

BESTÄNDIGHET I BETONG SOM INNEHÅLLER FLYGASKA ELLER SLAGG

Experimentell studie om saltfrostbeständighet



Martin J. Strand

2019-03-01

FÖRORD

Huvudförfattare: Martin J. Strand

Handledare: Dr Katja Fridh, Professor Lars Wadsö, and Dr Maria Fredriksson;

Medlemmar av referensgruppen: Dr Anders Lindvall, Dr Arvid Hejll, Erik Vigg, lic. Mikael Westerholm, Dr Nils Rydén, Dr Peter Utgenannt, Dr Staffan Hintze, Dr Ulf Håkansson, and Ulf Jönsson;

Tack till SBUF och Cementa AB som var finansiärer av projektet.

Tack till Professor Emeritus Göran Fagerlund och Dr. Kyösti Tuutti som initierade projektet.

Tack till Dr. Sture Lindmark som hjälpt med vissa frågor och Dr. Jan-Erik Lindqvist som instruerade hur mikroskopianalysen skulle genomföras.

2019-03

SAMMANFATTNING

Doktorandprojektet har varit en experimentell studie av saltfrostsador i betong med olika fraktioner flygaska eller slagg. Projektet resulterade en doktorsavhandling [1] som försvarades 1 februari 2019.

Under projektet så har en metod utvecklats för att testa saltfrost beständighet i högpresterande betong ($v_{bt}=0.40$) med flygaska eller slagg och som utsatts för olika förkonditioneringar innan testet börjar. Metoden presenteras i den publicerade artikeln [2].

Resultaten visar hur respektive recept presterar i relation till betong med 100% anläggningscement (från Degerhamn). De recept som presterar likvärdigt eller bättre jämfört med 100% cement tolkas som att de därmed har god saltfrostbeständighet.

Fokus har varit på hur karbonatisering och olika lufthalter påverkar saltfrostbeständigheten för olika bindemedelskombinationer. Mätningar har utförts för att se om det går att koppla olika saltfrostbeständighet till porositetens egenskaper. De mätningar som utförts för att karakterisera porositeten var lågtemperaturkalorimetri och kapillärsugning. För att mäta karbonatiseringsdjupet så utfördes mikroskopisk analys.

Resultaten visar hur karbonatisering påverkar mikrostrukturen och hur förändringen i sin tur påverkar saltfrostbeständigheten. Resultaten visar även att olika lufthalter har olika inverkan på saltfrostbeständigheten beroende av porositeten hos betongen.

Studien har utförts på betong som härdat i över 308 dygn, men mätningar har även utförts på 8 till 63 dygn gammal betong för att överbygga sambandet om hur torkning och karbonatisering, olika lufthalter, samt olika saltkoncentrationer påverkar saltfrostbeständigheten i betong med 100% cement, 35% flygaska, eller 35% slagg.

Betongen med högst saltfrostbeständighet hade en porositet där porer med en radie mellan 2 och 50 nm bidrog till att mindre vatten frös, och en tät struktur för porer över 50 nm. Välhydratiserad betong där upp till 35% av cementen ersatts med slagg, eller 25% slagg och 10% kalkstensfiller, tycks prestera likvärdigt med 100% anläggningscement, varför dessa bör studeras vidare.

INNEHÅLL

FÖRORD	1
SAMMANFATTNING	2
INNEHÅLL	3
1 BAKGRUND OCH SYFTE	4
2 METODIK OCH UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR	5
2.1 KARAKTÄRISERING AV MATERIALEN.....	5
2.2 SALTFROSTAVSKALNINGAR.....	6
3 SLUTSATSER	8
3.1 FORSKNINGSFRÅGOR.....	8
3.2 GENERELLA SLUTSATSER	8
3.3 FRAMTIDA STUDIER	8
REFERENSER	9

1 BAKGRUND OCH SYFTE

För att minska klimatpåverkan från cementproduktionen krävs många olika åtgärder. En åtgärd för att minska cementanvändandet är att använda tillsatsmaterial, som flygaska eller slagg. Därför har detta projekt testat betong som innehåller antingen flygaska med lågt kalciuminnehåll, eller granulerad masugnsslagg. När betongreceptet innehåller flygaska eller slagg ändras reaktionen och därmed produkterna (den resulterande hårdnade pastan) från reaktionen. Som en följd därav ändras även materialegenskaperna och beständigheten av betongen.

Detta doktorandprojekt har studerat tösaltfrostavskalning, en yttlig skada på betong som sker då en saltlösning med låg saltkoncentration fryser i kontakt med betongytan. Tösaltfrostavskalning har studerats sedan början av 1900-talet för att förstå skademekanismen och hur betongrecept behöver utformas för att minimera potentiell skada. Tidigare studier har visat att en låg saltlösningkoncentration (ca 3%) resulterar i mer tösaltfrostavskalning jämfört med 0 eller 10%. Vidare har även studier visat att lufthalten i betong, som bildats från en luftporbildare, reducerar tösaltfrostavskalningen. Studier har även påvisat att förkonditioneringen av betongytan, särskilt torkning och karbonatisering, påverkar tösaltfrostavskalningen. Anledningen till detta är att mikrostrukturen ändras beroende på vilken förkonditioneringsprocess som betongprovet utsätts för. Om ett prov får hydratisera under en längre tid kommer mer produkter bildas från bindemedelsreaktionen och vilket innebär att mikrostrukturen blir tätare. Två faktorer som påverkar detta är karbonatisering och torkning. Karbonatisering innebär att betongytan binder CO₂ (koldioxid), vilket förändrar ytans mikrostruktur. Endast uttorkning påverkar inte mikrostrukturen, däremot kan torkning bidra till att mikrosprickor bildas och den initiala vattenhalten i betongen minskar.

Tillsammans har tidigare studier resulterat i teorier som försöker förklara skademekanismen som skapar tösaltfrostavskalningsskadan. Dock finns en brist på studier som har testat vilken påverkan de ovan nämnda faktorerna (torkning och karbonatisering, lufthalten, och saltlösningkoncentrationen) har på tösaltfrostavskalningen i betong som innehåller flygaska eller slagg, varför detta projekt genomförts. Betong som innehåller flygaska eller slagg har mikrostrukturer som skiljer sig från betong som endast innehåller cement. Eftersom härdning och karbonatisering förändrar mikrostrukturen av materialet så behövdes en bred studie som studerar hur respektive faktor (torkning och karbonatisering, lufthalten, och saltlösningkoncentrationen) påverkar tösaltfrostavskalningen i betong med olika mängd flygaska eller slagg. Då mikrostrukturen ändras över tiden, beroende på härdningen och karbonatiseringen, kan vissa förkonditioneringsprocesser vara fördelaktiga för vissa material och ofördelaktiga för andra.

Forskningsfrågorna detta projekt hade som mål att besvara var följande:

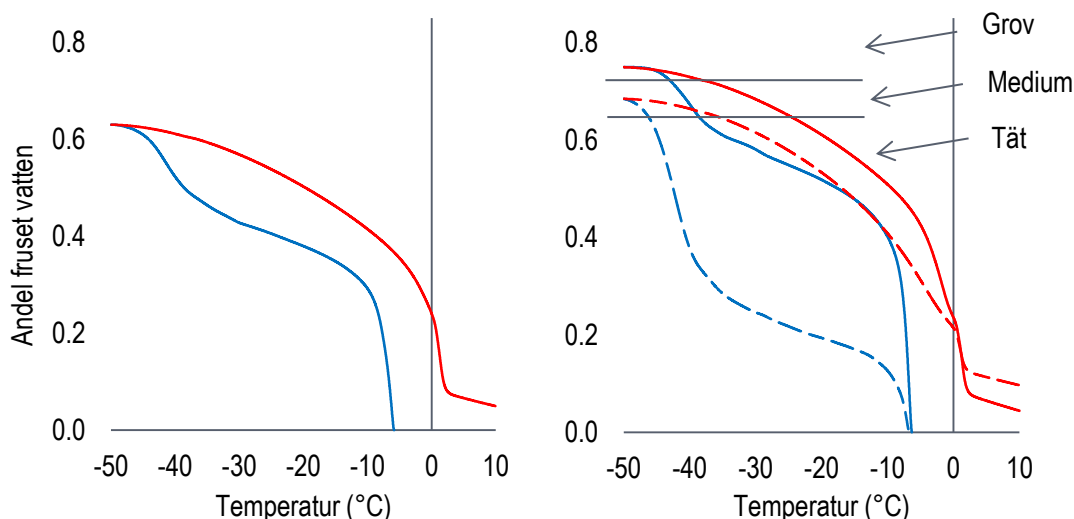
- Hur påverkas saltfrostbeständigheten när fraktionen av flygaska (med lågt kalcium innehåll), eller slagg ökar?
- Hur påverkar torkning och karbonatisering saltfrostbeständigheten för betong med flygaska (med lågt kalcium innehåll) eller slagg?
- Hur påverkar olika lufthalter saltfrostbeständigheten i betong med flygaska (med lågt kalcium innehåll) eller slagg?

2 METODIK OCH UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR

Försök har utförts där olika egenskaper hos porositeten har kopplats till tösaltfrostavskalkningen för betong som härdat över 300 d. Bindemedelskombinationerna som testades vid dessa försök var CEM I blandat med 20, 35% flygaska med låg kalciumhalt, eller 20, 35, 70% slagg, eller 25% slagg med 10% kalkfiller. Slagg och flygaska kan bidra till en långsammare hydratation, men på grund av den långa härdningstiden så har även de recepten med långsam härdning goda förutsättningar.

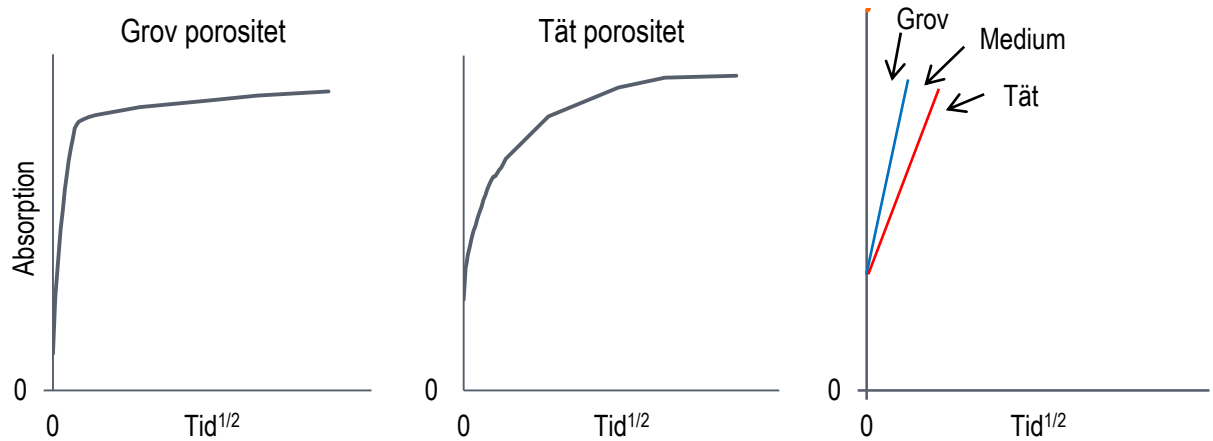
2.1 Karaktärisering av materialen

Linjär traversanalys har utförts för att kvantifiera de olika luftporssystemen skapade av luftporbildaren. Lågtemperaturkalorimetriska mätningar har utförts för att få information om isbildningen och mikrostrukturen av porer med radier under 50 nm, då dessa sänker fryspunkten. Figur 1 visar exempel på resultat från lågtemperaturkalorimetern. Blåa linjer visar andel vatten som frusit under frysningsen och röda linjer visar andel vatten under töningen. Under frysningsen blir isbildningen fördröjd (pga tex underkyllning), varför det är skillnad mellan frys och tökurvan. Till höger i figuren visas ett diagram där de streckade linjerna är resultat från mätningar på okarbonatiserat material och heldragna är från mätningar på karbonatiserat material från samma betong. Diagrammet visar att karbonatisering har en stor inverkan på mikrostrukturen då man t.ex. kan se att mer vatten kan frysa vid samma temperatur efter karbonatiseringen, och det blir mindre andel underkyllt vatten efter karbonatiseringen. Till höger så visas också indelningen som gjorts under utvärderingen där materialet har fått benämningen grov, medium eller tät struktur för porer under 50 nm. En tät struktur innebär att mindre vatten kan frysa då en större andel av porerna är väldigt små.



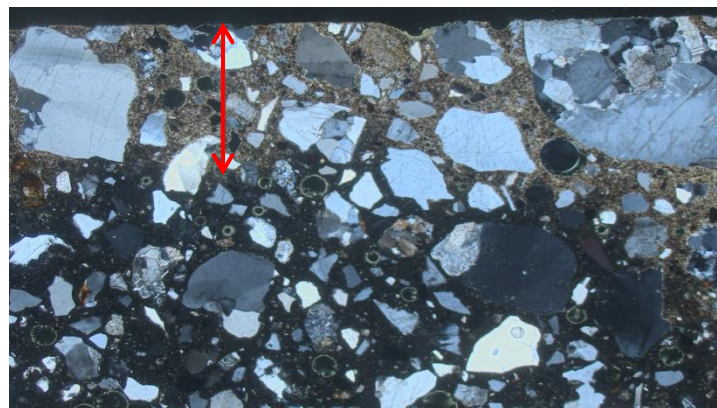
Figur 1. Resultat från lågtemperaturkalorimetern. Respektive linje presenterar resultat för ett prov som bestod av bitar bestående av övervägande cementpasta från respektive material.

Eftersom en grov porositet ger en hög absorptionshastighet och en fin porositet ger en låg absorptionshastighet, har kapillärsugningsförsök utförts, vilket ger information om kapillärporositeten (porer med radier över 50 nm). Dessutom utfördes mätningar på den totala porositeten. I figur 2 visas två exempel på resultat från kapillärsugningsmätningarna. Då materialet har en grov struktur sker en snabb initial absorption, och då materialet har en tät struktur sker en långsam initial absorption. Utifrån dessa resultat gjordes en indelning där materialet ansågs ha en grov, medium, eller tät struktur beroende på den initiala absorptionshastigheten (lutningen på kurvan), enligt det högra diagrammet i figur 2.



Figur 2. Resultat från kapillärsugningsmätningarna. Respektive linje presenterar medelvärde för 3 provkroppar som var 5 mm tjocka skivor med 100 mm i diameter.

Mätningar av pH-värde har utförts för att bestämma om de karbonatiserade proverna som användes för lågtemperaturkalorimetern och kapillärsugningen var genomkarbonatiserade. För att undersöka karbonatiseringens inverkan på avskalningen mättes karbonatiseringsdjupet med tunnslipsanalys på prover som karbonatiserats på samma sätt som de karbonatiserade proverna som saltfrosttestades. I figur 3 visas exempel på bild tagen under analysen med mikroskop. Den övre kanten på figuren är ytan som varit exponerad av karbonatisering. Det ljusa område från den övre kanten som är beige visar karbonatiseringsdjupet (då polariserat ljus lysas på tunnslipsprovet). Utifrån bilder som denna uppskattades ett medelvärde av karbonatiseringsdjupet för respektive bindemedelskombination.



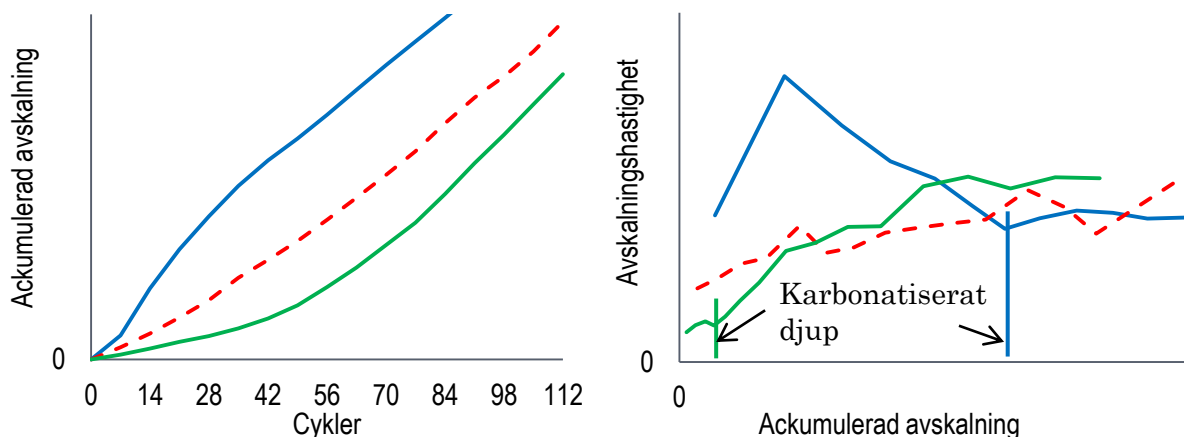
Figur 3. Foto taget under tunnslipsanalysen. Röda dubbelpilen visar approximerat medelvärde för karbonatiseringsdjupet.

2.2 Saltfrostavskalningar

För att undersöka inverkan från specifika faktorer såsom effekten från en ökande lufthalt och effekten från karbonatisering så utvecklades en tösaltfrosttestmetod för högpresterande betong med låg spridning i avskalningsresultaten. Denna metod är presenterad i detalj i [2].

Figur 4 visar exempel på resultat från saltfrostmätningar. De heldragna linjerna visar resultat från karbonatiserade prover och den streckade visar resultat från okarbonatiserade prov. Till vänster syns ett diagram där den ackumulerade avskalningen visas på y-axeln och antalet cykler som proven exponerats för visas på x-axeln. Till höger visas ett diagram där avskalningshastigheten (avskalningsmängd per vecka) på y-axeln i förhållande till den ackumulerade avskalningen på x-axeln. Genom att approximera 1 kg/m² tösaltfrostavskalning till 1 mm avskalningsdjup så kan man se en korrelation mellan avskalningshastigheten och karbonatiseringsdjupet. Resultaten visar att karbonatiseringen av materialet som den blå linjen presenterar är negativt för saltfrostbeständigheten då avskalningshastigheten är hög tills det karbonatiserade lagret skalats av. Karbonatiseringen av materialet som den gröna linjen

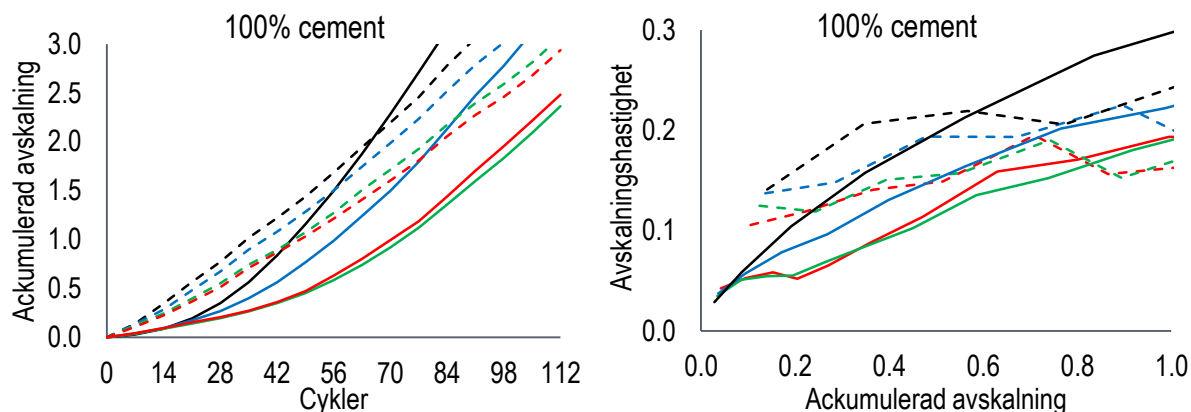
presenterar är positivt för saltfrostbeständigheten då avskalningshastigheten är låg tills det (grunda) karbonatiserade lagret skalats av.



Figur 4. Resultat från saltfrostmätningarna. Respektive linje presenterar medelvärde av 6 provkroppar som var 50 mm tjocka cylindrar med en provyta som hade 100 mm i diameter.

För att bestämma vilken inverkan lufthalten har på avskalningen krävdes det att flera satser gjöts där endast lufthalten varierades. En metod har utvecklats för att hitta en kombination av tillsatsmedel (ett flyttillsatsmedel och en luftporbildare) som minimerade risken för vattenseparation för respektive bindemedel, denna presenteras i [3].

Figur 5 visar resultaten från betongen som innehöll 100% cement där respektive färg visar resultaten för en viss lufthalt, den streckade linjen visar resultat från de okarbonatiserade proverna och de heldragna visar resultaten för de karbonatiserade proverna. Då avskalningshastigheten är låg i början för de karbonatiserade proverna så innebär detta att karbonatisering bidrar till en minskad tösaltfrostavskalningen för välhydratiserad betong med 100% CEM I. Figur 5 visar även att en ökad lufthalt bidrar till en lägre avskalning då de svarta linjerna presenterar betong med lägst lufthalt, sedan ökar lufthalten för blå, grön, och den högsta lufthalten var för de röda linjerna.



Figur 5. Resultat från saltfrostmätningarna där medelavskalningen visas för okarbonatiserade och karbonatiserade prover med CEM I som bindemedel samt för fyra lufthalter.

En bredare tösaltfroststudie gjordes också där yngre betong testades med 100% CEM I, 35% flygaska, eller 35% slagg, där proverna härdats i 8 till 63 dygn. Dessa tester utfördes på grund av flera anledningar. Dels för att få mer kunskap om hur olika förkonditionerar, lufthalter och saltkoncentrationer påverkar avskalningen hos betong innehållande flygaska eller slagg som hydratiserat en kort tid. Resultaten överbryggas dessutom resultaten för hur uttorkning, karbonatisering och lufthalt påverkar tösaltfrostbeständigheten hos ung betong jämfört med välhydratiserad betong (resultaten från betong som härdat över 300 d).. På grund av bredden av tösaltfrostavskalningstesterna i ung betongen hittades flera intressanta och oväntade resultat.

3 SLUTSATSER

3.1 Forskningsfrågor

Hur påverkas saltfrostbeständigheten när fraktionen av flygaska (med lågt calcium innehåll), eller slagg ökar?

Resultaten visar att när upp till 35% av CEM I ersätts med flygaska *ökar* saltfrostskaadorna i välhydratiserad betong. Detta gäller både för aldrig torkad och aldrig karbonatiserad betong, samt för torkad och karbonatiserad betong.

När 70% av CEM I ersätts med slagg *minskar* saltfrostskaadorna i välhydratiserad betong som aldrig torkat och aldrig karbonatiserat. När välhydratiserad betong torkat och karbonatiserat så ger en cementersättning upp till 35% slagg *minskade* saltfrostskaador. För välhydratiserad, torkad och karbonatiserad betong där 70% av CEM I ersätts med slagg så *ökar* saltfrostskaadorna kraftigt.

Hur påverkar torkning och karbonatisering saltfrostbeständigheten för betong med flygaska (med lågt calcium innehåll) eller slagg?

Torkning och karbonatisering påverkade inte saltfrostbeständigheten i välhydratiserad betong där 20% av CEM I ersätts med flygaska. För välhydratiserad betong där 35% av cementen ersätts med flygaska så ökar saltfrostskaadorna kraftigt då betongen torkat och karbonatiserat.

Ett oväntat resultat var då testytan härdat 8 dagar, sedan torkat och karbonatiserat i 21 dagar så resulterade det i den minsta avskalningsmängden för betong där 35% av cementen ersätts med flygaska.

Torkning och karbonatisering minskade saltfrostskaadorna i välhydratiserad betong där upp till 35% av CEM I ersätts med slagg. För välhydratiserad betong där 70% av CEM I ersätts med slagg så ökade saltfrostskaadorna kraftigt då betongen torkat och karbonatiserat.

Saltfrostskaadorna i 8 till 63 dygn gammal betong där 35% av CEM I ersätts med slagg var generellt låga och spridningen i saltfrostskaadorna varierade minst av de recept som testades då förkonditioneringen varierade.

Hur påverkar olika lufthalter saltfrostbeständigheten i betong med flygaska (med lågt calcium innehåll) eller slagg?

Ökad lufthalt minskar saltfrostskaadorna i välhydratiserad betong där 20% av cementen ersätts med flygaska, både då betongen aldrig torkat och aldrig karbonatiserat, samt då betongen torkat och karbonatiserat.

Ökad lufthalt minskar saltfrostskaadorna i välhydratiserad betong där 35% av cementen ersätts med flygaska då betongen torkat och karbonatiserat. När samma betong aldrig torkat eller karbonatiserat så har en ökad lufthalt ingen påverkan på saltfrostskaadorna.

3.2 Generella slutsatser

En liten andel porer med en radie mellan 2 och 50 nm tillsammans med tät struktur av porer med en radie större än 50 nm resulterade generellt i små saltfrostskaador.

En stor andel porer med en radie mellan 2 och 50 nm tillsammans med medium eller otät struktur av porer med en radie större än 50 nm resulterade generellt i de största saltfrostskaadorna.

Saltfrostskaadorna är starkt beroende av bindemedelskombinationen kombinerat med vad ytan utsatts för innan testet (hydratation, torkning och karbonatisering), vilken lufthalt betongen har, samt saltkoncentrationen i saltlösningen som fryser. Olika bindemedelskombinationer kan påverkas på olika sätt av samma förkonditioneringsprocess.

3.3 Framtida studier

Detta doktorandprojekt har visat att de tre studerade faktorerna (torkning och karbonatisering, lufthalt, och NaCl koncentration) påverkar avskalning på olika sätt beroende på materialet. Därmed påvisas komplexiteten i att testa saltfrostavskalning i laboratorier. Några forskare har kritiserat standardmetoderna

för att vara alltför konservativa och underkänna betong med flygaska eller slagg som klarar sig i fält. Då det finns ett kritiskt behov av att sänka CO₂ utsläppen på grund av den globala uppvärmningen, finns det en anledning att finjustera standardmetodernas förkonditioneringsprocess för att vara mindre konservativ så att färre betongrecept med flygaska eller slagg som bidrar till en minskning i netto CO₂ emissionerna underkänns av standardmetoden som tycks klara sig i fält. Denna doktorsavhandling bidrar med viktig information om en sådan finjustering av förkonditioneringsprocessen till den europeiska standardmetoden för tösaltfrostavskalningen skulle genomföras.

REFERENSER

1. Strand, M., *Experimental Study of De-icing Salt-frost Scaling in Concrete with Low-calcium Fly Ash or Slag : Influence of Drying and Carbonation, and Air Content*. 2018: Faculty of Engineering, LTH at Lund University, TVBM 1038.
2. Strand, M.J. and K. Fridh, *Test method for de-icing salt-frost scaling in high-performance concrete*. *MethodsX*, 2018. **5**: p. 1299-1310.
3. Strand, M.J. and K. Fridh, *Methodology to analyse the salt frost scaling mechanism(s) in concrete with different binders*, *Materials, Systems and Structures in Civil Engineering 2016*, Editors: M. Tange Hasholt, R.D. Hooton, and K. Fridh, 2016. Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark. p. 161-170.