

URLAKNING AV BETONG MED ELEKTRISK MIGRATION OCH FRYSNING UNDER TVÅNG

Kristoffer Karlsson

Lunds Tekniska Högskola

Avdelningen för byggnadsmaterial

TVBM-5109

Lund 2017 Examensarbete

Copyright © Kristoffer Karlsson, 2017

Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi,
Avdelningen för Byggnadsmaterial,
Lunds Tekniska Högskola, Lund

ISRN LUTVDG/TVBM-17/5109-SE (1-55)
Lunds Tekniska Högskola
Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi
Byggnadsmaterial
Box 118
SE-221 00 LUND

<http://www.byggnadsmaterial.lth.se>

Förord

Det här examensarbetet är den avslutande delen på civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Examensarbetet omfattar 30 högskolepoäng. Examensarbetet är utfört under 2016 på avdelningen för Byggnadsmaterial i samarbete med Svensk Kärnbränslehantering, SKB.

Katja Fridh har varit handledare till examensarbetet vid LTH och Per Mårtensson har varit extern handledare från SKB. Båda har varit delaktiga i diskussioner och frågeställningar, samt kommit med värdefulla kommentarer under arbetets gång. Till dessa två riktar jag ett stort tack. Ett stort tack skall även riktas till Lars Wadsö, examinator för examensarbetet. Även tack till Dr Arezou Babaahmadi, CBI Betonginstitutet, för allt stöd under återskapandet utav hennes experiment.

Tack går även till: Bengt Nilsson och Stefan Backe, forskningsingenjörer på avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH

Sammanfattning

Titel: Urlakning av betong med elektrisk migration och frysning under tvång

Författare: Kristoffer Karlsson

Handledare: Katja Fridh, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, Lund

Extern handledare: Per Mårtensson, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm

Examinator: Lars Wadsö, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola

Problembeskrivning: Den dagen då Slutförvaret För kortlivat Radioaktivt avfall, SFR, i Forsmark försluts så kommer även pumparna att stängas av. Detta leder till att anläggningen kommer att stå under vatten och kommer efter lång tid att bli vattenfylld då grundvattennivån stiger. När vatten kommer i kontakt med betong så påbörjas en så kallad urlakning, det vill säga att vatten tar med sig vissa joner från ett annat ämne. I fallet med betong är det kalcium i form av kalciumhydroxid som först försvinner i och med kontakten med vattnet. Ett scenario är att om cirka 10 000 år så kommer landsområdet där anläggningen SFR finns vara täckt av permafrost, det vill säga när marktemperaturen är under 0 °C under ett år. Permafrosten orsakar en isbildning inuti den urlakade betongen vilket orsakar spänningar som betongen måste klara av att ta hand om. Tidigare studier är ej överens om hur betongen kommer klara av dessa spänningar, vilket är grunden för fortsatta studier i detta examensarbete.

Syfte: Syftet med detta examensarbete har varit att få en ökad förståelse över hur betongen i SFR, närmare bestämt bergssalen BMA, kommer att reagera på en framtida permafrost efter att betongen har blivit urlakad på kalciumhydroxid.

Metod: Examensarbetet påbörjades med en litteraturstudie för att få förståelse för hur tidigare urlakningsförsök med hjälp av elektrisk migration, samt tidigare försök till frysning under tvång har studerats. Därefter upprättades det egna försök med vissa justeringar (som att använda silikonrör istället för asfaltstejp) för att urlaka provkroppar i betong med hjälp av elektrisk migration. När provkropparna hade urlakats i ett visst antal dagar så vattenmättes de innan de placerades i en stålcyklinder tillsammans med omgivande grus och vatten. Detta för att på något sätt efterlikna de verkliga förhållanden som kommer ske i SFR när permafrosten slår till.

Frysningen skedde under 150 timmar från 0 °C till -10 °C. Efter att provkropparna hade utsatts för både urlakning med elektrisk migration och frysning uppskattades betongens strukturförändringar med hjälp av gångtid med ultraljud, svepelektronmikroskop och porositetsberäkningar.

Slutsatser:

- Studien lyckades att återskapa Dr Babaahmadi försöksuppställning och urlaka betongprov till olika grad.
- Gångtiden med ultraljud ökar i snitt med 27% efter urlakning och 9% efter frysning
- Porositeten ökar på grund av urlakning och frysning i snitt med 23,5%.
- Isbildning sker mellan 0°C och -3°C.
- Provkropparna håller ihop trots svår urlakning och frysning.

Nyckelord: urlakning, urlakning med elektrisk migration, permafrost, frysning, frysning under tvång, SFR, BMA

Abstract

Title: Leaching of concrete with electric migration and freezing under influence of constraint

Author: Kristoffer Karlsson

Supervisor: Katja Fridh Division of Building Materials, Faculty of Engineering, LTH

External supervisor: Per Mårtensson, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm

Examiner: Lars Wadsö Division of Building Materials, Faculty of Engineering, LTH

Questions: The day SFR is closing down the facility in Forsmark and locking the doors to the repository for short-lived radioactive waste, the water pumps inside the building will also be shut down. Stopping the water pumps will lead to increased ground water levels, and the water will slowly begin penetrate the concrete. When concrete is exposed to water, a so-called leaching begins where the water carries certain ions, in this case calcium, away from the concrete. In 10 000 years from now, the area with the SFR facility in Forsmark, Sweden, will be covered in permafrost. Permafrost is defined by a sub 0 °C temperature for a period of at least a year. If leached concrete is exposed to permafrost, ice will form within the material and create tensions inside the concrete. Previous studies have given inconclusive results as to whether the concrete is able to tolerate these tensions, or if the concrete will crack. This question is the foundation for this master thesis.

Purpose: The purpose of this master thesis is to improve the understanding of how the concrete in the SFR facility, more specifically the rock vault BMA, will react to permafrost after the concrete has been leached of calcium.

Method: This master thesis began with a literature study to increase the knowledge of how previous leaching experiment with electrical migration and freezing under influence of constraint had been conducted. Second, our own experiment to leach specimen of concrete with electrical migration were performed. When the specimens had been leached for a couple of days the specimens were saturated before they were placed in a steel cylinder with surrounding gravel and water. This was to mimic the conditions in SFR when the permafrost arrives. The freezing from 0 °C to -10 °C were performed over 150 hours. After the specimens had been both leached and frozen a number of test were performed, such as the determination of ultrasound velocity, scanning electron microscopy and calculation of porosities.

Conclusions:

- Leaching with electrical migration works on concrete and not only on cement pastes.
- The porosity increases because of leaching and freezing on average with 23,5 %
- Ice formation occurs between 0 °C and -3 °C.
- Concrete specimens retain their structure despite leaching and freezing.
- The running time with ultrasound increases after both leaching and freezing.

Keywords: Leaching, Leaching with electrical migration, permafrost, freezing, freezing under influence of constraint, SFR, BMA

Innehåll

Förord.....	ii
Sammanfattning.....	iii
Abstract	iv
1 Inledning.....	1
1.1 Syfte.....	1
1.2 Mål.....	1
1.3 Avgränsningar.....	1
2 Bakgrund.....	2
2.1 Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall – SFR.....	2
2.2 Framtida klimatutveckling.....	5
2.3 Tidigare studier.....	5
2.3.1 SKB R-07-60 [5].....	5
2.3.2 SKB TR 12-13 [6].....	6
2.3.3 SKB P-13-07 (Thorsell 2011) [8].....	6
2.3.4 SKB R-01-08 (L-O Höglund 2001) [9].....	7
2.4 Denna studie.....	7
3 Teori.....	8
3.1 Betongs sammansättning.....	8
3.1.1 Blandvatten	8
3.1.2 Cement	8
3.1.3 Ballast	9
3.1.4 Blandningsvatten.....	10
3.1.5 Tillsatsmaterial	10
3.1.6 Tillsatsmedel.....	10
3.2 Betongs beständighet.....	11
3.2.1 Urlakning	11
3.3 Frostbeständighet	12
3.3.1 Allmänt	12
3.3.2 Hydrauliskt tryck.....	13
3.3.3 Sluten behållare.....	14
3.3.4 Mikroskopiska islinser	15
3.3.5 Makroskopiska islinser	15
4 Material och metoder	17
4.1 Provkroppar.....	17
4.1.1 Betongsammansättning	17

4.1.2 Gjutningsförfarande	17
4.1.3 Tillverkning av provkroppar.....	17
4.2 Metoder.....	17
4.2.1 Vattenmätning av provkroppar.....	17
4.2.2 Urlakning med hjälp av elektrisk migration	18
4.2.3 Frysning	22
4.2.4 Temperaturskåp och temperaturloggning	24
4.3 Materialundersökningar	24
4.3.1 Gångtid med ultraljud	24
4.3.2 Scanning Electron Microscope - SEM	26
4.3.3 Porositet	27
5 Resultat och diskussion	28
5.1 Gångtid med ultraljud	28
5.2 Porositet	29
5.3 Frystemperatur.....	30
5.4 SEM.....	31
6 Slutsatser	33
7 Fortsatta studier	33
8 Referenser	34
Bilaga A.....	36
Standard operation procedure - Urlakning	36
Vad du behöver	36
Utförande	36
Förberedande åtgärder	38
Bilaga B	38
Standard operation procedure – Frysning	38
Vad du behöver	38
Utförande	38
Bilaga C - SEM-bilder	39
Ej åldrade betonger	39
Urlakade betonger.....	41
Bilaga D.....	42

1 Inledning

När Sverige började att tillverka el med hjälp av kärnkraft på 1970-talet var det stor debatt om hur och vem som skulle ta hand om avfallet. Ansvarstagarna blev kärnkraftindustrin. Kärnkraftindustrin bildade då Svensk Kärnbränslehantering AB – SKB vars enda uppdrag var att ta hand om avfall från kärnkraftindustrin och övriga radioaktiva avfall ifrån områden så som forskning, sjukhus och veterinärer på ett fungerande sätt. [1]

Lösningen för det kortlivade avfallet blev att bygga Slutförvaret För kortlivat Radioaktivt avfall – SFR. SFR är en anläggning som ligger i Forsmark cirka 50 meter under havsbotten, och har en total förvaringsvolym på cirka 63 000 kubikmeter [2].

1.1 Syfte

Syftet med examensarbetet är att få en ökad förståelse för hur en urlakad betong påverkas av påfrestningar av en framtida permafrost under inverkan av tvång.

1.2 Mål

Målet med examensarbetet är

- Att genom att återskapa Dr Babaahmadis försöksuppställning för acceleration av urlakning av Ca urlaka betongprov i olika grad och därefter utsätta proven för frysning.
- Att genom gångtidmätningar och porositetsbestämningar karakterisera hur betongen påverkas av först urlakning och därefter frysning.

1.3 Avgränsningar

Studien har endast gjorts på en betongkvalite.

Hänsyn har ej tagits till strålningen från avfallet.

2 Bakgrund

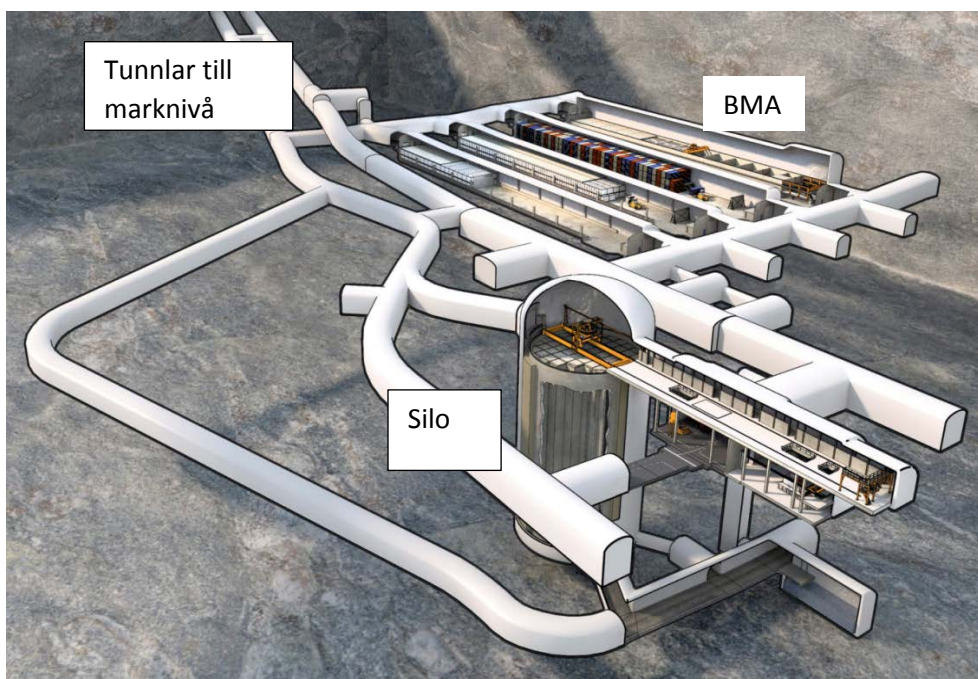
2.1 Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall – SFR

Avfallet som kommer att förvaras i SFR klassificeras som låg och medelaktivt avfall. Radioaktiviteten minskar snabbt till en början, efter 30 år har radioaktiviteten minskat med cirka 90%. Avfallet är dock aktivt under förhållandevis lång tid och aktiviteten är jämförbar med den ursprungliga uranmalmens aktivitet som först efter 100 000 år anses ofarlig. Därför måste avfallet isoleras i minst 100 000 år [3]

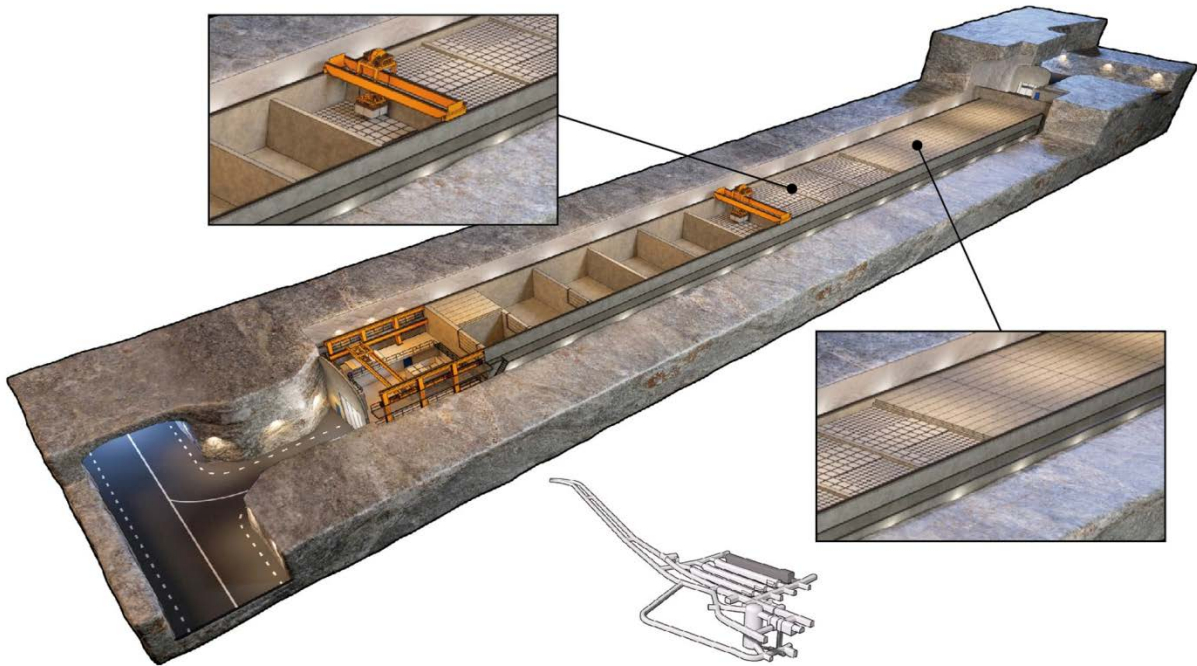
Avfallet kommer att isoleras via ett flertal barriärer. Även betongen som SFR är uppbyggd av fungerar som en barriär [3] Mindre radioaktivt avfall förvaras i vanliga containrar av stål, vilket också fungerar som en barriär [1].

Efter flera års översiktsstudier så genomfördes förundersökningar med bland annat provborringar i ett flertal svenska kommuner. Det sprickfattiga och torra berget i Forsmark passade bäst för slutförvaret och SFR byggdes därför i Forsmark [1].

Anläggningen (se Figur 1 nedan) öppnades 1988 och var först i världen av sitt slag. SFR har fyra stycken så kallade bergssalar på 160 meter per styck. Det mest radioaktiva avfallet kommer att förvaras i en betongsilo som är 50 meter hög. För att komma åt SFR från markytan så finns det två stycken tunnlar på ungefär en kilometer styck, en byggtunnel och en drifttunnel [2] Olika typer av avfall kommer förvaras i de olika bergssalarna och silon. I silon kommer stelnat medelaktivt avfall att förvaras. I bergssalen BMA kommer medelaktivt, mestadels ingjutet avfall att lagras. 1BTF och 2 BTF kommer att innehålla avfall som har torkats medan BLA kommer innehålla filter, verktyg och liknande som har kontaminerats med radioaktiva ämnen [4]. I det här examensarbetet kommer i huvudsak en betong med samma vct som i BMA att undersökas.



Figur 1 - Skiss över SFR – Bilden används med tillstånd från SKB



Figur 2 - Skiss över BMA - Bilden används med tillstånd från SKB

Bergssalen BMA (se Figur 2 ovan) är gjord av betong. Bergssalen har stabiliserats undertill med hjälp av grus. När BMA är fullt så kommer ett lock i betong att försluta avfallet innan ytterligare ett lager med betong läggs på för att skapa stabilitet (se Figur 3). Utrymmet mellan konstruktionen och bergväggen kommer innan stängning att fyllas upp med makadam (se Figur 4). [4]

När SFR är fullt kommer anläggningen att stängas igen och ingen drift eller underhåll kommer att ske efter det. [3] Detta innebär bland annat att pumparna som håller undan grundvattnet kommer att stängas av vilket leder till att SFR kommer fyllas med vatten och grundvattnet kommer gå tillbaka till sin naturliga nivå [4] Prognosen säger att om cirka 2000 år så kommer all betong i SFR, inklusive silon att vara vattenmättad. [5]

Tabell 1 - Materialdata för silo och BMA [6]

Konstruktion	Silo	BMA
vct[-]	$0,47 \pm 0,03$	$0,62 \pm 0,07$
Cement [kg/m ³]	350	300
Tryckhållfasthet [MPa]	48 ± 5	40 ± 5



Figur 3 - Bild inifrån BMA, När BMA är fullt kommer ett lock i betong att gjas på plats -
Bilden används med tillstånd från SKB



Figur 4 - Mellanrum mellan bergvägg och betongkonstruktion som
kommer att fyllas med makadam - Bilden används med tillstånd från
SKB

2.2 Framtida klimatutveckling

De senaste 700 000 åren har glaciationscykler varat i cirka 100 000 år. Cyklerna består oftast av en period där klimatet stegvis har blivit kallare och kallare, som sedan följts av en snabb övergång till ett varmare klimat. För 20 000 år sedan, när glaciärerna var som störst så var cirka 47 miljoner km² av jordens yta täckt av inlandsis, vilket kan jämföras med de 15 miljoner km² inlandsis som existerar idag. I Skandinavien kommer permafrosten oftast före inlandsisen på grund av det kalla klimatet. Inlandsis i Skandinavien uppstår under de glaciala perioderna då dalglaciärer expanderar i den skandinaviska fjällkedjan. Då tillväxten av inlandsis sker så orsakar vikten av isen en så kallad isostatisk nedpressning av jordskorpan. Permafrost definieras som när marktemperaturen är under 0 °C i över ett år. Det finns flera orsaker som orsakar permafrost, men som tumregel uppkommer permafrost om den genomsnittliga lufttemperaturen är lägre än ett värde inom intervallet -9 °C och -1 °C. Referenscykeln som SKB har tagit fram är ett exempel över hur klimatutvecklingen kommer se ut över Forsmark de kommande 120 000 åren. Denna cykel är även mer känd som Weichselglaciation. Weichselglaciationscykeln går ut på att de senaste 120 000 årens klimat kommer att upprepas. Enligt denna teori kommer den första permafrosten med inlandsis att slå till om cirka 10 000 år för att, i sammanhanget, snabbt tina bort. Nästa permafrost med inlandsis kommer därefter dröja cirka 20 000 år. Denna tinar också bort relativt snabbt men därefter är det endast 5 000 år tills nästa permafrost. 10 000 år efter denna permafrost så kommer isarna att vara på motsvarande dagens is mängd. Därefter kommer under cirka 25 000 år is mängderna öka kraftigt i perioder med tre stycken toppar som inträffar vid 45 000, 50 000 och 65 000 år från och med idag, där den kraftigaste toppen är om 65 000 år. Efter 65 000 år kommer is mängderna att minska under 5 000 år när till värden som idag. Efter 70 000 år så kommer is mängderna att sakta men säkert att öka med vissa toppar under en 30 000 årsperiod med sin absoluta topp efter 105 000 år. Is mängderna kommer att drastiskt sjunka under en period på ungefär 8 000 år innan de håller sig stadigt mot dagens klimat [7].

Underlaget för klimatförändring i den här studien är endast baserat på referensglaciationscykeln.

2.3 Tidigare studier

2.3.1 SKB R-07-60 [5]

Mats Emborg, Jan-Erik Jonasson och Sven Knutsson har vid Luleås Tekniska Universitet, på uppdrag av SKB utrett hur betongkonstruktionerna och silons omgivande bentonit vid SFR klarar av att uppfylla önskade krav efter tusenåriga perioder av permafrost. Kraven som ställs på betongen och bentonitleran är att de ska fungera som barriärfunktion efter frysning och upptining.

Analyserna i rapporten är av teoretisk karaktär. Grunden till dessa teorier är rapporter från SKB där framtida klimat uppskattas. I dessa rapporter är det framtaget att klimatet för SFR som ligger mellan 40-110 meters djup kommer utsättas för temperaturer emellan -5 °C och -10°C.

I rapporten har författarna nämnt olika faktorer som åldrar betong, bland annat saltfrostangrepp. Dock har de inte nämnt faktorer som urlakning eller omkristallisation av CSH-gel. Receptet författarna använt sig av överensstämmer med betongen i silon i SFR.

Enligt författarna kommer betongen i silon vara såpass vattenfylld att vatteninnehållet överskrider den kritiska mängden för att undvika inre frostsador redan vid den första permafrostcykeln. Redan vid den första frysningen kommer frostangreppet på betongen göra så pass stora skador att barriäreffekten till stora delar upphör. Rapporten anger att betongen kommer få en struktur som bäst kan liknas med sand eller grus och därmed kommer även diffusionspärren att upphöra.

2.3.2 SKB TR 12-13 [6]

Tang Luping från Chalmers tekniska Högskola och Dirch H Bager från DHB-Consult har på uppdrag av SKB genomfört en teoretisk studie av hur betongen i SFR skulle reagera i samband med permafrost. I rapporten har författarna gjort beräkningar på konsekvenserna för cykler av frysning och tining ner till -5°C och -10°C . Parametrar för beräkning av betongens egenskaper togs fram för en 20 år gammal betong. Betongrecepten från silon i SFR och 1BMA användes. Författarnas brottmekaniksteori grundar sig på en teori av Coussy och Monteiro, (2009) om att när en skada sker så avlastas materialet och belastningsprocessen börjar om. Vattnets kompressabilitet är en viktig faktor för betongens skadepåverkan. Då elasticitetsmodulerna för vatten, is och cementpasta (1,8 GPa, 7,8 GPa respektive 10 GPa) är olika kommer vattnet att tryckas ihop vid frysning. Författarna säger att vattenmättad betong klarar temperaturer ner till -10°C med enbart vissa makroskador. Författarna menar att betongen inte kommer smulas sönder av frysningen utan endast sprickbildning sker vilket ger betongen en lägre hållfasthet. Detta innebär att det uppstår spänningar i betongen tills det uppstår en spricka och därefter avlastas materialet vid sprickan innan spänningar börjar byggas upp igen. Spänningarna avlastas igen när nästa sprickbildning uppstår. Detta mönster upprepas om och om igen och fler avlastningar och sprickbildning sker. De första sprickorna i betongen kommer uppstå mellan $-1,8^{\circ}\text{C}$ och $-2,3^{\circ}\text{C}$ för betongen i silon medan första sprickbildningen i 1BMA kommer uppstå mellan $-1,3^{\circ}\text{C}$ och $-1,7^{\circ}\text{C}$. Eftersom fryshastigheten är långsam anser författarna att frysning kommer ske i omgivningen innan frysning sker i betongen. Detta leder till att betongen ej dräneras vid frysning. Tryckökningen vid isbildningen kommer inte heller att leda till att ett vattenflöde uppstår, utan ett kommer leda till ett ökat tryck. Enligt författarna kommer 1BMA vid värsta tänkbara förhållanden tappa 20% i draghållfasthet och 51% i tryckhållfasthet vid en frysning ner till -10°C . Strukturen i betongen kommer dock att bestå enligt Tang och Bager.

2.3.3 SKB P-13-07 (Thorsell 2011) [8]

Vattenfall har genomfört en experimentell undersökning av betongen i 1BMA i SFR. Anledningen har varit att få fram vid vilken temperatur betongen i fråga fryser och vilka frysegenskaper betongen i fråga besitter. Betongen borrades ut i september 2009 innan de vattenmättades och frystes. Undersökningarna av betongen har skett okulärt och med hjälp av egenfrekvensmätningar. Egenfrekvensen mättes med en så kallad Grindsonic. Vattenfall definierade provkropparna som sönder då antingen provkroppen inte höll ihop eller egenfrekvensen markant sjönk.

Provkropparna torkades till en konstant vikt vid 105°C innan de placerades i en tunna med vakuum i 48 timmar. Därefter fylldes tunnan på med vatten och provkropparna fick dra åt sig i 48 timmar.

Provkropparna placerades sedan i koppar av plast med vatten och temperaturövervakning. Frysning skedde på två olika sätt. Egenfrekvenserna mättes till en början på varje provkropp vid 20°C som ett referensvärde. Den första metoden som provkropparna frös på var att gå från 20°C till 0°C under 48 timmar för att sedan gå upp till 20°C på 24 timmar. Därefter mättes egenfrekvens. Sedan gick temperaturen från 20°C till -1°C under 48 timmar och sedan till $+20^{\circ}\text{C}$ under 24 timmar innan egenfrekvensen mättes igen. Detta upprepades för temperaturer -2°C , -3°C och så vidare tills betongen bedömdes ha gått sönder.

I det andra försöket så frystes 11 stycken provkroppar ner till 0°C . en provkropp tinades upp till 20°C och egenfrekvensen mättes över provkroppen. Därefter kasserades provkroppen. De övriga provkropparna sjönk från 0°C till -1°C under 48 timmar. Därefter tinades en provkropp upp till 20°C och egenfrekvensen mättes. Temperaturen sjönk sedan till -2°C , -3°C och så vidare ner till -10°C .

Metoderna var likvärdiga och gav resultatet att provkropparna gick sönder vid $-5\pm 2^{\circ}\text{C}$

2.3.4 SKB R-01-08 (L-O Höglund 2001) [9]

Syftet med den här studien har varit att se hur porositeten har ökat i betong efter urlakning. För att urlaka betongen har tre modeller satts upp för att jonutbyte skall ske och därmed också urlakning. Tre fall eller modeller har satts upp för att matematiskt se hur betongen i SFR urlakas på grund av jonutbyte i 10 000 år och hur det kommer att påverka porositeten i betongen.

I det första fallet så har betongen varit i direktkontakt med grundvattnet. Massöverföringen har skett via så kallad diffusion och grundvattnets sammansättning har ansetts vara konstant. Urlakning var i det här fallet, som begränsades av diffusion, väldigt långsam. Enligt beräkningarna förblir kalciumsilikaterna intakta på större djup än 0,4 meter, även efter 10 000 år. De stora förändringarna sker på ytan där en rejäl minskning av portlandit och kloridinträngning sker. Porositeten innan försöken låg runt 10 %, och på avståndet 0-0,1 meter in låg porositeten mellan 7,4 % och 19 % efter urlakningen. Längre in i provkroppen låg porositeten mellan 7,6 % och 13 % efter urlakningen.

I det andra fallet har grundvattnet trängt sig in i en sprucken betong med ett konstant flöde vilket har antagits vara lika stort som vattenflödet genom silon. Urlakningen sker snabbare i det här fallet jämfört med förra fallet på grund av flödet av grundvattnet. Enligt beräkningarna är kalciumsilikaterna så gott som slut efter 10 000 år på djupet av 0,4 meter. Porositeten hade ett maxvärde runt 17 % i provkroppen.

Det tredje fallet har satts upp som fall ett, fast med en avskiljare i bentonit på 1,5 meter vilket förhindrar att betongen hamnar i direktkontakt med grundvattnet. Urlakningen sker väldigt långsamt i och med att bentoniten fungerar som en barriär för diffusionen. Beräkningarna visar att kalciumsilikaterna förblir intakt på alla djup i provkroppen under 10 000 årsperioden. Porositeten minskar i det här fallet från 10 % till 8 % i betongen och från 25 % till 19 % i bentoniten.

2.4 Denna studie

Då de tidigare studierna inte är överens om betongen kommer att hålla ihop eller brytas ner till ett grusliknande tillstånd efter urlakning och frysning skulle detta undersökas i detta examensarbete.

För att få ytterligaste kunskap om betongens tillstånd så användes både accelererande urlakning med hjälp av elektrisk migration och frysning under tvång att undersökas för att på så sätt ta fram mer kunskap om betongens struktur kommer att vara efter att permafrost kommer angripa området Forsmark om cirka 10 000 år.

3 Teori

3.1 Betongs sammansättning

Betong som material kännetecknas framför allt av sin goda beständighet, formbarhet samt hållfasthet [10]. Vanligaste området där betong används som stommaterial, det vill säga i bärande konstruktioner. Betongen har goda egenskaper emot nötning och fukt. Betongens beståndsdelar består av vatten, ballast och cement. Dock förekommer det ofta tillsatsmedel och tillsatts material för att på ett eller annat sätt ändra betongens egenskaper. När vatten och cement blandas så går det under namnet cementpasta, och det är cementpastan som används som bindemedel i betongen. [10]

3.1.1 Blandvatten

Förhållandet mellan vatten och cement betecknas som vattencementtalet och förkortas vanligen till vct. Ju högre vct, desto bättre arbetbar blir betongen, dock sjunker hållfastheten i betongen vid högre vct. Vct beräknas enligt ekv 1. [10]

$$vct = \frac{W}{C} \quad (1)$$

Där

vct	är vattencementtalet [-]
W	är mängden blandningsvatten [kg/m ³]
C	är mängden cement [kg/m ³]

3.1.2 Cement

Cement är ett hydrauliskt bindemedel i pulverform. Hydrauliskt bindemedel definieras som att det hårdnar vid reaktion med vatten och sedan bildar ett material som blir beständigt mot vatten. Reaktionen kan ske både i luft och i vatten. Flera av betongens egenskaper påverkas av typ av cement. Bland annat påverkas betongens hållfasthet, värmeutveckling, utseende, gjutbarhet och beständighet. [11]

Enligt Europeisk och Svensk standard används det idag tre typer av cement, CEM I, CEM II och CEM III. CEM I måste innehålla minst 95% så kallat portlandklinker. Typen CEM I används bland annat som anläggningscement vilket är en vanlig svensk produkt som används i anläggningar som SFR. CEM II innehåller minst 65% portlandklinker och CEM III innehåller mellan 20% och 65% portlandklinker. Sverige har tidigare mestadels använt sig av CEM I som standardcement, men för att minska klimatpåverkingarna så är numera CEM II standardcement. [10]

År 2013 lanserade Cementa ett nytt cement i Sverige, Bascement. Bascement går under kategorin CEM II. Bascement har reducerat sin andel klinker vilket då reducerar koldioxidutsläpp. Bascement har ett innehåll av 16 % flygaska. [12]

Tabell 2- Betongkemi [13]

Beteckning	Förkortat skrivsätt	Förklaring	Anmärkning
CaO	C	Kalciumoxid	Bränd kalk, beståndsdel i portlandcement
SiO ₂	S	Kiseldioxid	Kvarts, kvartsit
Al ₂ O ₃	A	Aluminiumoxid	Beståndsdel i portlandcement
H ₂ O	H	Diväteoxid	Vatten
Fe ₂ O ₃	F	Järn(3)oxid	Beståndsdel i portlandcement
Ca(OH) ₂	CH	Kalciumhydroxid	Portlandit, stark basisk
3CaO·SiO ₂	C ₃ S	Trikalciumsilikat	Klinkerkomponent
2CaO·SiO ₂	C ₂ S	Dikalciumsilikat	Klinkerkomponent
3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A	Trikalciumaluminat	Klinkerkomponent
4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	Tetrakalciumaluminatferrit	Klinkerkomponent
3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃	Kalciumsilikathydrat	CSH-gel, vanligtvis kallat CSH

Då kalksten och lera bränns så sker det kemiska reaktioner som bildar klinkerkomponenterna. De komponenter som är viktigast för hållfastheten är C₃S och C₂S. C₃S härdar snabbare än C₂S och är därmed viktigare för hållfastheten de första 28 dagarna, medan C₂S ger en högre hållfasthet fast under längre tid. Olika typer av cement har olika halter av C₃S och C₂S. C₃A och C₄AF är båda komponenter som både sänker hållfastheten och gör betongen känslig för kemiska angrepp. Därför begränsas användandet av både C₃A och C₄AF i betong. [14]

3.1.3 Ballast

Ballast är det gemensamma namn på bergartsmaterial eller ersättningsmaterial som används vid betongtillverkning. Bergartsmaterialet kan antingen vara makadam (krossat material) eller singel (naturgrus) med rundade korn. Beroende på storleken på ballasten så delas ballasten upp i olika benämningar, se tabell 3

Ballasten påverkar betongens sammansättning och därmed i hög grad den färska betongens egenskaper. De egenskaper som främst påverkas är gradering, fillerhalt, slam halt, maximal kornstorlek, kornform och ytbeskaffenhet. [15]

Tabell 3 – Kornstorleksfördelning

Beteckning	Kornstorlek [mm]
Sten	> 8
Fingrus	≤ 8
Sand	≤ 4
Filler	≤ 0.125

3.1.4 Blandningsvatten

Vatten som används för att blanda betong skall vara av sådan god kvalitet att vattnet ger en jämn betongkvalitet. Ett riktmärke att gå efter är att om vattnet är drickbart går det att använda till betong. Om vattnet är av dålig kvalitet så kan betongens hållfasthet och beständighet påverkas negativt [16]. Vatten med salter i sig bör alltid undvikas vid betongtillverkning [10].

3.1.5 Tillsatsmaterial

De tre vanligaste tillsatsmaterialen till betong i Sverige är idag silkastoft, flygaska och masugnsslagg. Silkastoft är en stark puzzolan, vilket kräver kalk för att kunna reagera. Silkastoftets partiklar är väldigt finkorniga och förbättrar betongens sammanhållning och stabilitet.

Flygaska är en restprodukt som bildas vid koleldade värmeverk. Flygaskan består mestadels av aluminiumsilikatglas där glashalten är en måttstock på askans reaktivitet [10].

Vid framställning av järn så uppstår en restprodukt som kallas för masugnsslagg. Masugnsslagg är ett latent-hydrauliskt material, vilket innebär att masugnsslagg behöver någon mer reagent än vatten för att få igång reaktionen, vanligtvis används kalciumhydroxiden i cementpastan [17].

3.1.6 Tillsatsmedel

För att få fram vissa egenskaper efter behov i betongen, både färsk och hårdnande, används det flera olika sorters tillsatsmedel. Exempelvis finns retarderande eller accelererande medel som påverkar hur snabbt betongen härdar. För att få bättre arbetbarhet med betongen utan att ändra vattencementtalet används så kallat flytmedel. För att förebygga frostsador i betongen går det att använda luftporbildande medel [18].

3.2 Betongs beständighet

3.2.1 Urlakning

Urlakning är vad som sker när ett material i fast form, som innehåller lösliga ämnen, kommer i kontakt med vatten. Då vätskan kommer i kontakt med materialet påbörjas en process där de lösliga ämnena löses upp i vätskan och transporteras ifrån det fasta materialet. [19]

En illustration över urlakning är när odlingsjord och mark kommer i kontakt med vatten och lättlösliga mineraler frigörs och följer med vattnet ner till grundvattnet. [20]

För att någon som helst urlakning, i vilket sammanhang som helst, skall kunna ske så måste det finnas vatten. Vatten har en förmåga att kunna lösa upp fler ämnen än någon annan vätska och kallas därmed för "det universella lösningsmedlet". [21]

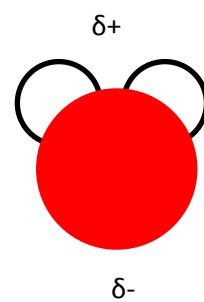
Vattens goda lösningsegenskaper beror på hur vattenmolekylen är uppbyggd (se Figur 5). Vatten består utav en syreatom och två stycken väteatomer.

På grund av vattenmolekylens uppbyggnad (se Figur 5) så bildas det en så kallad dipol, som är positiv laddad vid väteatomerna och negativt laddad vid syreatomen. Detta gör att vatten kan attraheras av både positiva och negativa laddningar. Vattenmolekylen attraheras först och främst av jonföreningar och andra dipoler vilket i sin tur ger möjlighet till upplösning. [22]

Det är detta som gör att vatten som färdas genom exempelvis odlingsmarker och betongkonstruktioner tar med sig viktiga mineraler och föreningar. [21]

Betong är ett kompositmaterial där vissa beståndsdelar är lösliga i vatten. Det är framför allt de kalkhaltiga ämnen som portlandit (kalciumhydroxid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) som skapas vid hydratiserande av cement. Även andra kalkbaserade ämnen så som C-S-H-gel (kalciumsilikathydrat) som bildades vid cemenhydratationen kan urlakas. Eftersom det oftast är kalk som avses när urlakning av betong studeras är det korrekta namnet kalkurlakning men i vardagligt bruk säger man bara urlakning. Om en betong är porös så kan vatten transporteras igenom betongen mycket lättare jämfört med en oporös (tät) betong. Det ökade vattenflödet orsakar då ännu mer urlakning. [23]

Urlakning är en process som rent naturligt tar väldigt lång tid. Därför får de flesta betongkonstruktioner ingen eller obetydliga skador av urlakning. Dock finns det konstruktioner som förväntas ha en väldigt lång livslängd som exempelvis vattenkraftdammar och slutförvaring av kärnkraftavfall och där blir urlakning utav större intresse. [24]



Figur 5 -
Vattenmolekylens
uppbyggnad

3.3 Frostbeständighet

3.3.1 Allmänt

I länder med ett kallt klimat, så som Ryssland, Kanada och de skandinaviska länderna finns det en stor risk för frostsador i betong, och även andra porösa material så som exempelvis tegel. I Sverige observerades de första frostsadorna på betong i början av 1900-talet. [25]

Betong som har härdat har vanligtvis en porositet emellan 12% och 20%. Majoriteten av porerna består av så kallade gelporer och kapillärporer. Vid normalt utomhusbruk av betong så fylls dessa porer med vatten. [26]. När temperaturen sjunker under vattnets fryspunkt så bildas därför is. Vatten i sin fasta form har i snitt nio procent mer volym än vatten i flytande form [27]. I och med att vattnet som expanderar inte har någonstans att ta vägen orsakar det i sin tur höga spänningar och så småningom sprickor i betongen. Betong som främst påverkas är betong som exempelvis saknar luftinblandning, ung betong och betong som exponeras för (tö-)salter. [26]

Det vatten som är kapillärkondenserat blir utsatt för ett så kallat undertryck. Ju mindre porradien är desto större blir undertrycket. Konsekvenserna av detta blir att frystemperaturen sjunker för vattnet i kapillärporerna. Exempel syns i tabell 4 nedan.

Tabell 4 - Hur frystemperaturen påverkas av porradie [27]

Porradie (Å)	Fryspunkt (°C)
634	-2
222	-6
137	-10
95	-15
74	-20
53	-30
43	-40

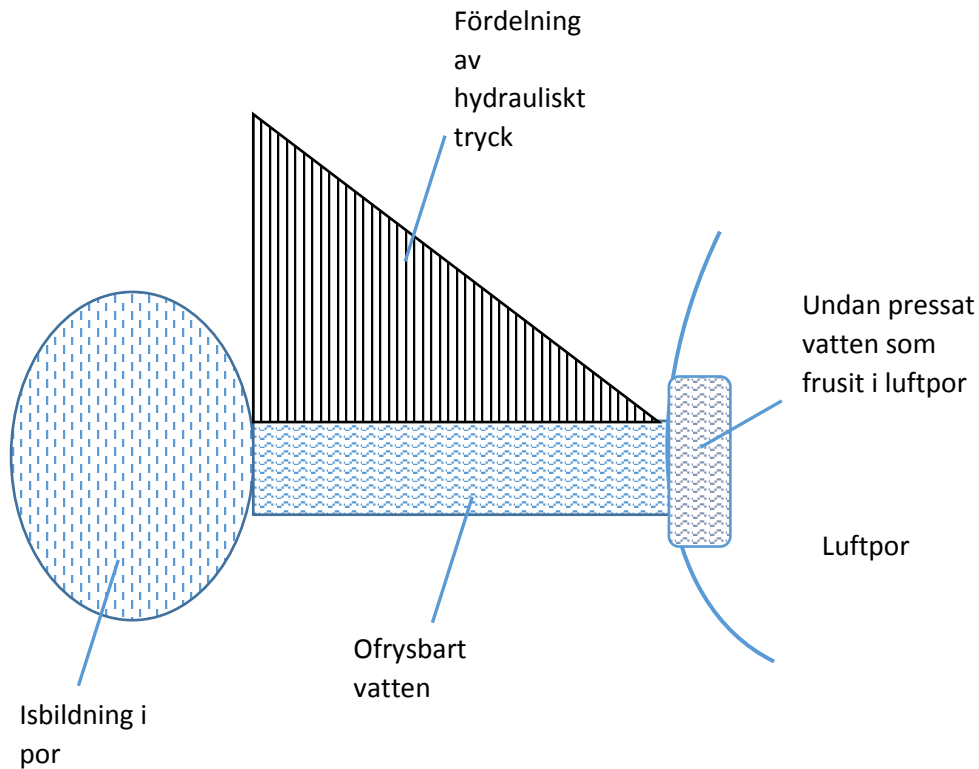
I grund och botten finns det två olika sorters frostsador på betong.

- Frysning som sker med rent vatten som trängs in betongen, även kallat frostangrepp. I det här fallet är oftast ytan på betongen intakt medans de inre delarna i betongen tar skada utav angreppet. Oftast undviks dessa angrepp genom att höja lufthalten i betongen eller av att göra betongen vattentät.
- Frysning sker i närheten av salthaltigt vatten eller annat förorenat vatten, även kallat saltfrostangrepp. De här angreppen sker vanligtvis på ytan av betongen. För att undvika denna typ av skador görs betongen med lågt vattencementtal och tillsatt luft [26]

I det här arbetet kommer endast frostangrepp att behandlas.

3.3.2 Hydrauliskt tryck

Som tidigare nämnts så expanderar vattens volym med 9% då det övergår från flytande till fast form. Om vattnet då inte har något utrymme kommer det uppstå stora spänningar inuti betongen och betongen kommer att gå sönder. Dock så kan vatten som fryser transporteras bort till en luftpor via antingen gel- eller kapillärporer då det alltid kommer att finnas ofrusna porer, se tabell 4. Nätet utav gel- och/eller kapillärporer är trångt och delvis fyllt av is. Detta gör att stora tryck uppstår, så kallat hydrauliskt tryck, se Figur 6 [26].



Figur 6 - Uppbyggnad av hydrauliskt tryck

Det hydrauliska trycket kan beskrivas med följande uttryck:

$$p_h = \frac{dW_f}{dt} \cdot \frac{1}{K} \cdot f(\bar{a}) \quad (2)$$

Där

p_h	=	hydrauliskt tryck, Pa
$\frac{dW_f}{dt}$	=	isbildningshastighet $\text{m}^3/(\text{m}^3\text{s})$
W_f	=	frysbart vatten kg/m^3
K	=	permeabilitet, $\text{m}^3/(\text{Pa s})$
\bar{a}	=	medelavståndet från platsen för isbildning till närmaste luftfyllda utrymme, m
$f(\bar{a})$	=	en funktion som beror på det luftfyllda porsystemets geometri. $f(\bar{a})$ ökar alltid med ökande \bar{a} , m^2 [26]

Betong, har ett komplicerat porsystem som gör det svårt att beräkna avståndet som vattnet måste transporteras från vattenfylld por till luftfylld por vid frysning . För att underlätta detta så används en metod som går ut på räkna ut det genomsnittliga poravståndet och i förlängningen kritiska vattenhalten i betongen. Om den kritiska vattenhalten överskrider så kommer frostskyddet i betongen inte att räcka till [27].

Om volymandelen luft samt luftporernas storlek i betongen är kända, då går det räkna ut avståndet, L, mellan porerna [27].

$$L = r \left(1,4 \left(\frac{1}{a} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \quad (3)$$

Där

a	volymandelen luftfyllda porer i materialet, m ³ /m ³
L	genomsnittligt poravstånd, m
r	medelradien hos porerna, m

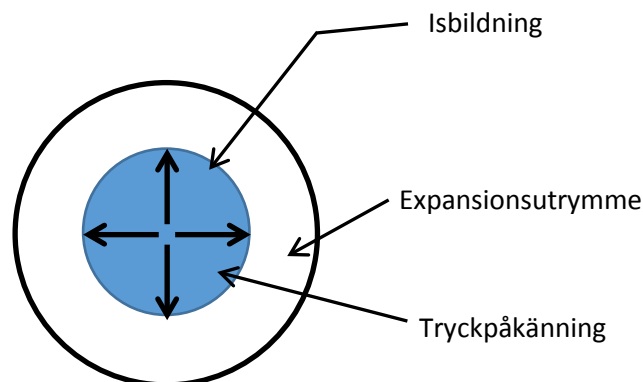
Man kan även använda begreppet kritiskt poravstånd, L_{kr}. För frysning av betong i sötvatten ligger det kritiska poravståndet mellan 0,37-0,45 mm. [25]

Hydrauliskt tryck kan endast uppkomma om S_f > 0,917. Om S_f < 0.917 klarar vattnet att expandera då tryck uppstår. [25]

3.3.3 Sluten behållare

Begreppet 'sluten behållare' bygger på ett specialfall inom mekanismen vid hydrauliskt tryck. Begreppet bygger på att permeabiliteten och töjningen är lika med noll. [25]

När vatten fryser och övergår till fast fas sker en volymökning med 9% utav vattnet, i begreppet sluten behållare har vattnet ingenstans att transporteras (se Figur 7). Detta tvingar vattnet att expanderas på plats, vilket då ger starka dragspänningar inuti betongen om den frysta vattenvolymen är större än luftporsvolymen, såpass starka spänningar att betongen slutligen sprängs. [26]



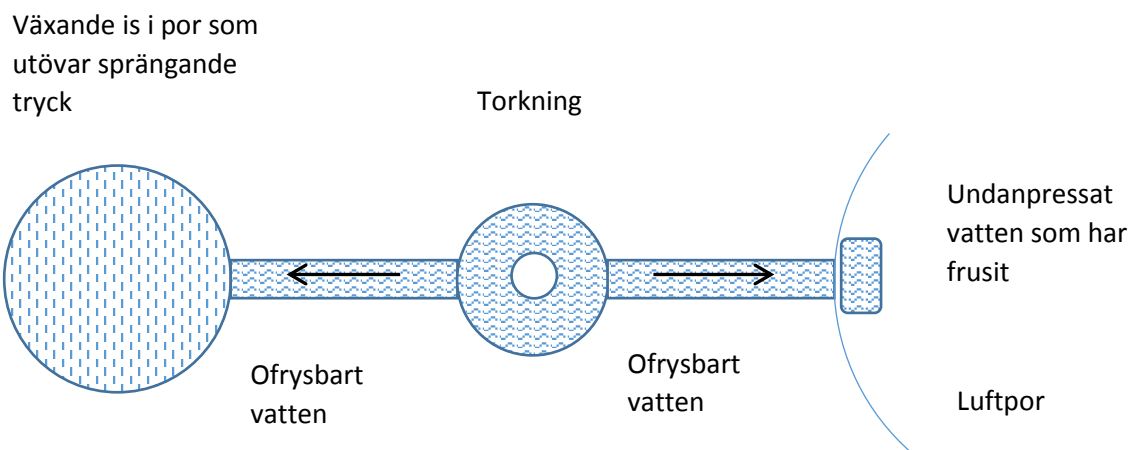
Figur 7 - Frysning inuti en sluten behållare

För att undvika det här problemet så är den allra minsta tillåtna luft halten 9% av det frysbara vattnets volym. Detta är den maximala kritiska vattenmättnadsgraden, S_{f,kr}. Vattenmättnadsgraden kan även förklaras som förhållandet mellan det frysbara vattnets volym och den totala porvolymen i betongen [27].

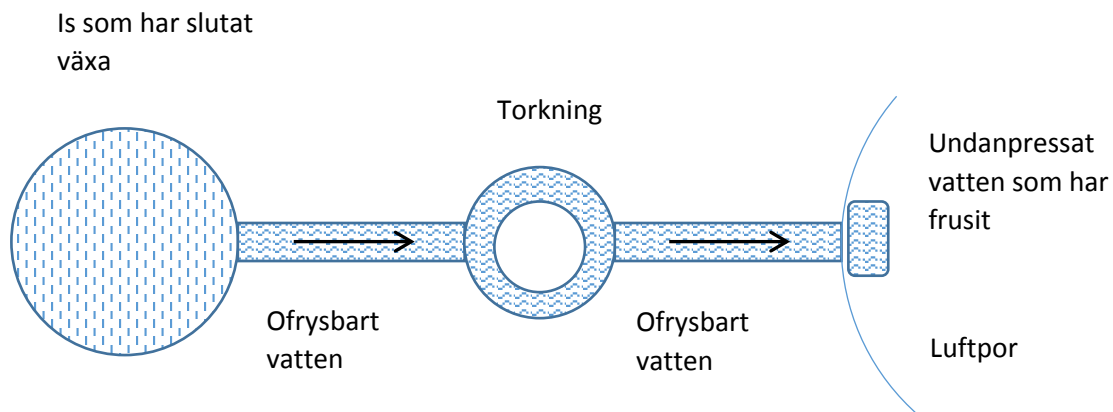
3.3.4 Mikroskopiska islinser

I ett material med en stor mängd ofrysbar vatten, alltså ett finporöst material, så kommer iskroppar att befinna sig i de större porerna samtidigt som det finns ofrysbar vatten i de finare porerna, även vid lägre temperaturer. Vid lägre temperaturer har ofrysbar vatten ett högre energiinnehåll jämfört med is vid samma temperatur. Detta resulterar i att vattnet kommer vandra från de finare porerna, ut till de större porerna där iskropparna finns och frysas till is. Vattnet kommer transporteras både till helt isfyllda porer och delvis luftfyllda porer där vattnet frusit till is. I luftporen kan vattnet frysa utan att betongen utsätts för spänningar.

Till en början så kommer vattnet att gå åt båda hållen (se Figur 8) vilket resulterar i att materialet till en början expanderar då den fyllda poren får en ökad tillväxt. I och med detta ökar trycket i den



Figur 8 - Vatten som går mot den isfyllda poren och mot islinsen i luftporen



Figur 9 - Vatten går enbart mot islinsen i luftporen

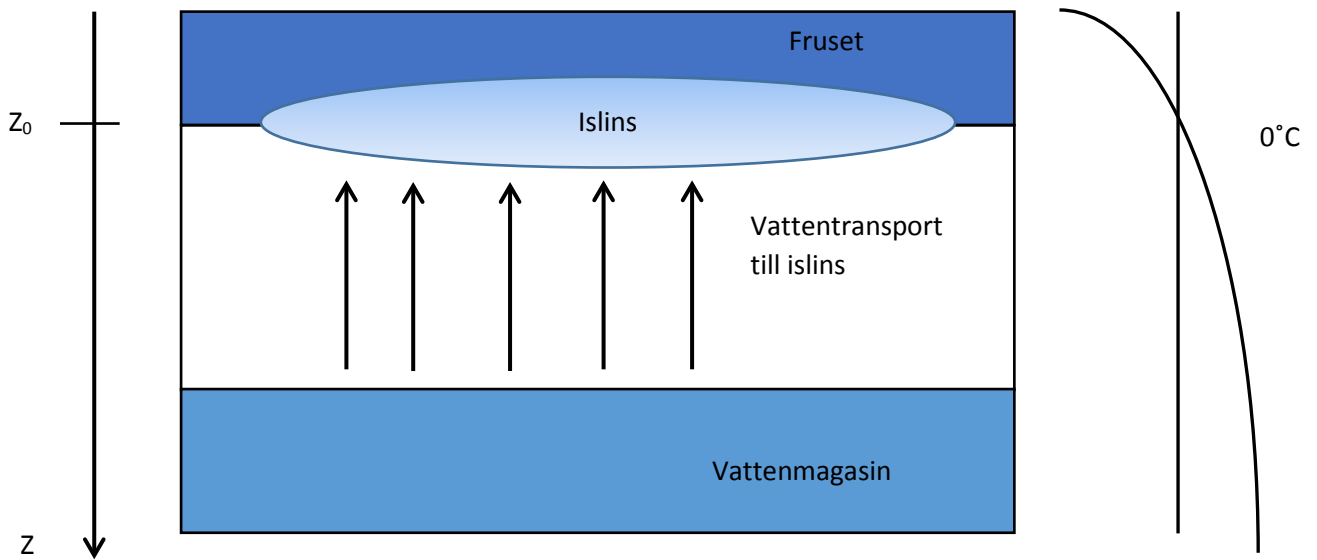
isbildade poren så ökar energiinnehållet där och vattnet kommer istället röra sig mot luftporen (se Figur 9). Sedan kommer isen delvis att smälta på grund av det höga trycket och trycket kommer jämnas ut. Ju längre avstånd det är emellan porerna, desto större tryck kommer bildas i den is fyllda poren innan processen vänder. [27]

3.3.5 Makroskopiska islinser

Makroskopiska islinser uppkommer på samma sätt som tjäle i mark. Mekanismen uppkommer endast i fuktigt miljö och då materialet ifråga är mycket poröst. [27] För att makroskopisk isbildning skall

uppstå måste vattnets frystemperatur uppstå på djupet z_0 (se Figur 10) Temperaturen på djupet z_0 måste hållas konstant under en längre tid så att en islins hinner uppstå. Om materialet inte vore poröst skulle islinsen ej kunna förses med vatten och islinsen skulle inte växa och därmed inte orsaka skada på materialet. [25]

Det som gör att hela processen startar är energiskillnaden mellan isen och vattnet. Eftersom vattnet inte är fruset innehåller det mer energi än isen och vattnet transporteras därför mot isen och islinsen växer och orsakar skada på materialet. [27]



Figur 10 - Bildande av makroskopisk islins

4 Material och metoder

4.1 Provkroppar

4.1.1 Betongsammansättning

Tabell 5 - Betongrecept

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

Betongen som studerades skulle representera betongen i BMA. Cementet som användes till gjutningen var av typen anläggningscement. Blandat med vatten så blev vattencementtallet 0,63. Då materialet som blev över skulle användas till andra studier vars provningar krävde små provkroppar användes ingen ballast över åtta millimeter, så att ballasten inte skulle bli överrepresenterad i tvärsnittet av dessa provkroppar. Följaktligen fick cementmängden och kvarvarande mängd ballast ökas proportionerligt.

4.1.2 Gjutningsförfarande

För att få reda på fuktkvoten i ballasten så användes en så kallad fukthaltsvåg. Då fuktkvoten var uppmätt så blandades de torra ingredienserna (cement och ballast) i en cementblandare till en homogen massa. Sedan tillfördes vatten och blandades till en bra konsistens. Betongen hälldes i en form för att härdas i 28 dagar.

4.1.3 Tillverkning av provkroppar

För att få till provkroppar borrades det ut cylindrar med hjälp av en kärnborr på 50 mm. Cylindrarna var då 155 mm höga. Ytterkanterna på cylindrarna sågades till med hjälp av en diamantsåg, därefter sågades provkroppar ut i önskad längd, det vill säga 50 mm.

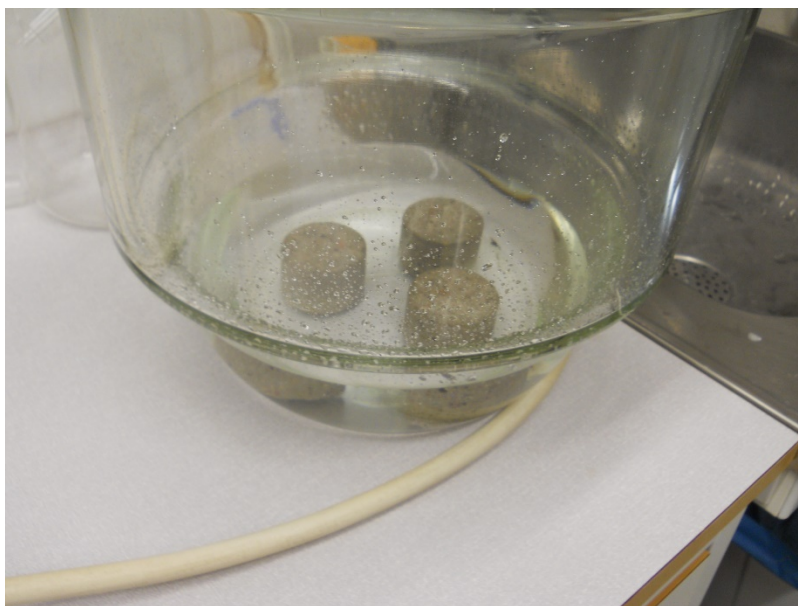
4.2 Metoder

4.2.1 Vattenmätning av provkroppar

SFR som ligger under vattennivå använder sig idag av vattenpumpar för att på så sätt hålla vatten utanför anläggningen. När anläggningen är full kommer anläggningen stängas igen och pumparna att stängas av [4]. I sinom tid kommer då anläggningen att fyllas med vatten och efter cirka 2000 år så kommer all betong i anläggningen vara helt vattenmättad, inklusive silon [5]. För att efterlikna dessa förhållanden så beslutades det att provkropparna skulle vattenmättas innan frysning.

För att vattenmätta provkropparna så placerades dessa först i en vakuumblocka där en kompressor sög ur all luft ur klockan för att på så sätt bilda ett vakuum. Utsugningen av luft pågick tills tryckmätaren till klockan visade mellan 1-5 mbar. Sedan kopplades på en slang emellan vakuumblockan och en behållare med avjoniserat vatten för att täcka provkropparna. För att inte påverka mikrostrukturen i betongen torkades inte provkropparna innan de vakuummättades.

Vakuomet gör att när provkropparna täcks med vatten så fylls porsystemet nästa helt då inga luftfickor finns kvar i porsystemet. Provkropparna låg i vattenbadet i minst 24 timmar innan provningen påbörjades (se Figur 11).



Figur 11 - Vattenmätning av provkroppar

4.2.2 Urlakning med hjälp av elektrisk migration

För att accelerera urlakning av betong har detta exjobb försökt återskapa försöksupställningen i "Durability of Cementitious Materials in Long-Term Contact With Water" [28]. Experimentet har gått ut på att med hjälp av elektrisk migration få joner att gå åt olika håll och på så sätt få kalcium ut ur betongen (se Figur 12). Provkroppen i betong har omslutits med hjälp av ett silikonrör för att skilja lösningen i anoden och lösningen i katoden från varandra. I anoden har det använts en lösning med litiumhydroxid (LiOH) med en koncentration på 3 mol/liter och vid katoden, ammoniumnitrat (NH_4NO_3) med koncentration på 0,3 mol/liter.

Då ammoniumnitrat hamnar i kontakt med vatten delar det upp sig i ammoniumjoner (NH_4^+) och nitratjoner (NO_3^-). Ammoniumjonerna delar sedan upp sig i vätejoner (H^+) och ammoniak (NH_3).

Katoden, som är negativt laddad attraherar de positiva jonerna i betongen så som natrium och kaliumjoner. I och med att nitratjonerna har en negativ laddning så repellerar de från katoden och vill gå till anoden via provkroppen. Då nitratjonerna väl är inuti provkroppen så reagerar de med kalciumjoner (Ca^{2+}) i betongen. På så sätt urlakas betongen på kalcium (se Figur 12). [29]

I anoden (se Figur 14) används en stark koncentration av litiumhydroxid på 2 mol/liter.

Litiumhydroxiden löser sig i vatten och bildar joner (Li^+ och OH^-). Anoden som är positivt laddad drar ur de negativa jonerna i betongen, så som sulfat (SO_4^{2-}) och som sedan reagerar med vatten och bildar svavelsyra (H_2SO_4). Eftersom svavelsyran är en stark syra finns det risk att provkroppen blir utsatt för en syraattack. Dock är koncentrationerna så pass låga och litiumhydroxid fylldes på varje dag, och släpper ifrån sig hydroxidjoner och gör lösningen starkt basisk ($\text{pH} > 13$) och motverkar syraattacker mot provkroppen.

Vid starten av provningarna så visade det sig att asfalttejen som originalförsöken hade använt sig av som provhållare och LiOH-behållare hade ett stort problem med läckage. Flera försök med att minska läckaget genomfördes, bland annat att linda flera varv kring provkroppen men problemet med läckage kvarstod.

I ett försök att minimera läckaget så testades det att använda silikonrör med en innerdiameter på 51 millimeter. Detta visade sig eliminera läckaget så för denna studie användes silikonrör istället för asfalttejp som originaluppsättningen använde sig av.

För kunna få ut den strömstyrka som krävdes av spänningsaggregaten så seriekopplades de vilket då gav en spänning på 120 volt och 3 ampere. I originalförsöken så hade aggregaten funktionen att hålla konstant strömstyrka och automatisk korrigerande av spänningen. Denna funktion existerar inte på de aggregat som har använts i den här studien, utan strömstyrkan har fått regleras manuellt. Detta leder till större osäkerhet i urlakningsförsöken. En multimeter kopplades in för att ha kontroll över hur stor strömstyrka aggregaten skickade ut över provkroppen.

I och med den ökade osäkerheten i strömmen så gjordes det istället mätningar utav pH med jämna mellanrum i anoden och katoden för att se till att det inte blivit något syraangrepp på provkropparna.

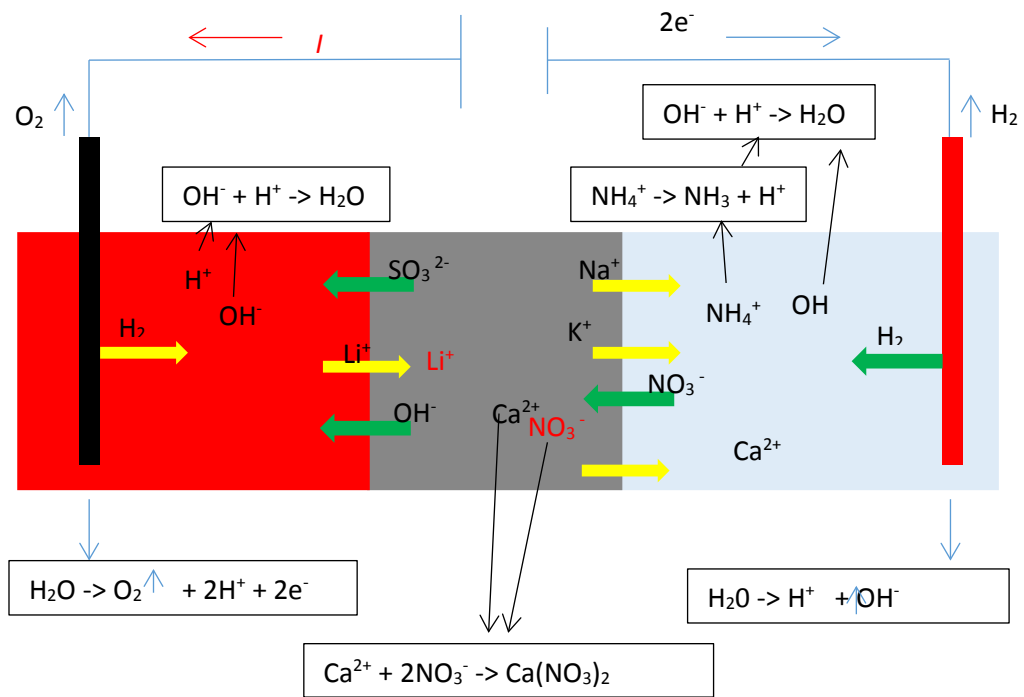
Innan experimentet genomfördes så vattenmättades provkropparna. Detta ansågs göra det lättare för jonerna att tränga sig in i provkroppen och på så sätt få igång urlakningsprocessen samt att den efterföljande frysningsen skulle göras på vattenmättade provkroppar.

För att starta experimentet så fylldes det på med avjoniserat vatten i anod och katod. I katoden fylldes det på med salt i form av ammoniumnitrat tills det kom upp i en koncentration av 0,3 mol/liter (24 gram salt per liter) och i anoden fylldes det på med litiumhydroxid till en koncentration på 2 mol/liter (48 gram salt per liter).

När experimentet sattes igång så började jonerna i lösningarna att förbrukas. För att det alltid skulle finnas god tillgång på joner så fylldes det på dagligen med ammoniumnitrat och litiumhydroxid dagligen med mängden $22 \times I$ respektive $71 \times I$, där I är strömstyrkan då det är mängden joner som förbrukas enligt originaluppsättningen. När allting såg ut att fungera beslutades det att urlaka totalt tre stycken provkroppar samtidigt. Alla tre provkropparna urlakades i samma katodlösning.

Då det endast fanns tillgång till en multimeter så bestämdes det att mätning utav strömstyrka gjordes över en provkropp då provkropparna var parallellkopplade till spänningsaggregaten. Om multimetern istället hade varit kopplad över alla tre provkropparna hade det inte gått att säga hur mycket ström som var över en enda provkropp. I och med att det endast fanns en multimeter antogs alla provkroppar ha samma strömstyrka över sig och salter fylldes på därefter. Detta adderar på osäkerheten i urlakningshastighet mellan olika provkroppar.

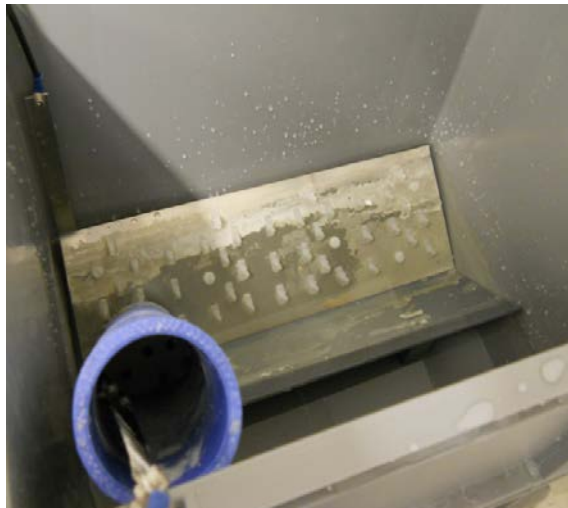
Under försöken så dunstade vattnet i katoden och täckte inte längre ytan på provkroppen. Åtgärden mot detta var att fylla på med avjoniserat vatten.



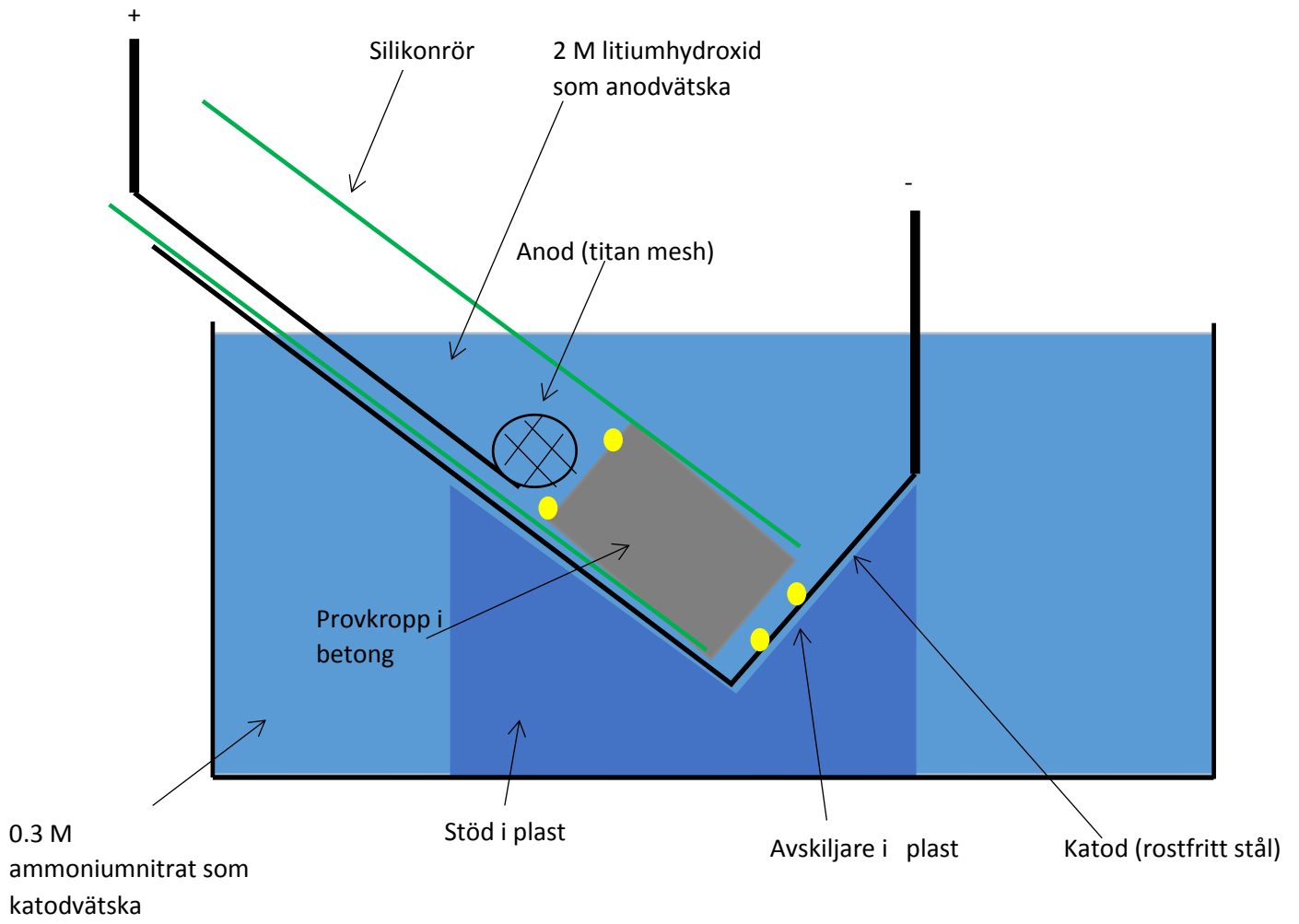
Figur 12 - De kemiska reaktionerna för urlakningen



Figur 13 - Titanmesh



Figur 14 - Anoden i silikonröret, katoden i baljan



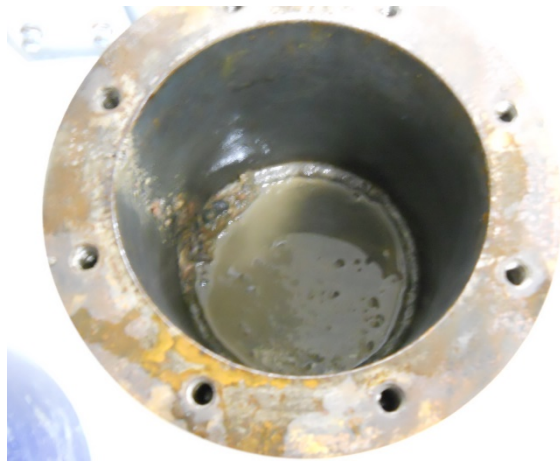
Figur 13 - Modell över uppställningen för urlakning med hjälp av elektrisk migration

4.2.3 Frysning

För att efterlikna frysningen av betongen i förvaret så har metoden som togs fram i "Frysning av betong under inverkan av tvång" av L. Pålbrink och O. Rydman upprepats [30].

Till frysförsöken användes två stycken cylindrar av stål. Cylindrarna har en innerdiameter på 147 mm, godstjocklek på 28 mm (se Figur 16). I varje cylinder finns det en fastsvetsad botten med godstjockleken 30 mm. Varje cylinder har även ett lock med en godstjocklek på 30 mm. Locket låses fast med hjälp av åtta stycken bultar i stål. I locket finns det flera stycken jämt utspridda hål på 5 mm styck. Detta för att kunna leda ur vatten som expanderar under frysning samt för att kunna använda termoelement under frysningen.

När SFR är fullt så kommer tunnlarna att fylls med grus för att ge extra stöd åt konstruktionen (se Figur 4). För att efterlikna dessa förhållanden så fylldes botten i behållaren med några centimeter grus innan provkroppen placeras i stålbehållaren (se Figur 17). Därefter fylldes resten av cylindern med grus och sedan med vatten innan locket skruvades på (se Figur 18). För att se till att utrymmet i behållaren var helt vattenfyllt användes en kanyl för att spruta in vatten genom ett av de små hål som var till för att vattnet skulle kunna expandera under frysning, ända tills det visuellt kom upp vatten från de omringande hålen. Efter detta sattes det in ett termoelement i ett av de små hålen i locket för att registrera temperaturen under frysningen.



Figur 14 - Tom behållare



Figur 17 - Behållare med några centimeter grus och provkropp



Figur 18 - Behållare fylld med grus, vatten och provkropp

När stålbehållaren var stängd och påfylld med vatten placerades den i en klimatkammare där temperaturen gick att reglera (se Figur 19). Temperaturen går då från 20°C till 2°C på 30 minuter. Sedan går temperaturen ner från 2°C till -10°C under 150 timmar. När temperaturen väl var nere på -10°C så var den det i två timmar. Provkroppen togs sedan ut ur behållaren när isen hade smält.



Figur 15 - Behållare i klimatkammare



Figur 20 – Urlakad och fryst provkropp

I Figur 20 ovan så går det att se hur provkroppen har börjat flagna en del. Dock så är provkroppen till större del intakt även efter både urlakning och frysning.

Temperaturkurvorna finns under kapitel 5 – Resultat samt bilaga D.

4.2.4 Temperaturskåp och temperaturloggning

Vid mätning av temperaturen användes en eller två stycken temperaturloggrar, beroende på hur många provkroppar som frös samtidigt. Varje logger hade två stycken kanaler och varje kanal kunde mäta en temperatur. För varje logger valdes då att en kanal skulle vara inuti klimatkammaren och den andra i stålbehållaren. Termoelementet fördes helt enkelt ner genom ett av de 5 mm hål i locket. Temperaturen registrerades var femte minut och sparades i temperaturloggern.

Då isbildning sker så kommer det att avges energi ifrån vattnet. Detta innebär att isbildning kommer registreras som värmeutveckling i temperaturdata, vilket ger information om hur länge isbildningen höll på under försökets gång.

Klimatkammaren som har använts för att reglera temperaturen kan variera temperaturen mellan -40°C och +70°C. Klimatkammaren kan även programmeras till att hålla konstant temperatur eller konstant temperaturförändring under en viss tid. Dessa egenskaper går även att sätta in i cykler.

4.3 Materialundersökningar

För att undersöka hur mycket provkropparna skadades under försöken så användes okulär besiktning, gångtid med ultraljud, förändring i porositet samt SEM.

4.3.1 Gångtid med ultraljud

För att se hur mycket mikrostrukturen påverkades av urlakningen och frysningen valdes det att undersöka detta med hjälp utav ett så kallat ultraljud. Ultraljudet fungerar på så sätt att det finns en sändare och en mottagare. Sändaren skickar ut ett ultraljud till mottagaren som mäter hur lång tid det tar för signalen att nå mottagaren.

Det finns en kalibreringskloss där det skall ta 26,2 μ s mellan sändare och mottagare (se Figur 21). Efter att sändningstiden har justerats mäts hur lång tid det tar från den ena sidan till den andra i ett visst material, vilket i de här fallet är betong. Kalibrering sker mellan samtliga mätningar.

I ett solitt material går signalen direkt från sändare till mottagare. Signalen färdas inte genom luft så om det skulle vara porer/sprickor i materialet tvingas signalen att föras runt porerna och sträckan blir längre för signalen. Eftersom hastigheten på signalen är konstant så innebär längre sträcka är lika med längre tid. Desto mer och desto större porer/sprickor desto längre sträcka blir det då för signalen att färdas.

Därför ger ultraljud ett bra riktvärde på om sprickbildningen/porstorleken i betongen påverkas av försöken att urlaka dem och frysa dem, det vill säga, om tiden med ultraljuden ökar så har antingen porerna i betongen blivit större eller så har fler sprickor bildats i provkropparna.

Betong är ett kompositmaterial där, framför allt i Sverige och andraländer med kallt klimat, använder luftporbildande medel i cementpastan för att ge större frostbeständighet i betongen vilket gör att ultraljudet redan där får en längre sträcka för att färdas.

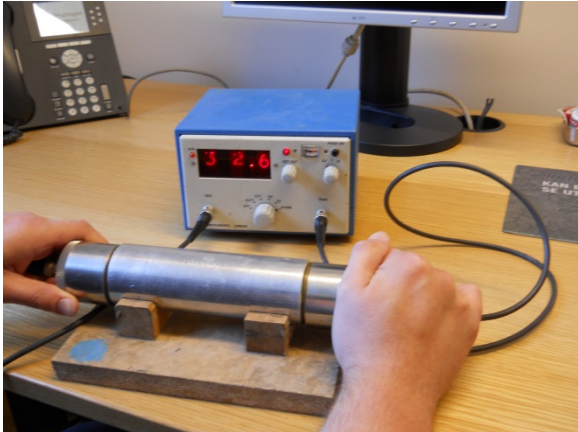
För att maximera mängden vatten i provkropparna så vattenmättades de i vakuum, på så sätt fylls alla luftporer och kapillärsprickor med vatten innan mätning med hjälp av ultraljud sker. Detta hjälper även för att ge så pass bra kontaktyta som möjligt emellan provkropp, sändare och mottagare.

Eftersom ultraljudet är så pass känsligt vid mätning och kalibrering så mättes gångtiden för varje provkropp tre gånger för att få fram ett medelvärde på hur lång tid det tog för signalen att färdas genom provkroppen (se Figur 22).

Mätning skedde efter urlakning och innan frysning, samt efter frysning av provkropparna. På så sätt fås ett resultat av vad urlakningen har för effekt på provkroppen samt vad för effekt frysningen har på den urlakade provkroppen.

Då urlakning påbörjades innan någon mätning med ultraljud hade gjorts så gjorde det flera mätningar på flera provkroppar som inte hade blivit påverkade på något annat sätt än att de vattenmättades innan mätning för att på så sätt kunna få fram ett startvärde på provkropparna. Medelvärdet av dessa mätningar blev då startvärdet.

Värdena av mätningarna finns under kapitel 5 – Resultat.



Figur 21 – Kalibrering av signalhastighet



Figur 22 – Mätning av gångtid

4.3.2 Scanning Electron Microscope - SEM

Efter att ha både urlakat och fryst provkroppar bestämdes det att se hur strukturen ändrats på mikroskopisk nivå med hjälp av ett scanning electron microscope (SEM).

För att kunna ta dessa foton med hjälp av en SEM, så höggs det ut bitar från en provkropp med orörd betong samt en med urlakad och fryst betong med hjälp av en hammare. Här noterades det att det gick mycket enklare att hugga ut bitar ur den urlakade betongen jämfört med den orörda betongen eftersom det inte behövdes lika mycket kraft med hammaren för att hugga loss bitarna samt att bitarna från den urlakade betongen blev mycket större jämfört med den orörda betongen. Bitarna limmades sedan fast på en metallyta med superlim (se Figur 23). De fastlimmade provkropparna sputtrades sedan med en tunn beläggning utav guld, vilket gör att ytan blir elektriskt ledande vilket är nödvändigt för att SEM-tekniken skall fungera. Metallskivan fördes sedan in i mikroskopet och flera bilder togs på bitarna från provkropparna i olika skalor.

Bilderna finns under kapitel 5 –Resultat och bilaga C.



Figur 23 – Uthuggna bitar fastlimmade på en metallplatta. De större bitarna är från en urlakad provkropp

4.3.3 Porositet

Då ingen mätning gjordes innan urlakningsförsöken påbörjades så beslutades det att använda sig av ett medelvärde av ej frysta eller urlakade provkroppar som referensvärde. Provkropparna torkades först i 50 °C i tre dygn innan de vägdes. Sedan vägdes provkropparna i vatten. Provkropparna vattenmättades sedan innan de vägdes igen, både i luft och i vatten. Till slut torkades provkropparna i 105°C tills vatten hade slutat dunsta från provkropparna innan de igen vägdes i luft och i vatten. Provkropparna mättes sedan med hjälp av ett skjutmått för att räkna ut volymen på provkropparna. Porositeten räknades sedan enligt följande ekvationer. [31]

$$m_{sw} = m_s - V \cdot \rho_w \quad (4)$$

$$P = \frac{m_s - m_0}{m_s - m_{sw}} \quad (5)$$

Där

P är porositeten (-)

m_0 är torkad (105°C) vikt (kg)

m_s är vattenmättad vikt (kg)

m_{sw} är vattenmättad vikt i vatten (kg)

resultaten av beräkningarna finns under kapitel 5 – Resultat.

5 Resultat och diskussion

Här visas resultaten av experimenten.

5.1 Gångtid med ultraljud

Först togs en referenstid fram enligt kap 4.3.1. Referenstiden togs fram på provkroppar som var vattenmättade men ej urlakade eller frysta. Resultatet finns redovisat i tabell 6 nedan.

Tabell 6 - Framtagning av referensgångtid

	Standard (μs)
	12,0
	12,8
	12,1
	12,1
	11,4
Starttid:	12,1

Mätning av gångtid med ultraljud gjordes på de åldrade provkropparna efter urlakning, före frysning och efter frysning. Därefter togs en differens fram på provkroppen för före och efter frysning samt en differens från efter frysning och referenstiden. Resultaten finns i tabell 7 nedan.

Tabell 7 - Resultat av gångtid med ultraljud före och efter urlakning och frysning

Provkropp (dagar urlakade)	Efter urlakning, före frysning (μs)	Differens från starttid innan frysning (μs)	Efter urlakning och frysning (μs)	Differens på grund av frysning (μs)	Differens från urlakade och frysta provkroppar från starttid (μs)
10	13,8	1,7	16,3	2,5	4,2
20	15,6	3,5	16,4	0,8	4,3
25	19,6 ¹	7,5	17,3	-2,3	5,2
30	18,6	6,5	19,2	0,6	7,1

Resultaten hade givetvis varit mer säkra om varje enskild provkropp hade haft en egen referenstid, men då spridningen var liten (se tabell 6) så anses resultaten ändå vara tillräckligt säkra.

Enligt tabell 7 så ligger differensen mellan referenstiden och mätningen efter urlakning mellan 1,7 och 6,5 μs . Detta borde bero på att kalcium faktiskt har urlakats vilket ger en högre porositet i provkropparna vilket ger en längre sträcka för ultraljudet att färdas. Differensen på grund av frysning ligger i gångtid emellan 0,6 μs och 2,5 μs , vilket borde bero på att viss sprickbildning har uppstått på grund av frysning. Differensen ger en genomsnittlig ökning av gångtiden med cirka 9 % vilket kan jämföras med examensarbetet av L. Pålbrink och O. Rydman [30] där den genomsnittliga ökningen låg på 3 % på prover torkade i 20 °C, 66 % för prover torkade i 50 °C och 92 % för prover torkade i 105 °C. Proverna i denna studie har inte torkats alls och trots det så erhålls en ökning av gångtiden som är

¹ Troligtvis mätfel

störreän vad som erhöles i [30] för betonger med högre vct, normal ballastgradering och cementmängd torkade i 20°C. Detta antas bero på urlakningen.

5.2 Porositet

Resultaten för mätning och beräkning av porositet enligt kapitel 4.3.3 i tabell 8 nedan.

Tabell 8 - Mätning och beräkning av porositet för orörd betong

Provkropp markering	m _{sw} (kg)	m _s (kg)	m ₀ (kg)	Volym (m ³)	P (-)
Kryss	0,1344	0,2404	2,15E-01	0,00010639	0,238
Triangel	0,1339	0,2397	2,15E-01	0,00010681	0,236
Cirkel	0,1341	0,2399	2,15E-01	0,00010785	0,237
Fyrkant	0,1353	0,2442	2,17E-01	0,00010702	0,252
				Medelvärde:	0,2407

Tabell 9-Mätning och beräkning för urlakade och frysta provkroppar

Provkropp urlakningstid	m _{sw} (kg)	m _s (kg)	m ₀ (kg)	Volym (m ³)	P (-)
14	0,1236	0,2294	1,99E-01	0,00010743	0,288
20	0,1200	0,2266	1,94E-01	0,00010910	0,307
25	0,1212	0,2274	1,96E-01	0,00010702	0,297
				Medelvärde:	0,297

En medelporositet beräknades av de ej urlakade eller frysta provkropparna. Medelporositeten jämfördes med porositeten hos de urlakade och frysta provkropparna för att få fram en procentuell skillnad i porositet. Resultat i tabell 10 nedan.

Tabell 10 - Medelporositet av de orörda provkropparna samt ökning jämfört med medelporositeten för de urlakade och frysta provkropparna

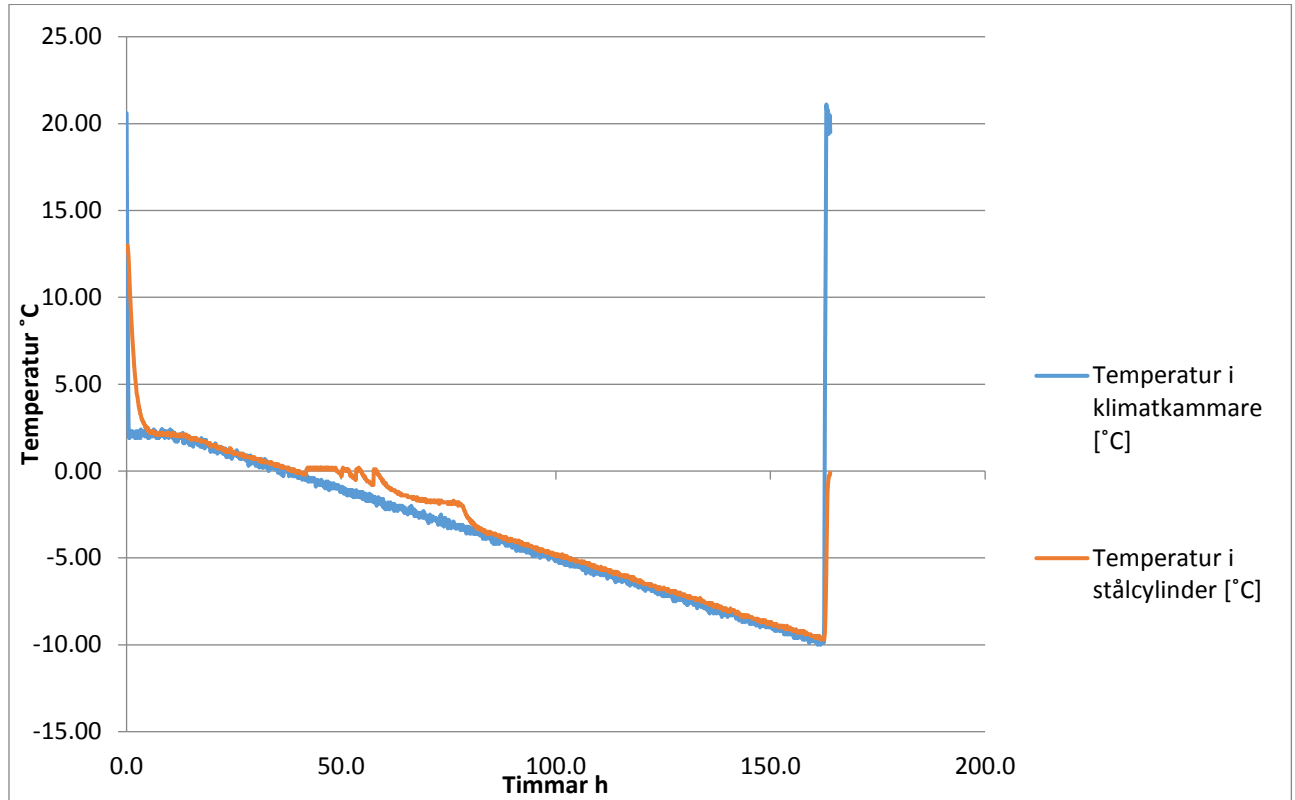
Medelporositet orörd betong	Provkropp	Porositet	Ökning av porositet
0,2407	14	0,288	19,8%
	20	0,307	27,4%
	25	0,297	23,2%
	Medelvärde:	0,297	23,5%

Så som går att se i tabell 8 så har porositeten för fyra stycken provkroppar som ej blivit urlakade eller frysta räknats ut som en referensporositet och porositeten räknades ut till ungefär 24%. Efter urlakning och frysning låg porositeten runt 30%. Detta kan förklaras genom att urlakningen har fått kalcium att lämna provkroppen och lämnat efter sig ett hålrum vilket ger en ökad porositet. Frysning under tvång har troligen också orsakat ytterligare sprickor. Med tanke på resultaten i gångtiden med

ultraljud tyder det på att porositeten har ökat både på grund av urlakning och på grund av frysning under tvång och att det kombinerade angreppet ger störst skada.

5.3 Frystemperatur

I figur 24 visas temperaturen i behållaren samt klimatskåpet



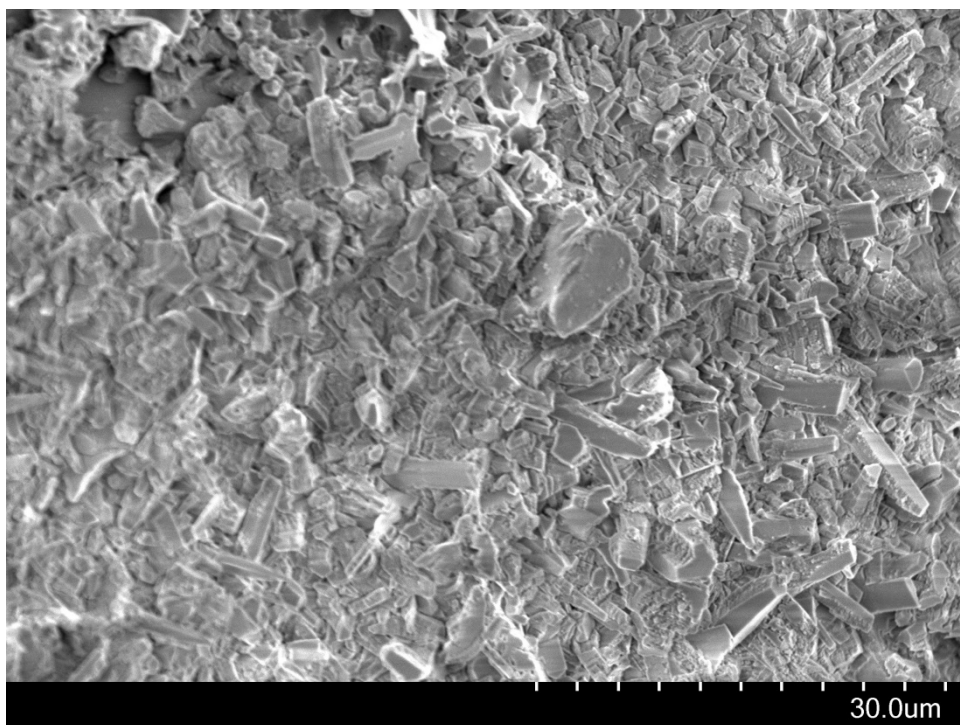
Figur 24 – Frysdata för en provkropp som har urlakats i 14 dagar.

Fler diagram finns under bilaga D.

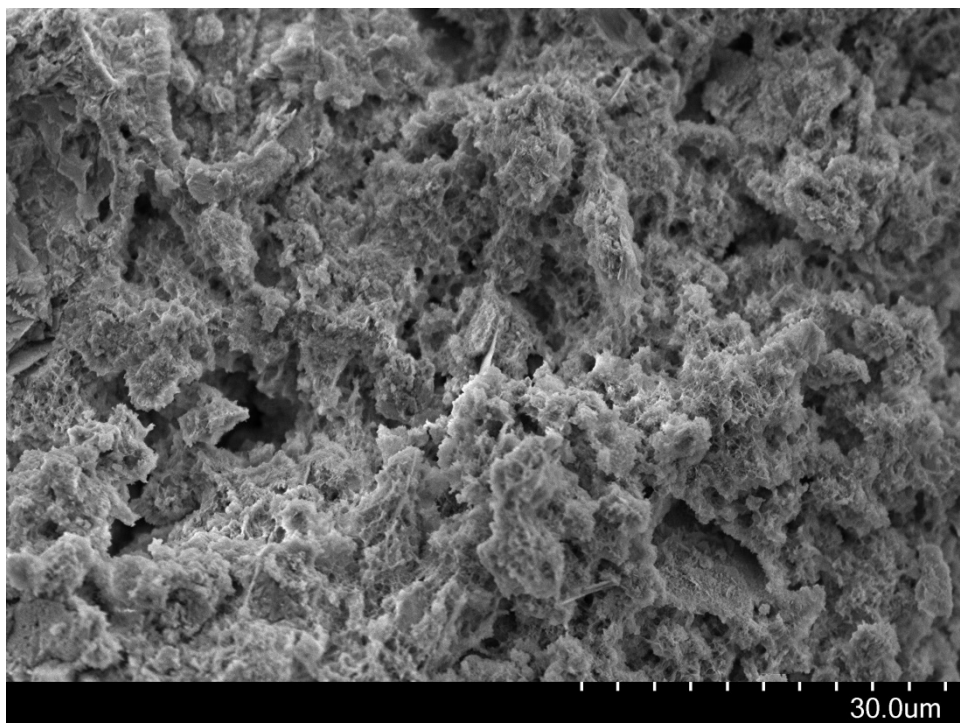
Så som går att se under diagrammet (och i övriga diagram i bilaga D) är att mellan 0°C och cirka -3°C så sker ett värmeutbyte, vilket är ett bevis för att isbildning sker inuti stålbehållaren. Detta påvisades även av rapporten från L. Pålbrink och O. Rydman [30] som också noterades det att isbildning sker vid högre temperaturer för prover under tvång jämfört med om inget tvång belastar provkroppen.

5.4 SEM

Resultaten för svepelektronmikroskop finns i Figur 25 & 26 nedan. Ytterligare bilder finns under bilaga C.



Figur 25 –Ej åldrad betong, skala i nedre högra hörnet



Figur 26 – Urlakad och fryst betong, skala nere i högra hörnet

Så som nämndes under kapitel 4.3.2 så gick det oerhört mycket lättare att få ut provbitar ur den urlakade betongen jämfört med den orörda betongen. I Dr. Babaahmadi avhandling [28] så har tryckhållfastheten på de provkroppar som har urlakats minskat med 70 %. Strukturen i betongen höll dock ihop efter frysning så som Tang och Banger har förutspått [6].

Det som framgår av bild 25, som är en orörd betong, är att strukturen till stor del består av kalciumkristaller utan olika sorter, medans det finns inget spår av några kristaller på bild 26 som är en urlakad och fryst betong. Det vi ser på bild 28 kan lättast beskrivas som ett skelett bestående utav CSH-gel där kristallerna en gång har suttit. Detta leder till att betongen blir mer porös vilket gör att vatten lättare kan komma in i betongen. I och med att betongen har blivit mer porös, sannolikt genom ökade porradier så minskar även undertrycket i porerna vilket leder till att mer vatten kan frysa vid lägre temperaturer, vilket troligtvis orsakar större skada vid så höga temperaturer som gäller vid permafrost.

6 Slutsatser

- Accelererad urlakning med hjälp av elektrisk migration har genomförts på betong genom metoden framtagen av Dr. Babaahmadi [28]
- Porositeten ökade på grund av urlakning och frysning i denna studie i snitt med 23,5%.
- Gångtiden visade att urlakningen skapade störst förändring av materialet.
- Temperaturmätningarna visade att underkylningen vid frysning var obetydlig.
- Provkropparna behåller sin form trots urlakning och frysning, men de inre skadorna verkar bli större än då enbart frysning testades i en tidigare studie.

7 Fortsatta studier

De spänningsaggregat som använts i studien har inte haft funktionen som beskrivs i "Durability of Cementitious Materials in Long-Term Contact With Water", alltså att hålla en konstant strömstyrka.

I fortsättning bör spänningsaggregat med funktionen konstant strömstyrka brukas för att noggrannare kunna förutspå graden av urlakning. Med hjälp av konstant strömstyrka bör det tydligare framgå hur långt urlakningen har gått och därmed lättare att jämföra resultat från olika prover.

Då provkropparna i den här studien har varit förhållandevis små (50 mm i höjd och 50 mm i diameter) har det begränsat möjligheterna att kontrollera egenskaperna och därmed betongens välmående under exjobbets gång, till exempel tryckhållfasthet och egenfrekvens. I fortsatta studier rekommenderas därför att även större provkroppar gjuts för att ge en bättre bild av betongens kvalitet.

När frystesterna drog igång så fanns det termoelement endast i stålbehållaren och inte inuti provkroppen av betong. Om det hade borrats i provet efter urlakningsförsöken så kunde termoelement placeras i provet och då hade det med större noggrannhet gått att säga när och att isbildning sker inuti betongen.

8 Referenser

- [1] SKB, "Faktablad - Det här är SKB," 2015.
- [2] SKB, "SFR - Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall," SKB Art: 202, 2015.
- [3] SKB, "SKB har uppdraget att ta hand om det svenska kärnavfallet," SKB Art: 400, 2015.
- [4] SKB, "Safety analysis SFR 1 Long-term safety," SKB R-08-130, 2008.
- [5] M. Emborg, J.-E. Jonasson och S. Knutsson, "Långtidsstabilitet till följd av frysning och tining av betong vid förvaring av låg och medelaktivt kärnavfall i SFR 1," SKB: Luleå Tekniska Universitet: R-07-60, 2007.
- [6] T. Luping och D. Bager, "A Study of Consequences of Freezing of Concrete Structures for Storage of Nuclear Waste due to Permafrost," SKB: Chalmers Tekniska Högskola: TR-12-13, 2013.
- [7] SKB, "Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle - Huvudrapport från projekt SR-Site Del2," 2011.
- [8] S. P.-E. Thorsell, "Studier av frysegenskaper hos betong från 1 BMA," SKB: Vattenfall: P-13-07, 2013.
- [9] L.-O. Höglund, "modelling of long term concrete degradation process in the swedish SFR repository," SKB: R_01-08, 2001.
- [10] P.-G. Burström, *Byggnadsmaterial Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper (2:a upplagan)*, ISBN 978-91-44-02738-8, 2007.
- [11] S.-E. Johansson, *Betonghandbok - Material, kap 2 - Cement*, Svensk Byggtjänst, 1994.
- [12] G. C. Group, Skribent, *Bascement - Teknisk beskrivning. [Performance]*. Cementa, 2013.
- [13] G. Fagerlund, *Kompendium i Byggnadsmaterial - vol 1, kap 1 - Kemiska Grundbegrepp*, Lunds Tekniska Högskola, 1999.
- [14] G. Fagerlund, *Kompendium i byggnadsmaterial - Vol 2, kap 19 - Cement och andra oorganiska bindemedel*, Lunds Tekniska Högskola, 2002.
- [15] G. Fagerlund, *Betonghandbok - material kap 3 - Ballast*, Svensk Byggtjänst, 1994.
- [16] G. Klingstedt, *Betonghandbok - Material, kap 4 - Vatten*, Svensk Byggtjänst, 1994.
- [17] S.-E. Johansson, *Betonghandbok - Material, kap 6 - Tillsatsmaterial*, Svensk Byggtjänst, 1994.
- [18] K. Byfors, *Betonghandbok - Material, kap 5 - Tillsatsmedel*, Svensk Byggtjänst, 1994.
- [19] S. Stunge, N. Nguyen, B. Alexander och L. Dutton, "Leaching of alkali from concrete in contact with waterways," 2009.

- [20] Nationalencyklopedin, "<http://www.ne.se/s%C3%B6k/?t=uppslagsverk&q=urlakning>," [Online]. [Använd 26 05 2016].
- [21] USGS, "<http://water.usgs.gov/edu/qa-solvent.html>," [Online]. [Använd 25 05 2016].
- [22] Visionlearning, "<http://www.visionlearning.com/en/library/Chemistry/1/Water/57>," [Online]. [Använd 25 05 2016].
- [23] T. Ekström, "Leaching of concrete : the leaching process and its effects," Lunds Tekniska Högskola: TVBM 1020, 2003.
- [24] N. Marinoni, A. Pavese, M. Voltolini och M. Merlini, "Long-term leaching test in concretes: An X-ray powder diffraction study," *Cement and Concrete Composites*, 30 (2008), 2008.
- [25] K. Fridh, "Internal frost damage in concrete - experimental studies of destruction mechanisms," Lunds tekniska högskola : TVBM - 1023, 2005.
- [26] G. Fagerlund, *Betonghandbok - Material*, kap 21 Frostbeständighet, Svensk Byggtjänst, 1994.
- [27] G. Fagerlund, *Kompendium i Byggnadsmaterial FK -vol 3 Kap 31, Frostbeständighet*, Lunds Tekniska Högskola, 2002.
- [28] A. BABAHMADI, "Durability of Cementitious Materials in Long-Term Contact with Water," Chalmers Tekniska Högskola, 2015.
- [29] A. Babaahmadi, "Development of a Method for Accelerated Ageing of Cementitious Materials Used in Repositories for Nuclear Waste," Chalmers Tekniska Högskola, 2013.
- [30] L. Pålbrink och O. Rydman, "Frysning av betong under," Lunds Tekniska Högskola: TVBM-50-91, 2013.
- [31] L. Wadsö, *Construction Material Science - kap 5 Morphology*, LTH, 2015.
- [32] G. Fagerlund, *Betonghandbok - material. kap 10 - Struktur och strukturutveckling*, Svensk Byggtjänst, 1994.
- [33] N. L. G. Möller, *Betonghandbok - Material*, kap 11 - Hållfasthet, Svensk Byggtjänst, 1994.

Bilaga A

Standard operation procedure - Urlakning

Vad du behöver

Utrustning

- Silikonrör i lika stor diameter som provkroppen
- Klämmor i rostfritt stål
- Anod i titan med en avskiljare i plast för att undvika direktkontakt med provkroppen
- Katod i rostfritt stål och avskiljare i plast för att undvika direktkontakt med provkroppen
- Spänningsaggregat som kan producera en spänning på upp till 100 V och en strömstyrka upp till 2 A, med funktionen konstant ström
- Plastbehållare med kapacitet på (minst) 20 liter

Elektrolyt

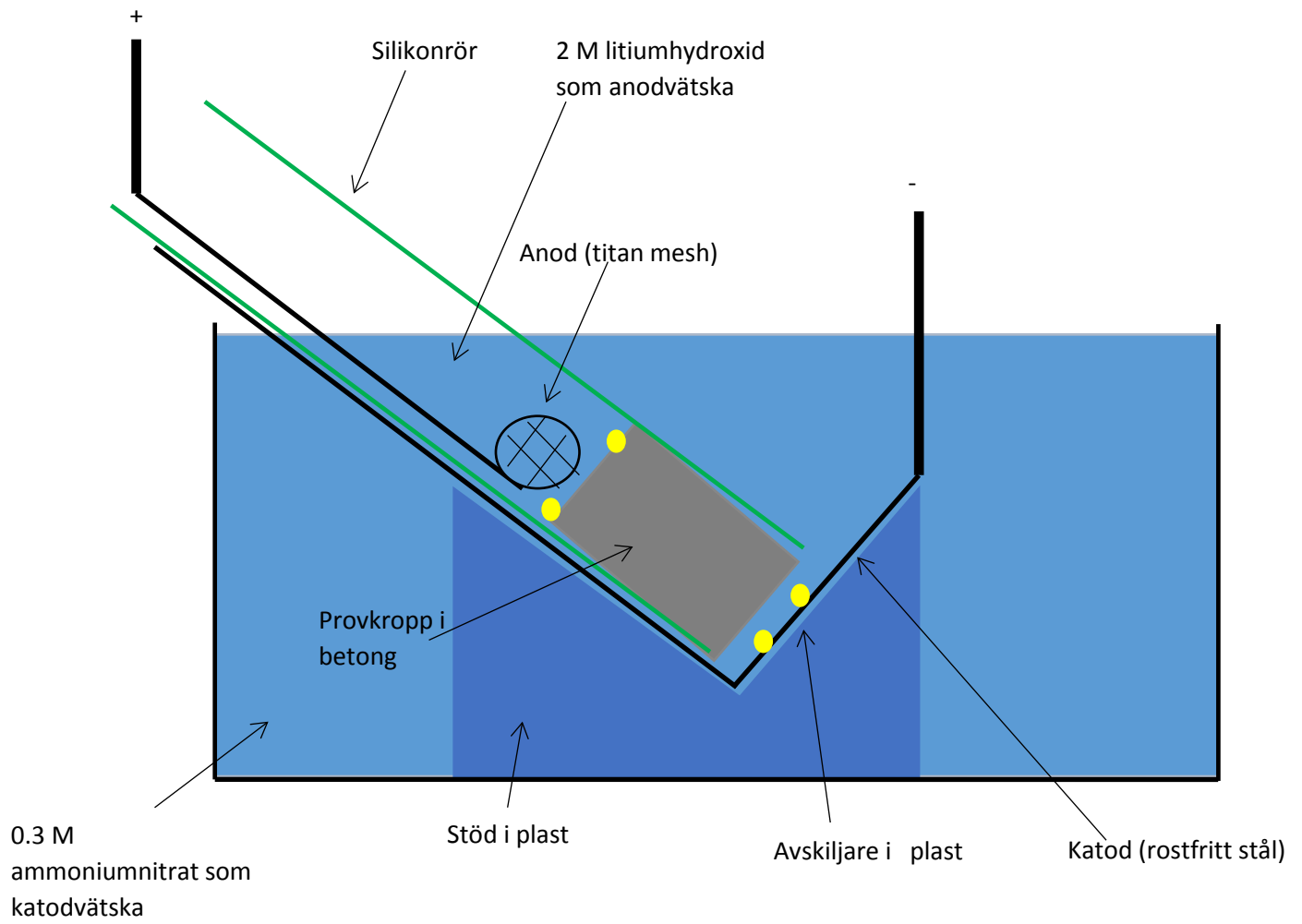
- Destillerat vatten
- 3 M litiumhydroxid (LiOH, 48 gram salt per liter vätska)
- 0,3 M Ammoniumnitrat (NH₄NO₃, 24 gram salt per liter vätska)

Övrigt

- Dragskåp
- Skyddsglasögon
- Skyddshandskar
- Labbrock
- Munskydd

Utförande

1. Omslut provkroppen med silikonröret och dra åt klämman
2. Fyll på med vatten och låt stå i minst två timmar för att se om cylindern läcker. Om den läcker måste detta åtgärdas.
3. Anordningen monterades enligt Figur 27 på nästa sida
4. Fyll på med destillerat vatten i anoden och katoden
5. Sätt in anordningen i ett dragskåp
6. Fyll på Litiumhydroxid i anoden och ammoniumnitrat i katoden
7. Sätt igång strömaggregatet och ställ in strömstyrkan I (A)
8. Läs av spänningen och räkna ut effekten ($P=V \times I$) Om effekten är över 25 W, måste strömstyrkan minskas, tills effekten är under 25 W
9. Fyll på dagligen med ammoniumnitrat i katoden med $71 \times I$ gram och litiumhydroxid med $22 \times I$ gram i anoden tills önskad grad av urlakning har skett



Figur 27 – Modell över urlakningsanordning

Förberedande åtgärder

1. Beräkna arean, A (m^2), på provkroppen som kommer vara i kontakt med katodvätskan.
2. Beräkna den procentuella pastavolymen, %VP, i provkroppen.
3. Multiplicera $A \times \%VP = A_p$, för att beräkna hur mycket pasta det finns i tvärsnittet.
4. Beräkna den behövda strömmen I (A) = $127 \times A_p$.

Bilaga B

Standard operation procedure – Frysning

Vad du behöver

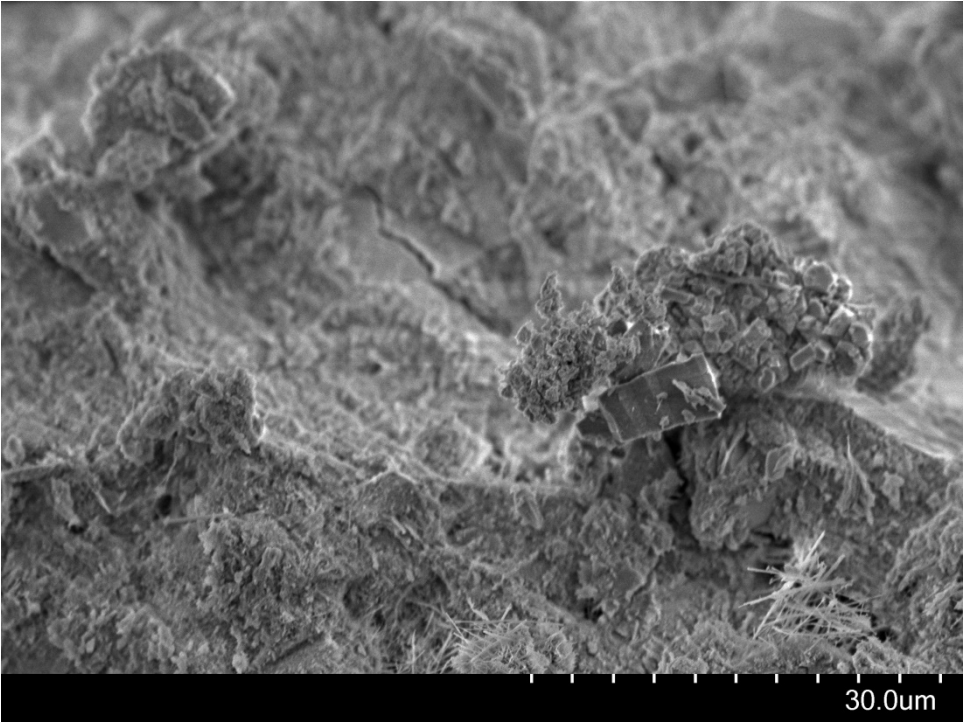
- Stålbehållare med fastsvetsad botten.
- Lock till behållaren, med små jämt utspridda hål för att låta vatten expandera under frysning
- Bultar för att fästa locket
- Skiftnyckel (eller liknande) för att dra åt bultarna
- Kanyl i plast
- Grus
- Provkropp i betong
- Vatten
- Klimatskåp där temperaturen går att regleras
- Temperaturlogga
- Temperaturelement

Utförande

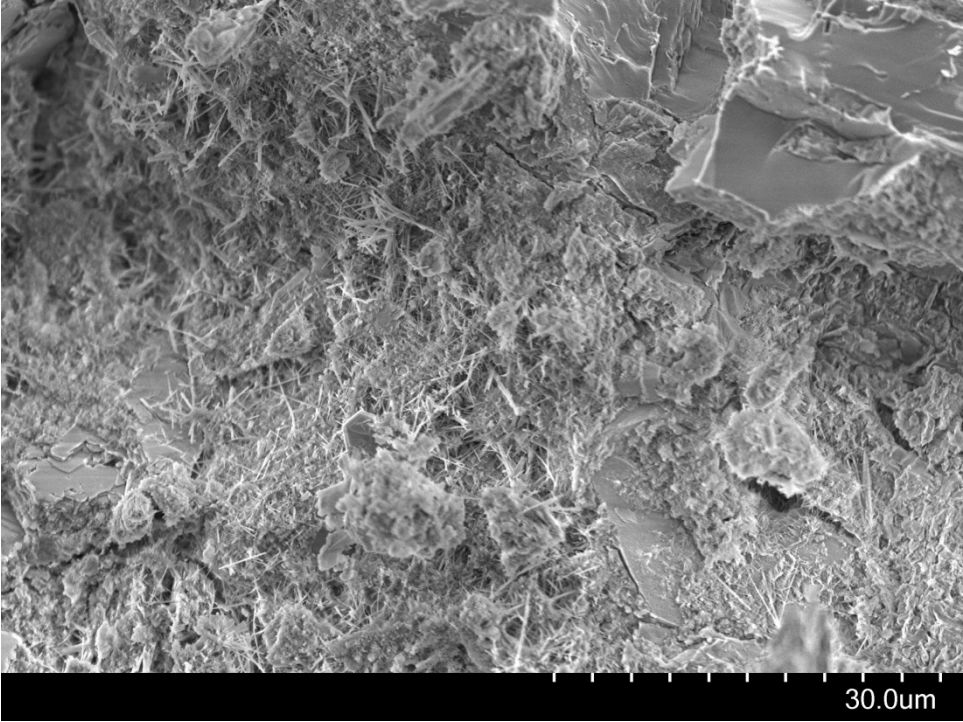
1. Fyll upp behållaren med några centimeter grus (gruset kan vara fuktigt är så det inte dammar)
2. Placera provkroppen, endast en provkropp per behållare, på gruset så den står rakt
3. Fyll upp behållaren med grus
4. Fyll på med vatten
5. Sätt på locket och dra åt bultarna
6. Placera behållaren i klimatskåpet
7. Se till att behållaren är helt vattenfylld genom att hälla på vatten genom ett av de små hålen i locket. När det kommer ut vatten ur hålen är behållaren helt vattenfylld.
8. Tryck ner temperaturelementet genom ett av de små hålen och låt ett temperaturelement vara i klimatskåpet. Koppla in temperaturelementen i temperaturloggan
9. Ställ in klimatskåpet hur temperaturen skall ändras. Den skall först gå från 20°C till 2°C på 30 minuter. Sedan från 2°C till -10°C på 150 timmar. Sedan skall det hållas -10°C i två timmar innan temperaturen går upp till 20°C igen på 30 minuter.
10. Här kan du välja själv om du vill stänga av klimatskåpet eller låta det stå i 20°C tills isen har smält i behållaren.
11. Skruva av locket och ta ur provkroppen.

Bilaga C - SEM-bilder

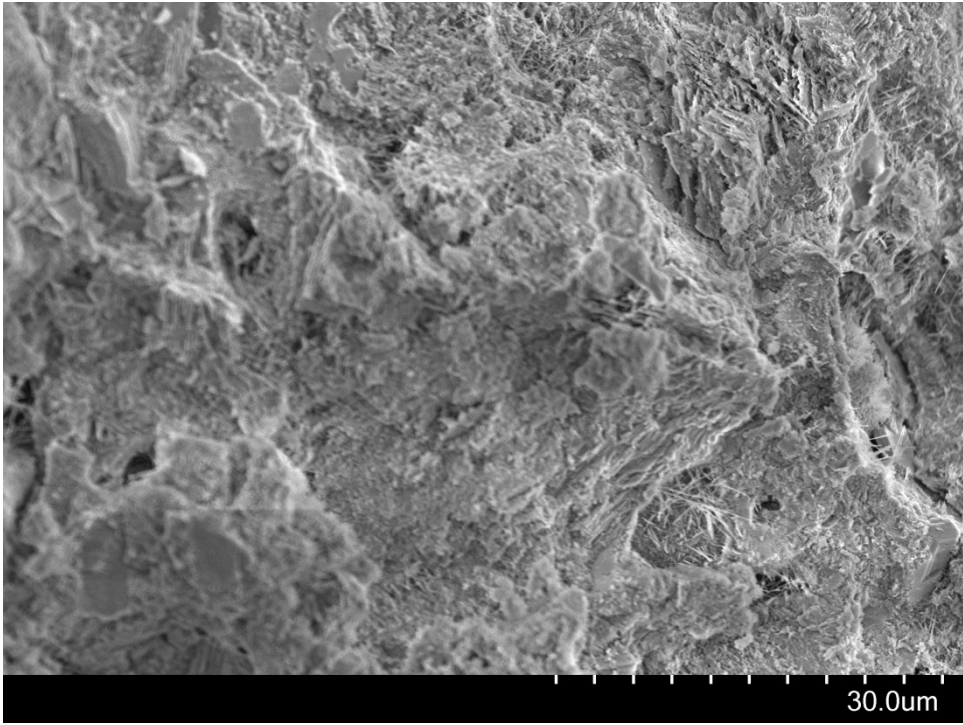
Ej åldrade betonger



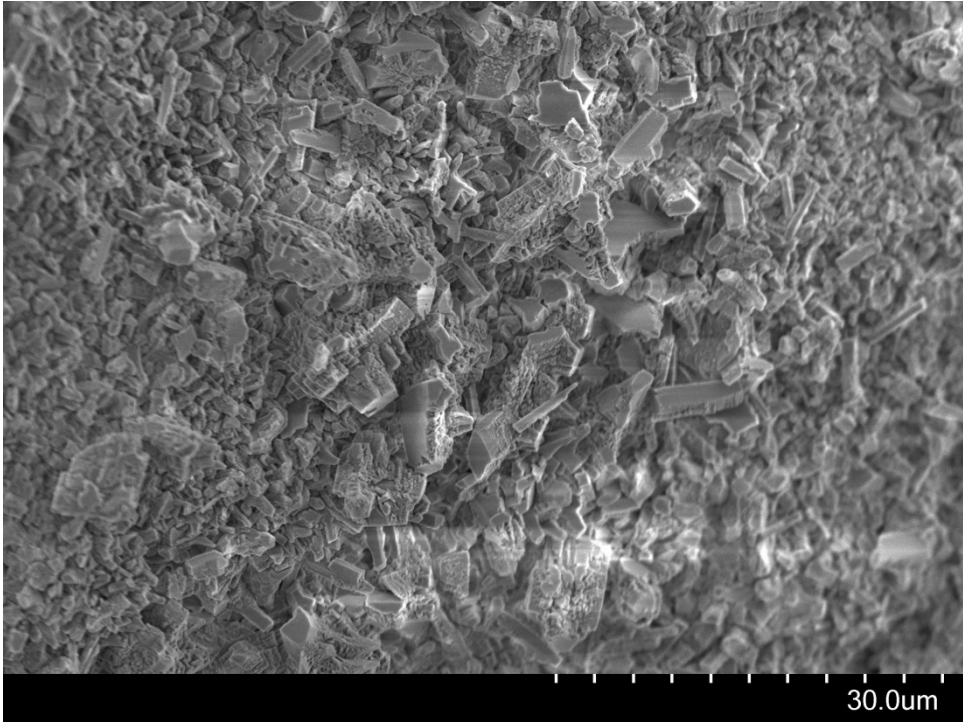
Figur 28



Figur 29

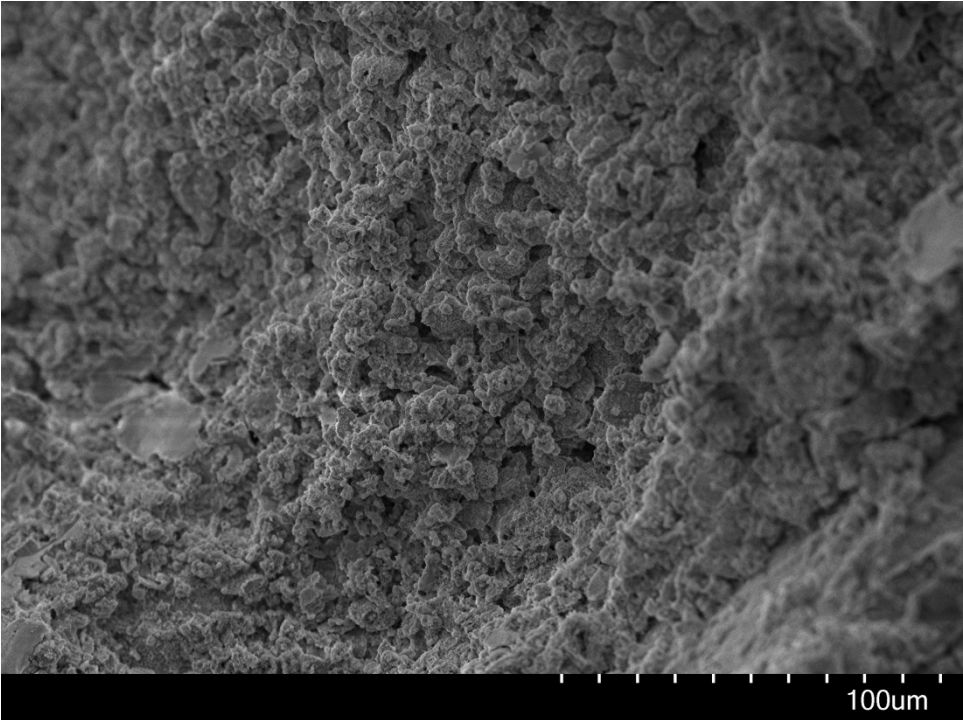


Figur 30

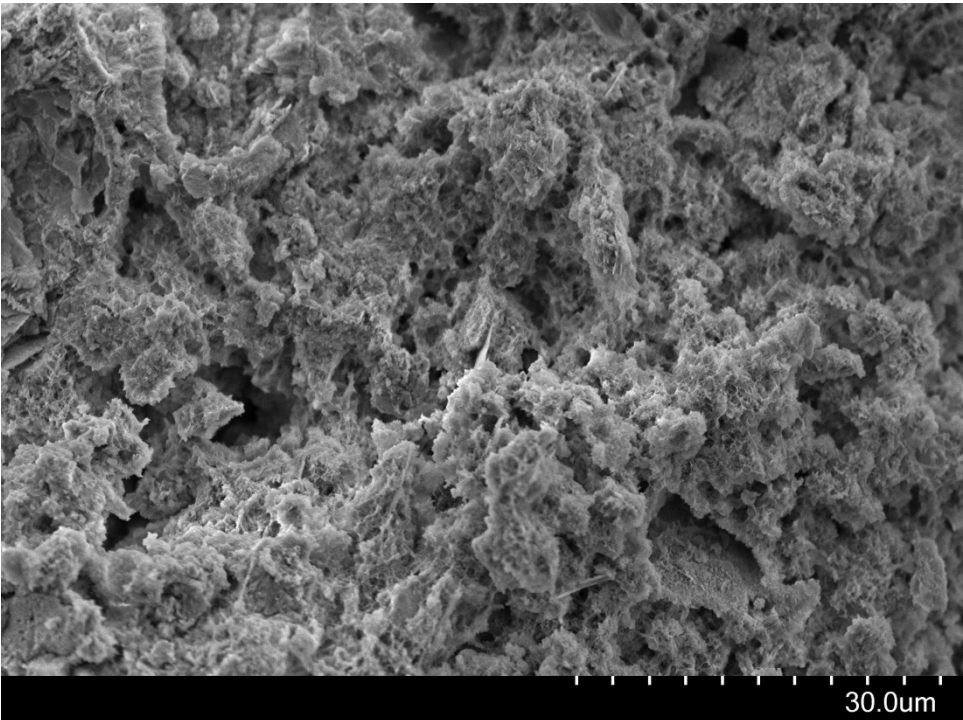


Figur 31

Urlakade betonger



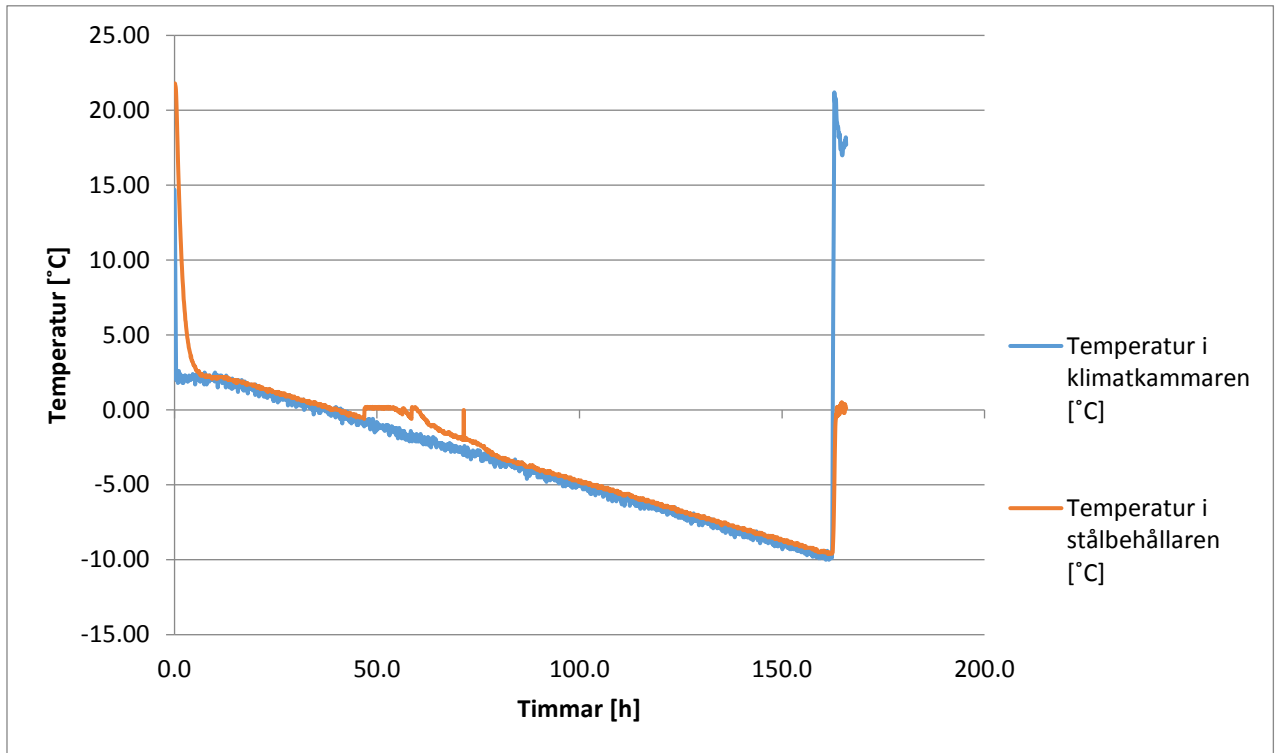
Figur 32



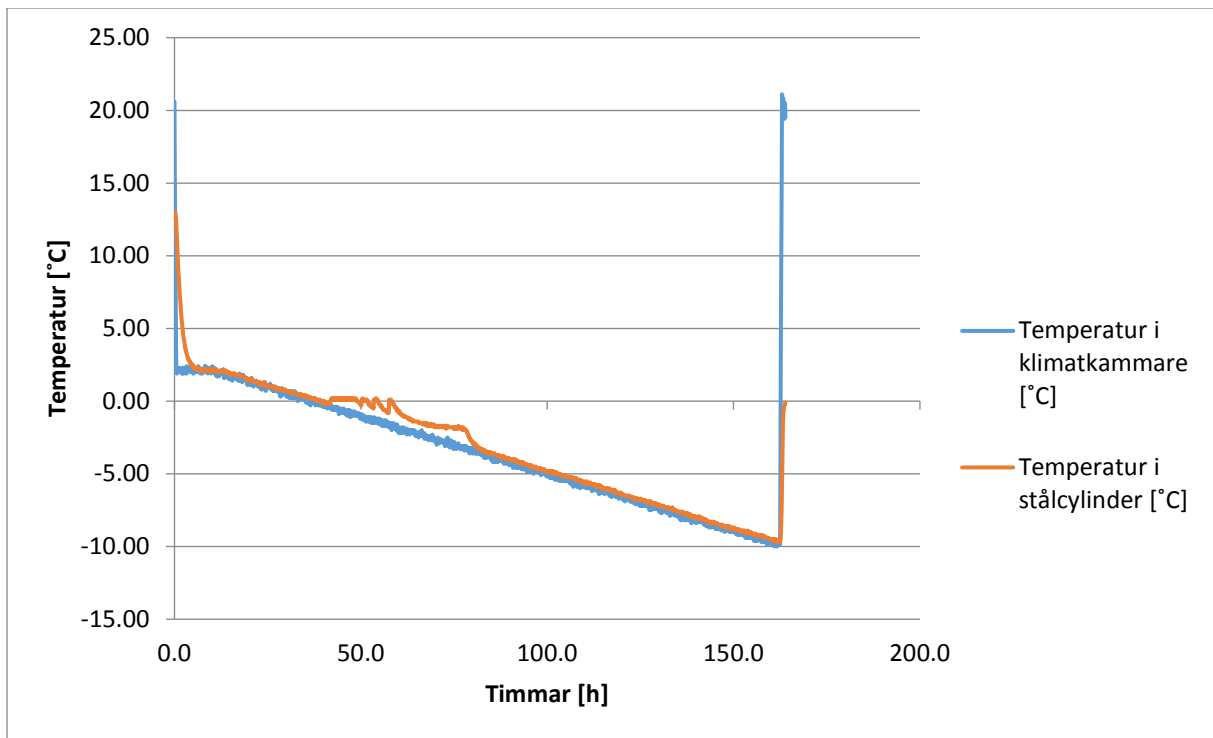
Figur 33

Bilaga D

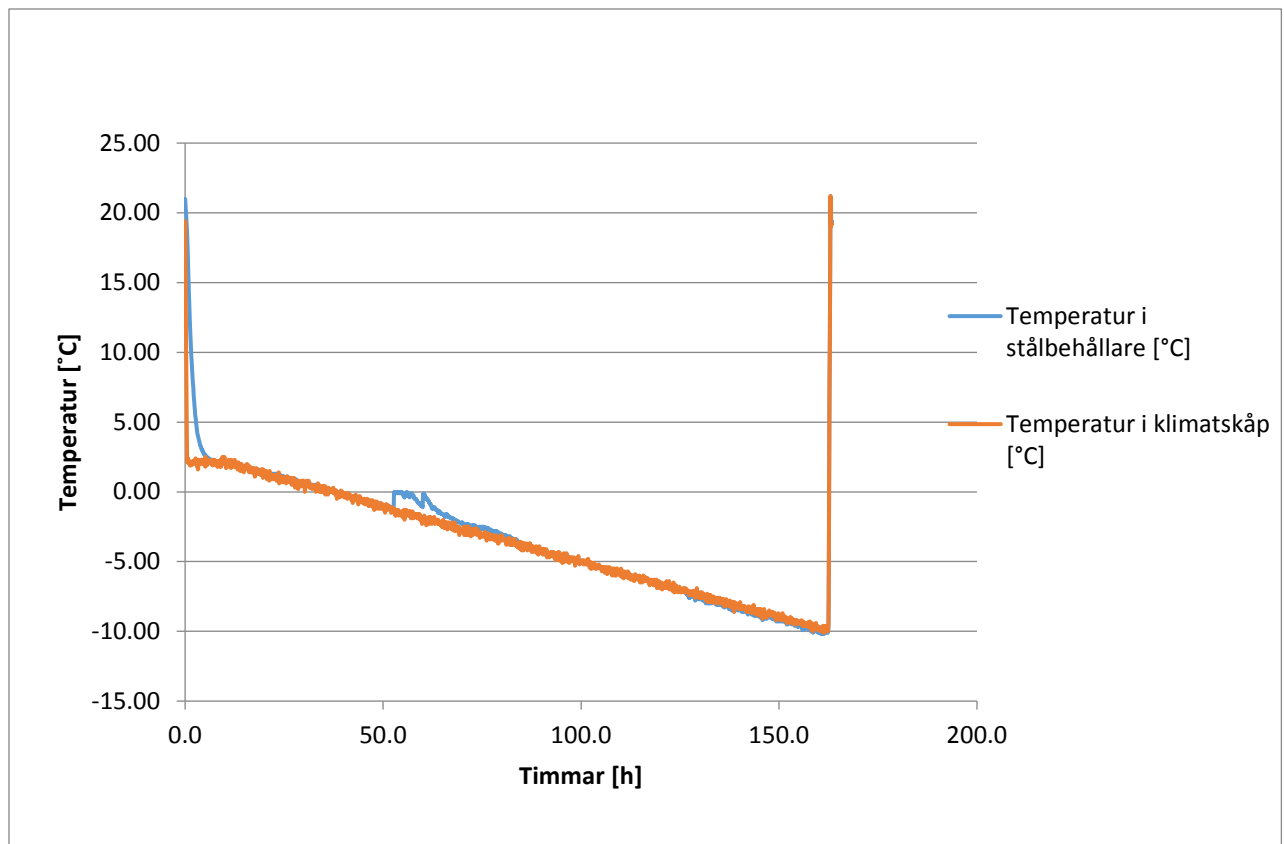
Fler temperaturdiagram över frysning



Figur 34 – Frysdata för en orörd, ej vattenmättad betong

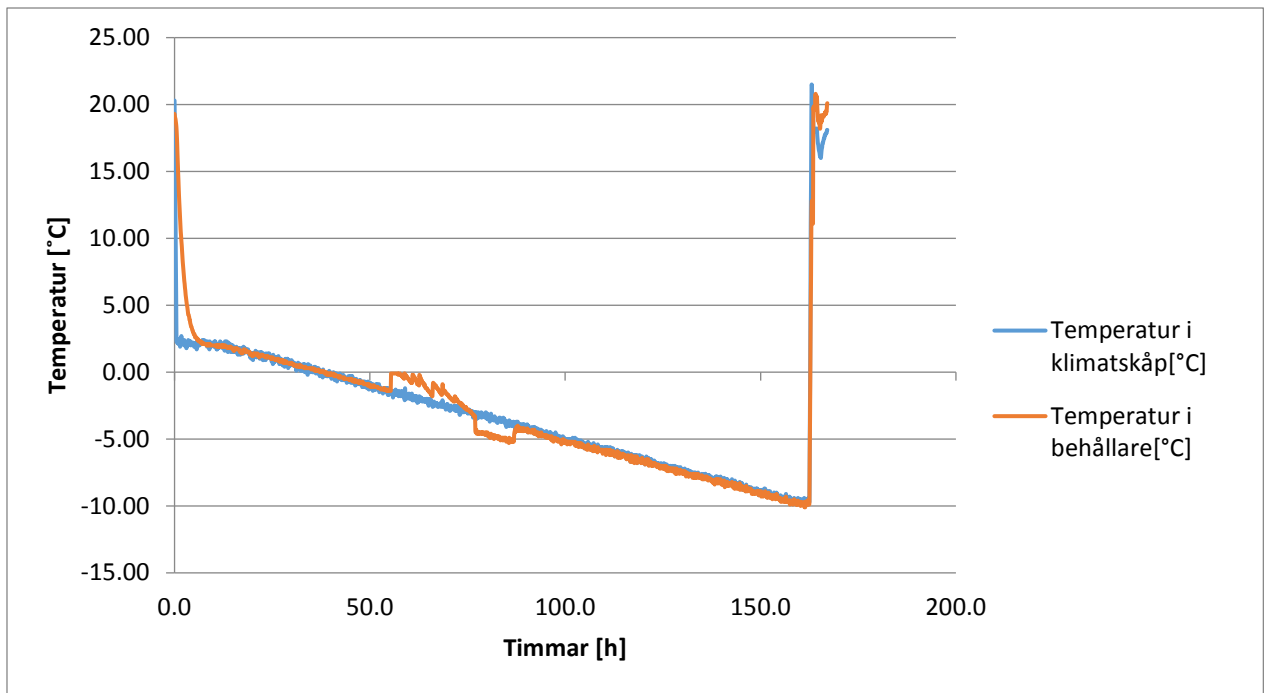


Figur 35 – Frysdata för en vattenmättad betong



Figur 36 – Frysdatab för en provkropp som urlakats i 30 dagar

Vid frysningen av provkroppen som hade urlakats i 25 dagar så visade det sig att det ena termoelementet var trasigt och ingen data registrerades. Dock så frös den in samtidigt som provkroppen som hade urlakats för 30 dagar så det är då ett godtyckligt antagande att fryskurvan såg godtyckligt ut som fryskurvan för 30 dagar



Figur 37- Frysdata för en provkropp som har urlakats i 20 dagar