13,4	32,7	13,5	32,2
D	14	0,11	13,2	33,7	14,1	29,6

*Otestade prover antas ha en gångtid på 12,1 μs , enligt tidigare mätningar (Karlsson, 2017).

Urlakningen sänker den dynamiska elasticitetsmodulen med 20 %*. Detta är mycket nära det värde som Karlsson (2017) erhöll för urlakningstiden 10 dygn, se tabell 6. Då Karlsson (2017) inte hade konstant ström under urlakningsförsöken utan justerade manuellt så är det intressant att se att i alla fall 10 dygnsprovet verkar jämförbart med prov kört under mer konstanta förhållanden. Däremot påverkades prov C och D mindre av den efterföljande frysningen. Detta kan bero på skillnad i vattenmättnadsgrader mellan proven vid frysningen.

4.4. Hydraulisk konduktivitet

Hur porernas konnektivitet ändras i proven efter urlakning och frysning kommer också att påverka hur stor nedbrytningen blir. Den hydrauliska konduktiviteten har bestämts enligt VU-SC:52 vid Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby för tre prov, se bilaga 1. Ett prov var aldrig

testat och aldrig torkat, ett prov hade frysts under tvång efter vakuummätning utan torkning och det tredje provet var prov D i tabell 9 som hade både urlakats och frysts under tvång och därefter förvarats i plastpåse. Resultaten visade att provet som inte hade åldrats var för tätt för att kunna mätas under en rimlig tidsperiod. Den hydrauliska konduktiviteten uppskattades till $<10^{-12}$ m/s. Prov D skapade också svårigheter under mätningen pga dess täthet men slutligen erhöles värdet $2,7 \cdot 10^{-11}$ m/s och för provet som enbart varit fryst erhöles det lägsta värdet $6,3 \cdot 10^{-10}$ m/s.

Resultaten visar om igen att om inte betongen är åldrad tar det väldigt lång tid för betongen att bli vattenmättad. Har betongen frysts under tvång med hög vattenmättnadsgrad blir strukturen 600 gånger öppnare. Mätningen på det urlakade och frysta provet tyder på att mineralomvandlingar i samband med lakningsprocessen av Ca också kan täppa till delar av porstrukturen.

5. Slutsatser

Studierna som presenterats här leder till följande slutsatser:

- Betydelsen av betongens vattenmättnadsgrad är tydligt då inverkan av tvång vid frysning skapar mer skada än frysning utan tvång för prover med höga vattenmättnadsgrader. Den dynamiska e-modulen sjunker med 85 % och spräckkraften med 30 % för betongen i studien utförd av Pålbrink & Rydman, (2013).
- Har betongen urlakats innan frysningen sker så sjunker den dynamiska e-modulen med 20-60 % beroende på urlakningsgrad. Efterföljande frysning under tvång sänker e-modulen ytterligare. Porositeten ökade i proven med ca 20 % för proverna i studien av Karlsson (2017).
- En urlakningsgrad på 30 % gav upp till 50 % mer is vid ett par minusgrader så hur långt urlakningen har gått innan frystemperaturen når förvaret kommer ha stor betydelse för hur mycket betongen i förvaret bryts ner.
- Ingenting i dessa studier tyder på att betongen helt kommer att falla samman när betongen utsätts temperaturer kring -3 °C.

6. Fortsatta studier

Fortsatta studier med frysprovning under tvång till högre temperaturer och vattenmättnadsgrader mellan 0,4 och 0,92 hade gett mer information om vid vilka vattenmättnadsgrader frysningen börjar påverka förvaret.

Skapa prover med olika urlakningsgrad för att sedan frystesta dem under tvång. Urlakningsgraden skall bestämmas med tex ICP-AES.

Dessa studier har varit möjliga tack vare finansiering från Svensk Kärnbränslehantering AB och ett stort tack riktas till dem och speciellt Per Mårtensson för mycket givande diskussioner.

Referenser

- Babaahmadi A. (2015), 'Durability of Cementitious Materials in Long-Term Contact with Water', Chalmers University of Technology, ISBN: 978-91-7597-155-1.
- Bager, D.H. and Sellevold, E.J. (1986), 'Ice Formation in Hardened Cement Paste, Part I – Room Temperature Cured Pastes With Variable Moisture Contents', Cement and Concrete Research, vol 16, pp. 709-720.
- Ekström T, (2003), 'Leaching of concrete: The leaching process and its effects', Ph.D. thesis, TVBM-1020, Lund University.
- Fagerlund, G. (1972), 'Critical degrees of saturation at freezing of porous and brittle materials', Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Report 34, in Swedish.
- Fridh K. (2005), 'Internal Frost Damage in Concrete', Doctoral Thesis, Lund Institute of Technology, TVBM-1023.
- Jacobsen, S. (1995), 'Scaling and cracking in unsealed freeze/thaw testing of Portland cement and silica fume concretes', Doctoral thesis, Division of Structural Engineering, Concrete section, The Norwegian Institute of Technology.
- Lindmark, S. (1998), 'Mechanisms of salt frost scaling of Portland cement-bound materials: Studies and hypothesis', Doctoral thesis, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, TVBM-1017.
- Powers, T.C. (1945), 'A working hypothesis for further studies of frost resistance' Journal of the American Concrete Institute, 16, pp. 245-272.
- Powers, T.C. (1965), 'The mechanism of frost action in concrete', Stanton Walker Lecture No 3, Silver Springs, Md. National Sand and Gravel Association/National Ready Mixed Concrete Association.
- Powers, T.C and Helmuth, R.A. (1953), 'Theory of volume changes in hardened Portland-cement paste during freezing', Proceedings, Highway Research Board 32, Bull. 46.
- Rosenqvist M. (2016), 'Frost-induced deterioration of concrete in hydraulic structures: Interactions between water absorption, leaching and frost action', TVBM-1036, Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University.
- Rosenqvist M and Persson M. (2009), 'Frostsprängning i betongdammar. Inverkan av frostsprängning till uppkomna skador vid vattenlinjen hos betong i vattenkraftverk', Master thesis, Division of Building Materials, Lund University, TVBM-5074, (in Swedish).

Sandström T. (2009), 'Durability of Concrete Hydropower Structures When Repaired with Concrete Overlays'. Technical Licentiate Thesis. Luleå University of Technology, ISBN 978-91-7439-074-2, 179 pp.

Setzer, M.J. and Auberg, R. (1997), Rilem workshop: Resistance of concrete to freezing and thawing with or without de-icing chemicals, E & FN Spoon.

SS137244 (2005) Betongprovning – Hårdnad betong – Avflagning vid frysning. Concrete Testing – Hardened Concrete – Scaling at freezing, Swedish Standards Institute (in Swedish)

Svensk Byggtjänst (1994), 'Betonghandbok – Material', Utgåva 2, kap 13, Arne Hillerborg, Stockholm.

Tange Jepsen, M. (2002), 'Salt frost scaling – interaction of transport mechanisms and ice formation in concrete', Doctoral thesis, Building Technology, Danish Technological Institute and Aalborg University.

SKB Technical report TR-14-01. (2015) 'Safety analysis for SFR, Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU'. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Utgenannt, P. (2004), 'The influence of aging on the salt-frost resistance of concrete', Doctoral thesis, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, TVBM-1021.

Valenza J and Scherer G. (2007), 'A review of salt scaling: II. Mechanisms', Cement and Concrete Research, no 37, pp 1022–1034.

Verbeck, G., Klieger, P. (1957), 'Studies of salt scaling of concrete', Highway Research Board, Bulletin 150.

Vidstrand P, Näslund, J-O, Hartikainen J, och Svensson U. (2007), 'Hydrogeological flux scenarios at Forsmark – Generic numerical flow simulations and compilation of climatic information for use in the safety analysis. SKB, Rapport: R-07-63.

Wu, M., Johannesson, B. and Geiker, M. (2014), 'Determination of ice content in hardened concrete by low-temperature calorimetry: Influence of baseline calculation and heat of fusion of confined water.' Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 115, No. 2, p. 1335-1351.

Warris, B. (1964), 'The influence of air entrainment on the frost resistance of concrete', Swedish Cement and Concrete Research Institute, Proceedings No 36.

Wikström, T (2012), 'Vattenabsorption i betong under inverkan av temperatur', Master thesis, Division of Building Materials, Lund University, TVBM-5084, (in Swedish).

Bilaga 1 Hydraulisk konduktivitet



PROVNINGSRAPPORT

utfärdad av ackrediterat provningslaboratorium

TEST REPORT issued by an Accredited Testing Laboratory



Akkred. nr 1716
ISO/IEC 17025

HANDLÄGGARE

Niklas Hansson

DATUM

Älvkarleby 2017-03-24

BETECKNING SIDA

1778-24

1 (2)

Svensk Kärnbränslehantering AB
Per Mårtensson
Box 250
101 24 Stockholm

PROVNING AV HÄRDNAD BETONG

Prover

3st prover inkom 2017-02-23 i torrt tillstånd. Proverna var märkta 1, 2 och 3.

Provinformation från kunden:

- Prov 1: referens: ett prov som legat i kalkvatten (ca 1 år) sedan den borrades ur ett större block.
- Prov 2: vakuummättad (utan någon torkning innan) och sedan utsatt för en fryscykel från +20°C till -10°C på 7 dygn. Sedan provningen har provet förvarats i kontorsklimat utan skydd för uttorkning.
- Prov 3: vakuummättad (utan någon torkning innan) och sedan utsatt för urlakning i 14 dagar genom elektrisk migration och därefter utsatt för en fryscykel från +20°C till -10°C på 7 dygn. Därefter har den förvarats i plastpåse i ca 1 månad.

Provningsmetod

Hydraulisk konduktivitet har provats enligt VU-SC:52.

Med vänlig hälsning

Niklas Hansson

VU-SC:52 Den utvidgade (K=2) standardmätosäkerheten för hydraulisk konduktivitet är mindre än $\pm 21\%$ av mätvärdet. Den angivna utvidgade mätosäkerheten är produkten av standardmätosäkerheten och täckningsfaktorn $k = 2$, vilket för en normalfördelning svarar mot en täckningssannolikhet av ungefär 95 %.

Denna rapport får endast återges i sin helhet, om inte utfärdande laboratorium i förväg skriftligen godkänt annat.

Provningsresultaten avser endast det provade materialet.

VATTENFALL AB

BETONGPROVNING

POSTADRESS

814 26 ÄLVKARLEBY

GODSADRESS

Laboratorievägen

814 70 ÄLVKARLEBY

TELEFON

026-835 00

TELEFAX

026-836 30

026-836 60

E-POST

betongprovning@vattenfall.com

WWW

www.vattenfall.se/foretag/services-tjanster/

Provberedning och vattenmätning

Proven bedömdes mycket täta och provernas längd kapades med hjälp av en betongsåg till en längd av runt 30 mm (se Tabell 1), för att möjliggöra högre gradient över provet i mätutrustningen.

Efter önskemål från kunden (Per Mårtensson) vattenmättades proverna genom att placeras under vatten i ett vakuumbärl (exsickator). Kärlet sattes under undertryck med hjälp av en vakuumpump som sög ut luft under 1,5h. Därefter stängdes kärlet med ventiler och lämnades över helgen (3 dygn).

Provning

Provningen följde vattenfalls interna provningsmetod VU-SC 52. Vilket innebär provning i celltryckspermeameter med mottryck. Varje prov installerades i ett flexibelt gummimembran, med tätande gummiringar i båda ändar, och placerades i en plexiglas cylinder. Cylindern fylldes med vatten som trycksattes, varvid gummimembranet smet åt runt provet för att förhindra randvatten under mätningarna. Trycket i provets inlopp och utlopp, samt celltrycket ökades till 5 bar, med celltrycket alltid 0,5-1 bar högre än förtrycket och mottrycket.

När trycket höjs löses eventuell luft i provet i vattnet och kan transporteras ut med vattenflödet genom provet. På så sätt uppnås nära vattenmättade förhållanden. Denna process tar längre tid ju tätare provet är.

När mätning påbörjades sänktes mottrycket (trycket i ovasidan på provet), vilket skapade en gradient över provet, med ett mättat flöde underifrån. Vattenflödet genom provet mättes genom att mäta vattenfrontens förflyttning i en tunn plastslang med 2 mm diameter. Provning skedde under två dagar, med omstart mellan mätdagarna. För alla tre proven genomfördes en mätning under 7,5 h dag 1 och en mätning under 6,5 h dag 2.

Resultat

Prov 2 gick lättast att mäta. För prov 1 och 3 gick flödet initialt baklänges i mätslangen vilket tyder på att proven fortfarande vattenmättades. Efter ett par timmars mätning stabiliserades flödet genom prov 3 och mätning kunde påbörjas. Flödet i prov 1 gick baklänges under hela mättiden för att helt avstanna i slutet av mätdag 2. Därmed är prov 1 för tätt för att framgångsrikt mätas inom rimlig tid i mätutrustningen. Det är möjligt att mätvärden skulle gå att få fram om mätperioden utökades med ett antal dagar eller veckor. Resultat visas i Tabell 1.

Tabell 1 Provningresultat hydraulisk konduktivitet

Prov	Provlängd [mm]	Provdiameter [mm]	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
1	29,8	51,5	För tätt för att mätas. Troligen $<10^{-12}$
2	30,8	51,5	$6,3 \times 10^{-10}$
3	30,3	51,5	$2,7 \times 10^{-11}$