

# **Frostsprängning i betongdammar**

Inverkan av frostsprängning till uppkomna skador vid vattenlinjen hos betong i vattenkraftverk.

## **Frost damage in concrete dams**

The effect of frost damage to observed damages on concrete in the waterline on hydroelectric power plants.

Mikael Persson  
Martin Rosenqvist

ISRN: LUTVDG/TVBM--09/5074--SE(1-88)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola  
Byggnadsmaterial  
Box 118  
221 00 Lund

Tel: 046-222 74 15  
Fax:: 046-222 44 27  
[www.byggnadsmaterial.lth.se](http://www.byggnadsmaterial.lth.se)

## Sammanfattning

- Titel:** Frostsprängning i betongdammar
- Inverkan av frostsprängning till uppkomna skador vid vattenlinjen hos betong i vattenkraftverk
- Författare:** Mikael Persson och Martin Rosenqvist
- Handledare:** Manouchehr Hassanzadeh, Vattenfall Research and Development AB, Älvkarleby.  
Katja Fridh, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Institutionen för Bygg- och miljöteknologi, Lunds Tekniska Högskola, Lund.
- Problemställning:** Vid en utredning av tillstånd och framtida reparationsbehov av vattenkraftverket Porsi upptäcktes skador i form av avskalning runt vattenlinjen på nedströmssidan av dammen. Då vattenkraftverket är beläget vid Lule älv utsätts det under vintern för extremt kallt klimat. Skadornas dominerande orsak kunde inte fastställas då ett flertal skademekanismer kunde vara verksamma. En hypotes var att frostsprängning gett upphov till skadorna, men då det inte fanns tidigare försök med liknande förhållanden kunde inget bekräftas. I och med detta fann Vattenfall, som äger vattenkraftverket, det intressant att genom ett examensarbete undersöka möjligheten att skadorna orsakats av frostsprängning.
- Syfte:** Examensarbetet har syftet att ge en ökad förståelse för hur betong i en vattenkraftverksdamm kan skadas i ett hårt klimat med samverkande sträng kyla och icke fruset vatten.
- Mål:** Examensarbetet har delats upp i fyra delmål. De två första handlar om att återskapa samma temperaturförhållanden i små provkroppar som de i referensdammen, samt att återskapa observerad isbildning på betongen under vattenlinjen. De två resterande delmålen handlar om att undersöka om samma skador uppkom i laboratoriemiljö, samt att undersöka vilken inverkan betongkvalitet och frostbeständighet har på skadorna.
- Metod:** Metoden för utförandet av examensarbetet har varit att genom experiment i laboratoriemiljö försöka återskapa likvärdigt klimat som vid referensdammen. Bakomliggande teori har behandlats genom en litteraturstudie.

**Slutsatser:**

Experimentet på små provkroppar i laboratoriet visade att det gick att återskapa temperaturfördelningar som var likvärdiga de för referensdammen Porsi. Det har dessutom påvisats att det är möjligt för is att bildas på betongytan under vattenlinjen, trots att vattnet har en temperatur över 0°C. Dessa två resultat medför att det med stor sannolikhet går att jämföra resultaten från experimentet med det som hänt i referensdammen.

På provkropparna med vct 0,65 har tydliga yttre skador uppkommit under vattenlinjen. Genom jämförelse av provkropparnas skadade yta med skadorna på referensdammen, har det gått att dra slutsatsen att denna avskalning uppkommit på samma sätt och beror på frostsprängning. Slutsatsen har styrkts genom att skadorna varit likvärdiga utseendemässigt och att temperaturförhållandena varit jämbördiga. Detta visar alltså att avskalning inte bara uppkommer då betong är i kontakt med saltlösning utan kan även inträffa i rent vatten.

De provkroppar som drabbats av avskalning har också fått inre skador genom frostsprängning i betongen över vattenlinjen. Dessa skador har identifierats okulärt, samt med hjälp av ultraljudsmätare och spräckhållfasthetstest. Under vattenlinjen har det inte med säkerhet gått att säga om inre skador uppkommit, då resultat från ultraljudsmätningarna och spräckhållfasthetstestet skiljer sig åt.

Experimentet har visat att det bara varit provkropparna med vct 0,65, utan luftporbildande medel, som skadats efter ca 50 fryscyklar, trots att både vct 0,65 och vct 0,45 har haft likvärdig tryckhållfasthet och spräckhållfasthet. Det som dock skilde de båda provkroppsserierna åt var lufthalt och täthet. Med andra ord har betongkvalitet i form av inre struktur haft stor betydelse för omfattningen av skadorna.

I experimentet har betong med lågt vct och hög lufthalt visat sig ha större motståndsförmåga mot både inre och yttre frostsprängning än betong med högt vct och låg lufthalt.

**Nyckelord:**

Vattenfall, vattenkraftverk, Lule älv, Porsi, betong, experiment, isbildning, frostsprängning, avskalning, hydrauliskt tryck, islinstillväxt, pumpningseffekt, vct, lufthalt.

## Summary

- Title:** Frost damage in concrete dams
- The effect of frost damage to observed damages on concrete in the waterline on hydroelectric power plants.
- Authors:** Mikael Persson and Martin Rosenqvist
- Supervisors:** Manouchehr Hassanzadeh, Vattenfall Reseach and Development AB, Älvkarleby.  
Katja Fridh, Division of Building Materials, Department of Building and Environmental Technology, Lund Institute of Technology, Lund University
- Questions:** In an investigation of the state and future needs for repair of the hydroelectric power plant Porsi, damages were discovered in form of scaling around the waterline at the power plant's downstream side. Porsi is located in Lule älv which in the winter is exposed to extremely cold climate. The dominant cause of damage could not be determined but could be multiple damage mechanisms. One hypothesis was that frost damage led to these damages, but there are no tests in similar circumstances that could confirm that. Due to that Vattenfall, the owner of Porsi, was interested to examine the possibility of frost damages as an explanation to the observed damages on Porsi through a diploma work.
- Purpose:** The purpose of this diploma work is to provide a better understanding of how damages in concrete can occur in a hydroelectric power plant, when it is exposed to a very cold climate and the concrete is in contact to non-frozen water.
- Aim:** The thesis is divided into four objectives. The first two addressing the issue of reproduce a, to the reference dam, similar temperature distribution in small specimens and to recreate the observed icing on the concrete surface below the waterline. The two remaining objectives is to reproduce similar damages in a laboratory environment and examine if the concrete quality and there fore the frost resistance had any effects on the damages.
- Method:** The method of this work has been to reproduce an equivalent climate, to the reference dam, in a laboratory experiment on small specimens. A literature review has also been performed for understanding the theory of the damage mechanisms.

**Conclusions:**

The experiment on small test specimens in the laboratory showed that it was possible to reproduce a temperature distribution that was equivalent to the reference dam Porsi. It has also been proven that it was possible for ice to form at the concrete surface below the waterline, though the water had a temperature above 0°C. These results mean that the probability is high that results of the experiment can be compared with the performance of the reference dam.

The specimens with w/c-ratio 0,65 have external damage below the waterline. By comparison of the test's damages with the surface damages in the reference dam, it has been possible to conclude that the scaling occurred in the same way and was due to frost damage. This has been demonstrated by similar damage appearance and equal temperature conditions. It is proven that scaling not only occurs when concrete is in contact with saline solution, but also in pure water.

The test specimens affected by scaling also have internal damages in the concrete over the waterline caused by frost damage. These damages have been identified visually, and with the help of ultrasonic measurements and testing of splitting tensile strength. Due to different results from ultrasonic measurements and testing of splitting tensile strength it was not possible to determine if the concrete below the waterline had any internal damages.

The experiments have shown that only the specimens with w/c-ratio 0,65, without air-entrainment, were damaged after about 50 freezing cycles, despite the fact that both w/c-ratio 0,65 and w/c-ratio 0,45 had similar compressive strength and splitting tensile strength. The differences between the two series of specimens were the air-entrainment and the permeability of the concrete. In other words, the concrete quality in terms of internal structure had a significant impact on the magnitude of the damages.

The experiments have shown that concrete with low w/c-ratio and air-entrainment have had greater resistance both to internal frost damage and scaling than concrete with high w/c-ratio and no air entrainment.

**Keywords:**

Vattenfall, water power plant, Lule älv, Porsi, concrete, ice growth, experiment, frost damage, scaling, hydraulic pressure, ice lens growth, pumping effect, w/c-ratio, air entrainment.

## Förord

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng och utgör den avslutande delen av utbildningen på civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad. Examensarbetet är utfört under höstterminen 2008 vid Avdelningen för Byggnadsmaterial på Lunds Tekniska Högskola på uppdrag av Vattenfall Research and Development AB.

Handledare för examensarbetet har varit Manouchehr Hassanzadeh och Katja Fridh och vi vill tacka dem för det stöd de gett oss genom sitt engagemang och värdefulla kommentarer på vårt arbete. Vi vill också tacka examinatorn Lars-Olof Nilsson. Till sist riktar vi ett tack till teknikerna på Avdelningen för Byggnadsmaterial för all teknisk hjälp i laboratoriet vi fått under arbetets gång.

Lund, januari 2009



Mikael Persson



Martin Rosenqvist





## Innehållsförteckning

1 Inledning .....	11
1.1 Bakgrund - allmänt .....	11
1.2 Bakgrund - projektspecifikt .....	12
1.3 Syfte .....	12
1.4 Mål .....	12
1.5 Avgränsningar .....	13
1.6 Metod .....	13
2 Problembeskrivning .....	15
3 Teori .....	19
3.1 Betong .....	19
3.1.1 Vattencementtal .....	19
3.1.2 Luftporer .....	19
3.1.3 Kapillärsugning .....	20
3.1.4 Vattenmättnadsgrad .....	21
3.2 Skademekanismer .....	24
3.2.1 Frostsprängning .....	24
3.2.1.1 Bakgrund .....	24
3.2.1.2 Hydrauliskt tryck .....	25
3.2.1.3 Tillväxt av islinser .....	27
3.2.1.4 Osmotiskt tryck .....	29
3.2.1.5 Pumpningseffekt .....	31
3.2.1.6 Inre frostsprängning .....	31
3.2.1.7 Yttre frostsprängning .....	32
3.2.2 Karbonatiseringsinitierad armeringskorrosion .....	33
3.2.3 Kloridinitierad armeringskorrosion .....	34
3.2.4 Urlakning .....	36
3.2.5 Erosion .....	36
3.2.6 Synergi mellan skademekanismer .....	37
3.3 Miljöpåverkan vid provning .....	37
4 Försök .....	39
4.1 Förstudie .....	39
4.1.1 Metod .....	39
4.1.2 Datorsimuleringar .....	39
4.1.3 Framtagande av provningsmodell .....	44
4.2 Material .....	49
4.2.1 Betong .....	49
4.2.2 Provkroppar .....	50
4.3 Utrustning .....	51
4.3.1 Ultraljudsmätare .....	51
4.3.2 Frysar .....	51
4.4 Experiment .....	52
4.4.1 Metod – veckovis provning .....	52
4.4.2 Metod – avslutande provning .....	53
4.4.3 Referensprovkroppar .....	54

## Frostsprängning i betongdammar

---

5 Resultat .....	55
5.1 vct 0,65.....	55
5.1.1 Fryscyklar .....	55
5.1.2 Yttre skador.....	56
5.1.3 Mätning med ultraljud.....	58
5.1.4 Inre skador .....	60
5.1.5 Spräckhållfasthet.....	61
5.1.6 Fuktkvot och vattenmättnadsgrad .....	62
5.2 vct 0,45.....	64
5.2.1 Fryscyklar .....	64
5.2.2 Yttre skador.....	65
5.2.3 Mätning med ultraljud.....	66
5.2.4 Inre skador .....	67
5.2.5 Spräckhållfasthet.....	67
5.2.6 Fuktkvot och vattenmättnadsgrad .....	68
6 Analys .....	71
6.1 Allmänt .....	71
6.2 vct 0,65.....	71
6.3 vct 0,45.....	73
6.4 Jämförelse vct 0,65 / vct 0,45 .....	73
6.5 Porsi vattenkraftverk.....	74
7 Slutsats .....	75
8 Diskussion.....	76
9 Referenser .....	77
Bilaga 1 – Uppmätta temperaturer vid Porsi.....	79
Bilaga 2 – Betongrecept vct 0,65 .....	80
Bilaga 3 – Betongrecept vct 0,45 .....	81
Bilaga 4 – Temperaturer provkropp 4 vct 0,65 .....	82
Bilaga 5 – Temperaturer provkropp 1 vct 0,45 .....	83
Bilaga 6 – Skadeutveckling provkroppar vct 0,65 .....	84
Bilaga 7 – Skadeutveckling provkroppar vct 0,45 .....	87
Bilaga 8 – Medelvärden av ultraljudsmätningar .....	88

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund - allmänt

Vid byggande av stora konstruktioner finns en strävan efter att utforma så hållbara konstruktioner som möjligt. Önskvärt är också att underhållsbehovet på både befintliga och framtida konstruktioner kan hållas på en låg nivå. Detta resonemang passar väl in på vattenkraftverksdammar i betong som ofta ska ha en beräknad teknisk livslängd på bortåt 100 år, Fagerlund (1989).

Då majoriteten av de större vattenkraftverksdammarna i Sverige är belägna i den norra delen av landet utsätts dessa periodvis under vinterhalvåret för väldigt låga temperaturer. Det är inte ovanligt att temperaturen sjunker ned mot  $-30^{\circ}\text{C}$ , Hassanzadeh (2008). Samtidigt sker ett flöde av vatten genom vattenkraftverket. Då strömningshastigheten på vattnet är hög fryser vattnet inte till is. Det har dock observerats att isbildning kan inträffa på betongen både över och under vattenytan.

Huvuddelen av de idag befintliga vattenkraftverksdammarna uppfördes mellan åren 1910 och 1970, Vattenfall (2009). På den tiden var förståelsen kring hur betong som byggnadsmaterial fungerar betydligt sämre än vad den är idag. Det fanns en föreställning om att betong var ett material som endast krävde ett minimalt underhåll och därmed beaktades inte förstörande mekanismer såsom frostsprängning vid livslängdsanalyserna. En delvis förklarande orsak var att vid projekteringen användes gällande regler från betonghandböcker där reglerna inte alltid var ordentligt utredda, Fagerlund (1989).

Vid besiktningar av vattenkraftverksdammar har skador på betongen i kontakt med vatten observerats i ett område  $\pm 1$  meter med utgångspunkt i vattenlinjen. Dessa skador består av att betongen avskalats med en ungefärlig hastighet på 1 mm per år. Utan åtgärder skulle hela täcksiktet på cirka 50 mm betong skalas bort under en period av 40-50 år, Hassanzadeh (2008). Bland några av de vanligaste förekommande skademekanismer som förkortar betongens livslängd kan armeringskorrosion, erosion, urlakning och frostsprängning nämnas.

Då 40-50 år är en kortare period än den tekniska livslängden på konstruktionen måste skadorna med jämna mellanrum åtgärdas för att garantera fortsatt drift av vattenkraftverket. Att genomföra dessa reparationsarbeten blir kostsamt då ett stillastående vattenkraftverk innebär ett inkomstbortfall på cirka en miljon kronor per dag, Hassanzadeh (2008).

Det finns alltså en stor ekonomisk vinning i att söka en bättre förståelse av de destruktiva mekanismer som inverkar på betong under dess livslängd. Det bör gälla såväl för nybyggnation som för reparation.

## 1.2 Bakgrund - projektspecifikt

Hälften av Sveriges elproduktion kommer från vattenkraft och en av de största aktörerna inom branschen i Norden är Vattenfall AB. Totalt äger Vattenfall AB 112 vattenkraftstationer varav majoriteten finns i Sverige. En av dessa vattenkraftstationer är vattenkraftverket Porsi intill samhället Vuollerim vid Lule älv, Vattenfall (2009).

Porsi vattenkraftverk togs i drift 1961 och byggdes ut 1987. År 2006 genomfördes en uppgradering av dammen för att kunna klara av eventuella 10 000-årsregn. Arbetet har omfattat att förbättra erosionsskydden både upp- och nedströms för att klara av eventuella större vattenflöden, Svevia (2009).

Som referensdamm i examensarbetet kommer Porsi vattenkraftverk att användas.

## 1.3 Syfte

Examensarbetet har syftet att ge en ökad förståelse för hur betong i en vattenkraftverksdamm kan skadas i ett hårt klimat med samverkande sträng kyla och icke fruset vatten. Då det finns ett flertal tänkbara skademekanismer som kan vara inblandade är hypotesen för detta examensarbete att undersöka ifall frostsprängning är orsaken till de uppkomna skadorna.

## 1.4 Mål

För att bekräfta eller förkasta hypotesen har fyra viktiga moment identifierats. Dessa moment anses vara väsentliga och måste genomföras för att ge en kvalitativ bedömning av hypotesen.

- Att konstruera en nedskalad modell i laboratoriemiljö med möjlighet att återskapa likvärdiga förhållanden i betongprovkroppar jämfört med det verkliga fallet i referensdammen.
- Att med hjälp av modellen återskapa den observerade isbildningen på betongväggen under vattenytan.
- Att genom att utsätta provkroppen för upprepade frys- och upptiningscykler försöka åstadkomma liknande skador på betongytan jämfört med observerade skador på referensdammen.
- Att studera om betongkvaliteten samt betongens frostbeständighet är avgörande faktorer som påverkar omfattningen av skadorna på betongytan.

## 1.5 Avgränsningar

Examensarbetet har försökt åstadkomma förhållandet under vattenytan och då främst med betoning på den isbildning som har observerats på referensdammen. Således utfördes inget experiment för att undersöka hur skadorna ovan vattenytan uppstod. Anledningen till detta var svårigheten att återskapa förhållandena i laboratoriemiljö.

Experimentet som genomförts var inte representativt tidsmässigt då en normallång fryssäsong sträcker sig över större delen av vinterhalvåret. Istället utfördes ett forcerat experiment. Trots att det fanns ett flertal möjliga skademekanismer kom experimentet enbart att studera betongens motståndskraft mot frostsprängning. Modellen utformades så att övriga skademekanismer ej blev dominerande. I verkligheten kan det finnas en synergieffekt mellan urlakning och frostsprängning där urlakningen löser upp och försvagar ytskiktet som därmed lättare kan bli frostskadat. Synergieffekten borde utebli vid ett forcerat experiment eftersom urlakning är en långsam process. I det verkliga fallet får dock inte synergieffekten förbises.

Experimenten utfördes på betongkvaliteter som inte motsvarade den som användes i referensdammen. Istället användes två olika betongkvaliteter där den ena var av sämre kvalitet och ej frostbeständig, medan den andra betongen var av bättre kvalitet med god frostbeständighet. Fördelen med att välja betongkvaliteter som hade bättre respektive sämre kvalitet än referensdammens var att det enklare gick att få tydliga skillnader i omfattning på eventuella skador. Därmed borde det bli möjligt att kunna avgöra om det är frostsprängning som var den huvudsakliga destruktiva mekanismen.

## 1.6 Metod

Bakomliggande teori kopplad till experimentet samlades in genom litteraturstudier i ämnet. Även teori till icke verksamma skademekanismer studerades översiktligt för att skapa förståelse för att deras inverkan i det aktuella experimentet var marginella.

Experimentet har utförts med hjälp av en nedskalad modell. Provkropparna av betong var till hälften placerade under vatten, medan andra hälften befann sig ovan vatten. Endast en sida av provkropparna utsattes för kontakt med vatten och luft. Resterande ytor isolerades för att kunna styra värmeflödet i betongen.

Modellen utformades genom att utgå från en grundidé av modellen som modifieras efter upprepade försök där olika parametrar ändrades. Detta för att återskapa en teoretiskt beräknad temperaturfördelning i referensdammen där det även skulle bildas is på betongen under vattenytan.

Ett liknande förfarande användes för att ta fram fryscykeln.

## Frostsprängning i betongdammar

---

Då modellen och fryscykeln hade uppnått slutgiltig utformning utsattes provkropparna för fryscykler tills det blev möjligt att avgöra om några skador hade uppkommit eller ej. Genom att studera klimatdata från referensdammen och uppskatta antalet verkliga fryscykler per vintersäsong blev det möjligt att jämföra det forcerade experimentet med verkligheten.

Provkropparna göts med traditionell betong och membranhärddas första dygnet för att därefter lagras i 20°C under 28 dagar innan experimentet började. De sista dagarna placerades provkropparna till hälften i vatten för att återskapa en fuktfördelning liknande den som finns i referensdammens betong.

Experimentet avbröts en gång per vecka och provkropparna undersöktes okulärt. För att undersöka om inre frostsador hade inträffat undersöktes provkropparna med hjälp av ultraljud.

Efter avslutat experiment genomfördes en slutgiltig undersökning av provkropparna där dels uppnådda fuktnivåer och dels eventuell förlorad hållfasthet beräknades.

## 2 Problembeskrivning

Vattenfall AB är en av de största aktörerna bland elproducenterna i Sverige och en stor del av deras elproduktion kommer från vattenkraft. Totalt förfogar Vattenfall AB över 112 vattenkraftstationer varav majoriteten finns i Sverige och på grund av geografiska förutsättningar är de flesta vattenkraftverk belägna i den norra delen av landet. En av dessa vattenkraftstationer är Porsi vattenkraftverk intill samhället Vuollerim vid Lule älv, se figur 1, Vattenfall (2009). Porsi vattenkraftverk kommer att användas som referensdamm i examensarbetet för jämförelse av resultat.



*Figur 1 – Porsi vattenkraftverk.*

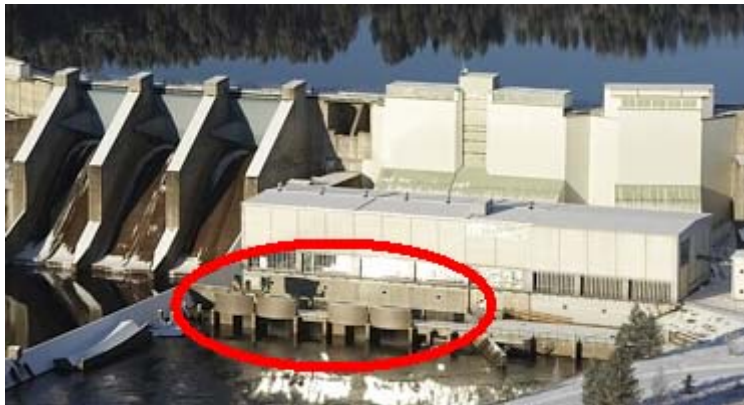
Porsi vattenkraftverk togs i drift 1961, Vattenfall (2009). I början av 1960-talet var förståelsen för hur betong som byggnadsmaterial fungerar sämre än vad den är idag. Forskning för att utreda betongens beständighet hade påbörjats, men var inte tillräckligt långt kommen för att det skulle gå att dra några säkra slutsatser om betongens beständighet. Vid projektering av vattenkraftverk användes gällande föreskrifter från betonghandböcker, Fagerlund (1989).

År 1987 byggdes Porsi vattenkraftverk ut och 2006 genomfördes en uppgradering av erosionsskydden både upp- och nerströms, för att få bättre beredskap att kunna klara av de vattenflöden som ett 10 000-årsregn kan medföra. Dessutom finns en osäkerhet i framtida vattenflöden med hänsyn till förändringar i klimatet, Svevia (2009).

## Frostsprängning i betongdammar

---

När Porsi vattenkraftverk nu börjar närma sig en ålder på 50 år har Vattenfall startat en utredning för att bedöma dess aktuella tillstånd och framtida reparationsbehov. Omgående riktades intresse mot skador som upptäcktes på dels en vägg och dels på pelare på nedströmssidan. Skadorna finns i ett område  $\pm 1$  meter med utgångspunkt i vattenlinjen och består av att betongen avskalats med en ungefärlig hastighet på 1 mm per år. Väggen är belägen ovanför utsläppet från turbinerna och pelarna bär upp en inspektionsbrygga framför väggen, se figur 2.



*Figur 2 – Skadornas placering.*

Då ritningar har visat att täcksiktet för underliggande armering är 50 mm innebär en avskalningstakt på 1 mm per år att det i genomsnitt skulle ta runt 50 år för armeringen att friläggas. På några enstaka ställen har detta redan inträffat. För att närmare kunna inspektera skadorna sänktes vattennivån och figurerna 3 till 5 visar skadornas utseende dels på väggen och dels på pelarna, samt ett exempel på den frilagda armeringen. Figur 6 ger en närbild på utseendet på den skadade betongen, Hassanzadeh (2008).



*Figur 3 – Skador på väggen.*



*Figur 4 – Skador på pelaren.*





*Figur 5 – Frilagd armering.*



*Figur 6 – Skadad betong.*

Om avskalningen tillåts fortskrida i samma takt kommer till slut all armering att friläggas och konstruktionens hållfasthet att riskeras. Då snart nådda 50 år är en betydligt kortare tidsrymd än den projekterade tekniska livslängden på konstruktionen, är det av stor vikt att sätta in åtgärder för att stoppa avskalningen och därmed garantera fortsatt drift av vattenkraftverket. Med ett inkomstbortfall på en miljon kronor per dag för ett stillastående vattenkraftverk är det av högsta intresse att åtgärda skadorna på rätt sätt för att undvika återkommande reparationer. För att kunna göra detta måste man förstå mekanismerna bakom angreppet, Hassanzadeh (2008).

Efter inledande undersökningar från Vattenfall drogs slutsatsen att utifrån de förutsättningar som råder för Porsjvattenkraftverk skulle skadorna antingen bero på frostsprängning, mekanisk erosion eller urlakning, men vilken av dessa tre skademekanismer som dominerar kunde inte bestämmas. Vintertid är dock klimatet väldigt hårt med samverkande sträng kyla och icke fruset vatten för ovan nämnda konstruktionsdelar. Följande bilder visar dessa konstruktionsdelar, se figur 7 till 10, då lufttemperaturen är  $-27^{\circ}\text{C}$ , Hassanzadeh (2008).



*Figur 7 – Väggen.*



*Figur 8 – Närbild på väggen.*

## Frostsprängning i betongdammar

---



*Figur 9 – Bryggan.*



*Figur 10 – Närbild på bryggan.*

Trots en lufttemperatur på  $-27^{\circ}\text{C}$  fryser inte vattnet, vilket bland annat beror på den väldigt höga strömningshastigheten på vattnet. Som syns på bilderna finns det ändå en isbildning på betongen ovan vattenytan. En liknande isbildning finns samtidigt på betongen under vattenytan. Genom experiment ska det i laboratoriemiljö undersökas om denna isbildning kan vara orsak till de observerade skadorna på berörda konstruktionsdelar tillhörande Porsi vattenkraftverk.

Klimatdata för Porsi vattenkraftverk mellan 2007-11-12 och 2008-11-09 kan ses i bilaga 1. De tre temperaturer som har uppmätts är vattentemperatur, samt högsta respektive lägsta lufttemperatur på daglig basis.

## 3 Teori

### 3.1 Betong

Ett av de vanligaste byggnadsmaterialen i världen idag är betong och det används främst till stommen i byggnader och anläggningar, exempelvis broar och dammar. Betong är ett kompositmaterial vilket består av cement, vatten, ballast (sand, grus, sten) och eventuella tillsatsmedel. Cementpasta bildas då cementet reagerar med vattnet och uppgiften för cementpastan är att binda ballasten och bilda ett sammanhängande material, Burström (2001).

#### 3.1.1 Vattencementtal

Den viktigaste indikatorn på betongens kvalitet är vct, vattencementtalet. Vct beskriver förhållandet mellan vikten cement och vikten vatten i betongen. Förhållandet är avgörande för bland annat vilken hållfasthet och täthet som betongen kommer att få. Ett lågt vct ger en tät betong med hög hållfasthet och anledningen till detta är att cementgelen blir tätare och därmed starkare. Ett högt vct ger generellt sämre täthet och lägre hållfasthet, Burström (2001).

$$vct = \frac{w}{c} \quad [\text{kg} / \text{kg}]$$

w = vikten blandningsvatten [kg / m<sup>3</sup>]

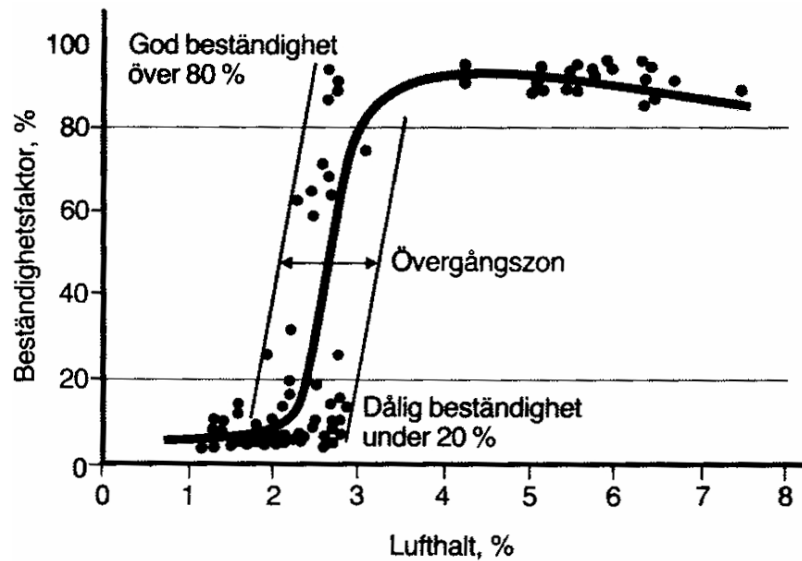
c = vikten cement [kg / m<sup>3</sup>]

#### 3.1.2 Luftporer

För att göra betong frostbeständig tillsätts ett luftporbildande medel i vattnet innan det hålls i betongblandaren. Frostbeständigheten uppnås då det luftporbildande medlet skapar mängder av små luftbubblor med diameter 50 – 300 µm. Luftbubblorna blir jämnt fördelade i betongmassan och motsvarar några procent av betongmassans volym, Burström (2001).

En betong utan tillsatsmedel har en lufthalt kring två procent medan en betong med ett luftporbildande medel har god frostbeständighet i kontakt med sötvatten vid en lufthalt överstigande fem procent, se figur 11, Fagerlund (1992). Luftbubblornas uppgift är att ta hand om det hydrauliska vattentrycket som uppstår vid volymexpansionen på nio procent från porvattnet då detta fryser till is, Burström (2001).

Tillsatser med luftporbildande medel får följden att betongens tryckhållfasthet minskar. Generellt antas tryckhållfastheten minska med tre till fem procent för varje procent inblandad luft. Vid lufthalter överstigande sju procent är minskningen kraftigare, Byfors (1994).



Figur 11 – Frostbeständighet som funktion av lufthalt. Fagerlund (1992)

### 3.1.3 Kapillärsugning

I små rör utsätter vatten, med krökt yta, röret för ett kapillärt undertryck. Det kapillära undertrycket orsakas av en stor adhesionskraft mellan rör och vatten, där adhesionskraften strävar efter att dra vattnet uppåt längs rörväggen. En motverkande kohesionskraft vill hålla samman vattenvolymen, Fagerlund (1998a). För hydrofila material är adhesionskraften dominerande och det kapillära undertrycket kan beskrivas med Laplace' ekvation, Burström (2001). Hänsyn måste dock tas till rådande atmosfärstryck  $P_0$  då  $\Delta P$  enbart uttrycker skillnaden mellan det yttre trycket och trycket i vattnet, Fagerlund (1998a).

$$P = P_0 + \Delta P = P_0 + \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} \quad [\text{Pa}]$$

$P_0$  = atmosfärstryck [Pa]

$\sigma$  = ytspänning mellan vätska och fast ämne [N / m]

$\theta$  = randvinkel, vätskans vinkel mot rörväggen

$r$  = rörets radie [m]

För de flesta naturliga byggnadsmaterial, såsom betong, är Laplace' ekvation relevant. Det kapillära undertrycket medför att vatten sugts upp i materialet och den kapillära stighöjden kan beräknas då vattnets tyngdkraft vid en viss höjd kommer att balansera det kapillära undertrycket, Burström (2001).

$$h = \frac{\Delta P}{\rho_w \cdot g} \quad [\text{m}]$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \text{kapillära undertrycket [Pa]} \\ \rho_w &= \text{vattnets densitet [kg / m}^3\text{]} \\ g &= \text{jordaccelerationen [m / s}^2\text{]} \end{aligned}$$

De två ovan angivna sambanden innebär att ju mindre porer ett material har desto större blir den kapillära stighöjden. Många av betongens porer har en radie mindre än 100 nm, vilket motsvarar en teoretisk kapillär stighöjd på minst 150 meter, Fagerlund (1998a). Betong består dock inte av små idealiska rör, utan har ett oregelbundet porsystem. I betong är oftast gelporer, med storlek 1-7 nm, fyllda med absorberat och kapillärkondenserat vatten. Vidare är kapillärporerna sammanhängande porer, med storlek 0,1 – 100 µm, och dessa bidrar starkt till kapillärsugning, Burström (2001). Luftporerna är oftast större sfäriska porer med storlek 10 – 500 µm. Dessa luftporer står utan kontakt med varandra och förblir oftast helt eller till viss del luftfyllda efter kapillärsugning, Fagerlund (1999).

En betong med i huvudsak gelporer och kapillärporer kommer att få en mycket kraftigare kapillärsugning än en betong med hög andel luftporer. Luftporerna fungerar ”kapillärbrytande” genom att det kapillära undertrycket sjunker i en por med stor radie. Vattnet måste således ta en annan väg för att nå högre upp i materialet. För betong är detta avgörande för frostbeständigheten, dels genom att vattenfyllningen av luftporerna är väldigt långsam och dels för att de ”kapillärbrytande” luftporerna är en förutsättning för att betongen ska kunna ta hand om isens volymexpansion vid frysning, Nilsson (2006).

### 3.1.4 Vattenmättnadsgrad

Vattenmättnadsgraden är ett mått på hur stor andel av den totala porvolymen som är vattenfylld och den har en avgörande betydelse för frostbeständigheten hos betong, Fagerlund (1999). En allmän definition på vattenmättnadsgraden  $S$  är:

$$S = \frac{W_e}{1000 \cdot V_p} \quad [\text{m}^3 / \text{m}^3]$$

$$\begin{aligned} W_e &= \text{mängd avdunstningsbart vatten i provet [kg]} \\ V_p &= \text{total porvolym i materialet [m}^3\text{]} \\ 1000 &= \text{porvattnets densitet [kg / m}^3\text{]} \end{aligned}$$

Då  $S = 0$  är betongen helt uttorkad och när  $S = 1$  är alla porer vattenfyllda. Vid det senare tillståndet fryser all betong sönder undantagslöst, Burström (2001).

## Frostsprängning i betongdammar

---

Vid frysning av betong gäller följande definition på effektiv vattenmättnadsgrad:

$$S_f = \frac{W_f}{W_f + A} \quad [\text{m}^3 / \text{m}^3]$$

$W_f$  = mängd frysbart vatten i provet [ $\text{m}^3$ ]

$A$  = volym luftfyllda porer [ $\text{m}^3$ ]

Andelen frysbart vatten är beroende av temperaturen och porernas radie i betongen. Detta beror på att adsorberat och kapillärkondenserat vatten har lägre fryspunkt än vanligt vatten och anledningen är det kapillära undertryck som uppkommer i små porer. Ju mindre por desto större undertryck och därmed lägre fryspunkt. Även RF-värde då vatten kondenserar i porerna minskar med minskande porradie. I tabell 1 framgår sambandet mellan porradie, fryspunkt och RF-värde, Fagerlund (1999).

Upplysningsvis är en Ångström [ $\text{Å}$ ] lika med  $10^{-10}$  m.

*Tabell 1 – Samband mellan fryspunkt och porradie*

<b>Porradie</b> [ $\text{Å}$ ]	<b>Fryspunkt</b> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	<b>RF</b> [%]
634	-2	98
222	-6	95
137	-10	92
95	-15	88
74	-20	85
53	-30	79
43	-40	74

Betong är ett material som har en mycket stor andel ofrysbart vatten. Generellt kan vatten som binds vid ett RF lägre än det givet i tabell 1 ej frysa. Detta har en positiv inverkan på betongens frostbeständighet. I verkligheten är andelen frysbart vatten faktiskt ännu lägre eftersom vatten måste nås av en isfront för att kunna frysa. Vatten fryser alltså inte spontant, utan en iskristall måste först tillföras. Om ingen iskristall når vattnet kommer det i isolerade porer att förbli underkyllt, Fagerlund (1999).

För att betong ska klara frysning måste det finnas luft i porsystemet som kan ta hand om det tryck som uppstår av volymutvidgningen på nio procent. För att betongen ska ha denna förmåga får den teoretiskt högsta, det vill säga den kritiska, vattenmättnadsgraden  $S_{kr}$  vara 0,917, Fridh (2005).

## Frostsprängning i betongdammar

---

$$S_{kr} = \frac{W_f}{W_f + 0,09 \cdot W_f} = 0,917 \quad [\text{m}^3 / \text{m}^3]$$

$W_f$  = mängd frysbart vatten i provet [ $\text{m}^3$ ]

Då det är praktiskt svårt att exakt beräkna den frysbara mängden vatten används en förenklad formel för vattenmättnadsgraden  $S$ . Denna formel baseras på det totala vatteninnehållet och den totala porvolymen i betongen, Fridh (2005).

$$S = \frac{W_e}{V_p} \quad [\text{m}^3 / \text{m}^3]$$

$W_e$  = total mängd förångningsbart vatten [ $\text{m}^3 / \text{m}^3$ ]

$V_p$  = total porvolym [ $\text{m}^3 / \text{m}^3$ ]

Den kritiska vattenmättnadsgraden  $S_{kr}$  är unik för varje enskild betongblandning men den är dessutom temperaturberoende. Genom experiment kan det visas att en avsevärd del av porsystemet kan vara vattenfyllt men att betongen ändå förblir frostbeständig. Den kritiska vattenmättnadsgraden påverkas inte av fryshastigheten eller antalet frostcykler. Dock räcker det att vattenmättnadsgraden överstiger den kritiska vattenmättnadsgraden i samband med frysning vid enstaka tillfällen för att allvarliga frostsador i betongen ska uppkomma, Fagerlund (1999).

## 3.2 Skademekanismer

Vid praktisk användning av betong i verkliga konstruktioner kommer betongen att påverkas av den omgivande miljön. I ett långt tidsperspektiv har den omgivande miljön nästan alltid en nedbrytande inverkan på betongen. Därmed blir det intressant att bestämma betongens beständighet och indirekt dess livslängd i den miljö som betongen kommer att vistas i.

Några skademekanismer som betong kan tänkas utsättas för är armeringskorrosion, urlakning, frostsprängning och erosion. För att bestämma dessa skademekanisters inverkan på betongen är det av intresse att skapa miljöer i ett laboratorium där de verkliga förhållandena avspeglas så väl som möjligt.

Vid provning i laboratoriemiljö provas oftast en skademekanism åt gången varav det är viktigt att inte förbise eventuella synergieffekter som kan inträffa i verkligheten.

### 3.2.1 Frostsprängning

#### 3.2.1.1 Bakgrund

Skador orsakade av frostsprängning kan delas in i två grupper, dels inre frostsprängning och dels ytfrostsprängning. I de båda fallen är det i stort sett samma mekanismer som orsakar skadorna. Vanligtvis finns en skillnad då inre frostsprängning oftast inträffar hos betong i kontakt med rent vatten, medan ytfrostsprängning är vanligare då betongen står i kontakt med salthaltigt vatten, Fagerlund (1994).

Skador orsakade av frostsprängning i betong är ett stort problem i länder med kallt klimat, exempelvis Sverige. Betongkonstruktioner i vatten, till exempel dammar, är speciellt utsatta för frostsprängning och redan i början av 1900-talet observerades skador, Fridh (2005). Även betongbroar har genom åren drabbats av omfattande skador på grund av frostsprängning, Fagerlund (1989).

En orsak till dessa skador var inledningsvis en bristande kunskap om vilken inverkan vct har på betong. Många konstruktioner byggdes av betong med högt vct och blev därmed inte vattentäta. Likaså var tillgången på cement inte lika god som idag, varav speciellt stora konstruktioner med stor förbrukning av cement uppfördes i en sämre betong med lägre cementhalt än en mindre konstruktion skulle ha fått. Dessa konstruktioner drabbades relativt omgående av urlakning och frostsprängning, Fridh (2005).

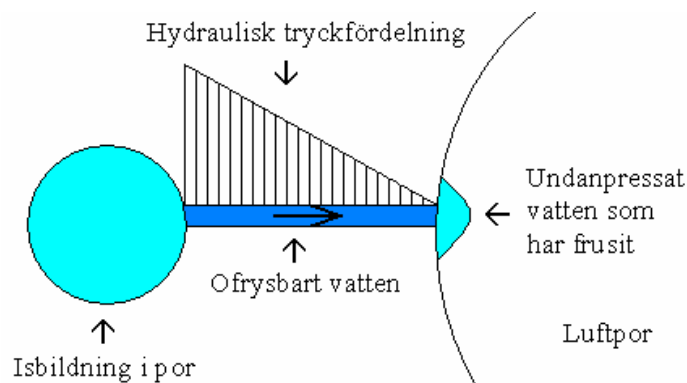


På 1930-talet hade lufthaltens betydelse för betongens frostbeständighet upptäckts i USA. Användandet av betong med luftinblandning fick där ett brett genomslag på 1930- och 1940-talet, Fridh (2005). Först 1965 infördes betong med luftinblandning vid nyproduktion av broar i Sverige, Fagerlund (1989). År 1966 utkom föreskrifter om luftinblandning, men då bara gällande de mest utsatta konstruktionerna. Därefter har antalet skadefall orsakade av frostsprängning i kombination med rent vatten minskat i Sverige, Fridh (2005).

En del betongkonstruktioner utsatta för vatten med saltinblandning har visat sig frysa sönder trots luftinblandning. För att i förväg kunna bedöma frostbeständigheten på en aktuell betongblandning har det utvecklats en standardiserad provningsmetod i Sverige, denna kallas Boråsmetoden och betecknas SS 13 72 44. Provningsmetoden gäller dock endast ytavskalning i NaCl-lösning. Det finns ingen väletablerad provningsmetod för frostbeständighet i rent vatten, Fridh (2005).

### 3.2.1.2 Hydrauliskt tryck

Ett hydrauliskt tryck i betong uppstår under nedkylningsperioden då porvatten, som trycks undan av den nioprocentiga volymökningen vid isbildning, måste pressas vidare till luftfyllda porer. Beroende på permeabiliteten i betongen sker detta porvattenflöde olika fort, vilket avspeglas på det hydrauliska trycket som inledningsvis kan bli stort, se figur 12. Om trycket blir för stort och draghållfastheten överskrids skadas cementpastan i betongen, Fagerlund (1994). Likaså är isbildningshastigheten avgörande för hur mycket porvatten som måste transporteras i betongen. Både inre frostsprängning och ytfrostsprängning kan orsakas av ett stort hydrauliskt tryck, Fridh (2005).



Figur 12 – Hydrauliskt tryck då vatten pressas till luftpor. Fagerlund (1999)

Försök har visat att det behövs betydligt större volym luftfyllda porer än de teoretiskt beräknade nio procenten av den totala porvolymen. Detta beror på att de luftfyllda porerna måste vara tillgängliga för den expanderande isen så att det undanpressade vattnet har någonstans att ta vägen. Med tillgänglighet menas att luftporerna inte kan befinna sig alltför långt bort från den vattenfyllda kapillärpor där isbildning sker. I ett sådant fall fyller den luftfyllda poren ingen som helst funktion, Fagerlund (1999).

Då Darcy's lag om vattenströmning innebär att ju längre sträcka vatten ska strömma desto större initialt tryck krävs, Nilsson (2006). Detta tryck får inte överskrida betongens draghållfasthet och då trycket är beroende av sträckan finns det ett kritiskt avstånd till närmsta luftfyllda por, Fagerlund (1999).

$$g = -\frac{K}{\eta} \cdot \frac{dP}{dx} \quad [\text{kg} / \text{m}^2 \cdot \text{s}]$$

$g$  = vattenflöde [ $\text{kg} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]

$P$  = trycket [ $\text{Pa}$ ]

$K$  = permeabilitetskonstant [ $\text{m}^2$ ]

$\eta$  = vätskans viskositet [ $\text{Ns} / \text{m}^2$ ]

$x$  = längden [ $\text{m}$ ]

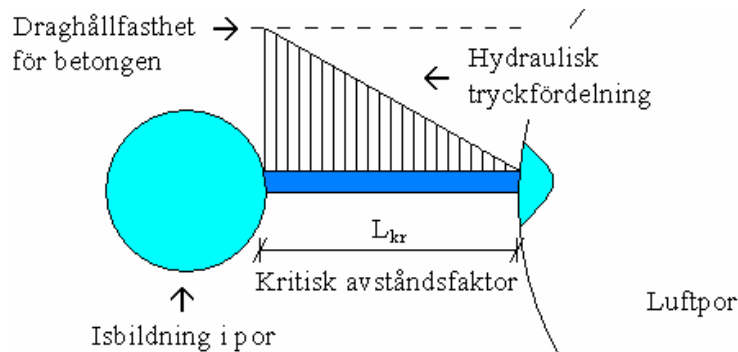
Hur stort det genomsnittliga avståndet mellan en vattenfylld kapillärpor och en luftfylld por är beror på två faktorer, dels volymandelen luftporer i betongen och dels porernas storlek. Enbart en hög volymandel luftporer är inte tillräcklig för att skydda betongen mot att frysa sönder. Få och stora luftporer resulterar i långa avstånd och då säger Darcy's lag att stora tryck uppstår med risk för att betongens draghållfasthet överskrids. Det är således viktigt att luften fördelas på många och små porer i betongen med mindre avstånd som följd. Utifrån volymandelen luftporer och storleken på porerna kan betongens genomsnittliga avståndsfaktor  $L$  beräknas, Fagerlund (1999).

$$L = r \left( 1,4 \left( \frac{1}{a} \right)^{1/3} - 1 \right) [\text{m}]$$

$r$  = medelradien hos porerna [ $\text{m}$ ]

$a$  = volymandelen luftfyllda porer i betongen [ $\text{m}^3 / \text{m}^3$ ]

Det avstånd som föranleder ett så högt tryck i betongen att skador uppstår kallas den kritiska avståndsfaktorn och betecknas  $L_{kr}$ , se figur 13. Beräkningar utförda av Fagerlund år 2004 har visat att  $L_{kr}$  ligger mellan 0,37 och 0,43 mm beroende på val av vct för betongen, Fridh (2005).



Figur 13 – Kritisk avståndsfaktor i förhållande till betongens draghållfasthet.

Effektiv vattenmättnadsgrad  $S_f$  är avgörande för avståndet  $L$  då en hög vattenmättnadsgrad innebär att en stor del av porsystemet är vattenfyllt. Avstånden mellan de fortfarande luftfyllda porerna har ökat och därav vikten att ha många och små luftporer jämnt fördelade i hela betongmassan. Provningsar har visat att den kritiska vattenmättnadsgraden för betong kan ligga kring  $S_{kr} = 0,80-0,85$ , vilket ska jämföras med det teoretiska värdet  $S_{kr} = 0,917$ , Fagerlund (1999).

### 3.2.1.3 Tillväxt av islinser

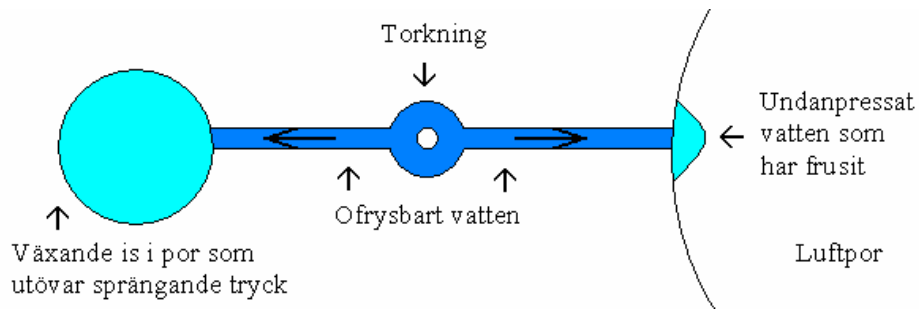
Islinstillväxt kan vid vissa förhållanden vara en skademekanism med större effekt än det hydrauliska trycket. I ett poröst material som betong kan det samtidigt finnas fruset och ickefruset vatten. Då det fria energiinnehållet skiljer sig mellan fruset och ickefruset vatten skapas förutsättningar för islinstillväxt.

#### Mikroskopiska islinser

Beroende på vattenmättnadsgrad och storleksfördelning på porsystemet kommer det att vid samma temperatur existera vattenfyllda kapillärporer, delvis vattenfyllda kapillärporer och luftfyllda porer. Beroende på storleken på porerna kan det vid frystemperatur samtidigt existera kapillärporer med is och kapillärporer med ofruset vatten, så kallat underkyllt vatten, Fagerlund (1999).

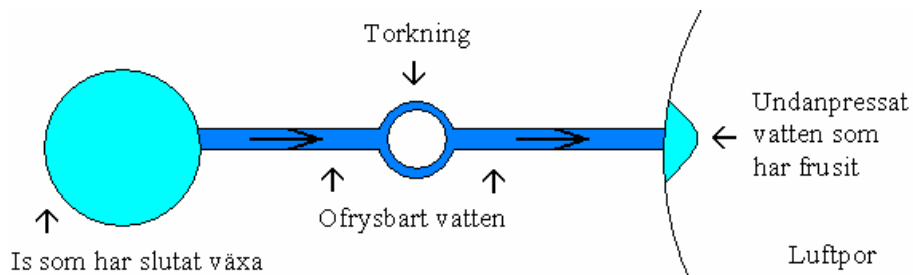
Vid samma temperatur skiljer sig det fria energiinnehållet mellan is och underkyllt vatten åt, där isen har det lägre värdet. Vid initial isbildning i den vattenfyllda kapillärporen pressas det undanträngda vattnet ut till luftporen med följden att trycket i kapillärporen sänks. Det undanträngda vattnet tillåts frysa i luftporen. När trycket är normaliserat är det energiinnehållet i is respektive vatten som styr riktningen på vattenflödet. Således kommer det underkyllta vattnet att vandra mot isen dels i kapillärporen och dels mot luftporen, se figur 14. Följaktligen kommer en uttorkning och därmed krympning av betongen att ske, Fridh (2005).

## Frostsprängning i betongdammar



Figur 14 – Vattentransport både till kapillärpor och luftpor. Fagerlund (1999)

Så länge isen har ett lägre energiinnehåll än vattnet fortsätter isen att växa. Samtidigt som isen växer kommer den att börja utöva ett tryck på porväggarna och ett ökat tryck innebär ett ökat energiinnehåll i isen. Då isen i luftporen tillåts växa utan nämnvärt mottryck bibehålls det låga energiinnehållet och hela vattenflödet ändrar riktning mot luftporen istället, se figur 15. Beroende på avståndet mellan en kapillärpor med isbildning och en luftpor med isbildning kan olika stora tryck i kapillärporen uppstå innan vattenflödet ändrar riktning, Fagerlund (1999).

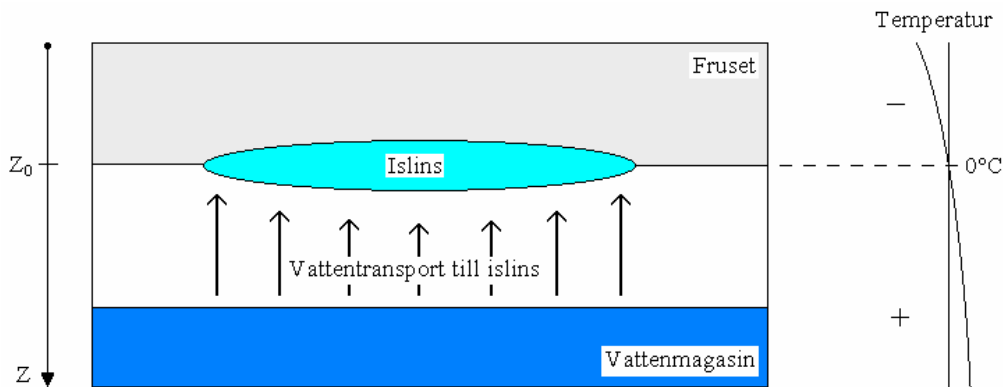


Figur 15 – Vattentransport enbart till luftpor. Fagerlund (1999)

Har trycket i kapillärporen överskridit draghållfastheten innan vattenflödet ändrade riktning är betongen skadad. Det finns alltså en kritisk avståndsfaktor också mellan luftporerna vid bildning av mikroskopiska islinser. I betong med liten avståndsfaktor har en krympning till följd av uttorkningen av betongen observerats då merparten av det underkylda vattnet enkelt tillåts bilda is i luftporen. I betong med stor avståndsfaktor har istället en volymökning noterats, vilket beror på att isbildningen till stor del skett i kapillärporerna med följd av att betongen blir skadad. Även osmotiskt tryck kan bidra till en ökad destruktiv effekt av mikroskopisk islinnsbildning. Fridh (2005).

### Makroskopiska islinser

En makroskopisk islins kan jämföras med de islinser som är verksamma vid tjällyftning av mark vintertid. En förutsättning för tillväxten av makroskopiska islinser är att det uppstår en temperaturfördelning i betongen så att vattnets fryspunkt inträffar vid djupet,  $Z_0$ . Vidare måste temperaturfördelningen vara konstant tillräckligt länge för att islinserna på nivån  $Z_0$  ska hinna växa till och orsaka skador. Till sist måste också betongen ha en tillräckligt hög permeabilitet för att kunna försörja islinserna med vatten, Fridh (2005). För schematisk bild av makroskopisk islinsebildning, se figur 16.



Figur 16 – Förhållande vid makroskopisk islinsebildning. Fagerlund (1999)

Att det kan ske en vattentransport till islinserna beror på skillnaden i fritt energiinnehåll mellan islinserna och det ofrusna vattnet. Vid samma temperatur har is ett lägre energiinnehåll än det ofrusna vattnet. Vatten med högre temperatur än isen får ett högre fritt energiinnehåll, vilket resulterar i ett större vattenflöde till isen. Naturen strävar alltid efter att utjämna olikheter. Så länge inte temperaturfördelningen eller tillgången på vatten ändras kommer islinserna att fortsätta växa och därmed orsaka skador i betongen, Fagerlund (1999).

På 1940-talet bevisades det att makroskopiska islinser kan bildas i betong med hög permeabilitet i kontakt med ofrusat vatten. Exempel på konstruktioner där fenomenet kan inträffa är gamla betongdammar och fundament i vattenlinjen. Hög lufthalt kan inte hindra makroskopisk islinstillväxt, Fridh (2005).

#### 3.2.1.4 Osmotiskt tryck

Osmotiskt tryck kan beskrivas genom att två vätskor med olika joninnehåll åtskiljs med en semipermeabel skiva. På grund av potentialskillnaden mellan de två olika lösningarna transporteras vätskan med högre potential genom membranet för att skapa jämvikt. Lösningen som har högst koncentration joner har den lägsta potentialen, således sker ett flöde från lösningen med lägst koncentration, Jacobsen (1995).

## Frostsprängning i betongdammar

---

Osmotiskt tryck kan uppkomma i betong genom att två porer, en liten por med ofryst saltlösning och en stor por med delvis is och delvis saltlösning, separeras med cementgel. Då mer is bildas ökar koncentrationen av saltlösningen i den stora poren och detta leder till att det ofrysta vattnet i den lilla poren flödar genom cementgelen in till den stora poren för att jämna ut koncentrationsskillnaden, Jacobsen (1995).

Raoult's lag beskriver potentialskillnaden mellan en jonlösning och rent vatten, vilket ger upphov till ett ökat tryck, Jacobsen (1995).

$$\mu_{isol} = \mu_{0liq} + R \cdot T \cdot \ln a_i$$

$\mu_{i\ sol}$  = den kemiska potentialen i lösningen [J/mol]

$\mu_{i\ liq}$  = den kemiska potentialen i rent vatten [J/mol]

R = allmänna gaskonstanten [J / mol·K]

T = absolut temperatur [K]

$a_i$  = aktivitet i lösningen ( $\approx$  jämviktsångtryck över lösningen)

Det osmotiska trycket är beroende på temperatur och koncentration av lösningarna, vilket illustreras i Van't Hoff's ekvation. Trycket minskar med en lägre temperatur och ökar med en högre koncentration, Jacobsen (1995).

$$P = \frac{R \cdot T}{V} \cdot \ln x_i$$

P = tryck [Pa]

R = allmänna gaskonstanten [J / mol·K]

T = absolut temperatur [K]

V = molvolym hos rent vatten [m<sup>3</sup>/mol]

$x_i$  = koncentration av lösta joner [mol/m<sup>3</sup>]

Beräkningar har visat att med Van't Hoff's ekvation kan trycket uppgå till 32 MPa, vilket är avsevärt högre än betongens draghållfasthet, som vanligtvis ligger runt 5MPa, Jacobsen (1995).

Det är viktigt att temperaturen inte sjunker för fort under frysningen för att osmotiskt tryck skall uppstå. För att det osmotiska trycket skall kunna uppstå och ha möjlighet att skada betongen krävs att den får verka under en längre tid. Det maximala osmotiska trycket uppkommer då det blir ett stationärt flöde, vilket för betong kan variera mellan cirka en dag och upp till åtta dagar. Variationen kan delvis förklaras med att porstrukturen och porositeten i cementpastan av naturliga skäl varierar från betong till betong, Jacobsen (1995).

### 3.2.1.5 Pumpningseffekt

Det förekommer två olika pumpningseffekter då frostsprängning undersöks. Den första pumpningseffekten beror på att betongen fryser och tinar i ständig kontakt med vatten. Den andra pumpningseffekten uppkommer då det finns joner i vattnet eller betongen, vilket ger upphov till osmotiskt tryck. Pumpningseffekten förstärker vatteninträngningen i betong, Jacobsen (1995).

En förklaring till pumpningseffekten som uppkommer vid frysning och tining är att då is i betongen smälter uppstår undertryck, vilket leder till ökad vatteninträngning. En annan förklaring till pumpningseffekten vid frysning och tining är differens i den kemiska potentialen på grund av temperaturvariationer och vattnets fasdifferenser i betongen. Den kemiska potentialen kan beskrivas med att vatten i porerna har olika energinivå beroende på temperatur samt vilken fas de befinner sig i. Några exempel är att energinivån är högre i vatten med hög temperatur än vatten med låg temperatur samt att underkyllt vatten har en högre energinivå än is trots att de har samma temperatur. Då naturen strävar efter jämvikt i betongen uppstår ett vattenflöde från den mängden med hög energi till den med lägre, Jacobsen (1995).

Pumpningseffekten som uppkommer då betong har kontakt med jonlösningar beror dels på en sänkning av den kemiska potentialen som inträffar när vissa porer fylls med exempelvis en saltlösning och dels då det sker en sänkning av ångtrycket i de vattenfyllda porerna i närvaro av joner. Detta fenomen kallas osmotiskt tryck, Jacobsen (1995).

### 3.2.1.6 Inre frostsprängning

Vid frysning av betong med högre vattenmättnadsgrad än den kritiska kommer betongen att utsättas för inre frostsprängning. Den inre frostsprängningen är direkt förödande för betongens hållfasthet och E-modul, Fagerlund (1999). Betongens kritiska vattenmättnadsgrad varierar med betongkvalitet, lufthalt och kritisk avståndsfaktor.

Det som inträffar när betong med en för hög fukthalt fryser är att inre sprickor i betongen bildas. Skadorna uppkommer både genom islinstillväxt och hydrauliskt tryck. Utöver den direkta nedsättningen av betongens hållfasthet kan inre frostsprängning dessutom ge upphov till sämre armeringsvidhäftning. De sprickor som uppkommer inne i betongen leder till att permeabiliteten i betongen ökar. Konsekvensen av detta är att vattnet har lättare att transporteras i betongen vilket i förlängningen ger upphov till allt större skador, Fagerlund (1999).

Då betong är i kontakt med en saltlösning påverkas inte den inre frostsprängningen förrän lösningen kommit in i materialet. När detta inträffar blir dock skadorna mer omfattande då saltlösningen på grund av det osmotiska trycket kan transportera in mer saltlösning i betongen. Skadorna som uppkommer är av samma typ som vid frysning i rent vatten, Jacobsen (1995).

För att undvika inre frostsprängning är det bäst att använda en betong med lågt vct, samt en hög lufthalt med ett finfördelat luftforsystem. För makroskopiska islinser är det dock enbart betongens täthet som kan motverka skadorna, Fridh (2005).

### 3.2.1.7 Yttre frostsprängning

Till skillnad från inre frostsprängning påverkar inte ytfrostsprängning betongens hållfasthet och E-modul, utan orsakar främst estetiska skador genom avskalning. Skadorna kan dock med tiden påverka konstruktionens livslängd då täcksiktet för armeringen minskar och armeringen snabbare kan utsättas för andra skademekanismer, Fagerlund (1999).

För att avskalning skall kunna uppstå krävs det att materialet är utsatt för rent vatten eller saltlösning under hela fryscykeln. Det räcker med att vattnet eller saltlösningen någon gång under fryscykeln försvinner från betongytan för att avskalningen skall upphöra, även om betongytan fortfarande har en kritisk fukthalt. Detta till skillnad från inre frostsador där det räcker med att betongen är tillräckligt fuktig för att skador skall kunna uppstå. Trots den avgörande skillnaden är det fortfarande i stora drag samma mekanismer som orsakar skadorna, med andra ord hydrauliskt tryck och islinstillväxt. Då betongen utsätts för en saltlösning kan det osmotiska trycket komma att utgöra en viktig roll när det gäller omfattningen på skadorna, Jacobsen (1995).

Avskalningen visar sig inledningsvis med att tunna flarn av cementbruk, oftast inte tjockare än en millimeter, lossnar från den utsatta ytan. Även små ytliga sprickor kan uppstå. Med tiden lossnar även större partiklar, av typen sand, grus eller sten, och detta beror på att cementpastan runt kornen gradvis försvagas, Jacobsen (1995).

Effekten av att betongen utsätts för fryscykler i vatten är att vattenabsorptionen blir kraftigare än vid enbart kapillärsugning och långsam vattenfyllning av luftporer. Detta leder således till att provkroppar som förvaras i vatten under dessa förhållanden får en avsevärt högre fukthalt än kroppar i vatten som inte fryser och tinar. Det som förklarar denna ökning av vatten är pumpningseffekten till följd av fryscykler. Det uppkommer dock inga direkta skador på grund av detta flöde. Orsaken till detta är bland annat att ismältningshastigheten är så låg att det hydrauliska trycket i kapillärporerna inte blir tillräckligt stort för att betongens draghållfasthet skall överskridas. Pumpningseffekten medför att den högsta fukthalten uppkommer i ytan som är i kontakt med vattnet, vilket resulterar i kraftigare frostsador än i provkroppens inre. Med andra ord uppkommer avskalning, Jacobsen (1995).



Då betongen utsätts för saltlösning blir skadorna avsevärt större än då det enbart är rent vatten som är i kontakt med betongen. Detta beror på att osmotiskt tryck adderas till den pumpningseffekt som orsakas av fryscyklar. Det osmotiska trycket blir även en skademekanism när betongen utsätts för frysning, Jacobsen (1995).

Ytavskalning undviks lättast genom att använda en tät betong med ett porsystem innehållande en stor mängd finfördelade luftporer, Jacobsen (1995).

### **3.2.2 Karbonatiseringsinitierad armeringskorrosion**

I en opåverkad betong råder alltid en hög alkalitet med ett pH-värde kring 12,5. Med detta höga pH-värde försätts armeringsstål i ett så kallat passivt tillstånd och ingen korrosion av stålet kan ske.

Processen karbonatisering kan översiktligt beskrivas med att luftens koldioxid långsamt tränger in i betongen och kemiskt reagerar med de kalciumföreningar och alkalihydroxider som finns där. Följden blir att pH-värdet i betongen sjunker till <9 och när karbonatiseringsfronten når armeringsstålet börjar det korrodera med volymutvidgning som följd. Volymutvidgningen orsakar ett tryck mellan betong och stål där betongen antingen spräcks eller sprängs bort helt och hållet. Detta leder till att konstruktionens bärförmåga reduceras, Fagerlund (1992).

Karbonatiseringen initieras alltid utan någon tidsfördröjning i ytskiktet, där betong och luft möts, för att därefter med en relativt väldefinierad front arbeta sig in i betongen, Fagerlund (1996). Bakom fronten är all betong karbonatiserad och framför fronten är betongen opåverkad. Så fort fronten når armeringsstålet antas korrosionen börja och hastigheten på korrosionen styrs av tillgången på syre och betongens elektrolytiska ledningsförmåga som är direkt sammankopplad med tillgången på fukt, Fagerlund (1992).

Det finns ett antal faktorer som styr hastigheten på karbonatiseringen och dessa är:

#### **Mängden karboniserbart material**

Med en större andel karboniserbart material, det vill säga kalk, kommer en långsammare karbonatisering att inträffa. Det kan därför vara avgörande vilken sorts cement som har använts och om mineraliska tillsatsmedel har tillförts, Fagerlund (1992).

#### **Halten koldioxid hos omgivande luft**

Jämfört med normalfallet i omgivande luft kommer en förhöjd halt av koldioxid innebära att karbonatiseringen går snabbare. Effekten blir omvänd vid en lägre halt av koldioxid, Fagerlund (1992).

### **Tätheten på betongen**

En avgörande faktor för hastigheten på karbonatiseringen är förmågan för koldioxiden att ta sig fram till okarbonatiserad betong. En tät betong har alltså större förmåga att genom en låg diffusionskoefficient fördröja karbonatiseringen. Täthet på betong styrs med vattencementtalet, Fagerlund (1992).

### **Täckskiktets fukttillstånd**

Karbonatisering kräver tillgång på vatten, varav en mycket torr betong karbonatiseras långsamt. Den optimala fuktnivån för en snabb karbonatisering ligger kring RF 50-60 %, vilket motsvarar en normal inomhusmiljö. En väldigt blöt betong karbonatiseras dock långsamt, men då på grund av att diffusion av koldioxid sker betydligt långsammare i vatten än i luft, Fagerlund (1992).

### **Fukthårdning före karbonatiseringen**

En väl fukthärdad betong får en minskad permeabilitet varav motståndet för diffusion av koldioxid i ytskiktet ökar. Permeabiliteten för en dåligt fukthärdad betong blir större med en ökad hastighet på karbonatiseringen i ytskiktet som följd, Fagerlund (1992).

### **3.2.3 Kloridinitierad armeringskorrosion**

Armeringsstål i betong som utsätts för saltpåverkan löper risk att korrodera till följd av förhöjd koncentration fria kloridjoner kring stålet. Följden av korrosion blir att betongen spräcks eller sprängs bort från armeringsstålet med en tilltagande hastighet på korrosionen då den skyddande miljön runt stålet kraftigt försämrats. Till skillnad från koldioxidtransport vid karbonatisering tränger inte kloriderna in med en väldefinierad front, utan koncentrationen av klorider är störst vid ytan för att avta med djupet i betongen, Fagerlund (1992).

Korrosion initieras inte omedelbart då de första kloriderna når fram till armeringsstålet, utan sker först då ett så kallat tröskelvärde har överskridits. Det kan passera fler decennier innan koncentrationen av klorider är tillräckligt hög för att korrosion ska kunna inträffa. Samtidigt är det inte ovanligt att tröskelvärdet aldrig kommer att överskridas vid armeringsstålet. Då tröskelvärdet väl har överskridits påbörjas ofta en lokal korrosion och under ogynnsamma förhållanden kan skadorna bli stora på kort tid. Speciellt utsatta konstruktioner är de med spännarmering, Fagerlund (1992). Förutom tillgång på kloridjoner krävs även syre och fukt för att er hålla korrosion på armeringen, Byfors, Tuutti (1994).

Faktorer som påverkar initieringstiden för kloridinitierad armeringskorrosion:

#### **Koncentration av klorider vid betongytan**

En svag exponering av kloridjoner innebär att transporten av klorider in i betongen oftast blir låg. En hög exponering innebär däremot att det finns en risk för en hög koncentration av klorider i betongen. Med andra ord är den omgivande miljön oftast en avgörande faktor för omfattningen av armeringskorrosionen, Fagerlund (1992).

### **Tröskelnivån av fria klorider vid armeringsstålet**

En hög koncentration av hydroxidjoner medför ett högt pH-värde i betongen, detta innebär att fler hydroxidjoner än kloridjoner adsorberas vid stålytan och armeringsstålet bibehåller sitt passiva tillstånd där ingen korrosion kan ske. Det måste alltså tillföras en stor mängd kloridjoner för att konkurrera ut hydroxidjonerna och överskrida tröskelnivån så att korrosion kan initieras, Fagerlund (1992).

Den ursprungliga koncentrationen av hydroxidjoner bestäms av cementets alkalihalt, det vill säga den lösliga halten av natrium och kalium. Med vct kan koncentrationen av hydroxidjoner påverkas då ett lågt vct innebär en ökad cementshalt och därmed indirekt en ökad alkalihalt. Samtidigt minskar mängden porvatten till följd av en tätare betong och uttorkningsgraden bidrar till en ökad koncentration av hydroxidjoner. Mineraliska tillsatsmaterial har en sänkande effekt på koncentrationen av hydroxidjoner, vilket alltid måste tas i beaktning då sådana tillförs betongen. Detta gäller speciellt silikastoft, Fagerlund (1992).

### **Diffusion av klorider i fuktig betong**

Tätheten och kloridbindningsförmågan hos täcksiktet är avgörande för hur lång tid det tar för kloriderna att diffundera in i betongen och överskrida tröskelnivån för initiering av korrosion på armeringsstål. Genom att sträva efter ett lågt vct kan en lägre kloriddiffusion uppnås. Cementtypen kan också anses ha inverkan på diffusionen då olika cementtyper har varierande förmåga att binda klorider, Fagerlund (1992). En god fukthärdning före kloridexponering kan också antas ha en positiv effekt genom en lägre diffusion av kloridjoner. De lägsta diffusionshastigheterna har uppnåtts då flygaska, slagg eller kiselstoft tillförts betongen, Byfors, Tuutti (1994).

### **Kapillärsugning av klorider i torr betong**

Då en torr betong utsätts för en kloridlösning kommer lösningen att sugas in kapillärt. Om en betong tillåts att torka ut med jämna mellanrum kommer en anrikning av kloridjoner att ske varje gång en kloridlösning fuktas upp betongen igen. Tröskelnivån kan därför uppnås på kort tid och det blir viktigt att se till att bara yttersta delen av täcksiktet utsätts för dessa fuktvariationer, Byfors, Tuutti (1994).

### 3.2.4 Urlakning

Om en otät betong exponeras för rent vatten som tillåts att strömma genom den kan vattnet lösa stora mängder av kalciumhydroxid. Det här gäller även en tät betong om den är drabbad av sprickbildning. När all kalciumhydroxid lösts upp kan även cementgelen brytas ner. Kalkurlakningen av betongen resulterar i förlust av hållfasthet, Fagerlund (1992).

Rent vatten kan också betecknas som mjukt vatten och är vanligt inom processindustrin, men framför allt i smältvatten och därmed indirekt i de norrländska älvarna, Fagerlund (1992).

I en otät, men osprucken, betong kan vattnet antas flöda genom alla porer i tvärsnittet. Tidigare undersökningar har visat att i stort sett hela betongvolymen blir urlakad i samma omfattning. Det tyder på att urlakningen sker i en takt som är lägre än den tid det tar för vattnet att strömma igenom. Vattnet hinner inte bli kalkmättat under genomströmningen utan löser hela tiden mer kalk, Fagerlund (1996).

Hastigheten på vattengenomströmningen är betydligt lägre i en tät betong och följden blir att vattnet hinner lösa mer kalciumhydroxid i ytskiktet jämfört med en snabb genomströmning. Då vattnet blir mättat på kalciumhydroxid i ytskiktet kommer det inte att kunna lösa mer kalciumhydroxid längre in i betongen. Urlakningen kan antas ske, likt karbonatisering, med en tydlig front som rör sig inåt. Effekterna av urlakningen blir därmed som störst i ytskiktet, Fagerlund (1996).

Senare undersökningar har dock visat att urlakningen koncentreras till de mest permeabla delarna av en betongkonstruktion där vattenflödet är som störst. Även urlakningen blir som störst där och medför att permeabiliteten ökar lokalt, vilket accelererar urlakningsprocessen, Ekström (2003).

En vanlig metod för att minimera risken för urlakning av kalciumhydroxid är att använda en betong med ett vct understigande 0,55–0,60. En sådan betong kan anses vara vattentät och någon större genomströmning av vatten sker inte. Även inblandning av puzzolaner kan ge en positiv effekt då dessa binder upp kalciumhydroxiden i mer svårslösliga föreningar. Samtidigt måste effekten av en sämre självläkningsförmåga vid sprickbildning tas i beaktning då mängden fri kalciumhydroxid i betongen minskar, Fagerlund (1992).

### 3.2.5 Erosion

Ytterligare en skademekanism som orsakar skador på ytskiktet på betong kring vattenlinjen är erosion. Vid kraftig isgång kan betongen mekaniskt nötas bort. Likaså kan kraftig kavitation vid utskoven i ett vattenkraftverk föranleda erosion. Motståndsförmågan för betong mot erosion kan styras med vct, ballastsort och halt av ballast i betongen, Fagerlund (1989).

### 3.2.6 Synergi mellan skademekanismer

I tidigare kapitel har olika skademekanismer presenterats var för sig. Det som inte har behandlats är vad konsekvensen blir om de skulle vara verksamma samtidigt. I verkligheten inträffar nämligen ofta synergieffekter där summan av två eller flera samtidigt verkande skademekanismers nedbrytande effekt överträffar summan av de enskilda skademekanismernas nedbrytande effekt var för sig, Fagerlund (1998b).

Ett exempel på synergi som kan inträffa är då en betongkonstruktion står i rent vatten, till exempel en betongdamm i en norrländsk älv. Cementpastan i ytan urlakas med följd av sämre motståndskraft mot frostsprängning, vilket medför mer omfattande skador, Fagerlund (2000).

### 3.3 Miljöpåverkan vid provning

Vid laboratorieförsök är det viktigt att försöka återskapa den naturliga miljön i så hög grad som möjligt, alternativt att kunna översätta det forcerade försöket till naturliga förhållanden på ett bra sätt, Jacobsen (1995).

En viktig aspekt när det gäller frysning och tining är med vilken hastighet temperaturen skall sänkas och höjas, för att undvika onaturliga fenomen. Hastigheten beror på geografiskt läge, årstid, samt vilket väderstreck konstruktionen som skall studeras ligger i. I Sverige ligger nedkylningshastigheten generellt mellan 1 och 6°C/h och vid extrema fall kan den uppgå till 14°C/h, Jacobsen (1995).

Försök har visat att det i första hand inte är antalet fryscyklar som är av störst vikt när det gäller frostförsök, utan istället mängden vatten i betongen. Det ger således ingen större skillnad i att frysa en provkropp med en fix fukthalt 10 gånger jämfört med 76 gånger såvida inte den kritiska vattenmättnadsgraden uppnåtts då antalet cykler blir avgörande för skadornas omfattning, Fagerlund (2002). En normal vintersäsong i svenskt klimat består ungefär av 50 fryscyklar, Fagerlund (1999).

Nedkylningshastigheten, samt längden på den nedkylda perioden, har stor inverkan på omfattningen av skadorna. För hydrauliskt tryck blir konsekvenserna större med en snabb nedkylning, medan åverkan från osmotiskt tryck blir störst då nedkylningen är långsam. Dessutom kräver de mikroskopiska och makroskopiska islinserna en lång nedkyld period för att de ska hinna växa tillräckligt mycket för att orsaka skador. Detta leder således till att det är svårt att exakt säga i hur stor grad de olika skademekanismerna är orsak till skador i betong. Fördelningen av vilken skademekanism som är mest verksam varierar från fall till fall, Jacobsen (1995).



## 4 Försök

### 4.1 Förstudie

Genomförandet av förstudien hade två mål. Det första målet var att utreda vilka temperaturer som betongen i referensdammen utsattes för och det andra målet var att skapa en provningsmodell där dessa temperaturer kunde uppnås. Dessutom undersöktes lämpligheten i att använda provkroppar med dimension 150 x 150 x 75 mm<sup>3</sup>, vilket motsvarar en halv standardkub.

#### 4.1.1 Metod

För att simulera väggens temperaturfördelning i referensdammen användes ingående data av både uppmätt och antagen karaktär. Därefter undersöktes möjligheten att simulera samma temperaturfördelning i en provkropp. Nästa moment blev att praktiskt testa den framtagna provningsmodellen i frys för att mäta temperaturfördelningen i provkroppen.

#### 4.1.2 Datorsimuleringar

För utveckling av en provningsmodell måste väggens temperaturfördelning först vara känd. Temperaturfördelningen undersöktes genom att utföra en datorsimulering på väggen i HEAT2, vilket är ett 2D datorprogram utvecklat av BLOCON. Då simuleringen inte gav svar på hur lång tid det tar att nå ett stationärt värmefflöde i modellen måste detta tas med i beaktning vid utformningen av provningsmodellen.

Enligt ritningar var väggens tjocklek två meter. Temperaturen inomhus är konstant hela året och ligger på 20°C. Utomhustemperaturen sattes till -30°C, vilket är en temperatur som inte varit ovanlig vid referensdammen under vinterhalvåret. Vattnets temperatur har antagits till 2°C, vilket baseras på att vattnet håller en tillräckligt hög temperatur där det inte kunnat frysa till is. Men samtidigt måste vattnet vara tillräckligt kallt för att det skulle kunna bildas is på betongen under vattenytan.



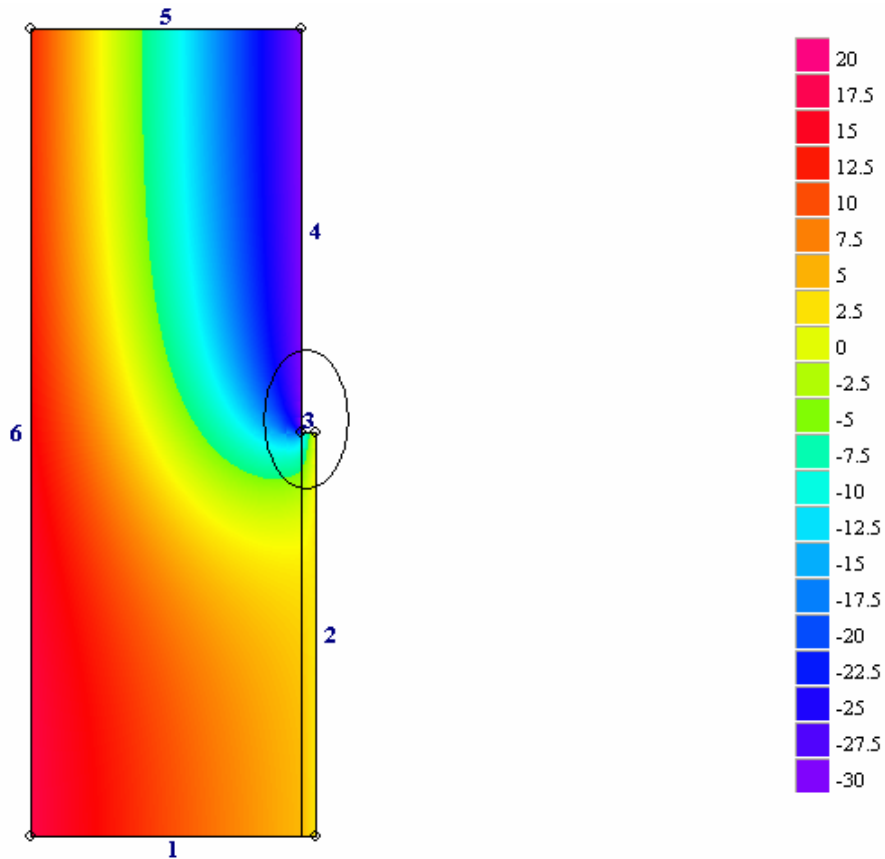


## Frostsprängning i betongdammar

Det första fallet simulerade var den oisolerade väggen,  $2 \times 6 \text{ m}^2$ , se figur 18. Det stora fältet representerar betongen och det smala representerar vatten. Ingångsdata för väggen redovisas i tabell 2. Det inringade området visar temperaturfördelningen i och omkring vattenlinjen för betongen och temperaturerna i de tre mätpunkterna redovisas i tabell 3.

*Tabell 2 – Ingångsdata till oisolerad vägg*

$T_{\text{luft}}$	-30°C	$q$ ränderna 1 och 5	0 W/m <sup>2</sup>
$T_{\text{vatten}}$	2°C	$R$ betong / inneluft	0,15 m <sup>2</sup> K/W
$T_{\text{inomhus}}$	20°C	$R$ betong / uteluft och betong / vatten	0 m <sup>2</sup> K/W



*Figur 18 – Temperaturfördelning [°C] på oisolerad vägg,  $2 \times 6 \text{ m}^2$ .*

*Tabell 3 – Temperaturer i mätpunkter.*

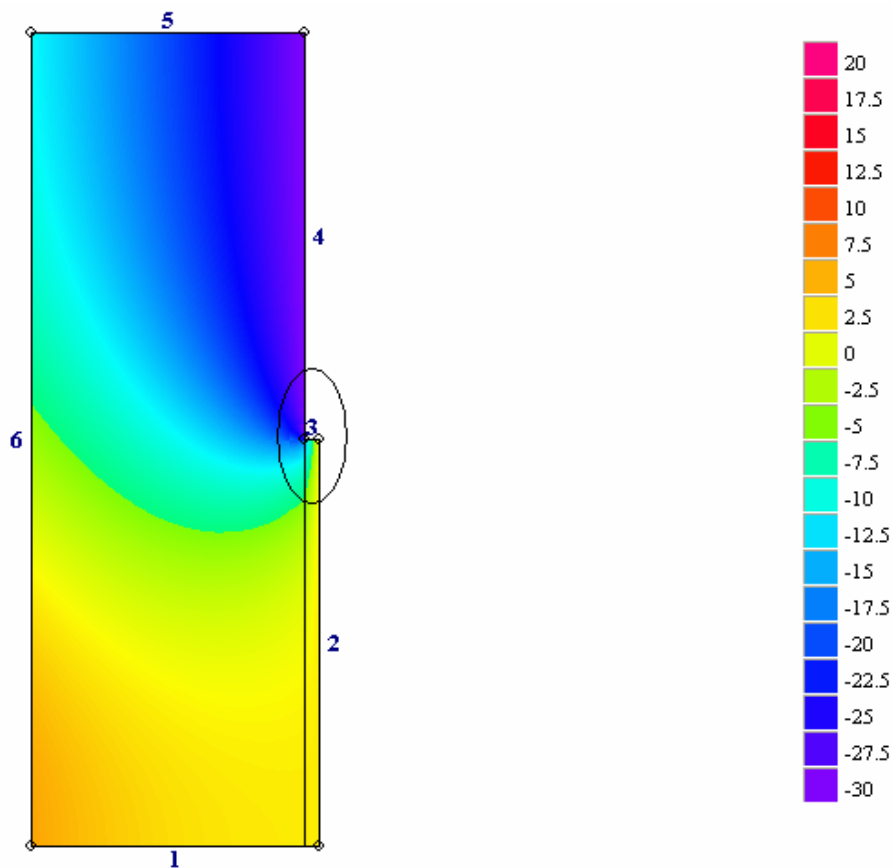
$T_{\text{yta +40 mm}}$	-27,2°C
$T_{\text{yta -40 mm}}$	-6,4°C
$T_{\text{kärna}}$	-16,3°C

## Frostsprängning i betongdammar

Det andra fallet simulerade var på den isolerade väggen,  $2 \times 6 \text{ m}^2$ , se figur 19. Det stora fältet representerar betongen och det smala representerar vatten. Ingångsdata för väggen redovisas i tabell 4. Det inringade området visar temperaturfördelningen i och omkring vattenlinjen för betongen och temperaturerna i de tre mätpunkterna redovisas i tabell 5.

*Tabell 4 – Ingångsdata till isolerad vägg.*

$T_{\text{luft}}$	-30°C	$q$ ränderna 1 och 5	0 W/m <sup>2</sup>
$T_{\text{vatten}}$	2°C	$R$ betong / inneluft	1,4 m <sup>2</sup> K/W
$T_{\text{inomhus}}$	20°C	$R$ betong / uteluft och betong / vatten	0 m <sup>2</sup> K/W



*Figur 19 – Temperaturfördelning [°C] på oisolerad vägg,  $2 \times 6 \text{ m}^2$ .*

*Tabell 5 – Temperaturer i mätpunkter.*

$T_{\text{yta} +40 \text{ mm}}$	-27,6°C
$T_{\text{yta} -40 \text{ mm}}$	-8,7°C
$T_{\text{kärna}}$	-17,8°C

## Frostsprängning i betongdammar

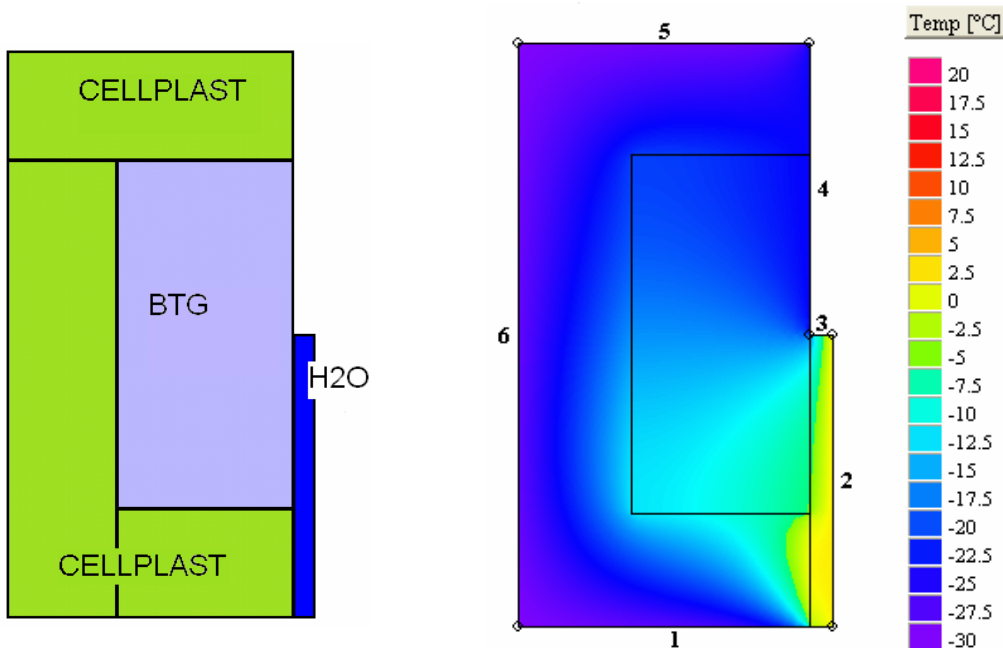
Då inte några större skillnader föreligger i temperaturerna i de beräknade punkterna, beroende på om väggen var isolerad på insidan eller ej, antogs isoleringens effekt på insidan av väggen vara av mindre betydelse. Således kommer det att räcka med en modell för att simulera de förhållanden som väggen befinner sig i.

Lämplig dimension på provkropparna vore  $150 \times 150 \times 75 \text{ mm}^3$  då det motsvarar en halv standardkub. För att avgöra provkroppens lämplighet genomfördes en simulering på temperaturfördelning i en sådan provkropp. För att säkerställa att endast en yta har kontakt med den kalla luften isolerades övriga sidor med 50 mm cellplast. Isoleringen minimerade även värmeflödet över de andra ytorna. Liksom tidigare befann sig halva provkroppen över vattenytan och den andra hälften under vattenytan, se figur 20.

Ingångsdata för väggen redovisas i tabell 6 och temperaturfördelningen för provkroppen visas i figur 21.

Tabell 6 – Ingångsdata till provkropp

$T_{\text{luft}}$	$-30^{\circ}\text{C}$	$q$ ränderna 1, 5 och 6	$0 \text{ W/m}^2$
$T_{\text{vatten}}$	$2^{\circ}\text{C}$	$R$ betong / luft och betong / vatten	$0 \text{ m}^2\text{K/W}$
$T_{\text{inomhus}}$	$20^{\circ}\text{C}$		



Figur 20 – Utformning av modell.

Figur 21 – Temperaturfördelning.

## Frostsprängning i betongdammar

De simulerade temperaturerna i motsvarande tre mätpunkter, vilka också gällde för den tidigare simulerade väggen i referensdammen, redovisas i tabell 7.

Tabell 7 – Temperaturer i mätpunkter.

$T_{\text{yta +40 mm}}$	-24,0°C
$T_{\text{yta -40 mm}}$	-6,8°C
$T_{\text{kärna}}$	-16,7°C

Resultat av simuleringen för provkroppen visar att det är möjligt att skapa en liknande temperaturfördelning i en provkropp med dimension 150 x 150 x 75 mm<sup>3</sup>. De simulerade temperaturerna i de tre fallen redovisas i tabell 8 för enkel jämförelse.

Tabell 8 – Jämförelse av simulerade temperaturer.

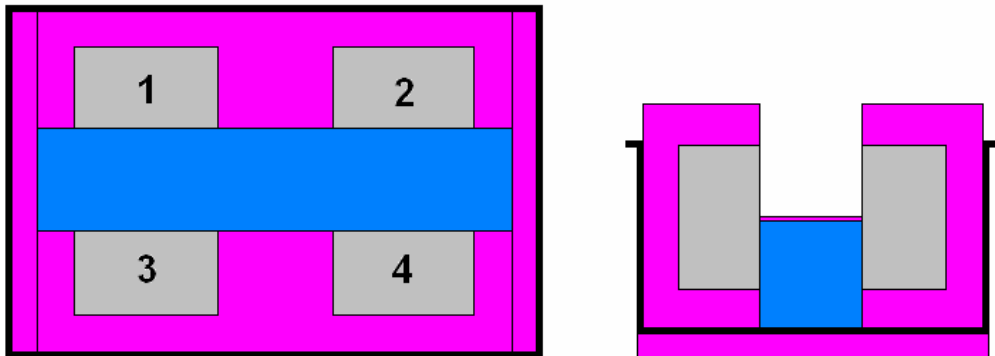
	Vägg med isolering	Vägg utan isolering	Provkropp
$T_{\text{yta +40 mm}}$	-27,2°C	-27,6°C	-24,0°C
$T_{\text{yta -40 mm}}$	-6,4°C	-8,7°C	-6,8°C
$T_{\text{kärna}}$	-16,3°C	-17,8°C	-16,7°C

Provkroppar med dimension 150 x 150 x 75 mm<sup>3</sup> kommer att användas.

### 4.1.3 Framtagande av provningsmodell

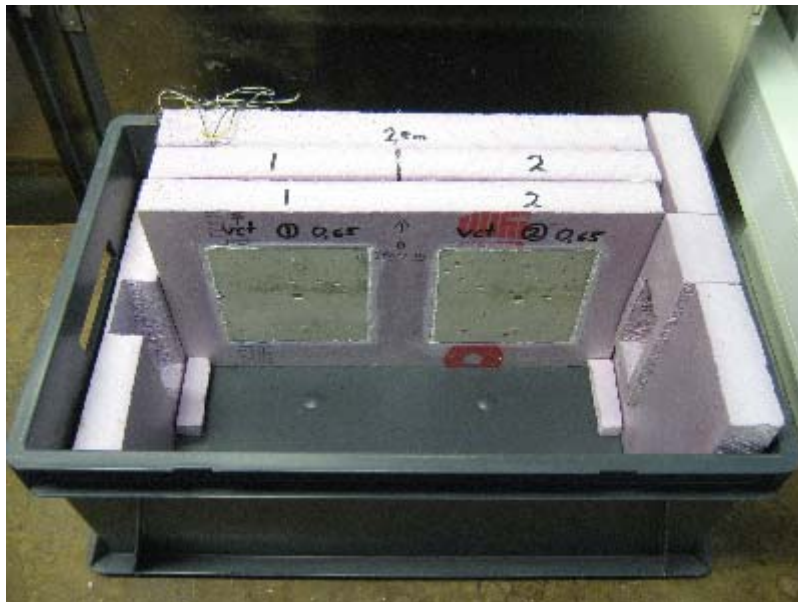
Den grundläggande tanken med en provningsmodell är att i så stor uträkning som möjligt återskapa de verkliga förhållandena i en laboratoriemiljö.

Provningsmodellens utformning bygger på att fyra provkroppar placeras i en plastbalja och befinner sig till hälften under vatten och till hälften över vatten. Endast en sida har kontakt med luft och vatten, då övriga sidor är isolerade med 50 mm cellplast. Vattnet isoleras genom att 40 mm cellplast placeras i kortsidorna av baljan, samt under plastbaljan. På vattenytan läggs en tunn isolering i form av ett liggunderlag med syfte att hindra att vattnet fryser. För principskiss med vy ovanifrån, samt i tvärsnitt, se figur 22.



Figur 22 – Principskiss av provningsmodell. Vy ovanifrån t.v. Tvärsnitt t.h.

Bild över placeringen av provkropparna 1 och 2 i provningsmodellen ses i figur 23.



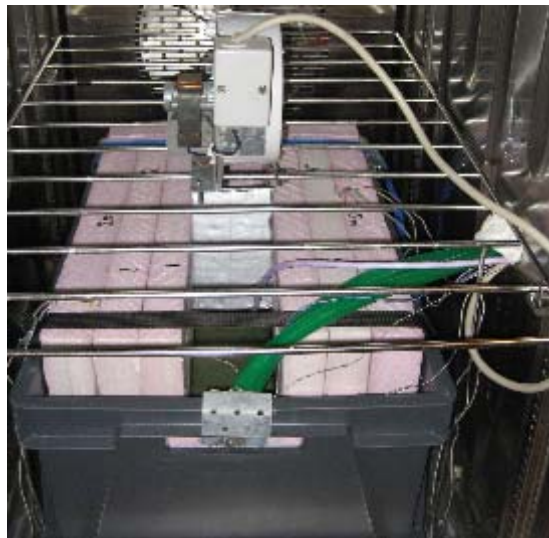
Figur 23 – Placering av provkroppar i provningsmodell.

För att säkerställa att vattnet håller rätt temperatur under hela provningen placerades en cirka tre meter lång värmeslinga som utvecklar 20 W/m i vattnet. Dessutom används en akvariepump för att cirkulera vattnet med syfte att hålla jämn temperatur i hela vattenvolymen, samt att säkerställa att värmeöverföringsmotståndet mellan vatten och betong är så gott som noll. För att se placering i provningsmodellen av värmeslinga, samt slangarna från akvariepumpen, se figur 24.



*Figur 24 – Placering av värmeslinga och slangar från akvariepump.*

För att nå de låga temperaturerna som erhållits i datorsimuleringarna användes en fläkt för att se till att värmeöverföringsmotståndet mellan betong och luft blir så lågt som möjligt. Stor risk fanns annars att stillastående luft utmed provkropparna skulle få en isolerande effekt på betongen och temperaturerna ej skulle bli så låga att is kunde bildas på betongen under vattenlinjen. Den kompletta provningsmodellens utformning ses i figur 25.



*Figur 25 – Kompletta provningsmodell.*

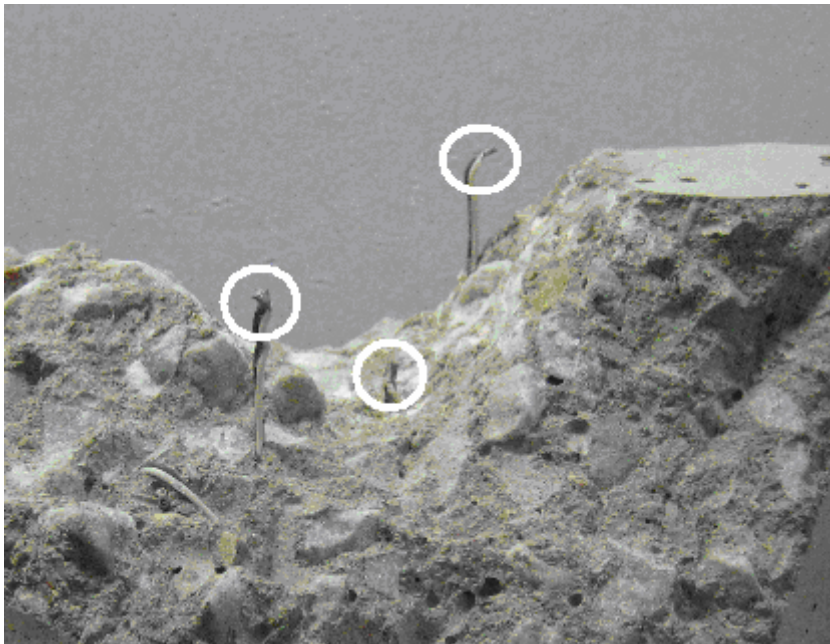
## Frostsprängning i betongdammar

---

För att kunna mäta temperaturen i de tre tidigare nämnda punkterna i provkropparna måste termoelement gjutas in. Placeringen av termoelementen är enligt följande:

- 1) I ytan av provkroppen, 35-40 mm ovan vattenlinjen, benämnd ÖK.
- 2) I kärnan av provkroppen, 30-35 mm från ytan och i nivå med vattenlinjen.
- 3) I ytan av provkroppen, 35-40 mm under vattenlinjen, benämnd UK.

Med en demolerad provkropp visas placeringen av de tre termoelementen, se figur 26. Den plana ytan till höger är en del av provkroppens framsida, alltså den yta som ska ha kontakt med luft och vatten. Som synes ligger två termoelement i höjd med den plana ytan, och det tredje och mellersta termoelementet ligger en bit in från ytan.



*Figur 26 – Placering av termoelement i demolerad provkropp.*

Som tidigare nämnts ger vår simulering i HEAT2 inget svar på hur lång tid det tar att uppnå jämviktsläge i värmeflödet i provkropparna. För att uppnå de simulerade temperaturerna i de tre mätpunkterna inom ett rimligt tidsperspektiv utvecklades en frys- och upptiningscykel. Utvecklingen skedde i form av upprepade försök med olika temperaturer eller tidsintervall under frysnings- respektive tiningsfasen. Då en komplett cykel där de simulerade temperaturerna uppnåddes och nedkylningshastigheten överensstämde med teorin avbröts försöken.

## Frostsprängning i betongdammar

Utifrån dessa försök framgick det att en cykel på 13 timmar uppfyllde kraven för vårt experiment med avseende på temperaturer och nedkylningshastigheter. Cykeln är uppdelad på åtta timmars frysning med lufttemperatur på cirka  $-38^{\circ}\text{C}$  och därefter fem timmars upptining med lufttemperatur  $+10^{\circ}\text{C}$ . Temperaturutvecklingen under två fryscyklar, vardera 13 timmar, visas i diagram 1. Diagrammet visar att avvikelserna i uppnådda temperaturer mellan de två provkropparna med termoelement är relativt liten. Denna temperaturutveckling anses vara representativ för hela det kommande experimentet.

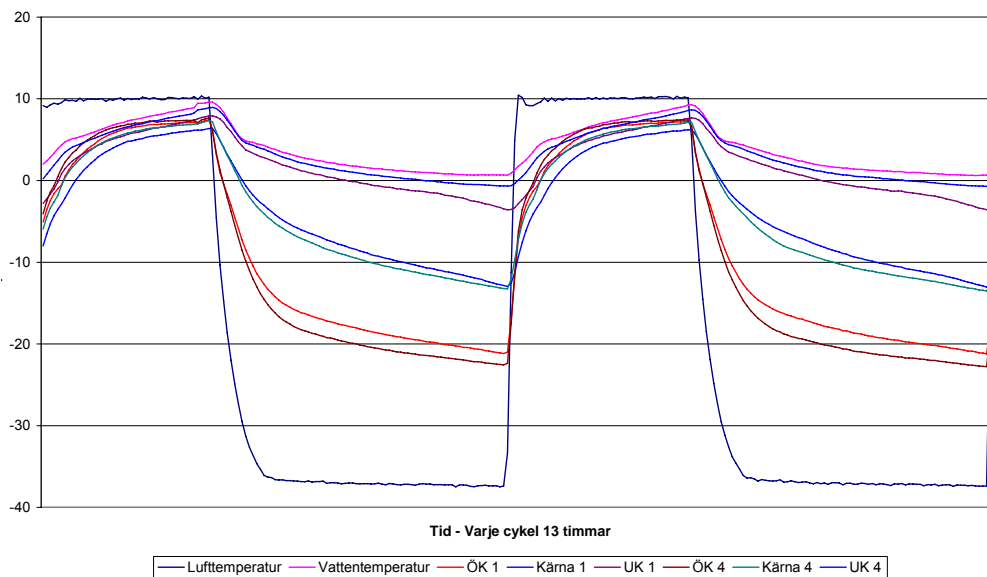


Diagram 1 – Principiell temperaturutveckling.

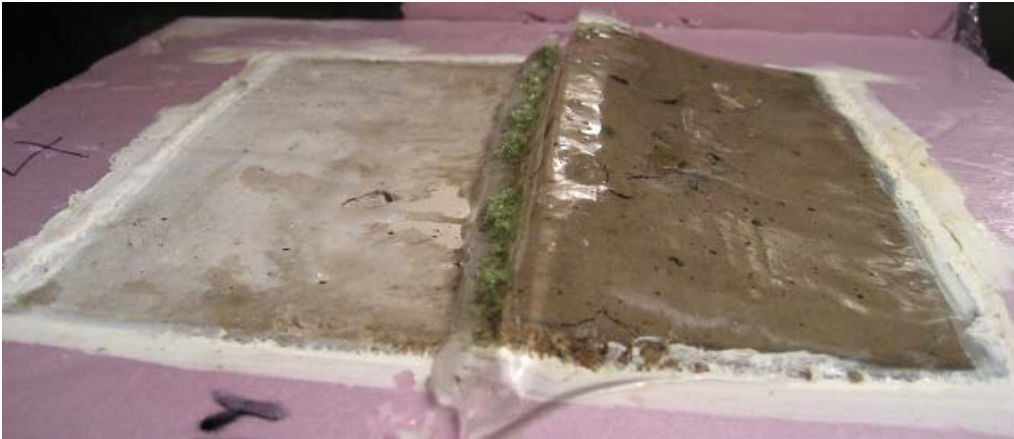
De uppnådda temperaturerna efter åtta timmars frysning jämförs sedan i tabell 9 med de simulerade temperaturerna från dels den riktiga konstruktionen och dels den simulerade provkroppen. Även den största nedkylningshastigheten [ $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ] vid temperaturer understigande  $0^{\circ}\text{C}$  redovisas för de tre mätpunkterna i tabell 9.

Tabell 9 – Temperaturjämförelse.

	Isolerad	Oisolerad	Provkropp	Fryscykel	Nedkylningshastighet
$T_{\text{yta } +40 \text{ mm}/\text{ÖK}}$	$-27,2^{\circ}\text{C}$	$-27,6^{\circ}\text{C}$	$-24,0^{\circ}\text{C}$	-23 till $-24^{\circ}\text{C}$	$-14,4^{\circ}\text{C}/\text{h}$
$T_{\text{yta } -40 \text{ mm}/\text{UK}}$	$-6,4^{\circ}\text{C}$	$-8,7^{\circ}\text{C}$	$-6,8^{\circ}\text{C}$	-1 till $-6^{\circ}\text{C}$	$-0,7^{\circ}\text{C}/\text{h}$
$T_{\text{kärna}}$	$-16,3^{\circ}\text{C}$	$-17,8^{\circ}\text{C}$	$-16,7^{\circ}\text{C}$	-15 till $-16^{\circ}\text{C}$	$-5,9^{\circ}\text{C}/\text{h}$



Den framtagna fryscykeln och den uppmätta temperaturfördelningen visade sig tillräcklig för att det skulle uppstå isbildning på betongytan under vattenlinjen. Efter åtta timmars frysning hade hela betongytan under vattenlinjen täckts av is. I figur 27 syns isbildningen som generellt var som tjockast i vattenlinjen för att därefter avta i tjocklek. Utseendet på isen från förstudien får anses vara representativ för kommande provning då samtliga provkroppar i förstudien fick is med likadant utseende.



*Figur 27 – Isbildning (till höger på bilden) på betongytan under vattenlinjen.*

Utifrån de resultat och erfarenheter som har erhållits från förstudien får provningsmodellens slutgiltiga utformning anses vara fullt funktionsduglig inför de kommande experimenten.

## **4.2 Material**

### **4.2.1 Betong**

I experimentet användes två olika betongkvaliteter. Det som skiljer de två betongkvaliteterna åt var både vct och lufthalt. Tanken var att använda en betong med högt vct och låg lufthalt, samt en betong med lågt vct och en lufthalt vilken anses vara tillräcklig för att betongen skall vara frostbeständig. Anledningen varför detta val har gjorts var för att testa en betong som med stor sannolikhet kommer att skadas samt en som förväntades kunna motstå påfrestningarna.

Betongkvaliteten som användes till referensdammen Porsi var inte känd, men historiskt sett användes betong utan lufttillsatser och med ett relativt högt vct på cirka 0,60, Hassanzadeh (2008). Således befinner sig referensdammens betong kvalitetsmässigt mellan de två som testades.

Båda betongkvaliteterna innehöll byggcement, samt grus- och stenfraktionerna 0-8 mm och 8-12 mm. Anledningen varför det inte användes större stenfraktioner berodde på ett behov att kunna utvärdera mindre och representativa delar av provkroppen i experimentets slutskede. Fullständiga blandningsrecept och egenskaper för de båda betongkvaliteterna presenteras i bilaga 2 och 3.

I tabell 10 presenteras data om de två betongkvaliteterna som användes i experimentet. Lufthalten och våtdensiteten uppmättes på nyblandad betong. Tryckhållfastheten testades efter 29 dagar genom kubhållfasthetstest och torrdensiteten beräknades efter experimentets genomförande.

Tabell 10 – Data om de två betongkvaliteterna

vct	Våtdensitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Torrdensitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Lufthalt [%]	Tryckhållfasthet [Mpa]
0,45	2247	2139	6,5	40,6
0,65	2353	2238	1,9	37,2

I tidigare kapitel framgår det att lufthalten behöver vara över fem procent för att betongen skall anses vara frostbeständig i rent vatten. Nygjuten betong utan luftporbildande tillsatser har en lufthalt på cirka två procent. Således kan konstateras att betongen med vct 0,45 uppfyllde kravet för frostbeständighet, medan betongen med vct 0,65 ej gjorde det. Dessa värden på lufthalten är som tidigare nämnts från den nyblandade betongen. Vad lufthalten är i betongen vid experimentets genomförande var ej känt, men kan antas ha ändrats en aning på grund av bearbetning.

#### 4.2.2 Provkroppar

Av de båda betongkvaliteterna göts vardera sex standardkuber 150x150x150 mm<sup>3</sup>. Under gjutningen preparerades två av kuberna med vardera tre termoelement. Placeringen av dessa var vid formytan, cirka 35 mm över och under mitten, samt en i mitten 35 mm in från formytan. Det gick inte att säkerställa exakt var termoelementen hamnade efter att kuberna hade vibrerats då termoelementen inte hade fixerats. Under förstudien preparerades en provkropp på samma sätt och då den stelnat lokaliserades termoelementen genom att hacka bort betongen vid ytan. Resultatet visade att termoelementen inte hade rört sig nämnvärt mycket. Utifrån detta antogs det att samma gällde för provkropparna till experimentet. Det kunde dock ej garanteras.

Kuberna förvarades inledningsvis ett dygn under en plastfilm för att undvika uttorkning av ytan. Därefter placerades samtliga kuber i ett rum med konstant temperatur 20°C i cirka tre veckor. De kuber som preparerats med termoelement placerades under den sista veckan innan experimentets start upp till hälften i vatten. Anledningen var för att inte låta betongen vara torr vid experimentets början.

Dagen innan experimentets start delades de två kuberna med termoelement på mitten. Resultatet blev fyra provkroppar  $150 \times 150 \times 75 \text{ mm}^3$ , där endast två av dem innehöll termoelement. Samtliga provkroppar placerades i vattenbadet igen till dess att experimentet påbörjades.

Av de resterande fyra betongkuberna användes två för att mäta betongens tryckhållfasthet, en användes som reserv om någon av de andra skulle gå sönder. Den sista användes för att få fram referensprovkroppar till mätning av vattenupptagning och spräckhållfasthetstest.

För att mäta vattenupptagningen i betongen under experimentet användes en referensprovkropp, med dimension  $100 \times 50 \times 35 \text{ mm}^3$ , av respektive betongkvalitet. Denna extra provkropp placerades i kortändan i samma balja som övriga fyra provkroppar och befann sig också till hälften under vatten.

### 4.3 Utrustning

#### 4.3.1 Ultraljudsmätare

Ett sätt att mäta inre skador i betongen är att använda en ultraljudsmätare. Till experimentet användes utrustning från C.N.S Instruments. Ultraljudsmätaren fungerar genom att en ljudsignal sänds ut från en sändare och tiden det tar för ljudet att nå mottagaren registreras. En ökad responstid indikerar att betongens inre har skadats. I ett standardtest går det utifrån responstiden att empiriskt bestämma betongens E-modul. Det var inte möjligt i detta experiment då standardprovkroppar ej användes. Dock gick det genom att jämföra utvecklingen över tiden utvärdera om betongen påverkats av frysningarna och eventuellt utsatts för inre frostsprängning.

#### 4.3.2 Frysar

Det användes två olika frysar för att genomföra experimentet. Frysarna har ungefär samma prestanda och någon skillnad beroende på vilken av frysarna som använts bör ej uppstå. Frysarna är av följande märke och modell:

Arc-test:                    Arc-500/-40+70  
Regulator: Jumo Dicon PRS

Weiss Technik:            KWP 305/80-180DU  
Regulator: Jumo Dicon PR

## 4.4 Experiment

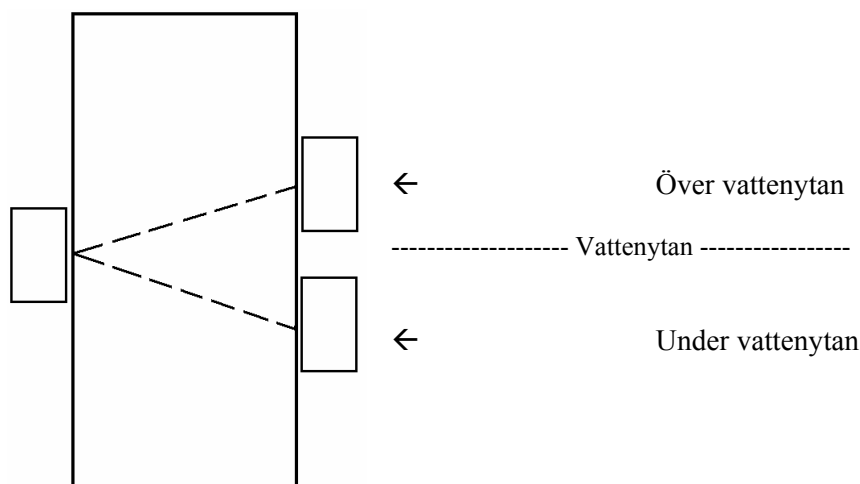
### 4.4.1 Metod – veckovis provning

Experimentet pågick i totalt fyra veckor och en gång per vecka, efter 11-13 fryscyklar då provkropparna var helt upptinade, avbröts experimentet och provkropparna undersöktes okulärt och med ultraljudsmätare.

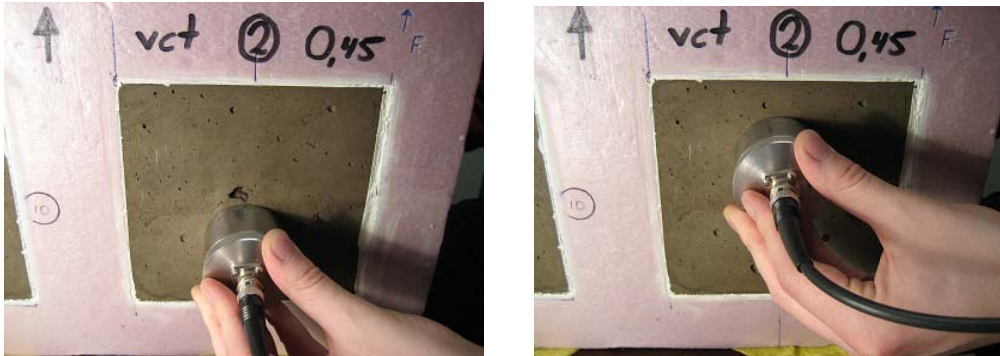
Den okulära undersökningen innebar att samtliga provkroppar fotograferades. Detta gjordes för att kunna undersöka omfattningen och utvecklingen av eventuell avskalning, samt för att undersöka om synliga sprickor uppkommit på provkropparna.

Mätningarna med ultraljud skedde genom att varje provkropp mättes vardera tio gånger, över respektive under vattenlinjen, med en liten variation av mätpunkterna. Ett medelvärde av dessa beräknades därefter. Anledningen till detta var att undvika mätfel då det vid mätningen var viktigt att sändare och mottagare hade god kontakt med betongen. Lokala defekter i betongytan misstänktes kunna försämra kontakten.

Vid experimentets inledning togs beslut om att ultraljudsmätningen enbart skulle utföras över vattenytan. Anledningen till detta beslut grundade sig i att en eventuell avskalning under vattenytan kunde resultera i att ultraljudscyldern inte skulle få bra kontakt på den skadade betongytan. Eventuella inre skador förväntades fördela sig över hela provkroppen. Men tre veckor in i experimentet med vct 0,65 upptäcktes det av en slump att responstiden under vattenytan var avsevärt kortare än den över vattenytan. Dessutom var avskalningen uppenbarligen inte ett hinder för att få pålitliga mätvärden. Efter denna upptäckt utfördes ultraljudsmätningarna både över och under vattenytan. Experimentet med vct 0,45 hade vid den här upptäckten enbart provats i två veckor och även den kom till att testas över och under vattenytan i de resterande provningarna. I figurerna 28 och 29 nedan visas en schematisk bild hur provningarna gick till, samt bilder från experimentet.



Figur 28 – Schematisk modell av ultraljudsmätning.



Figur 29 – Illustrering av vart ultraljudsmätningarna sker under delprovningarna.

Den extra provkroppen  $100 \times 50 \times 35 \text{ mm}^3$  plockades upp för att vägas så att vattenupptagningen kan följas. Efter vägning placerades provkroppen återigen i baljan.

#### 4.4.2 Metod – avslutande provning

I samband med att experimentet avslutades efter fyra veckor genomfördes tre extra provningar utöver de som inkluderas i de veckovisa provningarna. De provningar som tillkom var kontroll av relativ spräckhållfasthet, beräkning av fuktkvot- respektive vattenmättnadsgradsfördelning i en representativ provkropp, samt bestämning av avskalningens omfattning.

Den relativa spräckhållfastheten testades på en av provkropparna från experimentet. Provbiten sågades till två lika stora kroppar, där den ena var den betong som varit under vattenytan och den andra den betong som varit över vattenytan. Provkropparna fick en dimension på cirka  $150 \times 75 \times 75 \text{ mm}$ .

Fuktkvoten respektive vattenmättnadsgraden för en provkropp kontrollerades genom att en av provkropparna delades i 16 bitar. Åtta bitar (1-8) kom från provkroppens framsida, det vill säga den sida som hade exponerats för luft och vatten, se figur 30. Resterande åtta bitar kom från provkroppens baksida (9-16), se figur 31. Direkt efter uppdelningen vägdes samtliga bitar. Därefter placerades de i en ugn med temperaturen  $105^\circ\text{C}$ . Då bitarna var helt torra, plockades de ut och vägdes på nytt. Ur dessa två värden kunde fuktkvoten bestämmas. Nästa steg var att vattenmätta bitarna. Detta gjordes genom att placera bitarna i ett undertryck, nära vakuum, och därefter fylla på med vatten så att alla tillgängliga porer vattenfylldes. När bitarna var vattenmättade vägdes de igen och vattenmättnadsgraden kunde beräknas.

För att bestämma avskalningens omfattning samlades det material ihop som lossnat från betongprovkropparna. Därefter torkades och vägdes det. Genom att sedan summera de fyra provkropparnas totala avskalade area och dividera med massan av det avskalade materialet fås avskalningen i kilogram per kvadratmeter, vilket lätt kunde räknas om till avskalning i millimeter då betongens densitet var känd.



Figur 30 – Åtta bitar från framsidan.



Figur 31 – Åtta bitar från baksidan.

#### 4.4.3 Referensprovkroppar

För att kunna använda de uppmätta värdena på spräckhållfastheten från den avslutande provningen jämfördes dessa värden med referensprovkroppar. Referensprovkropparna kom från samma betongblandningar som användes till experimentet. Skillnaden var att de hade varit placerade i ett rum med konstant temperatur 20°C. Referensprovkropparna sågades till samma dimension, nämligen 150x75x75 mm<sup>3</sup>.

Provkroppen med dimension 100x50x35 mm<sup>3</sup> för mätning av vattenupptagning placerades i ugn 105°C tills den var torr. Därefter placerades provkroppen i frysen igen med konstant temperatur 10°C, samt till hälften ståendes i vatten. Provkroppen befann sig i vatten i cirka 300 timmar, vilket motsvarade ungefär samma tid som experimentets provkroppar hade stått i plusgrader. Även denna provkropp delades avslutningsvis upp i mindre delar för att se hur fuktfördelningen såg ut då den enbart innehåller kapillärt uppsuget vatten.

## 5 Resultat

De resultat som har uppnåtts genom dels experimentet och dels genom avslutande mätningar redovisas först för betongkvalitet vct 0,65 och därefter för betongkvalitet vct 0,45.

### 5.1 vct 0,65

#### 5.1.1 Fryscyklar

För att provkropparna ska kunna undersökas okulärt och med ultraljud en gång i veckan måste provningen stoppas vid dessa tillfällen. I tabell 11 redovisas när och efter hur många fryscyklar dessa fyra veckovisa provningar har skett. De lägsta temperaturer som uppnåtts från en representativ fryscykel för provkropp 4 under experimentet redovisas i tabell 12. Temperaturutvecklingen under den för experimentet representativa fryscykeln för provkropp 4 finns som diagram i bilaga 4.

Tabell 11 – Tidsintervall för veckovis provning.

	Datum	Klockslag	Fryscyklar
Start 1	2008-10-29	16.40	
Stopp 1	2008-11-05	16.30	13
Start 2	2008-11-05	17.25	
Stopp 2	2008-11-12	18.40	13
Start 3	2008-11-12	20.00	
Stopp 3	2008-11-19	08.10	12
Start 4	2008-11-19	09.45	
Stopp 4	2008-11-26	10.45	13
Totalt antal fryscyklar			<b>51</b>

Tabell 12 – Uppnådda temperaturer i en representativ fryscykel.

Luft	Vatten	ÖK	Kärna	UK
-36,3°C	1,2°C	-20,9°C	-13,7°C	-1,7°C



### 5.1.2 Yttre skador

För provkropp 4 visas resultatet av den okulära undersökningen i en bildserie, se figur 32 till 36, där första bilden är provkroppen innan experimentets start och sista bilden är tagen efter experimentets avslutning. Av bildserien framgår det tydligt att provkropp 4 har ådragit sig avskalning under vattenlinjen och avskalningen blir större för varje undersökningstillfälle. Dock sker den mest dramatiska förändringen under första provningsveckan. För provkropparna 1, 2 och 3 sker en tämligen liknande utveckling av skadorna under experimentets gång. Bildserier, precis som för provkropp 4, för provkropparna 1, 2 och 3 finns i bilaga 6. I figur 37 syns en närbild på den avskalade ytan där ballastkornen frilagts när cementpastan försvunnit.



*Figur 32 – Provkropp 4, 0 cykler*



*Figur 33 – Provkropp 4, 13 cykler*



*Figur 34 – Provkropp 4, 26 cykler*



*Figur 35 – Provkropp 4, 38 cykler*





*Figur 36 – Provkropp 4, 51 cykler*



*Figur 37 – Närbild på avskalning.*

Efter det avslutade experimentet samlades den avskalade betongen upp för att kunna beräkna hur stor avskalningen, mätt i mm, i genomsnitt hade varit. Den avskalade betongen bestod av allt från väldigt små partiklar till större flarn. I figur 38 syns avskalad betong på botten i plastbaljan innan uppsamling och i figur 39 syns ett av de större flarnen med millimeterskala i bakgrunden för jämförelse.



*Figur 38 – Avskalad betong i plastbalja.*



Figur 39 – Avskalad flarn av betong.

Efter att ha vägt den avskalade betongen och även uppskattat den area som avskalningen härstammar från kunde dels avskalningen uttryckt i  $\text{kg/m}^2$  och dels i mm beräknas. Beräkningarna utfördes efter lagring i  $20^\circ\text{C}$ , benämnd akt, och därefter lagring i  $105^\circ\text{C}$ , benämnd torr. Resultaten redovisas i tabell 13.

Tabell 13 – Avskalad betong från skadade ytor.

Avskalning per $\text{m}^2$	m(akt)	m(torr)	Avskalad tjocklek	skikt (akt)	skikt (torr)
	$[\text{kg/m}^2]$	$[\text{kg/m}^2]$		$[\text{mm}]$	$[\text{mm}]$
	1,83	1,78		0,81	0,79

### 5.1.3 Mätning med ultraljud

Responstiden från ultraljudsmätningen redovisas i två diagram, ett för mätning ovan vattenlinjen och ett för mätning under vattenlinjen, se diagram 2 och 3. Ökad responstid innebär att betongen fått inre skador. Det ska återigen poängteras att mätningen under vattenlinjen ej påbörjades förrän efter tre veckor beroende på rädsla för sämre tillförlitlighet då kontaktytan skulle bli ojämn till följd av skadorna.

Samtliga medelvärden från de veckovisa ultraljudsmätningarna för responstiden som ligger till grund för diagram 2 och 3 redovisas i bilaga 8.

## Frostsprängning i betongdammar

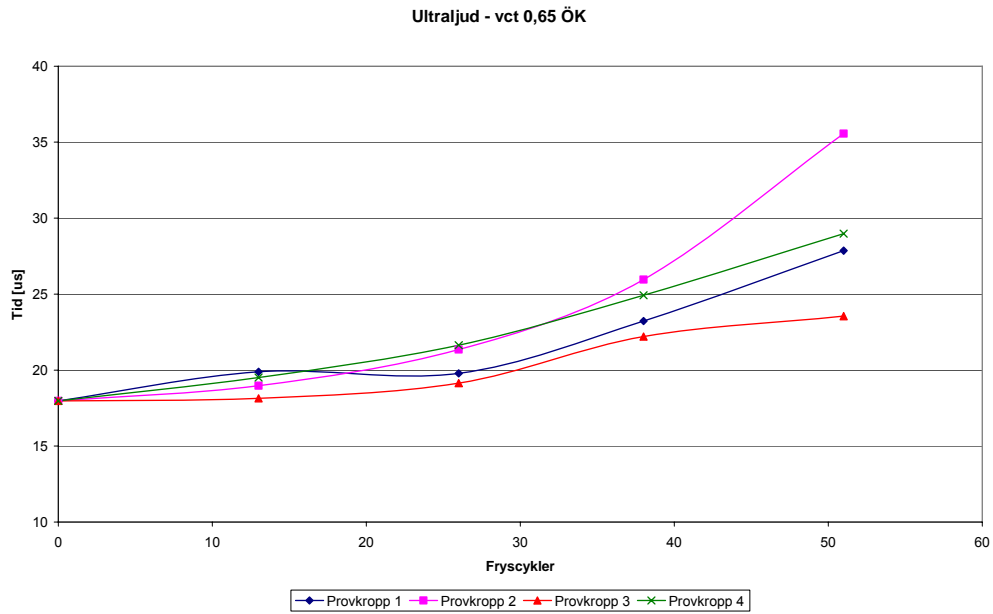


Diagram 2 – Responstid [ $\mu$ s] för ultraljudsmätning ovan vattenlinjen.

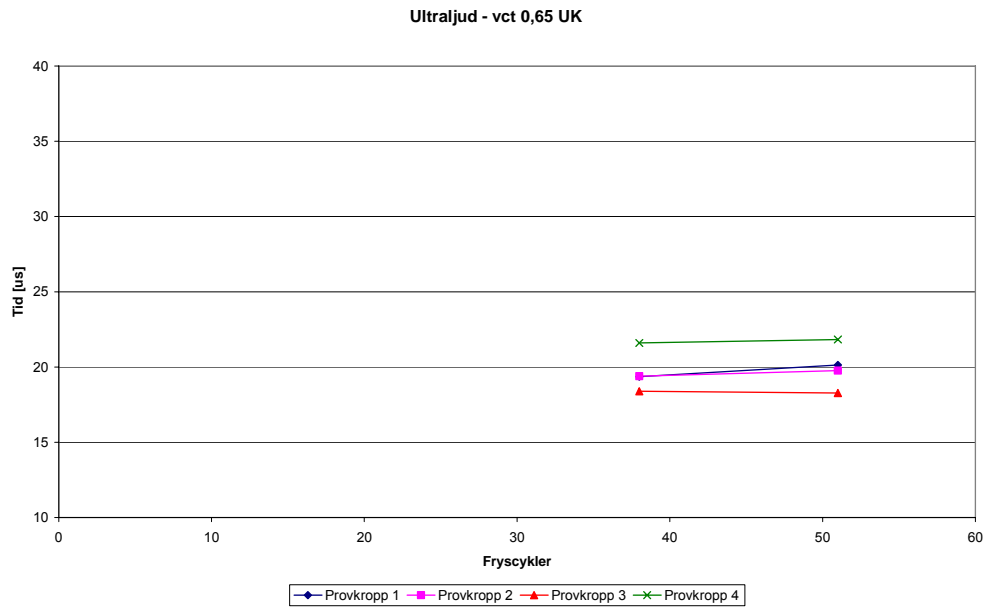


Diagram 3 – Responstid [ $\mu$ s] för ultraljudsmätning under vattenlinjen.

#### 5.1.4 Inre skador

Provkropp 2 delades på mitten för att kontrollera hur det såg ut inuti, se figur 40 och 41. Intrycket var att cementpastan kring ballastkornen i betongen över vattenlinjen hade luckrats upp under experimentet. Några synliga sprickor kunde inte observeras med blotta ögat. Under vattenlinjen såg betongen mer intakt ut. Det togs dessutom närbilder av betongytan ovan vattenlinjen, se figur 42. Där kunde ett mönster av fina sprickor observeras. Detta sprickmönster fanns även på sidorna ovan vattenlinjen, samt ovanpå provkroppen. Något sprickmönster syntes inte på betongen under vattenlinjen.



*Figur 40 – Tvärsnitt provkropp 2.*



*Figur 41 – Tvärsnitt provkropp 2.*



Figur 42 – Spräckmönster på betongen över vattenytan.

### 5.1.5 Spräckhållfasthet

Genom mätning av spräckhållfasthet på provkropp 1 blev det möjligt att uppskatta hur pass skadad provkroppen var. För jämförelse användes en oskadad referensprovkropp. Spräckhållfastheten mättes för en betonghalva ovan och en betonghalva under vattenlinjen. Resultatet av den relativa spräckhållfastheten blev att betongen ovan vattenlinjen hade ådragit sig större skador än den under vattenlinjen. Värden på resultatet redovisas i tabell 14.

Tabell 14 – Relativ spräckhållfasthet.

	<b>Benämning</b>	<b>F [kN]</b>	<b>Styrka [%]</b>	<b>Skada [%]</b>
73x73x150 mm <sup>3</sup>	REF	75	100	0
	UK	39	53	47
	ÖK	18	24	76

Det observerades också att brottet i betongen under vattenlinjen till stor del gick genom ballastkornen, medan brottet i betongen ovan vattenlinjen oftast gick runt ballastkornen. Detta styrker de uppmätta värdena på spräckhållfastheten som visar att cementpastan var mer skadad över vattenlinjen än under.

### 5.1.6 Fuktkvot och vattenmättnadsgrad

Efter avslutat experiment delades provkropp 3 i 16 bitar för beräkning av fuktkvots- och vattenmättnadsgradsfördelning. Resultatet blev att fuktkvoten i bitarna ökade ju högre upp i provkroppen biten hade suttit, se tabell 15. Fördelningen av vattenmättnadsgraden blev något svårare att läsa ut och ligger runt 90 procent i hela provkropp 3, se tabell 16. För att se hur bitarna satt ihop i provkroppen hänvisas till figur 30 och 31.

Tabell 15 – Fuktkvotsfördelning i provkropp.

Fuktkvot [%] Framtill, bitar 1-8			Fuktkvot [%] Baktill, bitar 9-16	
1 7,2	2 8,4	vattenlinje	9 8,3	10 7,8
3 6,9	4 8,1		11 7,2	12 7,1
5 6,8	6 6,5		13 7,1	14 7,0
7 6,4	8 6,4		15 7,0	16 6,9

Tabell 16 – Vattenmättnadsgradsfördelning i provkropp.

Vattenmättnadsgrad Framtill, bitar 1-8			Vattenmättnadsgrad Baktill, bitar 9-16	
1 0,87	2 0,89	vattenlinje	9 0,92	10 0,90
3 0,82	4 0,88		11 0,89	12 0,88
5 0,87	6 0,91		13 0,90	14 0,92
7 0,89	8 0,93		15 0,89	16 0,91



## Frostsprängning i betongdammar

---

Den extra provkroppen avsedd för mätning av vattenupptagning under fryscyklerna frös sönder redan efter två veckors provning. Efter en vecka kunde ett svagt sprickmönster vid vattenlinjen skönjas, se figur 43, och efter ytterligare en vecka hade provkroppen delats på mitten, se figur 44. Provkroppen gick inte längre att använda.



*Figur 43 – Provkropp efter en vecka.*



*Figur 44 – Provkropp efter två veckor.*

För att ändå få en uppfattning av vattenupptagningen i betongen användes en provkropp med dimension cirka 150x150x30 mm<sup>3</sup>. Denna provkropp stod också till hälften i vatten, men vid konstant temperatur på 10°C i cirka 300 timmar. Därefter delades provkroppen i åtta bitar och fuktkvot och vattenmättnadsgrad beräknades, se tabell 17. Värdena på både fuktkvot och vattenmättnadsgrad avtar ju högre upp i provkroppen biten har suttit. Dessa värden bör jämföras med värdena i provkropp 3 från experimentet.

Tabell 17 – Fuktkvot- och vattenmättnadsgradsfördelning i referensprovkropp.

Fuktkvot [%] Bitar 1-8			Vattenmättnadsgrad Bitar 1-8	
1	2	vattenlinje	1	2
6,2	5,0		0,80	0,80
3	4		3	4
6,6	6,2		0,88	0,88
-----	-----		-----	-----
5	6		5	6
6,5	6,3		0,90	0,91
7	8		7	8
6,9	5,8	0,90	0,89	

## 5.2 vct 0,45

### 5.2.1 Fryscyklar

Precis som för experimentet med vct 0,65 stoppas provningen en gång i veckan för att provkropparna ska kunna undersökas okulärt och med ultraljud. I tabell 18 redovisas när och efter hur många fryscyklar dessa fyra veckovisa provningar skedde. De lägsta temperaturer som uppnåts från en representativ fryscykel för provkropp 1 under experimentet redovisas i tabell 19. Temperaturutvecklingen under den för experimentet representativa fryscykeln för provkropp 1 finns som diagram i bilaga 5.

Tabell 18 – Tidsintervall för veckovis provning

	Datum	Klockslag	Fryscyklar
Start 1	2008-11-07	15.45	
Stopp 1	2008-11-14	13.40	13
Start 2	2008-11-14	16.05	
Stopp 2	2008-11-21	15.00	13
Start 3	2008-11-21	16.20	
Stopp 3	2008-11-28	15.00	13
Start 4	2008-11-28	16.30	
Stopp 4	2008-12-04	15.30	11

Totalt antal fryscyklar **50**



Tabell 19 – Uppnådda temperaturer i en representativ fryscykel.

Luft	Vatten	ÖK	Kärna	UK
-37,5°C	0,7°C	-21,2°C	-13,0°C	-3,6°C

### 5.2.2 Yttre skador

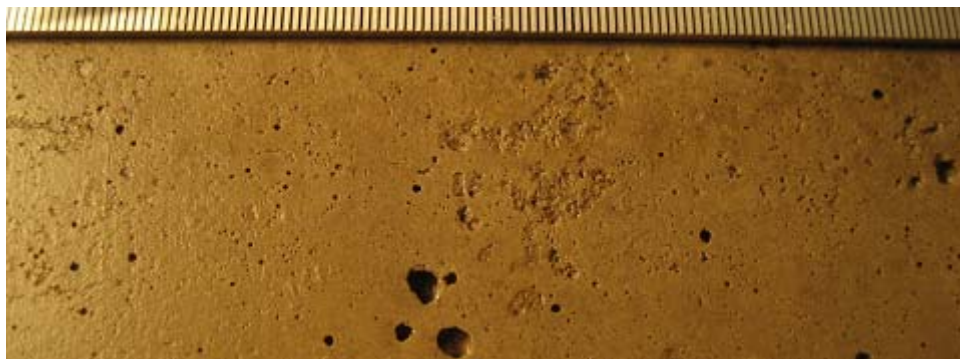
Resultatet av den okulära undersökningen för provkropp 1 visas genom två bilder, se figur 45 och 46. Första bilden är provkroppen före experimentets start och sista bilden är provkroppen efter experimentets avslutning. Några tydliga skador är svåra att upptäcka, men precis i vattenlinjen går det att se en ytterst svag avskalning på några ställen, se figur 47. För provkropparna 2, 3 och 4 har samma utveckling iakttagits, det vill säga nästintill obefintliga skador. Bilder före experimentets start och efter experimentets avslutning för provkropparna 2, 3 och 4 finns i bilaga 7.



Figur 45 – Provkropp 1, 0 cykler



Figur 46 – Provkropp 1, 50 cykler



Figur 47 – Svag avskalning vid vattenlinjen. Millimeterskala högst upp.

Den avskalade betongen syntes endast som ett väldigt fint damm på botten i plastbaljan och visade sig alltför svår för att samla upp och försöka väga. Avskalningen uttryckt i antingen massa per areaenhet [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] eller tjocklek [mm] skulle bli väldigt nära noll.

### 5.2.3 Mätning med ultraljud

Responstiden från ultraljudsmätningen redovisas i två diagram, ett för mätning ovan vattenlinjen och ett för mätning under vattenlinjen, se diagram 4 och 5. Mätningen under vattenlinjen påbörjades inte förrän efter två veckor då upptäckten av skillnad i responstid för vct 0,65 hade gjorts. Responstiden för vct 0,45 ligger stabilt både över och under vattenlinjen genom hela experimentet.

Samtliga medelvärden från de veckovisa ultraljudsmätningarna för responstiden som ligger till grund för diagram 4 och 5 redovisas i bilaga 8.

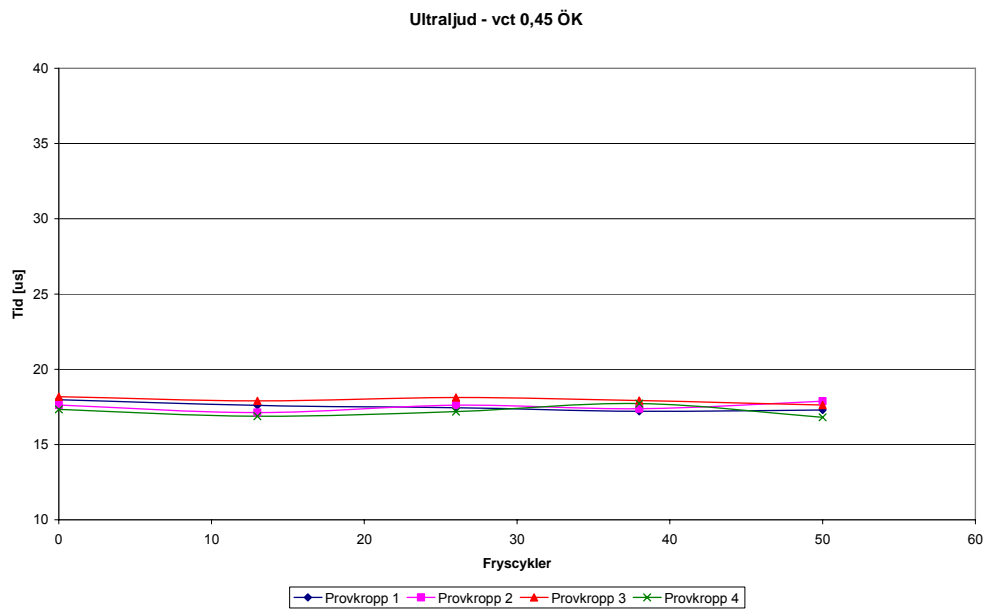


Diagram 4 – Responstid [ $\mu\text{s}$ ] för ultraljudsmätning ovan vattenlinjen.

## Frostsprängning i betongdammar

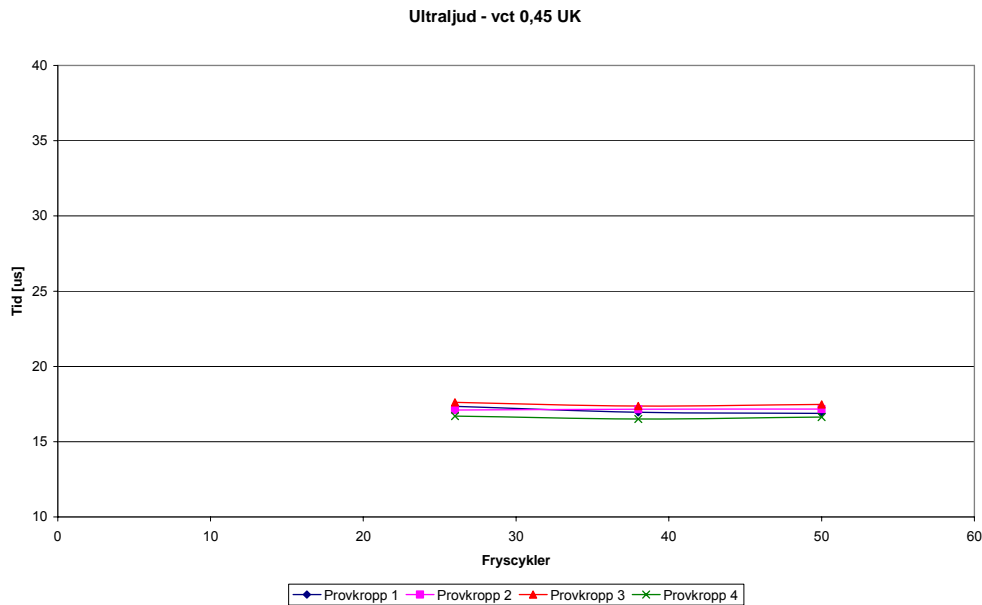


Diagram 5 – Responstid [ $\mu\text{s}$ ] för ultraljudsmätning under vattenlinjen.

### 5.2.4 Inre skador

Prov kropp 2 delades på mitten för kontroll av betongens tillstånd inuti. Någon skadad cementpasta kunde inte upptäckas, betongen såg intakt ut.

### 5.2.5 Spräckhållfasthet

Spräckhållfastheten mättes på prov kropp 2 och 3 och därmed blev det möjligt att uppskatta hur pass skadad prov kroppen var. För jämförelse användes en oskadad referensprov kropp. Spräckhållfastheten mättes för två betonghalvor ovan och två betonghalvor under vattenlinjen. Någon större skillnad i relativ spräckhållfasthet kunde inte konstateras för prov kropparna. Värderna på resultatet redovisas i tabell 20. Samtliga brott gick genom ballastkornen, vilket styrker att betongen var oskadad.

Tabell 20 – Relativ spräckhållfasthet.

Spräckhållfasthet	Benämning	F [kN]	Styrka [%]	Skada [%]
73x73x150 mm <sup>3</sup>	REF	65,4	100	0
	UK	66,2	101	- 1
	UK	57,8	88	12
	ÖK	55,0	84	16
	ÖK	62,1	95	5

### 5.2.6 Fuktkvot och vattenmättnadsgrad

Efter avslutat experiment delades provkropp 3 upp i 16 bitar för beräkning av fuktkvots- och vattenmättnadsgradsfördelning. Resultatet blev att fuktkvoten i bitarna minskade generellt ju högre upp i provkroppen biten hade suttit, se tabell 21. Värdena på vattenmättnadsgraden låg mellan 72 och 79 procent och minskade också generellt ju högre upp i provkroppen biten hade suttit, se tabell 22. För att se hur bitarna satt ihop i provkroppen hänvisas till figur 30 och 31.

Tabell 21 – Fuktkvotsfördelning i provkropp.

Fuktkvot [%] Framtill, bitar 1-8			Fuktkvot [%] Baktill, bitar 9-16	
1 5,8	2 6,8	vattenlinje	9 6,7	10 6,3
3 6,5	4 6,8		11 7,2	12 6,9
5 6,7	6 7,1		13 7,1	14 6,9
7 7,0	8 6,9		15 7,1	16 6,9

Tabell 22 – Vattenmättnadsgradsfördelning i provkropp.

Vattenmättnadsgrad Framtill, bitar 1-8			Vattenmättnadsgrad Baktill, bitar 9-16	
1 0,72	2 0,72	vattenlinje	9 0,74	10 0,70
3 0,71	4 0,74		11 0,76	12 0,71
5 0,73	6 0,78		13 0,76	14 0,70
7 0,76	8 0,79		15 0,77	16 0,73

## Frostsprängning i betongdammar

---

Referensprovkroppen avsedd för mätning av vattenupptagning under fryscyklerna vägdes varje vecka. De uppmätta vikterna redovisas under "Frysning/tingning" tillsammans med antalet fryscyklar i tabell 23. Efter experimentets avslutning kunde inga skador på provkroppen konstateras, se figur 48. Provkroppen torkades därefter i 105°C innan den återigen placerades i frysen, till hälften i vatten, men denna gång med konstant temperatur på 10°C. Vid flera tillfällen vägdes provkroppen och efter 309 timmar avbröts mätningen då tiden ansågs motsvara den tid som provkroppen tidigare stått i plusgrader under experimentets 50 fryscyklar. Vikterna som noterades redovisas under "Konstant +10°C" i tabell 23. Provkroppen fick dock stå kvar ytterligare en tid och vikten 368,455 g noterades efter 641 timmar, vilket motsvarar nästan 27 dygn. Att lägga märke till är vattenupptagningen under konstant temperatur 10°C var mindre än genom frysning/tingning i experimentet.

Tabell 23 – Vattenupptagning genom frysning/tingning jämfört med konstant +10°C.

Frysning / tining	Tid [h]	Fukthinnehåll [g]	ΔFukthinnehåll [g]
	-	345,42	0
	0	356,22	10,8
	78	366,82	21,4
	156	369,01	23,59
	234	369,50	24,08
	300	369,20	23,78

Konstant +10°C	Tid [h]	Fukthinnehåll [g]	ΔFukthinnehåll [g]
	0	345,42	0
	89	367,23	21,81
	137	367,52	22,10
	167	367,68	22,26
	189	367,72	22,30
	309	367,92	22,50
	641	368,46	23,04



Figur 48 – Provkropp efter avslutad provning.

Efter 27 dygn delades referensprovkroppen i fyra bitar där fuktkvot och vattenmättnadsgrad kunde beräknas, se tabell 24. Värdena på både fuktkvot och vattenmättnadsgrad avtar ju högre upp i provkroppen biten har suttit. Dessa värden bör jämföras med värdena i provkropp 3 från experimentet. Det ska återigen påpekas att referensprovkroppen befann sig dubbelt så lång tid i plusgrader jämfört med provkropp 3.

Tabell 24 – Fuktkvot- och vattenmättnadsgradsfördelning i referensprovkropp.

Fuktkvot [%] Bitar 1-4		Vattenmättnadsgrad Bitar 1-4
1 5,9		1 0,64
2 6,1	vattenlinje	2 0,67
3 6,6		3 0,76
4 6,7		4 0,77

## 6 Analys

### 6.1 Allmänt

Redan i förstudien uppmättes temperaturer i provkropparna som motsvarade simulerade temperaturer från referensdammen. Att det dessutom bildades is på betongytan under vattenlinjen precis som på referensdammen visade att det var möjligt att återskapa verkliga förhållanden i laboratoriemiljö. Nedkylningshastigheten för betongen under vattenlinjen avvek dessutom inte från nedkylningshastigheter uppmätta i verkligheten. Ur klimatdata för ett år från referensdammen har det gått att uppskatta att antalet fryscyklar per år kan uppgå till 50. Då även provkropparna utsatts för 50 fryscyklar kan experimentet anses representera ett års exponering av naturliga fryscyklar för referensdammen.

### 6.2 vct 0,65

Ultraljudsmätningarna gav tidigt, genom att responstiden ökade för varje provtillfälle, en indikation på att provkropparna ådragit sig inre skador över vattenlinjen. Detta styrktes vid den avslutande provningen då den relativa spräckhållfastheten kontrollerades och resultatet visade att betongen haft allvarliga skador över vattenlinjen. När det gäller betongen under vattenlinjen tyder ultraljudsmätningarna på att den var oskadad, men den relativa spräckhållfastheten motsäger detta då den visade på inre skador, dock inte lika omfattande som över vattenlinjen. Huruvida betongen under vattenlinjen verkligen ådrog sig inre skador eller ej har inte gått att med säkerhet fastställa. En möjlig orsak till de varierande resultaten kan vara att skadorna inte är lika omfattande på grund av att temperaturerna inte nått lika låga värden som för betongen över vattenlinjen.

Utifrån den relativa spräckhållfastheten är fuktkvotsfördelningen i provkropp 4 en möjlig förklaring till att omfattningen av de inre skadorna skiljer sig åt. Den avslutande provningen visade att betongen hade varit fuktigare över än under vattenlinjen. Referensprovkroppen som däremot enbart tagit upp vatten under konstant temperatur hade en fuktkvotsfördelning som visade att det varit fuktigare under vattenytan än över. Troligen har pumpningseffekten varit bidragande faktor till skillnaden i fuktkvotsfördelningarna.

Även vattenmättnadsgraden borde ha haft en fördelning likt den för fuktkvoten. Att så inte är fallet kan bero på att betongen över vattenlinjen varit så pass skadad att tillförlitligheten i torkningen och vakuummätningen kunnat ifrågasättas. Överlag har vattenmättnadsgraden dock överskridit den kritiska på cirka 80-85 procent

Skadorna i betongen över vattenlinjen har orsakats av inre frostsprängning där troligtvis både för stort hydrauliskt tryck och mikroskopisk islinstillväxt varit orsaker. Den höga vattenmättnadsgraden, överstigande  $S_{kr} = 80-85$  procent, i samband med de låga temperaturer som uppmättes över vattenlinjen medförde att en stor del av vattnet i betongen var frysbart och betongen blev extra känslig för fryscyklar. Nedkylningshastigheten var dessutom stor, men ändå i storlek med extrema fall från verkligheten.

Trots att hög vattenmättnadsgrad i betongen under vattenlinjen har konstaterats, men utan några tydliga inre skador, kan det bero på att den frysbara vattenmängden varit mindre. Temperaturerna har också varit avsevärt högre under vattenlinjen än över densamma och detta bör ha lett till ett gynnsammare förhållande för betongen.

Då den extra provkroppen, avsedd för mätning av vattenupptagning, frös sönder på mitten kan det tänkas att det bildats en makroskopisk islins i vattenlinjen där tillgången på fritt vatten var god. Detta borde i så fall också gälla för de övriga fyra provkropparna, men har ej observerats. En förklaring kan dock vara att den extra provkroppen har haft mindre isolering än de övriga provkropparna och således utsatts för lägre temperatur..

De yttre skadornas utseende och utveckling under vattenlinjen tyder på att de också är orsakade av frostsprängning. Detta kan förklaras genom att vid upprepade fryscyklar skapas en lokalt högre fuktkvot i betongytan på grund av pumpningseffekten. Då avskalning har inträffat har den kritiska vattenmättnadsgraden överskridits och bidragit till att det hydrauliska trycket och mikroskopisk islinsbildning har skadat betongen. Eftersom den uppmätta nedkylningshastigheten på betongen under vattenlinjen varit relativt liten kan den observerade isbildningen på ytan dessutom ha fungerat som en makroskopisk islins och ytterligare bidragit till en ökad fuktkvot i betongytan. Avskalningen har inte orsakats av osmotiskt tryck då dels fryscykeln varit för kort för att ett stationärt flöde skulle uppstå och dels för att experimentet utförts i rent vatten.

Då pumpningseffekten troligtvis både bidragit till högre fuktkvot i provkroppen över vattenlinjen och till betongytan under vattenlinjen kan den anses ha haft en uttorkande effekt på den inre betongen under vattenlinjen. Det skulle därmed delvis kunna förklara varför de eventuella inre skadorna är mindre omfattande under vattenlinjen.



### 6.3 vct 0,45

Några inre skador för provkropparna kunde inte upptäckas genom ultraljudsmätning och provning av den relativa spräckhållfastheten. Detta gäller både för betongen över och under vattenlinjen. Värden från ultraljudsmätningarna låg på konstant nivå under experimentets fyra veckor och värdena på den relativa spräckhållfastheten låg i nivå med referensprovkroppen.

Några tydliga yttre skador kunde inte heller observeras för provkropparna. Det enda som gick att se var lokala och ytterst minimala avskalningar.

Att det inte gick att upptäcka vare sig inre eller yttre skador tyder på att provkropparna inte drabbats av frostsprängning. Detta påstående styrks genom mätning av vattenmättnadsgraden som inte någonstans översteg 79 procent och därmed låg under den kritiska vattenmättnadsgraden på ungefär 80-85 procent. Vattenmättnadsgraden var också som högst i betongen under vattenlinjen och minskade ju högre upp i provkroppen biten hade suttit. Mätning av fuktkvot visade på samma resultat, det vill säga att provkropparna hade varit fuktigare under vattenlinjen än över densamma.

När det gäller mätning av vattenupptagningen i referensprovkroppen i konstant temperatur 10°C blev resultatet att vattenmättnadsgraden under vattenlinjen låg i nivå med värden i provkroppen från experimentet. Vattenmättnadsgraden över vattenlinjen däremot var betydligt lägre än i provkroppen. Detta kan tyda på att pumpningseffekten till följd av fryscyklerna i provkroppen drivit upp vatten i betongen över vattenlinjen.

### 6.4 Jämförelse vct 0,65 / vct 0,45

Det som skilde de två olika serierna med provkroppar var dels vct och dels lufthalt. När det gäller vct visade tryckhållfastheten att de två betongkvaliteterna var relativt lika varandra, vilket innebär att det samma gällde för draghållfastheten som bevisades genom provning av spräckhållfastheten på referensprovkropparna.

Skillnaden utifrån val av vct var tätheten i betongen. Då det för båda betongkvaliteterna observerats vattentransport uppåt i provkroppen till följd av pumpningseffekten bör således tätheten ha spelat en viktig roll. Även för vattentransport till betongytan under vattenlinjen, till följd av islinnsbildning och pumpningseffekten, bör en hög täthet kunna minska belastningen. En betong med lågt vct ger därmed ett större motstånd mot vattentransport.

Lufthalten var den andra skillnaden mellan de två serierna med provkroppar och då gränsen för god frostbeständighet i rent vatten ligger runt fem procent borde vct 0,45 med lufthalt 6,5 procent klara sig bättre än vct 0,65 med lufthalt 1,9 procent. Så blev också fallet. Då båda provserierna utsattes för samma fryscyklar lyckades luftporsystemet i betongen med vct 0,45 att ta hand om det undanpressade vattnet till följd av isbildningen. Resultatet blev att inga skador kunde uppstå till följd av hydrauliskt tryck eller islinsbildning.

Sammanfattningsvis ger en god betongkvalitet i form av ett lågt vct god täthet, vilket minskar vattentransporten och därmed ger betongen större chans att undvika skador till följd av frostsprängning. Lufthalten har också stor inverkan på betongens frostbeständighet då en hög lufthalt tillåter frysning av betongen utan att den skadas.

### 6.5 Porsi vattenkraftverk

Avskalningen för provkropparna vct 0,65 blev cirka 0,8 millimeter och ska jämföras med den uppmätta avskalningen på en millimeter per år som har inträffat på referensdammen. Inför ett resonemang kring eventuella synergieffekter där även urlakning och erosion är verksamma skulle det kunna förklara den uppkomna differensen. Sedan tidigare har det konstaterats att antalet fryscyklar som provkropparna utsatts för ungefär motsvarar ett års exponering i svenskt klimat.

Utseendet på skadorna dels på referensdammen och dels på provkropparna liknar varandra. Det ska dock påpekas att skadeutvecklingen på referensdammen pågått en längre tid och att ballasten är grövre och av natursten. Då avskalningen både utseendemässigt och omfattningsmässigt överrensstämmer ganska bra med varandra och provkropparna endast har utsatts för frostsprängning bör även den dominerande skademekanismen för väggen och pelarna tillhörande referensdammen, det vill säga Porsi vattenkraftverk, ha orsakats av frostsprängning.

Reliabiliteten för experimenten med provkropparna vct 0,65 och vct 0,45 har ansetts vara god då liknande resultat uppnåts för samtliga provkroppar av respektive kvalitet. Resultaten har dessutom varit av karaktären att de bör vara enkla att kunna återskapa. Validiteten kan däremot ifrågasättas då experimentet varit av forcerad karaktär och eventuella tidsberoende effekter har förbisetts. Validiteten anses dock vara tillräckligt god för att resultaten ska tas på allvar och det motiveras med att provkropparna utsatts för temperaturmässiga förhållanden som liknar de för referensdammen.

## 7 Slutsats

Redan förstudien visade att var möjligt att återskapa förhållanden i en liten provkropp som är likvärdiga de för referensdammen Porsi. Det har dessutom visats att det är möjligt för is att bildas på betongytan under vattenlinjen, trots att vattnet har en temperatur över 0°C. Dessa två resultat medför att det med stor sannolikhet har gått att jämföra experimentet med referensdammen.

På provkropparna med vct 0,65 har tydliga yttre skador uppkommit under vattenlinjen. Genom jämförelse av provkropparnas skadade yta med skadorna på referensdammen, har det gått att dra slutsatsen att denna avskalning uppkommit på samma sätt och berott på frostsprängning. Slutsatsen har styrkts genom att skadorna varit likvärdiga utseendemässigt sätt och att temperaturförhållandena varit jämbördiga. Detta visar alltså att avskalning inte bara uppkommer då betong är i kontakt med saltlösning utan kan även inträffa i rent vatten.

De provkroppar som drabbats av avskalning har också fått inre skador genom frostsprängning i betongen över vattenlinjen. Dessa skador har identifierats okulärt, samt med hjälp av ultraljudsmätare och genom spräckhållfasthetstest. Under vattenlinjen har det inte med säkerhet gått att säga om inre skador uppkommit, då resultat från ultraljudsmätningarna och spräckhållfasthetstestet skiljer sig åt.

Experimentet har visat att det bara varit provkropparna med vct 0,65, utan luftporbildande medel, som skadats efter ca 50 fryscyklar, trots att både vct 0,65 och vct 0,45 har haft likvärdig tryckhållfasthet, och spräckhållfasthet. Det som dock skilde de båda provkroppsserierna åt var lufthalt och täthet på betongen. Med andra ord har betongkvalitet i form av inre struktur haft stor betydelse för omfattningen av skadorna.

I experimentet har betong med lågt vct och hög lufthalt visat sig ha större motståndsförmåga mot både inre och yttre frostsprängning än betong med högt vct och låg lufthalt. Vilken variabel som varit avgörande, lufthalten eller vct, har inte ingått i denna studie.

## 8 Diskussion

Hypotesen att det var frostsprängning som gav upphov till den observerade avskalningen på kraftverksdammen Porsi anses bevisat i och med resultaten från experimentet. Däremot gjordes oväntade upptäckter i form av inre frostsprängning. Under försöket identifierades inre skador över vattenlinjen, samt eventuellt under vattenlinjen. Liknande skador har dock inte observerats på referensdammen eftersom inga undersökningar för detta har genomförts beroende på att fenomenet varit okänt. Osäkerhet uppstår således utifall dessa skador enbart är en följd av att försöket genomförts med små provkroppar eller för att försöket varit av forcerad karaktär.

Det går dock inte att utesluta att samma effekt också uppkommit på referensdammen. Något definitivt svar går inte att ge utan att både undersöka referensdammen noggrannare samt att genomföra experiment där eventuell inverkan av storlek på provkropparna undersöks. Genom att föra diskussionen ett steg längre och spekulera i att inre skador uppstått även i referensdammen skulle det betyda att andra konstruktioner som befinner sig i liknande förhållanden också kan ha dessa skador. Till sådana konstruktioner, förutom ytterligare vattenkraftverk, bör även hamnkonstruktioner och bropelare i rent vatten räknas in.

Många konstruktioner har uppförts med frostbeständig betong och anses därför säkra. Intressant vore att undersöka hur vår provade betong med vct 0,45 och 6,5 procent lufthalt hade uppfört sig vid ett längre experiment. Hade även den betongen blivit skadad eller hade den förblivit intakt.

Förslag på fortsatta studier blir således:

- Undersökning av referensdammen med fokus på inre skador.
- Utföra experiment med samma förutsättningar som i denna studie, men där kontroll av inverkan av storlek på provkroppar undersöks.
- Att låta experimentet fortgå en längre tid för att se om även betong med lågt vct och hög lufthalt kan skadas av yttre och inre frostsprängning.
- Utföra experiment med fler betongkvaliteter, samt att även använda betong med samma vct men med olika lufthalter.
- Undersöka andra konstruktioner, exempelvis hamnkonstruktioner och bropelare, i liknande förhållanden med fokus på inre skador.

## 9 Referenser

Burström, P G (2001), 'Byggnadsmaterial – Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper', Studentlitteratur, ISBN 91-44-01176-8, Lund

Byfors, K (1994), 'Betonghandbok material – Tillsatsmedel', AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, ISBN 91-7332-709-3, Stockholm

Byfors, K Tuutti, K (1994), 'Betonghandbok material – Armeringskorrosion', AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, ISBN 91-7332-709-3, Stockholm

Ekström, T (2003), 'Leaching of concrete – The leaching process and its effects', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, rapport TVBM-1020, Lund

Fagerlund, G (1989), 'Vattenbyggnadsbetong', Cementa, ISBN 91-87334-04-6, Danderyd

Fagerlund, G (1992), 'Betongkonstruktioners beständighet – En översikt', Cementa, ISBN 91-87334-00-3, Uppsala

Fagerlund, G (1994), 'Influence of environmental factors on the frost resistance of concrete', A contribution to the BRITE/EURAM project BREU – CT92-0591 "The Residual Service Life of Concrete Structures, Report TVBM 3059, Lund

Fagerlund, G (1996), 'Livslängdsberäkningar för betongkonstruktioner – Översikt med tillämpningsexempel', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, TVBM-3070, Lund

Fagerlund, G (1998 A), 'Kompendium i Byggnadsmaterial (2008) – Fukt och porer Del II. Kapillärfenomen', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund

Fagerlund, G (1998 B), 'Kompendium i Byggnadsmaterial (2008) – Beständighet Allmänt', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund

Fagerlund, G (1999), 'Kompendium i Byggnadsmaterial (2008) – Frostbeständighet', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund

Fagerlund, G (2000), 'Leaching of concrete – The leaching process. Extrapolation of deterioration. Effect on the structural stability', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, rapport TVBM-3091, Lund

Fagerlund, G (2002), 'Mechanical damage and fatigue effects associated with freeze - thaw of materials', Proceeding of the International RILEM workshop, Frost Resistance of Concrete, RILEM Publications S.A.R.L., ISBN 2-912143-30-6, Essen Tyskland

Fridh, K (2005), 'Internal frost damage in concrete – Experimental studies of destructive mechanisms', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, rapport TVBM-1023, Lund

Hassanzadeh, M (2008), intern kommunikation

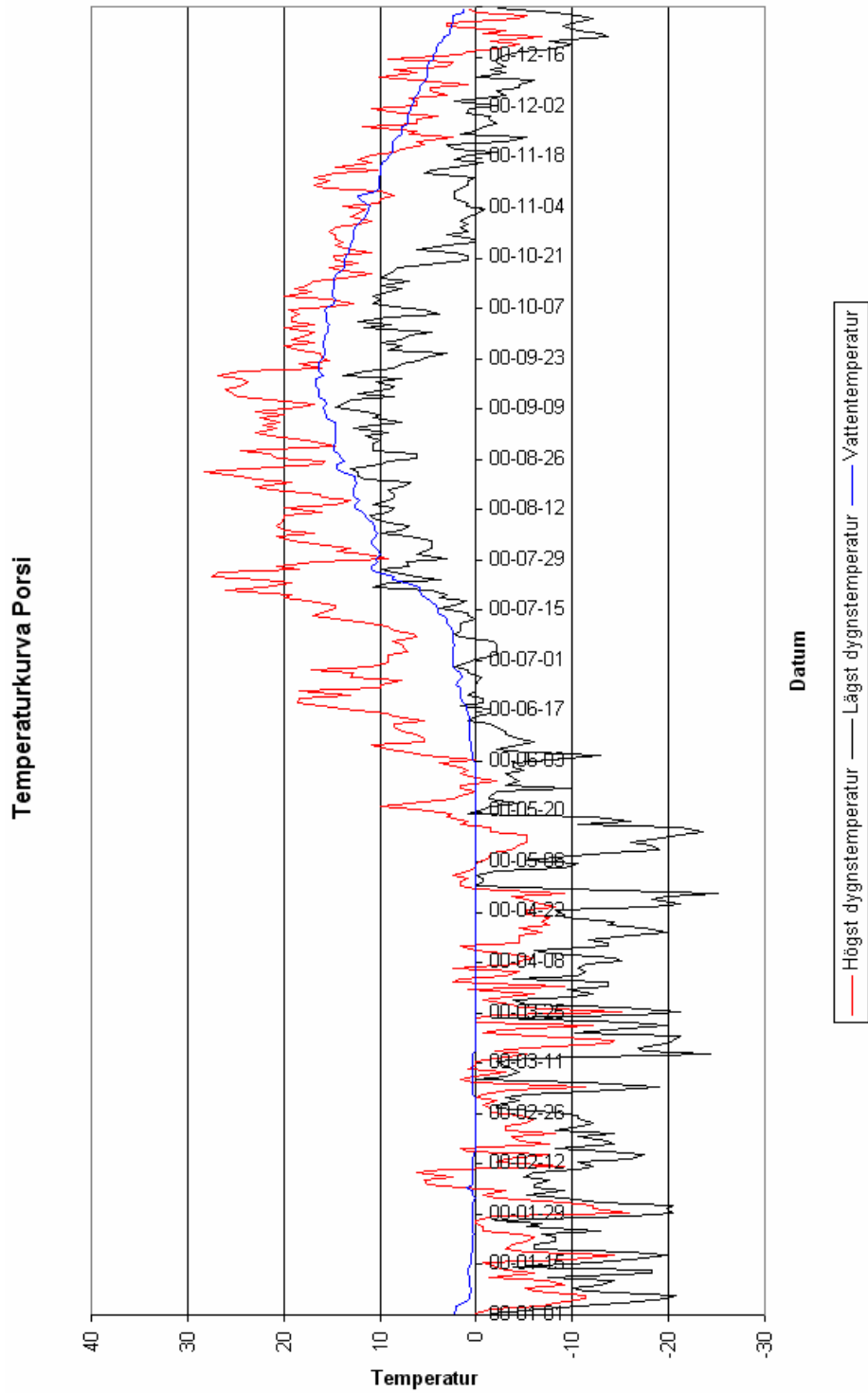
Jacobsen, S (1995), 'Scaling and cracking in unsealed freeze/thaw testing of Portland cement and silica fume concretes', Institutt for konstruksjonsteknikk, NTH, Doktor ingeniøravhandling 1995:101, Trondheim, Norge

Nilsson, L-O (2006), 'Kompendium i Byggnadsmaterial (2008) – Fukt och porer Del III. Transportfenomen huvudsakligen av fukt', Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund

Svevia, Det här gör vi,  
<http://www.svevia.se/Det-har-gor-vi/Referenser/Betong/Forstarkning-av-damm-Porsi/>, 2009-01-13 kl. 11:30

Vattenfall, Om Vattenfall,  
[http://www.vattenfall.se/www/vf\\_se/518304omxva/518334vxrxv/518814vxrxe/521004omxva/index.jsp](http://www.vattenfall.se/www/vf_se/518304omxva/518334vxrxv/518814vxrxe/521004omxva/index.jsp), 2009-01-13 kl. 11:35

## Bilaga 1 – Uppmätta temperaturer vid Porsi



## Bilaga 2 – Betongrecept vct 0,65

Datum för gjutning 2008-09-24

### Blandning 70 liter (antag 2,0% lufthalt)

	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	V [dm <sup>3</sup> ]	m [kg]
Cement	3100	6,820	21,140
Vatten	1000	13,740	13,740
0-8 (grus)	2650	24,020	63,650
8-12 (sten)	2650	24,020	63,650
Luft	0	1,400	0,000
	$\Sigma$	70,000	

### Blandning 35 liter

m [kg]
10,570
6,870
31,825
31,825
0,000

### Korrigerat för fuktkvot i grus

	m [kg]
Cement	10,570
Vatten	6,777
0-8 (grus)	31,918
8-12 (sten)	31,825
Luft	0,000

### Uppmätta egenskaper

Fuktkvot i grus [%]	0,3
Sättnått [mm]	45
Lufthalt [%]	1,90
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	2353



## Bilaga 3 – Betongrecept vct 0,45

Datum för gjutning 2008-10-06

### Blandning 70 liter (antag 5,0% lufthalt)

	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	V [dm <sup>3</sup> ]	m [kg]
Cement	3100	10,006	31,019
Vatten	1000	13,959	13,959
0-8 (grus)	2650	21,058	55,804
8-12 (sten)	2650	21,477	56,914
Luft	0	3,500	0,000
	$\Sigma$	70,000	

### Blandning 35 liter

m [kg]
15,510
6,979
27,902
28,457
0,000

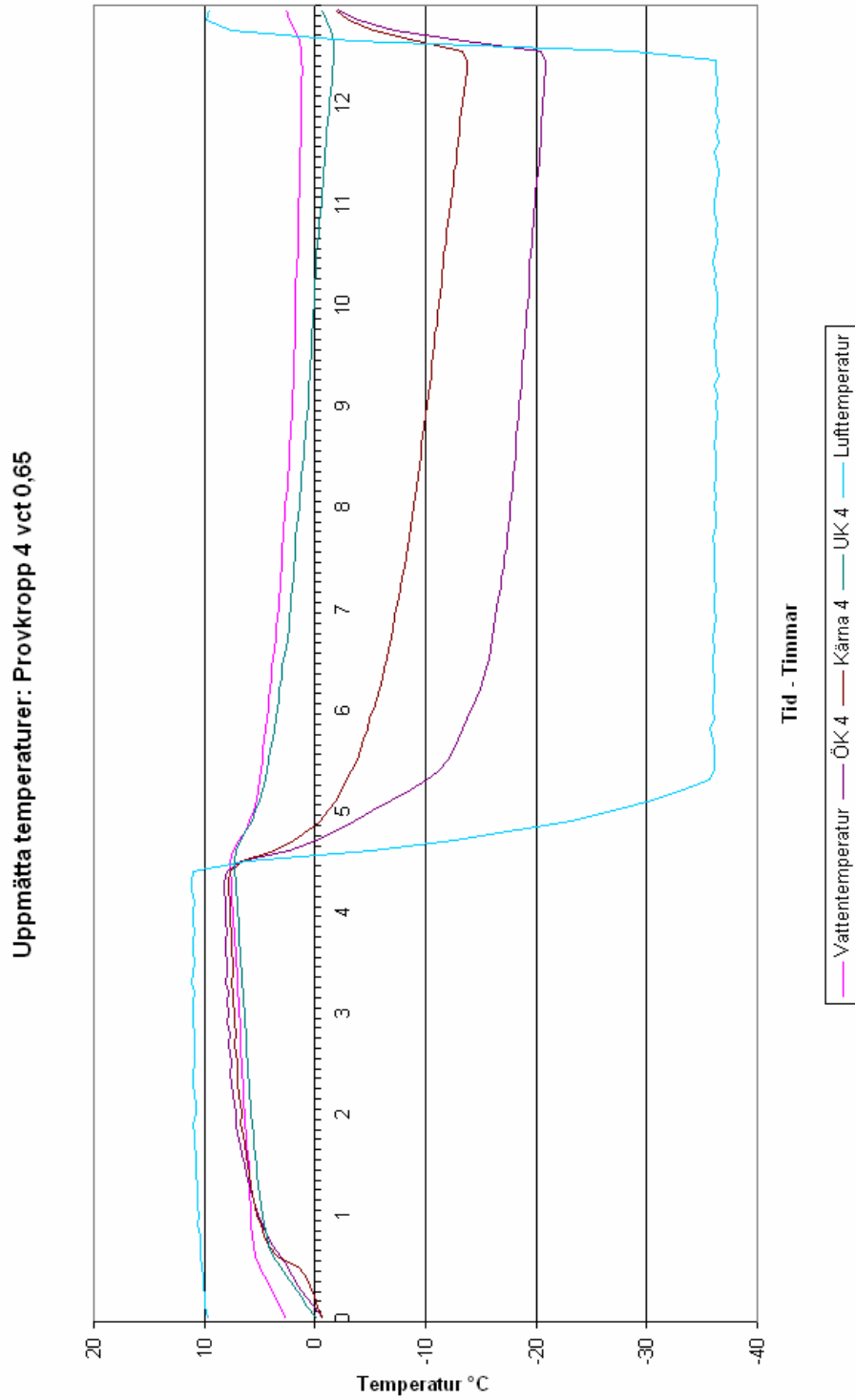
### Korrigerat för fuktkvot i grus

	m [kg]
Cement	15,510
Vatten	6,898
0-8 (grus)	27,983
8-12 (sten)	28,457
Luft	0,000

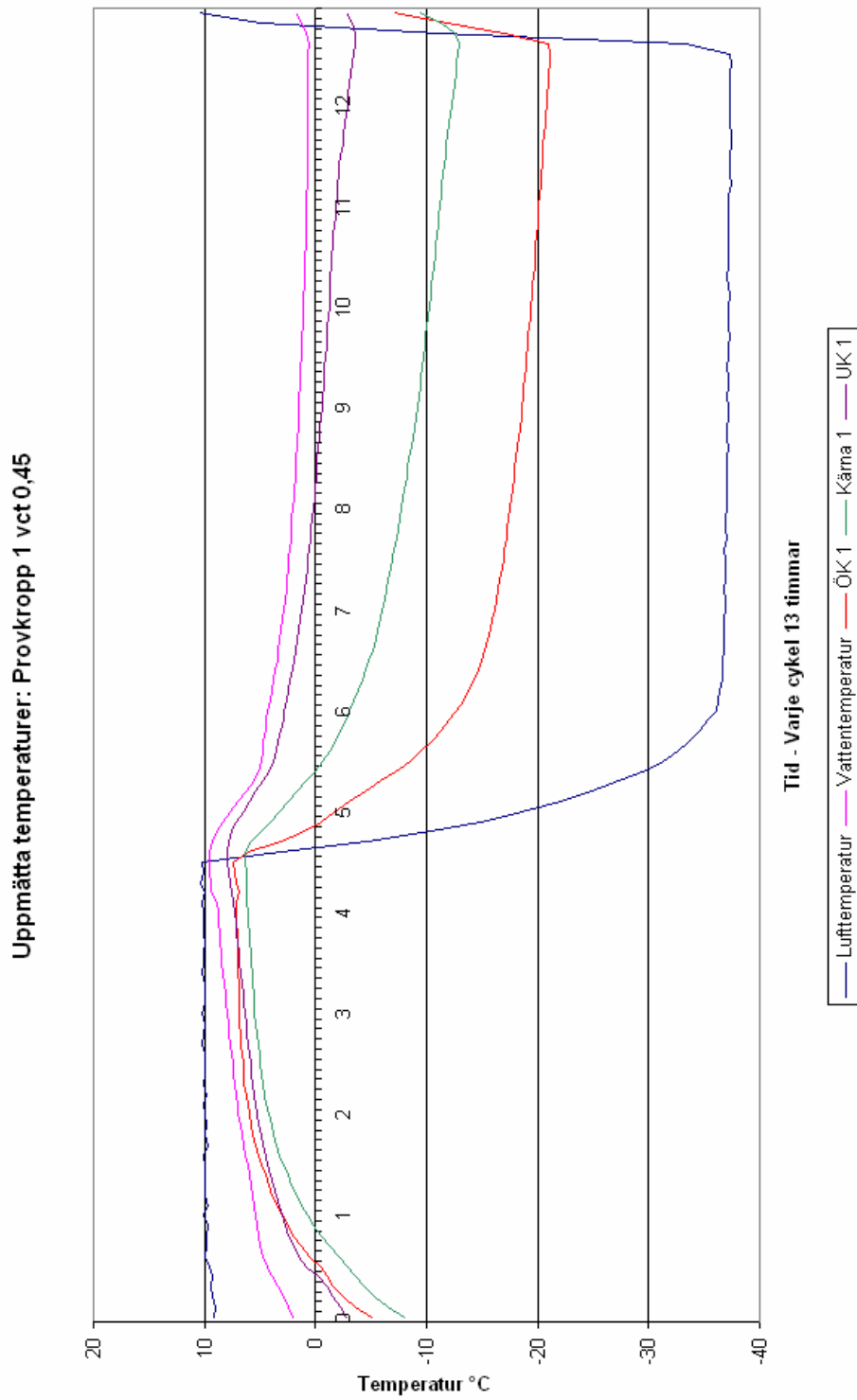
### Uppmätta egenskaper

Fuktkvot i grus [%]	0,3
Luftporbildare 88L (g)	9
Sättnått [mm]	50
Lufthalt [%]	6,50
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	2247

## Bilaga 4 – Temperaturer provkropp 4 vct 0,65



## Bilaga 5 – Temperaturer provkropp 1 vct 0,45



## Bilaga 6 – Skadeutveckling provkroppar vct 0,65



*Provkropp 1, vct 0,65: 0 cykler.*



*Provkropp 1, vct 0,65: 13 cykler*



*Provkropp 1, vct 0,65: 26 cykler*



*Provkropp 1, vct 0,65: 38 cykler*



*Provkropp 1, vct 0,65: 51 cykler*

Frostsprängning i betongdammar

---



*Provkropp 2, vct 0,65: 0 cykler.*



*Provkropp 2, vct 0,65: 13 cykler*



*Provkropp 2, vct 0,65: 26 cykler*



*Provkropp 2, vct 0,65: 38 cykler*



*Provkropp 2, vct 0,65: 51 cykler*

Frostsprängning i betongdammar

---



*Provkropp 3, vct 0,65: 0 cykler.*



*Provkropp 3, vct 0,65: 13 cykler*



*Provkropp 3, vct 0,65: 26 cykler*



*Provkropp 3, vct 0,65: 38 cykler*



*Provkropp 3, vct 0,65: 51 cykler*



## Bilaga 7 – Skadeutveckling provkroppar vct 0,45



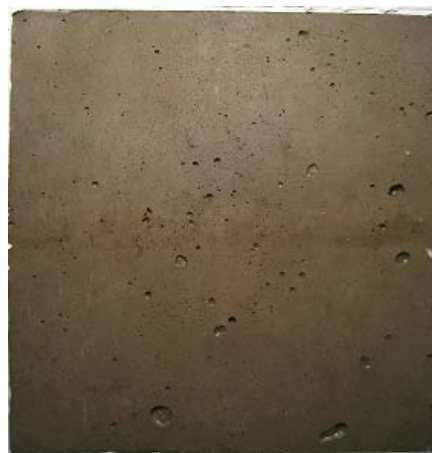
*Provkropp 2, vct 0,45: 0 cykler*



*Provkropp 2, vct 0,45: 50 cykler*



*Provkropp 3, vct 0,45: 0 cykler*



*Provkropp 3, vct 0,45: 50 cykler*



*Provkropp 4, vct 0,45: 0 cykler*



*Provkropp 4, vct 0,45: 50 cykler*

## Bilaga 8 – Medelvärden av ultraljudsmätningar

### Ultraljudsmätning: vct 0,65

Provkropp: 1 ÖK 1 UK 2 ÖK 2 UK 3 ÖK 3 UK 4 ÖK 4 UK  
 [µs] [µs] [µs] [µs] [µs] [µs] [µs] [µs]

Fryscykel:

0	Utrustning saknades, test på referensprovkropp gav 18,0							
13	19,9	-	19,0	-	18,1	-	19,5	-
26	19,8	-	21,3	-	19,1	-	21,6	-
38	23,2	19,3	26,0	19,4	22,2	18,4	24,9	21,6
51	27,9	20,1	35,6	19,8	23,6	18,3	29,0	21,8

### Ultraljudsmätning: vct 0,45

Provkropp: 1 ÖK 1 UK 2 ÖK 2 UK 3 ÖK 3 UK 4 ÖK 4 UK  
 [µs] [µs] [µs] [µs] [µs] [µs] [µs] [µs]

Fryscykel:

0	18,0	-	17,6	-	18,2	-	17,3	-
13	17,6	-	17,1	-	17,9	-	16,9	-
26	17,4	17,3	17,6	17,1	18,1	17,6	17,2	16,7
39	17,2	16,9	17,4	17,1	17,9	17,4	17,7	16,5
50	17,3	16,9	17,6	17,2	17,6	17,5	16,8	16,6