



LUND UNIVERSITY

Mekanismen bakom kombinerat salt- och frostangrepp på spröda, porösa byggnadsmaterial - första test av arbetshypotes : undersökning av saltkoncentrationens betydelse för ytavskalning vid sen salttillförsel

Lindmark, Sture

1996

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Lindmark, S. (1996). *Mekanismen bakom kombinerat salt- och frostangrepp på spröda, porösa byggnadsmaterial - första test av arbetshypotes : undersökning av saltkoncentrationens betydelse för ytavskalning vid sen salttillförsel*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7101). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00



**Mekanismen bakom kombinerat salt- och frostangrepp på spröda, porösa byggnads-
material - första test av arbetshypotes:**

UNDERSÖKNING AV SALTKONCENTRATIONENS BETYDELSE FÖR YTAVSKALNING VID SEN SALTILLFÖRSEL

Sture Lindmark

SAMMANFATTNING

Denna rapport redovisar resultaten från en första test av en hypotes om mekanismen bakom saltfrostnedbrytning av spröda, porösa byggnadsmaterials ytor. Hypotesen presenteras endast kortfattat, en utförligare beskrivning finns i [1]. Enligt hypotesen bör det välkända maximum i skadenivå som rapporterats av bland andra Arnfelt [2] och Verbeck och Klieger [3] inte finnas om testet utförs så att avsningsämnet ej tillförs porsystemet. Ytavskalningsförsök genomfördes där salt tillsattes först vid temperaturen 0° och sedan avlägsnades då temperaturen återigen steg till detta värde. Vid högre temperaturer täcktes ytan av rent vatten. Testet genomfördes på tre cementbrukskvaliteter (vct 0.45, 0.50 och 0.65). Både prover som aldrig torkats och prover som genomgått en uttorknings/uppfuktningscykel användes. Fyra saltkoncentrationer (NaCl) användes: 0, 1, 3 och 7.5% (för vct 0.50 gäller andra värden, se texten). Huvudresultatet av testet är att hypotesens prediktion om lika skador oavsett saltkoncentration är korrekt. Det genomfördes även försök där proverna exponerades för saltlösningarna under lång tid innan de frystes. Resultaten från dessa försök är för osäkra för att man skall våga dra säkra slutsatser, men tyder på att hypotesen även i detta fall förutspår kvalitativt korrekta resultat.

INNEHÅLL:

Sammanfattning

Bakgrund

Hypotes

Försöksutformning

Huvudförsök: Vct 0.45 och 0.65

Övriga kommentarer

Fortsättningsförsök - lång tid med saltlösning före frysning

Kommentarer kring saltkoncentrationer

Bilaga: Bruksrecept

BAKGRUND

1946 redovisade Arnfelt [2] försök där man hade provat inverkan av saltkoncentrationen på skadorna vid kombinerat salt- och frostangrepp på betongytor. Liknande försök utfördes också 1957 av Verbeck och Klieger [3], vilka har blivit flitigt citerade i skrifter om kombinerat salt- och frostangrepp. Innehållet i de bägge rapporterna är dock i det närmaste identiskt, såväl vad gäller försöksomfattning som resultat. Båda rapporterna avser försök på betong av ordinära vattencementtal. (Verbeck och Klieger anger vct 0.42-0.63, medan Arnfelt anger böjhållfastheten till 4.3 MPa).

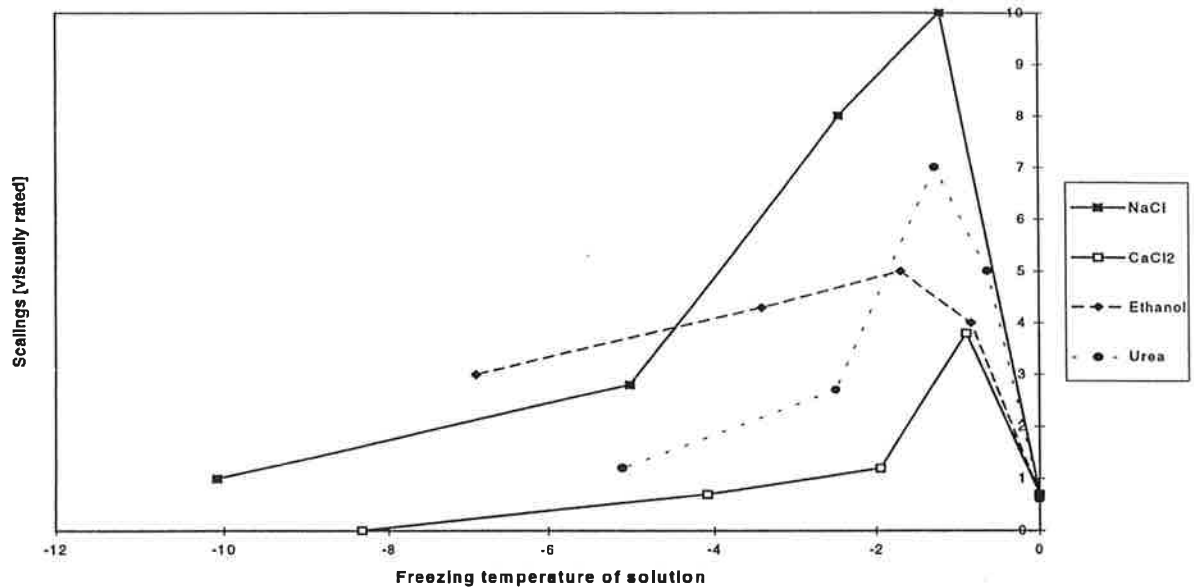
De avisningsmedel som användes var natriumklorid, kalciumklorid, urea och etanol. Skadorna graderades genom visuell inspektion.

I resultatdiskussionen kommer såväl Arnfelt som Verbeck och Klieger fram till följande: En måttlig koncentration av avisningsmedlet ger kraftigare skador än såväl en svagare som en starkare. Av de använda koncentrationerna kan uttydas att skadorna skulle vara som störst vid en koncentration av 2-4 viktsprocent. När det gäller skadornas avhängighet av testproceduren, konstaterar Verbeck och Klieger att skadorna blir kraftigare om provet fryses med saltlösning på ytan under hela förloppet, än om denna byts mot vatten under nedkylningsfasen. Av deras artikel framgår att skadorna inte förvärras med någon viss faktor, utan bara att de mycket väl kan mångfaldigas vid denna procedurförändring.

När det gäller inverkan av förlagringen konstaterar Verbeck och Klieger att prover som fått genomgå en period av torkning före frysnings klarar frysningsen bättre än aldrig torkade prover. De klarar sig dock inte skadesfria. För detta krävs extra luftinblandning i betongen.

Sammanfattningsvis anser såväl Verbeck och Klieger som Arnfelt att angreppet är av fysikalisk snarare än kemisk art.

När man läser Verbecks och Kliegers artikel kan man se att skadorna antar ett maximum för en medelmåttig koncentration av avisningsmedlet. Däremot varierar skadegradens maximum med vilken typ av avisningsmedel som använts, se Figur 1. I denna figur har skadegraden avsatts som funktion av avisningslösningens fryspunktssänkning. Antalet koncentrationer av respektive tömedel är något för litet för att man skall våga dra säkra slutsatser om kurvornas utseende, men figuren antyder ändå att maximal skada erhålls vid en fryspunktssänkning av 1-2.5 °C. Mer intressant är egentligen att skadegraden varierar med tömedelstypen. Tydligt är att natriumklorid ger de kraftigaste skadorna, följd av urea, etanol och sist kalciumklorid. Denna figur är hämtad ur resultatmängden från en testprocedur i vilken proverna exponerades för saltlösningen både under nedkylnings och upptiningsfasen av fryscykeln. (Författarna anger ej exakta siffror för maximivärdena för NaCl och urea, utan endast med angivelsen >10 resp >5. I figuren har de satts av som 10 resp 7, vilket med hänsyn till hur övriga siffror är rapporterade bör kunna accepteras.)

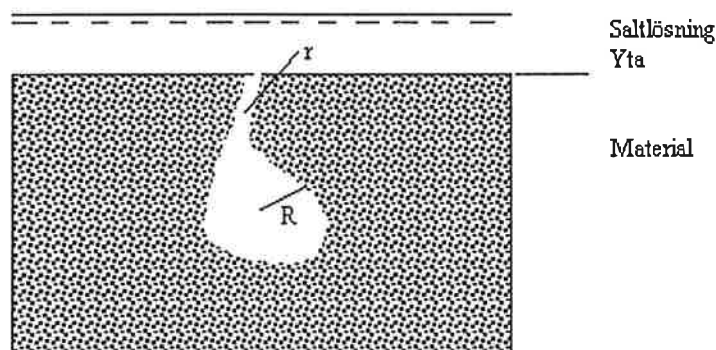


Figur 1: Bearbetning av resultat från Verbeck och Klieger [3]. Visuellt bedömning av ytskadorna mot fryspunktssänkningen för det aktuella avsningsmedlet.

HYPOTES

Inom projektet "Mekanismen bakom kombinerat salt- och frostangrepp på spröda, porösa byggnadsmaterial" har en arbetshypotes utvecklats. Fortfarande återstår arbete innan hypotesen kan anses fullt utvecklad, men en serie inledande tester kan dock påbörjas. Hypotesen presenteras här kortfattat, en utförligare beskrivning återfinns i Lindmark [1].

Figur 2 visar en kapillärpor strax under ytan i en provkropp av ett finporöst material. Poren är förbunden med den saltlösning som täcker provets yta via en trång kanal av radie r . Por-systemet innehåller rent vatten. Kapillärporens storlek är sådan att dess vatten har en mycket liten fryspunktsnedsättning (ca 0.1°). Kylningen görs så långsamt att temperaturen i den yttre lösningen och den i provets yttersta 2-3 mm är praktiskt taget lika (detta betyder att temperatordifferensen är så liten att denna ensam inte kan medföra att is och vatten kan stå i



Figur 2: Kapillärpor av radie R i cementpasta, förbunden med yttre saltlösning via trängre kanal av radie r .

termodynamisk jämvikt med varandra.) Provkroppen är fullständigt isolerad mot värmeflöden i horisontalled. Isoleringen kan ändras så att provet antingen kyls underifrån eller ovanifrån. I det senare fallet kyls således lösningen tidigare än provet. Följande tre fall förklarar mekanismen bakom nedbrytningen:

- 1 Provet kyls uppifrån. Ytan täcks av rent vatten.
- 2 Provet kyls underifrån. Ytan täcks av rent vatten.
- 3 Provet kyls uppifrån. Ytan täcks av en svag saltlösning.

I det första fallet kommer det yttre vattnet att frysa till is innan vätskan i poren gör det. En menisk mellan yttre is och inre vatten bildas vid förbindelsekanalens övre ände. Rent vatten och is kan inte stå i termodynamisk jämvikt med varandra vid en och samma temperatur om det inte föreligger en skillnad i tryck mellan faserna. Vatten i porsystemet kommer därför att transporteras ut till den yttre isen. Porsystemet avvattnas tills den erforderliga tryckdifferensen uppstår i form av ett undertryck i porvätskan. På detta vis får den yttre, rena isen en skyddande verkan på materialets ytskikt att jämföra med den skyddande verkan som is i inre luftporer har enligt vad som beskrivits av Powers [4].

I det andra fallet kommer porvattnet att frysa innan det yttre vattnet fryser. En menisk utbildas i detta fall vid förbindelsekanalens nedre ände. Fukttransporten blir nu den omvända: Fukt transporteras till isen i kapillärporen. Iskärnan växer och börjar utöva ett tryck på porväggarna. När detta tryck är så stort som erfordras för termodynamisk jämvikt avbryts islinstillväxten. I detta fall måste alltså hela tryckdifferensen bestå i ett övertryck i isen, eftersom den yttre vätskan hela tiden står under atmosfärstryck, och således inte kan sättas under något undertryck. Den erforderade tryckdifferensen stiger emellertid mycket snabbt med sänkt temperatur och risken är stor att normala byggnadsmaterial skall skadas om de fryses på detta vis. Förloppet är detsamma som anses äga rum vid tjälbildning i jordar.

Det tredje fallet innebär en kombination av de ovanstående två. Härvid kyls materialet uppifrån, men på grund av salthalten i den yttre vätskan kommer denna inte att frysa förrän vid en temperatur några grader under 0°C , vilken kallas T_f och även efter att denna temperatur har passerats kommer det att finnas en viss mängd flytande fas tillgänglig på materialets yta. Saltkoncentrationen i denna flytande fas kommer att stiga allteftersom temperaturen sänks. Det kommer nu därför inte att finnas någon menisk vid förbindelsekanalens övre ände. När porvätskan fryser kommer det istället att bildas en menisk vid dess nedre ände. Isinsen i poren hämtar därefter fukt från förbindelsekanalen. När denna töms sugs ny vätska in utifrån. Beroende på hur lång förbindelsekanalen är kommer det att ta en viss tid innan det vatten som når fram till isinsen innehåller något salt. Eventuellt kan en så koncentrerad saltlösning transporteras fram att jämvikt uppstår mellan denna lösning och iskristallen i poren. Vid en fortsatt temperatursänkning kommer dock ytterligare vatten att bli frysbar i saltlösningen varvid iskristallen återigen kan växa. Detta betyder bland annat att mekanismens verkan minskas eller helt uteblir om provet hålls vid en och samma konstanta temperatur. Men eftersom mikrolinstillväxt kan ske internt i provet vid konstant temperatur, såsom rapporterats av Powers och Helmuth [4], kan en viss sönderbrytning av materialet dock fortsätta även under sådana förhållanden. Det verkar dock troligt att mekanismen i ett sådant fall ändrar karaktär.

Förutsättningen för att kristallen skall växa på plats inne i kapillärporen är att inte vätskan i förbindelsekanalen blir frysbar. Den temperatur vid vilken detta blir möjligt beror av storleken på r samt saltkoncentrationen i förbindelsekanalen. Här fås också en koppling till porfördelningens betydelse för möjligheten till mikroskopisk islinstillväxt: Ju jämnare porstorlek, desto mindre risk att bildade iskristaller skall kunna växa sig stora på bekostnad av fukt i de mindre

porerna. I ett material som hårdnad cementpasta kommer dock risken alltid att bestå, ty den maximala tryckdifferens som kan uppstå mellan isen i en grov por och vätskan i en mindre por utan att vätskan i den senare blir frysbar ges av uttrycket

$$p_s - p_l = 2\sigma * \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)$$

Eftersom gelporerna är av storleksordningen 1-2 nm, kapillärporerna ända upp till 500 nm och ytspänningen mellan is och vatten är av storleksordningen 33J/m², ser man att trycket lätt kommer upp i många MPa. Eftersom draghållfastheten för cementpasta är av storleksordningen några MPa, inser man att det inte krävs några särskilt gynnsamma omständigheter för att mekanismen skall kunna bli effektiv.

Konsekvenser

Den beskrivna mekanismens beroende av olika parametrar har diskuterats i [1]. Här skall endast de delar av hypotesen som varit föremål för provning i de aktuella testerna beröras.

Enligt den beskrivna skall den absoluta saltkoncentrationen i den yttre vätskan vara av liten betydelse så länge inte salterna tillåts tränga in i porsystemet, det väsentliga är istället att det överhuvudtaget finns en yttre flytande sörja vilken gör att menisken mellan yttre is och inre porvätska elimineras. (Koncentrationen i den yttre lösningen kommer att vara beroende av den initiella koncentrationen endast ned till respektive lösnings T_f . För lägre temperaturer än så kommer saltkoncentrationen, oavsett initieell koncentration, i den resterande flytande fasen att vara densamma, dock kommer totala mängden flytande fas att vara olika stor).

Enligt hypotesen skall skadorna således inte visa något maximum (på klassiskt vis) om porsystemet hålls rent från salt. Detta är en förutsägelse som står i total kontrast till tidigare rapporterade, klassiska försöksresultat. Ett sätt att förkasta hypotesen är därför att genomföra ett försök där porsystemet bibehålls saltfritt medan den yttre saltkoncentrationen varieras. Om det då fortfarande existerar ett maximum i ytavskalningar kring 3% måste hypotesen omprövas.

FÖRSÖKSUTFORMNING

I syfte att testa hypotesen utfördes några inledande, småskaliga försök. Avsikten var att studera saltkoncentrationens betydelse då saltet tillförs så sent innan frysning påbörjas i porlösningen att saltet inte hinner diffundera in i materialet så som är fallet då saltlösningen tillförs på normalt sätt, dvs cirka 4 timmar före frysning.

Därför testades tre material (bruk vct 0.45, 0.50 och 0.65) med fyra olika saltkoncentrationer (0, 1, 3 och 7.5%), vilka tillsattes vid temperaturen 0°C. Saltlösningen avlägsnades och ersattes med rent vatten då temperaturen åter hade stigit till 0°. Försöken genomfördes både på prover som aldrig fått torka före frysning och på prover som genomgått en uttorknings/uppfuktningscykel.

Först genomfördes förförsök på bruk vct 0.50 och därefter huvudförsök på bruk vct 0.45 och 0.65. Den följande beskrivningen av försöksutformningen avser i första hand huvudförsöken.

Material

Inklusive förförsöket testades tre cementbruk med vct 0.45, 0.50 och 0.65. Största stenstorlek var 3 mm. Lufthalten i de färska bruken var 6.6, 6.2 respektive 6.7%. Pastahalterna (exklusive luften) var 48.1, 45.1 respektive 42.6%. Kompletta recept ges i bilaga 1.

Bruken gjöts i pvc-rör med diameter 127 mm och höjd 300 mm. Dagen efter gjutning sågades cylindrarna i skivor med tjockleken 25 mm. Härvid fick det söndersågade pvc-röret sitta kvar på proverna för att senare utgöra en del av försöksuppställningen. Proverna vattenlagrades direkt efter sågning.

Förlagring

Proverna av kvalitet 0.45 och 0.65 vattenlagrades minst 6 veckor. De sist testade proverna vattenlagrades upp till 11 veckor. Huvudseriernas prover som skulle genomgå en uttorkningsperiod förvarades två dygn i 60%/18°C och vattenlagrades därefter ytterligare tre dygn fram till försöksstarten. Förprovningsseriens motsvarande prover (vct 0.50) torkades tre dygn och vattenlagrades sedan tre dygn.

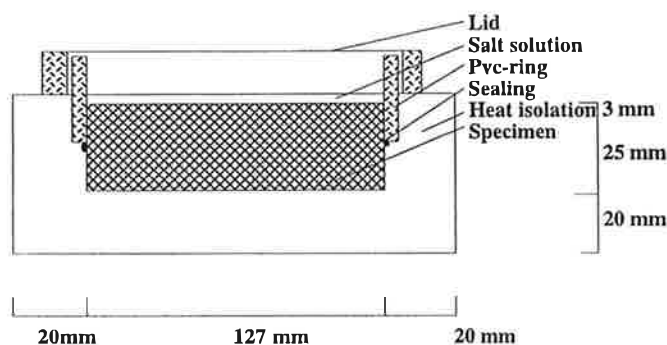
Litterering

Proverna littererades efter vct, saltkoncentration, förlagringsserier och slutligen med en bokstav för att skilja på "syskon"-prover, det vill säga parallella prover. Förkortningen 451.5NDA betyder således vct 0.45, 1.5% NaCl, Never Dried, prov A, medan 650DB betyder vct 0.65, 0% NaCl, Dried/Resaturated, prov B. För varje variabelkombination användes två provkroppar varför den sista bokstaven antingen är ett A eller ett B.

Provuppställning

Den kvarsittande ringen av pvc förskjöts något längs provets sida, varefter randen tätades med en tvåkomponents härdplast (Plastic Padding "Chemical Metal"). I förförsöket, vct 0.50, tätades proverna dock med härdande silikon i randen mellan provmaterialyta och pvc-röret. Denna tätning är naturligtvis mindre lämplig eftersom den dels inkräktar på försöksytan, dels lossnar då materialet bryts sönder. Under de sju första cyklerna var det dock endast 501.1NDA som råkade ut för upprepade läckage. Dessa upptäcktes i samband med salttillsatsen, varför det ändå kunde ordnas så att provet var täckt av korrekt mängd av korrekt saltkoncentration.

Provet ställdes sedan i en isoleringsform av extruderad cellplast i syfte att göra värmeflödet så endimensionellt som möjligt. Ytan täcktes med lösning och ett lock lades på. Försöksuppställningen framgår av Figur 3.



Figur 3: Försöksuppställningen i genomskärning.

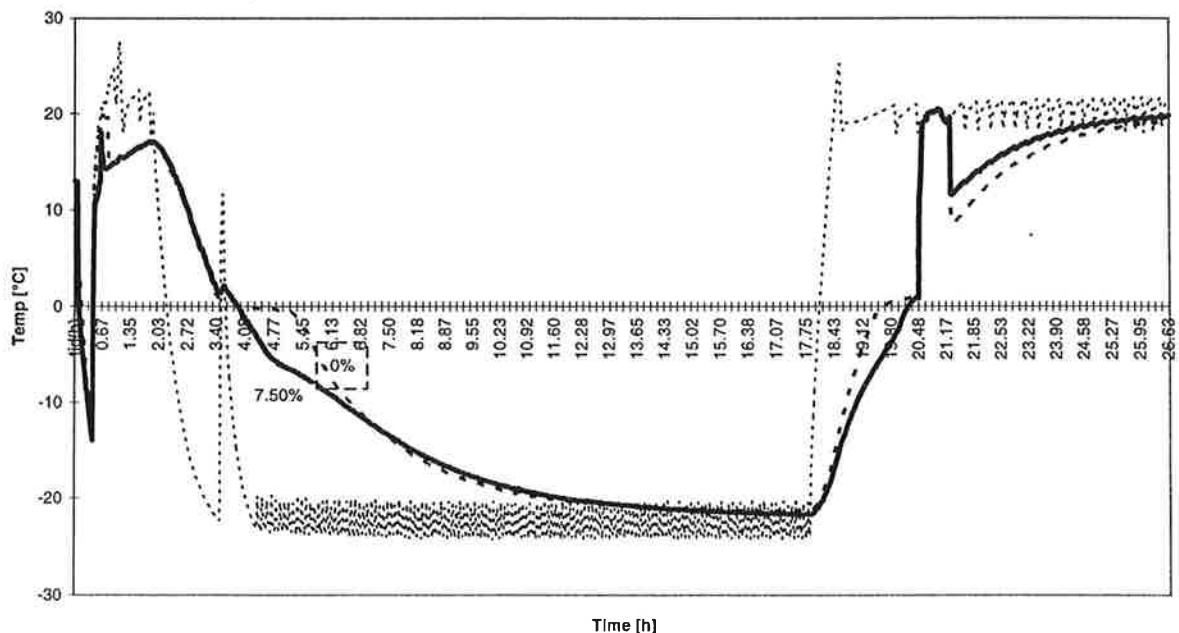
Saltkombinationer och salttillförsel

Avsikten var att fastställa huruvida en med avseende på ytavskalningsskador optimal saltkoncentration existerar då saltet tillförs så sent att saltjonerna inte får någon tid att diffundera inåt i materialytan. Genom att vid nedkylningens början (vid $+20^{\circ}\text{C}$) hälla 26 ml avjoniserat vatten på provytorna och sedan, då temperaturen i detta vatten sjunkit till $\pm 0^{\circ}\text{C}$, tillföra 13 ml av en likaledes kyld saltlösning med tre gånger högre koncentration än vad som var avsett att provet skulle ha under frysförloppet, erhöles en väl utblandad saltlösning av rätt koncentration på provytan, utan att saltjonerna fått någon tid att diffundera inåt i materialet innan frysning kunde påbörjas. Rimligen skulle alltså materialets porlösning, nära ytan, vara opåverkad av den utanförliggande saltlösningen då själva frysningsförloppet initierades. De saltkoncentrationer som användes (efter denna utspädning) var 0, 1, 3 och 7.5%.

Totala volymen blev således 39 ml, vilket motsvarar djupet ca 3 mm, vilket är vad som föreskrivs i SS137244. När proverna sedan tinat så pass att ytlösningarna åter nått $\pm 0^{\circ}$, skrapades avskalat material av och saltlösningen ersattes med 26 ml vatten. Nästa gång provernas lösningar kommit ned till $\pm 0^{\circ}$, cirka 8 timmar senare, upprepades proceduren.

Fryscykel

Fryscykeln avsågs bli en och samma i samtliga försök. Dock gör salttillsats i den yttre lösningen att temperaturförloppet varierar från prov till prov. Exempel på detta ges i Figur 4 nedan, där kurvorna visar temperaturförloppen i en 7.5 respektive 0-procentig saltlösning. Dessa temperaturkurvor är hämtade från huvudförsök 1. Fryscyklernas utseende, så som det mäts i saltlösningen, är dock detsamma oavsett materialkvaliteten.



Figur 4: Temperaturcykel

HUVUDFÖRSÖK : VCT 0.45 OCH 0.65

Allmänna kommentarer

Först skall redogöras för de avvikelser från avsedd provningsprocedur som har förekommit:

Huvudserie 1, vct 0.45

Tre missöden inträffade under detta test:

* Fryscykel nummer två blev cirka en timme för lång till följd av termostathaveri i frysskåpet. Inverkan av detta torde dock vara obetydlig.

* ND1B fick dubbel dos saltlösning i första cykeln. Dess verkliga saltkoncentration kan således beräknas ha varit cirka 1.5 istället för avsedda 1%. Detta misstag upprepades inte och torde därför inte ha haft betydelse mer än för den första cykelns avskalningar. Som framgår av figurerna ovan, kan man inte se någon effekt.

* Inför en av cyklerna tillfördes saltlösningarna något för sent (ca en halvtimme efter att temperaturen sjunkit till 0°). Av fryskurvorna för rent vatten kan man dock bedöma att detta inte skall ha haft någon avgörande effekt, eftersom en halvtimme för sent påförd saltlösning i alla fall påförs vid temperaturen 0°C i det rena vattnet.

Huvudserie 2, vct 0.65

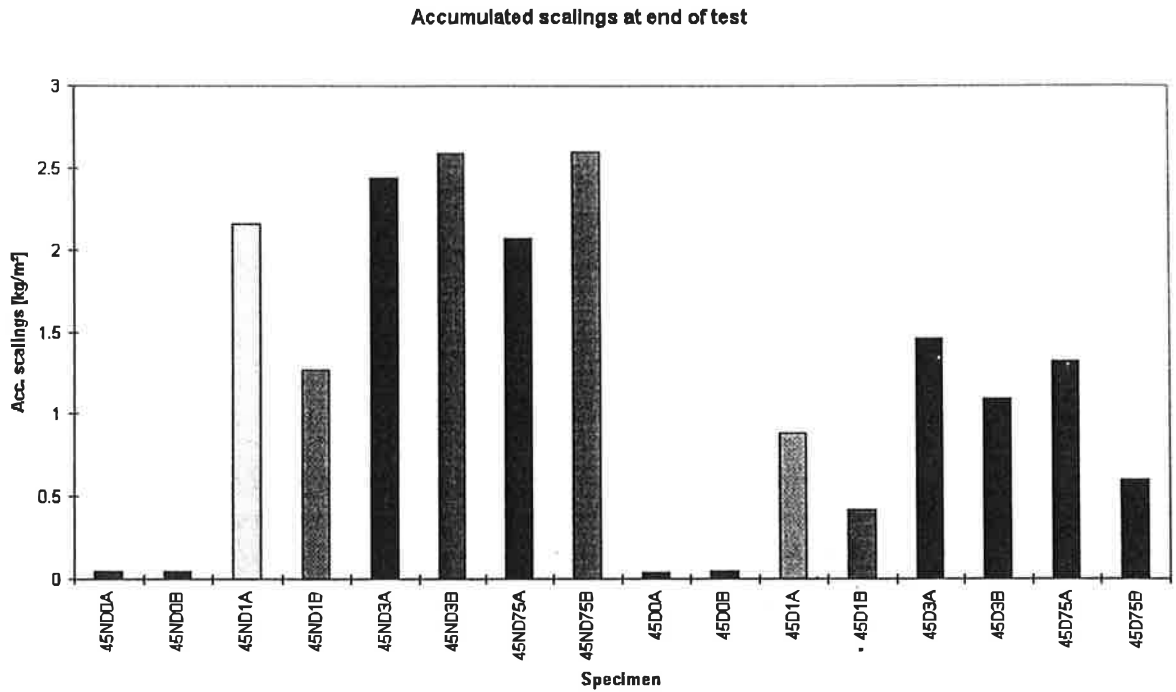
Enda missödet i denna serie var att D3A läckte saltlösning i den sista cykeln, varför den egentliga saltkoncentrationen för denna provkropp är något osäker.

Inverkan på slutlig avskalning av saltkoncentrationen

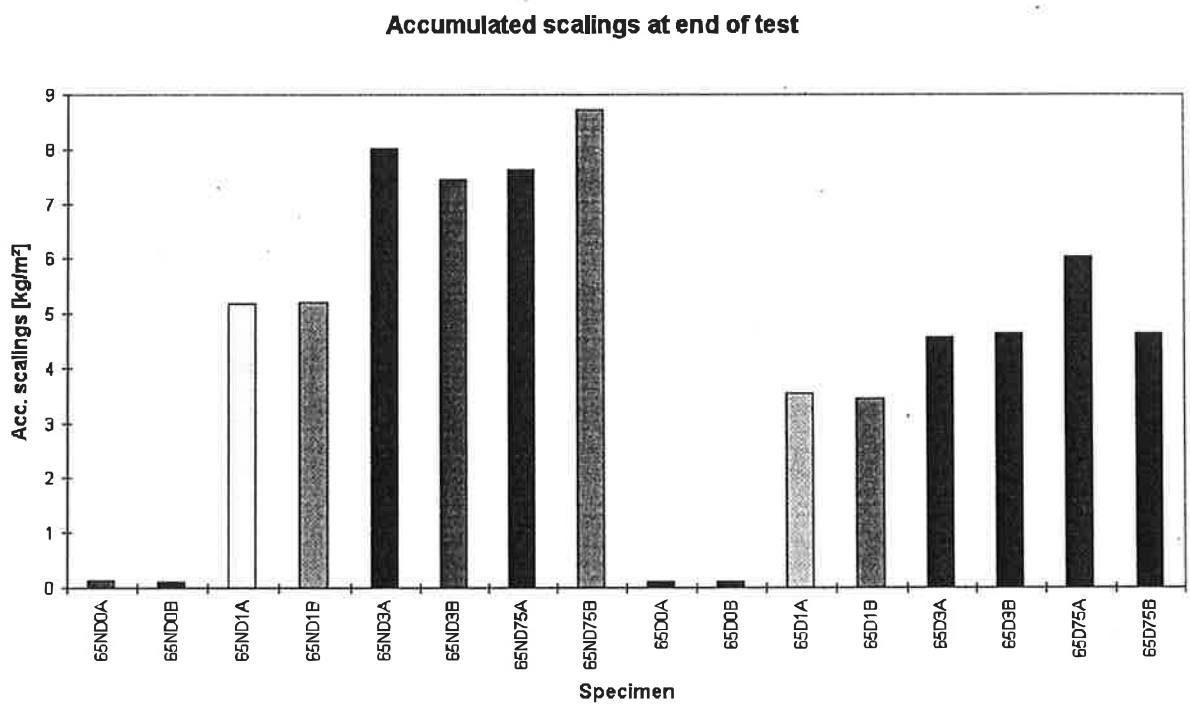
I Figur 5,6 och 7 redovisas slutlig avskalning för respektive provkropp. Den första observation man gör är att prover som testats med 0% salt nästan inte skadas alls. De små staplar som syns för dessa prover kan i själva verket ses som ett mått på mätonogrannheten i försöket, eftersom dessa prover vid inspektion föreföll helt oskadade.

Prover som ej har torkats före frysförsöken tycks vara oberoende av vilken saltkoncentration som används. Det är snarare fråga om huruvida salt används eller ej. Det finns skillnader, men de är inte konsekventa och den tydliga skillnad som redovisades av Arnfelt [2], Verbeck och Klieger [3] respektive Lindmark [5] finns definitivt inte.

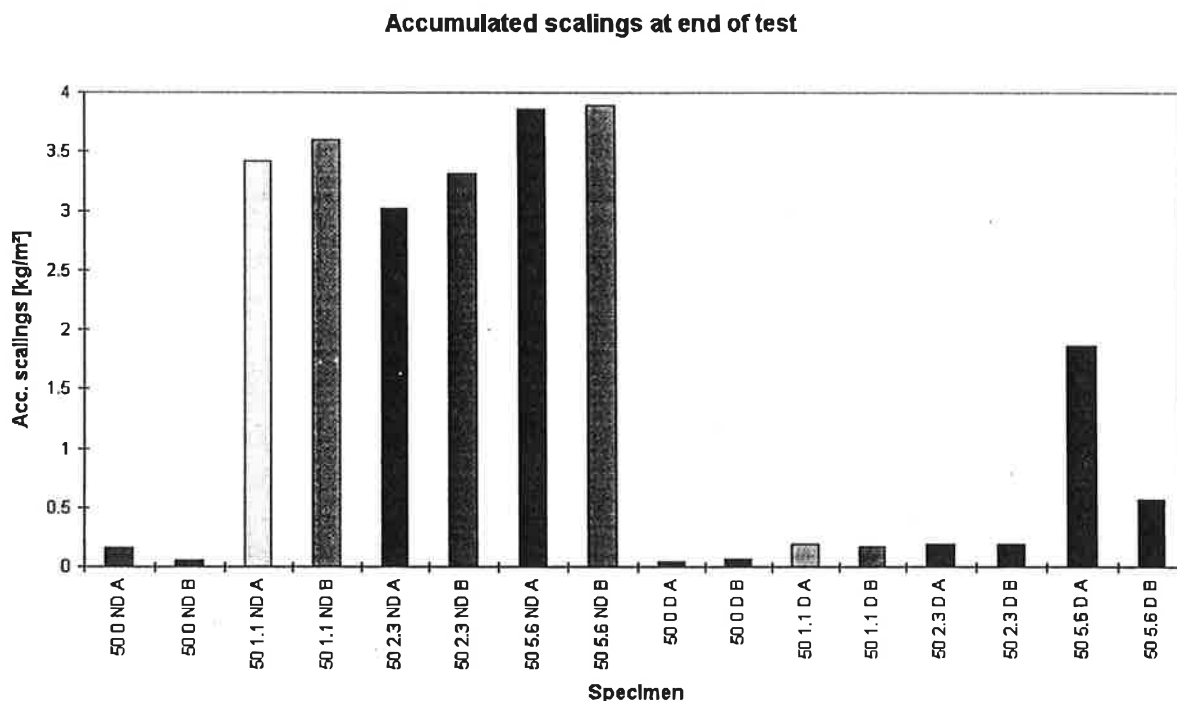
För prover som har torkats är det svårt att se några tendenser alls. Detta förklaras delvis av att dessa prover började skadas efter varierande antal cykler. Detta kan studeras i Figur 8, 9 och 10.



Figur 5: Slutlig avskalning för huvudserie 1, vct 0.45 (10 cykler)



Figur 6: Slutlig avskalning för huvudserie 2, vct 0.65 (9 cykler)



Figur 7: Slutlig avskalning för förförsöksserien, vct 0.50 (7 cykler). Observera avvikelser i försöksgenomförandet (se texten)

Inverkan på avskalningsförloppet av saltkoncentrationen

I Figur 8-13 redovisas hur de ackumulerade avskalningarna utvecklas med tiden. Slutintrycket är att den absoluta saltkoncentrationen inte spelar någon roll för hur skadorna utvecklas. Enda undantaget från detta är vct 0.65 där 1.5% NaCl ger mindre skador på otorkade prover än vad både 7.5 och 3% ger. Dessa två är dock likvärdiga.

Tydligen kan de olika proverna börja skadas något olika tidigt och under de första 2-3 cyklerna kan de cykelvisa resultaten skilja sig åt från prov till prov. Den skillnad som uppstår under dessa cykler finns sedan kvar även i slutresultatet. Vid utvärdering av saltkoncentrationens inverkan på avskalningsförloppet och dess betydelse för skadorna i allmänhet, bör man därför se på lutningen i kurvorna snarare än de absoluta nivåerna.

Sedan nedbrytningen väl inletts fortsätter den i så gott som ett och samma tempo oavsett saltkoncentration för samtliga tre serier när det gäller aldrig torkade prover. Särskilt tydligt är detta för vct 0.50, men som nämnts ovan var det också i denna serie som saltkoncentrationerna var minst spridda vilket naturligtvis bör leda till mer likartade beteenden. Som väntat är tempot dessutom högre ju högre vct materialet har. Eftersom de olika luftporsystemen skiljer sig något åt (olika lufthalt/pastahalt-förhållande, okänd porfördelning) mellan de olika brukskvaliteterna, kan man dock inte använda resultaten till att direkt avgöra exakt hur avskalningarna beror av vct.

En gång torkade prover behöver fler cykler innan skadorna har "svängt in" så att de blir lika för alla provkroppar oavsett saltkoncentration. Denna "insvängningstendens" är tydligast i Figur 9 (för vct 0.45) men finns även i Figur 11, vct 0.65. Därefter är lutningen i dessa kurvor nära nog lika brant som i kurvorna för aldrig torkade prover. Prover med vct 0.50 visar dock

prover med den starkaste saltkoncentrationen som först skadas. Detta skulle kunna vara en följd av att mer flytande fas finns tillgänglig under frysningen i detta fall än då man har en svagare saltkoncentration och överensstämmer i så fall med den föreslagna hypotesen.

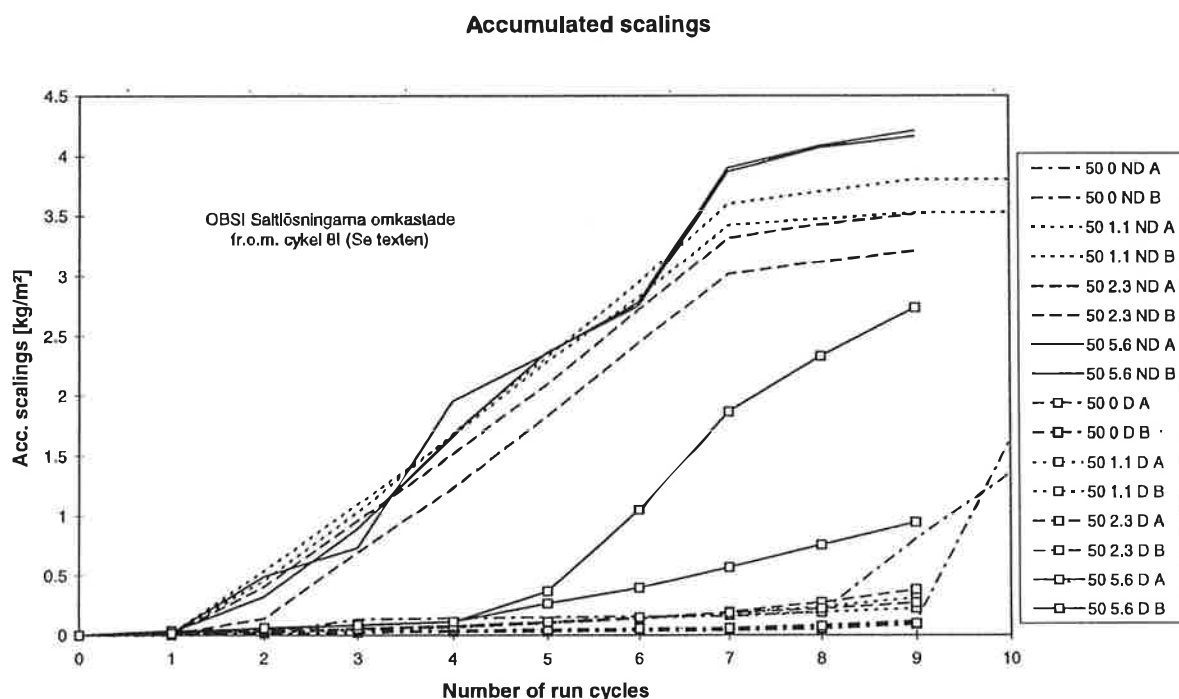
ÖVRIGA KOMMENTARER

Förförsök - Vct 0.50

Detta försök utfördes som ett förförsök, varför vissa delar av försöket utförts på annat sätt än i huvudförsöken, men resultaten kan ändå vara värda att studeras. Den främsta avvikelserna var att de använda saltkoncentrationerna, till följd av ett doseringsfel, var 1.1, 2.2 respektive 5.9% istället för som avsett 1, 3 och 7.5%. Detta betyder att spridningen i saltkoncentrationer är betydligt mindre än avsett och att resultaten för de olika koncentrationerna som följd därav bör likna varandra mer än i huvudserierna.

Huvudparten av resultaten har redovisats ovan. Nedan redovisas effekter av några ändringar i försöksutförandet som gjordes under de sista cyklerna.

Efter 7 cykler kastades saltlösningarna om så att prover som ditills skalat mycket (icke torkade prover med salt) därefter provades med rent vatten (för att se om avskalandet omedelbart skulle upphöra), medan prover som torkats och testats med salt fick fortsätta med sina vanliga salter (för att se om skadan skulle komma senare). Prover som testats med rent vatten testades istället med saltlösning i syfte att se om skadorna skulle komma omedelbart



Figur 14: Avskalning mot antal genomförda frostcykler för försök på bruk vct 0.50. Observera att saltkoncentrationerna var lägre än avsett, se texten.

eller om en viss tid erfordrades. Detta gjordes på så sätt att 500NDA och 500DA kördes med 1.1% och 0NDB och 0DB kördes med 5.9% (dvs en hög och en låg konc för att se effekten av denna)

I Figur 14 kan ses hur proverna reagerade på dessa förändringar: På prover som tidigare testats med saltlösning men från och med cykel 8 testades med rent vatten upphör avskalningen nästan helt. Att den inte avstannar fullständigt kan förklaras dels av att något salt kan ha funnits inlagrat i ytan sedan tidigare och på så sätt gjort en del flytande fas tillgänglig även under dessa sista cykler. Det kan också vara så att materialet skadats på ett sådant sätt i de tidigare cyklerna att även rent vatten nu förmår skada ytan. Vilken av dessa förklaringar som är den troligaste är omöjligt att avgöra, eftersom inga mätningar av saltinnehåll och saltkoncentrationsprofiler i proverna gjordes.

Prover som aldrig torkats och som från och med den åttonde cykeln provades med saltlösningar istället för som dittills rent vatten (lila respektive svart linje, bägge med kvadrat som punktmarkering i Figur 14) visar samma beteende som samtliga prover gjorde vid försökets början: Skadan kommer inte i den allra första cykeln, utan det behövs ytterligare någon cykel. Detta kan, så som nämndes ovan, bero på att det behövs någon cykel för att mekanismen skall hinna fylla luftporerna i tillräckligt hög grad för att skada skall kunna uppstå. Om fenomenet emellertid också finns även hos prover utan lufttillsats, måste förklaringen vara en annan, till exempel som också nämnts ovan kan man tänka sig att det behövs någon eller några fryscyklar för att så många iskristaller skall bildas inne i provet att mekanismen verkligen blir effektiv. Bägge dessa alternativa fall bör naturligtvis provas i framtida försök som ytterligare kontroll av den föreslagna hypotesen.

En intressant kontrast till detta är de prover som torkats och återuppfuktats, sedan testats med rent vatten och från och med cykel 8 testats med saltlösningar: I motsats till de prover som beskrevs i förra stycket skadas dessa inte alls under cykel 8, 9 och 10. Det förefaller således som att den positiva effekten av den föregående torkningen, som också synts tidigare i testen, fortfarande finns kvar. Detta stödjer hypotesen, eftersom det indikerar att ingen transport av fukt in i provet ägt rum så länge proverna provades med rent vatten (ren is) på ytan.

De extra-observationer som nämnts här är gjorda på ett minimalt antal prover och utgör inget statistiskt tillförlitligt underlag. Dock är resultaten konsekventa och väl i linje med vad hypotesen förutspår. Att dessa resultat endast skulle vara en följd av en lycklig slump verkar osannolikt och man bör därför inte bortse helt från dem.

FORTSÄTTNINGSFÖRSÖK - LÅNG TID MED SALTÖSNING

De försök som redovisats ovan skiljer sig från traditionella ytavskalningsförsök genom att saltlösningar endast använts under den tid proverna befunnit sig vid temperaturer från ungefär 0°C och lägre. Erfarenhetsmässigt borde de använda materialen ha skadats maximalt, på klassiskt vis, vid ca 3% saltkoncentration. För att testa att de erhållna resultaten inte beror på att just dessa material är unika så tillvida att de inte uppvisar något sådant maximum, borde därför också ett traditionellt test ha genomförts. Det bedömdes emellertid som tillräckligt säkert att ett sådant test skulle ha givit traditionella resultat, varför det alternativa testet istället utformades så att proverna fick stå med saltlösningar på den exponerade ytan en hel vecka för att därefter frysas. Denna långvariga exponering bör ha givit porsystemet nära ytan ett tydligt saltinnehåll. Denna långvariga saltlösningsexponering följt av en frysning upprepades sedan i 4-5 cykler. På grund av läckage kunde fler cykler inte genomföras och dessutom bortföll hälften av proverna så att det endast finns en enda provkropp för varje variablekombination.

Inga förtorkade/återuppfuktade prover användes denna gång. Underlaget är således för tunt för att man skall våga dra några säkra slutsatser, men resultaten redovisas ändå här.

Förväntade resultat

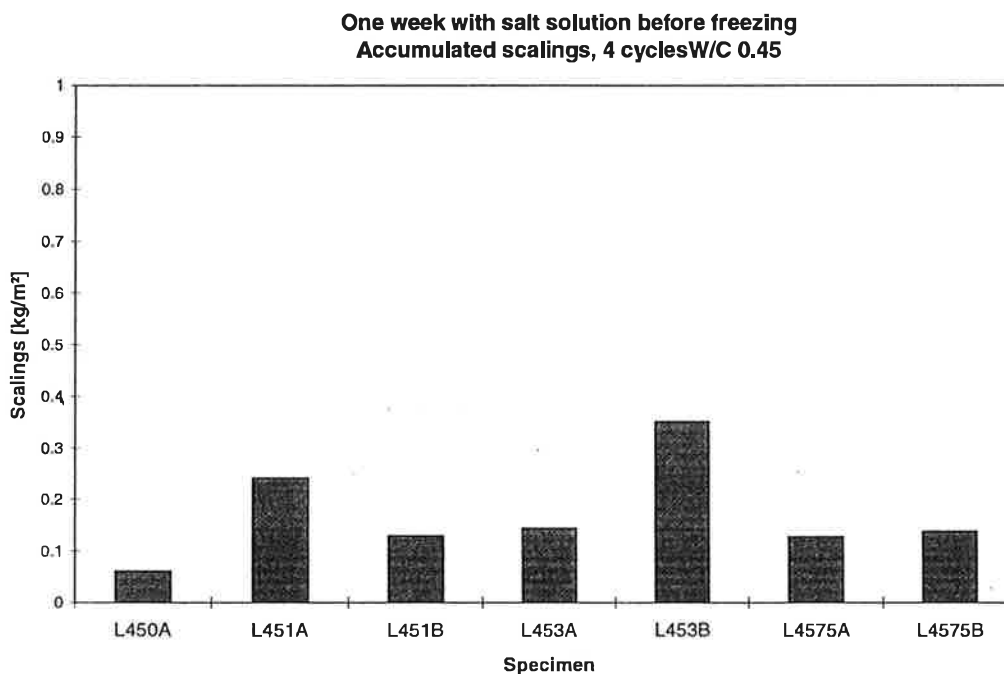
Hypotesen förutspår i detta fall att skadorna generellt skall bli lägre än då salterna inte hinner tränga in i porsystemet. Detta beror på att den för termodynamisk jämvikt erfordrade tryckdifferensen minskas då vattnet innehåller salter och således minskar även iskristallernas möjlighet att utöva sprängande tryck på porväggarna. Dessutom bör isbildningsförloppet i porerna förändras med saltmängden.

Resultat

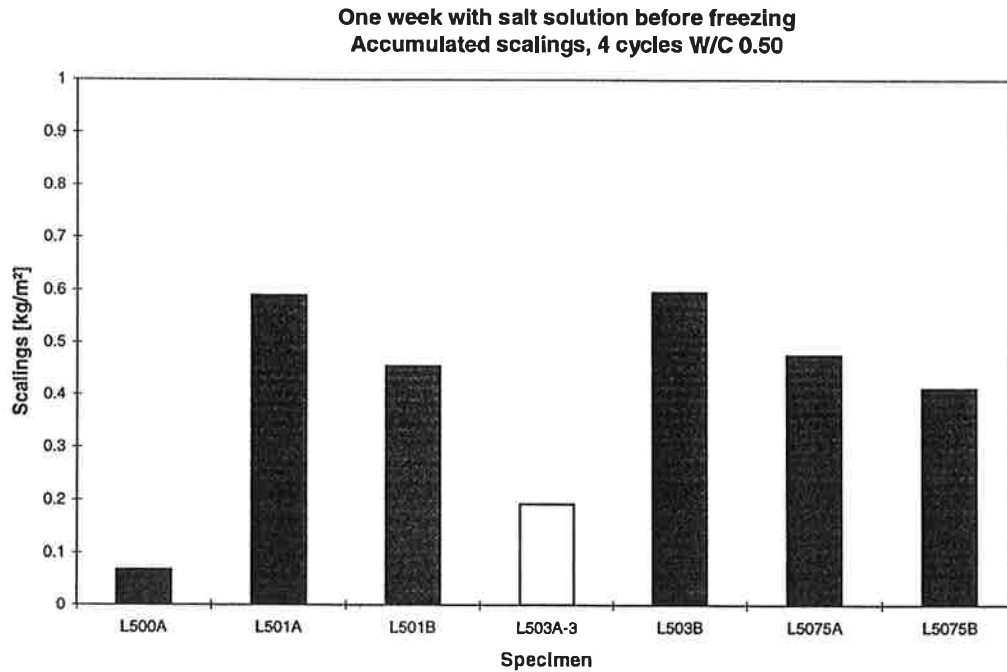
I figurerna nedan redovisas slutlig avskalning efter 4 fryscyklar för de tre brukskvaliteterna. I två fall har läckage gjort det tvunget att stoppa vissa prover. Stapeln har i dessa fall ritats vit. Vid dessa staplar är provkroppsbezeichnung följt av en siffra som anger hur många frostcykler den ritade stapeln avser.

Observera att kvalitet vct 0.50 i detta försök inte utfördes som förförsök, utan är fullt jämförbar med de övriga kvaliteterna vad gäller försöksutförandet.

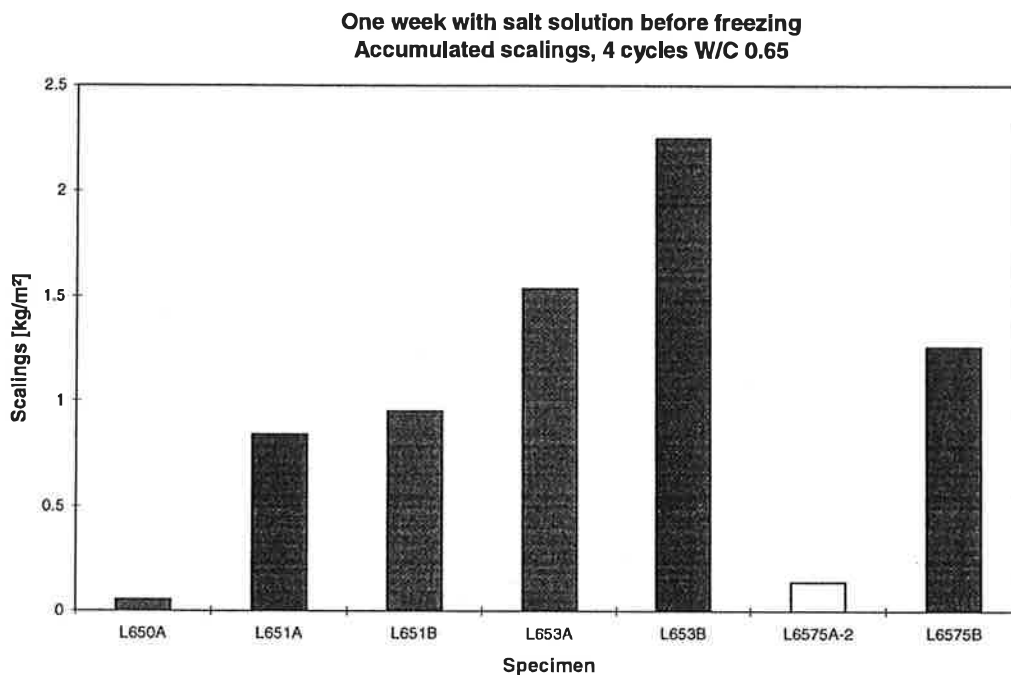
Resultaten är svåra att tolka. Man kan dock göra en grov jämförelse av den långvariga saltexponeringen med den kortvariga genom rätlinjig extrapolation av resultaten i Figur 15-17 till att gälla för samma antal cykler som genomfördes på respektive kvalitet i de föregående testerna. För kvalitet 0.45 skall då resultaten i Figur 15 multipliceras med $10/4=2.5$. Detta antyder att angreppet blir betydligt lindrigare på denna materialkvalitet då salterna får god tid på sig att penetrera porsystemet. För vct 0.50 blir skalfaktorn $7/4$. Också här har den långvariga exponeringen resulterat i betydligt lindrigare skador. För vct 0.65 fås skalfaktorn $9/4$.



Figur 15: Ackumulerad avskalning efter 4 cykler för vct 0.45. En veckas exponering för saltlösning före frysning.



Figur 16: Ackumulerad avskalning efter 4 cykler för vct 0.50. En veckas exponering för saltlösning före frysning.



Figur 17: Ackumulerad avskalning efter 4 cykler för vct 0.65. En veckas exponering för saltlösning före frysning.

Vid jämförelse med resultaten i Figur 10 ser man återigen att skadegraden minskar då provytan utsätts för saltlösningen under en längre tid före frysningen. Resultaten för vct 0.65 i Figur 17 är dock mycket olika beroende på vilken saltkoncentration som använts; Här finns även en antydning om maximala skador vid cirka 3% saltkoncentration.

KOMMENTARER KRING SALT KONCENTRATIONER

Vid ett test av denna typ är det naturligtvis nödvändigt att kontrollera att saltlösningarna är de avsedda samt att studera vad som sker med dessa under frysförloppet. Efter första cykeln för vct 0.45 samlades ytlösningarna upp och analyserades. Analysen gjordes genom potentiometrisk titrering med en utrustning av fabrikat Corning. Resultat:

Prov	Lsg	Lsg+vatten	Utslag	Konc (g/l lsg, ej korr för dens)
ND1A	1.994	101.374	94 95 92	7,8 (10)
ND1B	2.989	55.518	447 445	13.4 (10)
ND3A	2.017	48.701	678 698	27.4 (30)
ND3B	2.005	89.284	375 375	27.5 (30)
ND7.5A	-----			
ND7.5B	2.093	163.039	628 637(506mg)	80.8 (75) Ej analyserad
D1A	2.991	58.354	264 268	8.6 (10)
D1A	2.485	184.43	76 66 83	9.2 (10)
D1B	2.196	57.197	190 189	8.1 (10)
D3A	2.024	98.428	342 344	27.5 (30)
D3B	-----			
D7.5A	2.068	193.165	508 501	77.7 (75) Ej analyserad
D7.5B	2.078	193.149	508 510	78.0 (75)

Värden inom parentes anger avsedda/förväntade.

Som synes är koncentrationen lägre än avsett för koncentrationerna 1 och 3%, men högre för 7.5%. De koncentrerade saltlösningarna kontrollerades därför med följande resultat:

Lösning	Analysprov	Vatten+prov	Utslag (2st)	Konc (g/l lsg)
"3%"	2.025	85.565	431 , 436	30.2
"9%"	1.579	142.013	607 , 608	90.0
"22.5%"	0.886	165.331	730 , 729	224.3

Ingen av lösningarna var således felaktig nog för att förklara de avvikande värdena i mätningen. Därför kontrollerades doseringssprutan på avjoniserat vatten med följande resultat:

Avsedd mängd	Mätt vikt (gram)					
20 ml	19.89	19.87	19.98	20.09	20.00	
13 ml	13.05	12.99	13.06	12.92	12.84	13.13
6 ml	6.16	6.14	6.13	6.10	6.12	

Man kan beräkna vilket maximalt fel i mätning av saltkoncentrationen som felen i doseringssprutan kan ge upphov till på följande vis: Antag att maximalt mätfel är 0.15 g. Den maximala avvikelserna kan då, genom additiv verkan, bli (då ytlösningen späds ut)

$$(13-0.15)/(20+0.15+6+0.15+13-0.15)/0.33333 = 0.9847$$

Detta betyder att för respektive lösning borde man ha fått resultat i intervallen

1%:	9.85 < 10 < 10.16 g/l
3%:	29.54 < 30 < 30.47 g/l
7.5%:	73.85 < 75 < 76.17 g/l

Tydligt kan de låga värden som mättes på proverna efter en fryscykel inte förklaras som endast ett doseringsfel. Mätningarna tyder istället på att något händer under fryscykeln så att lösningarna förändras. Rimliga förklaringar är att kloridjoner transporteras in i materialet och/eller att fukt går ur provet och på så sätt späder saltlösningen. Uppenbarligen bör detta fenomen studeras separat.

I förserien på bruk med vct 0.50 gjordes kontrollmätning endast en gång och antydde då att de erhållna koncentrationerna (efter genomförd fryscykel) var 0.8-1.5, 2.2-2.6 samt 6.4-10.9% istället för som avsett 1.1, 2.2 och 5.9%. I de fall de mätta koncentrationerna är högre än avsett, är förklaringen troligen att provet läckt ut vätska innan saltlösning tillfördes (Tätningarna förstördes i takt med att ytorna skadades, detta förbättrades till huvudserierna genom att tätningen då gjordes på provets undersida). Fall med lägre än avsedd koncentration är svårare att förklara. Eftersom detta beteende, det vill säga en sänkning av kloridkoncentrationen under själva frysningen, också uppvisades i de efterföljande huvudförsöken, kan en tänkbar förklaring dock vara att isbildning inne i materialet under frysningens gång leder till insugning av den yttre vätskan, med följd att klorider suges in i materialet. Vid den efterföljande upptiningen är det inte säkert att kloridjonerna åter följer med vätskan ut ur materialet (det är inte heller säkert att vätskan går ur materialet; Den kan istället ansamlas i vad som tidigare var luftporer). Denna förklaring ligger i linje med den föreslagna hypotesen.

BILAGA : BRUKSRECEPT

Recepten avser torra material. Vattenmängden justerades vid gjutningarna med hänsyn till grusets aktuella fuktkvot.

Vct:	0.45	0.50	0.65	
Vatten:	262	280	266	l/m ³
Cement:	582	560	409	kg/m ³
Grus:	1295	1275	1424	kg/m ³
Fuktkvot:	5.8	4.8	5.6	%
Lufthalt:	6.6	6.2	6.7	%

Lufthalten mättes i färskt tillstånd. Luftporbildare var av vinsolharts-typ (Cementa 88L, torrhalt 21%, Tillsatt mängd 0.01% av cementvikten, brutto)

Cementet är det svenska Anläggningscementet.

Gruset är Åstorp Betonggrus, 0-3 mm.

REFERENSER

- 1 Lindmark, S: A hypothesis on the mechanism of surface scaling due to combined salt frost attack. Ingår i sammanfattningsrapport från Nordiskt Miniseminarium om Frostnedbrytningsmekanismer i Byggnadsmaterial, Lund 16-17 april 1996.
- 2 Arnfelt: Damage on concrete pavements by wintertime salt treatment. Meddelande 66, Statens Väginstytut, Stockholm 1946.
- 3 Verbeck, Klieger: "Studies of "salt" scaling of concrete", Highway Research Board, Bulletin 150, Washington DC 1957
- 4 Powers, Helmuth: Theory of volume changes in hardened Portland-cement paste during freezing. Highway Research Board, Proceedings 32/1953.
- 5 Lindmark: Inverkan på testresultatet av variationer i saltkoncentrationer, saltfördelningar och fryscykelutformning vid saltfrostprovning enligt SS137244. Tekniska Högskolan i Lund, Avd. Byggnadsmaterial, Rapport TVBM-7055, 1993
- 6 Sellevold, Bager: Some implications of calorimetric ice formation results for frost resistance testing of cement products. Technical University of Denmark, Building Materials Laboratory, Technical Report 86/80.