

# **Saltfrostskaadors tidsberoende vid låg temperatur på betong med tillsatsmaterial**

Henrik Sjöbeck

ISRN: LUTVDG/TVBM—15/5101—SE  
ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola  
Byggnadsmaterial  
Box 118  
221 00 Lund

[www.byggnadsmaterial.lth.se](http://www.byggnadsmaterial.lth.se)

# Förord

Detta examensarbete är den sista delen av civilingenjörsutbildningen på Lunds Tekniska Högskola, LTH. Det är utfört under vårterminen 2015 vid avdelningen för byggnadsmaterial. Katja Fridh och Martin Strand har varit handledare respektive biträdande handledare och Magnus Åhs har varit examinator. Projektet består av en litteraturstudie samt en stor laborativ del.

Stort tack till Katja och Martin för ständig möjlighet till många, långa och intressanta diskussioner.

Tack även till samtlig personal på avdelningen för byggnadsmaterial för all hjälp och att ni gjort att jag trivts så bra under hela våren.

Lund, juni 2015

Henrik Sjöbeck



# Sammanfattning

Betong skadas ibland av frysning. I miljöer där dessutom salt förekommer blir det särskilt svårt för betongen att inte skadas. Skadorna yttrar sig som avskalningar på betongens yta, men den inre strukturen kan vara opåverkad. Utöver den estetiska oangelägenheten kan dessa ytliga avskalningar även bidra till påskyndade korrosionskador och inre frostsador.

Syftet med detta examensarbete är att undersöka hur saltfrostbeständigheten för betong med olika bindemedelssammansättningar påverkas av olika fryscyklar. Ett annat syfte är att analysera provningsmetoden som är lite annorlunda än vad som är standard för att kvantifiera saltfrostbeständighet.

Det råder ingen enighet kring vilka skademekanismer som bidrar till saltfrostskador i betong. En del teorier menar att skademekanismerna är liknande de för inre frostsprängning, medan andra menar att saltfrostavskalningar orsakas av en helt annan mekanism som beror på ytliga spänningar i betongen då den frusna saltlaken krymper. Det är viktigt att få mer kunskap om vilka skademekanismerna är samt hur betong påverkas av olika miljöer. Då ges en bättre möjlighet att designa materialet för att göra det mer beständigt och öka konstruktionens livslängd.

Betong med tre olika bindemedelsammansättningar testas i denna rapport. En med 100 % anläggningscement, en med 65 % anläggningscement och 35 % masugnsslagg samt en tredje blandning med 65 % anläggningscement och 35 % flygaska. Samtliga utsätts för varierande fryscyklar i två omgångar, en cykel är i samtliga fall 24 timmar. Samtliga cykler hade samma temperaturgradienter vid nedkylning och uppvärmning. Det som varierades var tiden som provet och saltlösningen hade temperatur under  $-21^{\circ}\text{C}$  och över  $0^{\circ}\text{C}$ .

Det finns en vanlig metod i Sverige för att testa om saltfrostbeständigheten för betong, kallad Boråsmetoden eller SS 137244. Försöken i denna rapport liknar denna metodik, förutom att provuppställningen är upp- och nervänd. Största skillnaden är att i dessa försök doppas provet i en burk med saltlösning, medan man i Boråsmetoden håller saltlösningen ovanpå betongytan. Vid provning enligt Boråsmetodens manual finns det också en standardiserad fryscykel, som skiljer sig något från fryscyklerna i denna rapport.

Resultaten i omgång 1 och omgång 2 pekar i delvis olika riktningar. Proven tycks ha påverkats av hur mycket vatten de sugit upp, där de prover som sugit upp mest vatten är de som skadats mest av avskalningar. I omgång 1 är det tydligt att proverna utsatta för fryscykeln med den korta frystiden skadas mindre än de i referenscykeln. Mätningarna visar också att proverna i referensfrysen har sugit upp mer vatten. I omgång 2 går det däremot inte att tolka resultaten på samma sätt. Vid jämförelse av mängden avskalningar mellan cykeln med den förlängda frystiden och referenscykel går det inte att se om den ena cykeln är värre än den andra. Även vattenuppsugningen varierar oberoende av vilken cykel proven utsätts för.

Vid nedkylning till precis under  $-21^{\circ}\text{C}$  pekar resultaten på att skadorna förvärras upp till en viss (okänd) minimitid. Efter temperaturen hållits precis under  $-21^{\circ}\text{C}$  denna okända tid så tycks skadorna sluta öka med tiden. Det går inte att visa vilken skademekanisk/skademekanismer som orsakar saltfrostskador efter dessa försök. För att få ökad kunskap om skademekanismerna krävs vidare studier.



# Abstract

Concrete is sometimes damaged by freezing. The damage increases if salt also is present. The damage consists of the removal of small flakes on the surface of the concrete, the inner structure may however be completely unaffected. This surface damage may increase the degree of saturation and ingress of e.g. chloride ions, which may lead to inner frost damage and corrosion on the reinforcing steel. It is also an aesthetical inconvenience.

The purpose of this master thesis is to investigate how the salt-frost damage on concrete with different binder combinations is affected by different frost cycles. Another purpose is to analyze the test method, which is made in a slightly different way than what is normally done.

Although a lot of research has been done, there are still a lot of different theories on the characteristics of the salt scaling mechanisms. Some say that the mechanisms are similar to those of inner frost damage, while others say that it's a completely different mechanism which is caused by tension created on the surface of the concrete when the frozen solute shrinks. A better understanding of the damage mechanisms would lead to an opportunity to design a durable material and increase the service life of the structure.

Three different combinations of binders are tested in this report. One with 100 % Portland cement, one with 65 % Portland cement and 35 % fly ash and a third mixture with 65 % Portland cement and 35 % slag. All concretes are exposed to different frost cycles in two rounds, every cycle is 24 hours long. All the cycles had the same freezing rate. The time the specimens and the solute was subjected to a temperature below  $-21^{\circ}\text{C}$  and above  $0^{\circ}\text{C}$  varied between 2-12 h.

There is a common test method in Sweden for salt-frost durability called "The Borås method" or SS 137244. The tests in this report are similar to those in the Borås method, except that the test rig is upside down. In this study the surface of the sample is submerged into a can of solute, while in the Borås method the solute is poured on top of the surface of the sample. The frost cycle in the Borås method is also a bit different from the frost cycles in this report.

The results in round one and round two points in two different directions partly. The specimens seem to have been affected by how much water they absorbed. The specimens that have absorbed the most water have also been damaged the most by scaling. In the first round it is clear that the specimens subjected to short time at freezing temperature is damaged less than the specimens in the reference cycle. The measurements also indicate that the samples in the reference cycle have absorbed more water. In the second round the results cannot be interpreted in the same way. It is not possible to decide whether the samples in the reference cycle or the samples in the long freezing cycle have scaled the most. Neither does the amount of absorbed water vary between the two cycles. This suggests that the time at freezing temperature does matter up to a certain duration, but passed this duration the concrete is not further damaged.

Which mechanism causing salt-frost scaling cannot be shown in this study. An increased time at the lowest temperature seems to increase the amount of scaling, up to a certain minimum time where further freezing does not result in worse damage. More studies are needed to further investigate the mechanisms causing salt-frost damage.





# Innehåll

Förord

Sammanfattning

Abstract

1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund .....	1
1.2 Syfte.....	2
1.3 Avgränsningar .....	2
2 Litteraturstudie .....	3
2.1 Allmänt om bindemedel .....	3
2.2 Portlandcement .....	4
2.3 Masugnsslagg .....	4
2.4 Flygaska.....	5
2.5 Betongs porstruktur .....	5
2.6 Hur saltlake fryser .....	6
2.7 Frostskador på betong.....	6
2.8 Skademekanismer vid saltfrostangrepp .....	8
2.8.1 Hydrauliskt tryck .....	9
2.8.2 Mikroskopiskt istillväxt och osmotiskt tryck.....	9
2.8.4 Kritisk vattenmättnadgrad.....	10
2.8.5 Glue spalling .....	11
2.9 Olika fryscyklers inverkan.....	12
2.10 Boråsmetoden – SS 13 72 44.....	13
3 Försök.....	15
3.1 Hypotes .....	15
3.2 Material.....	15
3.2.1 Betongrecept .....	15
3.3 Metod.....	16
3.3.1 Gjutning och härdning .....	16
3.3.2 Provanordningen .....	18
3.3.3 Försökets fryscyklar.....	21
3.3.4 Avskalningar .....	22
3.3.5 Trycktester .....	23
3.4 Resultat .....	23

3.4.1 Trycktester .....	23
3.4.2 Resultat från omgång 1 .....	23
3.4.3 Resultat från omgång 2 .....	27
4 Diskussion .....	33
4.1 Analys av resultaten.....	33
4.2 Felkällor.....	34
5 Slutsats .....	37
6 Förslag på vidare studier .....	39
7 Referenser.....	41
Bilaga 1	
Bilaga 2	
Bilaga 3	
Bilaga 4	

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Betong skadas ibland av frysning, speciellt när temperaturen pendlar över och under fryspunkten vid aggressiva miljöer. Om betong är utsatt för saltvatten vid nedfrysning ökar påkänningarna och det finns risk att ytan skadas genom avskalningar (Fagerlund, 1992). Det är främst bindemedlet som avlägsnas, men ibland kan även ballastkorn lossna. I länder med kallt klimat saltas ofta vägar och broar vilket gör att exempelvis kantbalkar utsätts för mycket ogynnsamma förhållanden. Det är väldigt svårt att bedöma betongkonstruktionens livslängd utan kunskap om saltfrostens effekter och vilka åtgärder som bör vidtas för att skydda sig mot skador orsakade av detta. Varje betong som ska användas vid aggressiva miljöer, det vill säga i miljöer där betongen är särskilt utsatt och kan angripas av exempelvis salt, fukt och syror, testas normalt i laboratorier under standardiserade former för att säkerställa att betongen uppfyller beständighetskraven för den aktuella miljön.

Avskalningarna i sig behöver inte påverka betongen särskilt mycket (Valenza and Scherer, 2007). Däremot kan de leda till att andra angrepp får en snabbare och allvarligare utgång. Ett exempel på detta är kloridangrepp som kan leda till att armeringsjärnen börjar korrodera. Ett annat exempel är att ytan lättare får en högre vattenmättnadsgrad vilket leder till högre risk för inre frostsador. Avskalningar kan också innebära estetiska problem i form av ojämnheter och att stora ballastkorn syns.

Trots att saltavskalning är ett stort beständighetsproblem, och flera hundra laboratorieförsök har genomförts, råder ingen enighet om exakt vilka mekanismer det är som orsakar skadan (Valenza and Scherer, 2007). Störst skada uppnås när saltkoncentrationen är relativt låg, mellan 2-4 viktprocent salt (Verbeck and Klieger, 1957). Lösningemedlet behöver inte vara koksalt, även lösningar av till exempel barium och kalium ger samma effekt. Däremot visar studier att ingen saltavskalning sker om det bara är rent vatten eller helt torrt (Sellevold and Farstad, 1991, Verbeck and Klieger, 1957).

Vid aggressiva miljöer i Sverige används i princip aldrig några andra bindemedel än anläggningcement, som inte innehåller något tillsatsmaterial utan endast Portlandcement. Däremot förekommer det i andra länder såsom Danmark och Nederländerna att Portlandcementet blandas med tillsatsmaterial såsom flygaska och slagg, även i aggressiva miljöer. Anledningarna till att det inte kommit längre i Sverige är att kunskapen om tillsatsmaterial generellt är låg, och att dess effekter inte utretts tillräckligt för de förhållanden som råder i Sverige. I Sverige är klimatet annorlunda och troligen mer aggressivt, därför är man också mer försiktig.

Tyngdpunkten av analysen i denna rapport ligger på att jämföra varje bindemedel relativt sig själv, det vill säga hur det specifika bindemedlet reagerar när det utsätts för varierande fryscyklar i kontakt med saltvatten. Det finns flera anledningar till att studera detta. De stora koldioxidutsläppen från cementtillverkningen leder till att alternativa bindemedel används mer och mer. Betong med tillsatsmaterial får en annorlunda struktur och kan påvisa andra egenskaper än betong med enbart anläggningcement. Av denna anledning studeras vad som händer vid inblandning av slagg och flygaska, med avseende på saltfrostsador, i denna rapport. Om det går att komma fram till vilken cykel som ger mest avskalningar kan en ökad

förståelse för skademekanismerna bakom uppnås. Detta eftersom skademekanismerna som är föreslagna av tidigare studier förutsätter olika tillstånd där just dessa mekanismer kan verka. Vissa skademekanismer kräver att betongen har uppnått en kritisk vattenmättnadsgrad, medan andra beror på spänningar i isen som är i kontakt med betongen. Genom att variera fryscyklerna utsätter man betongen för denna variation av tillstånd, såsom att saltlösningen antingen är frusen mot betongens yta under lång tid, eller att den har en lång tid i vätskefas och endast en kort tid frusen mot betongytan. Det är även intressant att undersöka om de olika betongblandningarna uppvisar liknande avskalningsmönster, exempelvis i form av att avskalningarna ökar eller minskar med tiden och ökat antal fryscykler. Alltså kan en viss jämförelse mellan bindemedlen göras, det vill säga hur de uppträder, men en jämförelse mellan den absoluta mängden avskalningar bör inte göras. För att göra detta bör *hydratationsgraden*, det vill säga hur stor andel av cementet som är härdat, vara känd och noggrant undersökt vilket inte ingår i studien. Väldigt viktigt för saltfrostbeständigheten är även luftporstrukturen, vilken kan variera mellan olika gjutningar. I studien användes troligtvis för lite luftporbildare än vad som krävs för att göra betongen frostbeständig, men på grund av detta blir resultaten något tydligare då betongen skadas mer och skillnader är lättare att se.

En alternativ provningsmetod används i detta projekt eftersom den nuvarande standardmetoden i Sverige, Boråsmetoden, har en liten brist i att det finns risk att saltlösningen dräneras från ytan genom sprickor i betongen. Inträffar detta blir mätresultaten osäkra då det inte går att veta hur länge betongytan varit i kontakt med lösningen. Av denna anledning har testerna i denna rapport utformats på ett något modifierat vis, i syfte att få säkrare mätvärden.

## 1.2 Syfte

Ett syfte med detta arbete är att undersöka hur olika bindemedel påverkas av olika typer av fryscykler. Ett andra syfte är att analysera provningsmetoden, för att kvantifiera saltfrostbeständighet vilken görs på ett lite annorlunda sätt än standard.

## 1.3 Avgränsningar

Försöken i denna rapport studerar endast hur olika typer av fryscykler påverkar saltfrostskadorna för betong med tre olika bindemedelsblandningar. Inga jämförelser mellan de olika bindemedlen kommer alltså göras i form av hur många gram avskalning respektive betong fått. På grund av tidsbegränsningen av arbetet utförs försöken på ung betong som endast härdat i 36 respektive 58 dygn.

## 2 Litteraturstudie

### 2.1 Allmänt om bindemedel

Med ökande krav på miljövänlig betong arbetar man alltmer för att utveckla betong med andra bindemedel än Portlandcement. Exempel på alternativa bindemedel som används idag är slagg, flygaska och silika. Dessa kallas puzzolaner. Andelen cement som byts ut mot någon puzzolan är vanligen 5-50 % (Valenza and Scherer, 2007). Förutom den miljömässiga nyttan med alternativa bindemedel kan de också tillföra goda egenskaper hos betongen ur en hållfasthetssynpunkt och en beständighetssynpunkt. Kornstorleken hos dessa varierar men i de flesta fall är de mindre än cementkornen. Detta gör att de kan fylla små hålrumsytor mellan cementkornen och aggregaten, vilket medför en tätare betong och högre hållfasthet. Generellt gäller kornstorleksförhållandet silika < slagg < flygaska / cement.

Bindemedel i betong delas huvudsakligen in i tre olika typer (Johansson, 1994).

- **Hydrauliska**  
Bindemedel som reagerar direkt med vatten., exempelvis vanligt Portlandcement.
- **Icke hydrauliska**  
Bindemedel som inte reagerar med vatten utan måste aktiveras med tillsats av kalk, exempelvis flygaska.
- **Latent hydrauliska**  
Bindemedel som behöver en alkalisk aktivator för att börja reagera men sedan, när reaktionen väl kommit igång, är materialet egna kalkinnehåll tillräckligt för att bindemedlet ska fortsätta reagera och bilda CSH-gel. Ett exempel på ett sådant material är slagg.

När cement reagerar med vatten bildas kalciumsilikathydrat, så kallad CSH-gel, och kalciumhydroxid (Johansson, 1994).



Cementgelen är den lastbärande delen av cementpastan, kalciumhydroxiden tar upp volym men har lägre hållfasthet.

Förutom att puzzolaner fyller upp hålrum genom sin ringa storlek har de ytterligare en positiv inverkan på hållfastheten. De reagerar med kalciumhydroxiden och bildar mer av den starka cementgelen enligt följande.



På detta sätt blir betongen tätare och en högre hållfasthet kan uppnås. En viss försiktighet bör dock vidtas då kalciumhydroxid är basiskt och skyddar armeringen från att korrodera. Det finns en gräns för hur mycket puzzolan man kan blanda i betongen för att den ska bilda CSH-gel. Denna gräns finns eftersom vid en viss punkt är all kalciumhydroxid förbrukad. Efter denna gräns fyller puzzolaner endast en funktion som filler. Reaktionshastigheten hos en puzzolan beror på dess kalciumoxid/kiseldioxid förhållande. Desto högre detta förhållande är, ju mer hydrauliskt är det och har lättare att reagera med vatten och därmed höjs reaktionshastigheten. Även temperaturen spelar en stor roll för reaktionshastigheten, där en högre temperatur medför en snabbare härdning.

Den största delen utförd forskning är med rent Portlandcement som bindemedel. Forskningen tyder enligt Valenza and Scherer (2007) på att saltfrostskaorna ökar vid inblandning av slagg och flygaska. Detta beror dels på att betong med dessa bindemedel har högre benägenhet för separation och blödning, det vill säga att tyngre aggregat sjunker i pastan med gravitationens hjälp vilket medför en inhomogen betong med ökad sprickrisk och en svagare yta. Puzzolaner kräver också längre härdningstid innan de uppnår samma stryka som betong med enbart Portlandcement. Av denna anledning har betong med puzzolaner sämre förutsättningar vid frysprovning av ung betong.

De olika bindemedelstyperna samt dess inverkan på saltfrostbeständigheten diskuteras mer utförligt i följande avsnitt.

## 2.2 Portlandcement

Beroende på vilken kvalitetstyp cementet har varierar halten portlandsklinker. Råmaterialen i portlandsklinker är kisel, aluminiumoxid, kalciumoxid och järnoxid (Ramachandran, 1996). Att framställa portlandsklinker är en mycket energikrävande process då råmassan bränns i 1300-1450°C. Genom denna bränning bildas olika så kallade klinkerkomponenter:

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

$\text{C}_3\text{S}$  och  $\text{C}_2\text{S}$  utgör tillsammans 75- 80 % av Portlandcement, det är också dessa som står för den största lastbärande förmågan. Beroende på om man vill ha ett snabbhärdande eller långsamthärdande cement kan dessa komponenter varieras.  $\text{C}_3\text{S}$  reagerar snabbt med vatten och är helt dominerande den första månaden medan  $\text{C}_2\text{S}$  tar längre tid på sig och bidrar till hållfasthetsutveckling på längre sikt. Gips tillsätts för att inte  $\text{C}_3\text{A}$  ska reagera direkt vid kontakt med vatten och därmed minska arbetbarheten, det vill säga pastan blir då för fast i konsistensen och svår att hantera.  $\text{C}_3\text{A}$ -halten har betydelse för cementets beständighet mot sulfater eftersom det är  $\text{C}_3\text{A}$  som kan reagera med yttre sulfater vilket kan leda till skador.

## 2.3 Masugnsslagg

Masugnsslagg är en restprodukt ur tackjärnsproduktionen (Valenza and Scherer, 2007). För att slaggen ska komma till användning i betong måste den behandlas på ett speciellt sätt där resultatet är ett grusliknande material, kallad granulerad masugnsslagg, som mals ner till ett pulver som varierar i kornstorlek beroende på producenten men normalt är något finare än Portlandcement. Slagg består av samma oxider som Portlandcement, det vill säga kisel-, aluminium- och kalkoxider, men proportionerna av dessa är annorlunda.

Strukturen på slagg blir glasig, amorf, vilket gör den latent hydraulisk och användbar i betong (Johansson, 1994). Kornen är kantiga och kan liknas vid krossat glas. Vid tillsats av slagg utgör den vanligen 25-50 % av cementmängden.

Betong med slagg har initialt lägre hållfasthet än vanlig betong, men efter ungefär en månad har även slaggen hydratiserat och bildat en tätare och starkare betong än vad varit fallet utan den (Johansson, 1994, Valenza and Scherer, 2007). Härdningstiden är starkt temperaturberoende. Karbonatisering av slaggbetong resulterar i en annorlunda struktur

jämfört med för betong med enbart Portlandcement. Karbonatiserar slaggbetong blir ytan svag och skadas mer vid saltfrostangrepp. Denna effekt är mycket viktig att ta hänsyn till vid analys av ytliga saltfrostskador. I denna rapport kommer dock endast okarboniserad slaggbetong testas.

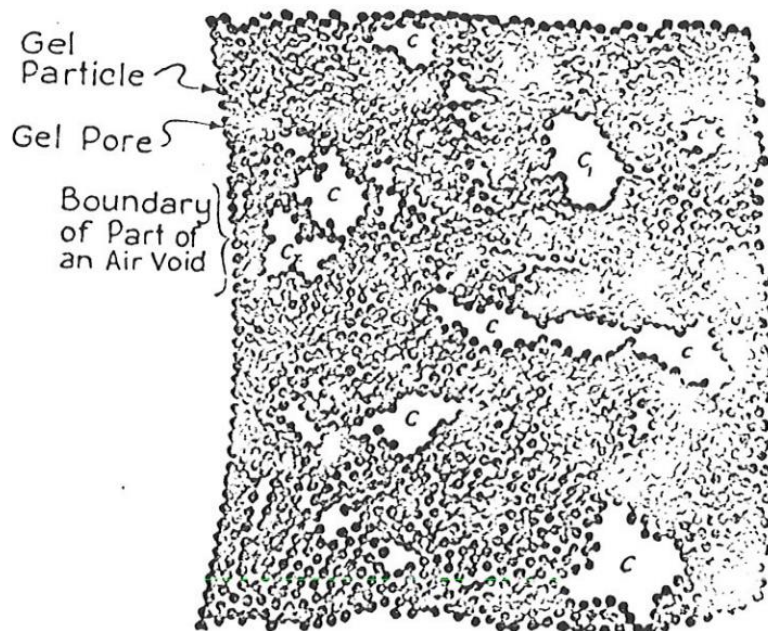
## 2.4 Flygaska

Flygaska är en restprodukt från kolkraftverk (Johansson, 1994). Ingår flygaska utgör den vanligtvis 10-40 % av den totala bindemedelsmängden i en betong. Flygaskan erhålls genom filtration av rökgaser från förbränningskammare som avskiljer dammet. Flygaskans partiklar varierar beroende på förbränningsprocess, förbränningstemperatur och kolsort. Kornstorleken är ungefär densamma som för ohydratiserat cement (Valenza and Scherer, 2007). Detta kombinerat med att flygaska inte innehåller så mycket reaktivt kisel gör att den puzzolana reaktionen sker relativt långsamt. Därför kräver betong med flygaska en längre härdningstid för att uppnå samma hållfasthet som betong med slagg eller enbart Portlandcement

Doseringen av luftporbildare måste normalt höjas avsevärt vid användning av flygaska, jämfört med Portlandcement (Cementa, 2015). Detta eftersom flygaska alltid innehåller en viss mängd oförbränt kol som adsorberar en del av luftpormedlet och därmed minskar dess effektivitet.

## 2.5 Betongs porstruktur

Det är mycket viktigt att cementpastan har en god luftporstruktur för att betongen ska vara frostbeständig, vilket beskrivs mer utförligt i avsnitt 2.8 i denna rapport. Man brukar dela upp porerna i cementpastan i *gelporer*, *kapillärporer* och *luftporer*, se Figur 1 nedan. Gelporererna är extremt små och bildas i cementgelen (Burström, 2007).



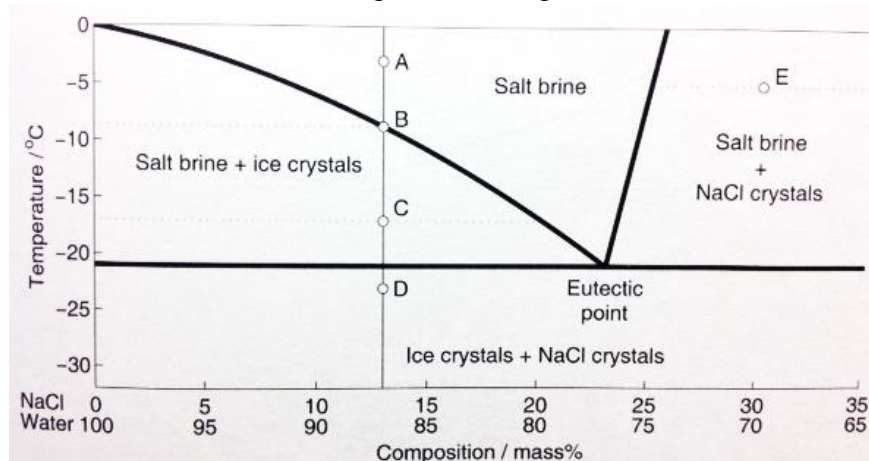
Figur 1- Porstrukturen i cementpastan. Kurvaturen i vänster del av bilden illustrerar gränsen mot en luftpor. Bilden är schematisk, i verklig skala skulle det vara mycket svårt att se någon kurvatur alls vid gränsen mot luftporen. Ett "C" indikerar en kapillärpor (Powers and Helmuth, 1953).

Allteftersom cementgel bildas fylls utrymmet mellan cementkornen ut på grund av att gelens volym är större än de ursprungliga cementkornens, eftersom gelen dels är porös men också för att den binder vatten. Dock finns det alltid utrymmen mellan cementkorn som cementgelen inte lyckas fylla ut. Där bildas istället kapillärporer. Ju längre tiden går, desto större andel av cementkornen hydratiserar och fyller därmed ut hålrummen och gör betongen tätare.

Kapillärporerna är mycket större än gelporerna. Hur pass vattenfyllda kapillärporerna är beror på tillgången på fukt, de fylls lätt vid tillgång till fritt vatten. Luftporer är porer som är större än kapillärporerna. Luftporer bildas i betongen när den blandas, men utan tillsats av ett luftporbildande medel försvinner de mycket snabbt (Dolch, 1996). För att luftporerna ska kunna verka som skydd mot frostsador måste de vara jämnt utspridda i pastan med ett visst minsta avstånd emellan sig som inte bör överskridas (Powers, 1949).

## 2.6 Hur saltlake fryser

För att förstå sig på saltfrostbeständighet och mekanismerna som påverkar betongen med avseende på detta problem är det viktigt att förstå vad som händer när en saltlösning fryser. Låt oss därför studera fasdiagrammet i Figur 2 nedan.



Figur 2- Fasdiagram för en NaCl-lösning (Wadsö, 2014).

Fasdiagrammet består av fyra områden, inbundna av linjerna i figuren (Wadsö, 2014). I punkt A finns det endast saltlösning. I området där punkt C befinner sig finns både saltlösning och iskristaller. Under en viss temperatur, kallad den *eutektiska punkten*, existerar endast iskristaller och saltkristaller. Alltså existerar ingen lösning under denna punkt. En saltlösning når den eutektiska punkten vid ca -21°C. I området där punkt E befinner sig är salthalten så hög att inga iskristaller kan bildas över -21°C och systemet består då av saltlösning och saltkristaller.

## 2.7 Frostskador på betong

Man kan dela in frostskador på betong i två olika varianter (Fagerlund, 1992).

- Frysning med rent vatten, inre frostskador
- Frysning i närvaro av salthaltigt vatten, avskalningar på ytan

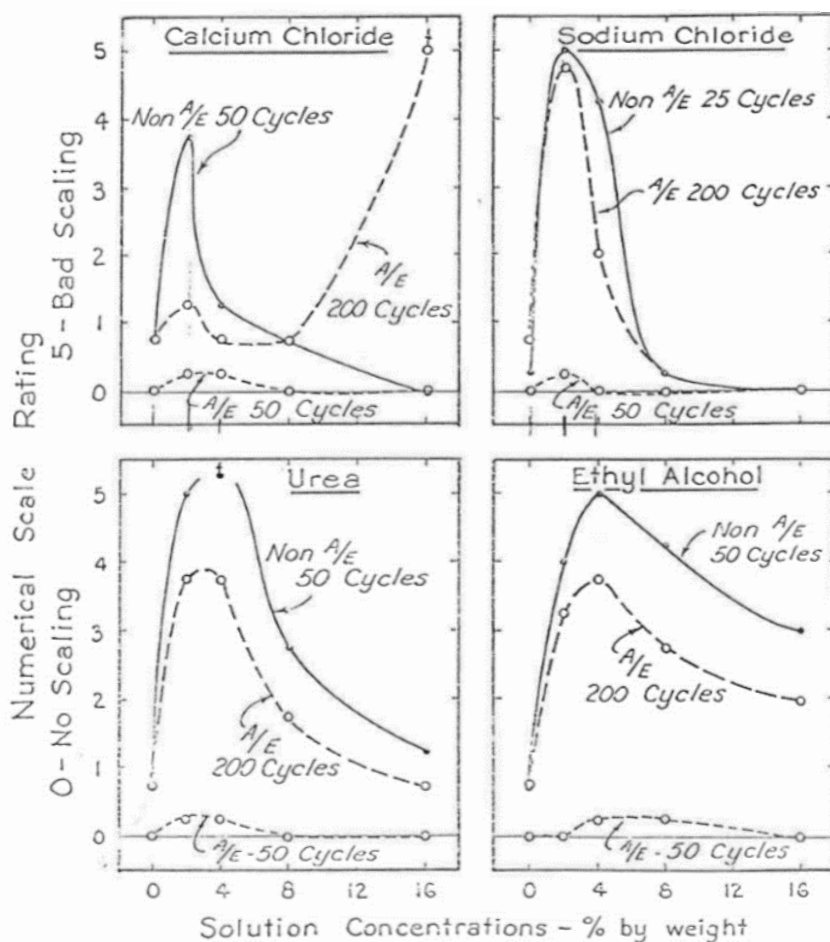
Saltfrostskador kan uppkomma när betong som är utsatt för en kloridhaltig vätska fryser. Det yttrar sig som en succesiv avskalning av betongens yta där det främst är cementpastan tillsammans med mindre aggregat (i storleksordningen som sand) som lossnar, men även



större aggregat lossnar efterhand. Saltfrostsador skiljer sig jämt mot inre frostsador på olika sätt. Angreppen vid inre frostsador sker inuti betongen och bidrar till sprickbildning (Fridh, 2005). Detta påverkar hela konstruktionens mekaniska egenskaper, såsom att E-modulen reduceras. Vid yttre saltfrostsador behöver inte de mekaniska egenskaperna för hela materialvolymen påverkas då det endast är det yttersta ytskiktet som skalas av, betongens inre struktur är fortsatt oförändrad. Inre frostsador behöver inte heller påverka betongens yta eftersom ytan ofta är torrare än den inre delen. Skademekanismerna för saltfrostsador diskuteras vidare i avsnitt 2.8.

Även om avskalningar från betongytan inte påverkar de mekaniska egenskaperna direkt, kan de däremot få långsiktiga konsekvenser för hela konstruktionen då inträngning av klorider kan påskyndas som gör att armeringsjärnen börjar korrodera (Valenza and Scherer, 2007). Ett skadat ytskikt kan även leda till att fukt lättare tränger in i betongen och därmed höjs risken för inre frostsador. Kraftig avskalning kan även innebära estetiska problem då ytan blir ojämn och större aggregat friläggs.

Avskalningar sker inte enbart då lösningar med koksalt fryser, utan även då andra lågkoncentrationslösningar fryser enligt Figur 3. Med hänsyn till att lösningarna kan skilja sig kemiskt tyder det mesta på att det är en fysikalisk process som ligger bakom avskalningsmekanismen (Verbeck and Klieger, 1957). Detta styrks även av att det verkar finnas ett pessimalt saltinnehåll på omkring 3 viktprocent, se Figur 3 nedan. Vore angreppen kemiska torde avskalningarna öka vid ökad saltkoncentration.



Figur 3- Inverkan av koncentration samt olika lösningars inverkan på avskalning av betongytan (Verbeck and Klieger, 1957)

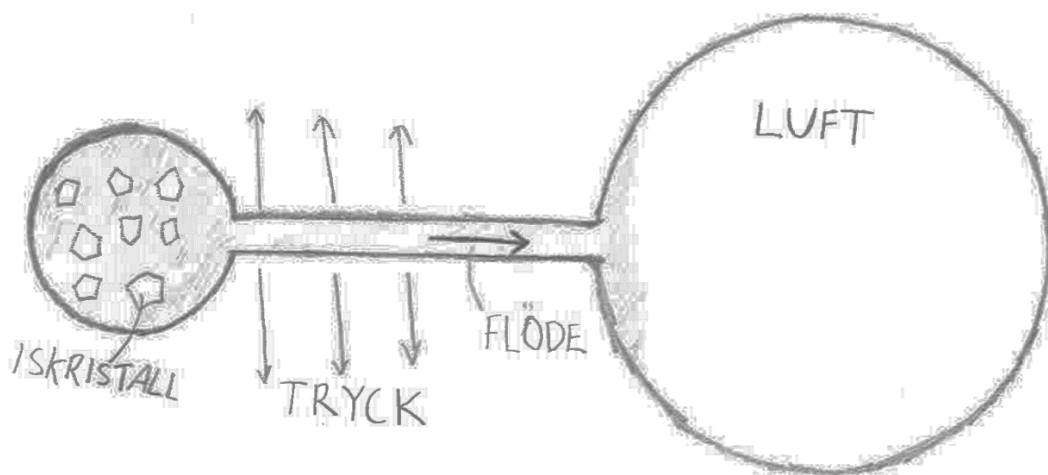
Om betongytan endast är utsatt för rent vatten förekommer inga avskalningar. Enligt Valenza and Scherer (2007) är analyser som ändå visar på avskalningar vid kontakt med rent vatten missvisande då dessa tester är gjorda efter 100 fryscyklar eller fler, vilket är dubbelt så många jämfört med ett vanligt saltfrosttest. Frostavskalningen vid dessa tester kan också bero på att betongen haft låg kvalitet och låg draghållfasthet vid ytan, enligt Valenza och Scherer.

## 2.8 Skademekanismer vid saltfrostangrepp

Det har inte kunnat bevisas vilka eller vilken mekanism som leder till saltavskalning. Däremot har en rad olika förslag framlagts vilka beskrivs i följande avsnitt. Teorin om hydrauliskt tryck som en skademekanism vid frysning och tönning av betong presenterades av Powers (1949). Ytterligare en teori presenterades av Powers and Helmuth (1953) som bygger på mikroskopisk istillväxt. Denna teori kompletterades även av Powers (1975) genom beskrivningen av osmotiskt tryck som en skademekanism i fall då det inte är rent vatten i porerna, utan saltlake till exempel. Huruvida det är dessa mekanismer som också har avgörande inverkan för saltavskalningar råder det som sagt inte någon enighet kring. Somliga menar att mekanismerna är desamma som för inre frostsador, medan andra menar att det är två helt skilda fenomen där saltlösningen på ytan har en avgörande betydelse. Den senare förklaringsmodellen presenterades av Valenza and Scherer (2006), som bygger på en så kallad "glue spalling"-mekanism som endast verkar vid betongens yta.

## 2.8.1 Hydrauliskt tryck

När temperaturen blir tillräckligt låg bildas iskristaller i vattnet i betongen. Eftersom is har 9 % större volym än vatten trycks vatten från den vattenfyllda poren till den luftfyllda poren när det fryser. Denna övergång sker genom rörliknande porer vilka därmed utsätts för ett hydrauliskt tryck. Detta tryck kan vara högre än vad betongen klarar av och det uppstår en skada. Hur stort det hydrauliska trycket blir beror på den rörliknande porens längd och storlek. Se Figur 4 nedan för illustration.



Figur 4-Illustration av hydrauliskt tryck. En mindre kapillärpor sammankopplas med en större luftpor med en rörliknande por. Bilden är schematisk, i verkligheten är luftporen väldigt mycket större. Avritad från Utgenannt (2004).

Genom ett effektivt luftporsystem med många jämnt fördelade luftporer i cementpastan förkortas vägen vattnet måste tryckas igenom från den vattenfyllda kapillärporen till luftporen, och därmed minskar risken för skada. Enligt Powers (1949) finns en så kallad kritisk avståndsfaktor, vilken är det största avståndet mellan varje luftpor, som måste uppfyllas för att betongen ska vara frostbeständig. Denna mäts och används fortfarande för att ge en uppfattning om frost- och saltfrostbeständigheten i betong.

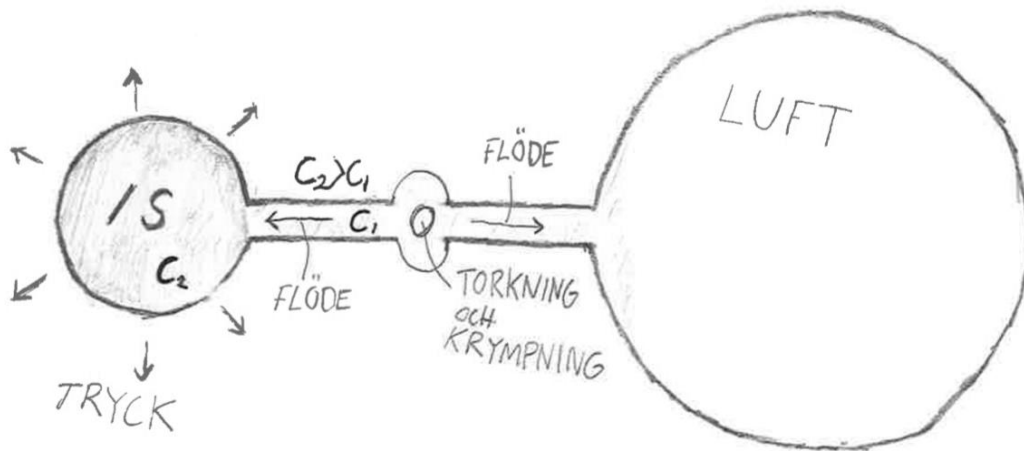
## 2.8.2 Mikroskopiskt istillväxt och osmotiskt tryck

När systemet befinner sig i plusgrader är det i termodynamisk jämvikt (Powers and Helmuth, 1953). Men när temperaturen sjunker under fryspunkten bildas iskristaller och jämvikten har brutits. Is har lägre energinivå än vatten vilket gör att vatten leds mot iskristallerna. Iskristallerna växer därför ännu mer och kan, om trycket mot porväggarna överstiger dess hållfasthet, orsaka skada. Skada kan också uppkomma genom att vattentransport från de mindre porerna leder till uttorkning och krympning i vissa delar av cementpastan.

Det är skillnad i energinivå mellan isen som bildas i kapillärporerna jämfört med den som bildas i luftporerna. Isen i kapillärporerna trycker mot porväggarna vilket leder till en högre energinivå än den is som växer i luftporerna, där den kan växa friare. Denna energiskillnad gör att vattnet i större utsträckning leds mot luftporerna vilket gör att istillväxten ökar i dessa istället för i kapillärporerna. Därmed minskar trycket mot kapillärporerna och betongen undviker skada.

Powers (1965) kompletterar dessa idéer om islinnsbildning med en förklaring till varför salt tillsammans med frysning orsakar extra mycket skada, och speciellt skador i form av

avskalningar på betongens yta. När vattnet innehåller t.ex. koksalt sänks frystemperaturen. Då fryspunkten nås bildar vattnet iskristaller, men det lösta saltet kommer fortfarande finnas kvar i vätskeform. Den vätska som inte frusit får då en högre saltkoncentration eftersom det endast är vattnet som fryser. Denna högre saltkoncentration leder till en ännu lägre frystemperatur och gör att jämvikt infinner sig med en bestämd andel iskristaller och resterande andel vätska vid en given temperatur. Det uppstår samtidigt en skillnad i saltkoncentration mellan vätskan i kapillärporerna och i de mindre gelporerna vilket leder till osmotisk vattentransport till kapillärporerna, eftersom saltkoncentrationen är högre där. Därmed sänks åter saltkoncentrationen vilken möjliggör mer isbildning och ökat tryck mot porväggarna. Tösalter såsom koksalt har två i princip motsatta effekter. Å ena sidan minskar den mängden is som kan bildas vid en given temperatur vilket leder till minskat tryck orsakat av frysning, å andra sidan höjs potentialen för osmotiskt tryck givet en specifik mängd is.



Figur 5-Illustration av mikroskopisk istillväxt i kapillärporerna. Vattenflödet drivs av både det osmotiska trycket och skillnaden i energipotential.  $C_2$  är saltkoncentrationen i lösningen i kapillärporerna, medan  $C_1$  är saltkoncentrationen i saltlösningen i övriga pastan. Avritad från Utgenannt (2004).

Lindmark (1998) presenterade en hypotes som till stora delar bygger på modellen om islinnsbildning i Portlandcement som tidigare beskrivits, men som ytterligare förklarar varför saltvatten på ytan orsakar skador i form av avskalningar. Hypotesen bygger på att den osmotiska islinnsbildningen underlättas väldigt mycket om porlösningen i betongprovet är sammankopplad med en reservoar av lösning som befinner sig under atmosfärstryck över tid. Genom att salt sänker frystemperaturen i denna reservoar av lösning förses porerna i provet ständigt av vatten som, genom skillnaden i fri energi mellan is och lösning, dras till isen i porerna och bygger på dessa.

#### 2.8.4 Kritisk vattenmättnadsgrad

Risken för skador i samband med frost och saltfrost hänger till stor del ihop med hur stor andel av porerna i betongen som är vattenfyllda (Utgenannt, 2004). Om det antas att hydrauliskt tryck och/eller mikroskopisk istillväxt är skademekanismer måste det även finnas en kritisk vattenmättnadsgrad. Vattenmättnadsgraden räknas ut genom ekv 1.

$$S = \frac{W_e}{P_{tot}} \quad \text{ekv 1}$$

där

$W_e$  är totalt frysbar vattenmängd [ $m^3/m^3$ ]

$P_{tot}$  är de tomma porerna [ $m^3/m^3$ ]

Om det finns tillräckligt många luftporer som samtidigt ligger utspritt på ett bra sätt i betongen, så att den kritiska avståndsfaktorn inte överskrids, har betongen en god beständighet mot frost- och saltfrostskador. Men ju mer vattenmättnadsgraden höjs, desto mer fylls porerna med vatten och avståndet mellan kvarvarande luftporer ökar vilket ökar risken för att betongen skadas vid frysning.

## 2.8.5 Glue spalling

Enligt Valenza and Scherer (2006) förklaras saltavskalning helt genom den så kallade "glue spalling"-mekanismen. Glue spalling är en teknik som används inom glasindustrin för att dekorera glasytor till olika mönster.

Tekniken bygger på skillnad i längdutvidgningskoefficient mellan glas och ett material som appliceras på ytan. Det går till så att glasytan sandblästras, vilken skapar många väldigt små mikrosprickor i ytan. Därefter appliceras ett lager epoxylim på ytan under hög temperatur varefter temperaturen sänks. Då epoxylimmet krymper mer än glaset det ligger på, skapas spänningar i limmet som gör att det tillslut spricker upp i små öar. Runtom dessa öar skapas dragspänningar i glaset som leder till att mikrosprickorna i glasytan, det vill säga vid ytans svagheter, sprider sig vidare ner i glaset. Detta leder till att små flarn av glaset lossnar, och bildar mönster.

När en saltlösning fryser ingår inget av saltet i isen, utan avgår i resterande lösning. All lösning över den eutektiska temperaturen, kommer innehålla flytande lösning. Denna lösning kommer finnas i fickor omslutna av is. Samma egenskap väntas för andra lösningar eftersom de har liknande fryspunkter. Dessa fickor av saltlösning påverkar isens mekaniska egenskaper och utgör svagheter som gör den benägen att spricka. Sprickorna fortplantar sig ner i betongen och orsakar därmed avskalning.

Det är troligt att betong i konstruktioner har småsprickor från trafik och slitage. Därför är det troligt att det är vid dessa småsprickor som, när spänningarna blir för stora, större sprickor bildas. Penetration av sprickan från isen rakt ner i betongen kan endast ske om vidhäftningen mellan isen och cementpastan är tillräckligt stark, vilket den enligt Valenza och Scherer (2006) är. Vid ett kritiskt djup förgrenar sig sprickan, parallellt med ytan, och leder till avskalning.

När islagret spricker kan alltså avskalningar uppkomma på två olika sätt:

- Fortplantning av tidigare ytsprickor/försvagningar i betongen
- Penetration av sprickor från islagret till betongytan

Pessimism vid ca 3 viktsprocent salt förklaras genom att lösningar med höga koncentrationer av salt producerar mindre is och stora volymer lösningsfickor. Detta innebär att isen kommer ha mindre vidhäftning mot betongytan och en lägre hållfasthet, vilket gör att den inte kan generera tillräckligt höga spänningar för att skada cementpastan. Vid lägre koncentrationer är lösningsfickorna färre så att isen kan er hålla tillräcklig vidhäftning mot betongen, men fickorna utgör inte tillräckligt stora defekter för att bidra till att isen spricker.

## 2.9 Olika fryscyklers inverkan

Det finns flera sätt på vilka fryscyklerna kan varieras. Fryshastigheten, det vill säga hur snabbt temperaturen sjunker/stiger kan varieras. Temperaturerna i fryscykeln kan varieras i princip hur mycket som helst, såsom hur låg den lägsta temperaturen är. Det kan vara stor skillnad på mängden avskalningar mellan prov som utsatts för en fryscykel där lägsta temperatur är  $-10^{\circ}\text{C}$ , jämfört med en fryscykel där lägsta temperatur är  $-20^{\circ}\text{C}$  till exempel. Sellevold and Farstad (1991) visade att minimumtemperaturen hade en stor påverkan på mängden avskalningar. I en jämförelse mellan en cykel där lägsta temperaturen var  $-10^{\circ}\text{C}$  och en annan cykel där lägsta temperaturen var  $-20^{\circ}\text{C}$  visade det sig att i den senare producerades mer än dubbelt så mycket avskalningar.

Vad som också är intressant att studera, vilket denna rapport i huvudsak gör, är huruvida tiderna vid högsta respektive lägsta temperatur i en cykel påverkar betongens skador.

Enligt Sellevold and Farstad (1991), som undersökte ett flertal olika parametrar som påverkar saltavskalning, påverkar inte fryshastigheten mängden avskalningar nämnvärt. Powers and Helmuth (1953) visade i försök att det hydrauliska trycket ökar med ökad nedkylningshastighet, eftersom istillväxten ökar enligt dem. Annan forskning (Lindmark, 1998), tyder på att en snabbare kylhastighet leder till värre skador än en långsammare. Det är dock oklart om det är den snabbare kylningshastigheten som leder till värre skador i Lindmarks försök. Anledningen kan också vara att vid cykeln där frystemperaturen sjunker snabbt, nås även lägsta temperaturen snabbare än för jämförbara cykler, vilket leder till att proverna under en längre tid är utsatta för den lägsta temperaturen.

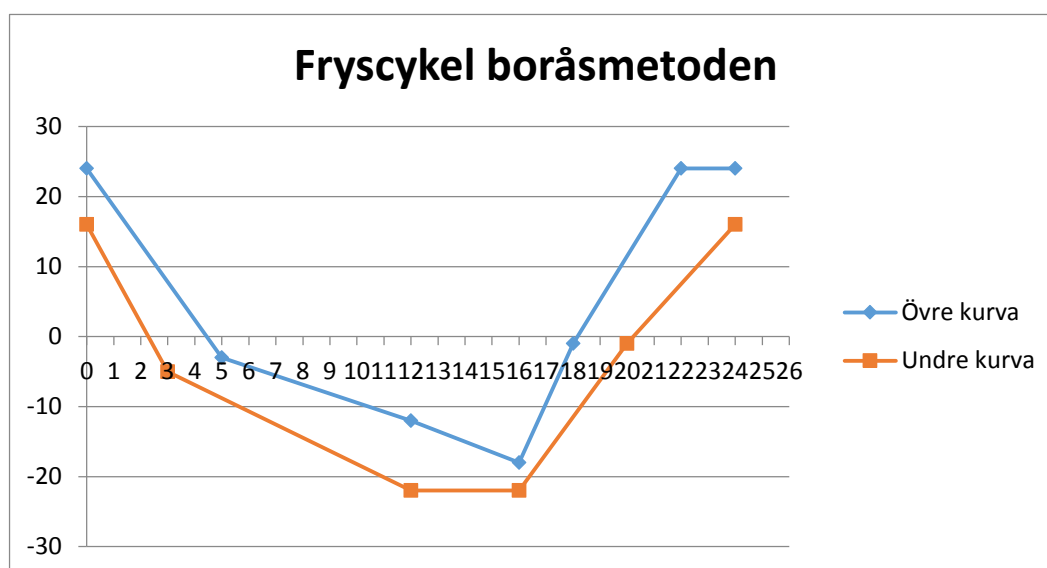
## 2.10 Boråsmetoden – SS 13 72 44

I Sverige används Boråsmetoden (SS 137244) för bestämning av betongs saltfrostbeständighet i kontakt med 3.0-procentig saltlösning.

Vid denna metod sågas ett prov ut, 50 mm tjockt  $\pm 2$  mm. Utseendet kan variera beroende på vilken yta som är mest intressant för det aktuella försöket. Det kan både vara kuber och cylindrar. Detta prov förvaras sedan i klimatrums i 7 dygn vid  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Under denna period ska en gummiduk limmas på alla provets ytor förutom frysytan. En limsträng ska även appliceras runt frysytan mellan betongen och gummiduken. Gummidukens kant ska sticka upp  $20 \pm 1$  mm över frysytans kant.

Efter 7 dygn i klimatrums ska avjoniserat vatten hällas på frysytan för infuktning i två dygn. Innan frysprovningen startar ska samtliga ytor utom frysytan värmeisolerats. Därefter byts det avjoniserade vattnet ut mot 3-procentig saltlösning och en plastfolie placeras ovanpå provet för att förhindra avdunstning.

Provet ska utsättas för en 24-timmars fryscykel enligt Figur 6 och avskrapning ska ske på provets yta efter 7, 14, 28, 42 och 56 cykler. Detta material vägs sedan efter torkning i  $110 \pm 10^\circ\text{C}$ . Frostbeständigheten enligt detta test bedöms efter mängd avskalat material efter 56 cykler, där  $<1.0 \text{ kg/m}^2$  anses acceptabel,  $<0.5 \text{ kg/m}^2$  anses god och  $<0.1 \text{ kg/m}^2$  anses mycket god.



Figur 6- Fryscykeln i Boråsmetoden.





# 3 Försök

## 3.1 Hypotes

Hypotesen är att en längre tötid kommer innebära att mer vatten kan sugas in i betongen och därmed höja vattenmättnadsgraden vilket leder till högre tryck i cementpastan vid frysning, och därmed mer avskalningar.

## 3.2 Material

Tre typer av betongprover med olika bindemedelssammansättningar gjöts i detta försök, se Tabell 1.

Bindemedlet är:

- Anläggningscement CEM 1 42,5 N – SR 3 MH/LA från Degerhamn

Tillsatsmaterialen är:

- Flygaska från Eminent a/s
- Masugnsslagg Merit 5000 från Merox.

I anläggnings- och slaggbetongen används flyttillsatsmedlet Sika ViscoCrete RMC-520. I betongen med flygaska används Pozzolith. Som luftporbildare används Sika AirPRO (SE) conc för samtliga blandningar. För anläggnings- och slaggbetongen späds den koncentrerade luftporbildaren ut med vatten, 1:9. Cirka 24 dm<sup>3</sup> gjuts för varje betongblandning.

### 3.2.1 Betongrecept

Tabell 1: Betongblandningarna

		<b>100 % anläggningscement</b>	<b>65 % anläggningscement + 35 % slagg</b>	<b>65 % anläggningscement + 35 % FA</b>	
Bindemedel					
vct		0,4	0,62	0,62	
vbt		0,4	0,4	0,4	
Ballast 0-8	kg	21,163	21,361	21,277	
Fuktkvot	%	3,5	4,5	4,1	
Ballast 8-12	kg	6,041	6,041	6,041	
Fuktkvot	%	0,2	0,2	0,2	
Ballast 12-16	kg	11,366	11,366	11,366	
Fuktkvot	%	0,2	0,2	0,2	
Cement	kg	9,5	6,175	6,175	
Flygaska	kg			3,325	
Masugnsslagg	kg		3,325		
Vatten	kg	2,929	2,731	2,782	
Flyttillsatsmedel	g	24	24	63	
Luftporbildare, utspädd 1:9	g	15 (utspädd 1:9)	15 (utspädd 1:9)	27	
Lufthalt färsk betong	%	5	4,1	3,8	
Sättningsmått	mm	100	200	190	
Densitet	kg/m <sup>3</sup>	2364	2385	2369	

## 3.3 Metod

### 3.3.1 Gjutning och härdning

Gjutningen inleddes med att bestämma fuktkvoten i sanden (0-8 mm). Ca 25 kg sand i förvaringslådan ”homogeniserades” för hand med en spade. Därefter togs ett representativt prov på cirka 1 kg, vikten noterades, sedan torkades det fria vattnet från sanden genom eldning med hjälp av t-röd enligt Figur 7 för att kunna bestämma fuktkvoten.



Figur 7- Eldning av ett representativt sandprov för att bestämma fuktkvoten i sanden.

När det brunnit klart vägdes provet igen. Fuktkvoten beräknades enligt ekv 2.

$$u = \frac{m_{fuktig} - m_{torr}}{m_{torr}} \quad \text{ekv. 2}$$

där

$m_{fuktig}$  är den fuktiga sandens massa.

$m_{torr}$  är den torra sandens massa.

Fuktkvoten användes för att bestämma den totala mängden fuktig sand som skulle användas i betongblandningen. Den torra mängden är förutbestämd enligt recept.

Fuktkvot för fraktionerna 8 till 12 mm och 12 till 16 mm antogs till 0,2 %. Därför kunde massan och dess vatteninnehåll räknas ut i förväg.

Samtlig torrbalast och cement vägdes upp och hälldes i frifallsblandaren, se Figur 8, från störst fraktion till minst. Detta innebar först 12-16 ballast, sedan 8-12 ballast, sedan 0-8 ballast, sedan cement, och sist eventuellt tillsatsmaterial. Först blandades ballast, cement och tillsatsmaterial i torrt tillstånd i drygt 2 minuter. Vatten och luftporbildare tillsattes därefter och blandades under 2,5 minuter. Därefter, utan att stänga av blandaren hälldes den bestämda mängden flyttillsatsmedel i och blandades i 2,5 minuter, sedan stängdes blandaren av. Nedan visas en bild på frifallsblandaren som användes, se Figur 8.



Figur 8- Frifallsblandaren som användes vid försöket.

När betongblandningen var klar togs sättmått med hjälp av en sättkon, metallstång och en metallplatta. En tredjedel av sättkonen fylldes på i taget och packades med en metallsticka som slogs 25 gånger mellan varje gång som konen fylldes på i tre omgångar. När formen var full jämnades toppen och därefter lyftes konen bort och betongen sjönk ihop något. Skillnaden mellan sättkonens höjd och betongens höjd mättes och noterades.

Betongens lufthalt bestämdes med hjälp av en lufthaltsmätare. Lufthaltsmätaren består av en cirkulär form som fylls med betong varefter ett lock skruvas på. På locket finns två hål på diameteravstånd från varandra. Vatten sprutades in genom det ena hålet tills det kom ut genom det andra med ett laminärt flöde. En pump används sedan för att öka trycket i behållaren till ett referenstryck. Därefter görs en tryckutjämning och en lufthalt kan då avläsas på en mätare som finns på locket. Betongen i denna form vägdes också för att kunna beräkna dess densitet, då volymen av formen är  $8 \text{ dm}^3$ .

Betongen hälldes därefter ner i cylindrar,  $200 \times \Phi 100 \text{ mm}$ , för härdning, se Figur 9. De fylldes en tredjedel åt gången emellan de vibrerades i vertikalt läge mot en vibratorplatta efter varje tredjedel. Formarna slöts sedan med ett metallock och skruvades åt. Varje form vibrerades slutligen några få sekunder i horisontellt läge och lades därefter ner, i horisontellt läge, för att härda i formen i ett dygn.



Figur 9- Cylinderformarna där den fräska betongen hälldes i och härdade i ett dygn.

Efter ett dygns härdning avformades proverna och lades i vatten för härdning i sju dagar. Efter dessa sju dagar placerades de i plastpåsar, två prover i varje påse, se Figur 10. Påsarna förseglades mycket noggrant så proverna kunde membranhärdas. Proverna placerades därefter i ett klimatrums vid 20°C i ytterligare nästan tre veckor. Om det trots den noggranna förslutningen skulle vara något luftläckage låg samtliga prover i en låda med vatten på botten, för att åstadkomma 100 % relativ fuktighet runt plastpåsar.

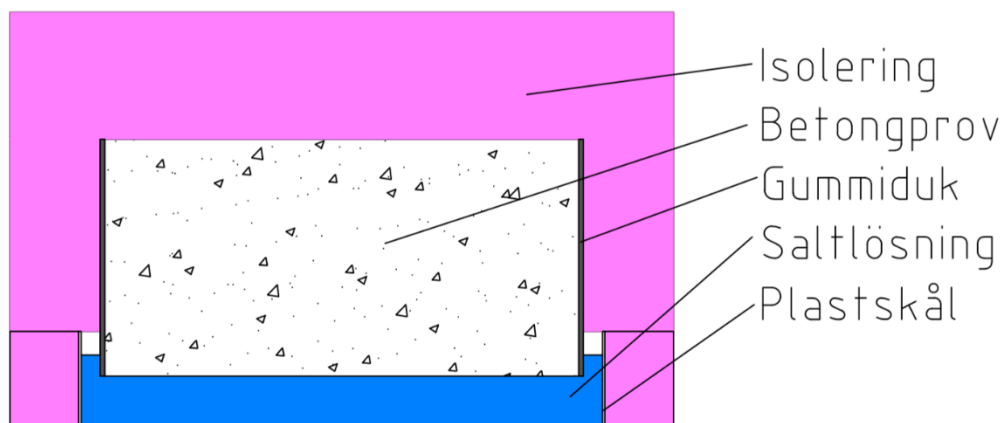


Figur 10- Efter ett dygn i cylinderformarna lades proven i plastpåsar och förslöts mycket tätt. Detta för att förhindra uttorkning.

När proverna härdat i totalt 35 dygn sågades varje prov mitt itu, det vill säga till två 100x  $\Phi$ 100 mm prover. Runtom nio av dessa prover limmades det gummiduk till den första omgången av frysförsök. Dessa nio sågades i sin tur itu, så det blev totalt 18 provkroppar för varje betongblandning vilka skulle användas till det första frysförsöket. Efter proverna sågats lades de i vatten ca 24 h innan frystesternas start. Resterande 9 st 100x  $\Phi$ 100 mm cylindrar sparades till tryckprovning samt frysförsök ett eventuellt andra frysförsök.

### 3.3.2 Provanordningen

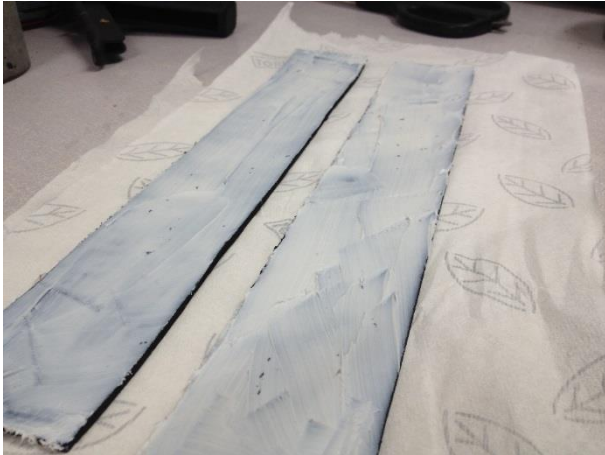
Testet arrangerades enligt Figur 11 nedan.



Figur 11- Illustration av provanordningen.

Testet liknar den standardiserade boråsmetoden, som beskrevs i avsnitt 2.10 men i detta försök är anordningen upp- och ner vänd. Varje provs tjocklek var cirka 50 mm. Sidorna av

varje prov var täckta av en pålimmad gummiduk. Detta gjordes för att minimera avskalningar från sidorna, det vill säga avskalningar utöver provets sågade plana yta.



*Figur 12- Gummiduksremorna som limmades runt om varje provkropp.*

Hela provet isolerades med cellplast för att undvika för kraftiga temperaturgradienter i betongen och för att saltlösningen inte skulle avdunsta. I cellplasten borrades ett cirkulärt hål så att provkroppen med den pålimmade gummiduken kunde tryckas in enligt Figur 13.



*Figur 13- Ett prov i som tryckts ner i cellplasten.*

Avjoniserat vatten med 3-viktprocent salt, fylldes på i en cirkulär plastskål med cellplast runt om sig, volymen av saltlösningen var 95 ml. Provanordningen som visas i Figur 13 kunde därefter doppas ner cirka 3 mm i saltlösningen samtidigt som cellplasten runt provkroppen och cellplasten runt plastskålen möttes. På detta sätt blev det tätt kring provet och saltlösningen kunde inte avdunsta, enligt Figur 11.

Under testets första vecka användes plastavstånd mellan betongytan och botten på plastskålen som en säkerhetsåtgärd för att inte provet skulle glida ur cellplastformen. Dessa togs dock bort efter en vecka eftersom de inte behövdes.

Av de fyra frysarna som användes hade tre av dem gallerhyllor där proverna kunde ställas. Men i en frys fanns det bara ett galler varför en anordning av trä byggdes där ett galler kunde läggas ovanpå, se Figur 14.





*Figur 14- Anordning att ställa proverna på. För att säkerställa god luftcirkulation i frysen höjs gallernivån med 10 cm ovan kylens botten.*

Det var viktigt att luft kunde cirkulera runt varje prov för att få jämn temperatur i hela frysen. Därför byggdes träanordningen på så vis att gallret kom upp 10 cm ifrån kylskåpets botten. På varje galler placerades nio prov. då fanns det utrymme mellan varje prov för luft att flöda, se Figur 15.



*Figur 15- En av de fyra olika frysarna, med totalt 18 prover i frysen, 9 prover på varje hylla.*

För att kontrollera temperaturen i de olika frysarna placerades ett termoelement i saltlösningen för ett prov per hylla. På så sätt kunde temperaturcyklerna ständigt övervakas.

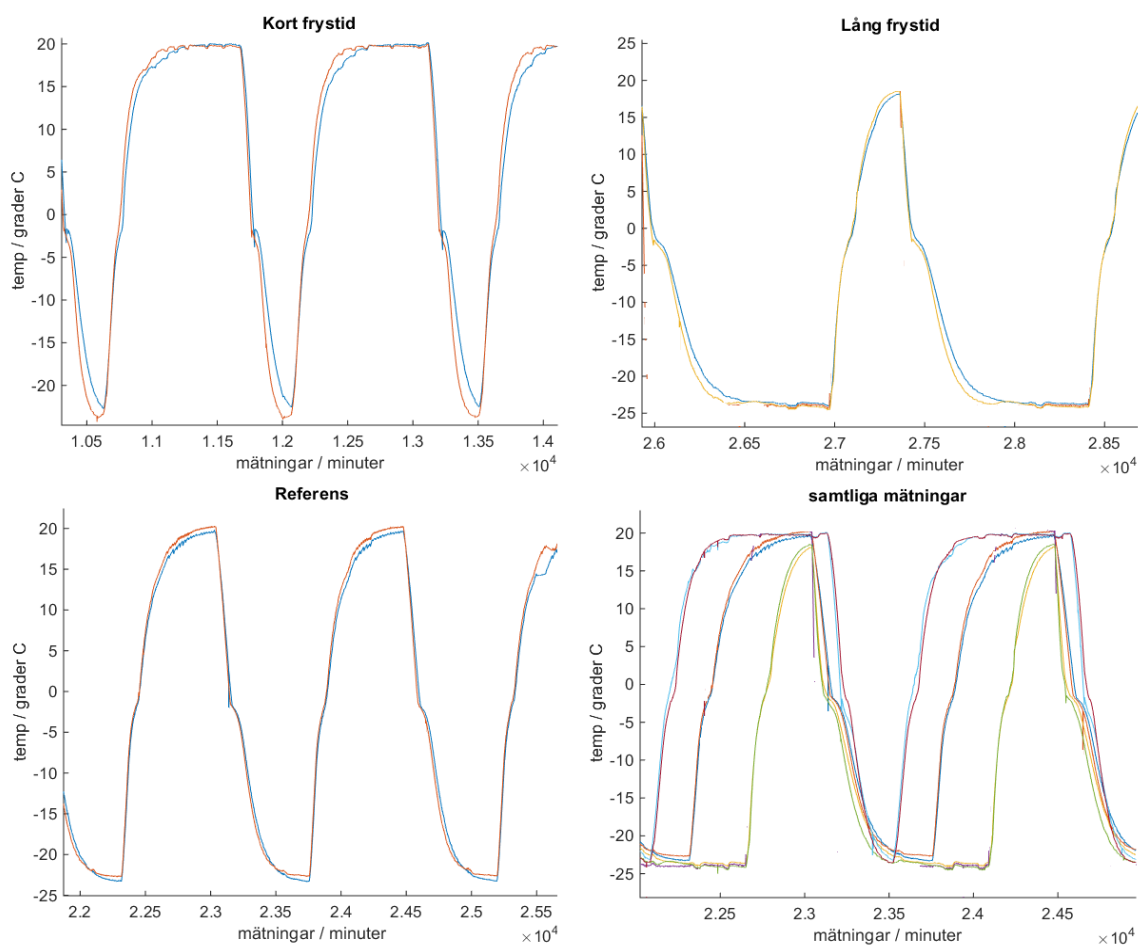
### 3.3.3 Försökets fryscyklar

För att undersöka hur längden på frystid respektive tötid påverkar saltavskalning för olika typer av bindemedel programmerades fyra kylskåp enligt tre olika schema, se Tabell 2 och Figur 16 nedan. Två frysar programmerades enligt referensfryscykeln, det vill säga lika lång frystid som tötid. De andra två frysarna programmerades med antingen längre frystid och kortare tötid, eller längre tötid och kortare frystid. Totaltiden var alltid 24 h.

Temperaturgradienten för nedkylning och uppvärmning har varit samma för samtliga cykler, ca 5°C/h. Detta gör att den viktigaste skillnaden mellan cyklerna är tiden vid lägsta temperaturen, definierad som tiden under den eutektiska punkten som är -21°C för en saltlösning.

Tabell 2- Tider vid minusgrader, dvs. frystid, tid vid lägsta temperatur, samt tid vid plusgrader, dvs. tötid, för de olika fryscyklerna.

	Frystid [h]	Tid under -21°C [h]	Tid över 0°C [h]
Kort frystid	ca 6	ca 2 ± 0,5	ca 18
Lång frystid	ca 18	ca 12 ± 0,5	ca 6
Referens 1	ca 12	ca 4,5 ± 0,5	ca 12
Referens 2	ca 12	ca 4,5 ± 0,5	ca 12



Figur 16- Samtliga fryscyklar som används i försöken. I figuren nere till höger kan man se att frys- och töningshastigheterna är ungefär samma för samtliga cykler.

Frysen som programmerades med lång frystid gick sönder efter tre cykler, därför försköts försöket i denna frys tills frysen lagats och nya prover förberetts. Därmed delades försöket upp i två omgångar. Omgång 2 sattes istället igång då betongproverna härdat 58 dygn, istället för 36 dygn som i omgång 1. För att den blå frysens prover fortfarande skulle vara jämförbara med andra fryscykler sattes det även in sex nya prover i referensfrysarna.

### 3.3.4 Avskalningar

Efter 7, 14, 21 och 28 fryscyklar borstades material av varje provs yta samt uppsamling av avskalningarna som fanns i plastburken. Ytorna borstades med en pensel där stråna på penseln klipptes så att de strån som satt kvar på penseln fick en lämplig styvhet. Provytan borstades med raka drag från olika vinklar tills inget mer löst material lossnade från provkroppen. En större skål användes för att samla upp det avborstade materialet. Både avskalningarna som fallit ned i plastburken och det avskrapade materialet sköljdes sedan med vatten ner i ett kaffefilter, se Figur 17.



Figur 17- Avskalningarna i plastburken sköljs ner för silning genom ett kaffefilter.

Kaffefiltret låg i en kaffefilterhållare med hål i där vattnet rann igenom ner i en liten hink. Då respektive provkropp hade en egen hink kunde även en enkel kontroll genomföras om det gått hål i filtret. När saltvattnet runnit genom kaffefiltret och det endast var avskalningar kvar spolades det ytterligare en gång med kranvatten för att skölja ur eventuellt salt ur materialet och filtret. När vattnet runnit ur veks kaffefiltren ihop och lades i en ugn där det torkades i 105°C. Detta för att få allt fritt vatten att avdunsta och göra det möjligt att väga torrvikten av avskalningarna. Efter minst ett dygn i ugnen vägdes proverna, inklusive kaffefiltret. Detta kunde göras eftersom kaffefiltrens variation i massa var mycket lägre än avskalningarnas spridning. Proven togs ut en åt gången och vägdes med en våg som hade noggrannheten  $\pm 0,0005$  g. Proven lades sedan i små märkta plastpåsar för förvaring.



Efter varje avskrapning vägdes betongprovet tillsammans med lim, gummiduk och isolering för att få en uppfattning om respektive provkropps absorption. Därefter fylldes en ny saltlösning på i plastburken och sedan sattes provkroppen tillbaka.

### 3.3.5 Trycktester

Tre 100 mm långa cylindrar med diametern 100 mm provtrycktes med en tryckpress. För att försöka kompensera att ena ytan var sågad, och därmed inte jämn, lades en träfiberskiva emellan provet och tryckplattorna. Tryckpressen som användes ställdes in på en viss deformationshastighet. För att kunna jämföra spänningsökningen med den som ska användas enligt gällande standard mättes tiden för lastökningen. Spänningsökningen per tidsenhet i tryckpressen ställdes in genom att räkna om vilken tid det skulle ta för spänningen att öka 100 kN med den tvärsnittsarea som var aktuell för dessa provningar. Det innebär att det skulle ta 15-25 sekunder mellan varje 100 kN-intervall. Brottslasten noterades för varje prov och räknades om till en spänning.

## 3.4 Resultat

### 3.4.1 Trycktester

Resultaten från trycktesterna är redovisade i Tabell 3 nedan. Resultaten har stor spridning, vilket sannolikt beror på att cylinderproven som trycktestades hade en yta som var ojämn. Den sågade ytan blev inte helt parallell med formytan, därför fördelades kraften från tryckpressen något ojämnt över provet och brottet blev oftast koncentrerat till provets ena sida istället för att få den önskade timglasformen. Trots spridningen finns en tendens mot att anläggnings- och slaggbetongen har uppnått en något högre hållfasthet än betongen med flygaska.

Tabell 3- Bärformåga för tre prover per betongblandning.

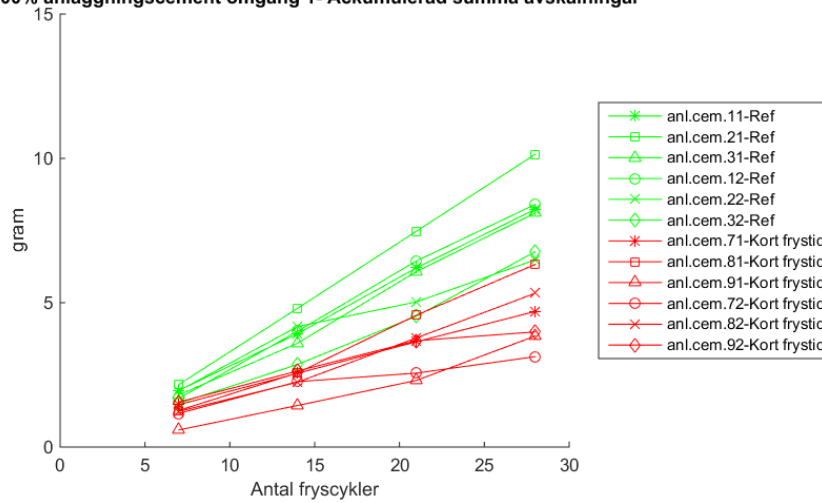
Hållfasthet [MPa]			
	Anläggningscement	Flygaska	Slagg
	59	52	59
	62	53	70
	53	48	48
<b>Medel:</b>	58	51	59

### 3.4.2 Resultat från omgång 1

De ackumulerade avskalningarna från omgång 1 visas i Figur 18-Figur 20 nedan. Y-axeln visar mängden avskrapat material i gram och x-axeln visar antalet fryscyklar. Generellt är mängden avskalningar hög men varierar mycket mellan de olika betongblandningarna. För samtliga blandningar är avskalningarna i referenscykeln värre jämfört med dem i utsatta för kort frystid. Detta samband är tydligt och det är endast enstaka prov som överlappar den andra cykeln. I Figur 19 kan ses att prov FA31 inte skalar av alls mellan dygn 7 till 14. Vid borstning efter 14 cykler noterades det att både betongytan och plastburken på detta prov var helt torrt vilket troligen berodde på läckage av något slag. Efter att plastburken fylldes på nytt fortsatte avskalningarna med ungefär samma hastighet som övriga prover, om än från en lägre

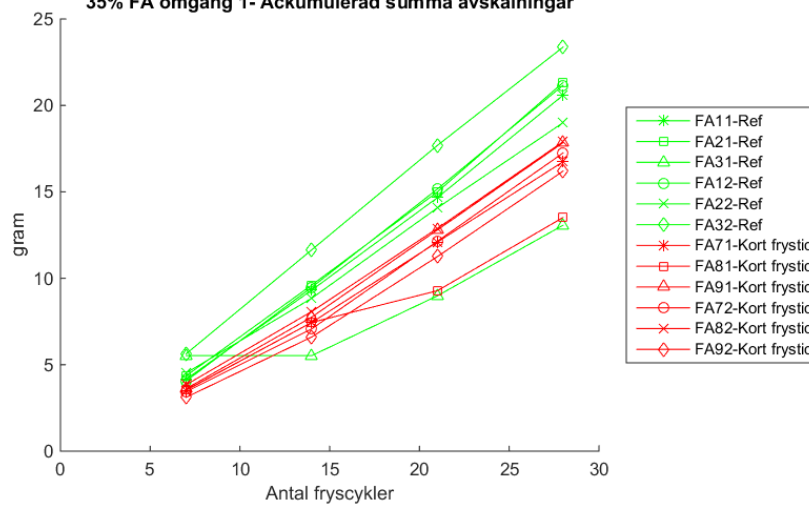
nivå. Samtliga resultat från frysförsök omgång 1, det vill säga där referenscykeln och den korta frystids- cykeln jämförs, presenteras i bilaga 1.

**100% anläggningscement omgång 1- Ackumulerad summa avskalningar**

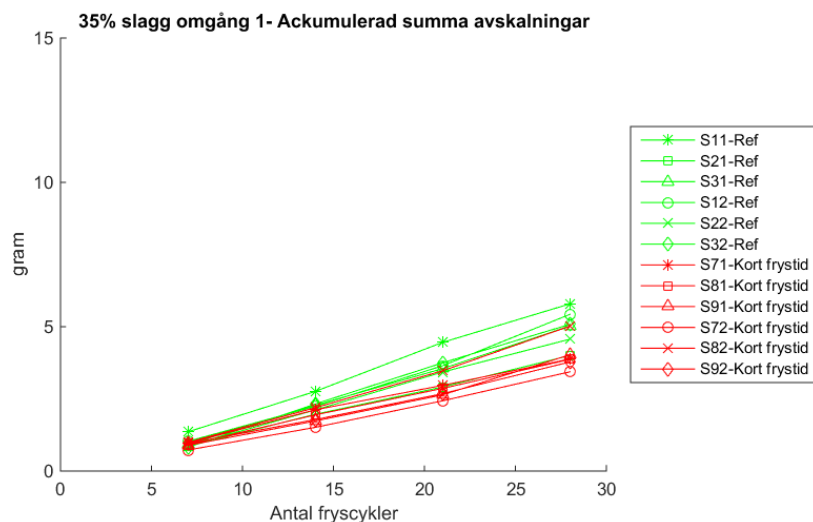


Figur 18- Ackumulerade avskalningar för betong med enbart anläggningscement omgång 1.

**35% FA omgång 1- Ackumulerad summa avskalningar**

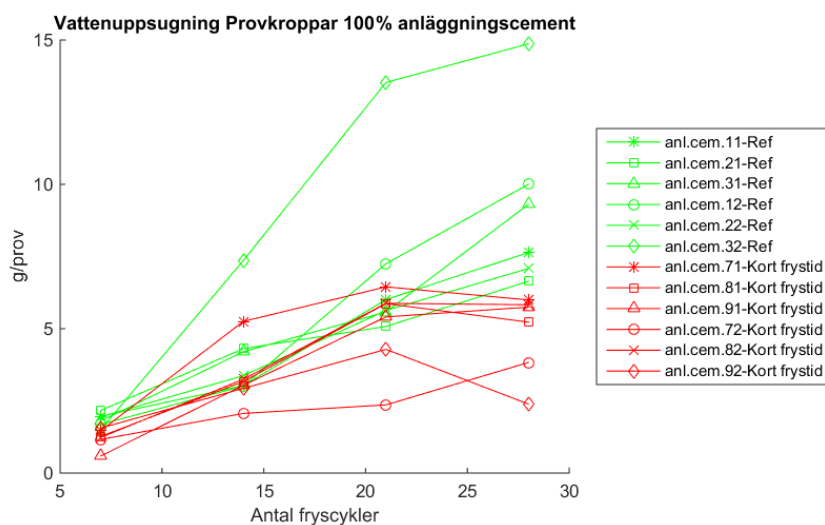


Figur 19- Ackumulerade avskalningar för betongproverna med 65 % anläggningscement, 35 % flygaska.

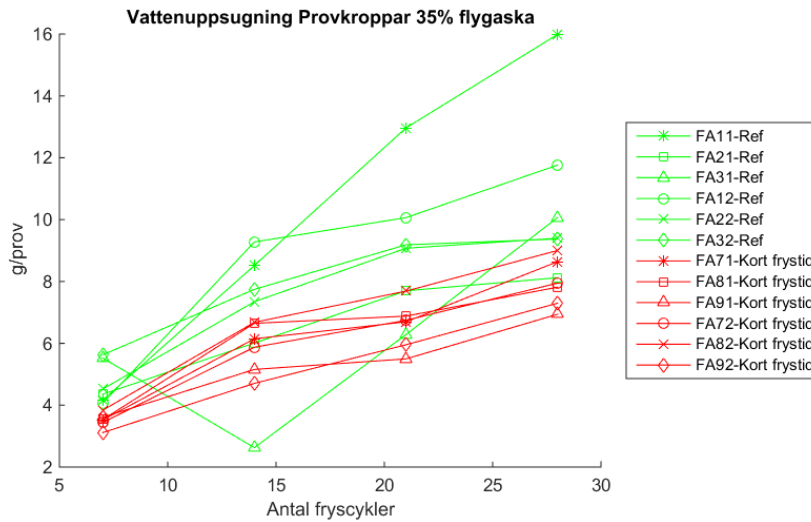


Figur 20- Ackumulerade avskalningar för betongproverna med 65 % anläggningscement, 35 % slagg.

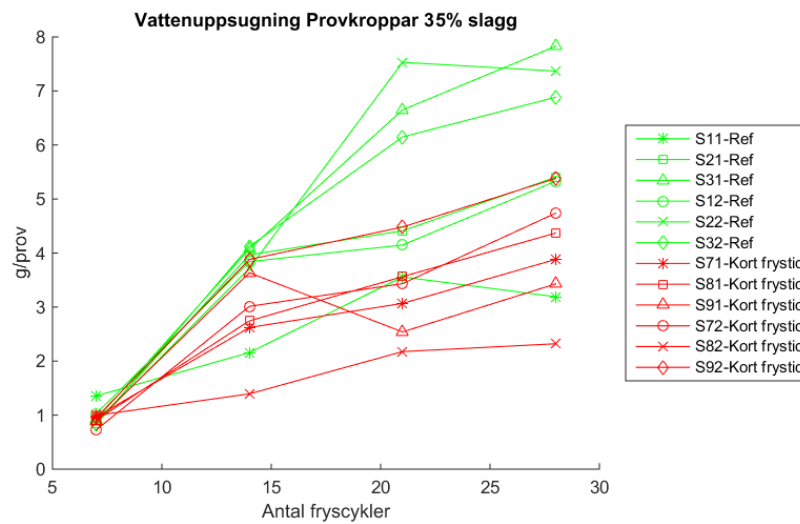
Vattenuppsugningen för samtliga prov i omgång 1 visas i Figur 21-Figur 23. Proven i referencykeln har generellt sugit upp mer vatten än de utsatta för den korta frystidscykeln. Detta samband gäller för samtliga bindemedelsblandningar även om spridningen är något större för slaggbetongen. Det syns även att prov FA31 som tidigare omnämndes torkat ut mellan cykel 7-14, därefter suger det upp vatten igen. Samtlig data presenteras i bilaga 2.



Figur 21- Den ackumulerade vattenuppsugningen för proverna med 100 % anläggningscement.

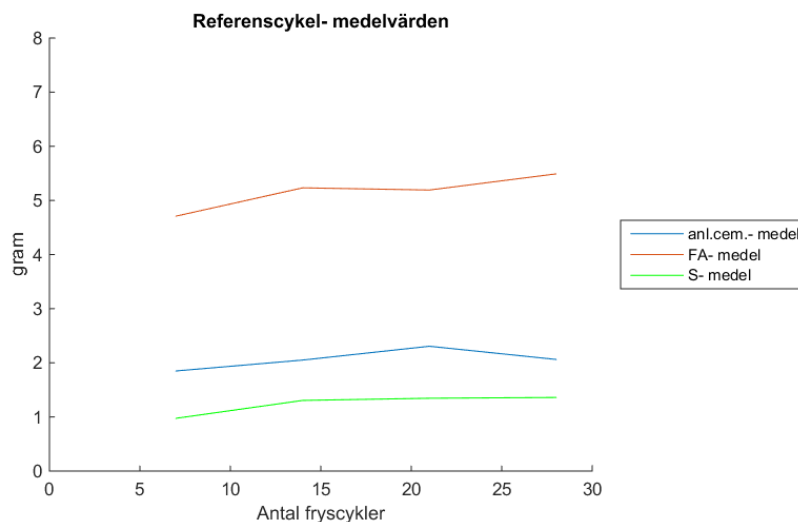


Figur 22- Den ackumulerade vattenuppsugningen för proverna med 65 % anläggningscement, 35 % flygaska.

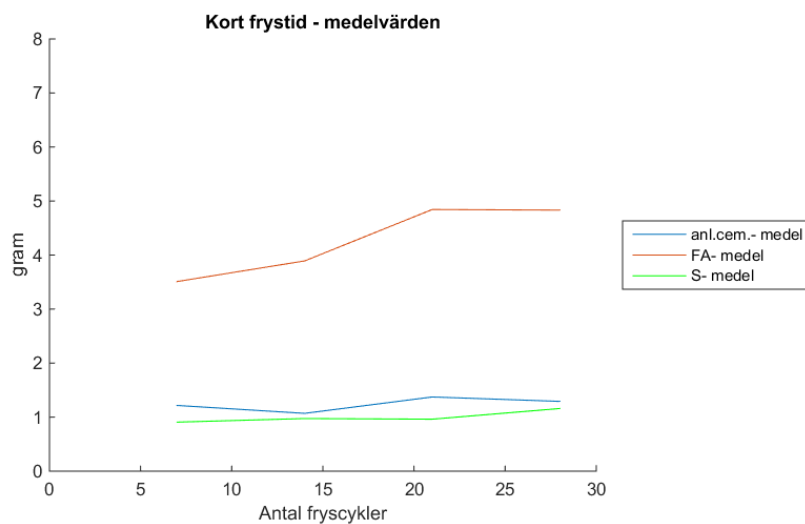


Figur 23- Den ackumulerade vattenuppsugningen för proverna med 65 % anläggningscement, 35 % slagg.

Figur 24 och Figur 25 visar medelvärdena av varje avskrapning för varje betong. Samma tendens uppträder för båda cyklerna, det vill säga slaggbetongen har minst avskalningar medan betongen med flygaska har mest. Denna jämförelse ska som tidigare sagts inte läggas stor vikt vid.



Figur 24- Medelvärden för avskalat material vid referenscykeln.

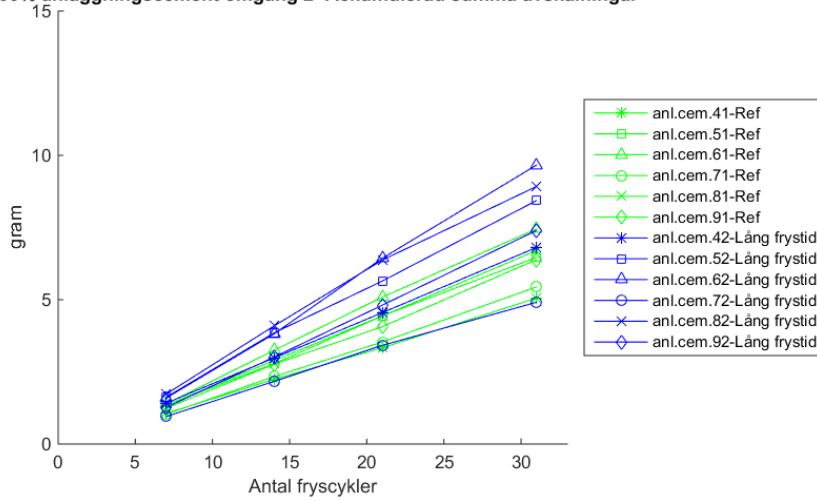


Figur 25- Medelvärden för avskalat material vid kort tid lägsta temperaturen.

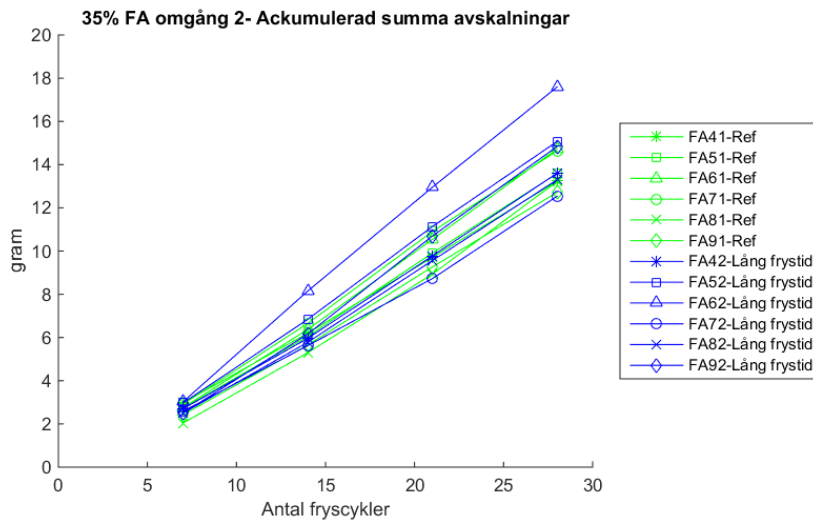
### 3.4.3 Resultat från omgång 2

Samtliga resultat från omgång 2, dvs. referenscykeln jämfört med den långa frystidscykeln, finns i bilaga 3. Den ackumulerade mängd avskalningar för varje betongblandning visas i Figur 26-Figur 28. Resultaten pekar inte i samma riktning som i omgång 1, utan enskilda prover från respektive cykel överlappar varandra i stor utsträckning.

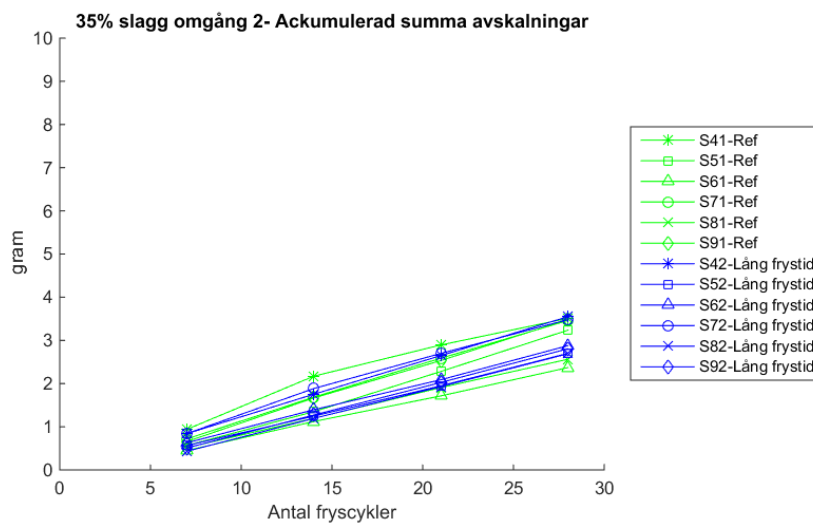
100% anläggningscement omgång 2- Ackumulerad summa avskalningar



Figur 26- Ackumulerade avskalningar för anläggningscement omgång 2.

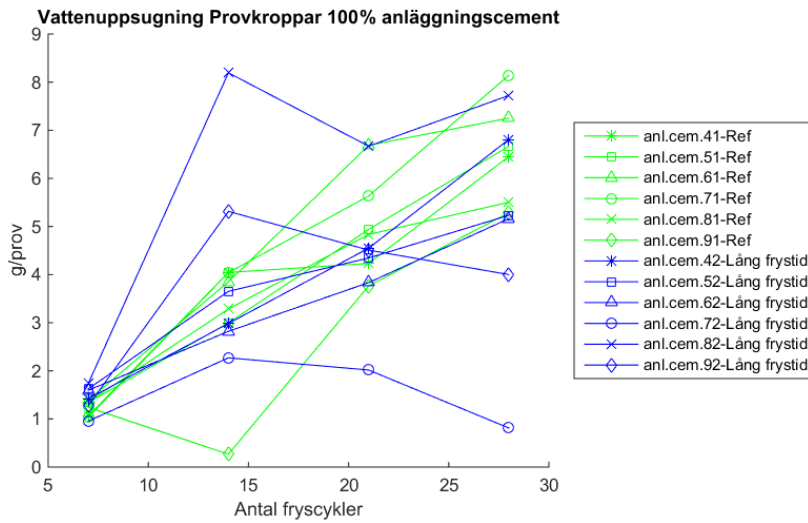


Figur 27- Ackumulerade avskalningar för betong med 65 % anläggningscement, 35 % flygaska, omgång 2.

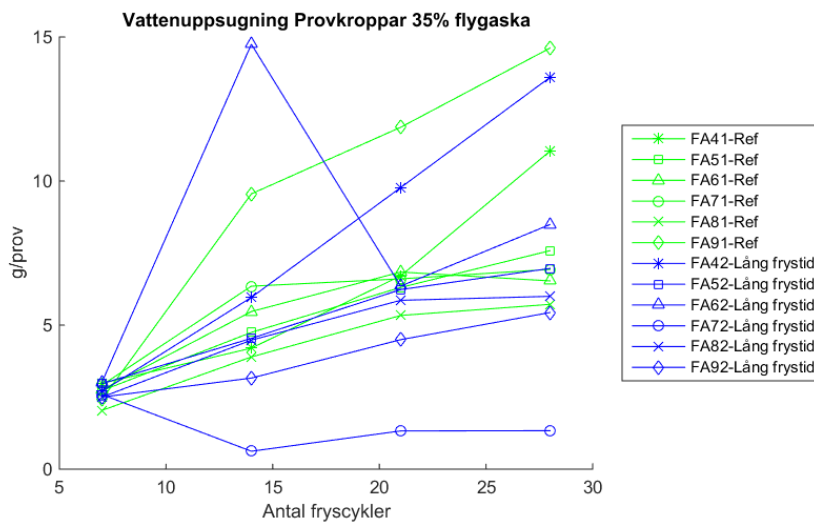


Figur 28- Ackumulerade avskalningar för betong med 65 % anläggningscement, 35 % slagg, omgång 2.

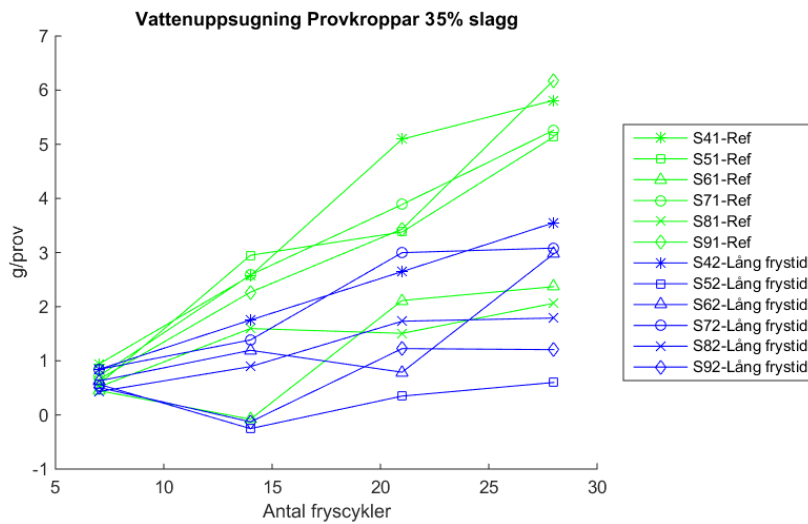
Vattenuppsugningen för omgång 2 visas i Figur 29-Figur 31. Samtlig data visas i bilaga 4. Också i dessa diagram överlappar provkroppar från vardera fryscykel varandra.



Figur 29- Den ackumulerade vattenuppsugningen per prov för betong med 100 % anläggningscement. Omgång 2.

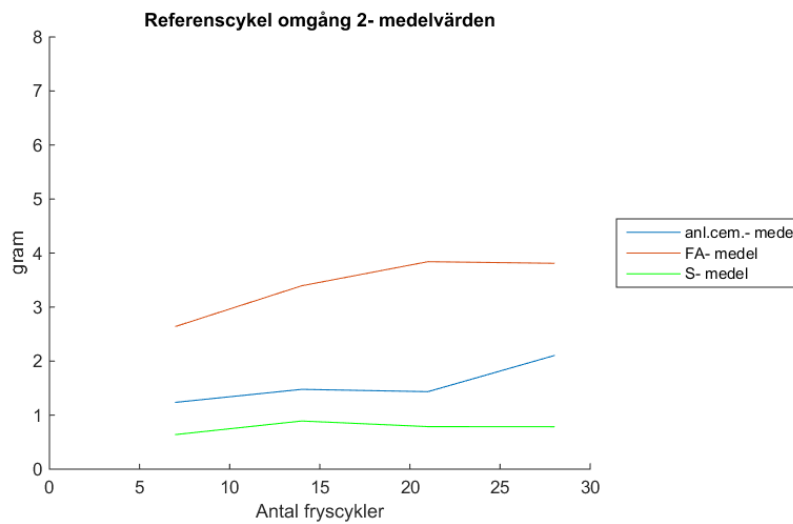


Figur 30- Den ackumulerade vattenuppsugningen för betongen med 65 % anläggningscement, 35 % flygaska. Omgång 2.



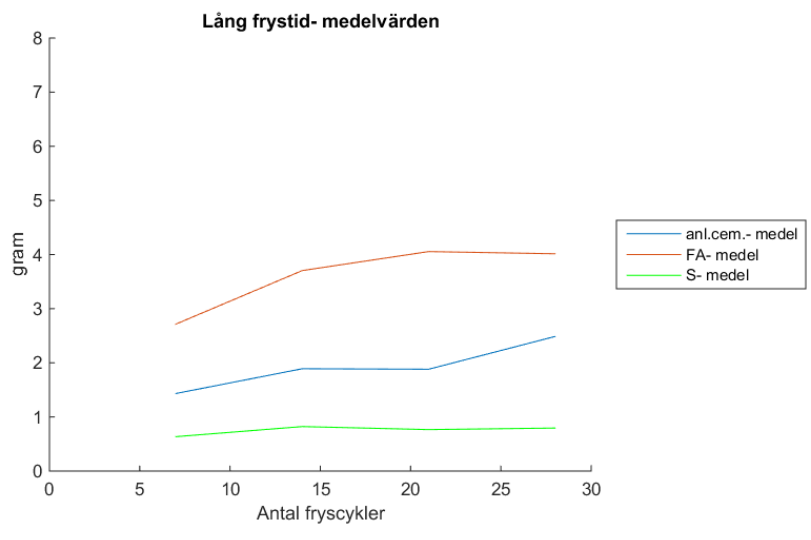
Figur 31- Den ackumulerade vattenuppsugningen för betongen med 65 % anläggningscement, 35 % slagg. Omgång 2.

Figur 32 och Figur 33 visar medelvärdena för samtliga prover vid respektive avskalning. Det är samma inbördes ordning som i omgång 1, men generellt ligger avskalningarna på en lägre nivå.



Figur 32- Medelvärden för avskalningarna i referenscykeln, omgång 2.





Figur 33- Medelvärden för avskalningarna i frysen med lång frystid. Omgång 2.



# 4 Diskussion

## 4.1 Analys av resultaten

Resultaten från omgång 1 pekar i en riktning mot att den kortare frystiden varken bidrar till att betongen suger upp mer vatten eller skadas mest, vilket tyder på att hypotesen i denna rapport inte stämmer. Tvärtom har proverna i referenscykeln sugit upp mer vatten än proverna utsatta för den korta frystiden och mängden avskalningar i referenscykeln är större för samtliga betongblandningar. Denna tendens är tydlig om man jämför cyklerna i omgång 1 mot varandra. Däremot kan inget samband mellan vattenuppsugning och mängd avskalningar ses om man studerar en enskild provkropp. Ett exempel på detta är att provkropp anl.cem.11 har sugit upp klart mest vatten, men det är inte det provet som skadats mest av avskalningar, se Figur 18 och Figur 21. Samma sak kan sägas om prov FA11, se Figur 19 och Figur 22. Denna provkropp har sugit upp mest vatten, men den har inte skadats mest.

Resultaten är något förbryllande av flera skäl. Om det vore så att vattenuppsugningen inte hade någon betydelse alls torde inte det klara generella samband mellan vattenuppsugning och mängd avskalningar i omgång 1 heller kunna ses.

En förklaring till att man inte ser något samband när man studerar enskilda prover kan vara att proverna har lokala svaghetszoner i betongytan som har så stor inverkan att den överskuggar effekten av vattenuppsugning mellan proverna i samma cykel. Enligt denna förklaring borde dock mängden avskalningar mellan cyklerna överlappa varandra mer än vad de gör. En annan förklaring kan vara att provningsmetodens brister gör att mätvärdena inte blir tillräckligt precisa, att så noggranna slutsatser kan dras. Den senare förklaringen verkar mest trolig även om den inte heller helt förklarar det entydiga sambandet på generell nivå. Möjligen är det en kombination av de två förklaringarna.

Mätningarna i omgång 1 tyder på att betongen med anläggningscement och flygaska efter 36 dygns härdning inte hydratiserat tillräckligt för att kunna stå emot den aggressiva miljön särskilt väl. Dock har inte heller slagg- eller anläggningsbetongen tillräckligt bra resistans vid en jämförelse med de avskalningsmängder som klassas godkända enligt Boråsmetodens (SS 137244) kriterier då dubblerad avskalning antas efter 56 cykler. Resultaten tyder på att metoden kan utsätta proverna för en mer aggressiv miljö jämfört med Boråsmetoden. Detta innebär att metoden ger en bättre upplösning vid jämförelse mellan olika betongtyper som godkänns av Boråsmetoden. På så sätt kan metoden vara användbar för att utveckla betong där det ställs mycket höga krav på beständighet mot saltfrostavskalning. Temperaturen går i samtliga cykler även under den eutektiska punkten, vilket också är en skillnad jämt mot Boråsmetoden där lägsta temperaturen kan variera över den eutektiska punkten. Jämförbarheten mellan olika tester ökar om lägsta temperaturen når under den eutektiska punkten för samtliga cykler, eftersom saltlösningen då uppnår samma fas, se Figur 2.

Förutom hydratationsgraden är även luftporsstrukturen en viktig parameter för saltfrostbeständigheten. Testerna på den färska betongen visade på en låg lufthalt för samtliga blandningar. Detta leder till en låg saltfrostbeständighet hos betongen, vilket var önskat för att erhålla mer avskalning och tydligare resultat. Denna skillnad i lufthalt, samt mätningens osäkerhet, gör att en jämförelse i absolut mängd avskalningar inte är meningsfull. Att lufthalten är så låg som den är har ingen betydelse för försöken i detta arbete, eftersom syftet

var att undersöka frostcyklernas påverkan och inte vilket bindemedel som var bäst eller sämst. Syftet var endast att göra relativa jämförelser för respektive bindemedel.

Resultaten i omgång 2 pekar inte i samma riktning som omgång 1. Enligt Figur 26-Figur 28 överlappar kurvorna varandra i stor utsträckning och ett samband likt det i omgång 1 går inte att urskilja. Effekten av en längre frystid verkar ha blivit klart mindre, eller försvunnit helt. Figur 29-Figur 31 visar vattenuppsugningen i omgång 2 och inte heller där kan något enkelt samband urskiljas. Kurvorna överlappar varandra i stor utsträckning. Proverna utsatta för längsta frystiden har inte sugit upp mer vatten än de i referenscykeln, så resultaten går inte i linje med de i omgång 1. Proverna har generellt avskalats mindre jämfört med omgång 1, vilket är logiskt med tanke på den förlängda härdningstiden för dessa prov.

Resultaten från mätningarna kan inte bekräfta hypotesen att en längre tötid ökar vattenmättnadsgraden och därmed orsakar mer skada. Resultaten från omgång 1 pekar istället på att det är en längre tid vid lägsta temperaturen som leder till mer vattenuppsugning och mer skada. Men eftersom försöket i omgång 2 inte visar samma resultat kan man inte säga att längre tid vid lägsta temperatur orsakar mer skada. Snarare pekar resultaten på att skademekanismen/skademekanismerna behöver en viss tid på sig att verka, men om man därutöver fortsätter att hålla nere temperaturen på en låg nivå så förvärras inte skadorna nämnvärt.

Resultaten tyder på att uppsugen mängd vatten i betongen påverkar hur mycket proverna skadats genom avskalningar. Skademekanismen/skademekanismerna tycks även vara tidsberoende. Utifrån dessa resultat går det inte att säga vilka skademekanismer som orsakar saltfrostskador. Det kan vara så att isens krympning är tidsberoende och spänningarna i isen ökar med tiden, vilket skulle leda till ökad avskalning. Det kan också vara så att ökad frystid leder till fler och större islinser i betongen, vilket också skulle leda till ökad avskalning. Det går alltså inte att styrka eller avfärda varken Valenzas och Scherers (2006) teori om glue spalling- mekanismen, eller Powers och Helmuth (1953), Powers (1965) och Lindmarks (1998) teorier om islinnsbildning i betongen. För att vidare undersöka skademekanismerna krävs ytterligare studier.

## 4.2 Felkällor

Det finns ett antal felkällor att beakta för försöken gjorda i detta arbete. Kanteffekter är något man vill undvika vid ett saltavskalningsförsök. Det finns olika orsaker till sådana effekter. Vid försöken i denna rapport släppte limmet mellan betongen och gummiduken redan innan frys-försöket tog vid för vissa provkroppar. Anledningen till detta var antagligen att ytan inte var tillräckligt torr vilket ledde till att vidhäftningen försämrades. Dessutom slets limmet upp av sågklingan vid några tillfällen. Som tidigare beskrivits i denna rapport leder kanteffekter till att avskalningsarean ändras något och därmed blir svår att bestämma. Följden blir att resultaten blir något osäkra. Gummidukens och limmets syfte uppfylls inte lika bra om vidhäftningen mellan lim och betong är dålig.

En åtgärd mot detta kan vara att sätta en hård plastform runtomkring gummiduken som håller denna på plats, dikt an mot betongen. En annan åtgärd kan vara att använda provkroppar med större yta, och därmed minska den procentuella effekten av kanteffekter.

Det har antagits att gummidukens vattenuppsugning inte påverkar försöken. Detta då dukens uppsugning är väldigt liten samt att denna uppsugning är samma för samtliga prover och därmed inte påverkar vid jämförelse mellan proverna. Viss variation kan dock förekomma även om den är väldigt liten.



## 5 Slutsats

- Längre tid vid lägsta temperatur verkar bidra till mer avskalningar på betongen, upp till en viss tidsgräns då effekten av en ytterligare förlängd frystid avtar.
- Resultaten visar att den/de skademekanismer som verkar vid saltfrostsprängning påverkas av tiden som betongen utsätts för den lägsta temperaturen. Det finns både mer tid för isen att krympa samt mer tid för islinsbildning i betongen.
- Samtliga bindemedelsblandningar uppvisar liknande avskalningsmönster vid test av olika fryscyklar.
- Resultaten tyder på att betongproverna utsätts för pessimala saltfrostförhållanden vid en viss (okänd) minimitid vid lägsta temperatur. Detta kan göra det möjligt att skilja på olika betongrecept med höga krav på saltfrostbeständighet.
- Provningsmetoden har brister, t.ex. risk för att lösningen torkar, som måste åtgärdas för att erhålla bättre repeterbarhet.





## 6 Förslag på vidare studier

Det finns många intressanta studier för att undersöka cyklernas påverkan på saltfrostbeständigheten ytterligare. I denna studie har olika tider vid lägsta temperaturen samt tötider varierats. Det vore intressant att undersöka ytterligare cykler där tötiden är samma men tiden varierar vid lägsta temperaturen. På detta sätt kan man undersöka noggrannare vilken som är den kortaste tiden vid lägsta temperatur innan skadorna slutar förvärras. Man kan också vända på det och hålla frystiden konstant, men variera tötiden. Genom att genomföra dessa försök fås en ökad kunskap huruvida tötiden har någon betydelse, eller om det endast är frystiden som påverkar skadorna.



# 7 Referenser

- BURSTRÖM, P. G. 2007. *Byggnadsmaterial- Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*, Studentlitteratur.
- CEMENTA. 2015. *Bascement- Teknisk beskrivning* [Online].
- DOLCH, W. L. 1996. Air- Entraining Admixtures *In: RAMACHANDRAN, V. S. (ed.) Concrete Admixtures Handbook (Second Edition)*.
- FAGERLUND, G. 1992. *Betongkonstruktioners beständighet*, Cementa.
- FRIDH, K. 2005. *INTERNAL FROST DAMAGE IN CONCRETE- Experimental studies of destruction mechanisms*. Lunds universitet.
- JOHANSSON, S.-E. 1994. Tillsatsmaterial. *In: LJUNGKRANTZ, C., MÖLLER, G. & PETERSONS, N. (eds.) Betonghandboken*.
- LINDMARK, S. 1998. *Mechanisms of Salt Frost Scaling of Portland Cement-bound Materials: Studies and Hypothesis*.
- POWERS, T. C. 1949. The air requirements of frost- resistant concrete. 184-211.
- POWERS, T. C. 1965. The mechanism of frost action in concrete.
- POWERS, T. C. 1975. Freezing effects in concrete.
- POWERS, T. C. & HELMUTH, R. A. 1953. Theory of Volume Changes in Hardened Portland-Cement Paste During Freezing.
- RAMACHANDRAN, V. S. 1996. Concrete Science. *In: RAMACHANDRAN, V. S. (ed.) Concrete Admixtures Handbook (2)*.
- SELLEVOLD, E. J. & FARSTAD, T. 1991. FROST/SALT- TESTING OF CONCRETE: Effect of Test Parameters and Concrete Moisture History. *In: FAGERLUND, G. & SETZER, M. (eds.) Freeze- Thaw and de- icing resistance of concrete*.
- SS 137244:2005, Betongprovning- Hårdnad betong- Avflagnig vid frysning, SIS- Swedish Standards Institute
- UTGENANNT, P. 2004. The influence of ageing on the salt-frost resistance of concrete.
- WADSÖ, L. 2014. *Construction Materials Science*, Byggnadsmaterial, Lunds universitet.
- VALENZA, J. J. & SCHERER, G. W. 2006. Mechanism for Salt Scaling.
- VALENZA, J. J. & SCHERER, G. W. 2007. A review of salt scaling: I. Phenomenology. *Cement and Concrete Research*, 37, 1007-1021.
- VERBECK, G. J. & KLIEGER, P. 1957. Studies of "Salt" Scaling of Concrete.



# Bilaga 1

## Avskalningar omgång 1

### 100 % anläggningscement

#### Referenscykel

Provkropp	<i>Inkl. kaffefilter (1,72g)</i>			
	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
11	3,684	3,685	4	3,75
21	3,89	4,36	4,389	4,384
31	3,529	3,514	4,198	3,75
12	3,408	4,048	4,154	3,675
22	3,67	3,945	2,575	3,178
32	3,234	3,071	3,387	3,956
Medel:	<b>3,569</b>	<b>3,771</b>	<b>4,026</b>	<b>3,782</b>
Exkl. filter	<b>1,849</b>	<b>2,051</b>	<b>2,306</b>	<b>2,062</b>
kg/m <sup>2</sup>	<b>0,235</b>	<b>0,261</b>	<b>0,294</b>	<b>0,263</b>

#### Kort frystidscykel

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
71	3,19	2,805	2,815	2,767
81	2,99	3,021	3,719	3,478
91	2,314	2,567	2,588	3,258
72	2,886	2,82	2,016	2,289
82	2,957	2,733	3,251	3,268
92	3,281	2,794	2,769	2,025
Medel:	<b>2,936</b>	<b>2,790</b>	<b>3,093</b>	<b>3,012</b>
Exkl. filter	<b>1,216</b>	<b>1,070</b>	<b>1,373</b>	<b>1,292</b>
kg/m <sup>2</sup>	<b>0,155</b>	<b>0,136</b>	<b>0,175</b>	<b>0,165</b>

65 % anläggningscement, 35 % FA

Referenscykel

Provkropp	Inkl. kaffefilter				
	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]	
11	5,883	6,874	7,068	7,644	
21	6,077	6,972	7,11	8,043	
31	7,246	1,72	5,18	5,803	
12	5,782	7,136	7,406	7,72	
22	6,243	6,043	6,948	6,645	
32	7,349	7,737	7,76	7,406	
Medel:	<b>6,430</b>	<b>6,952</b>	<b>6,912</b>	<b>7,210</b>	
Exkl. filter	4,710	5,232	5,192	5,490	
kg/m2	0,600	0,666	0,661	0,699	

Kort frystidscykel

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]	
71	5,241	5,646	6,368	6,367	
81	5,256	5,631	3,553	5,957	
91	5,33	5,866	6,761	6,765	
72	5,16	5,355	6,789	6,824	
82	5,558	5,961	6,53	6,734	
92	4,834	5,211	6,369	6,665	
Medel:	<b>5,230</b>	<b>5,612</b>	<b>6,563</b>	<b>6,552</b>	
Exkl. filter	3,510	3,892	4,843	4,832	
kg/m2	0,447	0,496	0,617	0,615	

65 % anläggningscement, 35 % slagg

Referenscykel

*Inkl. kaffefilter*

*1,72g*

Provkropp	Avskalning 3			
	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	[g]	Avskalning 4 [g]
11	3,077	3,121	3,42	3,054
21	2,573	2,833	2,666	2,812
31	2,638	3,077	2,995	3,198
12	2,75	2,931	3,128	3,5
22	2,587	2,969	3,034	2,859
32	2,543	3,219	3,147	3,055
Medel:	<b>2,695</b>	<b>3,025</b>	<b>3,065</b>	<b>3,080</b>
Exkl. filter	0,975	1,305	1,345	1,360
kg/m <sup>2</sup>	0,124	0,166	0,171	0,173

Kort frystidscykel

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
71	2,687	2,875	2,566	2,634
81	2,632	2,753	2,638	2,728
91	2,61	2,565	2,625	3,109
72	2,448	2,505	2,641	2,724
82	2,715	2,919	3,002	3,265
92	2,675	2,547	2,62	2,819
Medel:	<b>2,628</b>	<b>2,694</b>	<b>2,682</b>	<b>2,880</b>
Exkl. filter	0,908	0,974	0,962	1,160
kg/m <sup>2</sup>	0,116	0,124	0,122	0,148





# Bilaga 2

## Provkroppsvikter omgång 1

### 100 % anläggningscement

#### Referenscykel

Provkropp	Delvägning 1 [g]	Delvägning 2 [g]	Delvägning 3 [g]	Delvägning 4 [g]
11	843,6	842,7	843,4	843
21	825,1	824,6	822,7	821,6
31	817	817,6	816,5	818,2
12	1002	1001	1002,8	1003,6
22	993,8	993	994,4	994,4
32	987,5	992	996,5	995,6

#### Kort frystidscykel

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
71	971,7	974,4	974,5	973
81	982,2	982,8	983,5	981,1
91	970,7	972,3	973,8	972,6
72	795,3	795,1	795,1	796
82	836,5	837,5	838,6	837
92	835,8	836,1	836,4	834,2

### 65 % anläggningscement, 35 % FA

#### Referenscykel

Provkropp	Delvägning 1 [g]	Delvägning 2 [g]	Delvägning 3 [g]	Delvägning 4 [g]
11	811,4	810,6	809,7	806,8
21	826,7	823,1	819,4	813,5
31	817,6	814,7	814,9	814,6
12	967,6	967,4	962,5	958,2
22	975,7	974,2	970,7	966,1
32	980,5	976,6	972	966,5

#### Kort frystidscykel

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
71	870,3	869	864,9	862,2
81	847,5	846,7	845,1	841,8
91	898,5	895,9	891,2	887,6
72	931,1	929,9	925,7	921,8
82	930,9	929,5	925,7	922
92	892,7	890,8	887,4	883,8

65 % anläggningscement, 35 % slagg

Referenscykel

Provkropp	Delvägning 1 [g]	Delvägning 2 [g]	Delvägning 3 [g]	Delvägning 4 [g]
11	889,8	889,2	888,9	887,2
21	892,9	894,9	894,4	894,3
31	911,3	913,1	914,4	914,1
12	925,8	927,4	926,3	925,7
22	928,3	929,9	932,4	931,1
32	943,4	945,2	945,8	945,2

Kort frystidscykel

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
71	908,3	908,8	908,4	908,3
81	1006,5	1007,3	1007,2	1007
91	941,8	943,7	941,7	941,2
72	919,5	921	920,5	920,8
82	827,5	826,7	826,2	824,8
92	873,5	875,6	875,3	875,1

# Bilaga 3

## Avskalningar omgång 2

### 100 % anläggningscement

#### Referenscykel

*Inkl. kaffefilter 1,72 g*

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
41	2,781	2,903	2,808	3,444
51	3,063	3,274	3,262	3,748
61	3,108	3,583	3,556	4,085
71	2,753	3,027	2,914	3,628
81	3,074	3,151	3,37	3,989
91	2,962	3,246	3,017	4,041
Medel:	<b>2,957</b>	<b>3,197</b>	<b>3,155</b>	<b>3,823</b>
Exkl. filter	1,237	1,477	1,435	2,103
kg/m2	0,157	0,188	0,183	0,268

#### Lång frystidscykel

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
42	3,138	3,287	3,284	3,98
52	3,344	3,948	3,513	4,508
62	3,314	3,947	4,333	4,95
72	2,674	2,936	2,967	3,215
82	3,453	4,081	3,995	4,274
92	2,992	3,462	3,515	4,311
Medel:	<b>3,153</b>	<b>3,610</b>	<b>3,601</b>	<b>4,206</b>
Exkl. filter	1,433	1,890	1,881	2,486
kg/m2	0,182	0,241	0,240	0,317

65 % anläggningscement, 35 % FA

Referenscykel

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
41	4,698	4,941	5,229	5,25
51	4,446	5,042	5,579	5,396
61	4,478	5,333	5,89	5,913
71	4,64	5,45	5,975	5,449
81	3,761	4,974	5,359	6,006
91	4,146	4,949	5,331	5,168
Medel:	<b>4,362</b>	<b>5,115</b>	<b>5,561</b>	<b>5,530</b>
Exkl. filter	2,642	3,395	3,841	3,810
kg/m <sup>2</sup>	0,336	0,432	0,489	0,485

Lång frystidscykel

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
42	4,421	4,981	5,532	5,545
52	4,69	5,591	6,012	5,654
62	4,744	<b>6,843</b>	6,525	6,358
72	4,308	4,754	4,825	5,528
82	4,223	4,996	5,501	5,458
92	4,223	5,378	6,253	5,862
Medel:	<b>4,435</b>	<b>5,424</b>	<b>5,775</b>	<b>5,734</b>
Exkl. filter	2,715	3,704	4,055	4,014
kg/m <sup>2</sup>	0,346	0,472	0,516	0,511

65 % anläggningscement, 35 % slagg

Referenscykel

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
41	2,659	2,952	2,443	2,338
51	2,285	2,504	2,651	2,677
61	2,169	2,392	2,313	2,376
71	2,436	2,69	2,621	2,594
81	2,236	2,4	2,431	2,376
91	2,376	2,731	2,586	2,669
Medel:	<b>2,360</b>	<b>2,612</b>	<b>2,508</b>	<b>2,505</b>
Exkl. filter	0,640	0,892	0,788	0,785
kg/m <sup>2</sup>	0,082	0,114	0,100	0,100

Lång frystidscykel (6/18)

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
42	2,56	2,633	2,615	2,622
52	2,286	2,401	2,421	2,472
62	2,347	2,487	2,415	2,509
72	2,561	2,764	2,533	2,504
82	2,151	2,482	2,458	2,479
92	2,228	2,484	2,473	2,501
Medel:	<b>2,356</b>	<b>2,542</b>	<b>2,486</b>	<b>2,515</b>
Exkl. filter	0,636	0,822	0,766	0,795
kg/m <sup>2</sup>	0,081	0,105	0,098	0,101



# Bilaga 4

## Provkroppsvikter omgång 2

### 100 % anläggningscement

#### Referenscykel

Provkropp	Delvägning 1 [g]	Delvägning 2 [g]	Delvägning 3 [g]	Delvägning 4 [g]
41	1014,3	1016,1	1015,2	1015,7
51	1005	1005,1	1005,5	1005,2
61	954,8	955,4	956,4	954,6
71	982	983,7	984,1	984,7
81	987,3	987,8	987,7	986,1
91	959,1	956,6	958,8	958

#### Lång frystidscykel

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
42	959,2	959	957,9	956
52	952,6	951,6	950	948,1
62	1013,9	1014	1012,5	1009,8
72	950,6	954,7	950,9	949,4
82	974,6	976,9	974,3	971,2
92	1030	1032,3	1029,6	1027,5

### 65 % anläggningscement, 35 % FA

#### Referenscykel

Provkropp	Delvägning 1 [g]	Delvägning 2 [g]	Delvägning 3 [g]	Delvägning 4 [g]
41	970,5	968,5	967,5	968,3
51	966,5	965,2	962,9	960,5
61	974,8	973,9	971,1	966,6
71	1034,1	1033,8	1029,8	1026,4
81	953,9	952,5	950,3	946,4
91	1006,6	1010,5	1009,2	1008,5

#### Lång frystidscykel (6/18)

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
42	989,7	987,4	984,8	981,6
52	980,4	987	973,8	971,3
62	988,2	983,2	980,8	977
72	925,8	924,5	922,1	918,5
82	993,8	990,8	987,6	984,4
92	938,7	936,8	933,1	930

65 % anläggningscement, 35 % slagg

Referenscykel

Provkropp	Delvägning 1 [g]	Delvägning 2 [g]	Delvägning 3 [g]	Delvägning 4 [g]
41	982,8	983,2	985	985,1
51	966,8	968,4	967,9	968,7
61	976,9	975,7	977,3	976,9
71	963,4	964,3	964,7	965,2
81	1018,1	1018,5	1017,7	1017,6
91	981,9	982,5	982,8	984,6

Lång frystidscykel (6/18)

Provkropp	Avskalning 1 [g]	Avskalning 2 [g]	Avskalning 3 [g]	Avskalning 4 [g]
42	1004,5	1003	1002,9	1002,4
52	1007,8	1007,6	1006,5	1007,9
62	1019,6	1019,1	1019,9	1019,2
72	1010,7	1010,4	1010,5	1009,8
82	954,2	952,8	953,4	952,6
92	976,2	975,9	975	976,2