

# Inverkan av fukthistoriken och testyta på saltfrostavskalningen hos betong med tillsatsmaterial

Gustav Rosengren

TVBM-5115 Examensarbete  
Byggnadsmaterial LTH 2018

ISSN 0348-7911 TVBM-5115

Lunds Tekniska Högskola  
Byggnadsmaterial  
Box 118  
221 00 Lund

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



## Förord

Detta examensarbete avslutar min utbildning inom civilingenjör Väg- och vattenbyggnad. Arbetet har utförts på institutionen byggnadsmaterial under vårterminen 2017.

Jag vill tacka min handledare Martin Strand för all hjälp med planering, hitta litteratur laborationer och frågestunder. Stort tack till examinator Katja Fridh som hjälpt till att granska under arbetets gång.

## Sammanfattning

Betong är världens mest använda byggnadsmaterial och används i många konstruktioner som byggs idag. Saltfrostavskalning på betong har uppmärksammats i länder som har ett kyligt klimat. Dessa frostsador definieras som en ytlig skada som uppstår på grund av att saltlösning fryser på betongytan. Skadorna visar sig som små korn som lossnar från betongen vid varje frysning av lösningen. Efter tillräckligt många frysningar finns det ingen cementpasta kvar på betongytan och ballasten lämnas synlig. Dessa skador påverkar inte betongens hållfasthet men integriteten minskar vilket påskyndar andra fenomen såsom kloridinträngning och vattenfyllnad vilket gör att livslängden på för konstruktionen minskar.

Då miljömedvetenheten ökar har betong som innehåller restprodukter från järn och kolkraftverk så kallad masugnsslagg och flygaska börjat användas. Flygaska används för att öka arbetsbarheten på betongen och fungerar bra då betongen ska pumpas. Det används i till exempel betongbundna bärlager i vägar där det gör betongen lättare att packa och ger mindre genomgående sprickor. Betong med inblandning av slagg används främst i Sverige för inomhusbetong då man anser att den blir känsligare för frostangrepp. Att dessa betonger är miljövänligare än betong med portlandcement beror på att man inte har lika hög andel Portland cement vilket släpper ut stora mängde koldioxid under den produktionen.

Hur saltfrostavskalningen hos dessa betonger påverkas av olika förkonditionering och val av testyta är syftet med den här studien. Förkonditioneringen av betongen syftar till vilken temperatur, relativ fuktighet, tid och uppfuktning betongen utsätts för innan provningen påbörjas.

Olika testytor, olika längd på uppfuktning och uttorkning är faktorerna som har undersökts i den här studien. För att göra det har vanlig portlandcement (OPC), betong där 35 % av OPC ersatts med flygaska eller slagg gjutits i formar. Dessa formar har sedan sågats för att kunna testa en glättad (tillslätad) yta, sågad yta och formytan. Under försöken har tre provkroppar med varje förutsättning används för att få en uppfattning av spridningen på resultaten. Uttorkningen har gjorts i 28 dygn i ett klimatrums med relativ fuktighet på 60 % och 20 grader för att testytorna ska ha möjlighet att karbonatisera under uttorkningen. Uppfuktningen där provet placerats i ett vattenbad har gjorts precis innan provstart.

Under frystesterna placerades provkropparna i en frys där ytan var nedsänkt i en saltlösning. Saltlösningen frystes och töades en gång per dag. Var sjunde dag togs provkropparna ur frysen och det avskalade materialet samlades in, torkades och vägdes.

Resultaten har visat att avskalningen varierar beroende på vilken yta som testas. Den glättade ytan har överlag högst avskalning och ytan med lägst avskalning varierade med betongtyp.

Genom att låta prov torka ut under 28 dygn och jämföra med prover som inte fått torka ut, gav uttorkning minskad avskalning. Effekterna från uttorkningen är tydligast för OPC och minst för den slagginblandade betongen.

Uppfuktning ökar avskalningen för alla betonger men ökningen varierar med bindemedelskombination och ifall proverna fått torkas innan eller inte.

## Abstract

Concrete is one of the most widely used building materials and is used in most of the constructions that is built today. During the 20th century damages to concrete related to salt-frost scaling has been noted in countries with cold climate. Salt-frost scaling is defined as the damage in the form of small flakes that comes of the surface when a solute is frozen on the concrete. After numerous cycles of freeze and thawing of the solute the cement paste has disappeared and the ballast is visible. The damages from scaling does not affect the strength of the concrete but may lower the integrity and therefor increase the rate of other phenomena such as chloride attack and water permeability.

This study will test how the tested surface, rehydration and dehydration affect the scaling of the different concretes. 100 % Ordinary >Portland Cement (OPC), 65 % OPC and 35 % fly ash, and 65 % OPC and 35 % slag were used as binder and has been cast in a cylindrical shape. When the preconditioning is about to begin the concrete is sawn into small samples so that the troweled-, sawed- and mould surface can be tested. The dehydration has been done in a climate chamber with a constant temperature of 20 degrees and a relative humidity of 60 % so that carbonation can occur. The rehydration has been done both with and without dehydration to examine the effect of the dehydration on salt frost scaling.

The tests have shown different amount of scaling depending on which surface is being tested. Overall the trowelled surface has the highest scaling but the most resistant surface is dependent on the binder type.

Dehydration has a positive effect on every binder but mostly for OPC and only slightly for the slag infused concrete.

Rehydration increases the scaling but the amount is dependent on the binder type and if the sample has been dehydrated before or not.



# Innehållsförteckning

Förord .....	3
Sammanfattning .....	4
Abstract.....	5
1 Inledning .....	9
1.1 Bakgrund.....	9
1.2 Betong.....	9
1.2.1 Cement.....	9
1.2.2 Luftporstruktur .....	10
1.2.3 Karbonatisering.....	10
1.3 Slagg.....	10
1.4 Flygaska.....	11
2 Avskalningsmekanismen.....	13
2.1 Teorier.....	13
2.1.1 Saltlösningskemi .....	14
2.1.2 Frysning av vatten.....	15
2.1.3 Uttorkning.....	15
3 Tidigare studier som behandlat salt-frostavskalning i betong med flygaska eller slagg .....	17
4 Standardmetoder för att mäta saltfrostbeständigheten hos betong.....	21
4.1 CDF (Janssen, 1996) .....	21
4.2 Boråsmetoden ss 137244 (Farstad, 1991) .....	21
4.3 ASTM C (Lindmark, 1998) .....	21
4.4 MTO LS (Chidiac, 2007).....	22
4.5 BNQ NQ 2621-900 (Bouzoubaa. N, 2011).....	22
4.6 Sammanfattning provmetoder .....	22
5 Saltfrostprovningssmetod som använts i denna undersökning.....	23
5.1 Fryscykel .....	23
6 Metod .....	25
6.1 Material .....	25
6.2 Recept.....	25
6.3 Gjutning .....	25
7 Försöksserie .....	27
7.1 Förkonditionering .....	27
7.2 Omgång 1 - inverkan provningsyta.....	27



7.3	Omgång 2 - inverkan av uppfuktning.....	28
7.4	Omgång 3 – inverkan av uttorkning .....	28
8	Resultat och diskussion.....	29
8.1	Jämförelser mellan provkroppar .....	29
8.2	Summering omgång 1.....	33
8.3	Omgång 2 – inverkan av uppfuktning.....	35
8.3.1	29 dagars uppfuktning .....	35
8.3.2	1 dags uppfuktning .....	35
8.3.3	Ingen uppfuktning.....	36
8.3.4	Jämförelser inom respektive betongtyp.....	36
8.4	Omgång 3 – Inverkan av uttorkning .....	39
8.5	Uttorkningens inverkan på avskalningen .....	42
9	Sammanfattning .....	43
10	Framtida studier .....	44
	Referenser .....	46
	Bilaga 1 Vägningar av provkroppar och avskalat material .....	48

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Betong är ett väldigt vanligt byggnadsmaterial som används till allt ifrån byggnader, broar, vägar, tunnlar med mera. Under de senaste 60 åren har dock nedbrytning på grund av saltavskalning uppmärksammats i länder där tölsalter används under vinterhalvåret (Valenza. J, 2006).

Saltavskalning är en yttlig skada som uppstår på grund av att saltlösning som finns på betongytan fryser. Skadorna som sker blir större efter varje frysning och visar sig oftast som små korn som lossnar från betongytan (Valenza. J, 2006). När avskalningen har pågått under en längre tid har de mindre kornen och cementpastan lämnat ytskiktet av konstruktionen vilket lämnar de större fraktionerna av ballasten synliga vilka till sist också börjar lossna. Saltavskalningen har ingen direkt påverkan på konstruktionens hållfasthet men då det skalar av ytan finns det stor risk för att den skyndar på kloridinträngning och ökar vattenfyllnad (Valenza. J, 2006). Både kloridinträngningen som påskyndar korrosion av armering och vattenfyllnad som vid frysning skapar inre skador hos betongen påverkar konstruktionens hållfasthet och förväntade livslängd. I och med dessa konsekvenser bör betong som fått saltfrostsador åtgärdas innan större skador sker vilket annars blir en stor kostnad för samhället.

Målet med examensarbetet är att göra en djupare analys av ett antal faktorer som påverkar saltfrostavskalningen och på så vis få en djupare förståelse för den bakomliggande skademekanismen och hur den påverkar betong med flygaska och slagg. Resultaten kommer även visa om respektive faktor påverkar betong mer där 35 vikts % av cementen har ersatts av flygaska eller slagg jämfört med 100 % CEM I. De olika förutsättningarna som kommer att testas är fukthistorikens påverkan och hur val av testyta påverkar avskalningsresultaten. Det här ska göras genom att förkonditionera betongen med olika längd på uttorkning, och uppfuktning. Därefter görs ett avskalningstest i 28 cykler. Testytorna konditioneras på ett antal olika sätt vilket ger möjlighet till jämförelser av hur de olika konditioneringarna påverkar respektive bindemedelskombination.

Frågeställningar som ska besvaras i den här studien är:

Hur påverkar val av testyta saltfrostbeständigheten för betong med OPC och 35% slagg eller flygaska?

Hur påverkar uttorkningen saltfrostbeständigheten för betong med OPC och 35% slagg eller flygaska?

Hur påverkar uppfuktningen saltfrostbeständigheten för betong med OPC och 35% slagg eller flygaska?

## 1.2 Betong

Betong består av ballast (sten av diverse fraktioner) som hålls ihop av en cementpasta (vatten och cement). Ballasten som används påverkar hållfastheten och frostbeständigheten hos betongen. Cementpastans egenskaper påverkas till stor del av vattencementtalet vilket är mängden cement i förhållande till mängden vatten. Mer vatten leder till fler kapillärporer och lägre frostbeständighet.

### 1.2.1 Cement

Cement skapas genom uppvärmning av kalksten och lera till ungefär 1500 grader varvid Kalciumsilikater och aluminiumsilikat bildas (Valenza. J, 2006). Kalciumsilikaterna som bildas är  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  trikalciumpulver (Alit) och  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  dikalciumpulver (Belit). Båda calciumpulverna bildar calciumpulverhydrat (C-S-H) och

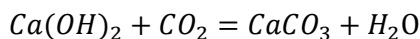
kalciumpolyhydroxid (CH) vid reaktion med vatten. Skillnaden är att Belit bildar en större mängd C-S-H och mindre CH per gram vilket gör att betongen får en högre hållfasthet då C-S-H är lastbärande. Alit reagerar lättare med vattnet än Belit och bidrar till betongens tidiga hållfasthet (Lea, 1970). Mängden vatten i förhållande till cement uttryckt som vikts % (vct) och  $vct = 0,39$  (Persson, 1992) är det minsta vct där all cement har en möjlighet att reagera med vattnet. Porstrukturen hos en betong med vct under 0,39 består enbart av gelporer medan för ett högre vct kommer det även finnas så kallade kapillärporer som uppkommer efter vatten som inte har reagerat med cement (Powers, 1962). Vid användning av tillsatser såsom flyggaska och slagg i cementen ändras själva härdningsprocessen och den slutgiltiga produkten vilket inkluderar hur porsstrukturen ser ut (Groves, 1992). Härdningen av CEM1 vid betong med inblandning av flygaska eller slagg skapar grova porstrukturer med större hålrum, dessa hålrum minskar när flygaskan eller slagg reagerar.

### 1.2.2 Luftporstruktur

Luftporsbildande medel används för att göra betongen mer frostbeständig genom att den får luftporer där vatten som fryser kan expandera utan att skapa spänningar i betongen. När tillsatsmedlet blandas med betong bildas ett skum som stannar kvar när betongen härdas och lämnar kvar luftporer (Lindmark, 1998). För att beskriva och eller kvantifiera luftporsystem har en så kallad spacing factor, avståndsfaktor utvecklats. Avståndsfaktorn är det längsta avståndet vatten måste flytta sig för att nå en luftpor. För att beräkna den antas det att luftbubblorna har en konstant diameter och ligger staplade i tänkta kuber med en sida som luftporens diameter. För att vidare beskriva porsystemet finns specifika ytan för porerna vilket visar storleken på porerna, ju mindre porerna är vid en viss volym desto mindre avståndsfaktor (Lindmark, 1998).

### 1.2.3 Karbonatisering

Karbonatisering i betong sker då koldioxid i luften reagerar främst med kalciumpolyhydroxiden i härdad betong och sänker därmed pH i betongen enligt följande:



Om slagg eller flygaska har använts i betong kommer karbonatiseringen minska ifall diffusionskoefficienten och vbt är samma då flygaska och slagg innehåller en mindre mängd  $Ca(OH)_2$  än OPC då det används för att flygaskan eller slaggen ska reagera (Bohlin, 2016).

Hastigheten för karbonatiseringen ökar med mängden koldioxid i luften och med en ökad mängd relativ fuktighet upp till ca 65 % för att sedan avta. Det är på grund av att koldioxid diffusion vilken är ungefär  $10^4$  gånger så stor i luft som i vatten. Det behövs dock vatten som reagerar med karbonaten varav vattnet blir basiskt och lämnar betongen surare för att karbonatisering ska ske vilket förklarar att det finns en optimal relativ fuktighet (Bohlin, 2016).

Då betongen karbonatiseras förändras porstrukturen hos betongen och får därmed andra transportegenskaper. OPC, OPC med flygaska, och OPC med slagg under 65 % får en tätare struktur på grund av tillskottet av kalciumpolyhydroxid. Vid hög andel slagg (över 65 %) sker ingen förtätning av porerna på grund av bristen på  $Ca(OH)_2$  som kan reagera. Strukturen hos OPC förändras mest vid karbonatisering, sedan flygaska och minst för slagg (Bohlin, 2016). Att strukturen hos betong med OPC förändras mest av karbonatisering beror på den högre andelen  $Ca(OH)_2$  varav förändringen är större.

## 1.3 Slagg

Slagg är en restprodukt från stålindustrin vilket bildas när tackjärn tillverkas. Slaggen är rik på både kisel och kalcium. Om slaggen kyls ner långsamt fås en kristallin struktur som inte är reaktiv. Om slagg kyls ner snabbt även känt som granulerad får den en glasig struktur vilket gör den reaktiv (Fagerlund, 1982). Då den mals ner till samma storlek som cement fås de hydrauliska egenskaper vilket kan jämföras med OPC (Groves, 1992). Skillnaden mellan slagg och OPC är att det tar mycket längre tid för den att reagera med vatten och bilda C-S-H då den har ett lägre innehåll av kalcium. Reaktionshastigheten hos slagg varierar med mängden kisel, aluminium, och kalcium, mängden glasmaterial och finkornigheten hos partiklarna. Ett högre kalcium mot kiselförhållande ökar reaktionshastigheten. Hur finkorniga partiklarna är påverkar då den specifika ytan ökar och därmed möjligheterna för reaktioner (Groves, 1992). Det är till stor del på grund av den långsamma härdningen som det används någon form av katalysator såsom OPC för att påskynda denna (Groves, 1992).

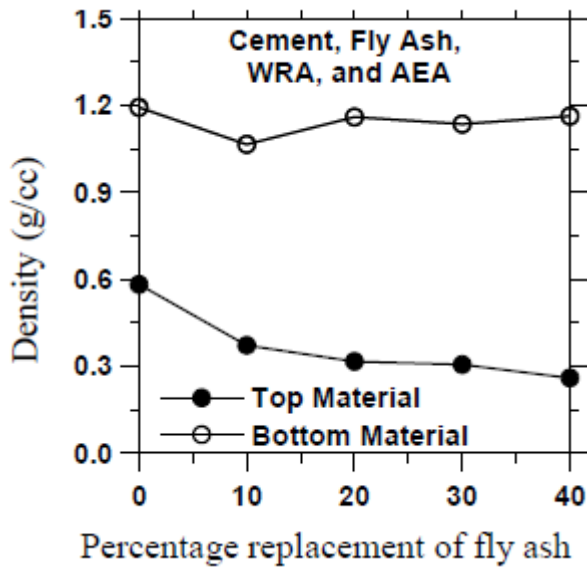
Slagg används för att minska miljöpåverkan genom att använda material som är biprodukter i järnindustrin och på så vis minska nyproduktionen av cement. Slagg har även visat sig minska kloridinträngningshastigheten och skydda mot sulfatangrepp (Groves, 1992). Problemet med inblandning av slagg är att det ökar salt frostavskalningen (Chidiac, 2007).

#### 1.4 Flygaska

Precis som slagg är flygaska en restprodukt men istället för att komma ifrån järnindustrin kommer flygaskan ifrån kolkraftverk (Fagerlund G. , 1983). Vid eldning av stenkol följer cirka tio % aska med gaserna vilket senare skiljs av med hjälp av ett antal elektrofilter. På grund av olika filter fås flygaska med olika finhet. Det finns olika typer av flygaska, typ F som har en låg kalkhalt oftast under fem % och typ C som har en högre kalkhalt upp till 35 % (Fagerlund G. , 1983). I Sverige får enbart typ F användas då typ C kan innehålla så kallad bränd kalk vilket riskerar att expandera vid reaktion (Fagerlund G. , 1983).

Flygaska ökar betongens arbetsbarhet och stabilitet på grund av att kornen är sfäriska. Dessa egenskaper gör betong med flygaska lämplig att använda vid tillfällen när kraven på arbetsbarheten hos betongen är höga såsom pumpning (Lewandowski, 1983).

Vid användandet av flygaska i samband med flyttillsatsmedel och eller luftporsbildande medel finns det risk för vattenseparation (Krishnan, 2006). Detta innebär att betongen kommer att skilja sig med djupet där topplagret har en lägre densitet och bottenskiktet en högre densitet. Skillnaden i porstruktur för den härdade betongen är att topplagret har en högre porositet medan bottenlagret är kompaktare (Krishnan, 2006). Vid vattenseparation är risken att avskalningen ökar.



Figur 1. Separationsökning i förhållande till mängd flygaska (Krishnan, 2006).

I Figur 1 har betong med vct på 1,0 och olika mängd flygaska undersökts. Det visar ett tydligt samband mellan en ökad mängd flygaska och en ökad separation. Här måste dock tilläggas att det enbart är helt applicerbart på betong med ett högt vct då separationen är väldigt liten i betongen där vct är under 0,6 (Krishnan, 2006).

(Krishnan, 2006) gjorde även försök där separationen undersöktes vid olika vct och tillsatser. Försöken visade att när enbart luftporbildare eller flyttillsatsmedel användes var densitetsskillnaderna större än vid användandet av båda. Vid användandet av luftporbildare var separationen större än med flyttillsatsmedel. Då båda tillsatsmedlen användes var tjockleken av lagret med lägre densitet större. Att separationen var större vid användandet av enbart ett tillsatsmedel gällde både för ren OPC och vid 20 % inblandad flygaska med skillnad att ren OPC hade en mindre separation oavsett mängden vatten och krävde ett något högre vct för att någon separation skulle ske.

## 2 Avskalningsmekanismen

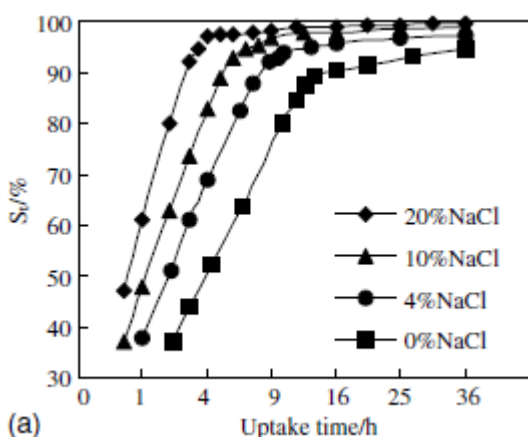
Saltfrostavskalning innebär att material lossnar från ytan av betongen när den fryser under kontakt med saltlösning. Avskalningen kan ses som små korn som fallit av från betongen och mängden ökar efter varje frysning. För att modellera avskalning i labbet används frys och tö cykler där betongkroppar är i kontakt med saltlösning (Valenza, J, 2006).

Vilken eller vilka mekanismer som styr avskalningen är inte helt klarlagt. För att få en större förståelse för vad det är som sker i betongen är det lämpligt att ha en grundläggande kunskap om hur saltlösningar som fryser fungerar eftersom saltinblandning har visat sig ha en effekt på avskalningen. Det är även relevant att se vilka faktorer som påverkar avskalningen negativt och positivt, och hur dessa samverkar.

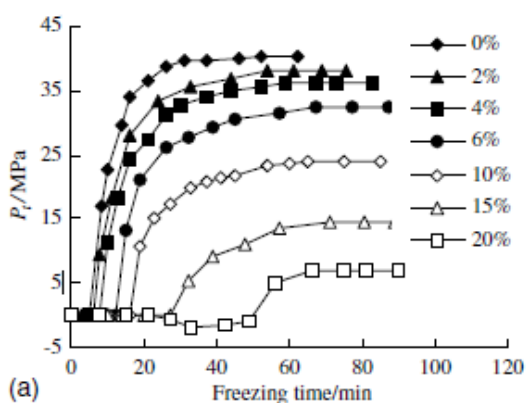
### 2.1 Teorier

Enligt (Valenza, J, 2006) är "glue-spall" den mekanism som ligger bakom salt frostavskalning. Glue-spall mekanismen kallas den metod som används för att dekorera glas då ett epoxilim hålls på en blåstrad glasyta. När limmet har stelnat sänker man temperaturen varvid sprickor bildas på grund av ojämna temperaturrörelse i de olika delarna där epoxin krymper mer än det underliggande glaset som epoxin är fäst vid. Samma mekanism sker i betongen då saltvattnet fryser ovanpå betongytan och motsvarar limmet på glasskivan. Spänningar uppstår då isen "limmar" sig fast på betongen och drar ihop sig mer än betongen vilket bidrar till en ytlig skada (Jacobsen, S, 1997). Zonen mellan ballast och cementpasta är svagare än både cementpastan och ballasten varpå det är större sannolikhet för brott och sprickor där. (Jacobsen, S, 1997)

En annan teori har tagits fram av (Yuang, J, 2015) där de menar att "glue spall" inte kan vara korrekt på grund av att det avskalade materialet är väldigt finkornigt och separerat från ballasten. Ifall "glue spall" skulle vara korrekt skulle istället det avskalade materialet vara större korn enligt beräknad sprickbildning med hjälp av finita elementmetoden och sprickbildningslära i betong som fryser i saltlösningar. De föreslår istället att avskalningen är ett resultat av expansionsökningen av vattnet när det fryser. Genom att testa uppsugningsförmågan hos betong av olika koncentrerade saltlösningar och vilket tryck dessa utför på ett stängt kärl när de fryses, såg de att en ökad koncentration salt ledde till en högre uppsugning men minskat tryck när betongen frös, se Figur 2 och Figur 3.



Figur 3 fuktkvot beroende på saltkoncentration (Yuang, J, 2015).



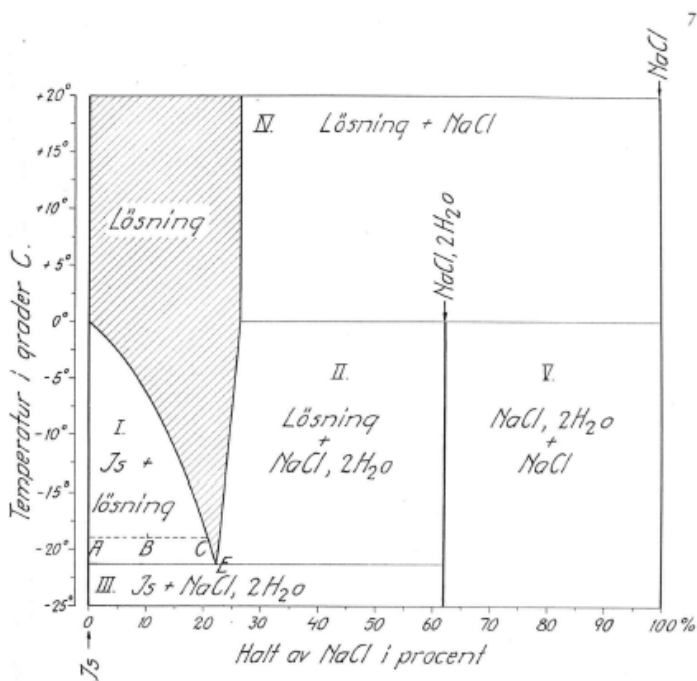
Figur 2 tryck vid frysning beroende på mängden NaCl (Yuang, J, 2015)

Från dessa försök har det räknats fram att det minskade trycket på grund av saltet kompenseras med den ökade uppsugningen för lägre koncentrationer. Det beräknades även att den mest destruktiva saltkoncentrationen bör

ligga någonstans mellan 2-6 % (Yuang, J, 2015). Att pessimum koncentrationen ligger någonstans mellan 2-6% stämmer väl överens med tidigare försök till exempel (Arnfelt, 1943) och (Lindmark, 1998).

### 2.1.1 Saltlösningsskemi

Då salt löses i vatten sänker det fryspunkten. Saltvatten kommer beroende på koncentration och temperatur sträva efter ett specifikt jämviktstillstånd enligt Figur 4 där område 1 is och "lösning" är av intresse för saltfrostavskalning. Då temperaturen är hög och koncentrationen salt låg kommer allt salt att vara löst i vattnet, sänks temperaturen eller om saltkoncentrationen höjs kommer en del av det lösta saltet fällas ur lösningen. För att beskriva förhållandena mellan saltlösning, is, saltkristaller och rent salt NaCl finns ett jämviktsdiagram (Arnfelt, 1943).



Figur 4 Jämviktsdiagram vatten och NaCl (Arnfelt 1943).

De koncentrationer varvid allt salt är löst i vattnet vid en given temperatur ändrar sig beroende på temperaturen och snävas till ju lägre temperaturen är tills det enbart är en punkt, i Figur 4 ses den som E och kallas för den eutektiska punkten. Vid temperaturer lägre än den eutektiska punkten finns inte längre någon saltlösning utan vattnet har fryst och fällt ut iskristaller vilket resulterar att det enbart kommer finnas iskristaller och saltkristaller (Arnfelt, 1943).

Ur jämviktsdiagrammet kan koncentrationen av de olika faserna beräknas enligt: (Ekv 1)

$$\frac{M_i}{M_l} = \frac{BC}{AB} \quad (\text{Ekv 1})$$

Där  $M_i$  är mängden is,  $M_l$  mängden lösning och BC och AB är längden ifrån beräknad punkt som ges av totalkoncentrationen av salt och vatten till vertikalaxeln eller området där samtligt salt är löst (Arnfelt, 1943).

Vid vilken nivå saltkoncentrationen har mest påverkan på betong har studerats ingående och det har visat sig vara en saltlösning med ungefär tre vikts % salt som är mest förödande för betong (Arnfelt, 1943).

Det har även gjorts flertalet studier där andra lösningarna har provats. Resultaten har även där visat att alkohol, urin och oorganiska salter har en pessimum koncentration där skadorna är större än om koncentrationen varit högre eller lägre (Arnfelt, 1943).

Tegel och sandsten är två andra porösa byggnadsmaterial vilka även de har testats om de reagerar som betong vid frysning i med kontakt med en saltlösning. Proverna har visat att frysning av rent vatten bidrar till mer skador än frysning av saltlösning på tegel och sandsten (Arnfelt, 1943).

### 2.1.2 Frysning av vatten

När vatten fryser till is tar det upp 9 % mer volym. Det betyder att om vatten fyller upp mer än 91,7 % kommer inte utrymmet vara tillräckligt för vattnets expansion vid frysning. Om utrymmet inte är tillräckligt stort vid frysning skapas ett tryck på grund av att vattnet vill expandera. Om trycket överstiger hållfastheten för materialet riskerar det att skadas (Lindmark, 1998). Den högsta mängden vatten som kan finnas i ett material utan risker för skador kallas den kritiska vattenmättnadsgraden och det är när innehållet överstiger den som frysning innebär risk för skador. Tryckökningen vid isbildning kan uppgå till 10 MPa per grad vilket redan vid minus en grad är tillräckligt för att göra skada på porösa byggnadsmaterial såsom betong (Lindmark, 1998). (Sellevold, 1994) har också visat att mängden absorberad lösning har påverkan på mängden avskalat material. Det sker ingen avskalning ifall den lägsta temperaturen är över - 10°C och mängden avskalning ökar med en minskad temperatur (Lindmark, 1998). Avskalningen ökar ifall man håller provet vid den lägsta temperaturen längre (Farstad, 1991)

### 2.1.3 Uttorkning

(Jacobsen, S, 1997) har konstaterat att det finns uttorkningsförhållanden som minskar avskalningen genom att jämföra avskalning när proverna inte fått torka och när de fått torka med ett antal olika uttorkningshastigheter. De olika uttorkningshastigheterna varierade från 0 – 500 g/m<sup>2</sup>\*h vilket åstadkoms genom att placera proverna antingen över ett saltlösningbad, i klimatrums med olika temperatur och relativ fuktighet, eller en 40 grader varm ugn.

Resultaten visade att proverna som legat i ugn och torkades ut snabbast, och de prover som torkats ut med lägst hastighet hade en högre avskalning än de som låg mitt emellan. De proverna som torkade ut med en uttorkningshastighet på 60 g/m<sup>2</sup>\*h hade lägst avskalning. Att de proverna hade lägst avskalning kan förklaras med att de hade de bästa förutsättningarna att karbonatiseras.





### 3 Tidigare studier som behandlat salt-frostavskalning i betong med flygaska eller slagg

Artiklarna som har studerats har valts ut på grund av att de har studerat salt frostavskalning. Avgränsningar som har använts har varit studier som har tittat på skillnader i ytorna som har provats, inblandning av flygaska av typ F eller slagg, eller uttorkning och uppfuktningstider. Dessa studier används för att jämföra med resultaten som erhålls i denna studie.

I (Chidiac, 2007) har en statistisk analys gjorts av avskalningsförsök där olika mängd slagg har använts. Analysen har gjorts med hjälp av envariabel linjär regression där man har tittat på avskalningen i förhållande till luftinnehåll, mängd bindemedel, andel OPC av bindemedel, vbt, härdningsförhållande och härdningstid. Regressionsanalysen har gjorts på 61 prov varav 37 stycken av dessa är glättade ytor och 24 stycken är formytor.

Det i studien som var av relevans för det här examensarbetet var att en ökad vattenhärdning ökade avskalningen för både glättad yta och för formytan men att påverkan var högre för den glättade ytan. En längre torkningstid har negativ påverkan på avskalningen av den glättade ytan men tyvärr fanns ingen data finns för formytan (Chidiac, 2007).

Av samtliga resultat dras slutsatsen att avskalningen för betong med slagginblandning skiljer sig beroende på vilken yta det är som testas. Vbt och andelen OPC är de faktorer som med störst säkerhet påverkar båda formytorna. En ökad mängd slagginblandning ökar avskalningen för båda ytorna. Härdningsförloppet påverkar mest den glättade ytan och luftinblandning påverkar formytan (Chidiac, 2007).

(Pigeon. M, 1996) har genom laboratorieförsök undersökt inverkan av flygaska på avskalning och skillnad i betongens porstruktur med avseende på avståndet från ytan. För att utföra försöken har sex olika betonger gjutits med två olika OPC som kommer från två olika fabriker och 3 olika viktandelar flygaska; 0, 20 och 40 vikts % av bindemedlet. Olika gjutningsprocedurer har använts där den första använder sig av ett vibratorbord och den andra enbart knackar på formen för att minska luftbubblor. Proven har sågats och saltfrosttester har utförts på både glättad yta och sågad yta vilket kan ge en indikation på skillnader hos porsystemet över djupet om resultaten skiljer sig. Försöken som har gjorts har följt ASTM C standard vilket beskrivs i kapitel 5 och tryckhållfasthetsprover har utförts för att avgöra mognaden hos betongen. SEM-mikroskop har även använts för att studera strukturen hos ytorna.

Resultaten visade att den sågade ytan hade högre resistans mot avskalning i alla försök. För blandningen utan flygaska hade den sågade ytan  $0,04 \text{ g/m}^2$  mot den glättade ytans  $0,42 \text{ g/m}^2$ . Vid inblandning av flygaska ökade även avskalningen hos samtliga prover med ökande vikts % flygaska. Resultaten visade även att beroende på använd vibrationsprocedur gav inblandningen av 20 vikts % flygaska väldigt olika avskalning. När man enbart knackade på formen var avskalningen lägre än när man använde vibratorbordet.

Med avskalningsresultaten och analyserna som gjordes med SEM-mikroskop konstaterades att den glättade ytan har en annan mikrostruktur än resterande betong. Den glättade ytan är mer porös på grund av ett förhöjt vbt vilket enligt resultaten leder till en högre känslighet mot avskalning. Då betongen har ett högre vbt på ytan har det troligen skett en vattenseparation (Pigeon. M, 1996).

I (Utgenannt, 2004) har cement med inblandning av olika mängd slagg, uttorkning vid olika åldrar och karbonatisering testats. Proverna bestod av rent OPC, 20, 35 och 65 % slagg med resterande viktsprocent bindemedel av OPC och de torkades ut mellan 7 och 270 dagar. Det visade sig att för betong med enbart OPC ändras avskalningen mest om den får torka vid tidig ålder, innan 30 dagars härdning för ett lägre vct och något längre ifall vct är högre. Vid en högre ålder har torkningen utan karbonatisering inte någon effekt.

Torkningen hade högst påverkan på ung betong cirka 20 dagar gammal med slagginblandning där avskalningen för prover som uttorkats var 20 % av avskalningen för betongen som inte torkats. På betong med slagginblandning som härdats i mer än 30 dagar var effekten av uttorkningen liten men avskalningen var alltid lägre då den torkades.

Vägningar gjordes under torkningen och för OPC-betongen uppmättes en snabbare uttorkning än för slagg vid yngre betong med en snabbt avtagande kurva som nästan var konstant vid åldrar över 40 dagar. Den slagginblandade betongen som hade snabbast uttorkning i början var betongen med 65 % slagg medan den med 20 % var långsammast. Efter 40 dagar avtar uttorkningen (Utgenannt, 2004). Då inverkan av torkning på avskalningen är högre vid yngre betong och mindre vid äldre finns det troligen ett samband mellan vatteninnehållet och avskalning. Då betongen torkat ut mer har den ett lägre vatteninnehåll vilket resulterar i en mindre avskalning (Utgenannt, 2004).

I (Valenza II, 2007) diskuteras ett antal faktorer som påverkar saltavskalning och i vilken utsträckning respektive faktor påverkar. De har tittat på experimentella studier där olika faktorer såsom tillsatsmaterial, härdningsförhållande och testtytor testats. Tillsatsmaterial i cement såsom flygaska och slagg kan öka slutproduktens densitet, hållfasthet och permeabilitet. Ett problem med tillsatserna är att de kan öka risken för vattenseparation vid ett högt vct eller när betongen vibreras för mycket.

(Valenza. J, 2006). Vid användandet av flygaska erhålls inte de puzzolanska fördelarna i hållfasthetstillväxt förrän betongen har härdat i 1-2 månader. Flera studier har visat att flygaska minskar motståndskraften mot avskalning men ifall man håller vbt under 0,5 eller om hållfastheten närmar sig 40 MPa minskar avskalningen. Resultaten har även visa att inverkan av flygaska är låg om man ersätter mindre än 30 % av cementet med flygaska. Frystester där avskalning har testats på ytan av befintlig betong har högst avskalning skett under de första 20 cyklerna vilket visar att betongen inte är homogen utan har ett skikt vid ytan där cementpastan har en mer dominerande roll.

Vid användandet av slagg istället för flygaska är trenden liknande med en högre avskalning i början. De har även sett ett samband mellan mängden utbytt cement och djup av försvagad yta (Valenza. J, 2006).

I (Krishnan, 2006) undersöks inverkan av tillsatsmaterial på densiteten av cementpastan nära ytan. Skillnaden i densitet mellan topplagret och bottenlagret ökade med en högre andel flygaska när både flyttillsatsmedel och luftporbildare var närvarande och betongen hade ett vct på 1,0. För OPC var skillnaden i densitet på 1,2 g/cm<sup>3</sup> i bottenlagret och 0,6 g/cm<sup>3</sup> för topplagret. Vid 10 % flygaska minskade densiteten på bottenlagret till 1,1 g/cm<sup>3</sup> och topplagret till 0,45 g/cm<sup>2</sup>. Vid 40 % flygaska var densitetsskillnaden på 1,2 g/cm<sup>3</sup> för botten mot 0,28 g/cm<sup>3</sup> vid toppen.

Separationen mellan topp och bottenlagret är inte märkbart förrän vct är högre än 0,6. Flyttillsatsmedel påverkar densiteten i störst utsträckning medan luftporbildande medel leder till en större volym av topplagret (Krishnan, 2006).

I (Farstad, 1991) beskrivs ett round-robin test på fem olika laboratorier i Skandinavien för att testa återskapningsmöjligheterna för Boråsmetoden vilken finns beskriven i kapitel 4. Även ett antal variationer på betongen testades. De har sett en ökning av avskalning på betong som är äldre då de jämfört samma betong med 14 månaders intervall vilket de antog berodde på att proven fått torka ut under en längre tid och sedan återuppfuktats. De testade hur avskalningen påverkades ifall man höll lägsta temperatur under fryscykeln olika lång tid samt hur den lägsta temperaturen under fryscykeln påverkade avskalningen. Resultaten visade att en ökad tid vid lägsta temperaturen ökar avskalning och att en sänkning av lägsta temperatur ökar avskalningen.

(Bouzoubaa. N, 2011) har studerat vilka testmetoder som är mest representativa för de förhållande som trottoarer utsätts för. För att göra det har provkroppar testats enligt ASTM C 672, BNQ NQ vilka finns beskrivna i kapitel 5, och i fält. De har även testat hur väl 25 % flygaskeinblandning och cement med tre komponenter i det

här fallet cement, flygaska och silika klarar sig mot avskalning. De olika förkonditioneringarna som använts är standard (se kapitell 4) ASTM C 672, ASTM C 672 med 14 dagars uttorkning i rumstemperatur, ASTM C 672 med en veckas återuppfuktning med saltlösning, BNQ standard och i en utomhusmiljö. Det visade sig att de proverna som förkonditionerats enligt ASTM C 672 standard och ASTM C 672 var de som hade mest lika resultat som den som förvarades i fält. Det kan tilläggas här att den som fått torka hade en lite högre avskalning än den som inte hade det. Resultaten visade även att betongen som innehöll flygaska klarade sig sämre oavsett testmetod.



## 4 Standardmetoder för att mäta saltfrostbeständigheten hos betong

För att bestämma saltfrostbeständigheten hos en betong låter man betongen vara i kontakt med saltlösning med en bestämd koncentration samtidigt som man fryser och tinar proverna. Frysningen leder till att betongen skadas vilket analyseras antingen genom att väga materialet som lossnar eller göra en okulär bedömning av betongen och då erhålls en uppfattning av betongens saltfrostbeständighet. Olika provmetoder har olika bedömningar men överlag har en massa under 500 g/m<sup>2</sup> försvunnit från betongen eller om den okulära bedömningen visar små förändringar på ytan, max ett par millimeter avskalning hos betongen har den en bra saltfrostbeständighet. Om mycket massa över 1000 g/m<sup>2</sup> har lossnat från betongen eller den okulära bedömningen ser stora förändringar till exempel synlig ballast på betongen har den en låg saltfrostbeständighet.

### 4.1 CDF (Janssen, 1996)

CDF står för "capillary suction on deicing solution and freeze-thaw test" (kapillärsugning av tössalter och frys-tö test) (Janssen, 1996). Metoden är framtagen för att med så lite utrustning som möjligt få ett resultat som är enkelt att återskapa. Proverna som gjuts genomgår 24 timmars härdning innan de avformas, efter avformningen vattenhärdas de i 6 dagar för att sedan torkas ut i 21 dagar i ett klimatrum (20 °C och 65 % RH).

Vid CDF försök ska en lösning av tre mass % natriumklorid och 97 % antingen avjoniserat eller demineraliserat vatten användas. Provkroppen placeras i saltlösningen och isoleras för att minimera risken för avdunstning.

Fryscykeln som används är 12 timmar lång och varierar mellan 20 och -20 °C. Avkylningen och uppvärmning sker med 10 °C per timme vilket mäts i en referenspunkt i saltlösningen. Saltlösningen hålls vid -20 °C i två timmar och vid +20 °C i två timmar (Janssen, 1996).

Saltfrostbeständigheten bestäms genom att väga materialet som förloras från kontaktytan mellan lösning och betong.

### 4.2 Boråsmetoden ss 137244 (Farstad, 1991)

Boråsmetoden även känd som ss 137244 är en svensk avskalningsmetod där provkroppen som är ca 50 mm tjock sågas ut från en cylinder eller kub. Sågningen sker först 28 dagar efter gjutning där den härdats en dag i form täckt med plast, sju dagar i ett vattenbad och 21 dagar i ett klimatrum med en temperatur på ca 20 °C och RH 60 %. Efter sågningen torkas de ytterligare 7 dagar under samma förhållande.

Provet placeras sedan i en form där kanterna sticker upp 20mm över provkroppen. En 3mm 3 % natriumklorid fylls på över den sågade ytan av provet vilket sedan hindras från avdunstning med en plastfilm. Temperaturen varierar från ca 20 °C till -20 °C under ett dygn och avskalningen mäts var sjunde dag och mängden avskalning definieras som massa torrt material per m<sup>2</sup> provyta. Efter 56 cykler bedöms betongen som väldigt bra ifall mängden avskalning är under 0,1 kg/m<sup>2</sup> under 0,5 kg/m<sup>2</sup> är den bra och under 1 kg/m<sup>2</sup> acceptabel.

### 4.3 ASTM C (Lindmark, 1998)

ASTM har krav på kontaktytan och höjden på provkropparna där ytan inte får understiga 460 cm<sup>2</sup> och höjden ska vara över 75 mm. När betongen har glättats skapas ett dike i mitten av provkroppen. Sedan placeras en gummifilm av polyeten runt provkroppen. Provkroppen avformas efter 20 till 24 timmar och placeras sedan i ett klimatrum vilket håller en temperatur på 23 ± 1,7 °C och har en RF på över 95 %. I klimatrummet hålls de i 14 dagar för att sedan flyttas till ett utrymme med 23 ± 1,7 °C och RF på 45–55 % under 14 dagar till. Efter förkonditioneringen placeras 4 vikts % CaCl<sub>2</sub> och 96 vikts % avjoniserat vatten (Chidiac, 2007) i ett lager på 6 mm över provkroppen. Provet befinner sig fruset vid -17,8 ± 2,8 °C under 16–18 timmar för att sedan tas ur frysen och hållas vid 23 ± 1,7 °C med en RF på 45 till 55 % under 6 till 8 timmar (Lindmark, 1998). Lösning tillsätts efter varje cykel för att säkerställa djupet på lösningen. Var femte cykel spolras provet av och inspekteras. 50 fryscykler

är standard innan provet är färdigt. Resultaten fås av en okulär bedömning på en skala från 0 till 5 där 0 är ingen avskalning och 5 är allvarlig avskalning vilket betyder att ballasten sticker ut längs med hela provytan (Lindmark, 1998).

#### 4.4 MTO LS (Chidiac, 2007)

Vid användandet av MTO LS-412 metoden ska provet ha måtten 300 x 300 x 75 eller motsvarande kontaktyta. 24 timmar efter gjutning ska proverna avformas och placeras i en miljö där temperaturen är mellan 21 och 25 °C med en relativ fuktighet av minst 95 %. Efter 13 dagar i dessa förhållanden ska provkroppen härddas 14 dagar i samma temperatur men med en relativ fuktighet mellan 45 och 55 %. Över provkroppen ska sedan en 6 mm lösning placeras som har 3 vikts % NaCl och 97 vikts % avjoniserat vatten. Provkroppen ska sedan utsättas för 50 fryscykler varav en cykel är 24 timmar. Temperaturen går mellan -18°C och 22°C under cykeln och provkroppen hålls i -18°C under 16-18 timmar (Chidiac, 2007). Det avskalade materialet vägs kontinuerligt under försöken.

#### 4.5 BNQ NQ 2621-900 (Bouzoubaa. N, 2011)

Här används en 3 % lösning av natriumklorid. I den här metoden vattenhärddas provkropparna i 13 dagar för att sedan torkas i 14 dagar och uppfuktas under sju dagar i natriumklorid. Provkropparna som används kan vara runda eller fyrkantiga men måste ha en ytarea på med än 0,05 m<sup>2</sup>. Uppfuktningen är tänkt att simulera verkligheten i den mening att när vägar börjar saltas tar det oftast ett par dagar innan det fryser kraftigt (Bouzoubaa. N, 2011). Fryscykeln som används börjar vid 12 °C och sänks till -20 °C under 12 timmar, hålls konstant i 6 timmar för att sedan värmas upp under 6 timmar.

#### 4.6 Sammanfattning provmetoder

Lösningen som används varierar något beroende på vilken metod som används men vanligen används 3 % natriumkloridlösning (BNQ NQ 2621-900, MTO LS, Boråsmetoden och CDF). Av de metoder som har studerats är det enbart ASTM C som använder sig av kalciumklorid istället för natriumklorid och använder sig av fyra % istället för tre. Hur man avgör avskalningen skiljer sig mellan en okulär bedömning av provet och vägning av det avskalade materialet. ASTM C är även i det här fallet metoden som skiljer sig något från standarden i och med att de använder en okulär besiktning istället för vägning som de flesta andra metoder. CDF placerar provkroppen i lösningen så att den får suga upp lösningen till skillnad från de andra metoderna där lösningen placeras ovanför.

Det mest vanliga är att fryscykeln varar i 24 timmar men CDF metoden har en 12 timmars cykel.

## 5 Saltfrostprovningssmetod som använts i denna undersökning

Frystesterna utförs genom att proverna placeras i en isolerad form där en skål som innehåller 100 ml 3 mass % NaCl placeras i botten. Proverna hålls fast i locket där ett hål skurits ut med hjälp av gummilisten som sitter på varje prov. När formen sätts ihop är provet några millimeter över botten på skålen vilket säkerställer att testytan har fri tillgång till vatten.



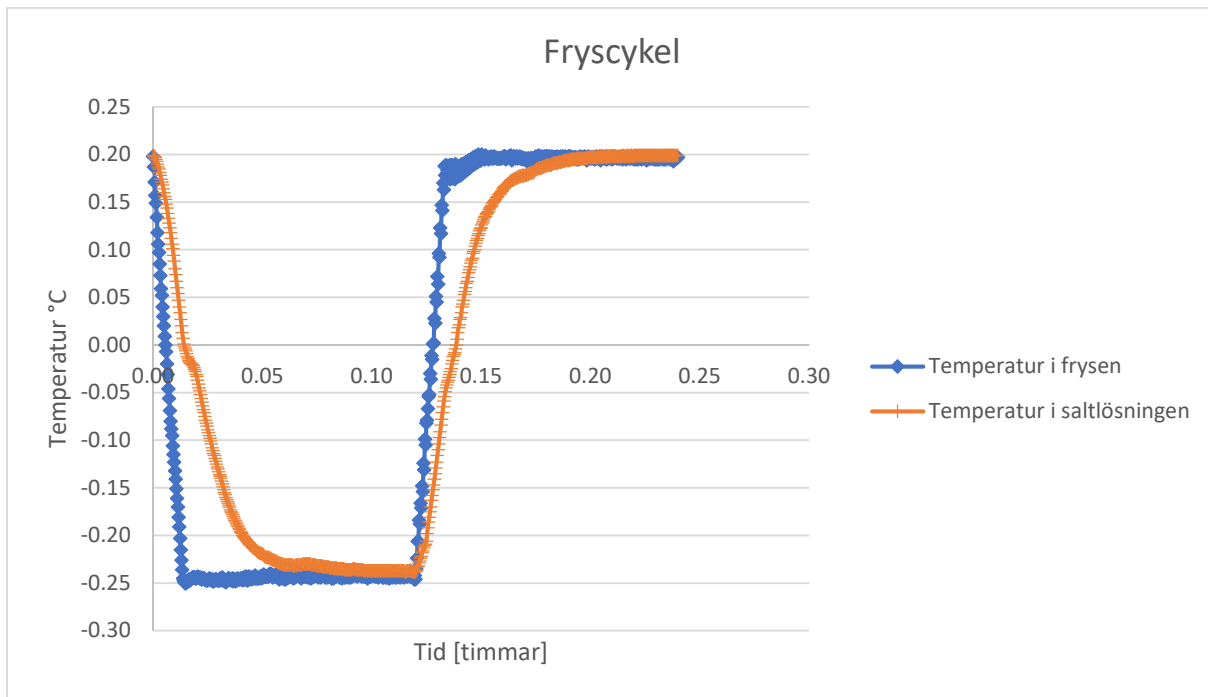
*Figur 5 Prov vid avskalningsmätning. Skålen i botten innehåller saltlösning med avskalat material.*

De utsågade proverna delas upp i omgångar vilka genomgår 28 cykler i en frys där temperaturen varierar mellan ca -24 °C och 20 °C. Var sjunde cykel tas proven ut ur frysen och det avskalade materialet samlas upp se Figur 5. För att samla upp avskalningen töms vattnet som är kvar i skålen ner i ett kaffefilter. Provkroppen borstas även av och materialet som lossnar hålls även det ner i kaffefiltret. Filtret placeras i en ugn som håller 105 °C under minst 3 dygn för att säkerställa att det är helt torrt. Tidigare tester på filtrets vikt efter uttorkning visar att de väger 1,73 +/- 0,01 gram efter uppfuktning med saltlösning och uttorkning (Strand, 2016).

### 5.1 Fryscykel

Fryscykeln som används har en temperaturförändring i luften på 30 °C per timme under både frysning och upptining se Figur 6. Temperaturen varierar mellan - 25 till +20 °C och högsta och lägsta temperaturen hålls drygt tio timmar vardera. Fryscykeln leder till att temperaturen i saltlösningen förändras med ungefär 10 °C per timme vid frysning och upptining. Saltlösningen hålls vid lägsta och högsta temperaturen i cirka sex timmar vardera.





Figur 6. Fryscykel, temperatur i frysen respektive saltlösningen.

## 6 Metod

### 6.1 Material

Bindemedlen som har använts under försöken är Anläggningscement Degerhamn (CEM I 42,5 N – SR 3 MH/LA) från cementa, Flygaska från Eminent a/s och masugnsslagg från MEROX.

Använda kombinationer av bindemedlen är 100 % anläggningscement, 65 % anläggningscement och 35 % flygaska, och 65 % anläggningscement och 35 % slagg.

Luftporbildare Sika AirPRO (SE) conc har använts, se Tabell 1 för mängd.

Flyttillsatsmedel Sika ViscoCrete RMC-520 användes se Tabell 1.

### 6.2 Recept

Tabell 1 recept sättmått, lufthalt och densitet

Receptbeteckning	A	F	S
Vatten [kg]	12,04	12,04	11,2
Anläggningscement [kg]	30,1	19,6	19,6
Flygaska [kg]	0	10,5	0
Slagg [kg]	0	0	10,5
Ballast 0-8 [kg]	64,93	65,05	65,05
Ballast 8-12 [kg]	19,13	19,07	19,07
Ballast 12-16 [kg]	36	35,95	35,95
Flyttillsatsmedel [gram]	250	250	250
Luftporbildare [gram]	50	85	50
Sättmått [cm]	6	3	6
Lufthalt [%]	4,9	5,7	4,9
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	2347	2283	2307

### 6.3 Gjutning

Tre satser betonger med tre olika bindemedel, OPC, flygaska och slagg (se Tabell 1 för recept) har gjutits i formar med höjden 20 cm och en diameter på 10 cm. Innan gjutningen började gjordes en fukthaltsmätning på ballasten vattenmängden som tillsattes justerades med mängden som redan fanns i stenarna. För att få en homogen blandning på ballasten blandades de först i blandaren. När stenarna och gruset hade homogeniserats i blandaren hälldes bindemedlet i och en kortare blandning gjordes. Den korta blandningen är tänkt att fördela bindemedlet jämt och var tvungen att hållas kort annars försvinner de små kornen och cementen som rök. Därefter hälldes vattnet och luftporbildaren i tillsammans och efter cirka 2,5 minuters blandning tillsattes flyttillsatsmedlet i två till tre små omgångar för att kunna stanna blandaren och göra en okulär bedömning så att konsistensen på de tre satserna betong blev så lika som möjligt. Ett prov togs med lufthaltsmätare för att bestämma mängden luftporer i betongmassan, Tabell 1. För att testa arbetsbarheten på betongen togs även ett sättmått, Tabell 1. Efter 24 timmars härdning avformades proverna och vattenhärdades i sju dagar. Proverna placerades sedan i en tätförsluten påse som blöttes ner innan förslutning för att garantera 100 % relativ fuktighet fram till den eventuella torkningen eller vattenuppsugningen skulle börja. Proverna sågades sedan upp innan den specifika

uttorkningen eller uppfuktningen skulle påbörjas i fyra lika stora provkroppar vilka blir ungefär 4,7 cm höga. Samtliga prover limmades med Xtremefix från Casco på sidan av provet vilket säkerställer att mantelytan inte släpper in något vatten så att uppsugningen enbart sker genom den provade ytan. Runt om provkroppen fästs en gummiduk, Figur 7 vilket även den är tät vilket minskar risken ytterligare att uttorkning, uppfuktning och avskalning sker på sidorna.



*Figur 7. Provkropp innan frystester påbörjas.*

## 7 Försöksserie

### 7.1 Förkonditionering

De prov där uttorkningens inverkan på avskalningen testades placerades med provytan fritt exponerad i ett klimatrumsrum där temperaturen hölls konstant på 20 °C och en relativ fuktighet på 60 %. Provernas ursprungsvikt bestämdes innan gummilisten limmades på för att minimera osäkerheten i viktsskillnaderna som limmet och gummilisten skulle kunna bidra med under uttorkningsmätningarna. Med den relativa vikten menas andelen av ursprungsvikten som har torkat ut. Proverna vägdes sedan kontinuerligt två gånger per vecka under hela uttorkningsförloppet för att dels se hur mycket den totala uttorkningen var men även för att se om det var någon skillnad på uttorkningskurvorna för de olika proverna.

När proverna ligger i ett vattenbad används en balja och distanser för att provytan ska vara helt i kontakt med vatten och inga prov ska ligga emot varandra. Vattnet täcker under återuppfuktningen hela provet.

Tabell 2 är en sammanfattning av förkonditioneringen där A, S och F står för bindemedelskombination OPC, OPC med 35 % slagg och OPC med 35 % flygaska. Numret direkt efter A, S eller F står för vilken försöksserie de tillhör (1) där olika ytor testas, (2) där uppfuktningstiden varierades och (3) där inverkan av torkning undersöks. Siffrorna eller bokstäverna efter bindestreck beskriver vilket prov de tillhör T är glättad yta, MB är en sågad yta, B är formytan, 29, 1 och 0 innebär antalet dagar de fuktas upp och samtliga av dessa är sågade ytor.

Tabell 2. Sammanfattning över förkonditioneringarna. Siffrorna representerar antalet dygn proverna har konditionerats, sågning är åldern på betong vid utsågning av provkroppen.

Omgång 1	Plastpåse	torkning	Vattenbad	Sågning
A1-T, -MB, -B S1-T, -MB, -B F1-T, -MB, -B	19	0	1	28
Omgång 2				
A2, S2, F2 - 29	19	0	29	28
A2, S2, F2 - 1	47	0	1	55
A2, S2, F2 - 0	48	0	0	56
Omgång 3				
A3, S3, F3 - 29	19	28	29	28
A3, S3, F3 - 1	47	28	1	55
A3, S3, F3 - 0	48	28	0	56

### 7.2 Omgång 1 - inverkan provningsyta

Omgång 1 undersöker skillnader i saltfrostavskalning beroende på vilken yta det är som testas. De tre ytorna som testades var en glättad gjutyta, en inre sågad yta och botten som motsvarar en formyta.

Samtliga prover till första omgången har efter vattenbadet i sju dagar härdat i plastpåse i 19 dagar. De limmades 5 dagar innan sågning för att säkerställa att limmet torkat tillräckligt för att behålla sin vidhäftning under vattenhärdning. Provkropparna har sedan sågats i fyra cylindrar som är 47 mm höga och 100 mm i diameter och uppifrån sett har första, tredje och fjärde delkroppen använts. Den första provkroppen har döptes till T (topp), tredje till MB (mitt närmast botten) och den fjärde till B (botten). T proverna testas den glättade ytan MB testas den sågade ytan närmast mitten på den ursprungliga provkroppen och B testas formytan som blivit i botten av gjutformen. Efter sågning har proverna lagts ner i vatten i 24 timmar och togs upp när frystesterna skulle börja.

Totalt testas 27 prover i omgång 1, 9 stycken Anläggningscement, 9 stycken Anläggningscement + flygaska och 9 stycken Anläggningscement + slagg.

Då ett misstag skedde under en flytt mellan två frysar så har proverna med enbart Anläggningscement genomgått 7 cykler för att sedan ligga med provytan i en saltlösning som haft temperaturen 18°C sju dagar för att sedan tas upp och borstas av och sedan läggas tillbaka i saltlösningen igen i sju dagar. Efter den nya förkonditioneringen kommer proven att genomgå 31 cykler. Det spelar inte så stor roll då det är den ackumulerade avskalningen efter 28 dagar som jämförs mellan provomgångar.

Då betongen med flygaska eller slagg inte hade påbörjat sina cykler innan misstaget inträffade har de aldrig frusits utan bara legat i saltlösning under lika lång tid som proverna med Anläggningscement med samma borstnings och vattenbytesprocedur. När misstaget upptäcktes togs de ut från saltlösningen och placerades i vattenbad under 39 dagar för att sedan påbörja 28 fryscyklar.

### 7.3 Omgång 2 - inverkan av uppfuktning

I denna omgång studerades vilka skillnader som uppstår beroende hur länge betongen fått fri tillgång till vatten innan provningen börjar. Proverna limmades innan sågning vilket innebar att proven kunde läggas i vattenbad direkt efter sågningen vilket därmed innebär att provytan aldrig torkades. Det är enbart sågade ytor som provas. Proverna har efter sju dagars vattenhärdning förvarats under 48 dagar antingen i plastpåse (och därmed enbart utsatts för självuttorkning) eller vattenbad efter sågningen. Av dessa 48 dagar har provernas testytor legat i vattenbad för återuppfuktning under 0, 1 eller 29 dagar. De som inte skulle återuppfuktas placerades i testformarna med 3 % NaCl lösning direkt efter sågning, se Tabell 2.

### 7.4 Omgång 3 – inverkan av uttorkning

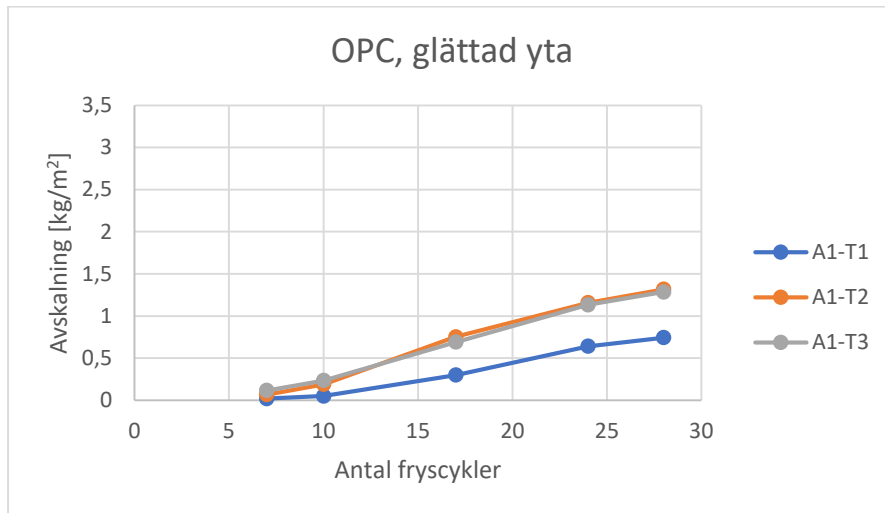
Här studeras hur uttorkning påverkar avskalningen. Här har proverna torkats i 20 °C med en relativ fuktighet på 60 % under 28 dagar innan de får absorbera vatten. De får absorbera vatten under lika lång tid som proverna i omgång två det vill säga 0, 1 eller 29 dagar, se Tabell 2.

## 8 Resultat och diskussion

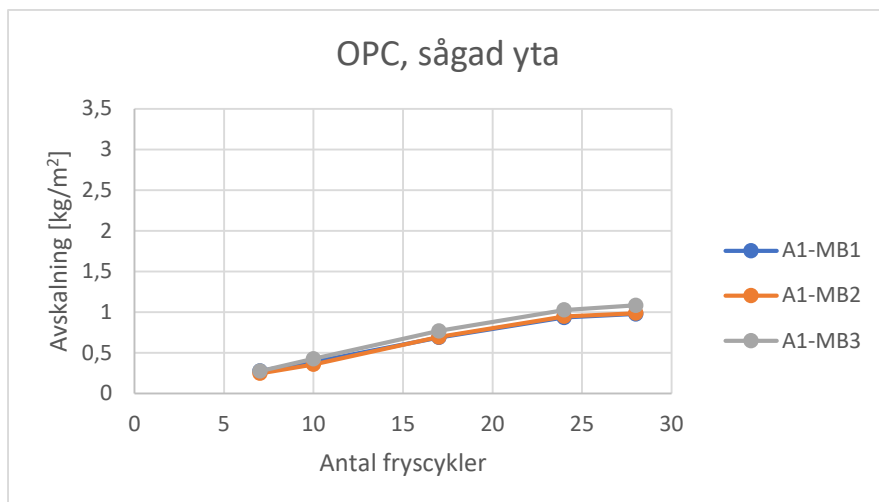
### 8.1 Jämförelser mellan provkroppar

Figur 8, Figur 9 och Figur 10 visar på avskalningsvariationerna för OPC för glättade prover, sågade prover och formprover. I dessa figurer kan man se att variationen är stor på de glättade proverna, mindre för formproverna och lägst för de sågade proverna. Figur 8 visar att slutresultatet för A1-T1 som skalats av mindre i början närmar sig samma mängd som de andra provkropparna. För formyteproverna är det också provkropp 1 det vill säga A1-B1 som skiljer sig ifrån de andra provkropparna men i det här fallet är avskalningen mindre, se Figur 10.

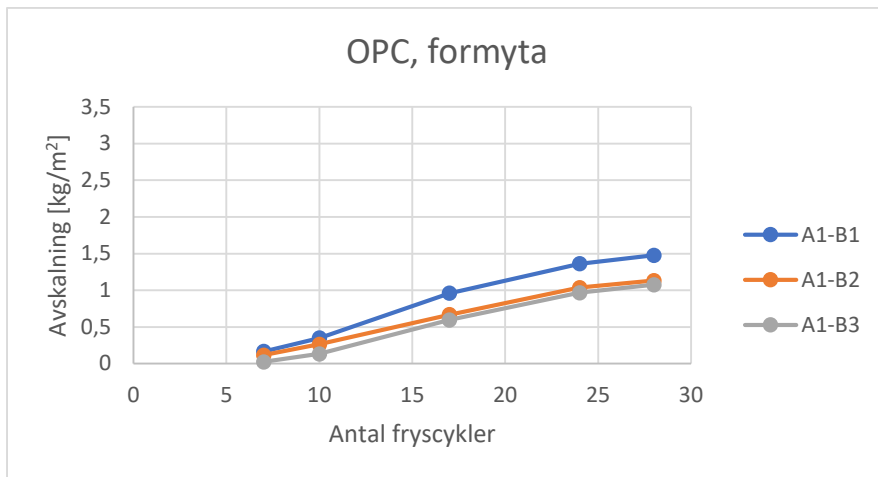
Från ovanstående dras slutsatsen att resultaten från OPC och glättade ytor kanske inte är så tydliga då skillnaden på proverna är större än för de andra proverna men en trend kan ses och diskuteras i kapitel 8.2.



Figur 8 Mängd avskalat material för de olika glättade proverna med OPC.

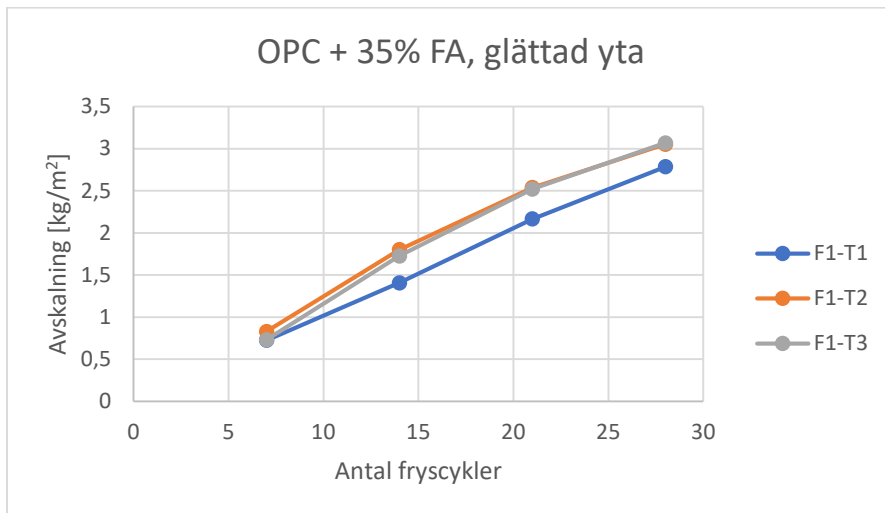


Figur 9 Mängd avskalat material för de olika sågade proverna med OPC.

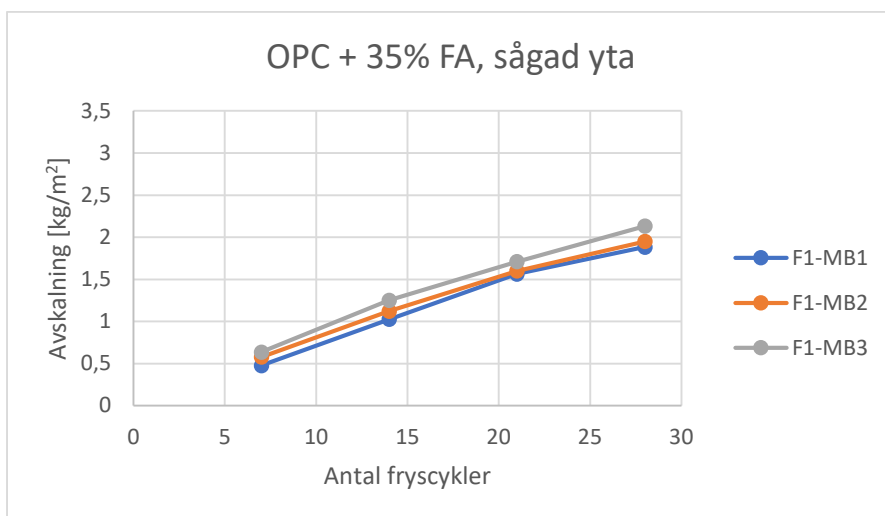


Figur 10 Mängd avskalat material för de olika formytsproverna med OPC.

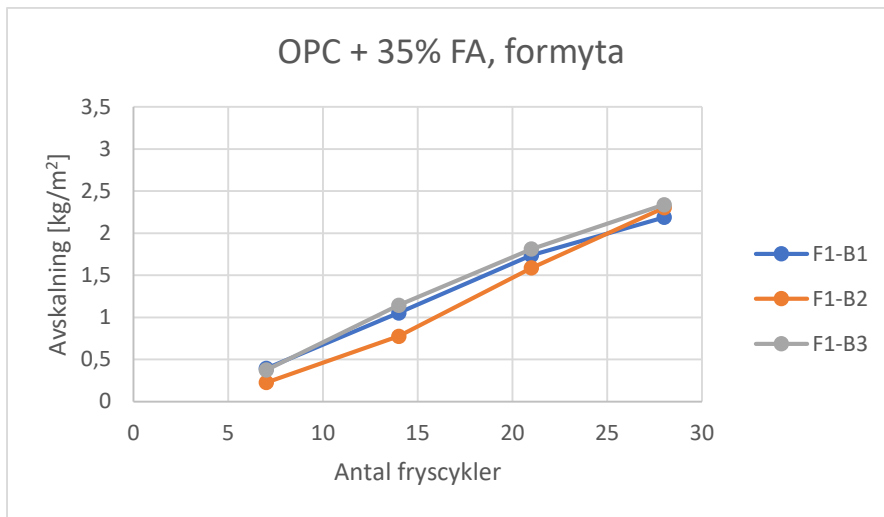
Figur 11, Figur 12 och Figur 13 visar avskalningsvariationer när betongen har gjutits med inblandning av 35% flygaska. För den här betongen var spridningen relativt låg för alla provytor men lägst för den sågade ytan. Proverna från samma provyta uppvisar snarlik avskallning speciellt vid resultaten efter 28 fryscyklar.



Figur 11. Mängd avskalat material för de olika glättade proverna med 35% flygaskeinblandning.

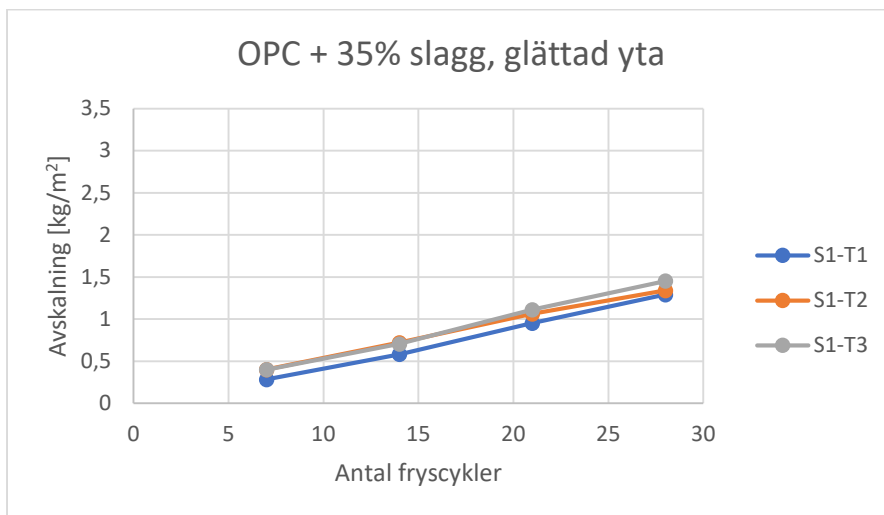


Figur 12. Mängd avskalat material för de olika sågade proverna med 35% flygaskeinblandning.

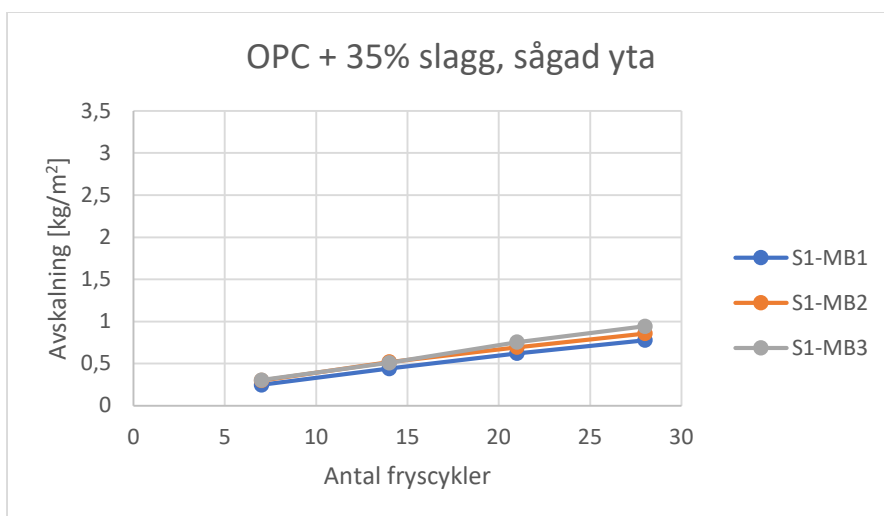


Figur 13. Mängd avskalat material för de olika formytsproverna med 35% flygaskeinblandning.

Avskalningen för prover med olika ytor och med 35% slagg visas i Figur 14, Figur 15 och Figur 16. Här har den glättade ytan minst spridning. De sågade proverna är också lika men 28 dagars resultaten skiljer sig mer åt än de glättade. För formytan erhålls en högre spridning där provkropp ett har en högre avskalning än de resterande.

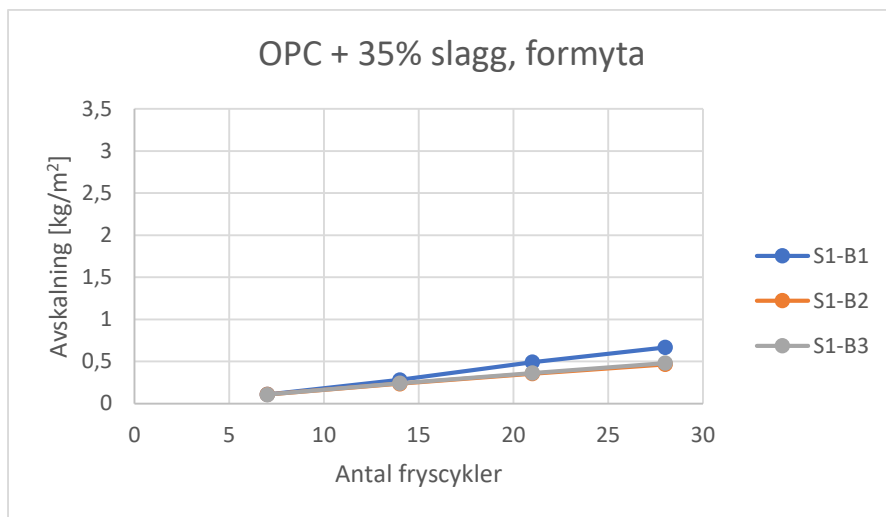


Figur 14. Mängd avskalat material för de olika glättade proverna med 35% slagginblandning.



Figur 15. Mängd avskalat material för de olika sågade proverna med 35% slagginblandning.





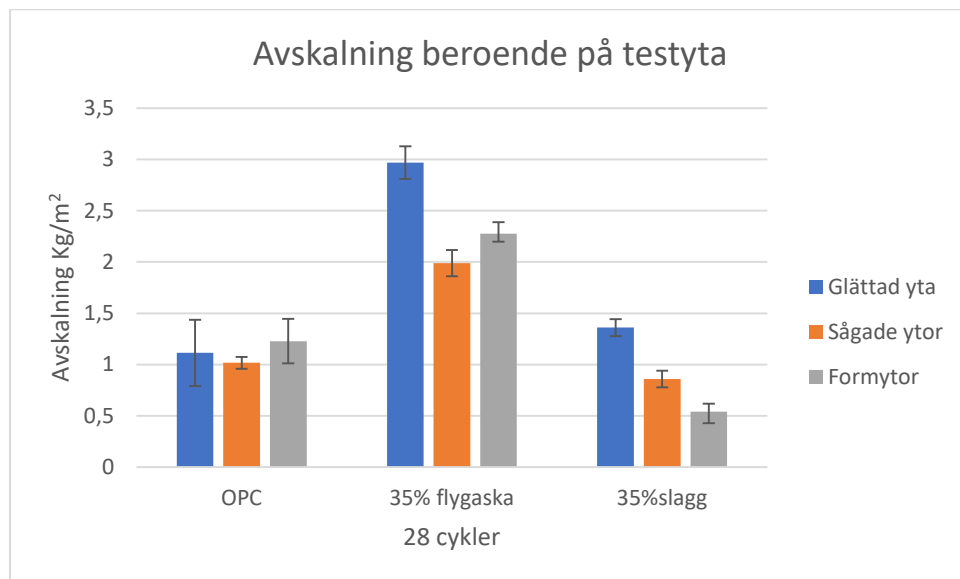
Figur 16. Mängd avskalat material för de olika formytsproverna med 35% slagginblandning.

Från jämförelserna mellan provytor och bindemedelstyp kan man se en viss skillnad på vilka prover som har minst spridning i resultaten. För OPC har de sågade proverna mer lika avskalning än vad både de glättade och formytorna. Flygaskeinblandad betong har väldigt låg spridning oberoende av testytan men formytan har något lägre spridning än vad de andra har. För den slagginblandade betongen har toppytan minst spridning.

Eftersom den yta som genererar bästa resultat varierar med bindemedelskombination är det möjligt att standardtester borde göras på olika ytor beroende på vilken bindemedelskombination som ska testas. Detta stärks av (Chidiac, 2007) som visat att beroende på vilken testyta som provas är det olika faktorer som påverkar. Lufthalten verkar inte ha någon inverkan på avskalning för den glättade ytan men för formytan minskas avskalningen med en ökad lufthalt (Chidiac, 2007). Fukthistoriken har en större påverkan på den glättade ytan som får en ökad avskalning med längre vattenhärdning mot formytan som inte påverkas (Chidiac, 2007).

## 8.2 Summering omgång 1

För att göra resultaten överskådliga har samtliga resultat summerats i Figur 17. Då alla resultat finns bredvid varandra är det lättare att se hur de olika bindemedlen förhåller sig till varandra och eventuella trender.

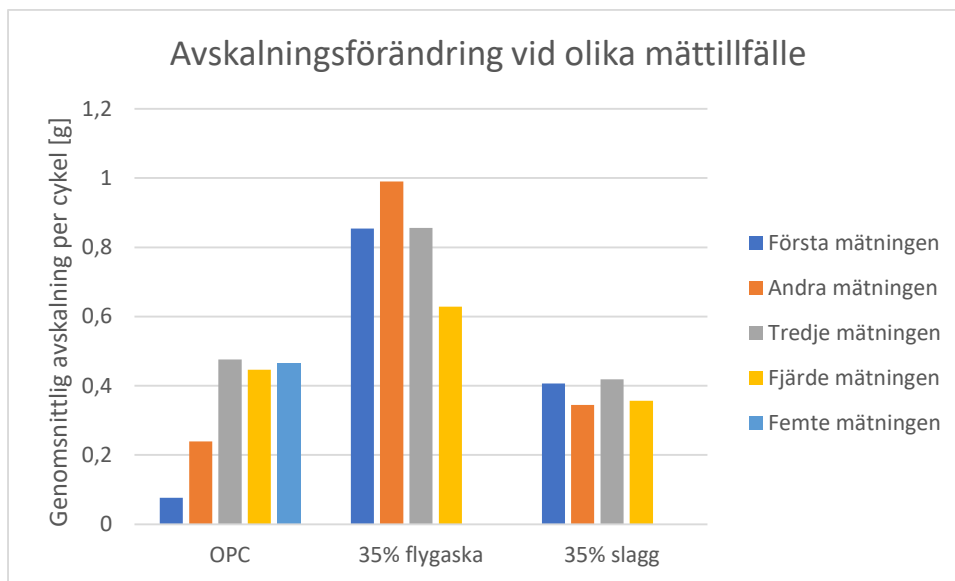


Figur 17. Avskalning efter 28 cykler från samtliga prover i omgång 1 som testat olika provtytor.

OPC och slagg uppvisar en lägre avskalning än flygaskan. Samtliga bindemedelskombinationer har en högre avskalning ifall den glättade ytan provas. För OPC och flygaska är det den sågade ytan som har lägst avskalning men för slaggen är det formytan.

Att flygaskan har en högre avskalning än resterande stämmer väl överens med resultaten från (Valenza II, 2007) och (Pigeon. M, 1996). Då försöken på flygaska gjordes efter mer än två månader är det troligt att betongen dragit nytta av flygaskans puzzolanska effekter vilket minskade skillnaden något då (Valenza II, 2007) visat en större skillnad då frystesterna utförs vid en tidig ålder.

Att den sågade ytan har lägre avskalning än den glättade ytan för både OPC och flygaskeinblandad betong har även (Pigeon. M, 1996) visat. Skillnaden mellan resultaten är dock ganska stora då han fick ungefär tio gånger så stor avskalning för den glättade ytan när han testade OPC vilket inte är fallet i den här studien. Att resultaten skiljer sig så mycket beror troligen på att han använde sig av en annan förkonditionering med två veckors vattenhärdning, två veckors uttorkning (där karbonatisering troligen har skett) och en veckas uppfuktning. (Pigeon. M, 1996) Visade att de första millimetrarna av den glättade ytan har en annan struktur än resterande del av betongen vilken är mer porös på grund av ett förhöjt vct varvid det antas att en viss vattenseparation har skett. Då det är större skillnad mellan flygaskans olika testtytor än vad det är för OPC i denna studie antas skillnaden i porositet vara större och att det kanske skett en mindre vattenseparation.

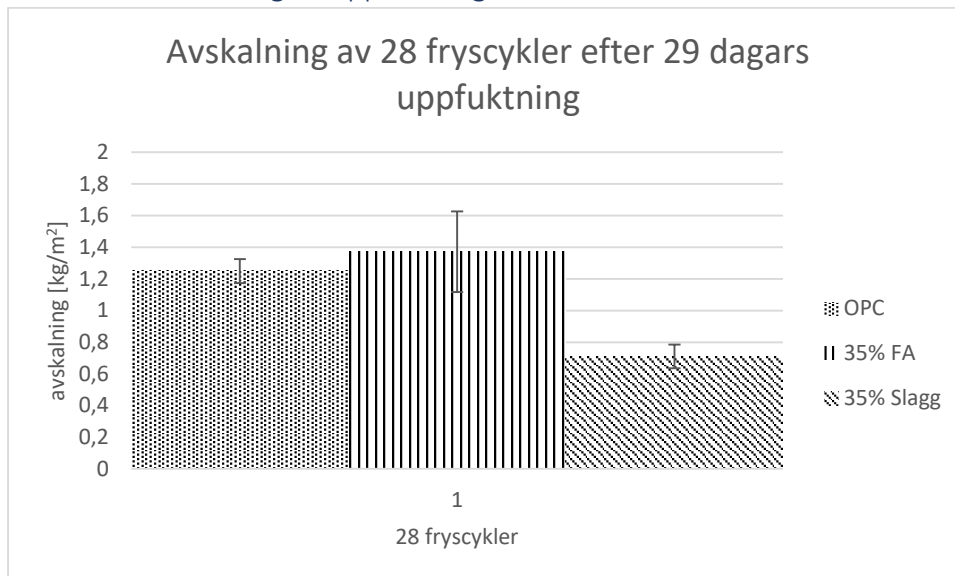


Figur 18. Avskalning vid varje mätningstillfälle för de glättade ytorna.

Då det troligen har skett en liten vattenseparation vid ytan för betongen med flygaska är det av intresse att se hur snabbt avskalningen tränger igenom lagret med sämre avskalningsmotstånd. För att ta reda på det har en jämförelse mellan avskalningarna för varje vecka gjorts, se Figur 18. För OPC ses att den första delen av den glättade ytan har en högre motståndskraft än längre ner i provet då avskalningen första cyklerna är ca 0,1 - 0,25 gram medan efter tio cykler ökar den till ca 0,45 gram och skalas ganska jämt av resterande tiden. En förklaring skulle kunna vara att när provkropparna togs ut ur plastpåsen och gummlisten limmades på exponerades den glättade ytan för luften i klimatrummet vilket kan ha lett till en karbonatisering och uttorkning av den översta ytan. Att karbonatisering av betongen leder till ett ökat avskalningsmotstånd för OPC har visats i (Utgenannt, 2004). För betongen med 35% flygaska ser man en liknande trend med en ökad avskalning efter sju cykler som även den kan förklaras med en ökad karbonatisering. Dock är skillnaden mellan avskalningen första 7 dagarna och de nästkommande 7 dagarna mindre än för OPC. Betongen med 35% flygaskas avskalningsmotstånd verkar öka med djupet vilket kan förklaras med att avskalningen tränger igenom den svagaste delen av betongen och med den en trolig vattenseparation i det översta lagret i likhet med det som visats i (Krishnan, 2006). Avskalningen är ungefär lika hög för betongen med slagg under hela förloppet och ingen trend går att se stämmer väl överens med (Bohlin, 2016) som visat att karbonatiseringen inte är lika avgörande för betong med 35% slagg som för OPC eller 35% flygaska.

### 8.3 Omgång 2 – inverkan av uppfuktning

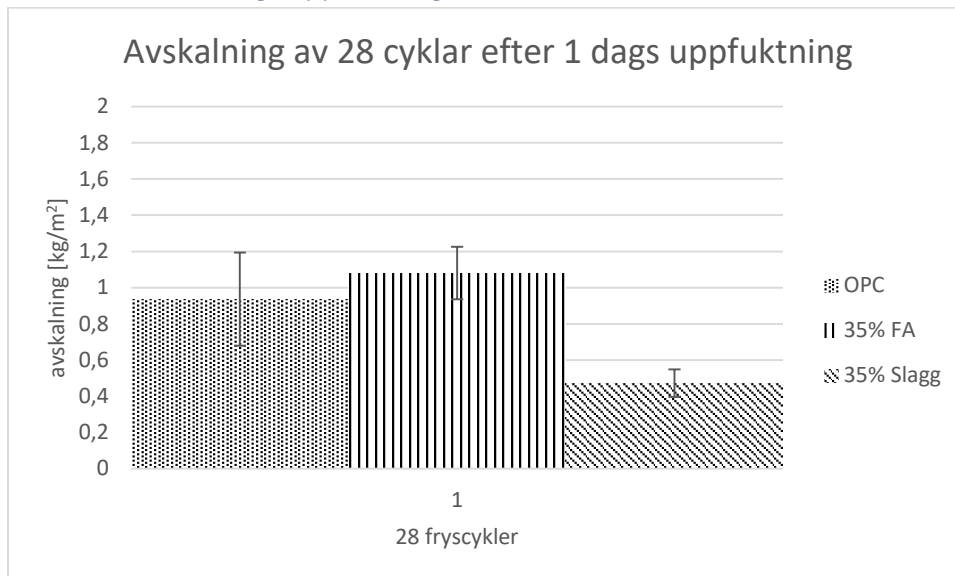
#### 8.3.1 29 dagars uppfuktning



Figur 19. Avskalning av 28 fryscyklar efter 29 dagars uppfuktning (samma härdningstid se Tabell 2), för OPC 35% flygaska och 35% slagg

Då betongen fått suga vatten under 29 dagar har OPC och flygaskeinblandad betong ungefär lika hög avskalning medan den slagginblandade betongen klarar sig avsevärt mycket bättre, fig 19. Spridningen i avskalningen hos flygaskebetongen är större än de andra kombinationerna.

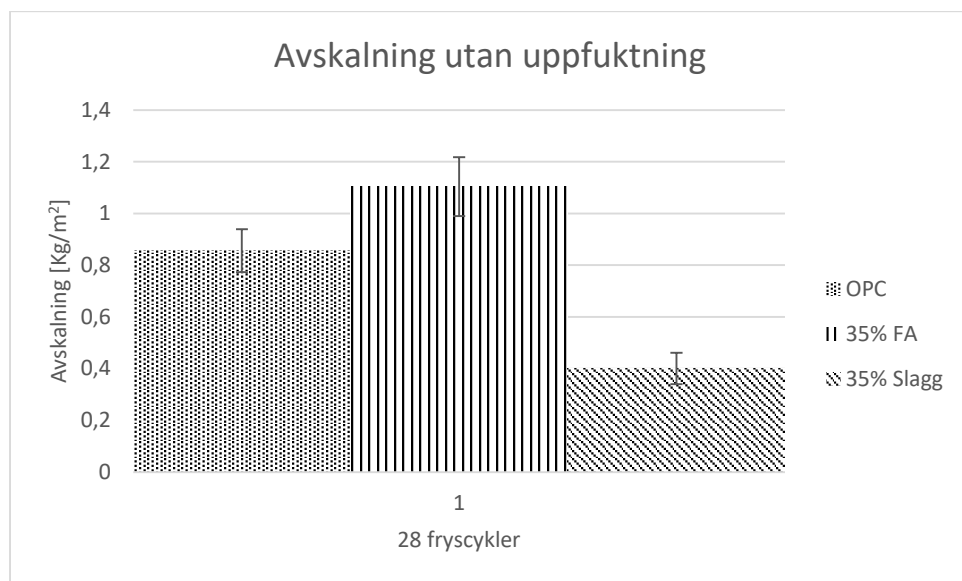
#### 8.3.2 1 dags uppfuktning



Figur 20. Avskalning av 28 fryscyklar efter 1 dags uppfuktning (samma härdningstid och uttorkningstid, se Tabell 2), för OPC 35% flygaska och 35% slagg.

Då betongen har sugit vatten under ett dygn ses samma trend som när den har sugit vatten i 29 dagar. Flygaska har högst avskalning och slagg minst, Figur 20. Skillnaden här är dock att spridningen är mycket högre för OPC proverna än den var när den fick suga vatten i 29 dagar.

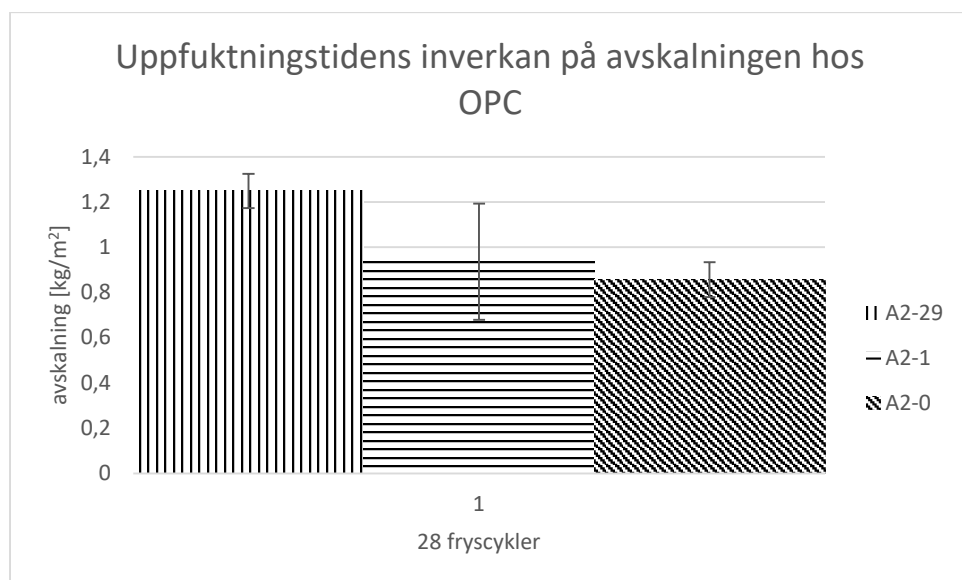
### 8.3.3 Ingen uppfuktning



Figur 21. Avskalning efter 28 fryscyklar utan uppfuktning (samma härdningstid och uttorkning), för OPC, 35% flygaska och 35% slagg.

När betongen inte fått fri tillgång vatten är spridningen lägre för alla prover men trenden är fortfarande samma, flygaska har högst avskalning och slagg minst, Figur 21.

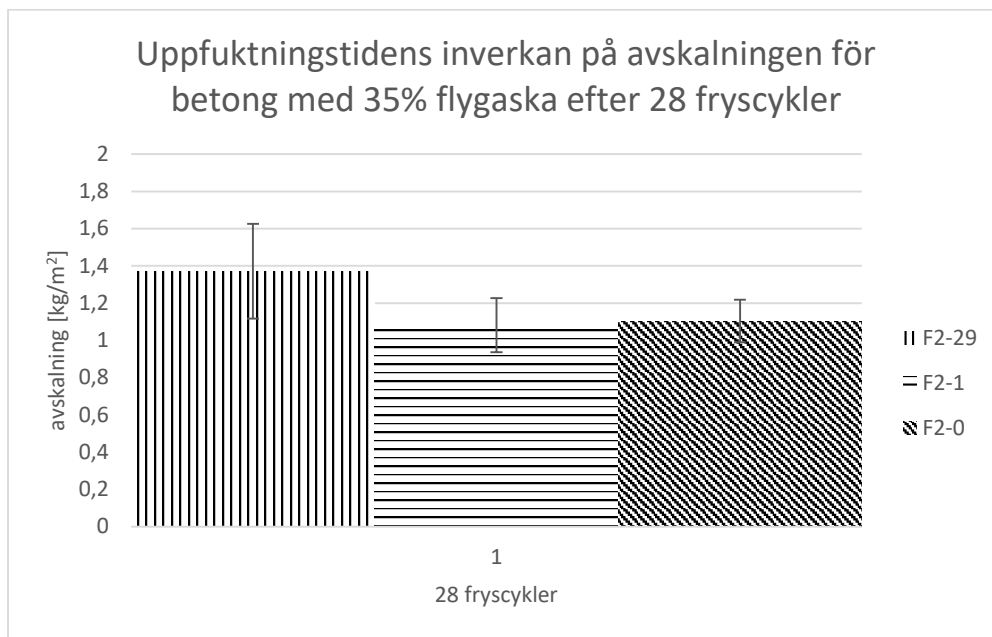
### 8.3.4 Jämförelser inom respektive betongtyp



Figur 22. Genomsnittlig avskalning efter 28 cykler hos OPC efter olika uppfuktningstid innan frysprovningen startade.

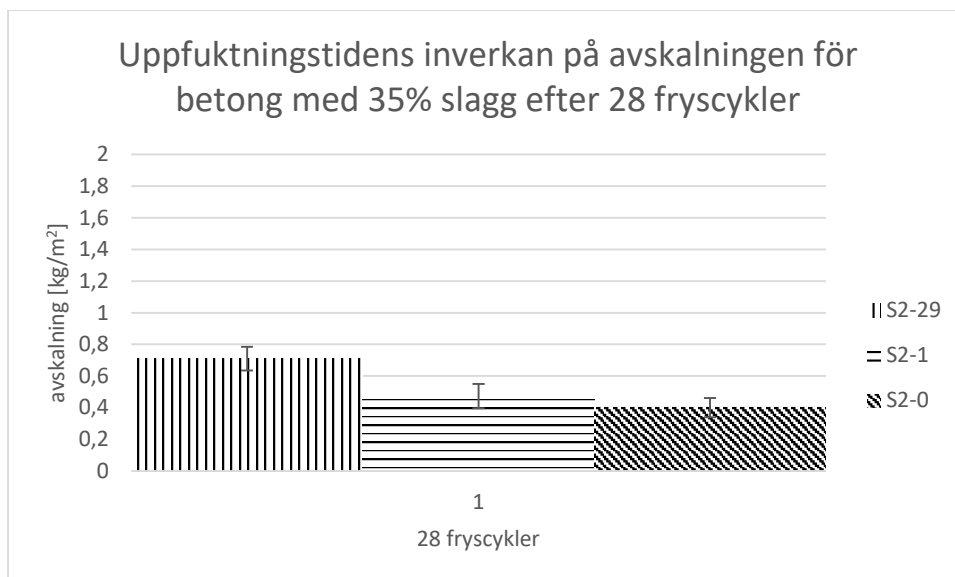
I Figur 22 ses avskalningen hos OPC efter det att provkroppen fått suga vatten i 29 dagar, 1 dag eller inga alls vilket skrivs som A2-29, A2-1 och A2-0. Värt att notera är att standardavvikelsen är avsevärt högre på de prover som fått suga vatten i en dag. Den höga standardavvikelsen för A2-1 beror till stor del på provkropp tre (A2-1-3, se bilaga 1 för mer detaljer) har en högre avskalning än de andra provkropparna. På grund av variationen inom

A2-1 blir inverkan av ett dygns uppfuktning mer osäker. 29 dagars uppfuktning är tydligt negativt för avskalningsmotståndet.



Figur 23. Genomsnittlig avskalning på flygaskainblandad betong efter olika uppfuktningstid.

Figur 23 visar hur avskalningen varierar efter olika uppfuktningstid för betong med 35% flygaskainblandning. Den genomsnittliga avskalningen är ungefär samma då betongen inte uppfuktats alls och när den fått uppfuktats i en dag. En negativ påverkan från uppsugningen sker dock ifall betongen får suga vatten under en längre tid vilket visas av att avskalningen för betongen som fått suga vatten under 29 dagar har en högre avskalning.



Figur 24. Genomsnittlig avskalning på slagginblandad betong efter olika uppfuktningstid.

Som ses i Figur 24 verkar all uppsugning av vatten vara negativt för avskalningen av betong med inblandning av 35% slag. Standardavvikelseerna för S2-1 och S2-0 har ett litet överlapp och antalet prover är litet vilket gör att det inte är helt tydligt om en dags uppsugning är värre än ingen alls. Den negativa inverkan kan dock ses vid 29 dagars uppfuktning vilket ihop med den något högre genomsnittliga avskalningen hos proverna som fått suga vatten i en dag visar en trend att ökad uppsugning av vatten leder till en ökad avskalning.

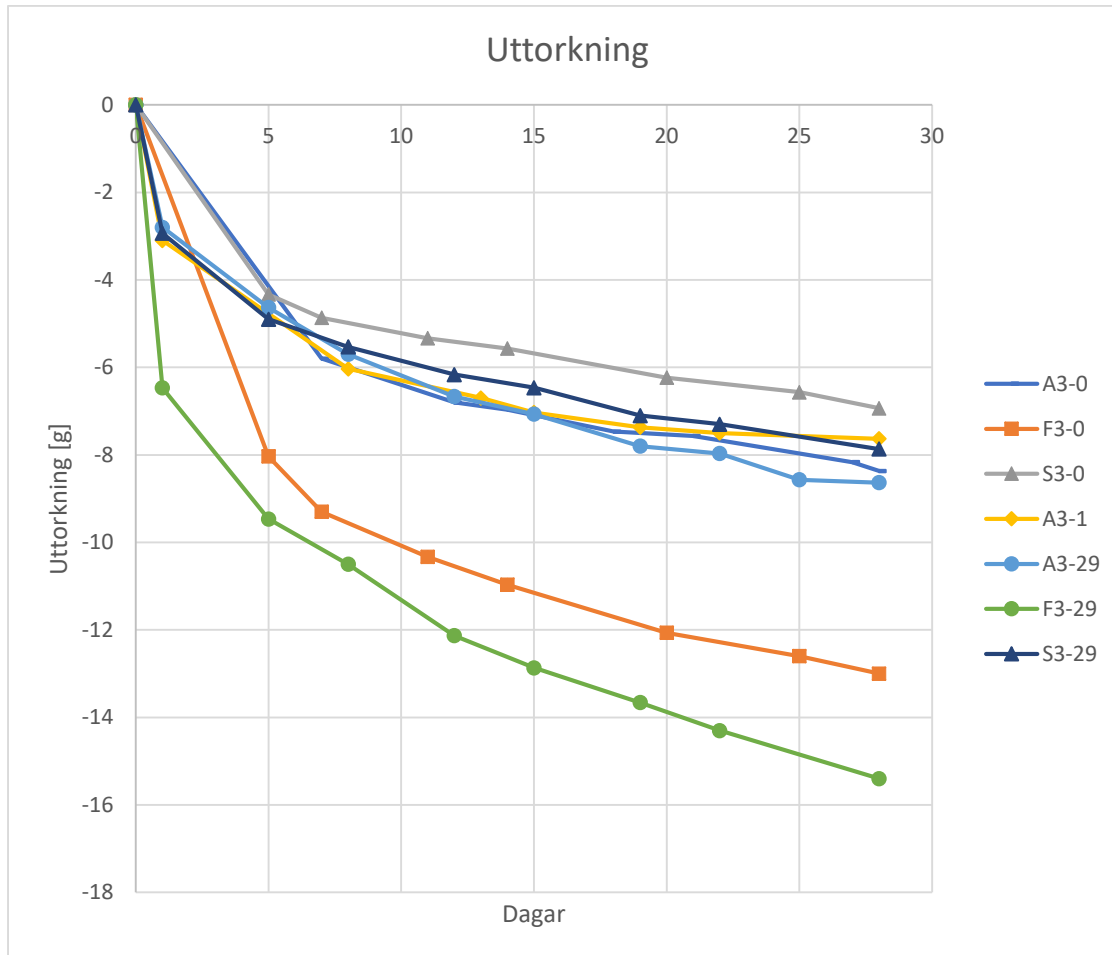
Tabell 3. Relativ inverkan på avskalning av uppfuktningstid.

Betongbeteckning	A2-0	A2-1	A2-29
Avskalning [kg/m <sup>2</sup> ]	0,86	0,94	1,25
Förändring från noll dagars uppsugning		9,3%	45,3%
Betongbeteckning	F2-0	F2-1	F2-29
Avskalning [kg/m <sup>2</sup> ]	1,10	1,08	1,37
Förändring från noll dagars uppsugning		-1,8%	24,50%
Betongbeteckning	S2-0	S2-1	S2-29
Avskalning [kg/m <sup>2</sup> ]	0,40	0,47	0,71
Förändring från noll dagars uppsugning		17,5%	77,5%

Tabell 3 visar procentuellt hur avskalningen har påverkats med tiden den fuktats upp. Där kan ses att betongen med flygaska påverkas minst av uppsugning med en ökning av 24,6 % efter 29 dagar. Betongen med Flygaska hade till och med en minskning på 1,6 % när den sugit vatten i en dag. Mest påverkan har uppsugningen på den slagginblandade betongen som ökade avskalningen med 17,8 % efter en dags uppsugning och 75,2 % efter 29 dagar. Flygaskan har dock fortfarande den högsta avskalningen.

## 8.4 Omgång 3 – Inverkan av uttorkning

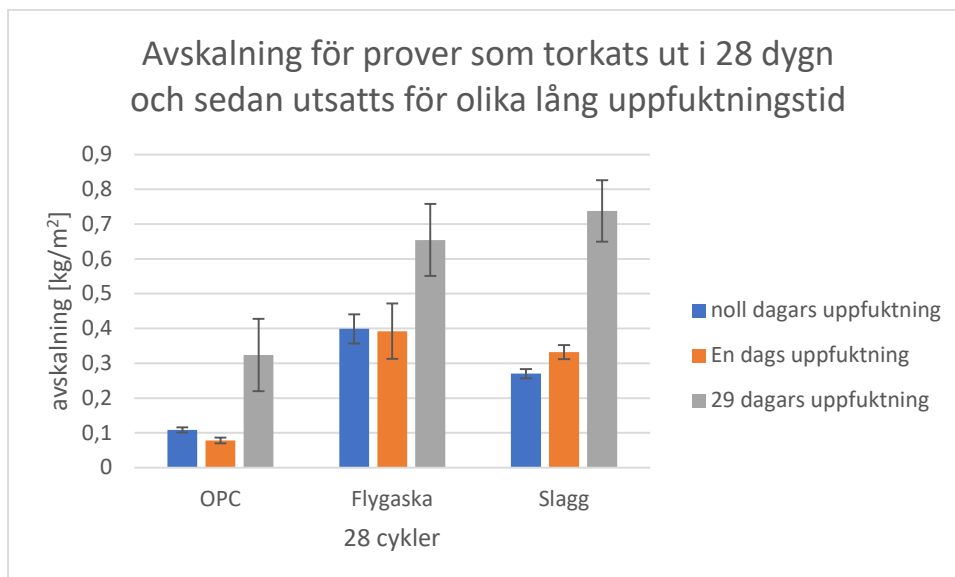
För att undersöka hur uttorkningen korrelerar med avskalningen har viktändringen under uttorkningen studerats. Provkropparna har torkats ut vid 20 °C och en relativ fuktighet på 60 %. Resultaten presenteras i Figur 25.



Figur 25. jämförelse av uttorkning för A3-0, A3-1, A3-29, F3-0, F3-29, S3-0 och S3-29.

I Figur 25 kan man se uttorkningen för alla prover utom S3-1 och F3-1 då de inte har mätvärden den första dagen och blir därför svåra att jämföra. Uttorkningen av betongen med flygaska är avsevärd högre än för OPC och den slagginblandade betongen. Betongen med slagg verkar ha en något lägre uttorkning men det är inte helt säkert då spridningen för proverna med slagg var större.





Figur 26. Avskalning av 28 fryscyklar efter 28 dagars uttorkning och olika uppfuktningstid.

Tabell 4. Relativ förändring av avskalning vid uppfuktning av karbonatiserad betong.

Betongbeteckning	A3-0	A3-1	A3-29
Avskalning [g/m <sup>2</sup> ]	0,11	0,08	0,32
Förändring från noll dagars uppsugning		-27,3%	191,0%
Betongbeteckning	F3-0	F3-1	F3-29
Avskalning [g/m <sup>2</sup> ]	0,40	0,39	0,65
Förändring från noll dagars uppsugning		-2,5%	62,50%
Betongbeteckning	S3-0	S3-1	S3-29
Avskalning [g/m <sup>2</sup> ]	0,27	0,33	0,74
Förändring från noll dagars uppsugning		22,2%	274,0%

Att en längre uppfuktningstid leder till en högre avskalning sågs i Figur 22, Figur 23 och Figur 24, verkar till en viss del gälla även för betong som fått torka ut i 28 dygn. Det anses då avskalningen på betongen som fått suga vatten i 29 dagar är avsevärt högre än för de som fått återuppfuktas bara en dag respektive de som inte fuktats upp, Figur 26. En skillnad mellan proverna som inte fått torka och de som fått torka är att det bara är slaggen som uppvisar en ökning med en dags uppfuktning medan de andra proverna får minskad avskalning om de får fuktas upp en dag.

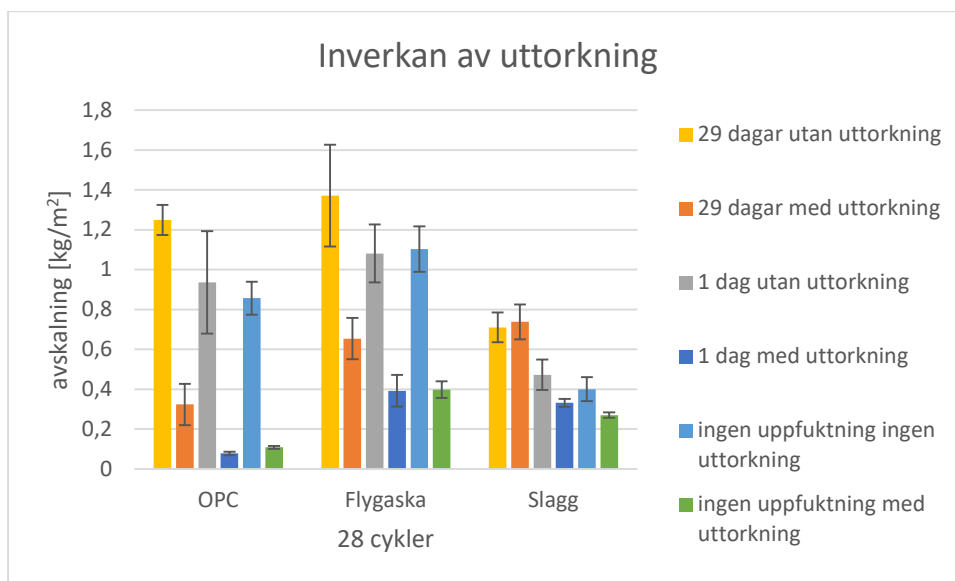
Om man jämför uttorkningen med avskalningen stämmer resultaten in på de som (Utgenannt, 2004) tog fram för slaggbetong. Han visade att en ökad uttorkning minskade avskalningen vilket inte verkar gälla för flygskabetong som i denna studie har högst uttorkning och samtidigt högre avskalning än de andra betongerna. En skillnad mellan studierna var att han testade samma betong vid olika ålder medan här jämförs olika betongtyper.

Den slagginblandade betongen fick större avskalning än OPC trots att uttorkningen är relativt lik. Detta indikerar att olika betongs saltfrostsmotstånd påverkas olika av uttorkning. Uttorkningen kan dock fortfarande medföra positiva eller negativa effekter för avskalningen men det går inte att säga att en betong som har hög uttorkning är beständig för avskalning eller vice versa.



## 8.5 Uttorkningens inverkan på avskalningen

För att se hur uttorkningen påverkar avskalningen har en jämförelse gjorts mellan provomgång två som inte har torkats innan de uppfuktats och omgång tre där proverna torkats ut innan återuppfuktning. Då det enbart är torkningstiden som har ändrats mellan omgång två och tre anses den stora skillnaden i resultat bero på uttorkningen av betongen. Under uttorkningen sker det dock olika fenomen såsom karbonatisering, porer som torkas ut och sluts igen på grund av hydratisering och att återuppfuktningen i vissa fall inte har hunnit vattenmätta betongen innan frysförsöken startat. Att rangordna dessa fenomen inverkan på avskalningen blir svår. Provkropparna som fått torka ut har hydratiserats 28 dygn längre än de andra proverna har därmed hydratiseringen kommit längre men enligt (Chidiac, 2007) borde den inverkan vara liten.



Figur 27. Avskalning för samtliga prover i omgång 1 och 2.

Det kan ses i Figur 27 att nästan samtliga betonger fått en positiv effekt av uttorkningen. För betongen med slagginblandning som återuppfuktats under 29 dygn har inverkan från uttorkningen försvunnit. OPC har påverkats mest av uttorkningen vilket troligen beror på att karbonatisering förtätar porerna mest för den typen av betong (Bohlin, 2016). Då betongen blir tätare stängs porer vilket gör det svårare eller omöjligt för dem att fuktas upp vilket minskar fukthalten som betongen kan fuktas upp till. Med en lägre fukthalt minskar risken att frostsador uppstår (Sellevold, 1994) (Lindmark, 1998).

Att den slagginblandad betong är den där porstrukturen förändras mest vid karbonatiseringen (Bohlin, 2016) ses ej i den här studien då skillnaden för den betongen är väldigt liten. Då uttorkningen av betongen började efter 27, 55 och 56 dagar finns det en risk att den slagginblandade betongen enligt (Utgenannt, 2004) inte fått optimala förhållanden för att uttorkningen ska ge ett ökat avskalningsmotstånd. Han visade att den högsta skillnaden uppstår då betongen får torka innan den härdat i 30 dygn. I den här studien är det dock så att betongen som torkats vid lägst ålder, det vill säga S3-29-x är den som har påverkats minst av uttorkningen.

## 9 Sammanfattning

3 olika betonger (OPC, 35% flygaska och 35% slagg med vct = 0,4 och lufthalt på 5%) vars avskalning har studerats, får olika resultat beroende på testyta och förkonditionering. Proverna som har använts har sågats ur en större cylinder för att kunna prova glättad yta, sågad yta och formyta. Dessa prover har utsatts för olika förkonditioneringar där tiden som de torkats och uppfuktats varierat. Proverna har placerats i en frys som har cyklat 28 gånger mellan 20 och - 25 °C under ett dygn.

Försöken har delats in i 3 omgångar där omgång 1 studerar testytan, för omgång 2 varierar uppfuktningstiden och i omgång 3 torkar samtliga prover ut 28 dagar innan de återuppfuktas olika länge. Genom att jämföra omgång 2 och 3 fås uttorkningens inverkan.

Resultaten i omgång 1 visade generellt att betongen med OPC och 35% slagg hade en lägre avskalning än den med 35% flygaska. Betongen med OPC hade lika hög avskalning oavsett testyta. Betongen med slagg hade lägre avskalning desto längre ner i provkroppen som testytan hämtades. För betongen med 35% flygaska hade den sågade ytan ett högre motstånd mot avskalning jämfört med de andra testytorna.

I omgång 2 som studerade uppfuktningstidens inverkan sågs en högre inverkan på betongen med 35% slagg som ökade avskalningen med 75% när den sugit upp vatten i 29 dagar jämfört med att inte låta den suga upp något vatten innan testerna. Betongen med 35% flygaska visade minst påverkan från uppfuktningen med en ökning av avskalningen med 24% efter 29 dagars uppfuktning jämfört med avskalningarna från proven utan uppfuktning.

I omgång 3 där proverna fått torka ut i 28 dagar sågs samma samband som i omgång 2 med skillnad att en kort uppsugning inte hade någon inverkan på mängden avskalning. För de proverna som återuppfuktats i 29 dagar sågs en större skillnad jämfört med proverna som inte återuppfuktats i omgång 3 vid jämförelse med omgång 2.

Vid jämförelse mellan omgång 2 och 3 fick OPC och 35% flygaska en signifikant minskad avskalning med en 28 dagars uttorkning innan uppfuktning. Proverna med slagg visade inte så stor förändring när de torkats ut innan uppfuktning.

Betongen med 35% flygaska hade överlag den högsta avskalningen men vid några försök såsom 29 dagars uppfuktning utan uttorkning var avskalningen något lägre än för betongen med 35% slagg. Utan karbonatisering har den slagginblandade betongen högst avskalningsmotstånd men efter uttorkning och karbonatisering var avskalningen lägre för OPC.

Uppfuktning av betongen innan frysning påverkar mest slaggbetongen som fick en 75 % högre avskalning när den hade varit nedsänkt i ett vattenbad under 29 dygn jämfört med att den inte uppfuktats alls. Flygaskan reagerade relativt lite på uppfuktningen och avskalningen ökade enbart med 25 % när den hade legat i vattenbad under 29 dygn jämfört med ingen uppfuktning.

Efter uttorkning påverkar uppfuktningen mer och högst skillnad i avskalning hade OPC vars ökning var 199 % när den fuktats upp i 29 dygn jämfört med ingen uppfuktning. Flygaskan är fortfarande den betong som hade den lägsta förändringen vid uppfuktning och ökningen var nu 64 %.

Att betongen får torkas ut och karbonatiseras är bra för samtliga betonger men störst inverkan har det på OPC och minst inverkan sågs på 35% slagg.

## 10 Framtida studier

Att olika testtytor haft minst spridning beroende på vilket bindemedel som använts skulle vara bra att studera ytterligare. Anledningen till att det kan vara relevant är att genom att använda testtytor som varierar minst för respektive bindemedel kan frystester göras med ett mindre antal provkroppar och ändå uppnå samma validitet.

Uttorkningen har en positiv effekt på salt-frost avskalningsmotståndet. Hur stor del av effekten som beror på att betongen torkat respektive karbonatiserats är inte helt klarlagt vilket också skulle vara intressant att studera.



## Referenser

- Arnfelt, H. (1943). *Skador på betongvägar uppkomna genom saltbehandling vintertid*. Stockholm: Statens väginstitut.
- Bohlin, R. S. (2016). Karbonatisering av slagg- och flygaskbetong och dess inverkan på transportegenskaper. *bygg och teknik*, 48-52.
- Bouzoubaa, N, A. B. (2011). Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating fly ash and (or) silica fume: laboratory and field sidewalk test data. *Canadian journal of civil engineering*, 373-382.
- Chidiac, P. o. (2007). Multi-variable statistical analysis for scaling resistance of. *Cement and concrete composites* 29, 39-48.
- Fagerlund. (1982). *The influence of slag cement on the frost resistance of the hardened concrete*. Lunds Universitet.
- Fagerlund, G. (1983). *Betong med flygaska*. Cement och Betonginstitutet.
- Farstad, E. J. (1991). *Frost/salt-testing of concrete: effects of tests parameters and concrete moisture history*. Norwegian institute of technology.
- Groves, G. R. (1992). Microstructure and microanalysis of hardened cement pastes involving ground granulated blast-furnace slag. *Journal of materials science*, 6204-6211.
- Jacobsen, S, J. M. (1997). Frost deicer salt scaling testing of concrete: effekt of drying and natural weathering. *Cement, concrete and aggregates*, 8-16.
- Janssen, M. J. (1996). CDF TEST -Test method for the freeze thaw resistance of concrete - tests with sodium chloride solution (CDF). *Materials and structures*, 523-528.
- Krishnan, J. J. (2006). *Technicak issues related to the use of fly ash and slag during late fall (low temperature) construction season*. West Lafayette,: Purdue University.
- Lea, F. (1970). *Chemistry of cement and concrete*. London: Chemical Publishing Co Inc.,U.S.
- Lewandowski, R. (1983). Einfluss unterschiedlicher Flugaschequalitäten und zugabemenengen auf die betongeigenschaften. *Betonwerk + fertigteil-technik*, 1-3.
- Lindmark, S. (1998). *Mechanism of salt frost scaling of portland cement-bound materials: studies and hypothesis*. Lund: Lunds Universitet.
- Persson. (1992). *Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet*. Lund: Lunds tekniska högskola.
- Pigeon, M, C. J. (1996). Surface microstructure and scaling resistance of concrete. *Cement and concrete research*, 1555-1566.
- Powers, T. (1962). Physical properties of cement paste . *Chemistry of cement*, 577-613.
- Scrivener, E. B. (2015). Evolution of pore structure in blended systems. *Cement and concrete research*, 25-35.
- Sellevoid, S. J. (1994). *Frost/salt scaling testing of concrete importance of absorption during test*. The Norwegian institute of technology.
- Strand, M. (2016). *De-icing salt frost scaling in concretes with fly ash or slagg with low air void contents*. Lunds universitet.

Utgenannt, P. (2004). *The influence of ageing on the salt frost resistance of concrete*. Lunds universitet.

Valenza II, G. W. (2007). A review of salt scaling: I. Phenomenology. *Cement and concrete research* 37 (2007), 1007-1021.

Valenza. J, S. G. (2006). Mechanism for salt scaling. *The American ceramic society*, 1-

Yuang. J, H. L. (2015). Mechanisms on the salt-frost scaling of concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 1-5.



## Bilaga 1 Vägningar av provkroppar och avskalat material

A1-T1		A1-T2		A1-T3		Datum	Cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
908,7		901,6		918,3			
912,9	1,871	904,8	2,256	925,5	2,639	2017-03-16	7
919,6	0	907,2	0	932,9	0	2017-04-03	
920,9	1,975	907	2,682	930,6	2,653	2017-04-06	10
917,9	3,687	901,5	6,158	928,5	5,315	2017-04-13	17
918	4,415	899,3	4,91	926,4	5,208	2017-04-20	24
915,7	2,529	897,5	2,981	924,5	2,919		28
914	4,855	896,1	5,217	923	5,108	27-apr	31
A1-MB1		A1-MB2		A1-MB3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
954,6		914,6		914			
960,4	3,913	915,7	3,674	915,4	3,893	2017-03-16	7
965,2	0	916,5	0	919	0	2017-04-03	
964,7	2,612	916,3	2,601	920,1	2,916	2017-04-06	10
962,2	4,075	913,5	4,369	918,6	4,418	2017-04-13	17
962,8	3,657	911,7	3,725	919	3,757	2017-04-20	24
961,8	2,067	911,1	2,045	917,7	2,174	2017-04-27	28
961	3,616	910,6	3,579	916,7	3,805	2017-04-27	31
A1-B1		A1-B2		A1-B3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
895,3		918,3		918,8			
897,6	3,042	928,4	2,634	927,1	1,922	2017-03-16	7
898,5	0	932	0	935,7	0	2017-04-03	
897,2	3,156	931,5	2,896	935,4	2,59	2017-04-06	10
894,1	6,526	930,5	4,903	933,3	5,351	2017-04-13	17
889,6	4,886	929,1	4,622	932,3	4,655	2017-04-20	24
888,5	2,645	927	2,489	930,6	2,578	2017-04-27	28
887,6	4,628	925,5	4,356	929,3	4,511	2017-04-27	31
F1-T1		F1-T2		F1-T3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
948,3		934,2		953,3		04-maj	0
940,5	7,428	925,7	8,238	947	7,467	2017-05-11	7
935,8	7,082	917,7	9,356	939,3	9,555	2017-05-18	14
929,7	7,681	911,1	7,524	932,8	7,97	25-maj	21

925,9	6,597	907,7	5,775	929,9	6,027	01-jun	28
F1-MB1		F1-MB2		F1-MB3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
924,9		932,2		949,3		04-maj	0
918,5	5,472	925,4	6,266	946,7	6,731	2017-05-11	7
914,5	6,047	922,1	6,018	941,7	6,565	2017-05-18	14
910,1	5,95	917,1	5,478	938,8	5,332	25-maj	21
908,8	4,246	914,6	4,474	936,8	5,035	01-jun	28
F1-B1		F1-B2		F1-B3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
860,1		910,2		885,7		04-maj	0
855,8	4,835	909,1	3,519	883,2	4,674	2017-05-11	7
850,6	6,909	906,2	6,04	880,1	7,777	2017-05-18	14
844,4	7,1	897,8	8,097	875,1	6,968	25-maj	21
840,5	5,261	891,8	7,341	872,7	5,868	01-jun	28
S1-T1		S1-T2		S1-T3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
945,1		927,7		965,3		04-maj	0
944,3	3,956	923,7	4,89	963	4,875	2017-05-11	7
943,4	4,083	921,4	4,227	961,9	4,126	2017-05-18	14
940,6	4,633	918,3	4,416	959	4,932	25-maj	21
940,3	4,385	915,7	3,911	957,3	4,393	01-jun	28
S1-MB1		S1-MB2		S1-MB3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
932,5		956,2		964,3		04-maj	0
931,3	3,675	952,4	4,074	959,7	4,125	2017-05-11	7
930,5	3,248	952,6	3,466	957,9	3,337	2017-05-18	14
930,7	3,151	952,1	3,103	956,4	3,656	25-maj	21
929,4	2,952	953,9	3,005	955,6	3,2	01-jun	28
S1-B1		S1-B2		S1-B3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
914,5		912,2		970,2		04-maj	0
925,5	2,586	922,6	2,597	969,4	2,579	2017-05-11	7
927,1	3,087	921,5	2,726	969,6	2,791	2017-05-18	14
926,9	3,396	920,6	2,67	969,1	2,682	25-maj	21
925,9	3,102	921,5	2,593	970,3	2,658	01-jun	28
A2-29-1		A2-29-2		A2-29-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		

952,8		958,5		960,8		2017-04-06	
954,2	5,777	955,2	5,069	965,6	5,199	2017-04-13	7
952,5	4,223	953,6	4,026	963	4,068	20-apr	14
951,4	3,631	951,5	3,446	963,3	3,96	27-apr	21
951,1	3,439	950,4	3,507	960,5	3,856	04-maj	28
A2-1-1		A2-1-2		A2-1-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
933,2		949,7		929,8		2017-04-06	
939,8	3,545	954,1	3,282	932,3	3,721	2017-04-13	7
938,6	3,436	955	3,1	931,9	4,204	20-apr	14
937,1	3,263	954,2	3,157	929,1	4,365	27-apr	21
937,5	3,265	955,5	3,203	928,3	4,273	04-maj	28
A2-0-1		A2-0-2		A2-0-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
860,4		911,1		931,4		2017-04-06	
870	3,144	916,4	3,533	937,2	3,252	2017-04-13	7
870	3,369	916,9	3,631	937,4	3,411	20-apr	14
868,8	3,182	915,8	3,666	937,4	3,429	27-apr	21
870,2	3,308	914,7	3,475	937,7	3,545	04-maj	28
F2-29-1		F2-29-2		F2-29-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
930		934,8		937,9		2017-04-13	0
925,6	5,11	936,6	4,813	939,5	5,8	2017-04-20	7
923,2	4,44	933,5	4,027	938	5,187	27-apr	14
921,8	4,151	933,1	4,061	936,2	4,845	04-maj	21
919,1	3,451	930,9	3,113	934,1	4,075	11-maj	28
F2-1-1		F2-1-2		F2-1-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
924,2		913,3		915,7		2017-04-13	0
929,4	3,906	920,1	4,502	926,5	3,87	2017-04-20	7
928,5	3,962	917,3	4,262	925,8	3,717	27-apr	14
928,9	3,924	918,2	4,3	928,2	3,566	04-maj	21
928,3	3,468	916,5	3,553	926,2	3,202	11-maj	28
F2-0-1		F2-0-2		F2-0-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
868,9		815,3		845,5		2017-04-13	0
875	4,206	817,7	4,027	846,6	4,21	2017-04-20	7
874,6	3,834	814,9	3,944	844,1	4,321	27-apr	14

874,4	3,778	812,9	3,845	841,5	4,263	04-maj	21
874	3,045	811,6	3,401	840,3	3,769	11-maj	28
S2-29-1		S2-29-2		S2-29-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
964,1		961,1		961,9		2017-04-13	0
972,6	3,529	969,6	3,684	969,4	3,378	2017-04-20	7
971,8	3,186	968,6	3,368	969,7	3,088	27-apr	14
973,2	3,053	969,5	3,2	970,4	2,867	04-maj	21
972,6	2,845	969	2,702	969,8	2,477	11-maj	28
S2-1-1		S2-1-2		S2-1-3			
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
940,1		952,9		928		2017-04-13	0
945,2	2,833	960,6	2,938	936,4	2,762	2017-04-20	7
943,9	2,849	961,7	2,659	936,7	2,45	27-apr	14
944,9	2,892	963,3	2,671	938	2,525	04-maj	21
943,2	2,629	962,2	2,421	938,1	2,265	11-maj	28
S2-0-1		S2-0-2		S2-0-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
869,5		829,7		865,6		2017-04-13	0
877,6	2,853	839,2	2,786	874,2	2,752	20-apr	7
876,4	2,747	841,3	2,562	874,5	2,387	27-apr	14
878,3	2,527	842,3	2,494	875,7	2,471	04-maj	21
877,9	2,291	841,2	2,411	876	1,913	11-maj	28
A3-29-1		A3-29-2		A3-29-3		Datum	Cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
848,4		950,8		954,2		04-maj	0
950,6	2,246	955	2,162	959,5	2,113	2017-05-11	7
951,2	2,432	955,1	2,6	960,5	2,263	2017-05-18	14
951	2,407	953,8	2,774	960,7	2,179	25-maj	21
951,9	2,236	954	2,804	962,7	2,173	01-jun	28
A3-1-1		A3-1-2		A3-1-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
907,4		913,4		931		04-maj	0
910,1	1,858	917,8	1,84	935,2	1,84	2017-05-11	7
911,5	1,86	920,7	1,927	939,1	1,895	2017-05-18	14
911,9	1,864	921,3	1,914	940	1,943	25-maj	21
912,8	1,877	923,2	1,871	942,4	1,911	01-jun	28
A3-0-1		A3-0-2		A3-0-3		Datum	cykler

kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
894,8		877		900,9		04-maj	0
902	1,865	883,7	1,92	909,5	1,922	2017-05-11	7
903,6	1,996	886,9	1,966	910,9	1,984	2017-05-18	14
905,1	1,971	887,9	1,999	912,8	1,898	25-maj	21
908,4	1,972	889,3	1,919	914,5	1,9	01-jun	28
F3-29-1		F3-29-2		F3-29-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
933,9		934,4		941,8		2017-05-11	0
932,4	2,924	935,8	2,547	942,2	2,692	2017-05-18	7
932,1	3,384	936,3	2,888	943	3,105	25-maj	14
930,9	3,268	934,8	2,883	942,1	2,85	01-jun	21
928,5	3,418	933,5	3,321	940,1	2,892	08-jun	28
F3-1-1		F3-1-2		F3-1-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
914,4		916,8		924,9		2017-05-11	0
916,1	2,641	916,6	2,547	926,9	2,391	2017-05-18	7
917,3	2,423	918,3	2,834	926,9	2,327	25-maj	14
916,8	2,326	918,3	2,683	927,8	2,449	01-jun	21
917,4	2,385	918	2,642	928,1	2,354	08-jun	28
F3-0-1		F3-0-2		F3-0-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
874		834,5		839,6		2017-05-11	0
879,4	2,604	840,3	2,491	844,7	2,704	2017-05-18	7
879,6	2,824	840,8	2,391	845,1	2,585	25-maj	14
882,2	2,536	841,8	2,351	845,6	2,461	01-jun	21
883,2	2,37	841,5	2,46	846,1	2,381	08-jun	28
S3-29-1		S3-29-2		S3-29-3		datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
969,3		968,6		973,3		2017-05-11	0
969,2	2,81	968,5	3,105	974,4	2,489	2017-05-18	7
966,2	3,991	966,4	4,209	972,3	3,788	25-maj	14
966,6	2,96	965,5	3,213	973,3	2,971	01-jun	21
964,7	2,968	964,7	2,872	973,2	2,767	08-jun	28
S3-1-1		S3-1-2		S3-1-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
925,3		945,7		945,8		2017-05-11	0
929,1	2,1	949,2	2,115	948,4	2,148	2017-05-18	7

926,8	2,403	950	2,448	949,4	2,366	25-maj	14
929,3	2,327	950	2,483	949,9	2,423	01-jun	21
928,1	2,514	949,7	2,557	948,8	2,695	08-jun	28
S3-0-1		S3-0-2		S3-0-3		Datum	cykler
kropp	skal	kropp	skal	kropp	skal		
865,8		885,4		912,4		2017-05-11	0
872,8	2,069	892	2,147	917,1	2,193	2017-05-18	7
873,7	2,197	892,1	2,281	917,9	2,271	25-maj	14
875,5	2,235	893,9	2,272	919,2	2,222	01-jun	21
875,3	2,422	893,7	2,408	919,4	2,409	08-jun	28