

Samband mellan isbildning och längdändring i betong med olika bindemedel

Timmie Karlsson

Rapport TVBM-5111

Byggnadsmaterial, Lunds Universitet

Rapport 5111
ISRN: LUTVDG/TVBM-17/5111-SE(1-47)
ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118
221 00 Lund

www.byggnadsmaterial.lth.se

Förord

Det här examensarbetet markerar slutet för min tid på Väg- och Vattenbyggnadsprogrammet vid Lunds Tekniska Högskola. Det har varit fem händelserika år med massor av minnen som jag alltid kommer ha med mig i framtiden. Examensarbetet markerar inte bara slutet på min studietid utan det är också starten på något nytt nu när jag ska ut i arbetslivet som civilingenjör.

Examensarbetet startade i januari 2017 på avdelningen för Byggnadsmaterial på LTH tillsammans med min handledare Katja Fridh och examinator Lars Wadsö. Examensarbetet avslutades i juni 2017 och omfattar de sista 30 av 300 högskolepoäng på civilingenjörsutbildningen som jag nu har avklarat. Jag skulle vilja rikta ett stort tack till min handledare Katja Fridh för stöd och uppmuntran under arbetets gång samt alla de diskussioner vi haft om försöksuppställningar och resultat. Jag vill även tacka Martin Strand som hjälpte till under gjutningarna och för intressanta diskussioner i frostlabbet. Jag skulle även vilja tacka min examinator Lars Wadsö för tips och tolkning av kalorimetern i början av projektet och utan Bengt Nilsson och Stefan Backe hade jag inte fått så mycket gjort nere i labbet med borrning, sågning samt inkoppling och kalibrering av kalorimetern.

Utöver redan nämnda personer vill jag tacka övrig personal på avdelningen för en trivsamtid.

Lund, juni 2017

Timmie Karlsson

Sammanfattning

Betong har under lång tid varit ett av de vanligaste byggnadsmaterialen och används idag i stor utsträckning till framförallt bärande konstruktioner. En bärande konstruktion utsätts för olika typer av påfrestningar och en av de mer problematiska för betong är frostangrepp. Problematiken beror på betongens begränsade draghållfasthet och att vid låga temperaturer fryser vattnet i betongen till is. Expansionen när vattnet övergår till is skapar dragspänningar i betongen som då kan medföra skador.

Dagens samhälle strävar efter att bli mer och mer miljövänligt och innebär utmaningar för betongindustrin. Vid cementtillverkning släpps stora mängder koldioxid ut och den stora utmaningen för betongindustrin är att minska de utsläppen. Ett av sätten att minska utsläppsproblemet är att byta ut en del av cementet i betong mot tillsatsmaterial med mindre miljöpåverkan (Lothenbach *et al.*, 2011). I den här rapporten behandlas två av de vanligaste tillsatsmaterialen, slagg och flygaska.

Studien omfattar två olika typer av försök där båda utfördes i en unik utrustning som samtidigt kan mäta isbildning och längdändring. I det första försöket fick provkroppen frysa och tina en gång samtidigt som provet var fuktisolerat. Det här försöket omfattar tre olika material med två olika lufthalter. Materialen är betong med CEM I, betong där 35% av cementet är utbytt mot slagg och betong där 35% av cementet är utbytt mot flygaska. Varje material är testat med lufthalter på omkring 2% och 5%. I det andra försöket fick provkroppen frysa och tina flera gånger samtidigt som provet hade tillgång till natriumkloridlösning. Under det andra försöket studerades bara betong med 35% flygaska och 5,7% luft. Målet med det första försöket var att studera eventuella skillnader i hur betong med olika bindemedel bildar is samt hur isbildningen påverkar dilatationen i de olika materialen. Målsättningen för det andra försöket var att ta reda på om det var möjligt att kontinuerligt studera islinnsbildning genom längdändringsmätningar när provet har tillgång till vätska.

Resultatet i studien visade att betong med CEM I har en relativt linjär isbildning medan isbildningen i betong med slagg och flygaska till stor del sker vid temperaturer omkring $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dilatationen följer den termiska rörelsen med små bidrag från isbildningen. Anledningen till att dilatationen i studien inte blir större beror troligtvis på att isen får plats i befintliga porer. Studien visar också att det är möjligt studera islinnsbildning genom längdändringsmätningar i betong när provet har fri tillgång till vätska. Dilatationen på grund av islinnsbildningen liknar resultatet från ett experiment av Powers & Helmuth (1953) där de visade att längdutvidgningen ökar trots att temperaturen var konstant.

Abstract

Concrete has been one of the most common construction material for a long time and today it is used to a large extent in load-bearing structures. Load-bearing structures are exposed to different types of stresses and one of the most severe is frost damage. The problem with frost damage is due to the low tensile strength of concrete. When the water in concrete freezes at low temperatures the water expands and create tensile stresses that might damage the concrete.

Today's society is striving to be more and more environmentally friendly and it creates challenges for the concrete industry. The manufacturing of cement cause a large amount of carbon dioxide emissions and the biggest challenge for the concrete industry is to reduce these emissions. One way of reducing the emissions is to replace some of the cement with supplementary cementitious materials (SCM) which have a smaller impact to the environment (Lothenbach *et al.* , 2011). Two of the most common SCMs, slag and fly ash, will be discussed in this report.

Two different experiments has been carried out in this study. Both experiments used a unique device that simultaneously measures ice formation and length change. The specimens in the first experiment were moisture insulated and were only allowed to freeze and thaw once. During the first experiment, three different materials were used with two levels of air entrainment. Concrete with CEM I, concrete with 35% of the cement replaced by slag and concrete with 35% of the cement replaced by fly ash was used in the study. The air entrainment levels were about 2% and 5%. In the second experiment the specimen was allowed to freeze and thaw several times and also had access to a sodium chloride solution during the cycles. During the second experiment only the concrete with 35% fly ash and an air entrainment of 5,7% was used. The aim with the first experiment was to study if the formation of ice differs between concretes with different binders and also how the ice formation affect the dilation of the different materials. The second experiment was carried out to see if it was possible to continuous study the formation of microscopic ice bodies by length change when the specimen had access to a solution.

The results from the study show that CEM I concrete form ice linearly while a major part of the ice formation in concrete with slag and fly ash occurs at about -40 °C. The dilation follows the thermal movement with small contributions from the ice formation. The reason for the small dilation is probably that the formed ice can fit into the existing pores. This study also showed that it is possible to study the formation of microscopic ice bodies by length change when the specimen had access to a solution. The dilation from the formation of the microscopic ice bodies resembles the result from the experiment carried out by Powers & Helmuth (1953) where they showed that the longitudinal extension continues even if the temperature is held constant.

Innehåll

Förord	I
Sammanfattning	III
Abstract	V
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Frågeställning	2
1.4 Avgränsningar	2
2 Teori	3
2.1 Bindemedel	3
2.1.1 Cement	3
2.1.2 Tillsatsmaterial	4
2.2 Hydratationsprocessen	5
2.2.1 Påverkan av tillsatsmaterialen flygaska och slagg	5
2.3 Cementpastans struktur	5
2.4 Frostskador	6
2.5 Kritisk vattenmättnadsgrad	8
3 Material & Metod	11
3.1 Encykelförsök med fuktisolering	11
3.1.1 Recept	11
3.1.2 Gjutning	12
3.1.2.1 Betong B – CEM I utan luftporbildare	12
3.1.2.2 Betong A – CEM I med luftporbildare	14
3.1.2.3 Betong C – Slagg med luftporbildare	14
3.1.2.4 Betong E – Flygaska med luftporbildare	15
3.1.2.5 Betong D – Slagg utan luftporbildare	15
3.1.2.6 Betong F – Flygaska utan luftporbildare	16

3.1.3	Utformning av kalorimeter	17
3.1.3.1	Kalibrering av kalorimeter	18
3.1.3.2	Fryscykel	19
3.1.3.3	Beskrivning av isberäkningsprogrammet	19
3.1.4	Förberedelser inför provning	20
3.1.4.1	Avformning och borring	20
3.1.4.2	Preparering och vägning av provkroppar	20
3.1.5	Omvandling av utdata	21
3.1.6	Test med provkropp och justering av fryscykel	22
3.2	Flercykelförsök med öppen frysning	25
3.2.1	Betongval och utformning av provkroppar	25
3.2.2	Provuppställning och fryscykel	25
3.2.3	Test av uppställningen	26
3.2.3.1	Justeringar av uppställningen	26
4	Resultat	31
4.1	CEM I – med och utan tillsatt luft	32
4.1.1	A1 – med luft	32
4.1.2	B1 – utan luft	33
4.2	CEM I med inblandat slagg – med och utan tillsatt luft	34
4.2.1	C1 – med luft	34
4.2.2	D1 – utan luft	35
4.3	CEM I med inblandad flygaska – med och utan tillsatt luft	36
4.3.1	E1 – med luft	36
4.3.2	F1 – utan luft	37
5	Analys	41
5.1	Diskussion	41
5.2	Slutsats	45
5.3	Förslag på fortsatta studier	45
6	Litteraturförteckning	46
A	Provkroppar – Bilder och mått	A-1

Kapitel 1

Introduktion

1.1 Bakgrund

Under lång tid har betong varit ett av de vanligaste byggnadsmaterialen och så är fallet även idag. Materialet används framförallt till bärande konstruktioner där betongen utsätts för flera olika påfrestningar. Några exempel på påfrestningar är last, frost och nötning (Burström, 2007). Då betong är ett mångsidigt material där egenskaperna kan varieras kraftigt kan dessa påfrestningar tas om hand genom att justera betongreceptet beroende på vilken påfrestning som betongen kommer utsättas för. I Sverige är en av de vanligaste påfrestningarna frost som också är en av de mer problematiska påfrestningarna för betong generellt sett. Anledningen till detta är betongens begränsade draghållfasthet. När betong utsätts för låga temperaturer börjar vattnet i betongen att frysa och expansionen när vattnet övergår till is medför dragspänningar i betongen.

Samtidigt som betongen är ett viktigt inslag i samhället ställer samhället större och större krav på att alla branscher ska bli mer miljövänliga. Den stora utmaningen för betongindustrin är att minska koldioxidutsläppen eftersom cementtillverkningen släpper ut stora mängder koldioxid. Ett sätt att minska miljöbelastningen är att byta ut en del av cementet mot tillsatsmaterial som inte ger en så stor belastning på miljön (Lothenbach *et al.*, 2011; Paris *et al.*, 2016). De tillsatsmaterial som kommer behandlas i den här rapporten är granulerad masugnsslagg och flygaska. En annan fördel med att använda dessa material i betong är att de annars skulle lagts på deponi.

I den här studien används en unik utrustning, som byggts på avdelningen för byggnadsmaterial av Dr Sture Lindmark, som samtidigt kan mäta isbildningen och längdändringen i betong. Två olika typer av försök har genomförts. Ett försök där fuktisolerade provkroppar fick frysa och tina en gång samt ett försök där provkropparna frysts och tinats i flera omgångar samtidigt som de hade tillgång till natriumkloridlösning.

1.2 Syfte

Syftet med det första försöket är att få en ökad förståelse för eventuella skillnader i isbildning mellan betong med olika bindemedel samt isbildningens bidrag till expansionen i respektive material.

Syftet med det andra försöket är att undersöka om det är möjligt att studera islinsbildning under fercykelförsök med fri tillgång vätska med den specialbyggda utrustningen.

1.3 Frågeställning

- Är det någon skillnad på vid vilken temperatur betong med olika bindemedel bildar is?
- Hur påverkar isbildningen töjningen av materialet?
- Hur påverkas betongen om den fryser och tinas flera gånger med tillgång till ofrusen vätska?
- Är det möjligt att studera islinsbildning genom längdändring under flercykelförsök med fri tillgång till vätska med den specialbyggda utrustningen?

1.4 Avgränsningar

Projektet kommer behandla tre olika typer av betong med två olika lufthalter vilket betyder sex olika betongtyper.

All betong som använts i studien har inte torkats eller karbonatiserats.

Kapitel 2

Teori

I det här kapitlet beskrivs hur betong är uppbyggt och hur den uppnår sin hållfasthet. Fokus ligger på bindemedlet cement och vilka tillsatsmaterial som kan ersätta cement i betong. I den här studien kommer de två tillsatsmaterialen slag och flygaska att användas och de är också två av de vanligaste tillsatsmaterialen (Burström, 2007). Kapitlet behandlar också hur frostsador uppstår i betong och vilka mekanismer som ligger bakom dessa skador. Slutligen beskrivs också mätprincipen bakom den utrustning som kommer användas i studien.

2.1 Bindemedel

Beståndsdelarna i betong är i huvudsak *ballast*, *vatten* och *bindemedel* (Burström, 2007). Vatten och ballast som kan vara sand, grus och sten kommer inte att behandlas mer ingående då dessa inte förväntas påverka resultaten i studien. Inverkan av olika bindemedel förväntas däremot påverka resultatet och kommer studeras mer grundligt. Det är precis som det låter bindemedlet som binder samman betongen och tillsammans med ballasten ger den dess hållfasthet och olika egenskaper. Bindemedel i betong brukar delas upp i tre olika klasser (Ljungkrantz *et al.* , 1994).

- Hydrauliska material
- Puzzolana material
- Latent hydrauliska material

Hydrauliska material hårdnar vid reaktion med vatten och blir även beständiga mot vatten efter reaktionen vilket gör att de kan användas vid gjutning både ovan och under vatten. Ett exempel på ett sådant material är portlandcement.

Puzzolana material hårdnar även de i kontakt med vatten men här krävs också att det finns löslig kalciumhydroxid tillgängligt för att materialet ska härda. Ett exempel på ett puzzolanskt material är flygaska.

För att *latent hydrauliska material* ska hårdna behöver de precis som de andra materialen vatten men även en aktivator som måste vara alkalisk. När väl reaktionen har kommit igång så klarar kalkinnehållet i de latent hydrauliska materialen av att hålla igång den fortsatta reaktionen. Ett exempel på sådant material är mald granulerad masugnsslagg.

2.1.1 Cement

Cement, eller portlandcement som är det fullständiga namnet, består huvudsakligen av kalksten och lera som har finmalts och sedan bränts i temperaturer upp till cirka 1450 °C (Burström, 2007;

(Taylor, 1997). Efter bränning kyls materialet ner och har då formen av kulor. Kulorna mals sedan tillsammans med lite gips ner till det som sedan blir cement. Gipset är nödvändigt för att inte cementet ska binda och utveckla hållfasthet för tidigt (Taylor, 1997).

Vid bränningen i ugnen bildas oxider främst i form av kalciumoxid och kiseldioxid men även aluminiumoxid och järnoxid bildas i små mängder. Under tiden i ugnen förenar sig sedan dessa oxider till klinkermineraler. Det är sedan klinkermineralerna som ger cementet dess egenskaper (Burström, 2007).

Nedan följer en beskrivning, med kemiska beteckningar, för de vanligaste klinkermaterialen enligt Johansson (1994a).

- Trikalciumsilikat - $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \rightarrow \text{C}_3\text{S}$
- Dikalciumsilikat - $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{S}$
- Trikalcialuminat - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{C}_3\text{A}$
- Tetrakalciumaluminatferrit - $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{C}_4\text{AF}$

Den största komponenten i cement med upp till 70% av innehållet är C_3S och har också störst inverkan på den tidiga hållfastheten. Störst inverkan på den långsiktiga hållfastheten har C_2S som kan ha en andel på upp till 20% av cement. Det är alltså dessa två mineraler som har störst inverkan på betongens hållfasthet och med kvoten $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$ kan hållfasthetstillväxten styras. Ju större kvot desto större hållfasthet i ett tidigare skede och tvärtom. C_3A är anledningen till att gips blandas in i portlandcement eftersom C_3A reagerar väldigt snabbt med vatten och då skulle arbetsbarheten minska. Innehållet av C_3A i cement brukar vara 5-10% (Johansson, 1994a).

2.1.2 Tillsatsmaterial

Under cementtillverkning avges stora mängder koldioxid och för att kunna minska utsläppet används olika sorters tillsatsmaterial som ersätter en del av cementet i betongen (Lothenbach *et al.*, 2011). Nedan följer en beskrivning av två av de vanligaste tillsatsmaterialen, flygaska och slagg.

Flygaska

Flygaska är en restprodukt från kolpulvereldade kraftverk och värmeverk (Burström, 2007; Johansson, 1994b; Siddique & Khan, 2011). Själva flygaskan är det oförbrända materialet som följer med rökgaserna ut från förbränningen och sedan separeras från rökgaserna med hjälp av olika filter. Den huvudsakliga beståndsdel i flygaska är aluminiumsilikatglas (Burström, 2007). Flygaskans kemiska sammansättning kan variera mycket och beror dels på vilket kol som används vid förbränningen och dels på vilken förbränningsprocess som används. Det här innebär att all flygaska inte får användas i betong.

Granulerad masungsslagg

Granulerad masungsslagg är en restprodukt från järntillverkning där temperaturen är omkring 1500 °C (Siddique & Khan, 2011). Slaggen flyter ovanpå det smälta järnet och kan på så sätt avskiljas från järnet. Den kyls sedan av med hjälp av luft eller vatten (Johansson, 1994b). Kyls slaggen av långsamt kristalliserar slaggen och den får i princip inga hydrauliska egenskaper. Därför måste den snabbt kylas av till under 800 °C och görs oftast med hjälp av vattenstrålar med högt tryck (Taylor, 1997). Efter nerkyllning torkas och mals slaggen ner till ett fintkornigt pulver med ungefär samma finhet som cement (Johansson, 1994b; Siddique & Khan, 2011).

2.2 Hydratationsprocessen

I avsnitt 2.1.1 nämns att C_3S och C_2S är de klinkermaterial som bidrar mest till betongens hållfasthet. Detta sker genom att cementet kommer i kontakt med vatten och dessa två silikater hydratiserar och bildar en cementgel som kallas för CSH (Johansson, 1994a; Neville & Brooks, 1987). Det är sedan denna gel som står för hållfastheten i betongen. Tillsammans med CSH bildas också kalciumhydroxid (CH). De andra klinkermaterialen som beskrivs i 2.1.1 reagerar med det gips ($CaSO_4$) som blandas i betongen och de kemiska reaktionerna kan översiktligt beskrivas enligt

- $2C_3S + 6H_2O \rightarrow CSH + 3CH$
- $2C_2S + 4H_2O \rightarrow CSH + CH$
- $2C_3A + 3CaSO_4 + 32H_2O \rightarrow C_3A3CaSO_4 \cdot 32H_2O$
- $C_4AF + CaSO_4 \cdot 2H_2O + CH \rightarrow 3C(AF)3CaSO_4 \cdot H_2O$

Då det bildas kalciumhydroxid vid hydratiseringen av cement aktiveras eventuella puzzolanska och latent hydrauliska material av kalciumhydroxiden. Tillsammans med de materialen övergår kalciumhydroxiden till cementgel genom reaktion med vatten enligt Ekvation 2.1.



där M:et står för antingen puzzolanskt material eller latent hydrauliskt material.

2.2.1 Påverkan av tillsatsmaterialen flygaska och slagg

Tillsats av flygaska påverkar betongens permeabilitet och dess hydratationshastighet då flygaska genom Ekvation 2.1 fortsätter betongens hydratation. Permeabiliteten minskar genom att hydratiseringen fortsätter. Kapillärporerna fylls då med mer cementgel vilket minskar porstorleken och då minskar också permeabiliteten. Förutom att permeabiliteten minskar bidrar förminskningen av porstorleken på ovanstående sätt till att kontinuiteten av porsystemet i slutändan bryts (Siddique & Khan, 2011).

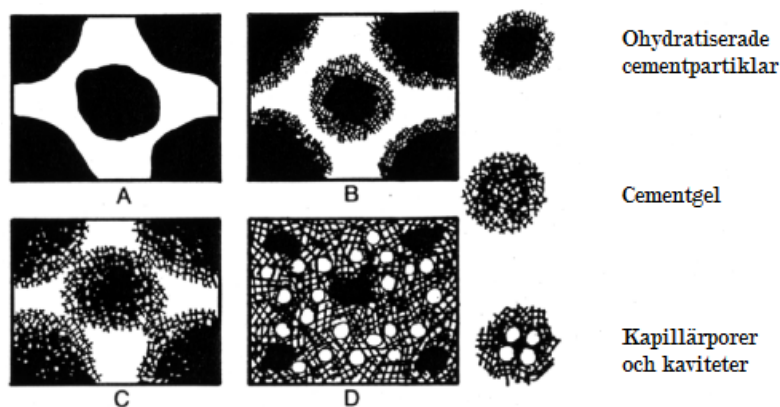
När slagg används i betong ökar andelen små gelporer medan andelen stora kapillärporer blir mindre på grund av reaktionen i Ekvation 2.1 samtidigt som den totala porvolymen är densamma (Siddique & Khan, 2011). Detta innebär på samma sätt som för flygaska att permeabiliteten blir lägre när slagg blandas in i betong.

Generellt reagerar både slagg och flygaska långsammare än cement och ger därför initieilt lägre hållfasthet (Johansson, 1994b). Det går dock att öka mängden C_3S och C_2S i cementet för att uppnå samma kortsiktiga hållfasthet som med ren cement. Ett annat sätt att öka den kortsiktiga hållfastheten är att mala cementet till större finhet. Det beror också på hur mycket av cementet som ersatts av tillsatsmaterial.

2.3 Cementpastans struktur

Precis efter gjutning när cementpastan fortfarande är färsk och plastisk består den av ett nätverk av cementpartiklar i vatten. Efter ett tag börjar cementet hydratisera till cementgel. Den här cementgelen består av gelpartiklar och mellan dessa partiklar bildas väldigt fina porer som kallas för gelporer (Powers, 1958). Själva cementgelen har en större volym än de ursprungliga cementkornen vilket leder till att gelen fyller ut det utrymme som från början var vattenfyllt (Fagerlund, 1994a). Beroende på vilket vattencementtal (vct, definieras som massa vatten/massa cement) som har använts till betongen så bildas det kapillärporer i det utrymme som gelen inte förmår att fylla ut. Det här innebär att mängden kapillärporer beror på hur högt vct som använts vid gjutning. Ju

högre vct desto större andel kapillärporer. Det finns dock en undre gräns för när kapillärporer inte kan bildas och detta sker enligt Powers & Brownyard (1946) när betongen har ett vct på cirka 0,39. Kapillärporerna kan antingen vara fyllda med luft eller vatten eller delvis fyllda med vatten medan gelporerna är fyllda med vatten (Taylor, 1997). I Figur 2.1 visas en schematisk bild av strukturutvecklingen.



Figur 2.1: Strukturutveckling enligt Powers (1962). A – Direkt efter blandning, B – Efter några minuter, C – Vid bindning, D – Efter några månader.

2.4 Frostskador

Frostskador i betong brukar delas in i två olika typer av skador, *inre skador* och *ytavskalning* (Pigeon *et al.*, 1996). De inre frostskadorna ger bland annat upphov till hållfasthetsförlust, lägre styvhet och sämre vidhäftning till armeringsjärn. Ytavskalning är precis som det låter en gradvis avskalning av ytan och ger upphov till ett försämrat täcksikt av armeringsjärnen (Lindmark, 2010). Frostskador på ytan sker oftast i samband med att det finns tillgång till salthaltigt vatten och kallas ofta för saltfrostangrepp (Fagerlund, 1994b). Den här rapporten kommer inte att behandla ytavskalning utan bara inre frostskador. Enligt Fagerlund (1994b) finns det tre olika typer av inre frostskador:

- Sluten behållare
- Hydrauliskt tryck
- Mikroskopisk islinnsbildning

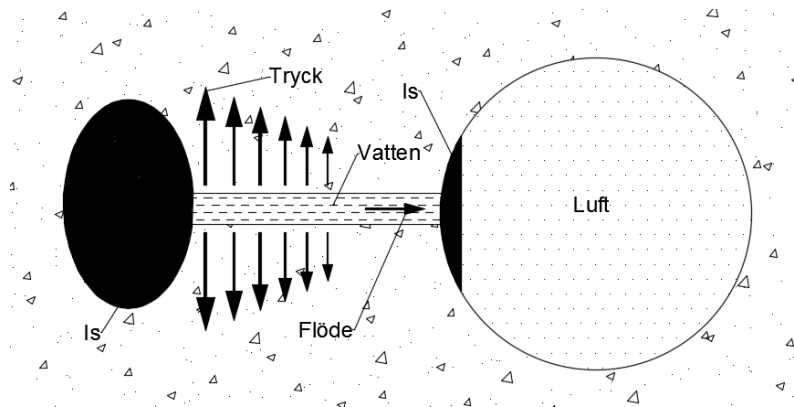
De här tre tillstånden kommer att beskrivas mer ingående i följande stycken. Generellt för frostskador är att de går att motverka genom att ha tillräckligt med luftporer i betongen där vattnet i betongen kan expandera utan att skada själva betongen. Tillsatsen av luftporer görs genom att använda luftporbildare vid gjutning som skapar väldigt många små och finfördelade luftporer i cementpastan (Burström, 2007).

Sluten behållare

För att en frostskada ska uppstå av en sluten behållare krävs det att ingen vattentransport får ske varken till eller från stället där isbildningen sker enligt Fagerlund (1993). Sannolikheten att det inte sker någon vattentransport i betongen är väldigt låg men det kan ske i delar av betongen om till exempel omgivningen har frusit till is och isen blockerar porerna. Det kan också ske om porväggarna har såpass låg permeabilitet att vattnet helt enkelt inte kan tränga igenom porväggen. Det här innebär att volymökningen på 9% som sker när vatten fryser till is måste tas om hand i poren.

Hydrauliskt tryck

Teorin om hydrauliskt tryck är en förklaringsmodell för frostsador som kan uppstå i betong. Teorin lanserades av Powers (1945) och utvecklades i Powers (1949). Sedan dess har teorin beskrivits många gånger av andra som till exempel Lindmark (2010) och Fridh (2005). Resonemanget i teorin gäller för vattnet i kapillärporerna då det kan frysa. Vattnet i gelporerna kan inte frysa eftersom porerna är för små för att isnukleation ska starta i porerna (Powers, 1958). Teorin går ut på att vatten i betongens porsystem bygger upp ett tryck mot porväggarna som överstiger betongens hållfasthet och därmed skadar betongen. Trycket byggs upp genom att vatten fryser i en por och eftersom vatten expanderar när is bildas måste det ofrusna vattnet ha någonstans att ta vägen. Det ofrusna vattnet pressas då genom porsystemet på väg till en annan por där det finns utrymme för vattnet att expandera när det väl börjar frysa. När vattnet pressas fram av isbildningen i betongen uppstår en slags friktion som motkraft till vattenflödeskraften och därmed byggs ett tryck upp i porsystemet. För att kunna motverka detta fenomen behövs det tillräckligt med luftporer i betongen (Pigeon *et al.*, 1996). I Powers (1949) beskrivs att avståndet mellan luftporerna måste vara tillräckligt litet för att betongen ska kunna skyddas. Detta beror på att trycket blir större ju längre avstånd vattnet behöver färdas mellan porerna. Ett kort avstånd innebär att trycket inte hinner byggas upp till en skadligt nivå innan vattnet når intilliggande luftporer. I Figur 2.2 nedan visas en bild av det hydrauliska trycket som kan uppstå. Observera att det är en schematisk bild och att luftporen är mycket större än kapillärporen i verkligheten.



Figur 2.2: Schematisk bild av hydrauliskt tryck. Avritad från (Utgenannt, 2004).

Mikroskopisk islinnsbildning

I Powers & Helmuth (1953) beskrivs hur frostsador i cementpasta inte enbart beror på det hydrauliska trycket utan att även mikroskopisk islinnsbildning är en faktor. Teorin beskriver hur vatten i betongen kan befinna sig i både fryst och flytande form samtidigt beroende på var i pastan vattnet befinner sig. Ju mindre porer desto lägre temperatur behövs för att vatten ska kunna frysa vilket innebär att is bildas i de största porerna först. Då vatten i flytande form har ett högre energivärde än is vid temperaturer under 0 °C innebär det att det ofrusna vattnet kommer vilja strömma till islinserna. När sedan islinserna börjar växa i kapillärporerna utsätts isen för ett tryck då isen trycker ut porväggarna. När detta sker ökar isens energivärde samtidigt som det ofrusna vattnets energivärde minskar på grund av den minskande mängden ofrusat vatten. Då drivkraften är termodynamisk avstannar isbildningen inte förrän det uppstår en balans mellan isens och det ofrusna vattnets energivärde. Precis som i den hydrauliska tryckteorin beskriver Powers & Helmuth (1953) att luftporer minskar risken för frostsador eftersom is som bildas i luftporer inte kommer att utsätta pastan för något tryck. Därmed har isen i luftporerna det allra lägsta energiinnehållet vilket attraherar det ofrusna vattnet mest. Då luftporer är större än kapillärporer bildas is där först. Ju tätare luftporerna är varandra desto högre blir vattenflödet dit och mindre tryck byggs upp i kapillärporerna.

I den här studien finns det två olika omgivningar för provkropparna, en där provkroppen är fuk-

tisolerad och en där provkroppen har tillgång till saltlösning. Det här påverkar islinnsbildningen i betongen på olika sätt enligt Lindmark (1998). Om provkroppen är fuktisolerad eller omgiven av luft har islinserna närmst ytan tillgång till mindre fukt som kan attraheras av isbildningen och skadorna blir då mindre på ytan än i provkroppens inre. Vidare skriver Lindmark (1998) att om provkroppen däremot har fri tillgång till en fryspunktnedsättande lösning kommer islinserna i provkroppen suga in lösningen i provkroppen. Balansen i energivärdet uppstår då aldrig och därmed fortsätter islinserna växa. Det här tillståndet fortsätter tills dess att saltlösningen runt om provkroppen fryser eller när saltkoncentrationen i porerna blir så hög att energivärdet balanseras.

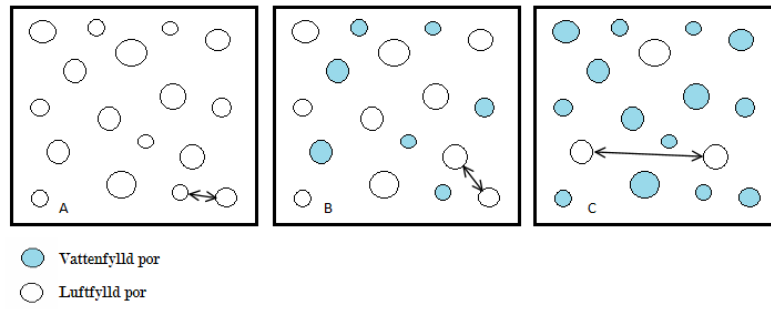
Utöver de tre olika typerna av skador finns ett annat fenomen som uppstår vid frysning och upptining av betong. När stora delar av betongens porer är fyllda med vatten som senare fryser till is uppstår skillnader i hur mycket isen och betongen expanderar och kontraherar beroende på om temperaturen stiger eller sjunker. Is har fem till sex gånger större längdutvidgningskoefficient än betong och därmed expanderar och kontraherar isen mycket mer än betongen. Kontraktionen är gynnsam för betongen under frysning då det motverkar expansionen från isbildningen men expansionen riskerar att skada betongen under upptining (Fridh, 2005; Penttala & Al-Neshawy, 2002).

Gemensamt för frostskaorna är att det är isens expansion som skapar skadorna i betongen och ger en bestående deformation. Enligt Jansson & Fagerlund (1983) är gränsen för betongens brottöjning 0,11 ‰.

2.5 Kritisk vattenmättnadsgrad

Gemensamt för olika typer av frostskaorna är att de i grund och botten är ett fuktproblem. I sin doktorsavhandling skriver Utgenannt (2004) utefter vad Fagerlund (1973) kom fram till att om fuktinnehållet i ett material är för högt riskerar materialet, i detta fall betong, att ta skada av frost. När betongen fuktas upp såpass mycket att fuktinnehållet kan skada betongen på något sätt har betongen nått sin så kallade kritiska vattenmättnadsgrad. Denna kritiska vattenmättnadsgrad kan användas som en materialparameter och bestäms genom en metod framtagen och beskriven av Fagerlund (1977).

Om ett material är helt torrt är vattenmättnadsgraden noll och således är vattenmättnadsgraden ett om alla porer i materialet är helt vattenfyllda (Utgenannt, 2004). I normala fall ligger vattenmättnadsgraden någonstans mellan noll och ett beroende på klimat och material. Den kritiska vattenmättnadsgraden hör ihop med den kritiska avståndsfaktorn mellan två tomma luftporer som beskrivs i Powers (1949). Den kritiska avståndsfaktorn är alltså det längsta avstånd som vatten kan transporteras under frysning utan att trycket blir för högt. Enkelt förklarar det beskrivas med att när avståndet mellan två luftporer är dubbelt så stort som den kritiska avståndsfaktor har betongen nått sin kritiska vattenmättnadsgrad (Utgenannt, 2004). I Figur 2.3 illustreras hur avståndet mellan två luftfyllda porer ökar med ökad vattenmättnadsgrad.



Figur 2.3: Schematisk bild över kritisk vattenmättnadsgrad. A – avståndet är mindre än 2 x den kritiska avståndsfaktorn, B – avståndet är lika med 2 x den kritiska avståndsfaktorn, C – avståndet är större än 2 x den kritiska avståndsfaktorn. Avritad från (Utgenannt, 2004).

Kapitel 3

Material & Metod

Den här rapporten innehåller två olika typer av försök, ett där provkropparna cyklas en gång och isoleras mot fukt utifrån samt ett där provkropparna cyklas flera gånger samtidigt som de har fri tillgång till vätska under cykeln.

3.1 Encykelförsök med fuktisolering

Utifrån beskrivningen av olika bindemedel i det föregående kapitlet valdes tre olika materialsammansättningar ut. Av de här tre materialen göts sedan ett block med enbart naturlig luftinblandning samt ett block med extra lufttillsats. Gjutningarna resulterade i sex olika typer av betong som studerades och betongtyperna visas i Tabell 3.1. I tabellen redovisas också hur betongtyperna benäms i försöken. Kolumnen för luft anger vilken lufthalt som var målsättningen vid gjutningarna. Alla betongtyper har en vct på 0,40.

Tabell 3.1: Betongtyperna som användes i försöken, dess benämning i testerna och vilka bindemedel som användes. Lufthalterna i tabellen var de som försöktes uppnås vid gjutningarna.

Betongtyp	Andel cement [%]	Andel tillsatsmaterial [vikt-%]	Luft [%]
CEM I (A)	100	-	4,5
CEM I (B)	100	-	2,0
CEM I + slagg (C)	65	35	4,5
CEM I + slagg (D)	65	35	2,0
CEM I + flygaska (E)	65	35	4,5
CEM I + flygaska (F)	65	35	2,0

3.1.1 Recept

De recept som användes vid gjutningarna bygger på tidigare forskning och provningar av Strand (2016) och ursprungsreceptet visas i Tabell 3.2. Det cement som användes vid gjutningarna var Anläggningcement tillverkat i Degerhamn med specifikationerna CEM I 42,5 N – SR 3 MH/LA. Luftporbildaren som användes vid gjutningarna var Sika AirPRO (SE) conc. Vid gjutningarna användes två olika flyttillsatsmedel vilka var Sika ViscoCrete RMC-520 som användes till betong med enbart CEM I och till betong med slagg samt Pozzolith 475-S från BASF som användes till betong med flygaska. Flygaskan tillhandahölls av företaget Emineral a/s och slaggen, MERIT 5000, tillhandahölls av företaget SSAB MEROX AB.

Receptet avser torrvikterna för ballasten vilket innebär att mängden vatten måste korrigeras med hänsyn till fukthalter i ballasten. Mängden vatten måste också korrigeras så att tillsatsen av flyt-

tillsatsmedel och luftporbildare tas med i beräkningen. I recepten med tillsatsmaterial korrigeras vikten för cement till 65% då tillsatsmaterialen ersätter 35% av cementet. I studien användes frostbeständig ballast.

Tabell 3.2: Grundrecept.

Beståndsdel	Mängd [kg/m ³ btg]
Vatten	172
Cement	430
Ballast 0-8	929,70
Ballast 8-12	274,26
Ballast 12-16	515,98

3.1.2 Gjutning

Vid gjutningen vägdes först alla beståndsdelar upp och sedan hälldes de torra delarna ner i blandaren med de största kornfraktionerna först. Därefter startades blandaren för att homogenisera de torra delarna. När de torra beståndsdelarna homogeniserats hälldes vatten och luftporbildare (i de fall det användes) ner i blandaren och kördes i två minuter. Flyttillsatsmedel tillsattes lite i taget tills betongen hade en önskad konsistens där den varken var för lätt- eller trögflytande. När betongen var färdigblandad bestämdes först sättmättet innan formen fylldes med betong och vibrerades med en stavvibrator. Efter det bestämdes lufthalten i betongen och i samband med det beräknades även betongens densitet. Sättmättet bestämdes med hjälp av en kon, så kallad sättkon, som placerades på en metallskiva på golvet. Konen som är öppen i båda ändar fylldes ungefär en tredjedel innan betongen kompakterades med hjälp av en stav med rundad ände 25 gånger. Proceduren upprepades två gånger tills konen var full vilken sedan planades av. Konen lyftes sedan upp och då sjönk betongen ihop och det är nedsjunkningen av betongens toppyta som är sättmättet. Det här är ett standardiserat mått där betongens konsistens mäts (Burström, 2007). Lufthalten bestämdes genom att en stålbehållare med volymen 8 dm³ fylldes med betong och planades av. Stålbehållaren förslöts och lufthalten bestämdes genom att trycksätta behållaren.

De första gjutningarna gjordes tillsammans med gjutningarna för ett annat examensarbete då samma typ av betong skulle användas av båda och därför användes den större blandaren i betonglabbet. Till dessa gjutningar användes en form med måtten 400 x 400 x 200 mm, se Figur 3.1. Till gjutningarna av Betong D och F användes en mindre blandare. Då den mindre blandaren bara kan gjuta cirka 30 dm³ betong installerades en avskiljare i den tidigare använda formen.

Betongtyperna i följande avsnitt är redovisade i den ordning som de göts i och följer därför inte numreringen i Tabell 3.1. De redovisade recepten i följande avsnitt är framräknade innan gjutning och sedan redovisas eventuella avvikelser. Till exempel användes inte allt flyttillsatsmedel som var framtaget enligt receptet i en del gjutningar.

3.1.2.1 Betong B – CEM I utan luftporbildare

Den första gjutningen gjordes med betong med CEM I och utan luftporbildare. Receptet korrigerades för en volym på 60 liter betong. Fukthalten i kornstorleken 0-8 mm mättes upp till 0,3 % och fukthalten i övriga kornstorlekar antogs vara 0,2 %, då detta har uppmätts vid tidigare gjutningar i laboratoriet.

Med hänsyn till fukthalten och flyttillsatsmedlet blev det slutliga receptet enligt Tabell 3.3. Vattnemängden i receptet är den uppvägda mängden vatten och de övriga mängderna i receptet avser de mängder som hälldes ner i blandaren. Det här gäller för samtliga betongtyper.

Tabell 3.3: Recept för Betong B.

Beståndsdel	Mängd [kg/60 liter btg]
Vatten	10,058
CEM I	25,800
Ballast 0-8	55,949
Ballast 8-12	16,489
Ballast 12-16	31,021
Flyttillsatsmedel	0,300

Mängden flyttillsatsmedlet som faktiskt användes var 314,3 gram vilket var mer än beräknat. Den första gjutningen var lite av en provomgång för att se om det gick att gjuta såpass små mängder i den större blandaren och ändå få fullständig omblandning. På grund av detta visade den färdiggjutna betongen tecken på vattenseparation. Detta blev ännu tydligare då betongen fått härda någon timme vilket illustreras i Figur 3.1. Vattnet som separerades hade ett djup på 1-1,5 centimeter.



Figur 3.1: Vattenseparation i betongen med CEM I utan luftporbildare samt formen som betongen göts i.

Sättnmättet, lufthalten och densiteten redovisas i Tabell 3.4.

Tabell 3.4: Egenskaper för Betong B utan luftporbildare.

Egenskap	Resultat
Sättnmätt	205 mm
Lufthalt	1,8 %
Densitet	2 433 kg/m ³

På grund av vattenseparationen blev sättnmättet väldigt högt, det är på gränsen till flytbetong som är väldigt lös i konsistensen.

60 liter visade sig vara lite för lite eftersom den sista betongen fick skrapas ihop från botten för att kunna utföra lufthaltstestet. Detta kan eventuellt medföra att lufthaltstestet inte blir representativt och därför utökades volymen till nästa gjutning.

3.1.2.2 Betong A – CEM I med luftporbildare

Till den andra gjutningen antogs samma fukthalt för ballasten som i den tidigare gjutningen men receptet korrigerades till 70 liter för att slippa använda bottenskräpet till lufthaltstestet. Dessutom användes luftporbildare som var utspädd i ett förhållande 1:9 vilket resulterade i receptet i Tabell 3.5. Flyttillsatsmedlet minskades till 250 g trots att mängden betong ökade för att undvika problemet med vattenseparation som uppstod vid den första gjutningen.

Tabell 3.5: Recept för Betong A.

Beståndsdel	Mängd [kg/70 liter btg]
Vatten	11,435
CEM I	30,100
Ballast 0-8	65,274
Ballast 8-12	19,236
Ballast 12-16	36,191
Flyttillsatsmedel	0,250
Luftporbildare	0,050

Allt flyttillsatsmedel användes inte utan den totala mängden i betongen blev 170,6 gram. Betongens egenskaper redovisas i Tabell 3.6.

Tabell 3.6: Egenskaper för Betong A.

Egenskap	Resultat
Sättnmätt	60 mm
Lufthalt	4,9 %
Densitet	2 347 kg/m ³

Sättnmättet på 60 mm innebär en trögflytande betong.

3.1.2.3 Betong C – Slagg med luftporbildare

Gjutningen för slaggbetongen gjordes med samma recept som för betong A med skillnaderna att fukthalten i kornstorleken 0-8 mm var 0.65 % och att 35 viktprocent av CEM I var ersatt med slagg. Det här gav receptet i Tabell 3.7.

Tabell 3.7: Recept för Betong C.

Beståndsdel	Mängd [kg/70 liter btg]
Vatten	11,207
CEM I	19,565
Slagg	10,535
Ballast 0-8	65,502
Ballast 8-12	19,236
Ballast 12-16	36,191
Flyttillsatsmedel	0,250
Luftporbildare	0,050

Mängden flyttillsatsmedel som användes var 125 gram och betongens egenskaper redovisas i Tabell 3.8.

Tabell 3.8: Egenskaper för Betong C.

Egenskap	Resultat
Sättnått	60 mm
Lufthalt	4,9 %
Densitet	2 307 kg/m ³

3.1.2.4 Betong E – Flygaska med luftporbildare

Gjutningen för betongen med flygaska gjordes med samma fukthalter för ballast som i gjutningen för betong C och följde nästan samma recept. Skillnaderna var att slagget var utbytt mot flygaska och att det användes lite mer luftporbildare samt att den inte var utspädd som i tidigare gjutningar med luftporbildare. Dessutom användes en annan typ av flyttillsatsmedel men lika mycket som i tidigare recept. Receptet för betongen med flygaska kan ses i Tabell 3.9.

Tabell 3.9: Recept för Betong E.

Beståndsdel	Mängd [kg/70 liter btg]
Vatten	11,172
CEM I	19,565
Flygaska	10,535
Ballast 0-8	65,502
Ballast 8-12	19,236
Ballast 12-16	36,191
Flyttillsatsmedel	0,250
Luftporbildare	0,085

Mängden flyttillsatsmedel som användes var 150 gram och egenskaperna för betongen redovisas i Tabell 3.10.

Tabell 3.10: Egenskaper för Betong E.

Egenskap	Resultat
Sättnått	30 mm
Lufthalt	5,7 %
Densitet	2 283 kg/m ³

Sättnåttet på 30 mm är lågt och definieras som betong med plastisk konsistens.

3.1.2.5 Betong D – Slagg utan luftporbildare

Vid gjutningen med slaggbetong utan luftporbildare korrigerades receptet för en volym på 22,1 liter betong. Även detta recept bygger på tidigare gjutningar av Strand (2016). Receptet korrigerades också beroende på fukthalten i materialet och precis som tidigare antogs de större kornfraktionerna innehålla 0,2 % fukt medan den minsta kornstorlekens fuktinnehåll mättes till 0,5 %. Receptet efter justeringarna redovisas i Tabell 3.11.

Tabell 3.11: Recept Betong D.

Beståndsdel	Mängd [kg/22,1 liter btg]
Vatten	3,563
CEM I	6,177
Slagg	3,326
Ballast 0-8	20,649
Ballast 8-12	6,073
Ballast 12-16	11,426
Flyttillsatsmedel	0,100

Mängden flyttillsatsmedel som faktiskt användes var 40 gram. Egenskaperna för betongen visas i Tabell 3.12.

Tabell 3.12: Egenskaper för Betong D.

Egenskap	Resultat
Sättnått	30 mm
Lufthalt	2,8 %
Densitet	2 376 kg/m ³

Vid mätningen av lufthalten observerades ett luftläckage vid handtaget som används för att pumpa upp trycket inuti spannen. Detta skulle kunna innebära att lufthalten i betongen är något lägre än vad mätaren visade.

3.1.2.6 Betong F – Flygaska utan luftporbildare

Precis som för betong D korrigerades receptet för en fukthalt på 0,5 % för den minsta kornstorleken och 0,2 % för de större samt en mängd på 22,1 liter. Receptet för betongen redovisas i Tabell 3.13.

Tabell 3.13: Recept för Betong F.

Beståndsdel	Mängd [kg/22,1 liter btg]
Vatten	3,563
CEM I	6,177
Flygaska	3,326
Ballast 0-8	20,649
Ballast 8-12	6,073
Ballast 12-16	11,426
Flyttillsatsmedel	0,100

Mängden tillsatsmedel som användes var 52 gram och egenskaperna för betongen redovisas i Tabell 3.14.

Tabell 3.14: Egenskaper för Betong F.

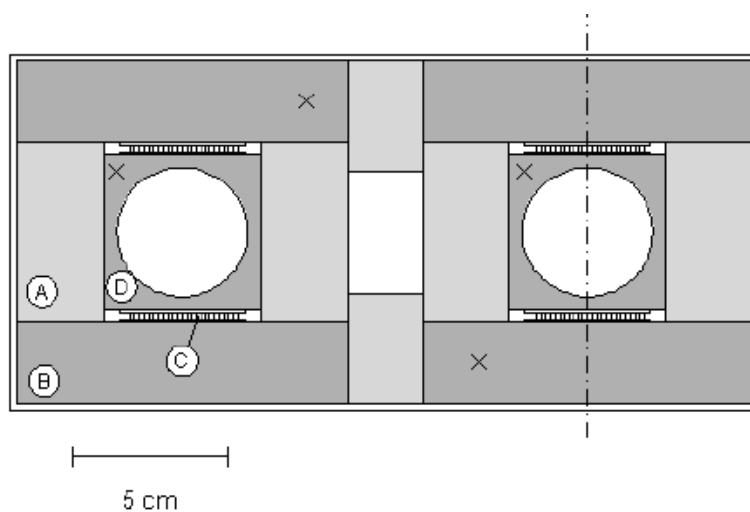
Egenskap	Resultat
Sättnått	20 mm
Lufthalt	2,0 %
Densitet	2 367 kg/m ³

Sättnmättet på 20 mm är lågt och definieras som betong med plastisk konsistens.

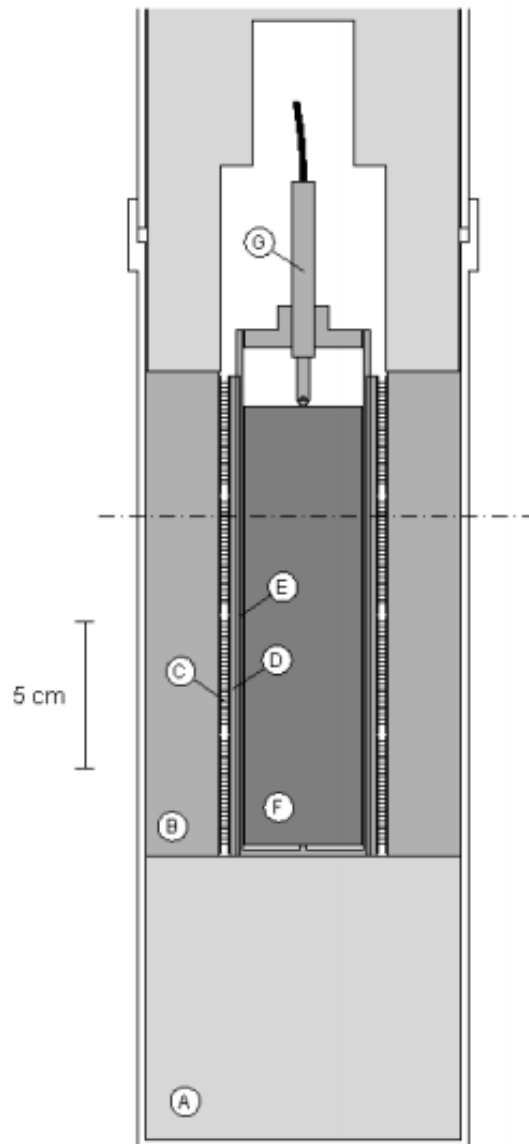
3.1.3 Utformning av kalorimeter

Kalorimetern som använts i den här rapporten finns beskriven i Fridh *et al.* (2003) som ligger till grund för detta stycke.

Kalorimetern är en tvillingkalorimeter, bestående av två identiska kalorimetrar, som samtidigt mäter värmeflöde och längdändring av två provkroppar och är konstruerad så att de två kalorimetrarna inte ska påverka varandra. En horisontell sektion visas i Figur 3.2 och en vertikal sektion visas i Figur 3.3. De mest intressanta mätningarna i den här rapporten kommer från de inbyggda värmeflödessensorerna som syns i båda figurerna och längdändringen som mäts av LVDT-givarna (Linear Variable Differential Transducer) som sätts fast i locket på behållarna och visas i Figur 3.3.



Figur 3.2: Schematisk bild på kalorimetern sett från ovan. A – isolering, B – aluminiumblock, C – värmeflödessensor, D – form för behållaren. X:en markerar var det sitter termoelement och det tomma utrymme i mitten är till för de elektriska kablar. Snittet till höger visar sektionen i Figur 3.3 (Fridh *et al.* , 2003).



Figur 3.3: Schematisk bild på kalorimeters genomskärning. A – isolering, B – aluminiumblock, C – värmeflödessensor, D – form för behållare, E – behållare, F – provkropp, G – LVDT-givare. Snittet i mitten visar sektionen i Figur 3.2 (Fridh *et al.* , 2003).

3.1.3.1 Kalibrering av kalorimeter

För att kunna få så bra mätresultat som möjligt måste kalorimetern vara kalibrerad innan försöken startade. Detta utfördes i olika steg beroende på vad som skulle kalibreras. LVDT-givarna, som mäter längdändring, kalibrerades genom att använda en mikrometer. LVDT-givarna skruvades fast i mikrometern samtidigt som LVDT-givarna var inkopplade i loggern som skulle användas i försöken. Därefter justerades mikrometern så att 0 på mikrometern motsvarade 0 för LVDT-givarna vilket kunde utläsas på datorskärmen. Värdet 1 från loggern motsvarade 0,001 mm på mikrometern. Det konstaterades att loggern följde mikrometern linjärt i intervallet mellan -0,500 och 0,500 mm och det förväntades inga större deformationer än så. Efter den initiala kalibreringen användes en kopparstav med måttet 150,06 mm för att säkerställa korrektheten i den första kalibreringen. Kopparstaven placerades i kalorimetern och LVDT-givaren kopplades in och därefter kördes en temperaturcykel för att se hur stor längdändringen i kopparstaven blev. Eftersom längdutvidg-

ningskoefficienten för koppar är känd kunde sedan den teoretiska längdändringen användas för att jämföra längdändringen enligt LVDT-givarna. Jämförelsen mellan LVDT-givarna och det teoretiska värdet visade att LVDT-givarna gav ett värde som låg cirka 13% över det teoretiska värdet. Därför användes 13% som en korrigeringsfaktor vid de fortsatta försöken.

I de senare försöken skulle ismängden som bildas räknas ut med hjälp av ett isberäkningsprogram i MATLAB. En kontroll av detta gjordes genom att köra fryscykeln i Avsnitt 3.1.3.2 och föra in utdata i isberäkningsprogrammet. Då det bara var vatten i behållaren skulle allt vatten frysa och tanken var att se hur stor del av vattnet som frös enligt isberäkningsprogrammet. Mängden vatten som fanns i behållaren var 15,1 gram och isberäkningsprogrammet räknade ut att 14,4 gram frös vilket motsvarar ungefär 95%. I samråd med handledaren ansågs detta vara tillräckligt noggrant för att gå vidare till tester med betong.

3.1.3.2 Fryscykel

För att ismängden skulle kunna beräknas med hjälp av isberäkningsprogrammet måste temperaturen gå ända ner till $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Den planerade fryscykeln som provkropparna skulle genomgå bestämdes i samråd med handledare till 36 timmar med linjär temperaturändring på sex grader i timmen vilket innebär 15 timmar från $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ till $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Just tiden 36 timmar grundar sig på tidigare försök.

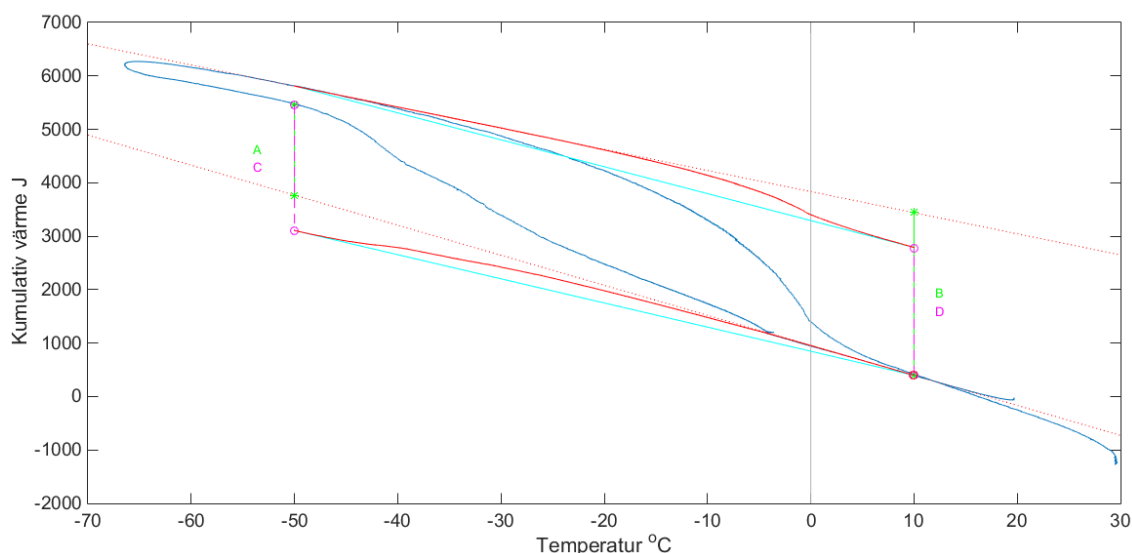
3.1.3.3 Beskrivning av isberäkningsprogrammet

Isberäkningsprogrammet är en MATLAB-kod skriven av examinatorn och handledaren där koden räknar ut hur mycket is som bildas i en provkropp baserat på fyra kolumner med indata från en kalorimetern. Ett exempel på indata visas i Figur 3.4.

Index	Tid	Temp i prov (degC)	Skillnad (mW)
1	0	19,655736	-4,176926395
2	20	19,647124	-4,218333245
3	40	19,647124	-4,285181412
4	60	19,666296	-4,343687664
5	80	19,657566	-4,409869552

Figur 3.4: Bild på de fyra indatakolumnerna med fem värden.

Med hjälp av en excelfil med indata från kalorimetern startar sedan koden med att fråga om provkroppens torrsvikt och det förångningsbara vattnets vikt. Vikterna angivs och koden ritar upp ett flertal figurer. Utifrån figuren med det ackumulerade värmeflödet ritar programmet ut linjer för att utifrån dem kunna räkna ut isbildningen. Vid temperaturer högre än $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ finns det två stabila faser i betongen vilka är betongen i sig och det förångningsbara vattnet. När temperaturen går under $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ finns de tre stabila faserna betong, is och det förångningsbara vatten som inte kan frysa. Under respektive stabila fas i fryscykeln tas två punkter ut och extrapoleras. Extrapoleringarna är de streckade tunna röda linjerna i Figur 3.5. Beroende på vid vilka temperaturer isen bildas justeras dessa linjer sedan till de heldragna röda linjerna. I just detta fall bildades mycket is vid de lägre temperaturerna och därför skiljer sig linjerna åt mest där. Likadant sker vid smältningen där den största smältningen sker när temperaturen går upp mot $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ igen. Det är alltså de heldragna röda linjerna som utgör baslinjen från vilken isberäkningen görs (Fridh, 2005).



Figur 3.5: Exempel på hur isberäkningsprogrammet ritar ut baslinjerna.

3.1.4 Förberedelser inför provning

3.1.4.1 Avformning och borring

Cirka 24 timmars formhärdning med plast på ytan avformades betongen och sänktes ned i vattenbad för att undvika sprickbildning och säkerställa härdningen genom att skydda betongen mot uttorkning (Burström, 2007).

Då betongblocken vattenhärdats i mer än 50 dygn borrades kärnor ut ur blocken för att användas som provkroppar. Kärnorna hade diametern 40 mm och ändarna sågades av så att höjden på kärnorna blev 150 mm. Efter denna bearbetning sänktes de färdiga provkropparna ner i vattenbadet igen.

3.1.4.2 Preparering och vägning av provkroppar

Innan provkropparna placerades i kalorimetern behövde de prepareras och vägas. För att kunna få ut de önskade resultaten genom isberäkningsprogrammet behövdes vikter av provkropparna vid flera olika tidpunkter.

I avsnittet 3.1.3 beskrivs utformningen av kalorimetern som användes vid försöken. Det finns två stycken block och det beror på att det ena blocket används som referens. Referenserna i försöken är provkroppar av samma dimensioner som de testade provkropparna. Skillnaden är att referenserna är uttorkade på allt förångningsbart vatten. Uttorkningen skedde genom att torka en provkropp av respektive material (A,C och E) i 105 °C. Provkroppen vägdes med ett dygns intervaller tills dess att den inte längre förlorade någon vikt och då ansågs vara helt uttorkad. Det tog cirka tre dygn för provkropparna med extra luft i och cirka en vecka för provkropparna med enbart naturlig luft. Då kalorimetern mäter värmeflödet för båda provkropparna innebär det att skillnaden mellan provkropparna utgör isbildningens/tiningens värmeflöde.

Provkropparna som testades var förkonditionerade på två olika sätt. Antingen så togs de upp direkt ur vattenbadet precis innan försöket startades eller så vakuummättades proverna innan försöket för att trycka in ännu mer vatten i proverna. Vakuummättningen utfördes genom att proverna utsattes för ett vakuumsug under tre timmar innan de vattendränktes. Proverna låg sedan i vattenbadet tills dess att de skulle testas vilket varierade mellan 2 och 14 dygn.

För att behålla så mycket som möjligt av fukten i testkropparna under testcykeln lindades provkropparnas mantelyta in i plastfolie. Optimalt hade varit att linda in hela provkroppen för att

säkerställa fuktillståndet i provkropparna men toppen och botten lämnades fria. Det här berodde på att behållarna har en pigg i botten som provkropparna måste vila på vilket blir en osäkerhetsfaktor om det kommer plast mellan piggen och provkroppen. Utan piggen hade längdändringen blivit osäker då det hade krävts en helt plan botten på provkroppen. En kvadratisk glasbit limmades fast på toppen av provkroppen och därför finns ingen plast på toppen av provkroppen heller. Dessutom täcker glaset större delen av toppen så även toppen blir fuktisolerad. Utan glaset finns risken att LVDT-givaren fastnar i betongens skrovliga yta och därmed inte ger ett korrekt värde.

Temperaturen i provkroppen mättes med hjälp av ett litet termoelement som fördes in i en hålighet i provkroppen och tejpades fast innan provkroppen lindades in i plastfolie. Från början var det tänkt att termoelementet skulle föras in i ett borrhål för att mäta temperaturen likadant hos alla provkroppar. Vid provborrning konstaterades dock att provkropparna med största sannolikhet skulle knäckas av ett sådant ingrepp och därför mättes temperaturen i någon hålighet istället.

I Figur 3.6 visas hur provkroppen såg ut innan den stoppades ner i kalorimetern.

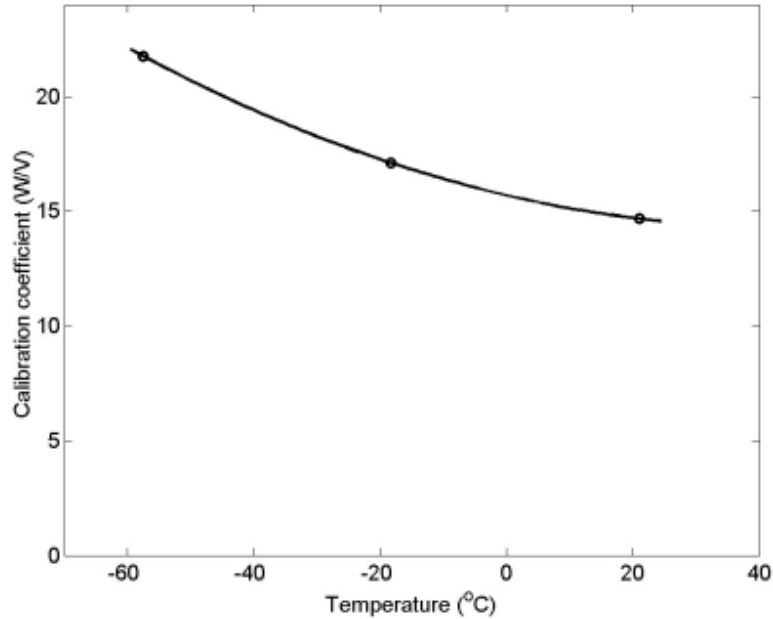


Figur 3.6: Bild på en provkropp med glas, termoelement och plast.

3.1.5 Omvandling av utdata

För att kunna tolka utdata krävdes en omvandling då loggern som användes gav värden från värmeffödet i millivolt (mV) och isberäkningsprogrammet kräver indata för värmeffödet i milliwatt (mW). Omvandlingen gjordes med hjälp av en graf från tidigare mätningar och kalibreringar av Fridh *et al.* (2003), se Figur 3.7. Funktionen *polyfit* i MATLAB användes för att ta fram tre koefficienter till ett andragradspolynom för att beskriva kurvan som en funktion av temperaturen. Då det bara fanns tre mätvärden var ett andragradspolynom den bästa passningen som kunde göras.

Utdata från LVDT-givarna justerades genom att minska värdet med 13% och 1 mV motsvarade 0,001 mm.



Figur 3.7: Graf över omvandlingskoefficient mellan watt och volt beroende på temperatur (Fridh *et al.*, 2003).

Utifrån omvandlingen skapades Ekvation 3.1.

$$P = U \cdot (k_1 \cdot T^2 + k_2 \cdot T + k_3) \quad (3.1)$$

där

- P = värmeeffekt (mW)
- U = skillnaden i millivolt mellan provkroppens och referens kroppens värme flöde
- T = temperaturen i °C
- $k_1 = 6,85 \cdot 10^{-4}$
- $k_2 = -680,1 \cdot 10^{-4}$
- $k_3 = 156262,3 \cdot 10^{-4}$

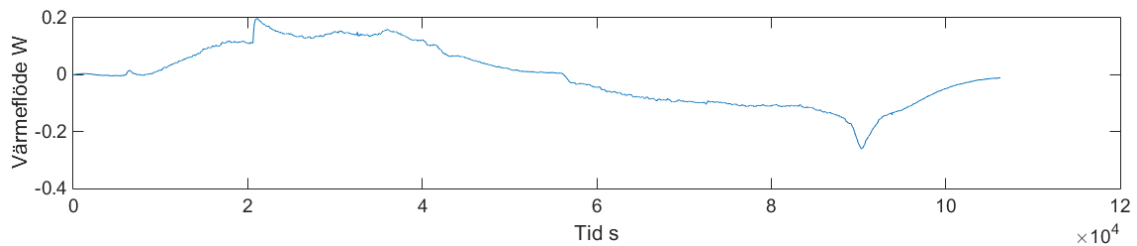
Det är sedan mW-värdet som tillsammans med ett indexnummer och provkroppens temperatur för varje loggat tillfälle som är indata till isberäkningsprogrammet.

Förutom omvandlingen av data krävdes en del manuell justering av vissa mätvärden. De mätvärden som justerades var de som var uppenbart fel, så kallade spikar, där mätutrustningen loggat ett felaktigt värde i temperaturen eller värme flödet.

3.1.6 Test med provkropp och justering av fryscykel

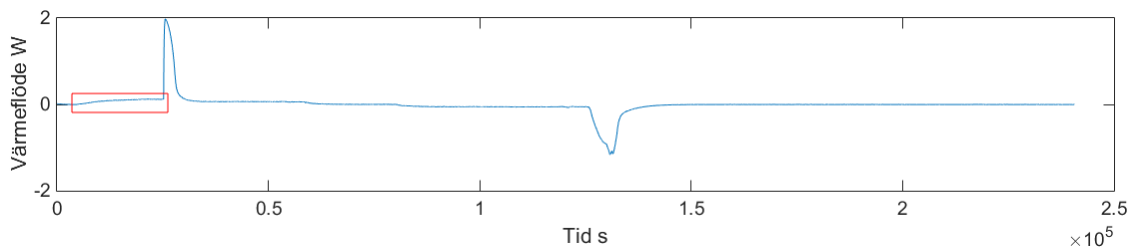
Vid det första testet med provkropp konstaterades att de borrade provkropparna var något för stora och nya provkroppar behövdes borrar. Anledningen till att de var för stora var att behållarna som provkropparna skulle placeras i inuti kalorimetern var något smalare i botten vilket inte hade uppmärksamats tidigare. Då provkropparna är relativt långa vid borrning, 200 mm, var de inte

heller perfekt raka vilket också bidrog till att provkropparna inte passade i behållarna. De nya provkropparna hade en diameter om 35 millimeter. Det här ledde till en något försenad tidplan och därför kortades fryscykeln ner från tänkta 36 timmar till 30 timmar för att hinna med så många provkroppar som möjligt. Resultatet från det första testet blev mindre lyckat då det var svårt att urskilja topparna från isbildningen från bruset i mätningen, se Figur 3.8.

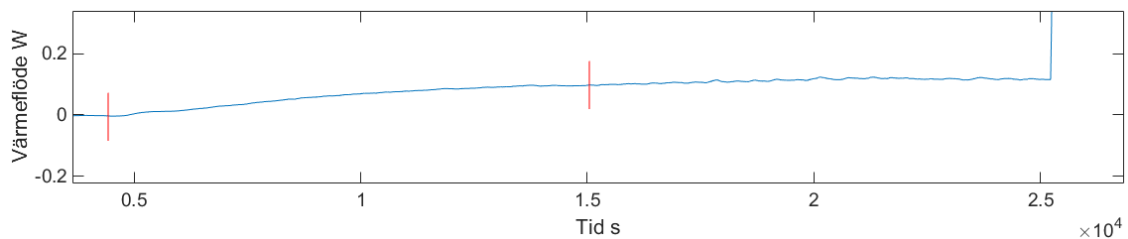


Figur 3.8: Graf över värmeflödet för det förångningsbara vattnet i provkroppen under det första testet.

Efter konsultering med examinator bestämdes att förlänga cyklerna rejält till upp mot 60 timmar. En av anledningarna var att loggningen inte verkar vara stabil i början. I Figur 3.9 visas värmeflödet för enbart vatten i Figur 3.9a och i Figur 3.9b visas den inzoomade delen. Delen som är markerad i Figur 3.9b kan betecknas som en stabiliseringsfas för loggningen då grafen utanför strecken är relativt plan medan grafen innanför har en stigande kurva. Grafen borde vara plan hela tiden då det innebär en konstant temperatursänkning av provet, i detta fall vattnet. Tiden mellan de båda strecken är cirka 10 000 sekunder vilket ungefär motsvarar tre timmar. Det var en bidragande orsak till svårigheten att urskilja topparna i Figur 3.8 eftersom isbildningen börjar innan stabiliseringsfasen är avslutad i det första testet. En annan orsak till de låga topparna är att betongprovet togs direkt ur vattenbadet innan testet och därmed inte innehöll några större mängder förångningsbart vatten. I samråd med handledare och examinator togs därför beslutet att vakuummätta nästa provkropp innan den stoppades ner i kalorimetern.



(a) Markering för den inzoomade delen.

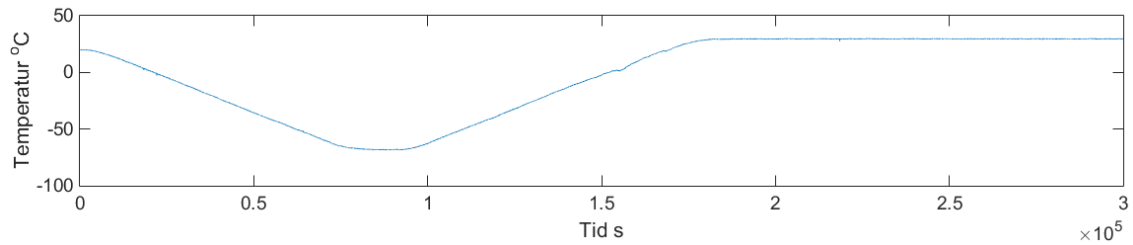


(b) Inzoomat läge och med markering för stabiliseringsfas och tid innan den konstanta temperatursänkningen.

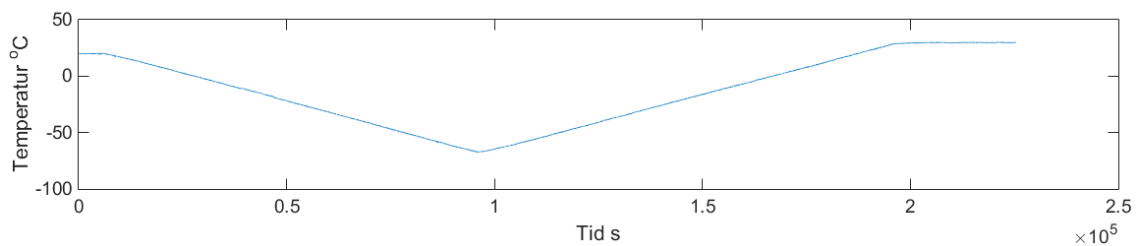
Figur 3.9: Graf över värmeflöde för enbart vatten med inzoomad del.

Efter provtestet bestämdes att fryscykeln skulle vara upp mot 60 timmar. En ny cykel bestämdes i samråd med handledaren och visas i Figur 3.10a. En provkropp från material A kördes därefter med

den nya fryscykeln. Efter testet justerades cykeln något med en längre fas i början av cykeln samt långsammare nedkylning och upptining. Dessutom gick cykeln direkt från nedkylning till upptining utan en konstant temperatur däremellan. De olika cyklerna visas i Figur 3.10. Anledningen till att cykeln justerades på detta sätt var att minska antalet insvängningsfenomen från två till ett och även få insvängningstoppen längre från den sista isbildningstoppen. Detta visas i Figur 3.11 där Figur 3.11a hänger ihop med Figur 3.10a och Figur 3.11b hänger ihop med Figur 3.10b. I figurerna blir det tydligt att de markerade insvängningstopparna i Figur 3.11a och 3.11b inträffar då temperaturgraferna i Figur 3.10a och 3.10b byter riktning.

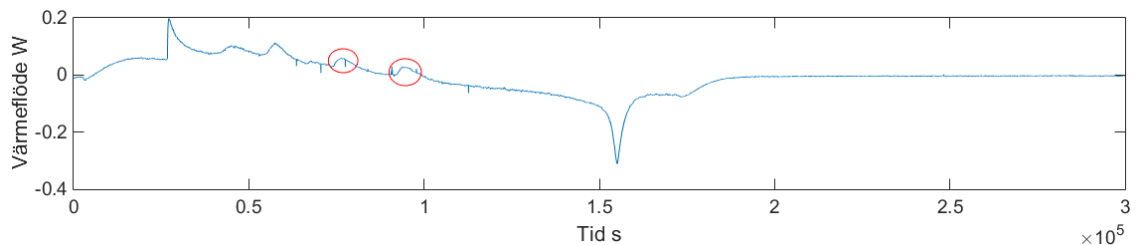


(a) Den använda fryscykeln till det första försöket.

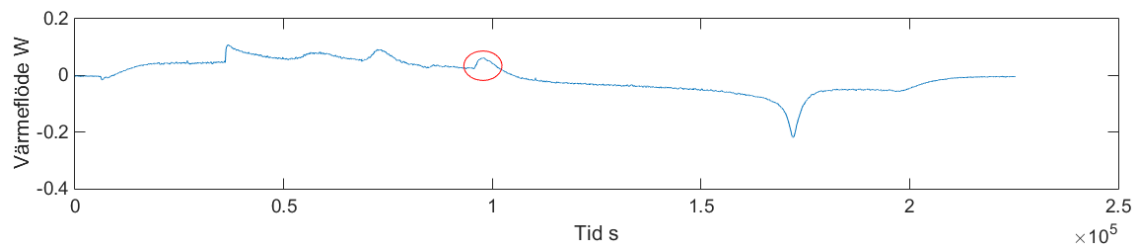


(b) Justerad fryscykel som användes till resterande försök.

Figur 3.10: De två fryscyklerna som användes i försöken.



(a) Värmeflödet för det första försöket med insvängningsfenomen markerat.



(b) Värmeflödet för försöket med justerad cykel med insvängningsfenomen markerat.

Figur 3.11: Jämförelse mellan värmeflödena med olika fryscyklerna.

Även om cykeln justerades så var resultatet från det första försöket såpass bra att det användes som ett resultat.

Utifrån metoden som tagits fram genomfördes resterande tester i encykelförsöken med fryscykeln

i Figur 3.10b.

3.2 Flercykelförsök med öppen frysning

Ett berömt försök inom frostforskningen utfördes av Powers & Helmuth (1953) som visar att längdutvidgningen av provet fortsätter öka trots att temperaturen blivit konstant. Det försöket ligger till grund för teorin om mikroskopisk islinnsbildning men försöket har inte kunnat återskapas då beskrivningen av försöket tyder på att provet varit fuktisolerat. Mätningar av fuktisolerade prov av bland annat Fridh (2005) har dock inte givit liknande resultat. Därför är det intressant att testa om resultaten går att återskapa genom att istället ge provet tillgång till vätska under frysningen. Då betong utsätts för långvarig fuktlagring ökar dess vattenmättnadsgrad och till slut kan den kritiska vattenmättnadsgraden nås och en frostska ske. Någon riktigt bra metod för att kunna studera den gradvisa fuktupptagningens inverkan på isbildning har inte presenterats. Studien med flercykelförsök med öppen frysning testade om den kombinerade kalorimeter/dilatometer kunde vara lämplig. Då det var oklart om sådana mätningar skulle ge relevanta resultat provades enbart ett material under några olika fryscykler.

3.2.1 Betongval och utformning av provkroppar

Betongtyp E valdes beroende på att den dels gav bra utslag på dilatationen samt att det var den betong med högst lufthalt. Det gav goda förutsättningar för att få in så mycket vatten som möjligt i provkroppen under cykeln. Valet styrktes också av att betong E var den som ökade mest i vikt under vakuumbehandlingen av provkropparna i det första försöket.

Eftersom provkropparna skulle ha fri tillgång till vätska under cykeln genom att även ha en saltlösning i behållaren under cyklerna behövdes en mindre provkropp tas fram. I det tidigare försöket användes cylindrar med 35 millimeter i diameter men då skulle det knappt få plats någon vätska runt omkring då behållaren har en innerdiameter på 40 millimeter. Under borrningen av de första cylindrarna uppstod en del problem med att cylindrarna gick sönder under borrningen på grund av dess slankhet. På grund av det uteslöts borrade cylindrar med mindre diameter och lösningen blev att först borra ut en cylinder med 100 millimeters diameter och därefter såga ut rätklock med sidorna 20 x 20 millimeter ur den stora cylindern.

3.2.2 Provuppställning och fryscykel

Provuppställningen för försöket skiljer sig en del från det första försöket som utfördes. Den största skillnaden är att det är saltlösning i behållaren under fryscykeln. Då provkroppen står på en pigg i botten av behållaren, vilket kan urskiljas i Figur 3.3, kan saltlösningen komma in under provkroppen. När lösningen fryser finns risken att det blir en lyftkraft från isen som då kommer att störa LVDT-givarnas utslag. Därmed måste avståndet mellan botten på provkroppen och behållaren tätas så att saltlösning inte kan ta sig in under provkroppen. Tätningen gjordes genom att lägga en kabel med fogmassa i ytterkanterna av provkroppens underdel. Enligt fogmassans produktblad skulle massan varken ta upp fukt eller expandera/kontrahera vid temperaturskiftningar.

Det intressanta i det här försöket är att provkroppen ska frysas flera gånger och därför användes korta cykler mellan +10 °C och -15 °C. För att provkroppen ska ha tillgång till vätska hela tiden användes en saltlösning då saltet sänker fryspunkt gentemot vanligt vatten. Efter diskussion med handledare bestämdes att en natriumkloridlösning på 10% skulle användas.

Fryscykeln utformades genom att låta temperaturen gå mellan +10 °C och -15 °C på en timme och sedan ligga på -15 °C i åtta timmar. Därefter steg temperaturen till +10 °C igen på en timme och låg kvar där i åtta timmar och sedan började cykeln om.

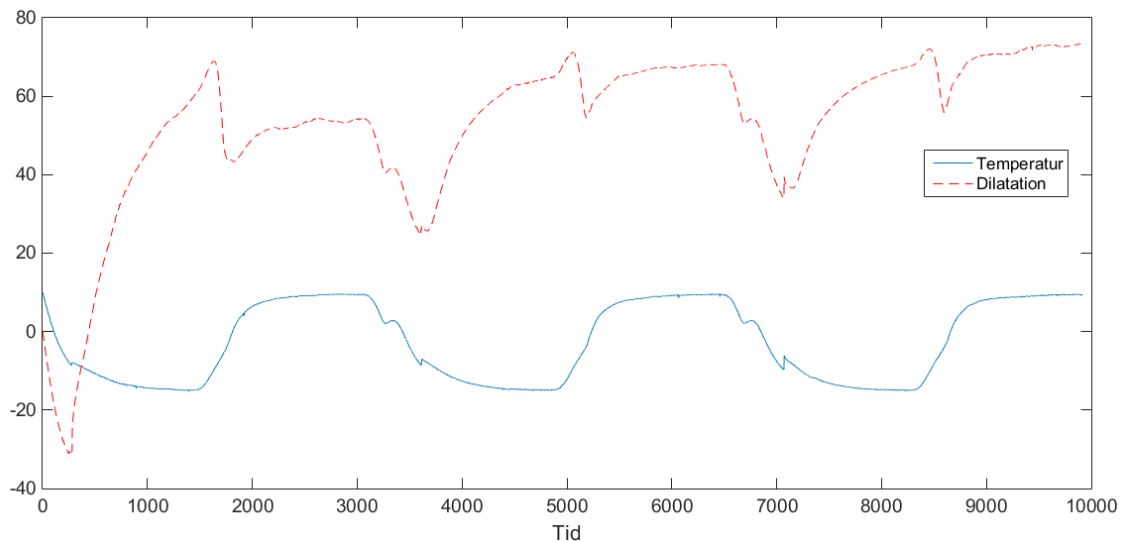
Då provkropparna är betydligt mindre än i föregående försök måste de fixeras i behållaren för att kunna använda LVDT-givarna. Det gjordes genom att stansa ut cirkelformade gördelar av

cellplast i samma diameter som behållaren och sedan göra hål i mitten av dem så att de kunde träs på provkroppen. Cellplastens ytterkanter filades ner någon millimeter för att saltlösningen skulle kunna passera då gördelen placerades på mitten av provkroppen.

Precis som i föregående försök limmades en kvadratisk glasbit fast på toppen av provkroppen så att inte LVDT-givarens spets skulle fastna i betongen. Provkroppen fördes sedan, med gördelen på, ner i behållaren innan saltlösningen hölldes i tills dess att bara den översta centimetern av provkroppen inte var omsluten av vätska. Ett termoelement fördes sedan ner i saltlösningen för att kunna mäta temperaturen i vätskan.

3.2.3 Test av uppställningen

Det första testet kördes med tre cykler där varje cykel var cirka 20 timmar lång. Efter det plockades provkroppen ut och saltlösningen hälldes ut ur behållaren. Provkroppen lossnade relativt lätt från botten av behållaren men tätningssmassan satt kvar i botten. Det konstaterades därefter att tätningen i botten inte hade fungerat fullt ut eftersom undersidan på provkroppen var blöt samt att det fanns tecken på avskalning på undersidan. När provkroppen plockades ut konstaterades det att locket som LVDT-givaren sitter i inte var åtskruvat. Resultatet av testet kan ses i Figur 3.12.



Figur 3.12: Graf över temperaturen i saltlösningen och dilatationen för de tre cyklerna för det första testet.

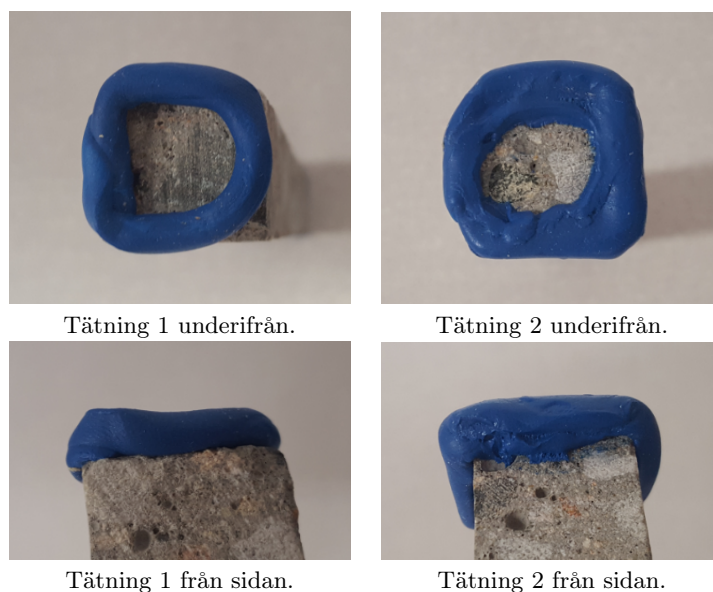
Trots de ovan nämnda bristerna såg resultatet av testkörningen bra ut och det bestämdes att göra ett nytt försök och försöka justera det som var mindre bra med testförsöket.

3.2.3.1 Justeringar av uppställningen

Utifrån resultatet från testkörningen bedömdes det att fryscykeln behövde justeras. På grund av den häftiga nedkylningen blev det en liten knöl på temperaturgrafens vid 2-3 °C som berodde på den häftiga inbromsningen när frysen når -15 °C. Knölen spelade inte så stor roll för resultatet då isbildningen skedde senare, ungefär vid -7-8 °C, så samma nedkylningshastighet behölls till nästa test. Däremot skapar den snabba upptiningen problem för dilatationen som påverkar resultatet negativt. Dilatationsgrafens är fortfarande på väg uppåt när den kraftiga upptiningen börjar och skapar en topp i grafen som följs av en dal när upptiningen stannar av. Efter dalen i grafen kan det urskiljas en liten fortsatt ökning av dilatationsgrafens och därför kan inte den snabba upptiningen behållas. Det bestämdes därför att upptiningen ska ske på sju timmar så att temperaturen i vätskan och provkroppen följer frysens temperatur bättre för att kunna få en mer kontinuerlig graf

för dilatationen. Då inget hände med provkroppen vid 10 °C bestämdes att temperaturen bara ska vara konstant i en timme medan temperaturen ska vara konstant i sju timmar vid -15 °C. Valet att fortsatt behålla en konstant temperatur vid -15 °C gjordes då den delen av cykeln är mer intressant.

Tätningen justerades genom att använda lite mer fogmassa och täta en bit upp på provkroppen också för att förhindra saltlösningen att tränga in mellan provkroppen och fogmassan. Undertill skedde ingen större justering. Skillnaden mellan tätningen visas i Figur 3.13. Det är inte provkropparna som användes i testerna utan visar bara hur tätningen utfördes. I det första testet användes massan som syns på bilderna medan en liknande grå massa användes till det andra testet. Massan byttes dels för att det första testet misslyckades samt att den andra massan fäste lite bättre mot betongen.



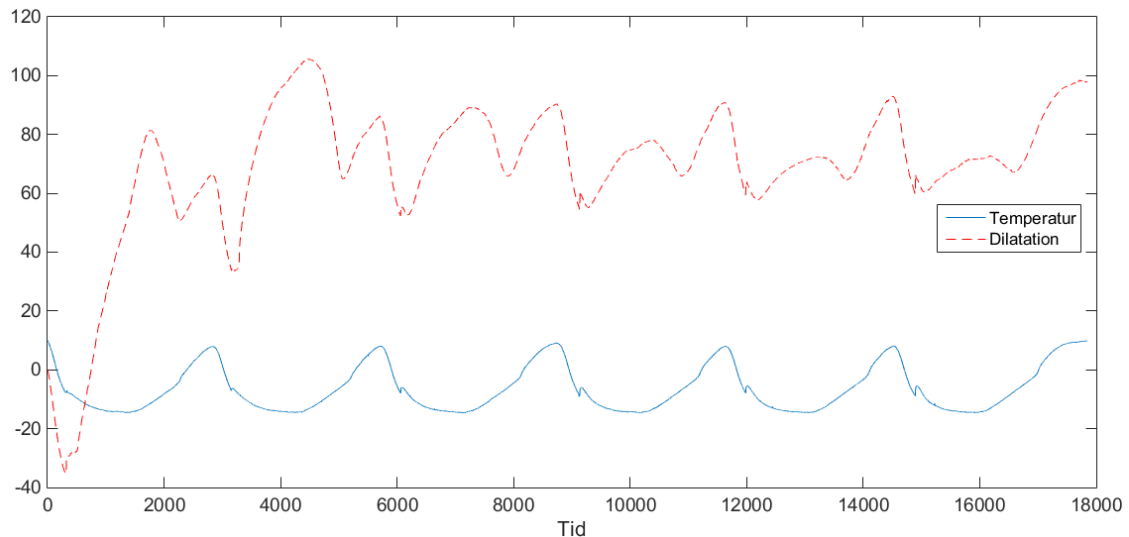
Figur 3.13: Justering av tätningen mellan testen.

I det första testet mättes temperaturen i saltlösningen, det hade dock varit bättre att mäta temperaturen i själva provkroppen. Därför fästes ett termoelementet i en por i den övre delen av provkroppen med hjälp av samma fogmassa som användes för att täta i botten. Då temperaturen bara skulle mätas i provkroppen kunde inte en lika stor del av provkroppen vara omsluten av saltlösningen eftersom termoelementet satt en bit ner från toppen. Det innebar att två till tre centimeter av provkroppen inte var omsluten av saltlösningen. I Figur 3.14 visas hur provkroppen såg ut innan den sattes ner i behållaren.



Figur 3.14: Provkropp inför det andra testet med glas på toppen, termoelement, gördel och tätning längst ner.

Resultatet av det andra testet visas i Figur 3.15



Figur 3.15: Graf över temperaturen i provkroppen och dilatationen för de sex cyklerna i det andra testet.

Den justerade tätningen i Figur 3.13 fungerade inte fullt ut då botten på provkroppen var blöt. Provet satt fast ganska hårt i botten av behållaren och en del kraft krävdes för att få loss provet. Tätningssmassan satt kvar i botten av behållaren efter att provet lossnat. När tätningssmassan avlägsnades från behållaren konstaterades det att små bitar av provet fastnat i massan tillsammans med lite salt. Om bitarna var avskalning eller bitar som lossnat när provet avlägsnades är svårt att säga. Då det inte fanns någon längre konstant temperatur blev det svårare att urskilja var cyklerna startade och slutade. Dessutom var temperaturen konstant $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ en kortare tid. Tillsammans med handledare bestämdes därför att återgå till den första fryscykeln inför det tredje testet. När provkroppen togs ut ur behållaren konstaterades det även att termoelementet hade lossnat från provkroppen. Inför det tredje testet sattes därför termoelementet fast med både tätningssmassa och silvertejp. Utöver att mäta temperaturen i provkroppen installerades ytterligare ett termoelement

för att också kunna mäta temperaturen i saltlösningen. Trots att tätningen inte fungerade fullt ut användes samma princip för det tredje testet men tätningsmassan byttes tillbaka till den som användes i det första testet.

Det visade sig efter det tredje testet att temperaturskillnaden mellan provkroppen och saltlösning inte skiljde sig nämnvärt, cirka 1 °C. Tätningen för det tredje försöket fungerade något bättre än tidigare och precis som efter det andra testet var provet svårt att få ut ur behållaren. Även efter det här testet fanns det små bitar blandat med salt kvar i tätningsmassan men det var svårt att urskilja om det var avskalning eller bitar som lossnat i samband med att provkroppen avlägsnades ur behållaren.

Efter det tredje testet togs provkroppen ut och saltlösningen hölls ut ur behållaren. Tätningen togs bort och behållaren rengjordes och torkades innan provkroppen preparerades som i encykelförsöken och samma fryscykel som i encykelförsöken startades för att kunna räkna ut hur mycket is som bildades i provkroppen.

Kapitel 4

Resultat

I följande kapitel redovisas resultaten av de tester som har utförts tillsammans med kortare kommentarer om varje resultat. En längre diskussion om resultaten kommer i efterföljande kapitel. Provkropp A1 kördes med den första fryscykeln medan resterande provkroppar är testade med den justerade fryscykeln.

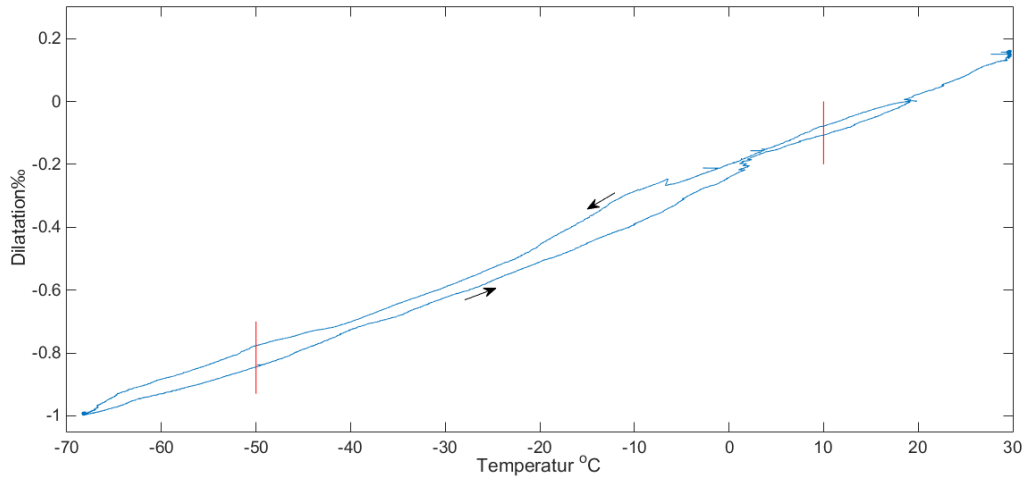
Bilder på respektive provkropp finns i Bilaga A.

Encykelförsöken

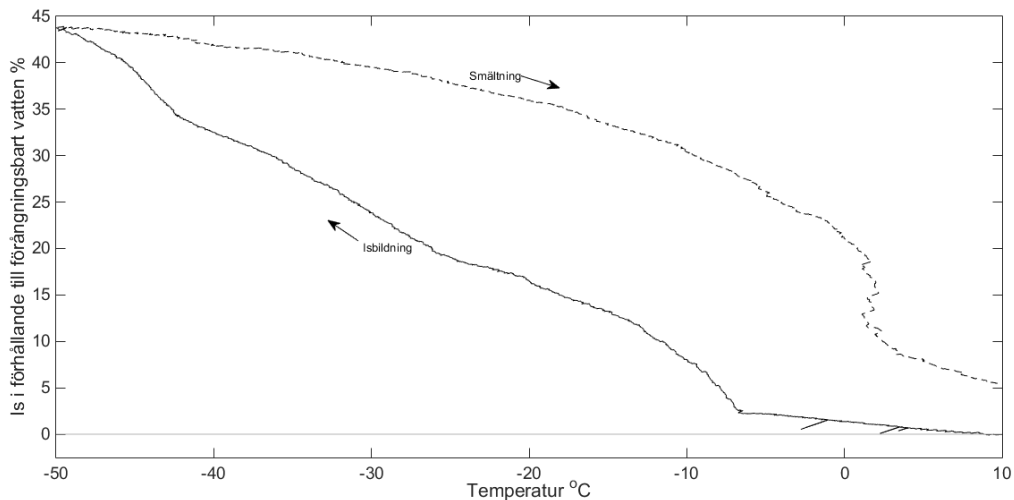
4.1 CEM I – med och utan tillsatt luft

4.1.1 A1 – med luft

Provkropp A1 hade utsatts för vakuum i tre timmar och därefter vattenmättats i cirka 40 timmar vid testtillfället. Vid tidpunkten för frysning var A1 61 dygn gammal. Dilatationen i ‰ utifrån längden vid 20 °C vid olika temperaturer visas i Figur 4.1 och mängden is i förhållande till mängden förångningsbart vatten vid olika temperaturer visas i Figur 4.2. Torrvikten för A1 var 304,8 gram och mängden förångningsbart vatten i provkroppen var 18,3 gram.



Figur 4.1: Dilatationen för provkropp A1 med avseende på temperaturen. De vertikala röda linjerna i figuren markerar temperaturintervallet för isbildningen och smältningen i Figur 4.2.

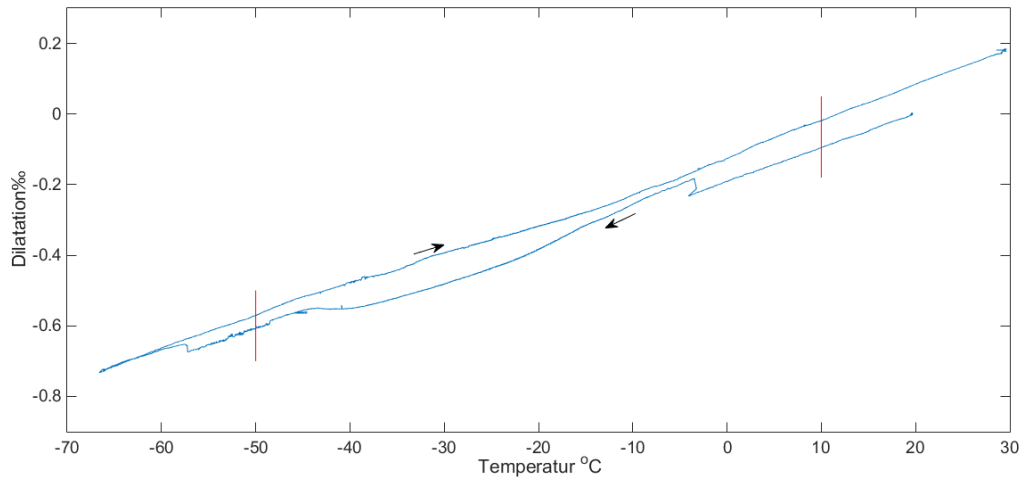


Figur 4.2: Mängden is i förhållande till mängden förångningsbart vatten för provkropp A1 med avseende på temperaturen.

Notera att mängden is som bildades i förhållande till mängden förångningsbart vatten var knappt 45%.

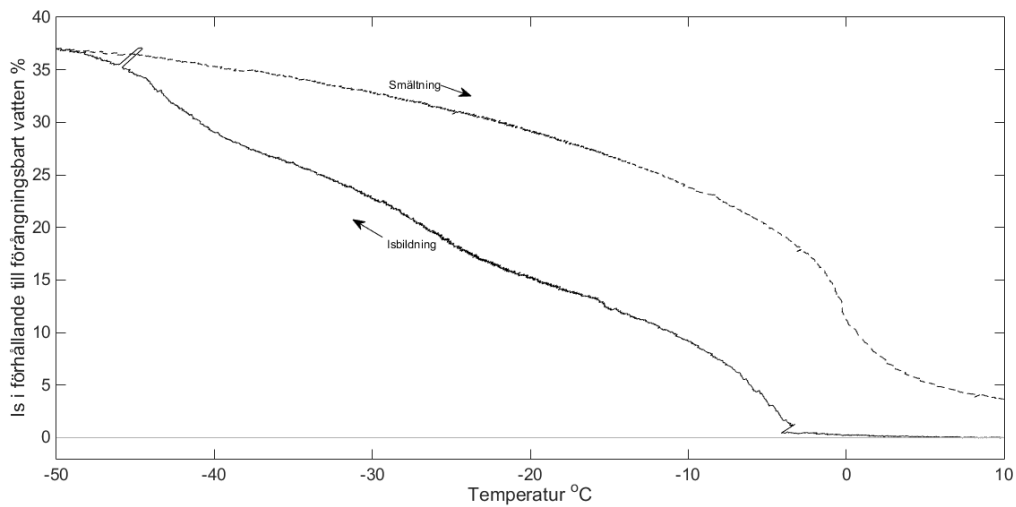
4.1.2 B1 – utan luft

Provkropp B1 utsattes för vakuum i tre timmar och vattenmättades sedan i cirka 10 dygn innan testtillfället. Provkroppen var 70 dygn gammal när den testades. Dilatationen i ‰ utifrån längden vid 20 °C vid olika temperaturer visas i Figur 4.3 och mängden is i förhållande till mängden förångningsbart vatten vid olika temperaturer visas i Figur 4.4. Torrvikten för B1 var 327,0 gram och mängden förångningsbart vatten i provkroppen var 16,2 gram.



Figur 4.3: Dilatationen för provkropp B1 med avseende på temperaturen. De vertikala röda linjerna i figuren markerar temperaturintervallet för isbildningen och smältningen i Figur 4.4.

Notera att linjerna inte konvergerar vid temperaturen 20 °C.



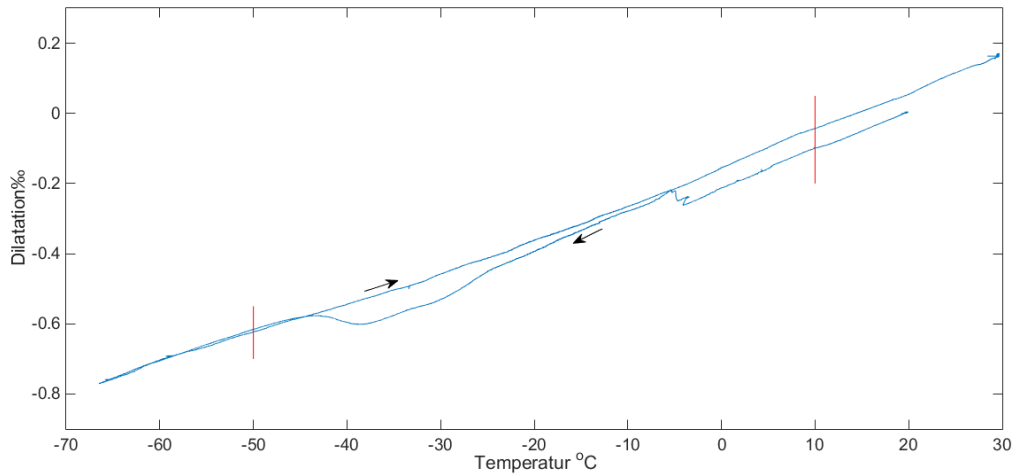
Figur 4.4: Mängden is i förhållande till mängden förångningsbart vatten för provkropp B1 med avseende på temperaturen.

Notera att mängden is som bildades i förhållande till mängden förångningsbart vatten var 36-37%.

4.2 CEM I med inblandat slagg – med och utan tillsatt luft

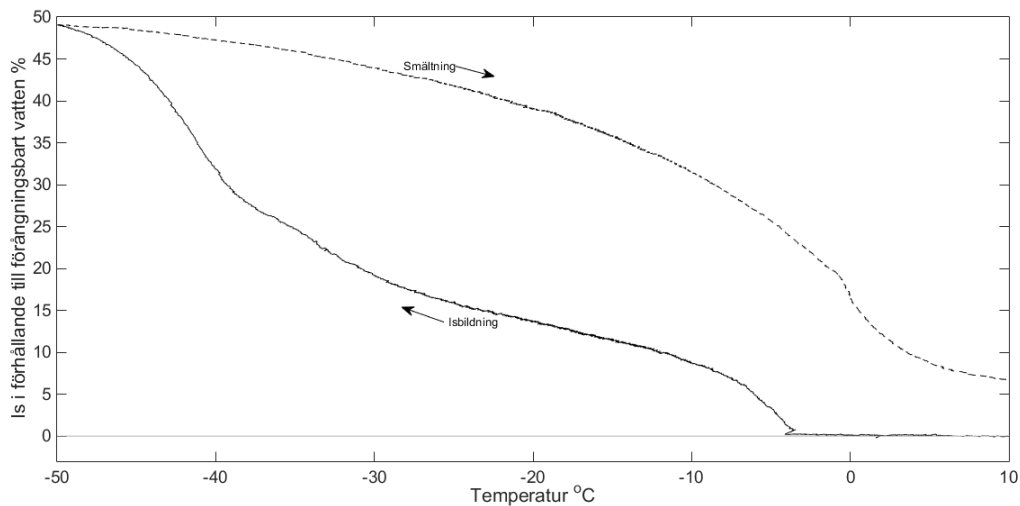
4.2.1 C1 – med luft

Provkropp C1 utsattes för vakuum i tre timmar och vattenmättades sedan i cirka 14 dygn innan testtillfället. Provkroppen var 67 dygn gammal när den testades. Dilatationen i ‰ utifrån längden vid 20 °C vid olika temperaturer visas i Figur 4.5 och mängden is i förhållande till mängden förångningsbart vatten vid olika temperaturer visas i Figur 4.6. Torrvikten för C1 var 308,6 gram och mängden förångningsbart vatten i provkroppen var 18,7 gram.



Figur 4.5: Dilatationen för provkropp C1 med avseende på temperaturen. De vertikala röda linjerna i figuren markerar temperaturintervallet för isbildningen och smältningen i Figur 4.6.

Notera att linjerna inte konvergerar vid temperaturen 20 °C.

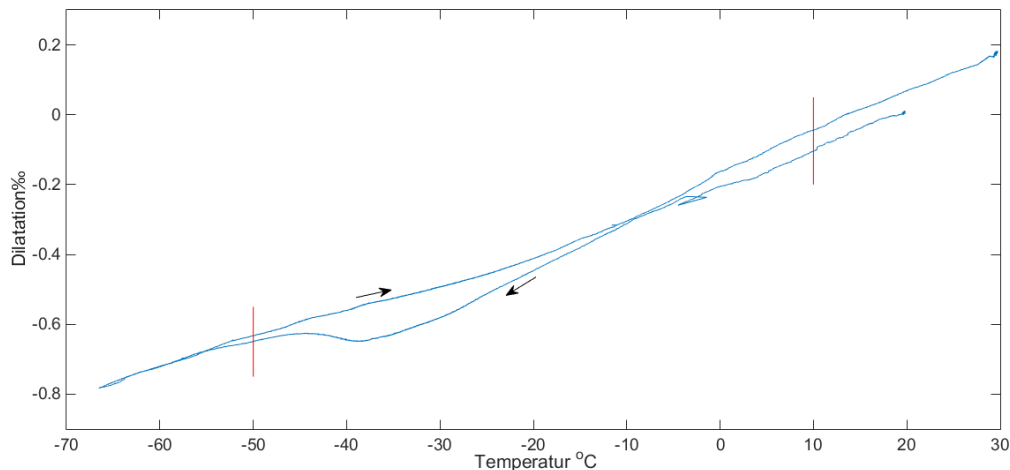


Figur 4.6: Mängden is i förhållande till mängden förångningsbart vatten för provkropp C1 med avseende på temperaturen.

Notera att mängden is som bildades i förhållande till mängden förångningsbart vatten var knappt 50%.

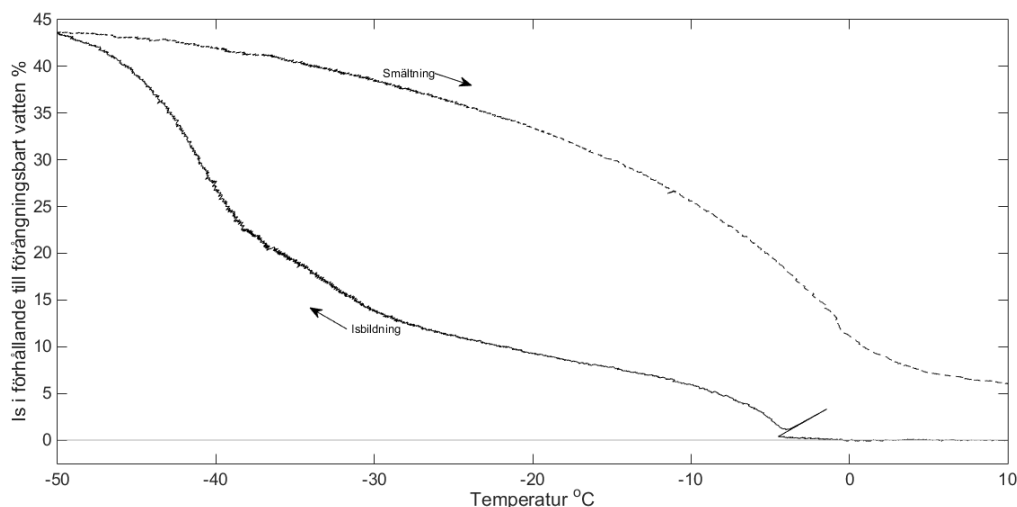
4.2.2 D1 – utan luft

Provkropp D1 utsattes för vakuum i tre timmar och vattenmättades sedan i cirka 48 timmar innan testtillfället. Provkroppen var 63 dygn gammal när den testades. Dilatationen i ‰ utifrån längden vid 20 °C vid olika temperaturer visas i Figur 4.7 och mängden is i förhållande till mängden förångningsbart vatten vid olika temperaturer visas i Figur 4.8. Torrvikten för D1 var 322,5 gram och mängden förångningsbart vatten i provkroppen var 16,8 gram.



Figur 4.7: Dilatationen för provkropp D1 med avseende på temperaturen. De vertikala röda linjerna i figuren markerar temperaturintervallet för isbildningen och smältningen i Figur 4.8.

Notera att linjerna inte konvergerar vid temperaturen 20 °C.



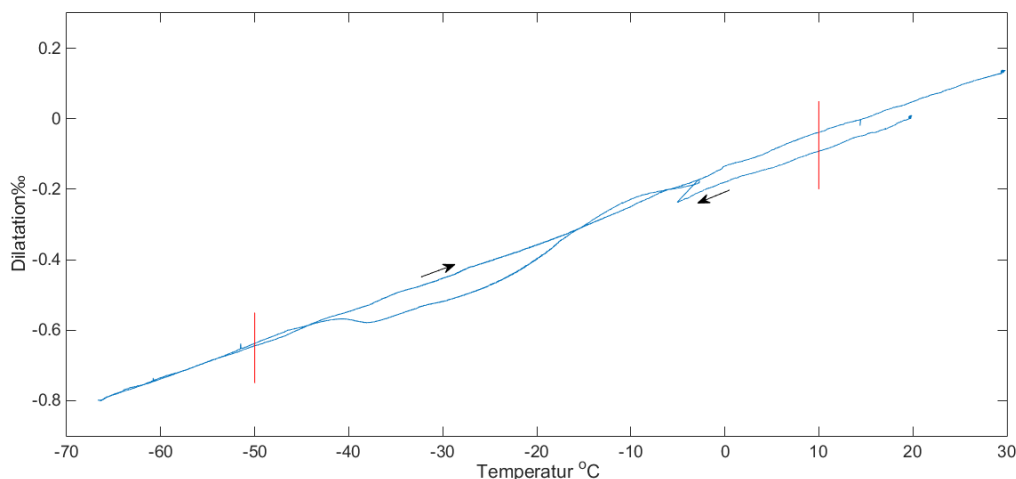
Figur 4.8: Mängden is i förhållande till mängden förångningsbart vatten för provkropp D1 med avseende på temperaturen.

Notera att mängden is som bildades i förhållande till mängden förångningsbart vatten var cirka 44%.

4.3 CEM I med inblandad flygaska – med och utan tillsatt luft

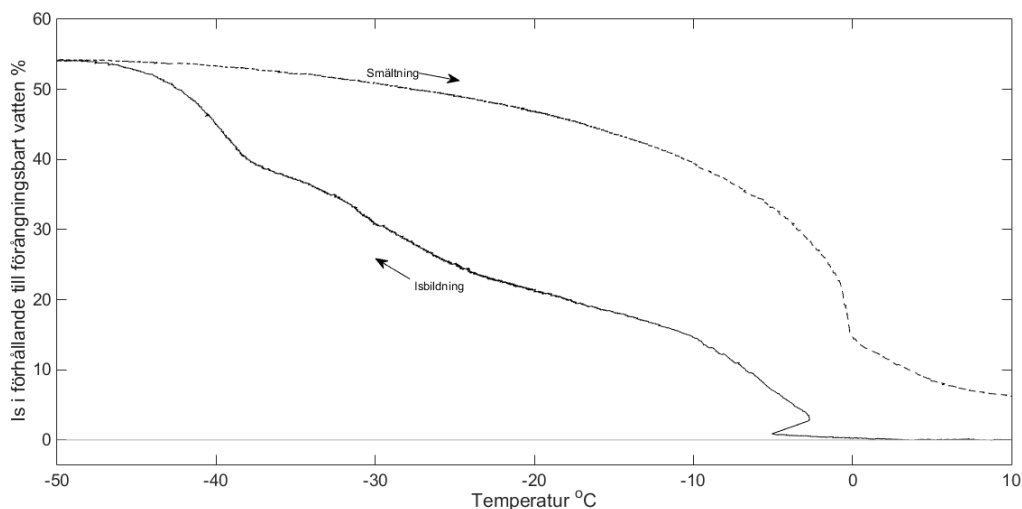
4.3.1 E1 – med luft

Provkropp E1 utsattes för vakuum i tre timmar och vattenmättades sedan i cirka sex dygn innan testtillfället. Provkroppen var 74 dygn gammal när den testades. Dilatationen i ‰ utifrån längden vid 20 °C vid olika temperaturer visas i Figur 4.9 och mängden is i förhållande till mängden förångningsbart vatten vid olika temperaturer visas i Figur 4.10. Torrvikten för E1 var 298,9 gram och mängden förångningsbart vatten i provkroppen var 21,2 gram.



Figur 4.9: Dilatationen för provkropp E1 med avseende på temperaturen. De vertikala röda linjerna i figuren markerar temperaturintervallet för isbildningen och smältningen i Figur 4.10.

Notera att linjerna inte konvergerar vid temperaturen 20 °C.

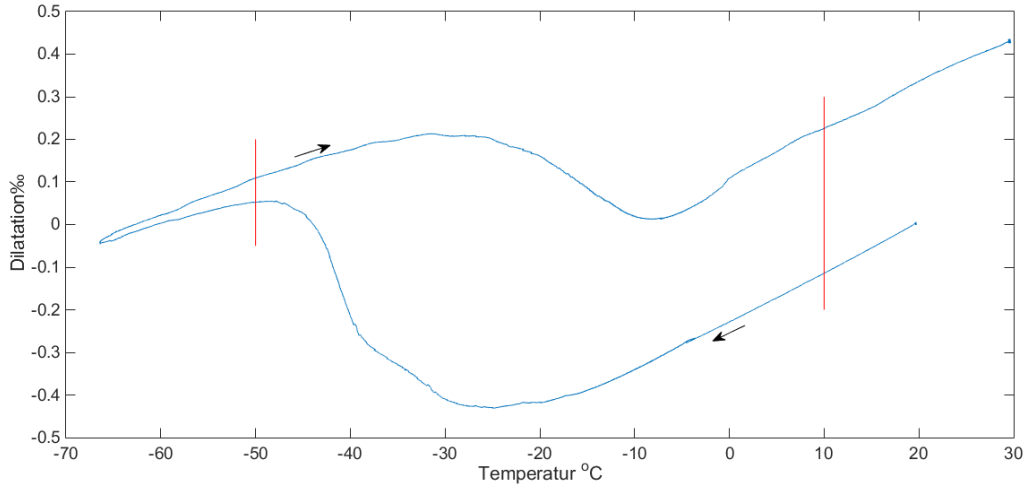


Figur 4.10: Mängden is i förhållande till mängden förångningsbart vatten för provkropp E1 med avseende på temperaturen.

Notera att mängden is som bildades i förhållande till mängden förångningsbart vatten var cirka 54%.

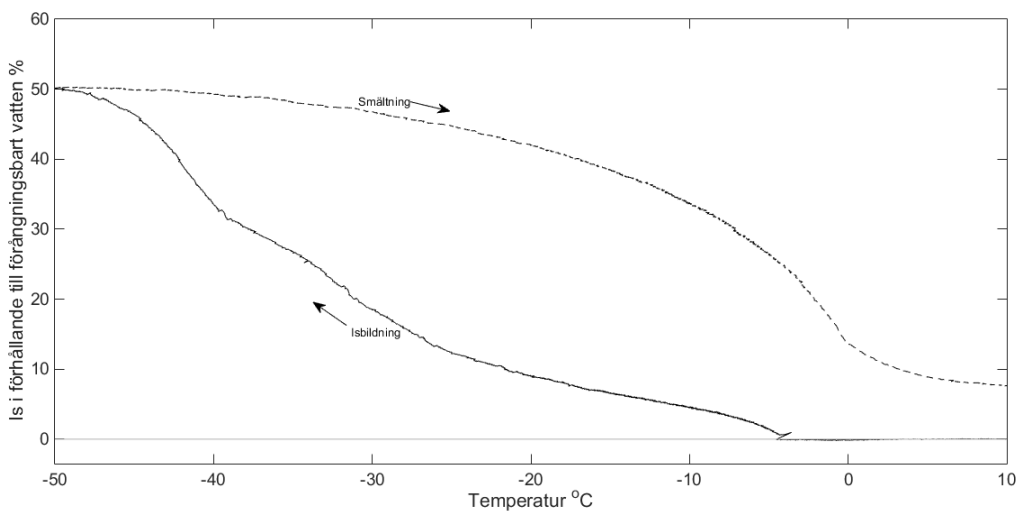
4.3.2 F1 – utan luft

Provkropp F1 utsattes för vakuum i tre timmar och vattenmättades sedan i cirka tre dygn innan testtillfället. Provkroppen var 73 dygn gammal när den testades. Dilatationen i ‰ utifrån längden vid 20 °C vid olika temperaturer visas i Figur 4.11 och mängden is i förhållande till mängden förångningsbart vatten vid olika temperaturer visas i Figur 4.12. Torrvikten för F1 var 320,9 gram och mängden förångningsbart vatten i provkroppen var 17,9 gram.



Figur 4.11: Dilatationen för provkropp F1 med avseende på temperaturen. De vertikala röda linjerna i figuren markerar temperaturintervallet för isbildningen och smältningen i Figur 4.12.

Notera att linjerna inte konvergerar vid temperaturen 20 °C samt det stora glappet mellan linjerna gentemot de övriga resultaten.

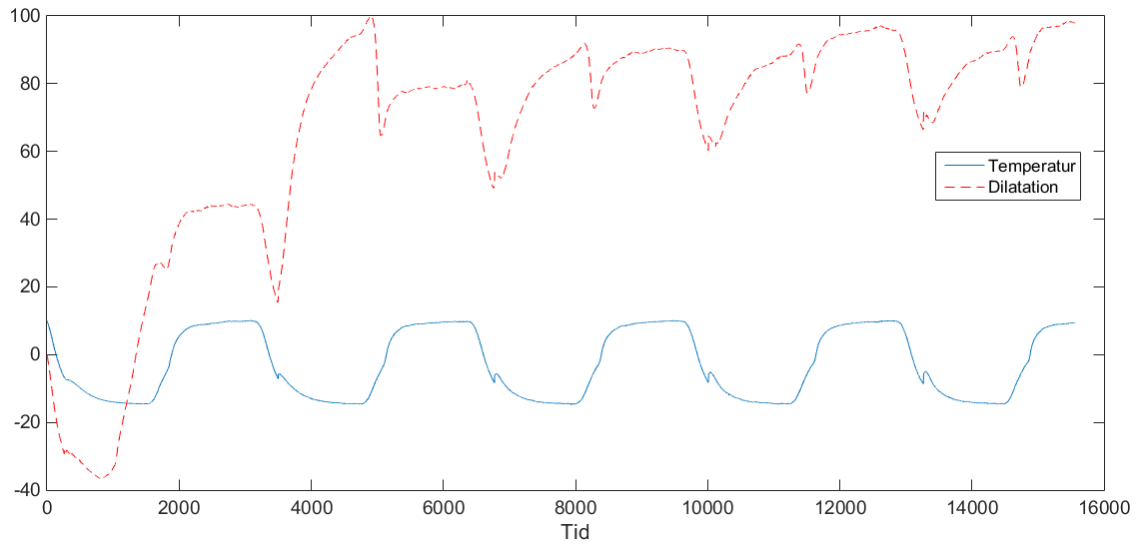


Figur 4.12: Mängden is i förhållande till mängden förångningsbart vatten för provkropp F1 med avseende på temperaturen.

Notera att mängden is som bildades i förhållande till mängden förångningsbart vatten var cirka 50%.

Flercykelförsöken

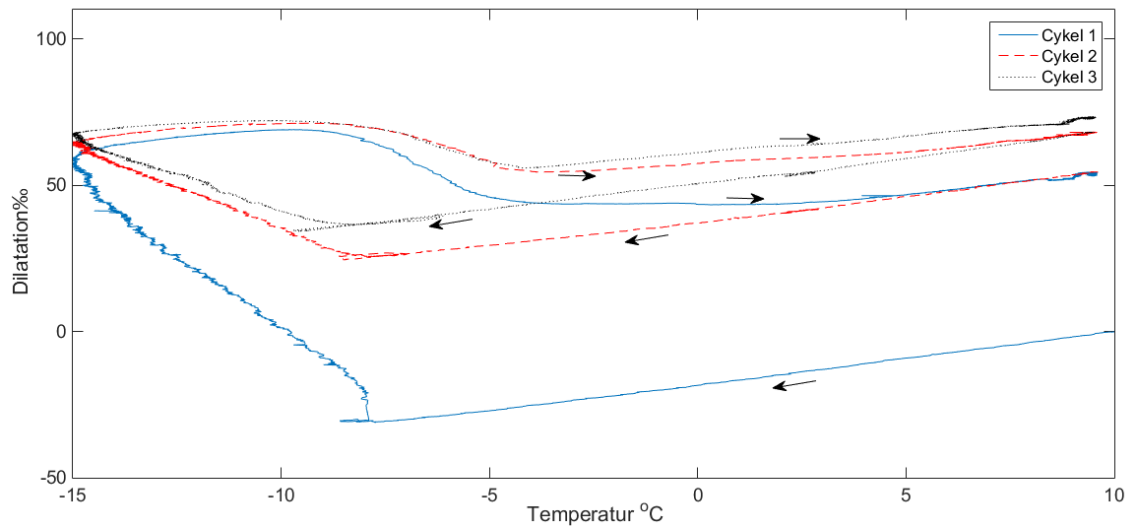
I Figur 4.13 visas resultatet från det tredje testet. De första två testerna var för att hitta en bra fryscykel och graferna från dem finns i Avsnitt 3.2.3.



Figur 4.13: Graf över temperaturen i provkroppen och dilatationen för de fem cyklerna i det tredje testet.

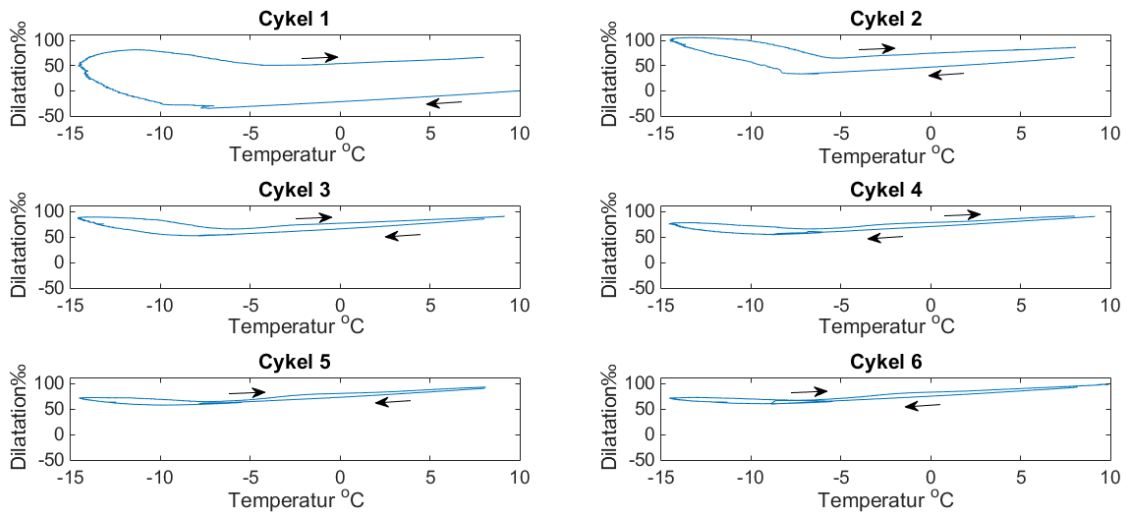
Notera att dilatationen ökar trots att temperaturen ligger konstant på $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

I Figurerna 4.14, 4.15 och 4.16 visas dilatationen i $\%$ utifrån längden vid $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ vid olika temperaturer för respektive test. Observera att testerna har olika många cykler.



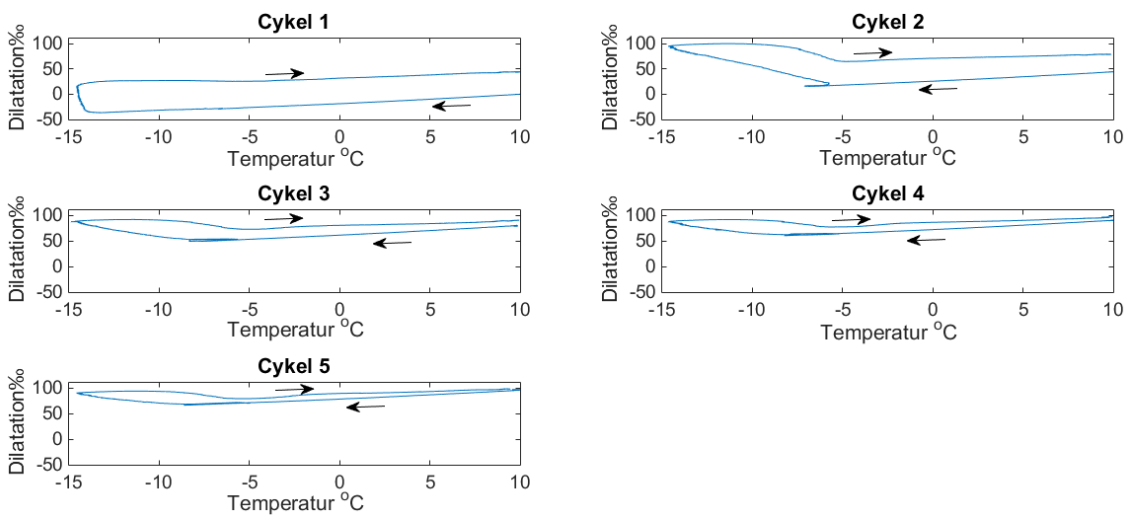
Figur 4.14: Graf över cyklerna från det första testet där dilatationen är ritad mot temperaturen.

Notera att den bestående deformationen, skillnaden mellan starten och slutet för grafen, är störst för den första cykeln och sedan minskar för varje cykel.



Figur 4.15: Grafer över cyklerna från det andra testet där dilatationen är ritad mot temperaturen.

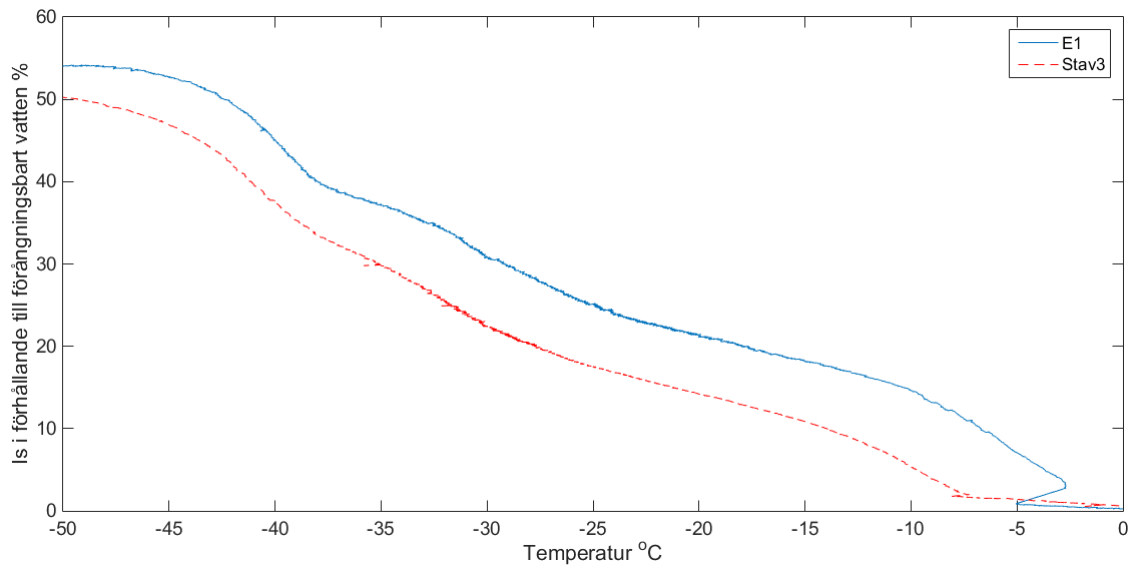
Notera att den bestående deformationen, skillnaden mellan starten och slutet för grafen, är störst för den första cykeln och sedan minskar till den andra cykeln för att sedan i princip vara noll för de sista fyra cyklerna.



Figur 4.16: Grafer över cyklerna från det tredje testet där dilatationen är ritad mot temperaturen.

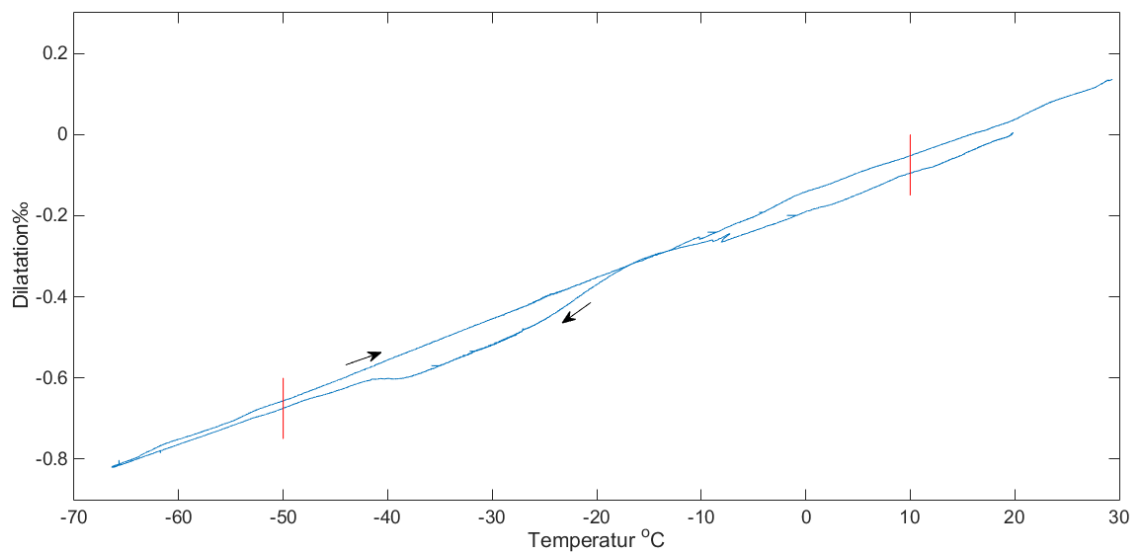
Notera att den bestående deformationen, skillnaden mellan starten och slutet för grafen, är störst för den första cykeln och sedan minskar för cykel två och tre för att i princip vara noll för de sista två cyklerna.

I Figur 4.17 visas isbildningen för Stav3 och E1 eftersom båda provkropparna kommer från samma material.



Figur 4.17: Isbildning för provkroppar med CEM1 och slagg där E1 är samma som tidigare och Stav3 är cyklad fem gånger.

I Figur 4.18 visas dilatationen i ‰ utifrån längden vid 20 °C vid olika temperaturer för Stav3.



Figur 4.18: Dilatationen under den längre fryscykeln för provkroppen som är cyklad fem gånger. De vertikala röda linjerna markerar temperaturintervallet för isbildningen för Stav3 i Figur 4.17.

Kapitel 5

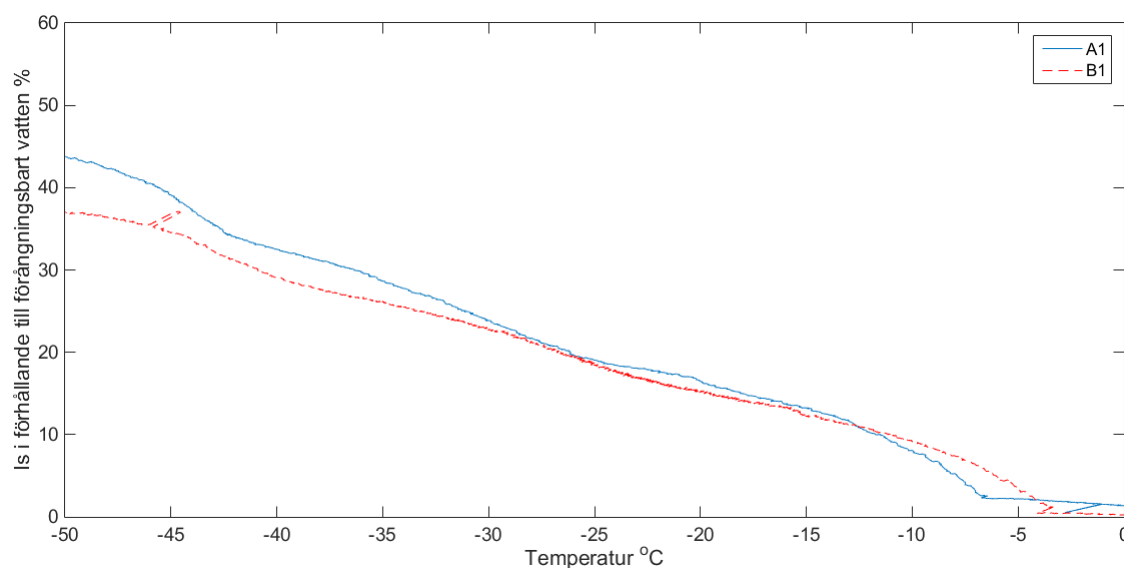
Analys

5.1 Diskussion

Encykelförsöken

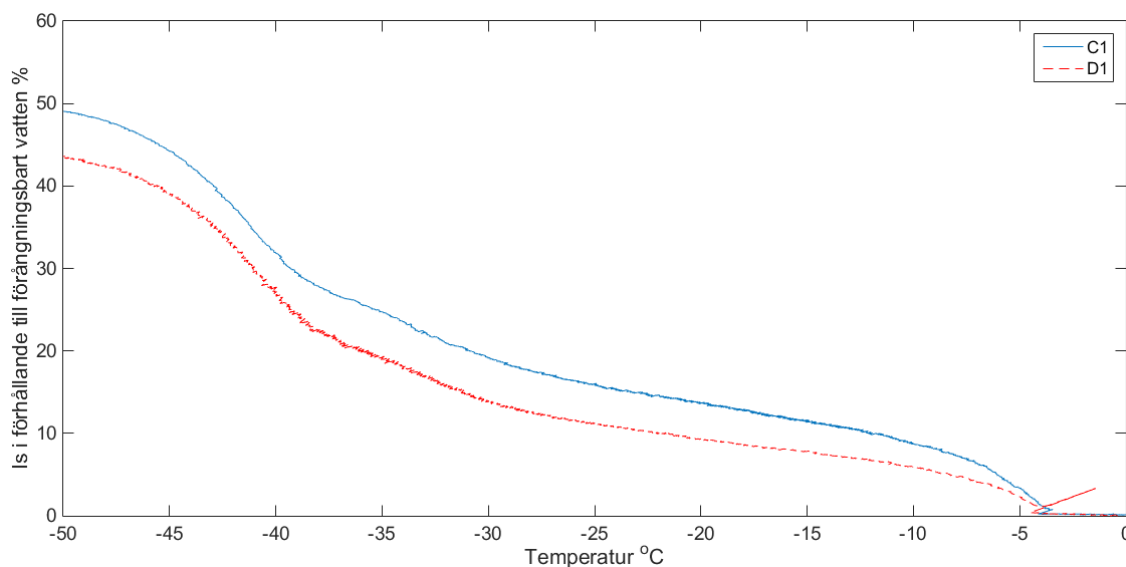
Från början var det tänkt att 12 provkroppar, två från varje gjutning, skulle testas men efter det första testet med en provkropp som inte var vakuummättad bestämdes att inte fortsätta med de icke vakuummättade proverna. Det berodde på att det testet inte gav så stora utslag på värmeflödesmätningarna.

I Figur 5.1 visas isbildningen för provkropparna A1 och B1. Båda proverna har ganska linjära isbildningskurvor vilket tyder på att de båda har en jämn fördelning mellan större och mindre porer där vattnet fryser vid olika temperaturer. Under större delen av isbildningen ligger kurvan för A1 över kurvan för B1 vilket är naturligt då A1 innehåller både mer luft och förångningsbart vatten än B1. Det är dock lite märkligt att B1 ligger över A1 precis i början just på grund av att A1 innehåller mer luft och då även borde ha fler andel stora porer där vattnet fryser först. Det skulle kunna ha att göra med vattenseparationen som inträffade vid gjutningen för B1 och att det då skulle ha kunnat bildas fickor under ballasten (Johansson & Petersons, 1994) eller att kompakteringen gjorde att en större por bildades. Det skulle i så fall innebära att en stor mängd vatten kunde frysa där precis i början av fryscykeln.



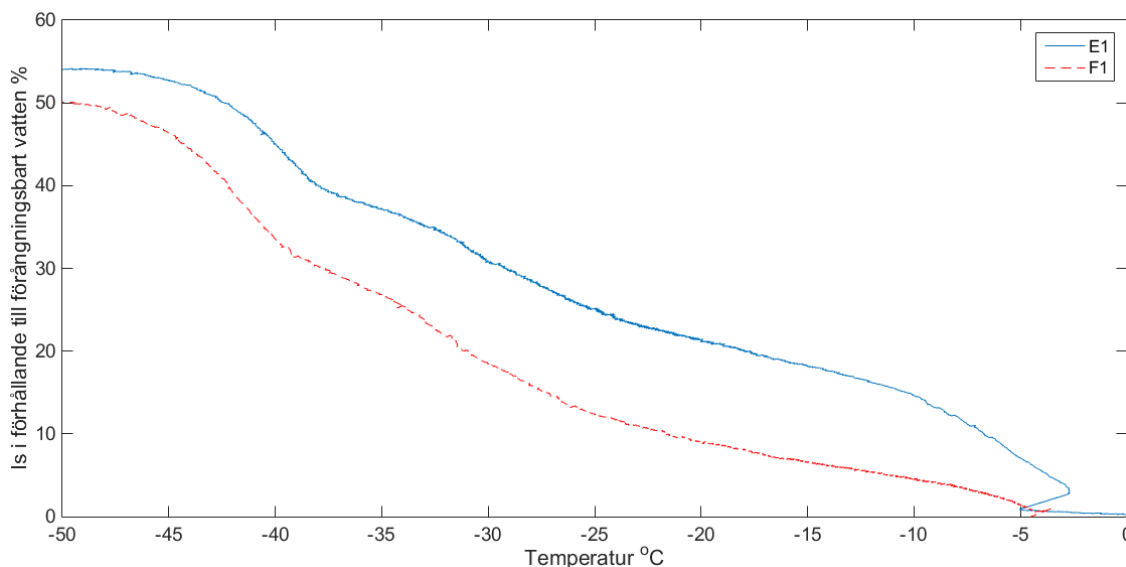
Figur 5.1: Isbildningen för provkropparna med enbart CEM I.

I Figur 5.2 visas isbildningen för provkropparna C1 och D1. Kurvorna följer varandra bra och det syns en tydlig ökning av isbildningen vid $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ för båda proverna. Det är naturligt för en betong med en relativt stor andel slagg eftersom andelen mindre porer ökar och därigenom sänks temperaturen för när vattnet i dem kan frysa. Kurvan för C1 ligger hela tiden över kurvan för D1 vilket är naturligt då C1 innehåller både mer förångningsbart vatten och luft än D1.



Figur 5.2: Isbildningen för provkropparna med CEM I och 35% slagg.

I Figur 5.3 visas isbildningen för provkropparna E1 och F1. Även här följer kurvorna varandra bra men med en större skillnad i början på fryscykeln. Detta är en rätt naturlig följd av att E1 innehåller mer luft och förångningsbart vatten än F1 och det ger framförallt utslag i början av fryscykeln eftersom det är då de stora vattenfyllda porerna fryser till is. Precis som för kurvorna för C1 och D1 syns en tydlig ökning av isbildningen vid $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ och det beror på att mängden små porer ökar vid inblandning av flygaska i betongen.



Figur 5.3: Isbildningen för provkropparna med CEM I och 35% flygaska.

Betong B1 har lägst andel is i förhållande till mängden förångningsbart vatten och det beror med

stor sannolikhet på vattenseparationen som skedde vid gjutningen. Mängden vatten som på så sätt förlorades var uppskattningsvis 20% vilket sänker vct ganska kraftigt och ett lägre vct ger större andel mindre porer.

Ur figurerna ovan syns det att en ökad lufthalt också innebär en ökad mängd is i förhållande till mängden förångningsbart vatten. Den ökade mängden is ger dock ingen ökad deformation av provkropparna utan snarare tvärtom en lägre bestående deformation i dessa mätningar. Det stämmer i fallen med CEM I och CEM I med flygaska medan CEM I med slagg uppvisar liknande deformationer oavsett lufthalt. Det här tyder på att den extra isbildningen sker i luftporerna i proverna med extra luft och därmed inte påverkar deformationen.

I alla dilatationsfigurer gör grafen ett hopp ett par grader under 0 °C vilket i de flesta fall beror på expansionen när is bildas i de större porerna. I de figurer där det inte sker en expansion, D1 och F1, bildas det också is men isbildningen får där plats i porerna vilket medför att provet inte expanderar. Sedan syns en kontraktion i figurerna som i alla fall förutom F1 är större än den var när temperaturen låg över 0 °C och detta beror troligtvis på isens kontraktion som är fem till sex gånger större än betongens och gör att även betongen kontraherar som beskrivs i Penttala & Al-Neshawy (2002). Kontraktionen pågår hela tiden, då den är temperaturbetingad, men vid cirka -40 °C börjar betongen expandera förutom för F1 som börjar sin expansion vid cirka -30 °C. Då kontraktionen fortsätter innebär det att expansionen som sker på grund av isbildningen dominerar över kontraktionen. Expansionen är förmodligen en kombination av de tre skadetyperna slutna behållare, hydrauliskt tryck och mikroskopisk islinnsbildning men det som sannolikt dominerar av de tre är slutna behållare då isbildningen aktiveras i de små porerna när temperaturen sjunker och de större porerna i omgivningen redan frusit till is.

I dilatationsfigurerna syns det att inga större bestående deformationer uppkommer i proverna förutom i F1. A1 uppvisar inga bestående deformationer medan de övriga provernas deformationer understiger 0,1‰ vilket är lägre än betongens brottöjning på 0,11‰. Att F1 har en så stor deformation är lite märkligt eftersom isbildningskurvan inte skiljer sig nämnvärt från de övriga. Torrvikten eller mängden förångningsbart vatten i provet sticker inte heller ut från de övriga proverna. Med tanke på det och utifrån resultaten är det tänkbart att även E1 skulle ha uppvisat större deformationer. E1 har dock en högre lufthalt än de övriga proverna och det är därför troligt att denna extra lufthalt skyddade provet från en större bestående deformation. Det är också möjligt att D1 skulle uppvisat större deformationer då lufthalten i D1 var förhållandevis mycket högre än i F1. Enligt samma resonemang som för E1 skyddar luftinblandningen provet från större deformationer. På grund av att det upptäcktes ett luftläckage vid bestämmandet av D1:s lufthalt kan det inte med säkerhet fastställas att lufthalten faktiskt var högre i D1 än i F1 och därför blir hela resonemanget kring D1 osäkert. Lufthalterna mäts i åtta liter av den färska betongen vilket anses representativt då det motsvarar en fjärdedel av de stora formarna och hälften av de små formarna. Däremot kanske inte lufthalterna stämmer överens med de små cylindrar som är använda vid testen. En större por i cylindrarna påverkar betongen mycket mer än motsvarande por skulle göra i de större blocken. Sådana större porer kan ses i bilderna på provkropparna i Bilaga A och skulle kunna ha uppstått vid vibreringen efter gjutningen. Det är svårt att säkerställa att hela blocket kompakteras på samma sätt beroende på var vibreringen sker och hur länge den pågår. När sedan provkroppen borrar ut ur blocken kan det hända att borrhärnan är precis där vibreringen har skett och då finns det risk att staven har lämnat hålrum efter sig när den drogs upp. Det gäller speciellt för det sista vibreringsstället. Varje betongtyp är bara testad en gång och det möjligt att resultatet inte är representativt för betongtypen. För att kunna säga något definitivt måste fler tester med samma material utföras. Det är då möjligt att deformationen för F skulle bli mindre eller att någon av de andra betongtyperna skulle uppvisa större skador. För att motverka problemet med håligheter i betongen så mycket som möjligt borde även betong med lösare konsistens gjutas och eventuellt använda mindre formar vid gjutningen.

Prepareringen av provkropparna inför testen med att linda in dem i plast och fästa termoelementet tog en del tid. Provkropparna började därför att torka ut innan själva testet startade vilket kan ha påverkat resultaten. Framst kanske att dilatationen hade gjort större utslag vid en större vattenmängd. En annan faktor som påverkar dilatationen är att den bara mäts i provkroppens längdriktning. Då provkroppens diameter är mindre än behållarens diameter är det därför rimligt att tror att expansionen och kontraktionen även sker utåt i radiell riktning från provkroppen. Ef-

tersom längdändringen var såpass liten och det fanns utrymme för provkropparna att expandera och kontrahera i alla riktningar är det därför troligt att längdändringarna är representativa för respektive provkropp.

Flercykelförsöken

I de tre testerna som utfördes syns det rätt tydligt att betongen expanderar även om temperaturen är konstant. Det här liknar resultat från experimentet som Powers & Helmuth (1953) utförde där längdutvidgningen ökade trots att temperaturen var konstant. Det var också på de mätningarna som de baserade sin teori om mikroskopisk islinzbildning. Det mest troliga som händer i provkropparna är att islinser bildas som sedan fortsätter växa då provkroppen hela tiden har tillgång till vätska så som beskrivs i Lindmark (1998). Resultaten tyder på att det troligtvis går att studera islinzbildning i provkroppar med fri tillgång till vätska i kalorimetern som använts i den här studien. Då kurvorna för längdutvidgningen i alla tre fallen liknar den kurva som Powers & Helmuth (1953) presenterar är det också troligt att de sänkte ner sina provkroppar i någon form av vätska även om det inte framgår av artikeln.

I Figurerna 4.14, 4.15 och 4.16 visas att den bestående deformationen efter varje cykel är som störst i början för att sedan avta med varje cykel. Det första testet består bara av tre cykler och där ökar den totala deformationen hela tiden medan den totala deformationen upphör efter den andra cykeln i test två och efter den tredje cykeln i test tre. En anledning till att expansionerna avtar skulle kunna vara att det kommer in saltlösning med hög koncentration vilket gör att isbildningen minskar. Det tyder på att den första deformationen har störst inverkan på betongen men att provkroppen förmodligen inte hade gått sönder om cyklerna fortsatt.

Botten på provkroppen visade för alla tre försöken att tätningen inte slutit tätt och att saltlösning tagit sig in under provkroppen. Det är därför svårt att veta om en del av expansionen beror på den lyftkraft som isen under provkroppen utgör när saltlösningen fryser. Resultaten för de tre testerna visar dock att expansionen blir mindre och mindre för varje cykel och det är därför mer troligt att den eventuella isen under provkroppen inte bidrar till expansionen. Hade isen bidrag till en större del av expansionen borde expansionen ökat eller i varje fall varit på samma nivå hela tiden då temperaturcykeln är likadan under alla cykler. Saltlösningen i försöket är dessutom vald så att det inte ska bli så stor isbildning utanför provkroppen, främst för att inte utsätta behållaren för så stora krafter men det styrker också argumentet att det inte sker någon större isbildning under provkroppen. Utifrån det är det därför troligt att islinserna i provkropparna fortsätter att växa även om temperaturen är konstant. För att helt kunna säkerställa att så är fallet och att det enbart är provkroppen som expanderar och på så sätt återskapa experimentet av Powers & Helmuth (1953) måste tätningen i botten fungera som det är tänkt för att helt utesluta expansion genom isens lyftkraft.

När provkropparna började tina hade inte expansionen, och förmodligen inte isbildningen heller, avstannat helt och det hade varit intressant att veta hur mycket is som kunde bildas vid den konstant låga temperaturen om tiden blivit kraftigt förlängd. Det hade även varit intressant att studera vad som händer om temperaturen sänks ytterligare. Framförallt gäller det de första cyklerna då det syns i de senare cyklerna att isbildningen har en flackare kurva vilket tyder på att isbildningen är på väg att avstanna. Det är svårt att säga vad det kan bero på men en tänkbar anledningen är att saltinnehållet i provkroppen blir högre och högre ju fler cykler som körs. Då får dels saltlösningen svårare att frysa samt att saltkoncentrationen i porerna blir så hög att energivärdet balanseras vilket leder till att islinzbildningen avstannar.

Vid jämförelsen av isbildning i Figur 4.17 mellan den vakuummättade provkroppen E1 från det första försöket och den cyklade provkroppen Stav3 från det andra försöket syns det att kurvorna följer varandra bra. Det är svårt att dra några större slutsatser utifrån graferna då det handlar om provkroppar med olika dimensioner och vattenmättnadsgrad. Det verkar dock inte som att dimensionerna på provkroppen påverkar isbildningsprocessen för materialet. Det är rimligt att grafen för E1 ligger över grafen för Stav3 då E1 är vakuummättad och därför innehåller mer förångningsbart vatten. I Stav3 är det svårt att säga om eller hur saltet från saltlösningen påverkar isbildningen. Dilatationen för Stav3 är också den ganska lik dilatationen för E1 vilket tyder på

att cyklerna inte har påverkat dilatationen som sker under de långa fryscyklerna när proverna är fuktisolerade.

Gemensamt för alla prover är att det inte syns några sprickor på provkropparna och det beror troligtvis på att den kritiska vattenmättnadsgraden inte uppnåtts i något fall. Det innebär att det finns tillräckligt många luftporer som det förångningsbara vattnet kan expandera i. Det är också troligt att provkroppen F1 har en vattenmättnadsgrad som ligger närmre dess kritiska då F1 uppvisar störst skada.

5.2 Slutsats

- I betong med slagg och flygaska sker en stor del av isbildningen vid $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ gentemot CEM I som har en mer linjär isbildning.
- Mer luft i betong skapar mer is men inte nödvändigtvis större deformationer.
- Vid upp till sex fryscyklar påverkas betongen mest av den första cykeln. Det är också då som den största expansionen sker.
- Det är möjligt att studera islinnsbildning genom längdändring under flercykelförsök med fri tillgång till vätska med den specialbyggda kalorimetern.

5.3 Förslag på fortsatta studier

Nedan följer ett par förslag till fortsatta studier utifrån de resultat som denna studie kommit fram till.

1. Utföra det första försöket med större antal provkroppar för att på ett mer statistiskt säkert sätt kunna fastställa skillnader mellan de olika materialen och hur lufthalten påverkar resultaten. Det vore intressant att laborera med högre vct än 0,40 för att kunna få in mer vatten i provkropparna och även torka ut proverna innan de vakuumbehandlas för att på sätt maximera vattenupptaget. Till de gjutningarna borde kornstorlekarna minskas för att ge snitten i provkroppen ett mer representativt innehåll samt att gjuta proverna i cylindrar med rätt dimension.
2. Förfina testutförandet för det andra försöket och framförallt fokusera på att få till tätningen på ett bra sätt för att utesluta lyftkraft från isen. Köra längre cykler för att se hur länge isbildningen kan fortgå.
3. Köra cykler som efterliknar saltfrostförsök för att jämföra med mängden avskalningar. Gjuta material med olika vattenmättnadsgrader och cykla dem. Laborera med olika slags saltlösningar och även sådana lösningar som inte expandera eller fryser vid normala frystemperaturer.

Kapitel 6

Litteraturförteckning

- Burström, P.G. 2007. *Byggnadsmaterial: uppbyggnad, tillverkning och egenskaper (2: a uppl.)*. Studentlitteratur AB.
- Fagerlund, G. 1973. *Critical degrees of saturation at freezing of porous and brittle materials*. Ph.D. thesis, Building Materials, Lund University, Report 34.
- Fagerlund, G. 1977. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. *Matériaux et Construction*, **10**(4), 217–229.
- Fagerlund, G. 1993. Frost resistance of high performance concrete-some theoretical considerations. *Pages 112–140 of: Durability of High Performance Concrete: In Proceedings of the RILEM International Workshop*.
- Fagerlund, G. 1994a. Betonghandbok: Material, Kapitel 10, Struktur och strukturutveckling. *Svensk Byggtjänst*, **2**.
- Fagerlund, G. 1994b. Betonghandbok: Material, Kapitel 21, Frostbeständighet. *Svensk Byggtjänst*, **2**.
- Fridh, K. 2005. *Internal frost damage in concrete*. Ph.D. thesis, Building Materials, Lund University, TVBM–1023.
- Fridh, K., Lindmark, S., & Wadsö, L. 2003. A combined temperature scanning calorimeter and dilatometer for studies of freeze/thaw effects in porous media. *Nordic Concrete Research*, **29**, 37–51.
- Jansson, S., & Fagerlund, G. 1983. Anläggningscement i fullskaleförsök vid Ringhals, *Cementa*.
- Johansson, A., & Petersons, N. 1994. Betonghandbok: Material, Kapitel 8, Betongmassa. *Svensk Byggtjänst*, **2**.
- Johansson, S.E. 1994a. Betonghandbok: Material, Kapitel 2, Cement. *Svensk byggtjänst*, **2**.
- Johansson, S.E. 1994b. Betonghandbok: Material, Kapitel 6, Tillsatsmaterial. *Svensk byggtjänst*, **2**.
- Lindmark, S. 1998. *Mechanisms of salt frost scaling on portland cement-bound materials: studies and hypothesis*. Ph.D. thesis, Building Materials, Lund University, TVBM–1017.
- Lindmark, S. 2010. *Handbook of Concrete Durability*. Middleton Publishing Inc, an imprint of Marina Glim on Media. Chap. Frost and Salt-Frost Deterioration of Concrete—An Overview, pages 249–329.
- Ljungkrantz, C., Möller, G., & Petersons, N. 1994. Betonghandbok: Material, Kapitel 6, Tillsatsmaterial. *Svensk Byggtjänst*, **2**.

- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R.D. 2011. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, **41**(12), 1244 – 1256.
- Neville, A.M., & Brooks, J.J. 1987. *Concrete technology*. Longman Scientific and Technical.
- Paris, J.M., Roessler, J.G., Ferraro, C.C., DeFord, H.D., & Townsend, T.G. 2016. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, **121**, 1 – 18.
- Penttala, V., & Al-Neshawy, F. 2002. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles. *Cement and Concrete Research*, **32**(9), 1407 – 1420.
- Pigeon, M., Marchand, J., & Pleau, R. 1996. Frost resistant concrete. *Construction and Building Materials*, **10**(5), 339 – 348. Durability of Reinforced Concrete Structures.
- Powers, T.C. 1945. A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, **16**(4), 245–272.
- Powers, T.C. 1949. The air requirement of frost resistant concrete. *In: Highway Research Board Proceedings*, vol. 29.
- Powers, T.C. 1958. Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. *Journal of the American Ceramic Society*, **41**(1), 1–6.
- Powers, T.C. 1962. Physical properties of cement paste. *Pages 577–613 of: Chemistry of cement; Proceedings of the 4th International Symposium, Washington 1960. National Bureau of Standards, Monograph 43*, vol. 2.
- Powers, T.C., & Brownyard, T.L. 1946. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. *In: Journal Proceedings*, vol. 43.
- Powers, T.C., & Helmuth, R.A. 1953. Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing. *In: Highway research board proceedings*, vol. 32.
- Siddique, R., & Khan, M.I. 2011. *Supplementary Cementing Materials. [Elektronisk resurs]*. Engineering Materials: 37. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- Strand, M. 2016. *De-icing salt frost scaling in concretes with fly ash or slag with low air void contents*. Building Materials, Lund University, TVBM–3181.
- Taylor, H.F.W. 1997. *Cement chemistry*. 2 edn. Thomas Telford.
- Utgenannt, P. 2004. *The influence of ageing on the salt-frost resistance of concrete*. Ph.D. thesis, Building Materials, Lund University, TVBM–1021.

Bilaga A

Provkroppar – Bilder och mått

På bilderna i denna bilaga syns håligheter, på grund av dålig kompaktering vid gjutning, och luftporer i de olika provkropparna. Respektive provkropps mått (längd x diameter) är också redovisad. Bilderna är tagna efter respektive test.

A1

Mått: (150,8 x 34,3) mm



Figur A.1: Bilder på provkropp A1

A2

Mått: (150,5 x 34,5) mm



Figur A.2: Bilder på provkropp A2

B1

Mått: (150,5 x 34,5) mm



Figur A.3: Bilder på provkropp B1

C1

Mått: (151,0 x 34,5) mm



Figur A.4: Bilder på provkropp C1

Missfärgningen på den högra bilden är en rostfläck som kommer från spannen där provkroppen vattenmättades efter vakuumbehandlingen.

D1

Mått: (149,8 x 34,5) mm



Figur A.5: Bilder på provkropp D1

E1

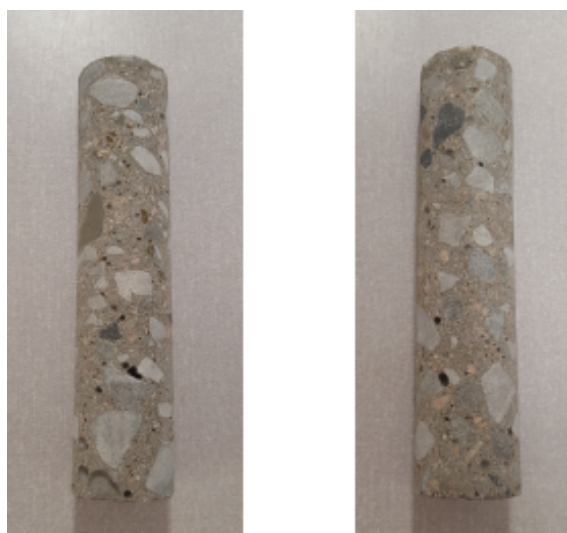
Mått: (150,1 x 34,5) mm



Figur A.6: Bilder på provkropp E1

F1

Mått: (150,5 x 34,5) mm



Figur A.7: Bilder på provkropp F1