LUND UNIVERSITY

Högpresterande betong : frostbeständighet

Fagerlund, Göran

1998

Link to publication

Citation for published version (APA):
Fagerlund, G. (1998). *Högpresterande betong : frostbeständighet*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7130). 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

Download date: 19. Dec. 2025

LUND UNIVERSITY
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Division of Building Materials

HÖGPRESTERANDE BETONG

FROSTBESTÄNDIGHET

Göran Fagerlund

Report TVBM-7130
Lund, Sweden, 1998

Förord

Det nationella projektet Högpresterande Betong bedrevs under åren 1991-1997. Finansiärer var BFR och NUTEK tillsammans med ett industrikonsortium bestående av 6 företag: Cementa, Elkem Materials, Euroc Beton, NCC, Skanska och Strängbetong. Ett av delprojekten avsåg den högpresterande betongens frostbeständighet. Resultat från detta delprojekt har redovisats i 8 interna rapporter, vilka kan erhållas från avdelning byggnadsmaterial, LTH. Rapportlista ges nedan.

Efter projektets avslutning har text till två handböcker sammanställts:

Handbok "Konstruktion"

Handbok "Material och Utförande"

Dessa kommer att ges ut hösten 1998.

Kapitel Frostbeständighet, som utgör kap 13 i Handbok "Material och Utförande", utarbetades av undertecknad . Texten återges i denna rapport.

Lund, 8 september 1998

Göran Fagerlund

Interna rapporter publicerade under delprojekt M2 "Fysikaliska angrepp"

M2:01: Sture Lindmark: Inverkan på testresultatet av variationer i saltkoncentrationer, saltfördelningar och fryscykelutformning vid saltfrysprovning enligt SS 13 72 44. Lund 1993.

M2:02: Sture Lindmark: Högpresterande betongs frost- och saltfrostbeständighet - kortfattad litteraturstudie. Lund 1993.

M2:03: Sture Lindmark: Studier av högpresterande betongs saltfrostbeständighet
A: Pessimala saltkoncentrationer och varierad förlagring
B: Inverkan av vct/vbt.
Lund 1994.

M2:04: Göran Fagerlund, Sture Lindmark: Studies of the effects on salt scaling of outer salt concentration, inner salt concentration and freeze/thaw cycle. Lund 1994

M2:05: Sture Lindmark: Influence of testing conditions on salt frost resistance of concrete. Lund 1995.

M2:06: Göran Fagerlund: Undersökningar av den inre frostbeständigheten hos högpresterande betong. Lund 1997.

M2:07: Katja Nordström, Göran Fagerlund: Mätningar av inre frostbeständighet hos betong som lagrats under ca 18 månader i vatten eller 3% NaCl-lösninmg. Lund 1998

M2:08: Göran Fagerlund och Yang Quanbing: Inner moisture conditions in high performance comncrete stored in water or salt solution for almost 2 years. Lund 1998.

HÖGPRESTERANDE BETONG

FROSTBESTÄNDIGHET

Göran Fagerlund, LTH

Innehåll

1. Inledning. Problemställning

2. Nuläge. Dagens betong

3. Nedbrytningstyper. Högpresterande betong versus normalbetong

4. Ur frostbeständighetssynpunkt relevanta egenskaper hos högpresterande betong
   4.1 Inledning. Definition av högpresterande betong
   4.2 Minskad frysbar vattenmängd
   4.3 Ökad självuttorkning
   4.4 Minskad permeabilitet

5. Experimentella undersökningar av saltfrostbeständigheten hos högpresterande betong
   5.1 Inledning
   5.2 Undersökningar av inverkan av yttre och inre salthalt
   5.3 Undersökningar av inverkan av vbt och silikastoft
   5.4 Inverkan av åldringseffekter
   5.5 Inverkan av cementtypen
   5.6 Inverkan av värmehärdning
   5.7 Saltfrostbeständighet - slutsatser

6. Experimentella undersökningar av den inre frostbeständigheten hos högpresterande betong
   6.1 Inledning
   6.2 Mätning av längdändring under en-cykelfrysning av fuktlagrade prover
   6.3 Traditionella flercykelförsök
   6.4 Inre frostbeständighet - slutsatser

7. Tidig frysning

8. Provningsmetoder för högpresterande betongs frostbeständighet
   8.1 Indirekta provningsmetoder
   8.2 Saltfrysprovning
   8.3 Provning av den inre frostbeständigheten

Litteratur

13 FROSTBESTÄNDIGHET

Göran Fagerlund

13.1 INLEDNING. PROBLEMSTÄLLNING

Frostbeständighetsproblem löses i dag genom att betongen som måste ha relativt lågt vct förses med extra luftinblandning. Luftinblandning påverkar emellertid flertalet mekaniska egenskaper negativt vilket gör att det finns en konflikt mellan hög frostbeständighet och goda mekaniska egenskaper:

1: Hållfastheten minskar ungefär enligt följande uttryck; Popovics (1969).

$$f = f_o \cdot 10^{-0,035 \cdot \Delta L} \qquad (13.1:1)$$

Där f är hållfastheten hos en betong där lufthalten ökar med $\Delta L\%$ och f_o är hållfastheten hos samma betong före lufthaltsökningen. En ökning av lufthalten från 2% till 5% innebär alltså en hållfasthetsminskning med ca 12%.

2: E-modulen hos cementpastafasen minskar med ökande porositet och lufthalt ungefär enligt följande uttryck; Helmuth &Turk (1966):

$$E = E_o(1-L/100)^3 \qquad (13.1:2)$$

Där E_o är E-modulen hos den luftfria cementpastan och P är porositeten (%). En ökning av lufthalten L från 2% till 5% innebär alltså att cementpastans E-modul minskar med ca 9%. Betongens E-modul minskar något mindre; storleksordningen 5%.

3: Nötningsmotståndet minskar med ökad lufthalt eftersom hållfastheten minskar. Enligt Dhir et al (1991) minskar nötningsmotståndet i direkt proportion till minskningen i tryckhållfasthet.

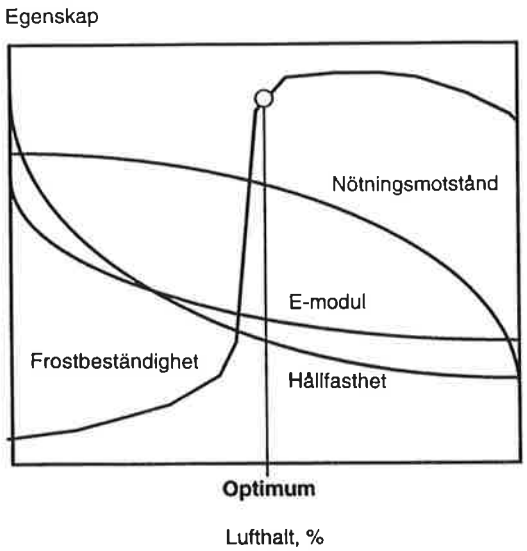
Inverkan av en ökad lufthalt på de mekaniska egenskaperna sker alltså gradvis vilket visas schematiskt i figur 13.1:1.

En frostutsatt betong med låg frostbeständighet kommer på grund av frostangrepp att få dåliga mekaniska egenskaper. Samtidigt är det väl känt att små förändringar i den hårdnade betongens lufthalt vid en kritisk nivå hos denna har drastiska effekter på frostbeständigheten. Inom ett snävt lufthaltsområde övergår betongen från att ha mycket låg frostbeständighet till att ha hög frostbeständighet. Ett hypotetiskt exempel visas i figur 13.1:1.

Det gäller att finna den lägsta lufthalt som ger såväl tillräcklig frostbeständighet som acceptabla mekaniska egenskaper. Denna "optimala" lufthalt kan definieras som den lufthalt som motsvarar övre värdet på övergångszonen mellan låg och hög frostbeständighet. Av säkerhetsskäl erfordras dock något mera luft än det absoluta minimivärdet. Lufthalten får emellertid inte drivas upp alltför högt utöver detta absolut minimivärde. I figur 13.1:1 visas den optimala lufthalten schematiskt.

Den mest optimala betongen för en frostutsatt betong med höga krav på mekaniska egenskaper, t ex en vägbana, är den som inte kräver någon extra luftinblandning alls, utan där den naturliga lufthalten på ca 1,5 - 2,5 % räcker för hög frostbeständighet.

Lågt *vbt* medger en potentiell möjlighet att skapa betong med mycket goda mekaniska egenskaper utan att äventyra frostbeständigheten. I många fall kan hög frostbeständighet hos betong med låga *vbt* erhållas utan att betongen förses med extra luftinblandning.



Figur 13.1:1. Hypotetiska samband mellan lufthalt och olika mekaniska egenskaper, samt mellan lufthalt och frostbeständighet. Definition av "optimal" lufthalt.
Figure 13.1:1. Hypothetical relations between the air content and different mechanical properties, and between the air content and the frost resistance. Definition of the "optimum" air content.

13.2 NULÄGE. DAGENS BETONG

13.2:1 Allmänt

Frostbelastad betong utsätts för två olika typer av frostangrepp:

1. Saltfrostangrepp som är ett rent ytangrepp förorsakat av frysning och tösaltning, eller frysning och havsvatten.

2. Inre frostangrepp förorsakat av att betongens inre delar är vattenmättade över en kritisk nivå.

Båda nedbrytningstyperna måste beaktas vid val av betongkvalitet. Fortsättningsvis beskrivs kortfattat hur man i dag hanterar dessa frågor.

13.2:2 Saltfrostangrepp

Betong till krävande konstruktioner i saltfrostutsatt miljö tillverkas sedan ca ett decennium med ett vattenbindemedelstal *(vbt)* av ca 0,40 och med extra luftinblandning. Visserligen skulle ett något högre *vbt* kunna räcka om man bara ser på saltfrostangreppet, men dimensionerande för *vbt*-kravet är normalt inte frysrisken utan risken för armeringskorrosion och då krävs detta låga *vbt*. Traditionellt har man i Sverige aldrig accepterat inblandning av mineraliska tillsatsmaterial i frostutsatt betong. Granulerad masugnsslagg har visat sig ge negativa åldringsfenomen hos betongytorna vilket försämrar saltfrostbeständigheten. Flygaska har visat sig ge stora och svårkontrollerade lufthaltsvariationer. Sedan 1994 tillåts dock enligt BRO 94 max 5% silikastoft i brobetong.

All betong för saltfrostutsatta konstruktioner förprovas normalt enligt; SS 13 72 44. Såväl BRO 88 som BRO 94 ställer krav på sådan förprovning. I BRO 94 ställs också krav på den färdiga konstruktionens saltfrostbeständighet provad med samma provningsmetod.

Erfarenheten från de senaste årens broproduktion där generell förprovning av betongens saltfrostbeständighet gjorts är mycket goda. Normalt sett klarar en betong med lämpligt cement och lämplig luftporbildare förprovningen. Det har inte gjorts någon mera omfattande kartering av hur saltfrostbeständigheten blivit hos de byggda broarna. Det förefaller emellertid som om i stort sett alla broar som byggts enligt BRO 88 och BRO 94 uppvisar mycket hög frostbeständighet.

Erfarenheten från förprovningar och en del laboratorieundersökningar är att valet av cement och luftporbildande tillsatsmedel är mycket viktigt. Det framgår rätt klart att LA/SR-cement (t ex anläggningscement) ger avsevärt högre saltfrostbeständighet än vanligt portlandcement; Malmström (1990), eller cement med mineraliska tillsatsmaterial; Bremner et al (1989). Det förefaller också som om vattenreducerande/plasticerande tillsatsmedel påverkar saltfrostbeständigheten negativt; Fagerlund (1983), Petersson (1989).

13.2:3 Inre frostangrepp

När det gäller frostbeständigheten vid frysning i rent vatten, vilket normalt är ett inre frostangrepp, vet vi erfarenhetsmässigt att *vbt* understigande ca 0,50 och en lufthalt hos den färska betongen överstigande ca 4,5 % ger hög beständighet. Även lufthalter ner mot 3 à 3,5 % har ofta visat sig vara tillräckliga; Cordon (1966). För denna angreppstyp ställs i dag inga krav på förprovning. Inte heller finns någon i Sverige etablerad provningsmetod. En möjlighet som diskuterats är att utnyttja metoden SS 13 72 14, varvid den yttre saltlösningen byts mot rent vatten. Det är emellertid oklart om denna metod är direkt användbar eftersom man sällan får ytavskalning vid frysning i rent vatten. Troligen erfordras även mätning av inre skador, t ex ultraljudhastighet, dynamisk *E*-modul eller expansion.

En annan möjlighet är att använda den amerikanska metoden ASTM C 666. Denna metod används tämligen mycket internationellt, men inte i Sverige. Tidigare hade vi en liknande normerad metod i Sverige för kontroll av luftporbildande tillsatsmedel; B5 (1973).

Beständigheten mot inre frostskador kan även provas med den amerikanska *"Dilation Test"*, ASTM C 671. Ett prov som lagrats under viss tid i vatten utsätts för en enda frysning ner till temperaturen -9,4°C, vilken lämpligen sänks till -20°C för svenska förhållanden. Provets längdändring mäts. Efter upptining placeras det än en gång i vatten under en viss tid varefter en ny frysning till -9,4°C (-20°C) genomförs. Detta upprepas tills provet får en påtaglig expansion jämfört med närmast föregående frysning. Denna fuktlagringstid definierar en s k *"period of frost immunity"* som är den tid provet kan ta upp vatten utan att skadas vid en efterföljande frysning. En liknande metod är den sk "kritiska vattenmättnadsgradsmetoden"; Fagerlund (1977a).

En alternativ provningsmetod är den finska indirekta metoden *"protective pore ratio"* enligt vilken en betong som skall vara frostbeständig måste, efter en viss tids vattensugning, ha en resterande luftfylld porvolym som är minst 20% (alt 25%) av volymen av betongens blandningsvatten. Metoden beskrivs i Vuorinen (1970), (1983).

Oavsett vilken frysprovningsmetod som används visar det sig att den hårdnade "normalbetongen" måste ha en viss lufthalt för att vara frostbeständig vid frysning i rent vatten. Storleken på denna minsta lufthalt beror på fuktnivån som betongen utsätts för i praktiken.

13.3 NEDBRYTNINGSTYPER. HÖGPRESTERANDE BETONG JÄMFÖRD MED NORMALBETONG

13.3:1 Saltfrostangrepp

Saltfrostangrepp kan ske när betongen omges av en saltlösning, tex havsvatten eller tösalt. Skadorna utgörs oftast av en ytavskalning. Denna beror troligen på att iskristaller som bildats i kapillärporer i betongens yta växer genom att dra till sig ofruset vatten från den yttre lösningen. En mera detaljerad analys av denna nedbrytningsmekanism har genomförts av Lindmark (1996). Mekanismen leder till existensen av en farligaste ("pessimal") saltkoncentration hos den yttre lösningen. För "normalbetong" förefaller denna koncentration ligga inom området 2-4 % oberoende av saltkoncentrationen hos porlösningen. Exempel på en sådan pessimal yttre saltkoncentration visas i figur 13.5:3. För betong med mycket låga *vbt* förefaller den pessimala saltkoncentrationen vara betydligt mindre väldefinierad; se figur 13.5:4 och 13.5:5.

Saltavskalningen tycks för "normalbetong" öka kraftigt med sänkt temperatur; se figur 13.5:3. Enligt försök av Lindmark (1995) gäller för fryscykler enligt figur 13.5:2 och för normalbetong med *vct*=0,40 följande mycket approximativa relation; se figur 13.5:3:

$$S \approx konst \cdot \theta_{min}^{2} \qquad (13.3:1)$$

Där S är avskalningen i kg/m^2 och θ_{min} är lägsta frystemperatur i betongen under fryscykeln. Frystemperaturen -10°C ger alltså enbart ca 25 % av de skador som -20°C ger. För betong med låga *vbt* torde temperatureffekten vara än större eftersom det erfordras tämligen låga temperaturer för att man överhuvud taget skall få isbildning i en tät betong; se figur 13.4:2.

Den inre saltkoncentrationen i porsystemet tycks spela liten roll för skadeförloppet vilket framgår av figur 13.5:3. Orsaken är troligen att den inre porlösningen till skillnad från den yttre lösningen genom sin begränsade volym inte kan bidra till en "ohämmad" iskristalltillväxt i betongens yta. Redan efter en liten iskristalltillväxt har en så kraftig uttorkning skett att iskristalltillväxten stoppar; Powers & Helmuth (1953).

Figur 13.5:3 gäller för en betong med *vct*=0,40, dvs i princip dagens brobetong. Inverkan av den inre salthalten torde inte vara större för högpresterande betong med dess låga *vbt*. I sådan betong är nämligen inflödet av salt i ytan mycket långsam varför inre salthaltern torde bli lägre än i normalbetong.

Saltfrostnedbrytningen kräver att en viss mängd iskristaller kan bildas i betongens yttre delar, dvs porsystemet får inte vara så fint att ingen is kan bildas. Iskristalltillväxten kan ske spänningslöst om den sker i luftporer. Därför kommer luftinblandning att skydda betongen; Powers & Helmuth (1953).

I högpresterande betong med lågt *vbt* bildas mindre mängd is än i normalbetong; se avsnitt 13.4:2. Man kan därför teroretiskt sett tänka sig att saltavskalning inte är möjlig ens i luftfri betong om *vbt* är tillräckligt lågt. Exempel på att så kan vara fallet visas i figur 15.5:5 och 13.5:6. Detta förutsätter dock att åldringsfenomen inte gör att ytans täthet på sikt minskar varvid frysbara vattenmängden ökar. Ett sådant åldringsfenomen är karbonatisering vilken visat sig kunna mer eller mindre helt ödelägga saltfrostbeständigheten hos betong tillverkad med vissa cementsorter; Matala (1995), Stark & Ludwig (1995). Se även figur 13.5:1.

13.3:2 Inre frostangrepp

Inre frostangrepp kan ske när betongen under längre tid omges av rent vatten. Skadorna uppträder oftast i betongens inre delar medan ytan är intakt. Skadorna observeras ofta genom att betongen visar tecken på expansion. Den har då en mer eller mindre omfattande sprickbildning, sk *"map-cracking"*, ett hönsnätsliknande sprickmönster över hela betongytan, eller *"D-cracking"*, sprickor parallella med fria kanter på betongkonstruktionen; Cordon (1966). Skador kan även detekteras genom förlust i hållfasthet och *E*-modul.

Skadeorsaken är troligen dragspänningar som skapas av det hydrauliska tryck som uppstår när vatten måste pressas undan från den plats där is bildas till närmaste luftfyllda utrymme, t ex en luftfylld s k luftpor; Powers (1949). En annan mekanism är den sk mikroskopiska islinsbildningen. Is i större kapillärer förmår dra till sig ofruset vatten från mindre kapillärporer och gelporer. De växer därvid och utsätter porväggen för ett tryck som kan skada betongen; Powers & Helmuth (1953), Everett (1961). Denna mekanism är i grunden densamma som den som antagits gälla för saltfrostangrepp; se ovan. Enda skillnaden är att vattnet som erfordrs för iskristalltillväxten denna gång kommer från betongens inre porvatten i stället för från den yttre saltlösningen. Därvid begränsas iskristalltillväxten av den begränsade mängd ofruset vatten som finns i porsystemet, och av det porvattenundertryck som uppstår på grund av att iskristalltillväxten medför en uttorkningseffekt.

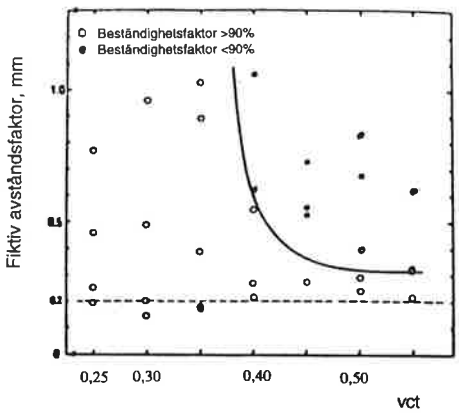
För att skador skall ske måste betongen innehålla tillräcklig mängd frysbart vatten. Det krävs dock mycket liten vattenmängd när betongen är fullständigt vattenmättad; 5-10 liter/m^3; Fagerlund (1995). Större vattenvolymer instängda i t ex vattenseparationsfickor, i större vattenfyllda porer, t ex kollapsade, kontinuerliga vattensugande luftporsystem, eller i porer i de grova ballastkornen kan således leda till stora inre frostskador.

Luftinblandning skyddar betongen, dels genom att tillhandahålla expansionsutrymmen vilka minskar det hydrauliska trycket, dels genom att tillåta platser för sådan mikroskopisk iskristalltillväxt som kan ske spänningslöst.

Högpresterande betong med lågt *vbt* kan teoretisk sett inte få inre frostskador om dess struktur är så tät att inget porvatten är frysbart. Troligen kan man tillverka cementpastor som har denna egenskap; se figur13.4:2. Man kan emellertid inte förvänta sig att en betong tillverkad av denna pasta är helt immun mot inre frostskador. En betong är nämligen aldrig helt defektfri. Det kommer alltid att finnas dåligt komprimerade delar som kan innehålla vatten. Betongen kan ha vattenfyllda sprickor. Åldringseffekter kan göra att den frysbara vattenmängden gradvis ökar. Exempel på detta visas i figur 13.4:3 och 13.4:4.

En högpresterande betong med lågt *vbt* har låg permeabilitet. Det hydrauliska trycket är omvänt proportionellt mot permeabiliteten och direkt proportionellt mot mängden frysbart vatten; Powers (1949). Detta innebär att det hydrauliska trycket i högpresterande betong teoretiskt sett kan bli lika högt som hos normalbetong trots att mängden frysbart vatten är betydligt mindre. Följaktligen kan det tänkas att man måste ha en lika väl fördelad luftporstruktur i en högpresterande betong som i en normalbetong. Att betong med mycket låga *vbt* utan extra luftinblandning kan vara känslig för inre frostangrepp visas av försök; se avsnitt 13.6:3 samt figur 13.6:2, 13.6:3 och 13.6:4.

Den sk kritiska avståndsfaktorn är ett mått på vilka spänningar som uppstår när betongen fryser. Om den kritiska avståndsfaktorn minskar ökar påkänningarna. Inverkan av *vbt* på den sanna kritiska avståndsfaktorn är okänd. Det finns några försök som visar att den kritiska s k fiktiva avståndsfaktorn (alla luftporer inräknas vid beräkning av avståndsfaktorn) ökar kraftigt vid *vbt* mindre än ca 0,35; se figur 13.3:1, Okada et al (1981). Den kritiska *fiktiva* avståndsfaktorn är emellertid annorlunda än den kritiska *sanna* avståndsfaktorn. Den sanna avståndsfaktorn beror på hur frysförsöket genomförs. Om provet är förhållandevis torrt kommer den sanna avståndsfaktorn att vara låg eftersom luftposystemet inte är vattenfyllt. Om samma prov utsätts för en mera fuktig frysprovning kommer den sanna avståndsfaktorn att bli högre eftersom vissa luftporer är vattenfyllda. Den japanska undersökningen torde ha genomförts med prover vars fuktnivå var relativt lägre vid låga *vbt* än vid normala eller höga *vbt* beroende på självuttorkningseffekter, lägre permeabilitet, etc i betongerna med låga *vbt*. Därför torde resultatet som visas i figur 13.3:1 vara delvis missvisande. I en fuktigare miljö kan mycket väl den *kritiska* sanna avståndsfaktorn bli ungefär lika hög som för normalbetong. Beträffande definitionen av sann resp. fiktiv avståndsfaktor, se Fagerlund (1994).



Figur 13.3:1. Samband mellan den kritiska fiktiva avståndsfaktorn och *vct*; Okada et al (1981). Resultat efter 300 cykler med frysprovningsmetod ASTM C 666.
Figure 13.3:1 Relation between the critical fictitious spacing factor and the w/c-ratio. Results after 300 freeze-thaw cycles in the ASTM C 666 test. Okada et al. (1981).

Den lägre frysbara vattenmängden hos betong med lågt *vbt* medför att den mikroskopiska iskristalltillväxten torde ha mindre möjligheter att utvecklas, vilket är en gynnsam faktor.

Betong med låga *vbt* har en avsevärd självuttorkning. Exempel visas i figur 13.4:7 och 13.4:8. Denna effekt kan kvarstå under flera år. Detta kommer att ha en mycket positiv effekt på den inre frostbeständigheten. Självuttorkningseffekten kan förklara varför man ofta får mycket hög frostbeständighet vid laboratorieprovningar av normalhärdad högpresterande betong. Man kan emellertid inte utesluta att självuttorkningsporerna på sikt gradvis fylls med vatten. Detta innebär att risken för frostskador ökar. Exempel på effekten av vattenlagringstiden på expansionen under frysning visas i figur 13.6:1. Självuttorkningseffekten måste således beaktas vid tolkning av ett laboratorieförsök med högpresterande betong. Om provningen startar när betongen är ung och starkt självuttorkad kan den inre frostbeständigheten hos betongen i verklig miljö överskattas.

13.4 UR FROSTBESTÄNDIGHETSSYNPUNKT RELEVANTA EGENSKAPER HOS HÖGPRESTERANDE BETONG

14.4:1 Inledning

I dag används oftast betong med *vbt*≈0,40 till svenska broar och andra utsatta anläggningskonstruktioner. Dagens brobetong är alltså genom sitt låga *vbt* i viss mån "högpresterande". Erfarenhetsmässigt kräver dock sådan betong luftinblandning för att vara frostbeständig. Se även figur 13.5:7. Betong med ännu lägre *vbt* kan under vissa förutsättningar vara frostbeständig äve n utan extra luftinblandning.

Högpresterande betong har vissa egenskaper som kommer att ha stor inverkan på dess frostbeständighet. Denna inverkan är oftast positiv men kan även vara negativ. De viktigaste egenskaper som skiljer högpresterande betong från normalbetong beskrivs tämligen utförligt nedan. Vissa av dessa skillnader berördes även kortfattat i avsnitt 13.3.

13.4:2 Minskad frysbar vattenmängd

Fryspunkten hos porvatten beror på porens storlek. Ju finare porsystem desto mindre andel frysbart vatten. Vid tillräckligt fint porsystem är inget vatten frysbart. I tabell 13.4:1 visas samband mellan pordiameter och ungefärlig fryspunkt.

Tabell 13.4:1. Samband mellan pordiameter och fryspunkt samt den relativa fukt (RH) där kapillärkondensation sker i poren; Fagerlund (1974).
Table 13.4:1. Relation between the pore diameter, the freezing point of pore water and the RH at which capillary condensation occurs in the pore; Fagerlund (1974).

Frystemperatur °C	Pordiameter nm	RH %
-2	127	98
-6	44	95
-10	27	92
-15	19	88
-20	15	85
-30	11	79
-40	9	74

Detta innebär att om alla porer i betongen är mindre än ca 15 nm (0,015 µm) så kan inget vatten frysa förrän temperaturen sjunkit till -20°C.

Mätningar av porstorleksfördelningar hos cementpasta visar att porfördelningen minskar kraftigt med sänkt *vbt*. Inblandning av silikastoft ger ytterligare förfining av porsystemet. Exempel på detta visas i figur 13.4:1; Zhang & Gjørv (1991). Uppenbarligen är emellertid aldrig porfördelningen så fin att inte en stor mängd vatten är potentiellt frysbart vid normalt förekommande frystemperaturer.

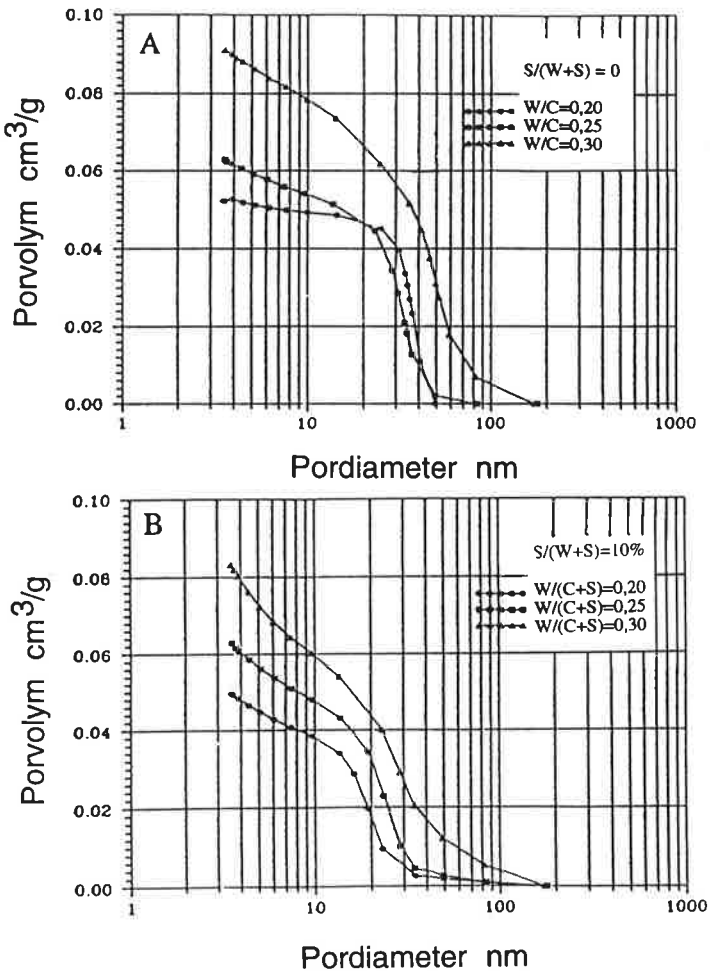
Exempel 1:

Vid *vbt* =0,20 är enligt tabell 14.4:1 och figur 13.4:1 den potentiellt frysbara vattenmängden vid -20°C ca 0,05 cm^3/g respektive 0,035 cm^3/g hos cementpasta utan respektive med silikastoft. Uttryckt i mängd vatten i en betong med cementhalten 600 kg/m^3 blir den potentiellt frysbara vattenmängden ca 30 liter /m^3 respektive ca 20 liter/m^3. Detta är tillräckligt för att medföra total sönderfrysning av en vattenmättad betong; Fagerlund (1995). I verkligheten förblir en stor andel vatten underkylt och fryser inte förrän vid lägre temperatur (ca -40°C) då isbildning initieras genom sk homogen isbildning. Exempel på mätningar av frysbar vattenmängd hos jungfruliga cementpastor (aldrig utsatta för torkning) visas i figur 13.4:2; Bager & Sellevold (1982). En pasta med *vct*=0,35 har i stort sett ingen frysbart vatten vid temperaturer överstigande ca -20°C. Vid denna temperatur fryser en liten vattenmängd.

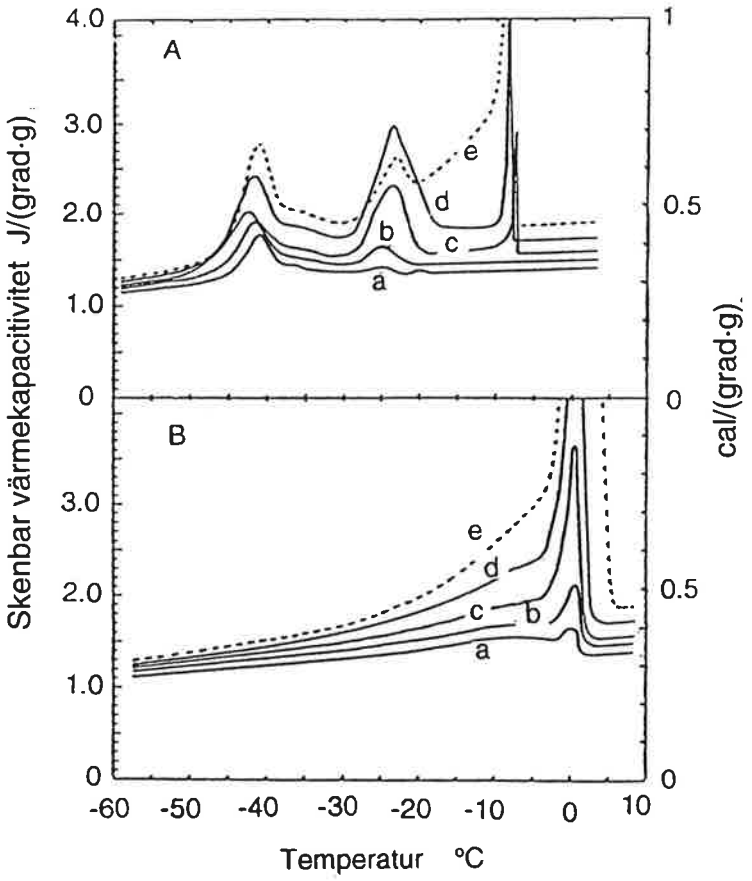
När samma cementpastor tinas efter att ha varit frusna vid -55°C sker smältning vid betydligt högre temperatur än den där isbildning skedde. Smältning sker gradvis och stora vattenmängder tinar vid ca -2 à -5°C, vilket överensstämmer väl med de smältpunkter som kan härledas ur porfördelningen.

Denna stora skillnad mellan isbildning och issmältning tyder på att lokal underkylning av porvatten sker under nedfrysningsfasen. Man kan därför inte utesluta att cementpasta under vissa betingelser, tex på grund av åldringsfenomen, ändras strukturellt så att allt potentiellt frysbart vatten också verkligen fryser vid sin "rätta" temperatur genom att isbildning initieras, "nukleeras", av is som bildats i grövre porer eller på materialytan. Att så kan vara fallet visas av figur 13.4:3; Sellevold et al (1982). Cementpastor med *vbt* = 0,60 och med 8 % och 16 % silikastoft och som aldrig torkats, har låg frysbar vttenmängd vid normala frystemperaturer. Efter en enda uttorknings-uppfuktningscykel ökar den frysbara vattenmängden drastiskt. Skillnaden mellan pastor med och utan silikastoft blir också starkt minskad.

Andra exempel på inverkan av en uttorknings-uppfuktningscykel visas i figur 13.4:4; Vuorinen (1973). Portlandcementbetong med *vct* < 0,40 har mycket liten frysbar vattenmängd när betongen aldrig torkats; <10 liter/m^3 vid *vct*=0,40. När betongen torkats kraftigt en enda gång och sedan återuppfuktats har frysbara vattenmängden i samma betong ökat till ca 65 liter/m^3. Detta måste påverka risken
för frostskador mycket kraftigt.



Figur 13.4:1. Porstorleksfördelningar bestämda med kvicksilverporosimetri för cementpastor med lågt *vbt*; Zhang & Gjörv (1991). A: Utan silikastoft. B: 10% silikastoft.
Figure 13.4:1. Pore size distributions determined by mercury porosimetry. Cement pastes with low water-binder ratio. A: Without silica fume. B: With silica fume. Zhang & Gjørv (1991).



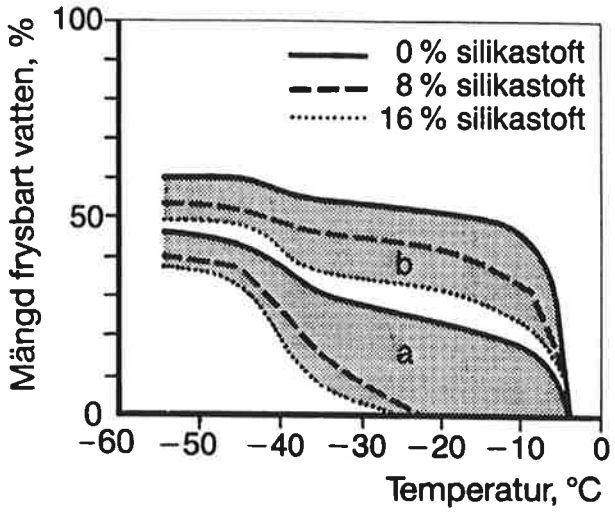
Figur 13.4:2. Kalorimetermätningar av frysbart vatten hos cementpastor som aldrig torkats; Bager & Sellevold (1982). A: Nedfrysning. B: Upptining. (a. *vct*=0,35; b. *vct*=0,40; c. *vct*=0,45; d. *vct*=0,50; e. *vct*=0,60).
Figure 13.4:2. Calorimetric measurements of the freezable water in never-dried cement pastes. A: Freezing. B: Thawing (a, b, c, d and e: Different water-cement ratios). Bager & Sellevold (1982).

Överslagsmässigt motsvarar den frysbara vattenmängden hos en kapillärmättad betong, som "åldrats" genom en kraftig uttorkning, allt vatten i kapillärporerna; Fagerlund (1995):

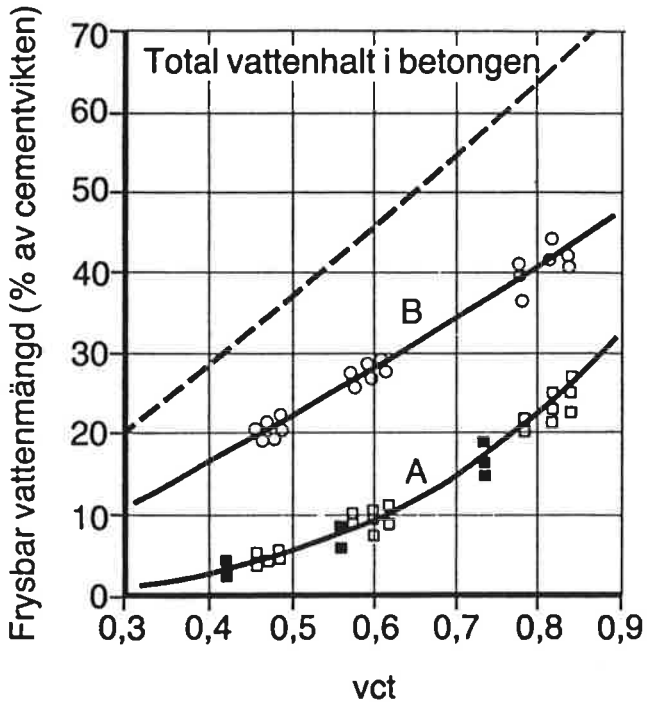
$$w_f \approx C(vbt\text{-}0{,}39\cdot\alpha) \qquad (13.4:1)$$

Där w_f (kg/m^3)är den frysbara vattenmängden, C (kg/m^3) är cementhalten och α är hydratationsgraden. Formeln gäller överslagsmässigt även för betong med restmaterial. Den ger då resultat på "säkra sidan". Ju lägre *vbt* desto lägre hydratationsgrad uppnås. Därför kommer en sänkning av *vbt* inte nödvändigtvis att medföra att den potentiellt frysbara vattenmängden minskar särskilt mycket hos en åldrad betong.

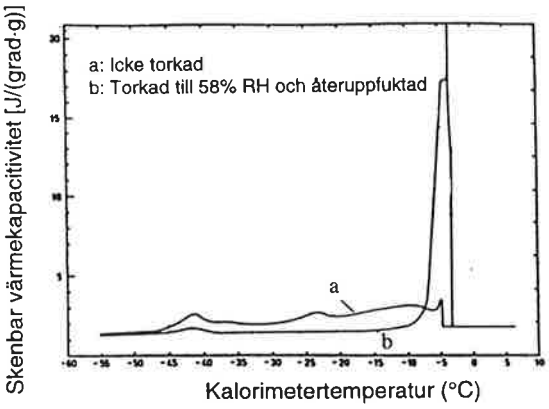
Proverna i figur 13.4:3 och 13.4:4 är torkade mycket hårt före återuppfuktningen (+50°C och +105°C). Andra försök visar emellertid att även en mildare torkning ökar den frysbara vattenmängden kraftigt; se tex figur 13.4:5, Sellevold and Bager (1981). Opublicerade försök vid LTH bekräftar detta. Torkning vid en så pass hög RH som 80% visade sig öka den frysbara vattenmängden påtagligt; Modéer (1974).



Figur 13.4:3. Frysbar vattenmängd under nedfrysning av cementpasta med *vbt*=0,60 och med 0%, 8% och 10% silikastoft; Sellevold et al (1982). Område a: Aldrig torkade pastor. Område b: Torkade vid +50°C och återuppfuktade.
Figure 13.4:3. Freezable water during freezing of cement pastes containing 0%, 8 % and 16 % silica fume. Area a: Never-dried cement pastes. Area b: Dried and re-saturated. Sellevold et al (1982).



Figur 13.4:4. Mätningar av frysbart vatten hos betong som aldrig torkats (kurva B) eller som torkats vid +105°C och återuppfuktats (kurva A); Vuorinen (1973).
Figure 13.4:4. Measurements of freezable water in never-dried concrete (curve B) or in dried and re-saturated concrete (Curve A). Vuorinen (1973)



	W_{es}	W_f (-10)	W_f (-55)	W_{nf}(-55)
a	.379	.029	.184	.195
b	.378	.195	.219	.159

Figur 13.4:5. Inverkan på mängden frysbart vatten i cementpasta med *vct*=0,60 av en torkning till olika RH följd av återuppfuktning till fullständig vattenmättnad; Sellevold & Bager (1981). W_{es}= W_f+W_{nf}=vattenmängd hos mättat prov. W_f = frysbart vatten, W_{nf} = icke-frysbart vatten. Siffran inom parentes anger frystemperaturen för vilken W_f och W_{nf} gäller.

Figure 13.4:5. Effect of drying to different RH-levels and re-saturation to full saturation on the amount of freezable water of cement paste with w/c=0,60. W_{es}= total evaporable water at saturation. W_f=freezable water, W_{nf}=non-freezable water. Sellevold & Bager (1981).

Slutsats

Den finare porstrukturen hos cementpasta med låga *vbt* medför att den frysbara vattenmängden minskar i förhållande till normal cementpasta. Den kan bli så låg att frostskador omöjliggörs. På grund av åldringsfenomen kan man emellertid inte utesluta att den frysbara vattenmängden på sikt kan bli tillräckligt hög för att ge frostskador. I betong finns dessutom alltid defekter som kan fyllas med frysbart vatten. Det är därför rimligt att anta att man aldrig kan göra en betong så finporös att det inte någon gång under betongens livstid finns tillräckligt mycket vatten för att frostskador skall kunna uppstå om betongen är helt vattenmättad. Genomförda försök visar också att även betong med mycket lågt *vbt* kan frysa sönder; se avsnitt 13.6:3.

Den frysbara vattenmängden kommer i flertalet fall alltid att vara lägre i en högpresterande betong än i en normalbetong. Därför kommer de skador som uppstår normalt att vara mindre i en högpresterande betong med lågt *vbt*. I bästa fall är den frysbara vattenmängden så låg att tex saltavskalning inte kan ske på grund av brist på expanderande iskroppar. Denna effekt kan kontrolleras med saltavskalningsförsök varvid åldringseffekten måste beaktas; se avsnitt 13.8:2.

13.4:3 Ökad självuttorkning

Betong med lågt *vbt* kommer att självuttorka på grund av cementreaktionen. Volymen självutorkningsporer kan beräknas ur:

$$V_s = 0{,}063 \cdot \alpha \cdot C \qquad (13.4:2)$$

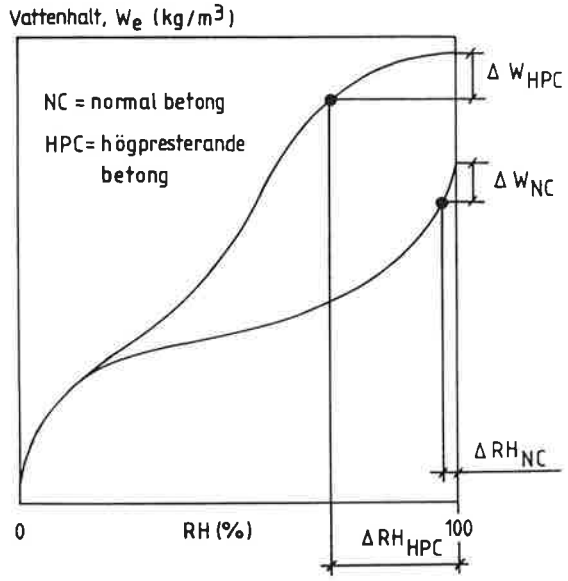
$$(V_s)_{max} \approx 0{,}16 \cdot vbt \cdot C = 0{,}16 \cdot w_o \qquad \text{när } \alpha = \alpha_{max} \approx vbt/0{,}39 \qquad (13.4:3)$$

Där V_s (liter/m^3) är volymen självuttorkningsporer , α är hydratationsgraden, α_{max} är maximalt möjlig hydratationsgrad, C (kg/m^3) är cementhalten och w_o (liter/m^3) är mängden blandningsvatten. Formeln gäller approximativt även för betong med restmaterial.

Högpresterande betong har normalt alltid högre cementhalt än normalbetong vilket ökar volymen självuttorkningsporer. Å andra sidan är hydratationsgraden vid given ålder lägre. Man kan inte få en volym självuttorkningsporer som överstiger värdet $(V_s)_{max}$ enligt ekv (13.4:3). Detta värde motsvarar maximalt möjlig hydratation.

Volymen självuttorkningsporer är alltså normalt inte högre i högpresterande betong än i normal betong. Däremot är effekten på inre RH betydligt större vilket beror på den finare porstrukturen hos högpresterande betong, vilket gör att jämviktsfuktkurvan blir mera horisontell vid höga RH. Principen för detta visas i figur 13.4:6.

När självuttorkningen gått så långt att inre RH understiger 85% finns enligt tabell 13.4:1 inget frysbart vatten förrän vid -20°C. Därför kan inga frostskador ske vid temperaturer överstigande -20°C.



Figur 13.4:6. Principiellt utseende hos sorptionsisotermen hos normalbetong och högpresterande betong. Inverkan av självuttorkningen på RH. ΔRH är självuttorkningen förorsakad av hydratationen ΔW. NB är normalbetong. HPB är högpresterande betong.
Figure 13.4:6. Shape of the sorption isotherm of normal concrete (NB) and high performance concrete (HPB). ΔRH is the self-desiccation caused by the hydration ΔW.

I ytan på en fuktbelastad betong, tex en tösaltad betong, kommer självuttorkningen att gradvis upphävas genom att vatten transporteras in före, under och efter frysningen. Därför kommer självuttorkningen troligen inte att ha någon som helst positiv inverkan på saltfrostbeständigheten. Saltfrostskador sker nämligen i de allra yttersta millimetrarna av betongytan.

I det inre av en fuktbelastad betong kommer självuttorkningseffekten att vara märkbar under mycket lång tid i en betong med lågt *vbt*. Exempel på detta visas i figur 13.4:7; Fagerlund & Yang (1997). Ett stort antal betongcylindrar med diameter 100 mm lagrades under 2 år i vatten. Prover togs därefter ut på olika avstånd från den fuktexponerade ytan utan att fukt tillfördes eller bortfördes. RH bestämdes hos de uttagna proverna. Som synes är självuttorkningseffekten märkbar redan ett par centimeter från ytan trots den långa fuktlagringstiden.

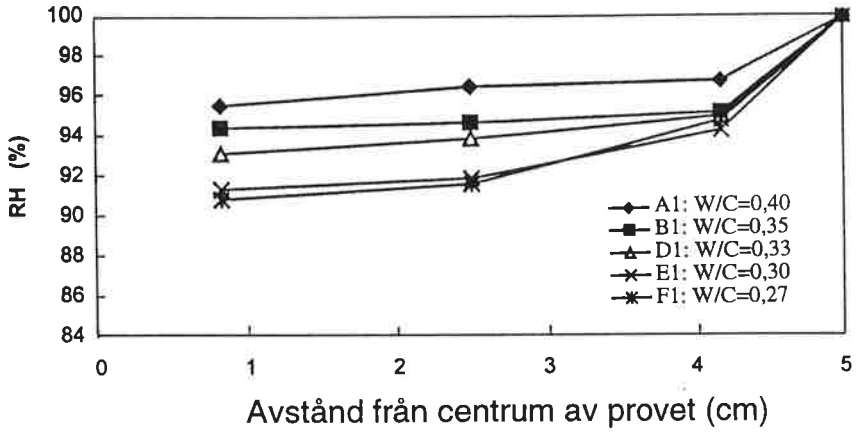
Vattenmättnadsgraden bestämdes för samma prover. Resultatet visas i figur 13.4:8. Kvalitativt samma resultat som för RH erhölls. Redan på ett par centimeters djup är vattenhalten lägre än i

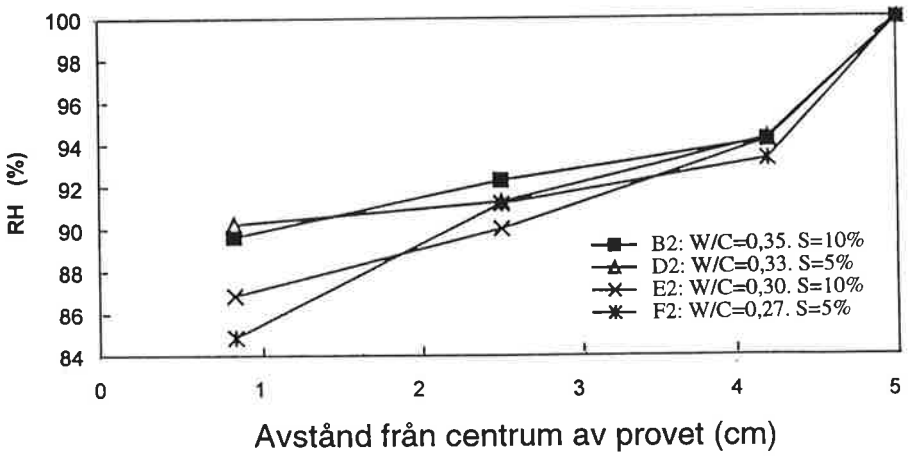
ytan, vilket visar att betong med lågt vbt är oerhört tät mot fuktinträngning. Ju lägre vbt desto lägre är vattenmättnadsgraden på givet avstånd från ytan.

Slutsats

Självuttorkningseffekten är påtaglig i högpresterande betong. Den kommer att ha stor positiv inverkan på betongens inre frostbeständighret men knappast på dess saltfrostbeständighet.

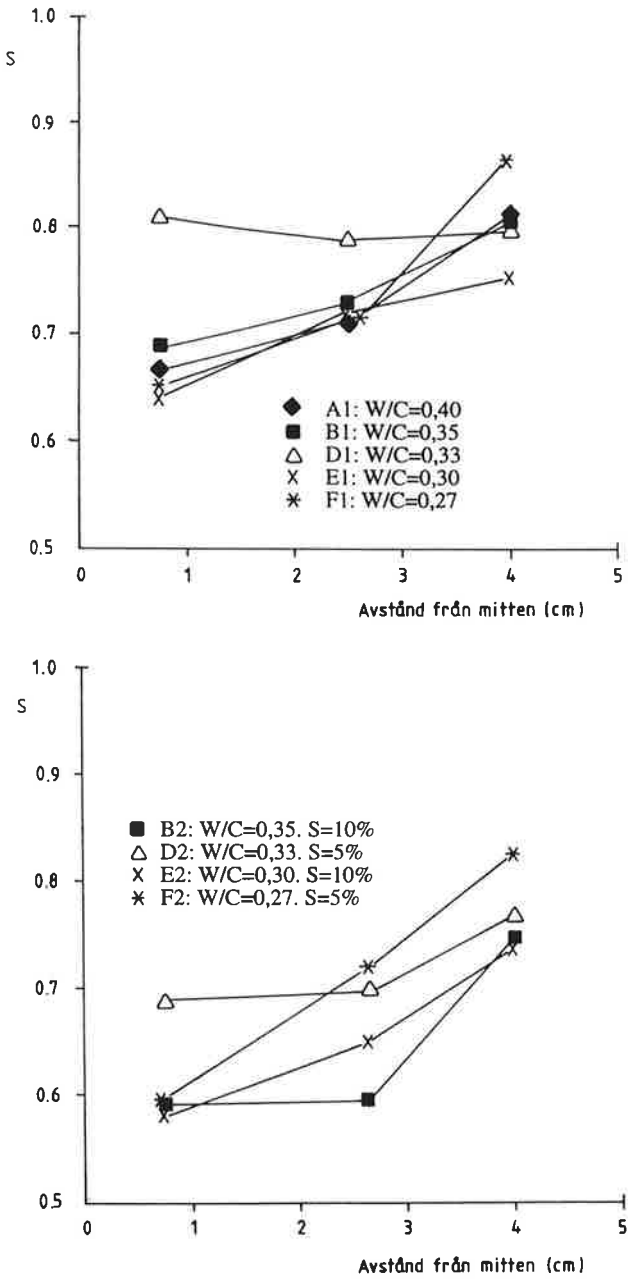
Man kan inte utesluta att självuttorkningsporerna på sikt återfylls med vatten, åtminstone på några centimeters djup från ytan. Därvid kommer den positiva effekten att försvinna. Detta måste beaktas vid frysprovning av högpresterande betong. Frysförsök startar ofta tämligen kort tid efter gjutning. Betongen kommer då att vara självuttorkad och resultatet av provningen visar på hög inre frostbeständighet. I verkligheten kommer emellertid betongen att under vissa betingelser vara mycket fuktigare. Frysprovningen överskattar i så fall den verkliga frostbeständigheten. Exempel på denna effekt visas i figur 13.6:1.





Figur 13.4:7. Inre RH på olika djup från mitten av 10 cm tjocka betongprover som lagrats kontinuerligt i vatten under 2 år; Fagerlund & Yang (1997). (a) 0% silikastoft. (b) 5 % eller 10 % silikastoft.

Figure 13.4:7. Internal RH on different depths from the exposed surface of 10 cm thick concrete specimens that have been continuously stored in water for 2 years. (a) 0 % silica fume. (b) 5 % or 10 % silica fume. Fagerlund & Yang (1997).



Figur 13.4:8. Vattenmättnadsgraden på olika djup från mitten av 10 cm tjocka betongprover som lagrats kontinuerligt i vatten under 2 år; Fagerlund & Yang (1997). (a) 0% silkastoft. (b) 5 % eller 10 % silikastoft.
Figure 13.4:8. The degree of saturation on different depths from the exposed surface of 10 cm thick concrete specimens that have been continuously stored in water for 2 years. (a) 0 % silica fume. (b) 5 % or 10 % silica fume. Fagerlund & Yang (1997).

13.4:4 Minskad permeabilitet

13.4:4.1 Allmänt

Den finare porstrukturen i högpresterande betong medför en kraftigt minskad permeabilitet för vatten och joner. Detta kan förväntas påverka frostbeständigheten på följande sätt.

13.4:4.2 Saltavskalning

Inverkan på diffusionen av lösta joner har troligen marginell effekt på saltfrostbeständigheten. Flertalet försök visar nämligen att det är den yttre saltkoncentrationen som spelar roll för saltfrostbeständigheten och inte den inre; se figur 13.5:4. Dessutom bestäms saltavskalningen av tillståndet i de yttersta millimetrarna av betongen. Där torde skillnaden i porvattnets saltkoncentration mellan en normalbetong och en högpresterande betong vara liten.

Inverkan på vattentransporten har troligen större betydelse. Saltavskalning torde nämligen sammanhänga med att vatten sugs in från den yttre lösningen till iskroppar i betongens ytliga porer; Lindmark (1996). Ju snabbare denna transport kan ske, desto större iskristalltillväxt kan ske, och desto större skador sker. Den lägre permabiliteten hos högpresterande betong är därför en fördel.

Även fryscykelns utseende har stor betydelse. En lägre permeabilitet kan motverkas av längre möjlig tid för vattentransport över ytskiktet. Detta framgår av figur 13.5:4(d) som visar att en längre tid vid -22°C ger avsevärt större avskalning hos betong med *vct*=0,40 än en kortare tid. Man kan inte helt utesluta att det finns fryscykler som är ogynnsammare för högpresterande betong än för normalbetong. Detta måste beaktas vid val av fryscykel i samband med provning av högpresterande betongs saltfrostbeständighet; se avsnitt 13.8:3.

13.4:4.3 Inre frostskador

Jondiffusion har ingen betydelse för risken för inre frostskador. Däremot har transporthastigheten för vatten avgörande betydelse. Den minskande transportförmågan kan ha såväl positiv som negativ betydelse.

Positiva faktorer:

Inre frostskador beror på att betongens inre delar är vattenmättade över en viss kritisk nivå. För en betong med extra luftinblandning motsvarar den kritiska vattenhalten normalt att en viss andel av luftporerna är vattenfyllda; Fagerlund (1979). För en betong helt utan luft motsvarar den kritiska vattenhalten att kapillärporerna inte är helt vattenfyllda, dvs i mycket fuktig miljö kan detta tillstånd bara uppnås om betongen är permanent starkt självuttorkad.

Ju lägre fukttransportförmågan är desto längre tid erfordras för att betongen skall uppnå den kritiska fuktnivån. Därför kommer teoretiskt sett en högpresterande betong att ha en högre potentiell livslängd än en normalbetong med exakt samma luftporstruktur och exakt samma kritiska avståndsfaktor. Med "potentiell livslängd" avses den tidrymd som erfordras för att betongen skall bli kritiskt vattenmättad när den suger vatten fritt. I måttligt fuktiga miljöer, där betongen ömsevis torkar och uppfuktas, kommer därför den lägre permeabiliteten hos högpresterande betong att vara en starkt positiv faktor. I många miljöer i verkligheten är emellertid fuktbelastningen ofta så varaktig att skillnaden mellan de båda betongtyperna på sikt utjämnas. Den positiva effekten av den lägre transportkoefficienten hos högpresterande betong motverkas av den långa fuktabsorptionstiden.

Detsamma gäller betong utan extra luftinblandning. En sådan betong är aldrig frostbeständig vid de *vbt* som i dag används i "normalbetong"; *vbt* > 0,40. Självuttorkningsporerna vattenfylls efter tämligen kort tid i sådan betong. Högpresterande betong utan extra luftinblandning kan vara frostbeständig under en längre tid på grund av självuttorkningseffekten. Det är emellertid osannolikt att den skall förbli frostbeständig vid mycket långvarig fuktbelastning.

Negativa faktorer:

Den minskade permeabiliteten har den negtiva effekten att motståndet mot undanpressat vatten i samband med isbildning ökar. Därvid ökar det hydrauliska trycket vid given isbildningshastighet. Följden är att det sk kritiska avståndsfaktorn, dvs det maximalt tillåtna medelavståndet mellan luftfyllda porer, minskar. Detta innebär vid oförändrade förhållanden att lufthalten måste öka om frostbeständigheten skall bibehållas. Denna effekt kompenseras troligen av att isbildningshastigheten, dvs vattenflödet, minskar ju lägre *vbt* är. Vi vet ännu inte hur den kritiska avståndsfaktorn påverkas av *vbt*; se avsnitt 13.3:2.

Om betongen skulle bli mycket tät, tex vid mycket lågt *vbt* och användning av stor mängd silikastoft, kan man tänka sig att vatten som fryser lokalt i en por, eller inne i en defekt, eller inne i ett ballastkorn, inte kan ta sig därifrån. I så fall kommer höga lokala tryck att uppstå i betongen om det parti där frysningen sker är helt vattenmättat. Man riskerar alltså att betongen fryser som om den vore en helt sluten behållare. Detta är i så fall en farlig situtation eftersom den innebär att högpresterande betong skulle vara mycket känslig för frysning av vatten i lokala defekter. Sådana är t ex. enstaka porösa ballastkorn, vattenseparationsfickor, sprickor, kollapsade och därför vattensugande "luftporsystem", etc. En normalbetong klarar sådana defekter bättre eftersom vatten i en sådan betong har större möjlighet att ta sig till luftfyllda utrymmen utan att skadliga spänningar uppstår.

13.4:4.4 Slutsatser

Inverkan av den minskade diffusionsförmågan för lösta joner torde ha marginell betydelse såväl för saltavskalning som för inre frostskador.

Den minskade permeabiliteten för vatten har positiv betydelse för saltfrostbeständigheten. Den har också positiv inverkan på inre frostbeständigheten hos betong som exponeras för måttligt hög och temporär fuktbelastning. För betong som är konstant utsatt för fukt utan möjlighet att torka torde den minskade permeabiliteten ha liten positiv betydelse. Den kan till och med vara negativ i de fall där den högpresterande betongen innehåller vattenfyllda defekter.

13.5 EXPERIMENTELLA UNDERSÖKNINGAR AV SALTFROSTBESTÄNDIGHETEN HOS HÖGPRESTERANDE BETONG

13.5:1 Inledning

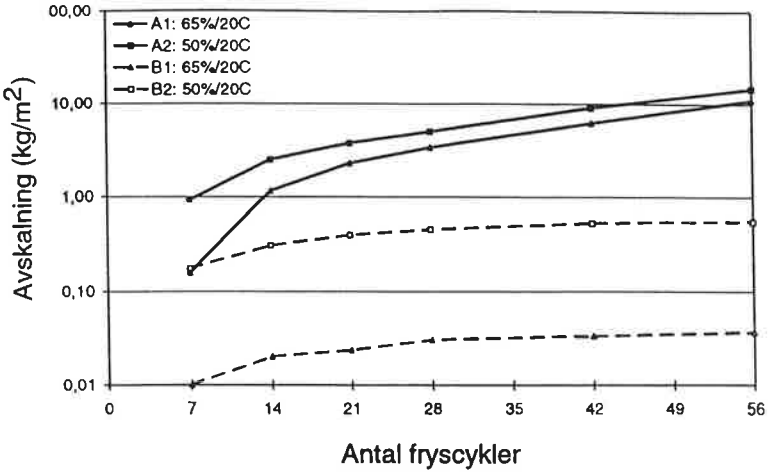
Saltfrostbeständighet bestäms experimentellt genom att en eller flera ytor på ett betongprov utsätts för en saltlösning under såväl nedfrysnings- som upptiningsförloppet. Olika metoder används i olika länder. I Sverige används metoden, SS 13 72 44. En halv kub exponeras därvid för en 3-procentig NaCl-lösning på sin överyta. Provets sidor och botten är fuktisolerade och det förvaras i en behållare av cellplast vilket ger någorlunda enaxiell frysning och smältning. Viktförlusten som funktion av antalet fryscykler mäts under minst 56 cykler (dygn). I andra länder, tex Tyskland, sänks en kub ner i 3% NaCl-lösning. Fryscykeln är däremot ungefär densamma som i Sverige. I Finland doppas kuber i mättad frusen NaCl-lösning. Fryskurvan är därför annorlunda än i tyska metoden. I den sk CDF-metoden används samma prover som i den svenska metoden men förbehandlingen är något annorlunda. Dessutom är frysytan vänd nedåt och fryscykeln hälften så lång; RILEM (1996). Dessa skillnader mellan olika provningsmetoder måste beaktas när man skall bedöma resultatet av en saltfrysprovning. De kan ofta förklara de olika skillnader i saltfrostbeständighet man uppmäter med olika metoder.

Det har visat sig att förbehandlingen av provet har mycket stor betydelse. Små variationer i den fuktkonditionering som görs före start av frysningen har stor effekt. Undersökningar tyder på att det karbonatiserade skiktet är av avgörande betydelse för resultatet vilket inte är så egendomligt eftersom det är det yttre lagret av betongen som fryser loss. Karbonatiseringsskiktets tjocklek och egenskaper är mycket kraftigt beroende av fuktnivån under förlagringsperioden.

Ett exempel på den stora effekten av lagringsförhållandena visas i figur 13.5:1; Utgenannt & Petersson (1997). Två olika betonger har här förlagrats i 50% RH resp 65% RH. Denna till synes marginella skillnad har stor betydelse för saltavskalningen som uppmättes i provningen, vilket med stor säkerhet beror på att karbonatiseringen går snabbare vid 65% RH än vid 50% RH. I detta fall har portlandcement använts. Detta påverkas uppenbarligen positivt av karbonatisering.

Andra cementsorter, t ex slaggcement, påverkas starkt negativt av karbonatisering; Matala (1995), Stark & Ludwig (1995). Orsaken är troligen att det karbonatiserade skiktet får en förgrovad struktur som har mycket låg saltfrostbeständighet. Enligt Stark och Ludwig (1995) är det karbonatiserade skiktet hos betong med slaggcement dessutom mindre stabilt och löses upp i kloridlösning.

Dessa effekter av ytans egenskaper och hur dessa påverkas av små förändringar i förlagringsmetoden måste beaktas vid värdering av resultatet av saltfrostprovningar.



Figur 13.5:1. Inverkan av RH under förkonditioneringsskedet på resultatet av en frysprovning med metod SS 13 72 44; Utgenannt & Petersson (1997). A1 och A2, icke lufttillsatt betong. B1 och B2, betong med viss extra lufttillsat.s.Klimat 50% RH resp. 65% RH
Figure 13.5:1. Influence of the RH-level during the pre-conditioning phase on the result of a freeze-thaw test with the Swedish slab test. A1 and A2, non-air-entrained concretes. B1 and B2, air-entrained concretes. Pre-conditioning climates 50% and 65% RH. Utgenannt & Petersson (1997).

13.5:2 Undersökningar av inverkan av yttre och inre salthalt

13.5:2.1 Normal brobetong med vbt=0,40. Variation av såväl inre som yttre salthalt

Systematiska undersökningar har gjorts av inverkan av salthalten utanför betongen i samband med frysning-upptining, och av den inre salthalten; Lindmark (1995). Före frysprovningen lagrades proverna i rent vatten, resp 3% och 6% NaCl-lösning under 6 till 11 månader. Man kan därför vara säker på att betongens ytparti har önskad salthalt. Proverna undersöktes med en test av samma typ som SS 13 72 44. Överytan täcktes med rent vatten eller 3% resp 6% NaCl-lösning. På så sätt erhölls 9 olika kombinationer av yttre och inre salthalt. Betongen hade *vct*=0,40 och "färsk" lufthalt 5,3 %. Det var således en normal svensk brobetong. Betongsammansättningen valdes emellertid så att betongen inte skulle bli fullständigt saltfrostbeständig. Orsaken var att det skulle bli möjligt att se effekten av olika provningstekniska variationer. De olika fryscyklerna visas i figur 13.5:2.

Resultaten av provningen visas i figur 13.5:3. De är tämligen entydiga:

1: Inre salthalt har marginell betydelse jämfört med yttre salthalt.

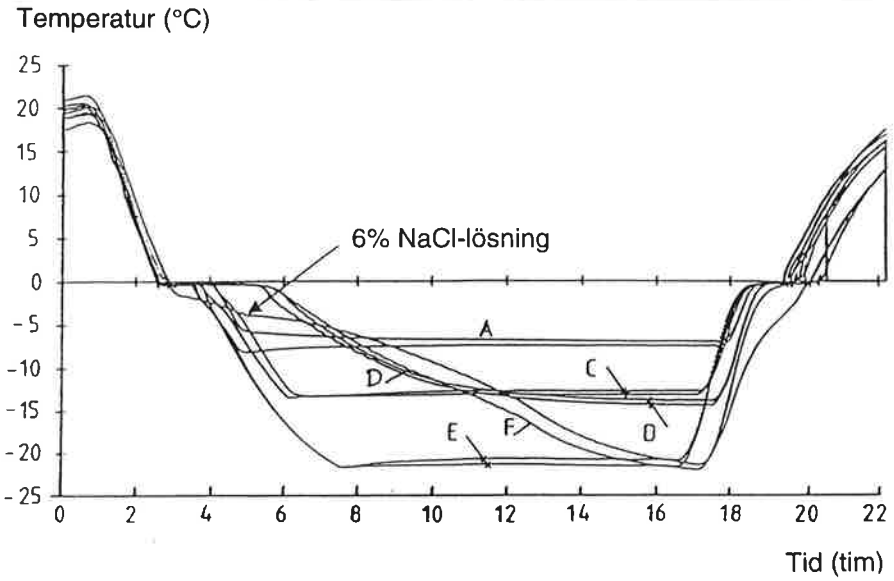
2: Yttre salthalt 3% är mycket mera aggressiv än rent vatten eller 6% saltlösning.

3: Avskalningarna ökar progressivt med sänkt lägsta frystemperatur under fryscykeln. I stort sett gäller ekv (13.3:1).

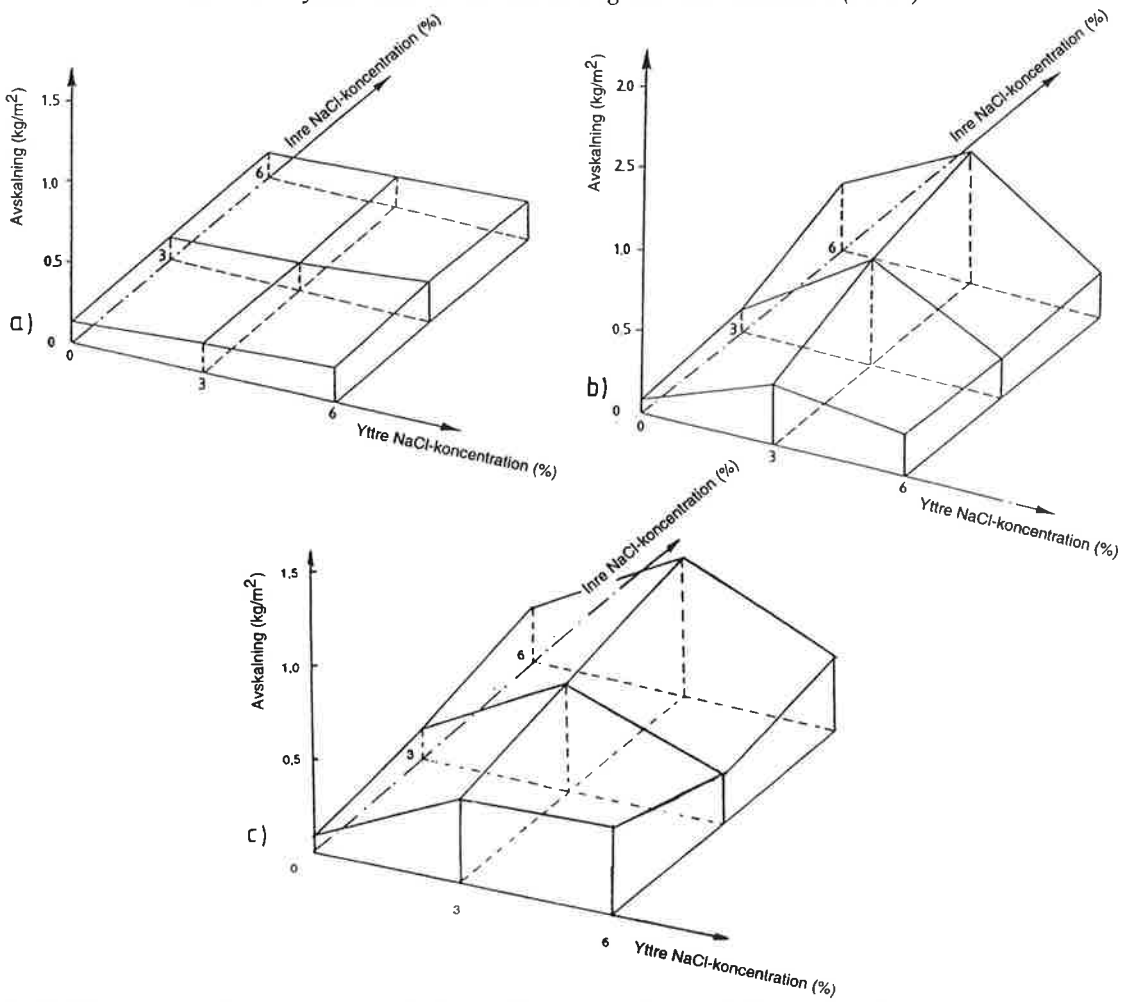
4: Längre tid vid låg temperatur (t ex -22°C) ökar avskalningen påtagligt.

5: Ökad fryshastighet ner till en lägsta temparatur av -14°C har ingen påtaglig inverkan på avskalningarna.

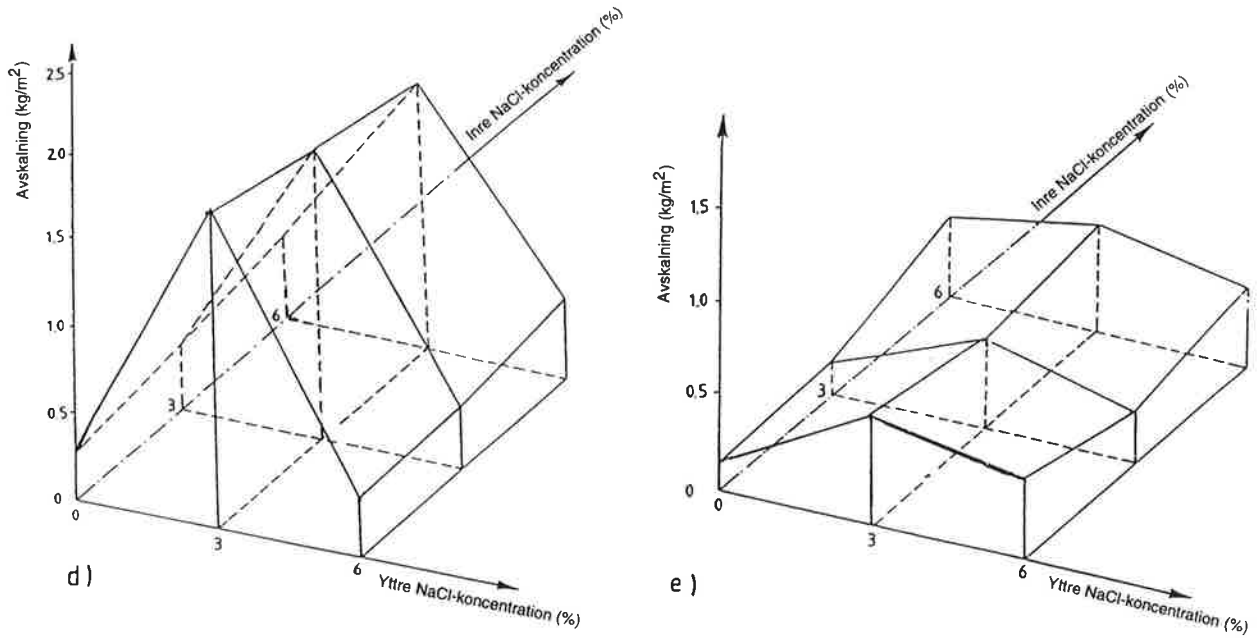
Det bör noteras att betongerna i figur 13.5:3 aldrig torkades före frysprovningen.



Figur 13.5:2. Fryscykler använda i de försök som redovisas i Fig 13.5:3; Lindmark (1995).
Figure 13.5:2. Freeze-thaw cycles used in the test in Fig 13.5:3. Lindmark (1995)



Figur 13.5:3 a-c. Inverkan av yttre och inre salthalt på saltavskalningen hos betong med *vct*=0,40; Lindmark (1995). (a) Fryskurva A; snabb nedfrysning till -7°C. (b) Fryskurva C; snabb nedfrysning till -14°C. (c) Fryskurva D; långsam nedfrysning till -14°C. "Snabb": max temp.sänkning 5,5°C/tim. "Långsam": max temp.sänkning 2°C/tim.
Figure 13.5:3. Influence of the outer and inner salt concentration on the salt-frost scaling of concrete with the water-cement ratio 0,40. (a) Freeze-thaw curve A. (b) Freeze-thaw curve C. (c) Freeze-thaw curve D. Lindmark (1995).



Figur 13.5:3 d-e. Inverkan av yttre och inre salthalt på saltavskalningen hos betong med *vct*=0,40; Lindmark (1995). (d) Fryskurva E; snabb nedfrysning till -22°C. (e) Fryskurva F; långsam ndfrysning till -22°C. "Snabb": max temp.sänkning 5,5°C/tim. "Långsam": max temp.sänkning 2°C/tim.
Figure 13.5:3 d-e. Influence of the outer and inner salt concentration on the salt-frost scaling of concrete with the water-cement ratio 0,40. (d) Freeze-thaw curve E. (e) Freeze-thaw curve F. Lindmark (1995).

13.5:2.2 Högpresterande betong. Variation av yttre salthalt

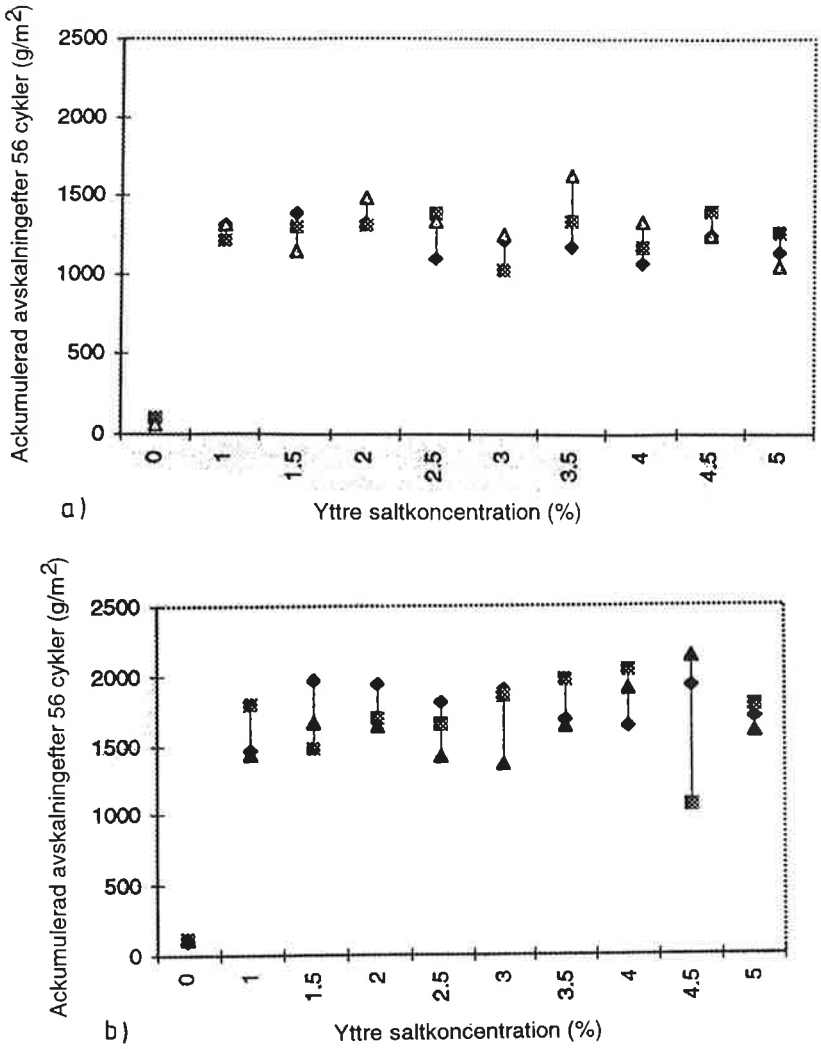
Systematiska undersökningar av inverkan av den yttre salthalten gjordes för betong med *vbt*=0,34 utan luftinblandning men med 5% silikastoft; Lindmark (1995). Fryscykel E i figur 13.5:2 användes. Två olika förlagringsmetoder användes; (a) ingen torkning, (b) en torknings/återuppfuktningscykel Resultatet visas i figur 13.5:4. Följande slutsatser kan dras:

1: Frysning i rent vatten ger i stort sett ingen avskalning, medan 1% salt på ytan ger kraftig avskalning.

2: Yttre salthalten liten roll för avskalningen; 1% är i stort sett lika aggressiv som 5%. En högpresterande betong är således rätt okänslig för nivån på den yttre saltkoncentrationen, men den är ytterst känslig för salt på ytan.

3: *vbt*=0,34 är inte tillräckligt lågt för att göra betong "immun" mot saltfrostangrepp.

4: En torknings-återuppfuktningscykel ökade avskalningen påtagligt. Den principiella effekten av salt ändrades dock inte.



Figur 13.5:4. Inverkan av yttre salthalt på saltavskalningen hos betong med *vbt*=0,34 och 5% silikastoft; Lindmark (1995). (a) Prover som aldrig torkats. (b) Prover som utsatts för en enda uttorknings-uppfuktningscykel.
Figure 13.5:4. Influence of the outer salt concentration on the salt-frost scaling of concrete with the water-binder ratio 0,34 and 5 % silica fume. (a) Never-dried specimens. (b) Specimens exposed to one drying-re-saturation cycle. Lindmark (1995).

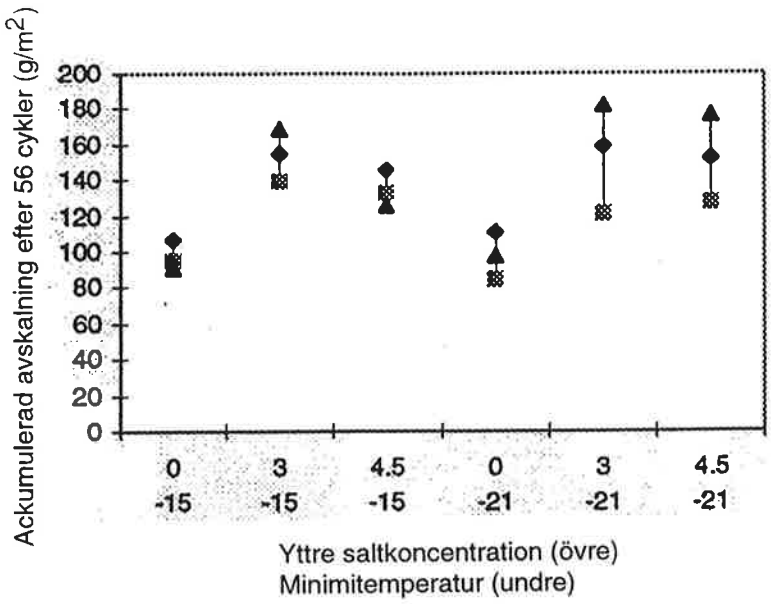
Samma försök som ovan genomfördes även med betong med *vbt*=0,30 utan luftinblandning men med 10 % silikastoft; Lindmark (1995). Fryskurvan var enligt Typ E i figur 13.5:2. Proverna torkades inte före provstart. Resultatet visas i figur 13.5:5. Följande slutsatser kan dras:

1: Frysning i närvaro av en yttre salthalt ökar avskalningen något. Total avskalning är dock låg vid alla salthalter. Det finns ingen påtaglig inverkan av saltkoncentrationens storlek.

2: *vbt*=0,30 är tillräckligt låg för att betong skall kunna var i stort sett "immun" mot saltfrostangrepp.

Det är inte självklart att samma goda resultat skulle ha erhållits för en annan betong som också har *vbt*=0,30 och ingen luftinblandning. Det är inte heller självklart att en radikalt annorlunda fryscykel skulle ha givit samma resultat. Mycket tyder emellertid på att en *vbt*-nivå av ca 0,30 skulle kunna ge hög saltfrostbeständighet utan luft i betongen. Detta bekräftas även av andra försök; se figur 13.5:6, 13.5:7 och 13.5:8.

OBS: Alla provningar som redovisades ovan gjordes på icke-åldrad betong. Åldringseffekter såsom karbonatisering kan radikalt såväl förbättra som försämra resultatet. Vid användning av portlandcement är naturlig åldring oftast positiv.



Figur 13.5:5. Inverkan av yttre salthalt på saltavskalningen hos betong med *vbt*=0,30 och 10 % silikastoft; Lindmark (1995).
Figure 13.5:5. Influence of the outer salt concentration on the salt-frost scaling of concrete with the water-binder ratio 0,30 and 10 % silica fume. Lindmark (1995).

13.5:3 Undersökningar av inverkan av *vbt* och silikastoft

13.5:3.1 Försök vid LTH; Lindmark (1991)

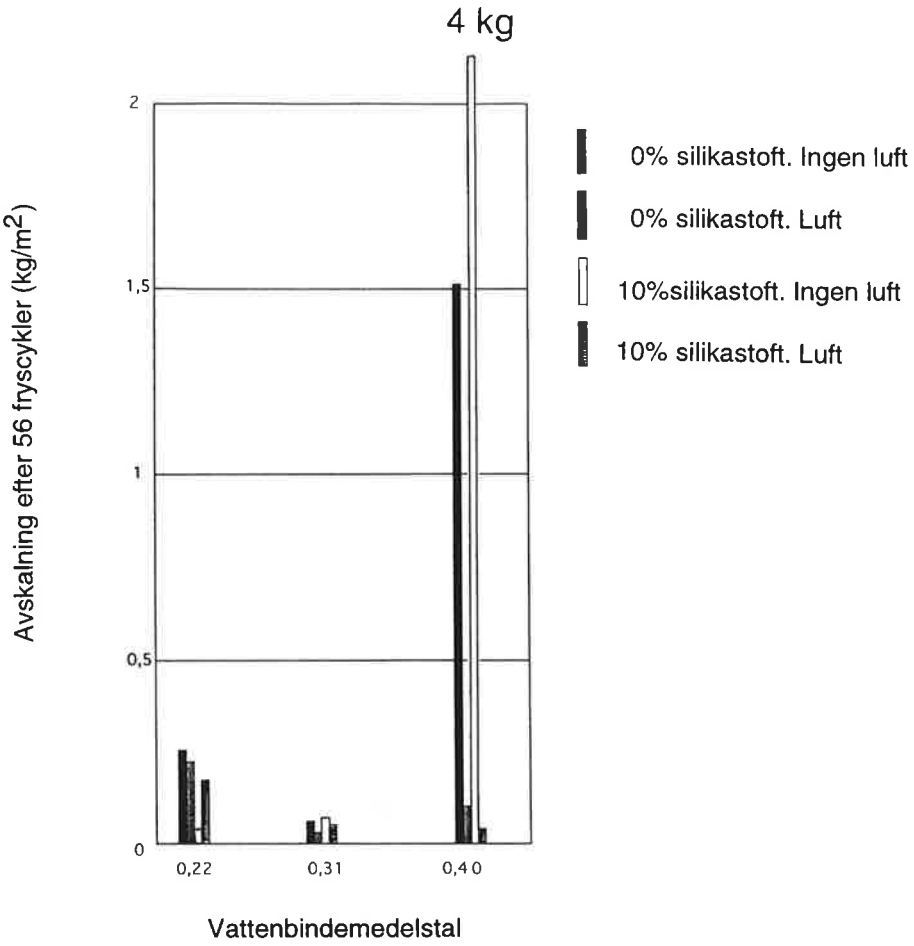
I figur 13.5:6 visas resultatet av saltfrysförsök med 12 betonger med olika vbt, olika lufthalt och olika halt silikastoft. Betongerna provades med en saltfrysprovningsmetod av samma typ som SS 13 72 44. Följande slutsatser kan dras:

1: Vid *vbt*=0,31 har även icke lufttillsatt betong hög saltfrostbeständighet

2: Vid *vbt*=0,40 erfordras luftinblandning. Utan luftinblandning är saltfrostbeständigheten mycket låg

3: Vid *vbt*=0,22 är saltfrostbeständigheten tillfredsställande. Avskalningen är dock högre än vid *vbt*=0,31. Orsaken är troligen att betongen var svår att komprimera. Därför uppstod vissa defekter som kunde fyllas med frysbart vatten. Resultatet visar alltså att det är oerhört viktigt att en högpresterande betong är helt defektfri om den skall ha hög frostbeständighet.

4: Silikastoftet visade sig inte ha någon större positiv eller negativ effekt vid konstant *vbt*.



Figur 13.5:6. Saltavskalning hos lufttillsatt och icke lufttillsatt betong med olika *vbt* och olika mängd silikatoft. Aldrig torkad betong. Lindmark (1991).
Figure 13.5:6. Salt-frost scaling of air-entrained and non-air-entrained concrete with different water-binder ratio and different amount of silica fume. Never-dried concrete. Lindmark (1991).

13.5:3.2 Försök vid FCB; Hammer och Sellevold (1990)

Vid FCB genomfördes saltavskalningsförslök med icke lufttillsatt betong med olika *vbt* och med 5% och 10% silikastoft. Betongerna förlagrades dels i luft, dels i plastpåse (membranhärdning).

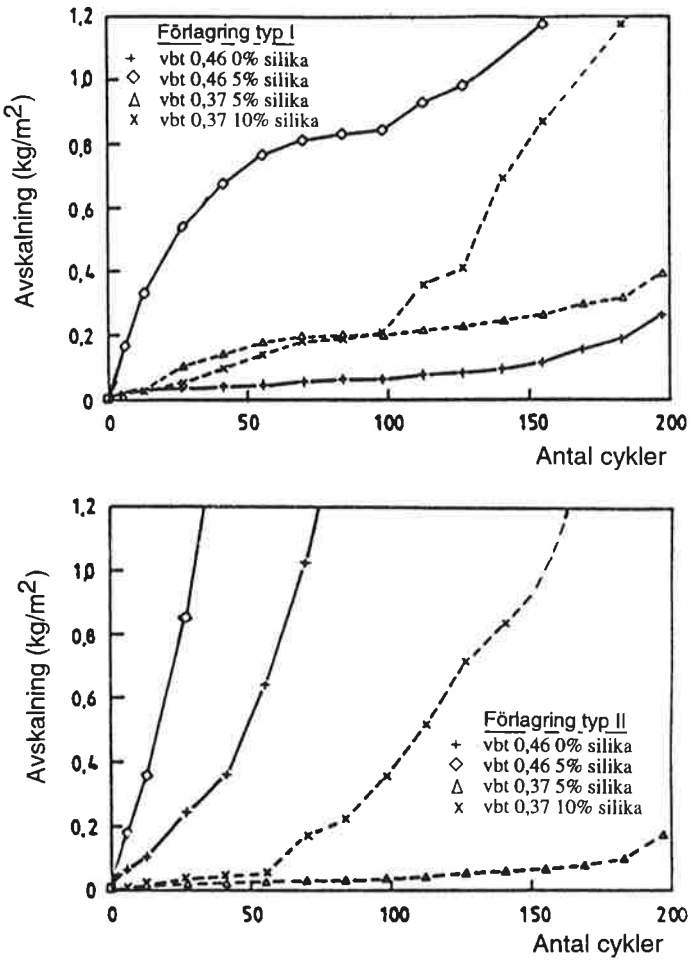
Provningen genomfördes i princip enligt SS 13 72 44. Resultatet visas i figur 13.5:7. Följande slutsatser kan dras:

1: *vbt*=0,28 ger i stort sett "immunitet" mot frostangrepp.

2: *vbt*=0,37 ger viss avskalning som dock är låg

3: *vbt*=0,46 ger mycket hög avskalning

4: Ökning av silikastoftmängden från 5% till 10% medför höjd och accelererande avskalning. Den accelererande effekten av silikastoft överensstämmer med observationer vid SP i Borås; se figur 13.5:13.



Figur 13.5:7. Saltavskalning hos betong med olika *vbt* och olika mängd silikastoft förbehandlade på två olika sätt; Hammer & Sellevold (1990). Betong 65 och 65S; *vbt*=0,46. Betong 95 och 95S; *vbt*=0,37. "Curing condition I": 1 månad i luft+1 månad i havsvatten. "Curing condition II": Förseglad i formen 1 månad+1 månad i havsvatten.
Figure 13.5:7. Salt-frost scaling of concrete with different water-binder ratio and different amount of silica fume. The concrete pre-treated in two different ways: 65 and 65S, w/b=0,46; 95 and 95S, w/b=0,37. "Curing condition I"; 1 month in air+1 month in sea water. "Curing condition II": 1 month sealed in the mould+1 month in sea water. Hammer & Sellevold (1990).

13.5:3.3 Undersökningar vid Karlsruhe Universität; Hilsdorf och Guse (1995)

Betong med *vbt* 0,30 och 0,50, med och utan luftinblandning och med och utan 10% silikastoft, saltfrysprovades efter det att provkropparna fuktlagrats olika lång tid (1, 3, 7, 42 och 49 dygn) följt av luftlagring i +20°C, 65% RH under olika lång tid (48, 46, 42, 7 och 0 dygn) så att alla prover var 49 dygn när frysprovningen började. Provningen skedde med den sk CDF-metoden som påminner om metod SS 13 72 44 men där frysytan är vänd nedåt; RILEM (1996). För samma betong blir avskalningarna annorlunda i CDF-metoden än med SS 13 72 44. Enligt Setzer (1996) medför CDF-metoden en ökad avskalning med en faktor 2 à 3. Enligt Petersson (1997) är skillnaden mellan de båda metoderna beroende på betongkvaliteten. För högpresterande betong tycks metod SS 13 72 44 ge högre avskalning. Resultatet visas i figur 13.5:8 uttryckt som avskalning relativt avskalningen hos en tysk "normalbetong för broar"; lufttillsatt betong med *vct*=0,50 . Dess avskalning är 0,205 kg/m^2 vid lagringstiden 7 d i fukt följt av 42 dygn i luft. Följande slutsatser kan dras:

1: Betong utan luftinblandning och *vct*=0,30 har god saltfrostbeständighet.

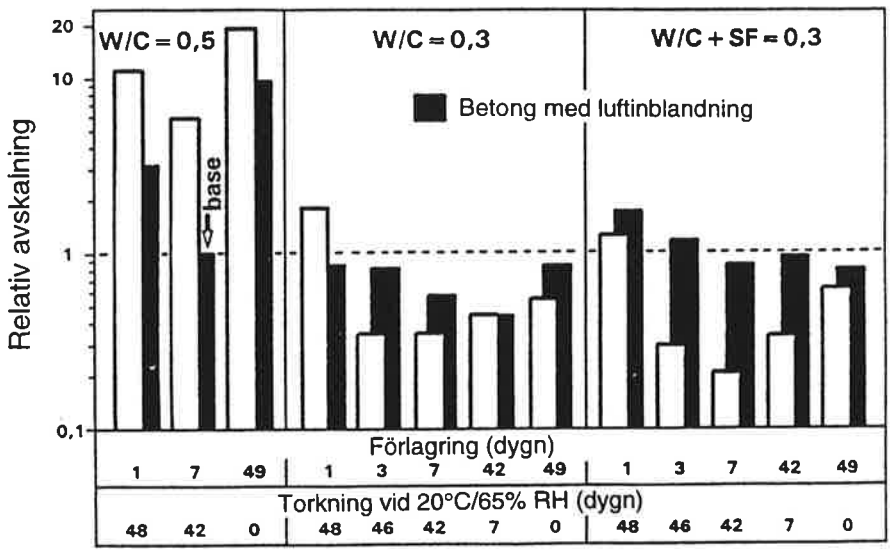
2: Luftinblandning försämrar saltfrostbeständigheten hos betong med *vbt*=0,30. Försämringen är särskilt stor för betong med silikastoft.

3: Tillsats av 10 % silikastoft ökar saltfrostbeständigheten något hos icke lufttillsatt betong men minskar den hos betong med lufttillsats.

4: Saltfrostbeständigheten är mycket stark beroende av förhärdningsförhållandena. Maximal beständighet erhålls vid ca 42 dygns torkning och 7 dygns fukthärdning. Undersökningen styrker således de iakttagelser som gjordes av Utgenannt och Petersson (1997)

5: *vct*=0,50 är för högt för att ge acceptabel saltfrostbeständighet hos betong utan luftinblandning.

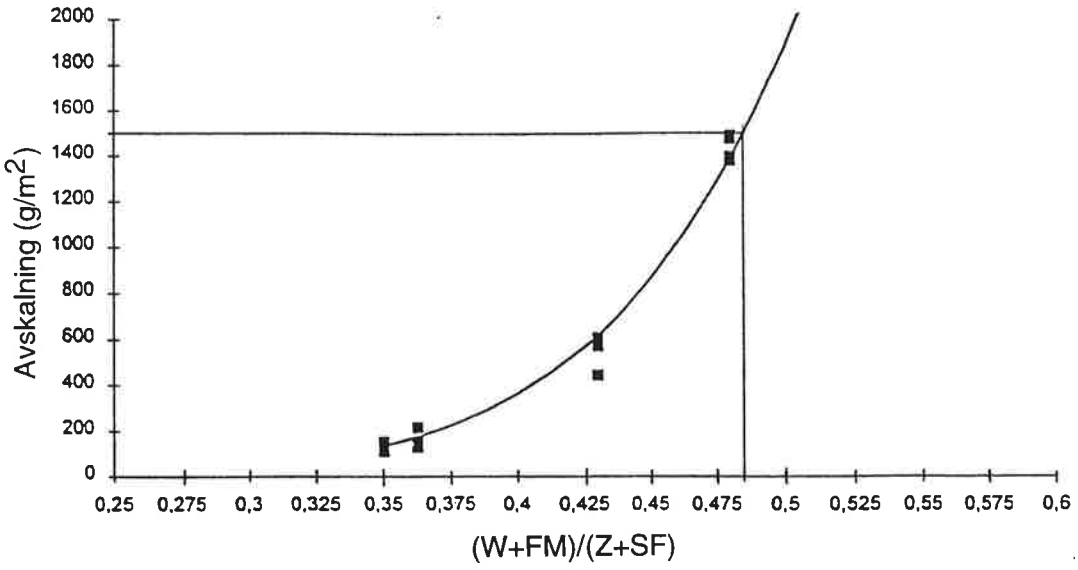
Det är mycket intressant att notera att luftinblandning tenderar att minska saltfrostbeständigheten hos högpresterande betong. Orsaken kan vara att luftporerna absorberar vatten varvid den frysbara vattenmängden ökar; Fagerlund (1996). Om så är fallet bör luftinblandning undvikas i högpresterande betong. Kravet på hög inre frostbeständighet kräver dock ofta att betongen har en viss lufthalt. Se avsnitt 13.6.



Figur 13.5:8. Saltfrostavskalning hos betong relativt avskalningen hos en tysk "normalbetong" ("base"); Hilsdorf & Guse (1995). Proverna förkonditionerade i fukt och luft olika lång tid. Betongålder vid start av frysförsök 49 dygn hos alla prover.
Figure 13.5:8. Salt-frost scaling of concrete versus the salt-frost scaling of a German "standard concrete" ("base"). The specimens are pre-treated in different ways before start of freeze-thaw. Hilsdorf & Guse (1995).

13.5:3.4 Undersökning vid Bauhaus Universität Weimar; Stark och Chelouah (1995)

En undersökning av saltfrostbeständigheten hos betong med portlandcement, 7,5 % silikastoft, utan luftinblandning men med olika vct genomfördes med CDF-metoden. Resultatet visas i figur 13.5:9. Inverkan av *vbt* är mycket kraftig. Vid *vbt* understigande ca 0,35 är avskalningen mycket liten (OBS i *vbt* inräknas även flyttillsatsen. Om denna borträknas minskar *vbt* från 0,35 till 0,32). Resultatet överensstämmer således kvalitativt med övriga resultat beskrivna ovan.



Figur 13.5:9. Inverkan av *vbt* på saltavskalningen hos betong med portlandcement och 7,5% silikastoft; Stark & Chelouah (1995). (FM= flyttillsats, Z=cement, W= vatten, SF=silikastoft). CDF-metoden användes; RILEM(1996). Acceptansgränsen sattes till 1,5 kg/m^2.
Figure 13.5:9. Influence of the water-binder ratio on the salt-frost scaling of concrete with portland cement and 7,5 % silica fume. The CDF-method was used. Maximim accepted scaling is 1,5 kg/m^2. Stark & Cheliuah (1995).

13.5:3.5 Utredning vid Université Laval; Gagné och Marchand (1997)

En sammanställning av 9 olika undersökningar av saltfrostbeständigheten hos betong med olika vbt och lufthalt har gjorts vid Université Laval i Québec. Resultatet visas i figur 13.5:10 för betong utan silikastoft och i figur 13.5:11 för betong med 5 % eller 10 % silikastoft. Följande slutsatser kan dras:

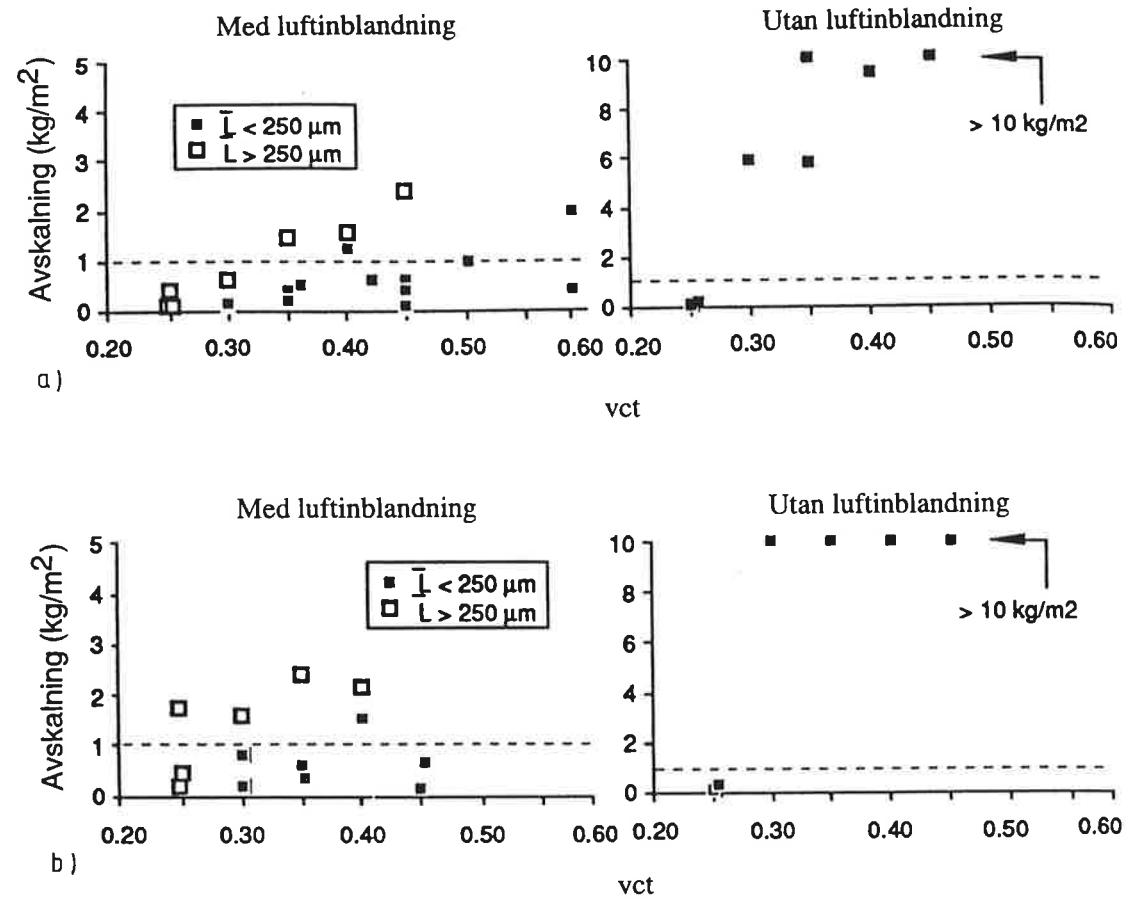
1: När betongen saknar luft erfordras ett *vct* av högst ca 0,25. Då tål betongen upp till 150 fryscykler.

2: Icke lufttillsatt betong med *vbt* 0,30 eller högre får kraftig saltavskalning redan inom 56 fryscykler.

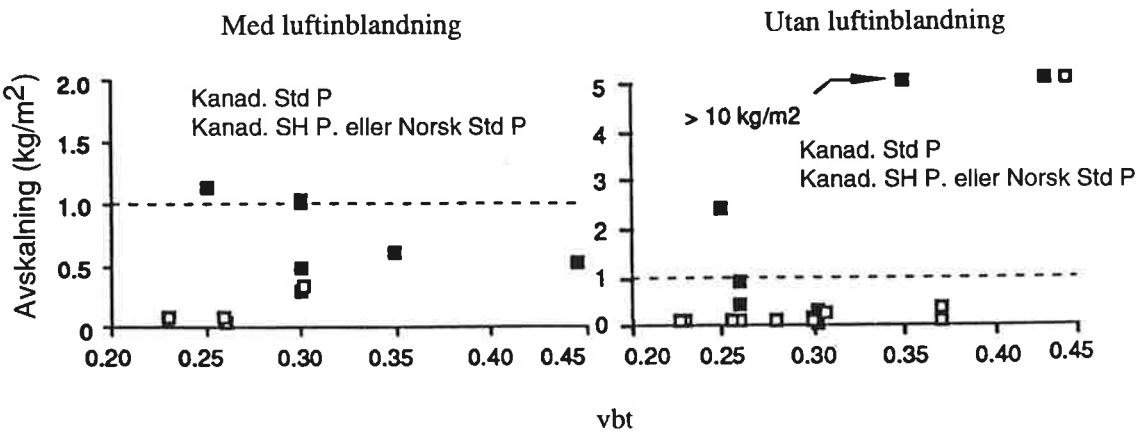
3: Luftinblandad betong får godtagbar saltavskalning vid vid *vct* upp till 0,45 förutsatt att den fiktiva avståndsfaktorn understiger 0,25 mm.

4: Silikastoftet minskar normalt avskalningen hos icke lufttillsatt betong så att acceptabel nivå erhålls ända upp till *vbt* = 0,37.

Den kanadensiska sammanställningen ger alltså delvis ett annorlunda resultat än de svenska, tyska och norska undersökningarna. Utan silikastoft krävs enligt den kanadensiska sammanställningen mycket lägre *vct* än enligt de andra undersökningarna; se figur 13.5:6, 13.5:7, 13..5:8. Med silikastoft fås mycket högre saltfrostbeständighet än i de svenska och norska undersökningarna. Orsaken till dessa skillnader kan inte genomskådas. Möjligen ligger den i att ett flertal olika testmetoder sammanställts i ett och samma diagram. Det är väl känt att förbehandlingen av proverna har stor betydelse. Förbehandlingen kan ha varit starkt varierande i de 9 olika studier som sammanställts. Resultatet visar emellertid vikten av att varje ny blandning frystestas och att man inte enbart kan lita på andras laboratorieundersökningar av andra betonger.



Figur 13.5:10. Sammanställning av resultat av saltfrysprovning av betong med olika *vct* och utan silikastoft; Gagné & Marchand (1997). (a) Resultat efter 50-56 fryscykler. (b) Resultat efter 100-150 cykler.
Figure 13.5:10. Compilation of salt-scaling tests of concrete with various water-cement ratio and no silica fume. (a) Results after 50-56 FT-cycles. (b) Results after 100-150 FT-cycles. Gagné & Marchand (1997).



Figur 13.5:11. Sammanställning av resultat av saltfrysprovning av betong med olika *vct* och med 5 % till 10 % silikastoft; Gagné & Marchand (1997). Resultat efter 100 cykler.
Figure 13.5:11. Compilation of salt-scaling tests of concrete with various water-cement ratio and 5 % or 10 % silica fume. Results after 100 FT-cycles. Gagné & Marchand (1997).

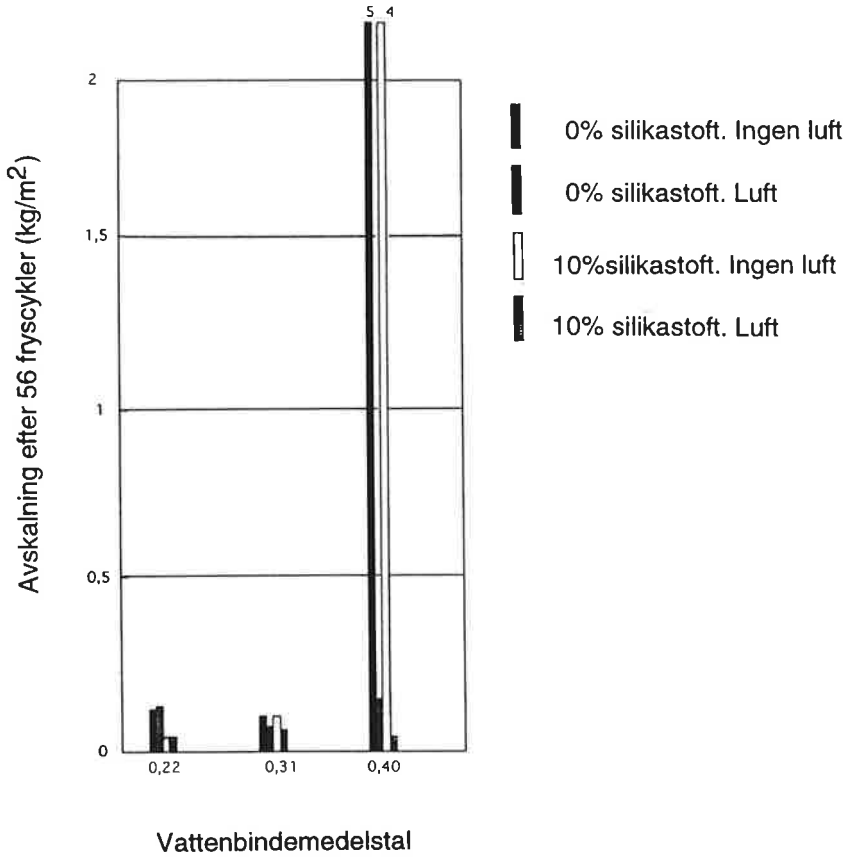
13.5:4 Inverkan av åldringseffekter

13.5:4.1 Allmänt

Figur 13.5:5 visar att en enstaka uttorkningscykel har en viss påverkan som i detta fall var negativ. Nedan återges andra försök som visar att åldringseffekter kan vara såväl positiv som negativ.

13.5:4.2 Försök vid LTH; Lindmark (1991)

Samma betongtyper som redovisas i figur 13.5:6 ovan saltfryspovades även efter en åldringsprocedur bestående av 6 cykler uttorkning i +50°C med mellanliggande återuppfuktning. Total tid för åldring var 30 dygn. Resultatet visas i figur 13.5:12. En jämförelse med figur 13.5:6 visar att åldringen haft marginell effekt.



Figur 13.5:12. Saltavskalning hos lufttillsatt och icke lufttillsatt betong med olika *vbt* och olika mängd silikastoft. Åldring genom 30 dygns cyklisk torkning till +50°C och återuppfuktning i vatten. Lindmark (1991). (Jämför Fig 13.5:6 som visar samma betonger utan åldring).
Figure 13.5:12. Salt-frost scaling of air-entrained and non-air-entrained concrete with various water-binder ratio and different amount of silica fume. Ageing procedure perfomed before the FT-test by 30 days cyclic drying at +50°C and re-saturation in water. (Cf. Fig 13.5:6 which is valid for unaged concrete). Lindmark (1991).

13.5:4.3 Försök vid SP; Petersson (1995)

En försöksserie av saltfrostbeständigheten hos icke lufttillsatt betong med *vbt* 0,35 och 0,40 och med 0 resp 5 % silikastoft har genomförts vid SP. Två olika portlandcement användes. Proverna exponerades under 3 år på en fältstation i marin miljö vid Träslövsläge på svenska västkusten. Efter denna tid togs prover in och den utomhusexponerade ytan provades med metod SS 13 72 44. Provet förlängdes till 112 cykler vilket krävs i BRO 94 när betongen innehåller silikastoft. Resultatet visas i figur 13.5:13. Följande slutsatser kan dras:

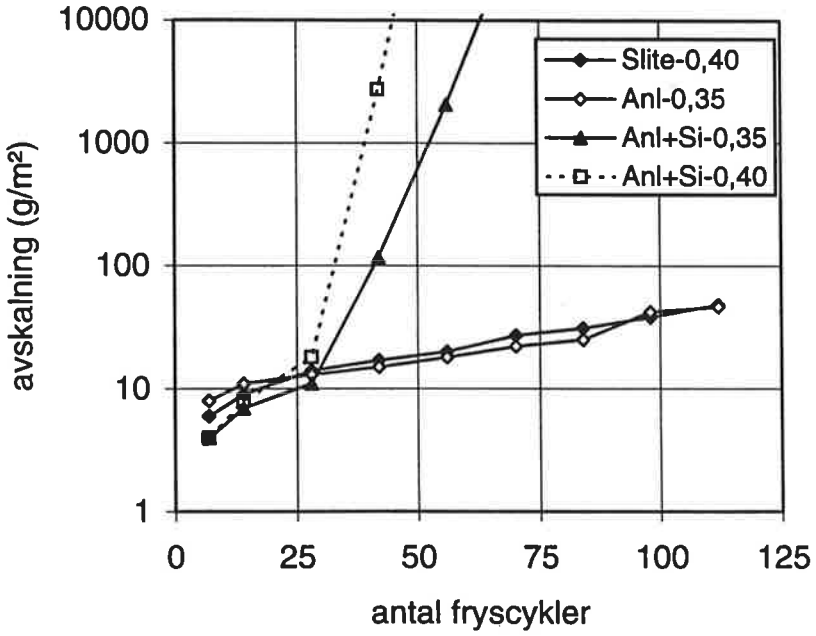
1: Hos betong utan silikastoft har åldringen medfört en radikalt förbättrad saltfrostbeständighet. Avskalningen efter 56 cykler för åldrade prover jämfört med icke-åldrade prover är följande:

* Anläggningscement *vct* = 0,35: Åldrad, 18 g/m^2. Icke-åldrad, 2410 g/m^2
* Slitecement *vct* = 0,40: Åldrad, 20 g/m^2. Icke-åldrad, 9120 g/m^2

2: Hos betong med silikastoft har åldringen inte medfört någon radikalt förbättrad saltfrostbeständighet utan i ett fall en försämring. Avskalningen efter 56 cykler för åldrade och icke-åldrade prover är:

* Anläggningscement, *vbt* = 0,35: Åldrad, 2050 g/m^2. Icke-åldrad, 4520 g/m^2
* Anläggningscement, *vct* = 0,40: Åldrad, totalt sönderfrusen. Icke-åldrad, 7550 g/m^2

3: Åldrad betong med silikastoft får en accelererad saltavskalning. Denna effekt har inte noterats i andra forskares undersökningar. Enligt Lagerblad & Utkin (1993) kan bristfälligt dispergerat silikastoft medföra alkali-kiselsyrareaktion. Silikastoftet i SP:s undersökning tillsattes som slurry och bör därför vara väl dispergerat. Det finns ingen uppgift om att alkali-kiselsyrareaktion noterats i de betonger som ingick i SP-provningen.



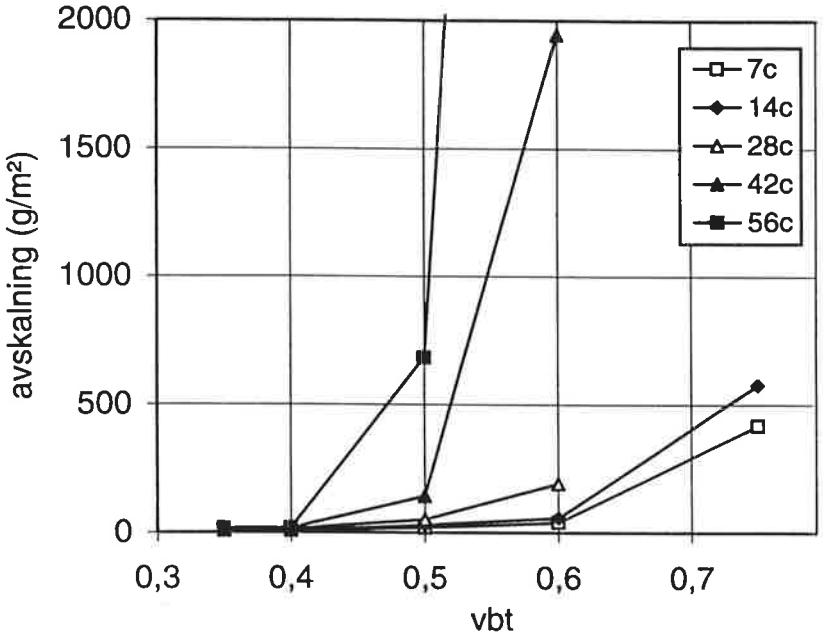
Figur 13.5:13. Saltfrysprovning av icke lufttillsatt betong som utsatts för en naturlig åldring under tre år. Olika cementsorter (Slite Std och Anläggningscement) och olika *vbt* (0,35 och 0,40). Med och utan silikastoft (Si). Åldrad yta utgör frysyta i testen. Petersson (1995).
Figure 13.5:13. Salt-frost testing of non-airentrained concrete exposed to natural ageing in the field during 3 years. The aged surface is the exposed surface in the salt-frost test. Petersson (1995).

I samma undersökning studerades inverkan av *vbt* på den åldrade betongens saltfrostavskalning. Alla betonger saknade extra luftinblandning. Proverna var naturligt åldrade på samma sätt som i den tidigare undersökningen. Resultatet visas i figur 13.5:14. Följande slutsatser kan dras:

1: Vid *vbt* understigande ca 0,40 har åldringen mycket stor positiv inverkan. Det förefaller som om man kan använda icke lufttillsatt betong med *vbt* ända upp till 0,40 förutsatt att betongen hinner åldras (karbonatisera) innan den utsätts för kraftig saltfrostbelastning.

2: vid *vbt* > ca 0,40 ökar avskalningen progressivt med ökande antal fryscykler. Detta visar att sådan betong inte har någon nämnvärd positiv åldring.

Det måste observeras att resultaten gäller för betong med rent portlandcement. Det är inte sannolikt att betong med restmaterial, tex masugnsslagg kommer att ha lika goda åldringsegenskaper. Tvärtom torde åldringen hos dessa betongtyper vara negativ. Redan 5 % inblandning av silikastoft visade sig ge negativ inverkan av åldring enligt resultaten ovan. Inverkan av flygaska på åldringsegenskaperna hos högpresterande betong är okänd. Däremot vet man att den påverkar åldring av normalbetong negativt; Vesikari (1988), Bremner et al (1989).



Figur 13.5:14. Inverkan av *vbt* på saltfrostbeständigheten hos icke lufttillsatt betong med Slitecement, vilken utsatts för en naturlig åldring under 3 år; Petersson (1995). Åldrad yta utgör frysyta i testen. (7c etc är antalet fryscykler).
Figure 13.5:14. Influence of the water-binder ratio on the salt-frost resistance of non-air-entrained concrete exposed to natural ageing in the field during 3 years. The aged surface is the exposed surface in the salt-frost test. Petersson (1995).

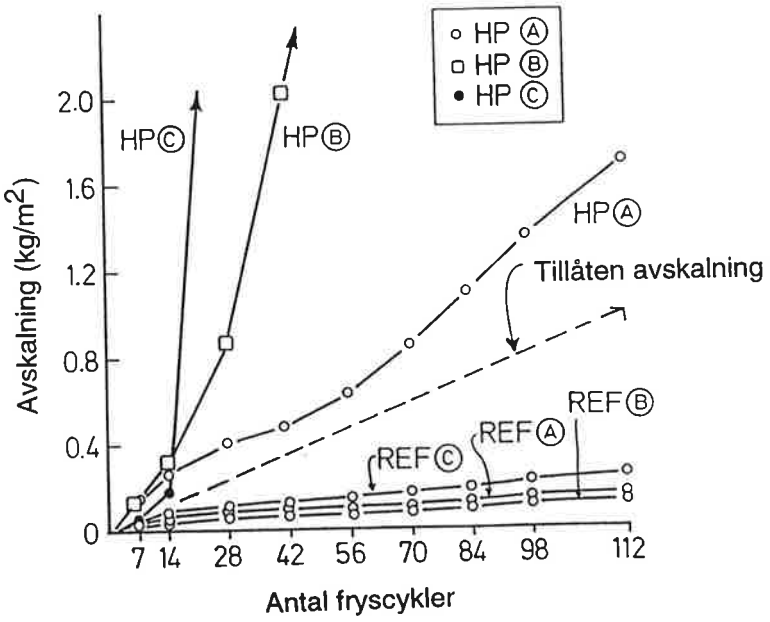
13.5:5 Inverkan av cementtypen

Ingen systematisk studie har gjorts av hur cementtypen påverkar saltfrostbeständigheten hos högpresterande betong. Undersökningar vid SP visar dock att inverkan av cementtypen inte är stor vid icke lufttillsatt betong; Petersson (1995). Däremot är det välkänt att man lättare kan tillverka en betong med lågt *vbt* genom att använda LA/SR-cement, tex Anläggningscement, vilket kan bero på att det är lättare att skapa en gynnsam luftporstruktur när denna cementtyp används; Malmström (1990).

Blandcement och tillsats av restmaterial bör undvikas i betong som skall ha hög saltfrostbeständighet. Troligen kan dock måttliga mängder silikastoft användas utan risk. Den negativa åldring som silikastoft visat sig ha i försök vid SP har inte kunnat noteras i andra försök. Av säkerhetsskäl bör man förlänga saltfrysprovningen hos betong med silikastoft. Detta krävs i BRO 94.

13.5:6 Inverkan av höjd temperatur eller värmehärdning

Exponering av hårdnad betong för höjd temperatur har visat sig kunna minska saltfrostbeständigheten drastiskt hos normalbetong; Malmström (1990). Begränsade undersökningar vid CBI visar att värmehärdning har starkt negativ påverkan på saltfrostbeständigheten hos högpresterande betong; Kjellsen (1995). Se även figur 13.5:15. Orsaken till denna effekt är inte klarlagd. Möjligen sammanhänger den med att betongens yta blir mer grovporös så att mängden frysbart vatten ökar och mängden luftfyllda porer minskar.



Figur 13.5:15. Inverkan av värmehärdning på saltavskalningen hos icke lufttillsatt betong med *vbt*=0,31 och 5,3% silikastoft; Kjellsen (1995). Kurvor A: Prover härdade i +20°C. Kurvor B: Prover värmehärdade vid +65°C under 5,5 timmar och därefter i vatten vid +20°C. Kurvor C: Prover värmehärdade vid +65°C under 5,5 timmar och därefter lagrade i utomhusluft. Ref=lufttillsatt referensbetong med vct=0,45 utan silikastoft. HP=högpresterande betong.
Figure 13.5:15. Influence of heat curing on the salt-frost scaling of non-air-entrained high performance concrete with water-binder ratio 0,31 and 5,3 % silica fume. Curves A: Cured at +20°C, Curves B: Heat cured for 5,5 hours at +65°C and then water stored at +20°C. Curves C: Heat cured for 5,5 hours at +65°C and then store outdoors. Ref is air-entrained concrete with w/c=0,45 and no silica fume. HP is high performance concrete. Kjellsen (1995).

13.5:7 Saltfrostbeständighet - slutsatser

Flertalet undersökningar tyder på att betong med *vbt* < 0,30 har hög saltfrostbeständighet även när den saknar luftinblandning. Vid *vbt* däröver erfordras luft. Minsta acceptabla mängden luft bestäms lämpligen genom saltfrysförsök.

Åldring ger ofta starkt positiv effekt på betong med rent portlandcement. Orsaken är troligen att betongytan förbättras genom karbonatisering. Denna effekt kan dock inte utnyttjas där betongen är oförmögen att karbonatisera, tex där den utsätts för fost och tösalt kort tid efter gjutning.

Betong med mineraliska tillsatsmaterial tycks inte ha denna positiva effekt av åldring. Detta gäller särskilt betong med masugnsslagg eller flygaska.

Vid bedömning av behovet av luftinblandning måste hänsyn tas till att luft kan behövas för att betongen skall få hög inre frostbeständighet; se avsnitt 13.6.

13.6 EXPERIMENTELLA UNDERSÖKNINGAR AV DEN INRE FROSTBESTÄNDIGHETEN HOS HÖGPRESTERANDE BETONG

13.6:1 Inledning

Det finns få undersökningar av den inre frostbeständigheten hos högpresterande betong. En viktig orsak är att det saknas bra frysprovningsmetoder som verkligen avslöjar risken för inre frostskador. Vanliga frysprovningsmetoder baseras på att vatten skall absorberas i betongen under pågående

frysprovning. En normal oisolerad frysprovning är därför i princip även en accelererad vattenabsorptionstest. När vattenhalten i betongens inre så småningom uppnår den kritiska nivån får man en detekterbar frostskada. Högpresterande betong har emellertid så långsam vattenabsorption att skador inte nödvändigtvis hinner uppkomma under det antal fryscykler som är normerat. Därvid kan den verkliga inre frostbeständigheten hos betong som kommer att utsättas för långvarig fuktbelastning överskattas. I princip borde andra frysprovningsmetoder användas, tex den s k *Critical Dilation* (ASTM C 671) eller den *kritiska vattenmättnadsgradsmetoden;* Fagerlund (1997a). Undersökningar med dessa metoder saknas för högpresterande betong. Rätt omfattande försök har dock gjorts vid LTH med en dilatationsmetod. Några av dessa resultat redovisas nedan.

Den inre frostbeständigheten är till skillnad från saltfrostbeständigheten i stort sett helt oberoende av provkroppsytans egenskaper. Däremot påverkas den med all säkerhet av hur provet behandlats. Torkning påverkar tex den frysbara vattenmängden (figur 13.4:3 och 13.4:4) vilket rimligen också påverkar den inre frostbeständigheten.

13.6:2 Mätning av längdändring under en-cykelfrysning av fuktlagrade prover

13.6:2.1 Allmänt

Vid LTH genomfördes en större undersökning av längdändringar under enstaka eller upprepade fryscykler ner till -30°C. Före provningen vattenlagrades betongproverna under 1 månad, 3 månader och ca 1 1/2 år. Vissa prover utsattes för en artificiell åldring bestående av upprepad uttorkning vid +40°C och vattenlagring.

26 olika betonger provades med *vbt* varierande mellan 0,26 och 0,40. Silikastofthalter 0%, 5% och 10% användes. Såväl betong med luft som utan luft provades.

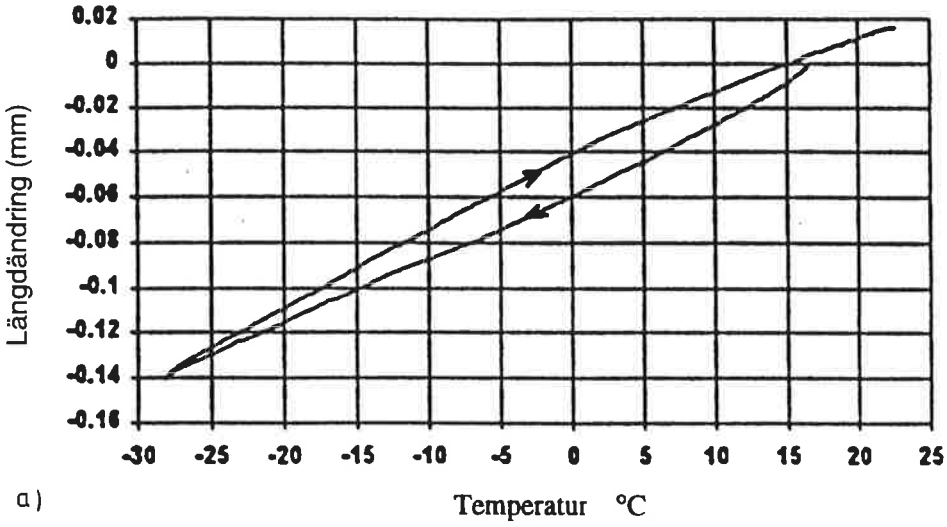
13.6:2.2 Undersökningar efter 1 och 3 månaders vattenlagring; Fagerlund (1997a)

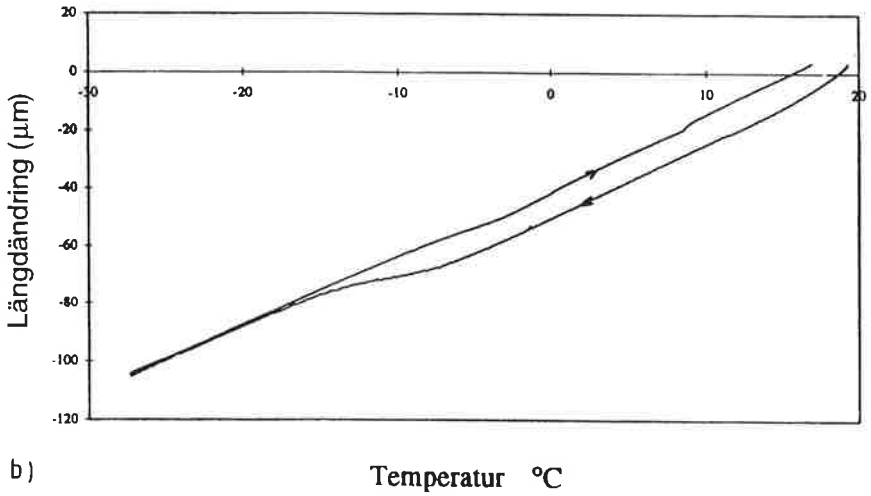
Ingen av de 26 betongerna uppvisade dilatation (expansion) under nedfrysningen. De måste därför anses vara frostbeständiga efter 3 månaders vattenlagring. Ett exempel på en längd-temperaturkurva visas för en betong med *vct*=0,30 i figur 13.6:1a.

13.6:2.3 Undersökning efter 11/2 års vattenlagring; Nordström & Fagerlund (1997)

Frysprovningen upprepades efter ytterligare ca 15 månaders vattenlagring varunder vattenhalten ökade påtagligt. Det finns nu för flertalet prover en viss tendens till dilatation under nedfrysningen. Exempel på en längd-temperaturkurva för samma prov som i figur 13.6:1a visas i figur 13.6:1b. Expansionen (dilatationen) är dock enbart ca 30% av töjningsförmågan hos betongen. Därför kunde ingen nedgång i dynamisk *E*-modul registreras. Orsaken till att ingen större dilatation uppkom är med all säkerhet självuttorkningseffekten i provets inre delar. Denna visas i figur 13.4:7 och 13.4:8 för samma betonger som frysprovades. Troligen var det därför enbart betongens ytparti som expanderade vilket minskade expansionen totalt hos provet.

Proverna kommer att lagras ytterligare 1 à 2 år i vatten och provas på nytt. Då är det tänkbart att en stor och skadlig expansion uppstår under frysning av icke lufttillsatt betong på grund av att den kritiska vattenhalten uppnåtts.





Figur 13.6:1. Längdändring-temperaturkurvor hos betong som lagrats under lång tid i vatten. *vct*=0,30, inget silikastoft. (a) Provet har lagrats kontinuerligt i vatten under 3 månader; Fagerlund (1997a). (OBS: Det krokiga kurvförloppet och hysteresisytan beror på att cykeln hade en mycket snabb temperatursänkning och temperaturökning och har inte med provets egenrörelser att göra). (b) Provet har lagrats kontinuerligt i vatten under 2 år före frysförsöket; Nordström & Fagerlund (1997). (Frysförloppet är mycket långsammare än i (a) och därför uppstår ingen hysteresisslinga)
Figure 13.6:1. Length-temperature curves of concrete stored in water from casting until freeze-thaw. w/c=0,30, no silica fume. (a) Stored in water for 3 months before freeze-thaw; Fagerlund (1997a). (b) Stored in water for 2 years before freeze-thaw; Nordström & Fagerlund (1997).

13.6:3 Traditionella flercykelförsök

13.6:3.1 Allmänt

Normalt genomförs frysförsök som upprepad frysning-upptining av prover som antingen hela tiden ligger i vatten eller som under nedfrysningsskedet ligger i luft. Resultatet blir starkt beroende av hur försöket genomförs; tex fryscykelns varaktighet, fryshastighet, frysmediets beskaffenhet (luft eller vatten), etc. Den mest använda metoden är ASTM C 666 som finns i två varianter; se även avsnitt 13.8:3:

* Metod A: Såväl frysning som upptining i vatten.
* Metod B: Frysning i luft och upptining i vatten

Några exempel på sådana frysprovningar av högpresterande betong visas nedan.

13.6:3.2 Kanadensisk undersökning; Malhotra et al (1987)

Betong med och utan luftinblandning undersöktes med ASTM C 666, Metod A. För betong utan luft var *vbt* 0,25 och 0,35. För betong med luft provades även några andra *vbt*. Resultatet visas i tabell 13.6:1.

Tabell 13.6:1. Resultat av kanadensisk frysprovning av högpresterande betong; Malhotra et al (1987). (C=cement. S=silikastoft).
Table 13.6:1. Results of a Canadian freeze-thaw test of high performance concrete. Malhotra et al (1987).

Typ av betong	w/(C+S)	Silikastoft %	Lufthalt %	Antal fryscykler när provning avbröts	"Beständighets-faktor", DF, %
Icke Lufttillsatt	0,35	0	2,0	66	6
	0,35	10	1,8	70	6
	0,35	20	1,2	70	10
	0,30	0	1,9	67	12
	0,30	10	1,3	67	3
	0,30	20	1,1	70	3
	0,25	0	2,0	89	11
	0,25	10	1,3	89	5
	0,25	20	1,5	89	8
	0,25	0	1,8	79	3
	0,25	10	1,5	79	2
	0,25	20	1,8	79	2
	0,25	0	2,0	47	6
	0,25	10	1,6	47	7
	0,25	20	1,8	47	2
	0,25	0	2,2	70	4
	0,25	10	1,8	70	3
	0,25	20	2,0	70	3
Luft-tillsatt	0,35	0	5,4	300	97
	0,36	10	5,6	265	59
	0,36	20	5,6	203	36
	0,30	0	3,7	300	99
	0,30	10	4,2	170	33
	0,32	20	4,5	138	16

Vid tolkningen av resultaten skall beaktas att en god betong skall ha en beständighetsfaktor ("*Durability Factor*") av lägst 80%. Frysförsöket avbryts enligt standarden när beständighetsfaktorn sjunkit till 60%. I det aktuella försöket fortsattes provningen till mycket lägre beständighetsfaktor.

Följande slutsatser kan dras:

1: Icke lufttillsatt betong har mycket låg inre frostbeständighet, detta trots att *vbt* är så lågt som 0,25. Flertalet betonger var mycket svårt skadade redan efter ett tiotal fryscykler.

2: Inblandning av silikastoft har inte haft någon påtaglig effekt, vare sig negativ eller positiv, på frostbeständigheten.

3: Lufttillsatt betong utan silikastoft har mycket hög inre frostbeständighet.

4: Inblandning av stora mängder silikastoft försämrar frostbeständigheten märkbart.

Den kanandensiska undersökningen ger alltså helt annorlunda resultat än den som gjorts vid LTH; se avsnitt 13.6:2. Orsaken är troligen följande:

* I LTH-undersökningen "bestämde betongen själv" vilken fukthalt den skulle uppnå före frysning. Under själva frysningen var proverna förseglade. Man fick därför en indikation på om de fukthalter som betongen når under långvarig vattenlagring kan vara tillräckliga för att betongen skall frostskadas vid enstaka starka nedfrysningar. Metoden är således i rätt hög grad relevant för verkliga förhållanden förutsatt att fuktlagringstiden och därmed fuktnivån i provet är representativ för verkliga förhållanden.

* I den kanadensiska undersökningen forceras vatten in i provet under själva frystesten. Provet har ingen möjlighet att torka någon enda gång under provningen. Detta gör att man kan förvänta att betongens ytparti blir så gott som totalt vattenmättat i en betong som saknar extra luft. Följaktligen skadas ytan kraftigt vid frysningen. Vid nästa fryscykel fylls även den nyskapade ytan varvid även denna skadas. Man får på så sätt en fortgående ökande ytskada. Denna registreras av den nedgång i *E*-modul som är basen för beräkning av beständighetsfaktorn; se avsnitt 8.3.

Sättet att prova frostbeständigheten hos högpresterande betong genom användning av ASTM C 666 förtjänar att kommenteras ytterligare:

I provningsmetoden ASTM C 666 kommer, som nyss nämnts, provet troligen att successivt skadas från ytan och inåt. Skador mäts som dynamisk *E*-modulförlust via provets egenfrekvens vid böjsvängning. Genom ytskadorna minskar provets "effektiva" yttröghetsmoment. Detta medför att den uppmätta egenfrekvensen hos provet minskar trots att själva den inre delen av provkroppen är oskadad. Resultatet kommer dock att registreras som en minskning av provets *E*-modul. En provkropp som har en diameter av 10 cm där ytpartiet intill 6 mm djup är totalförstörd av frysningen kommer enbart på grund av ytskadan få en egenfrekvensminskning av 23%. Den beräknade fiktiva "*E*-modulen" minskar då med 40 % utan att *E*-modulen överhuvud taget ändrats hos den inre delen av provet. 40% beräknad E-modulförlust är en gräns för att provningen skall avbrytas. Beräkningen visar att de två olika provningsmetoderna, dilatationsmetoden använd vid LTH och ASTM C 666 använd i det kanadensiska försöket, inte nödvändigtvis står i konflikt med varandra. De registrerar enbart olika typer av skador; inre skador resp ytskador. Problemet är att ASTM C 666 gör anspråk på att visa inre skador, vilket den alltså inte nödvändigtvis gör hos högpresterande betong.

13.6:3.3 Finska undersökningar; Kukko (1995)

Undersökningar av frostbeständigheten hos ett antal högpresterande betonger utan luft har genomförts vid VTT i Finland. Inverkan av olika restmaterial studerades; se tabell 13.6:2. Testmetoden påminner om ASTM C 666, Metod B, dvs frysning skedde i luft och upptining i vatten. Frysprovningsresultatet visas i figur 13.6:2.

Tabell 13.6:2: Karakteristika för blandningarna i figur 13.6:2.
Table 13.6:2. Characteristics of the concretes in figure 13.6:2.

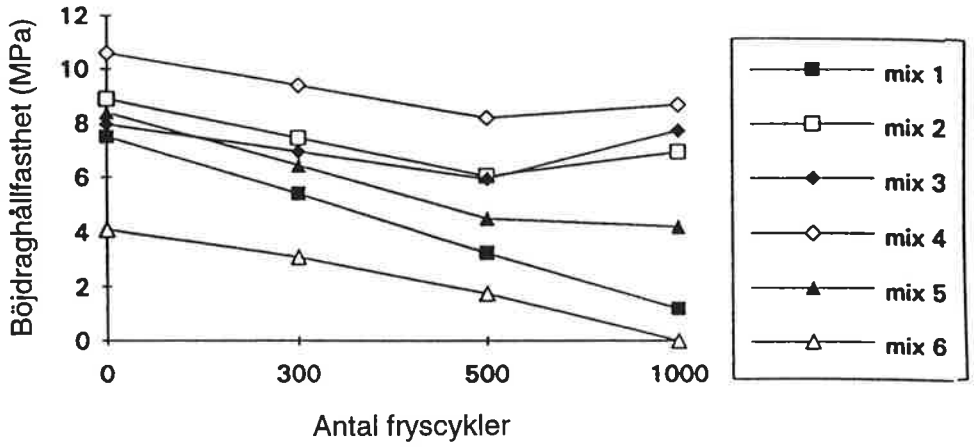
Blandning nr	Bindemedel	*vbt*	lufthalt %
Mix 1	95% SR-cement+5% silikastoft	0,275	0,8
Mix 2	100% SR-cement	0,327	2,5
Mix 3	75% SR-cement+25% flygaska	0,287	2,4
Mix 4	94% SR-cement + 6% silikastoft	0,299	2,8
Mix 5	67% SR-cement + 33% slagg	0,348	0,8
Mix 6	100% SR-cement	0,75	1,6

Följande slutsatser kan dras:

1: Ingen betong är helt frostbeständig eftersom böjdraghållfastheten minskar påtagligt för alla betonger. För Mix 1 är nedgången i böjdraghållfasthet till och med större än för betongen med *vct*=0,75 trots att dess *vbt* är så lågt som 0,275.

2: Betongerna med den lägsta lufthalten (0,8%) har den klart sämsta frostbeständigheten

3: Ultraljudhastigheten mättes också (redovisas inte här). Den visar kvalitativt samma resultat som böjdraghållfastheten, dvs stora minskningar för betong med låg lufthalt och högt *vbt*.



Figur13.6:2.: Böjdraghållfasthet hos icke lufttillsatt betong med olika *vct* som funktion av antalet fryscykler; Kukko (1995). Frysprovning av typ ASTM C 666, Metod B. Beträffande olika "Mixer" se tabell 13.6:2.
Figure 13.6:2. Bending strength of non-air-entrained concrete with various water-cement ratio as function of the number of freeze-thaw cycles. Test method ASTM C 666 Method B. Concerning the mixes, see table 13.6:2. Kukko (1995).

13.6:3.4 Kanadensisk undersökning; Li et al (1994)

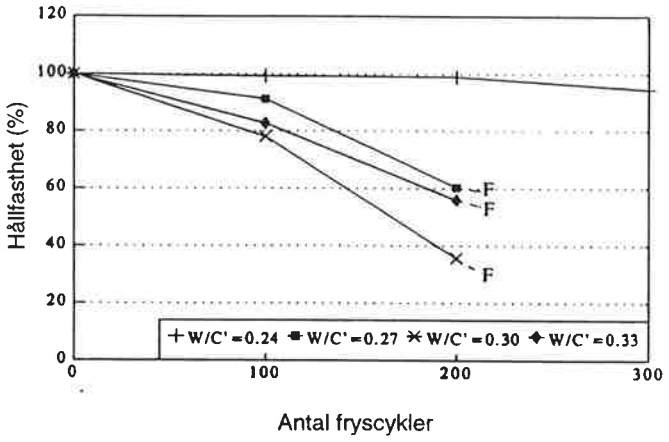
Icke lufttillsatt betong med olika vbt har provats med ASTM C 666, Metod A. Resultat för betong utan silikastoft visas i figur 13.6:3 (hållfasthet) och figur 13.6:4 (dynamisk *E*-modul). I figur 13.6:5 visas inverkan av mängden silikastoft på *E*-modulreduktionen vid konstant *vbt* = 0,24.

Följande slutsatser kan dras:

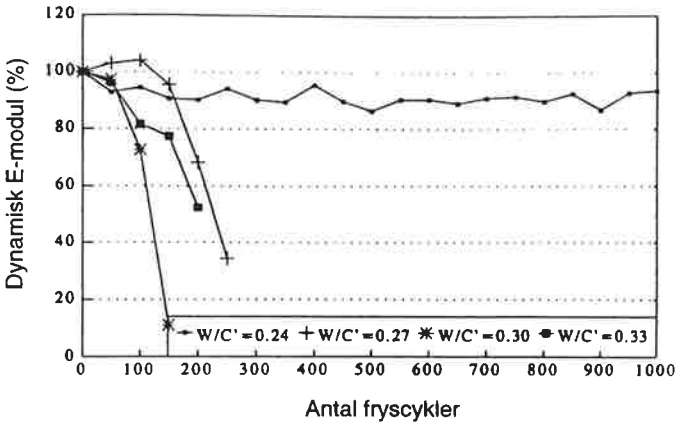
1: Enbart betonger med *vct* = 0,24 uppvisar god inre frostbeständighet. Vid högre *vct* sker snabb nedgång i *E*-modulen.

2: Vid *vbt* = 0,24 spelar mängden silikastoft liten roll för frostbeständigheten. Alla betonger är beständiga i provningen vid detta låga *vbt*.

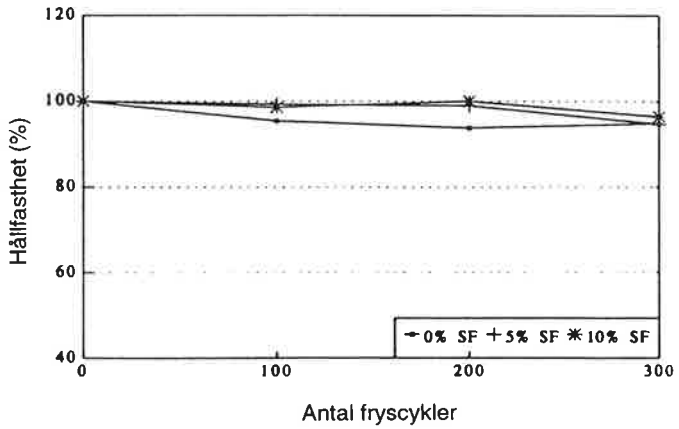
3: Nedgången i dynamisk *E*-modul är mycket större än nedgången i hållfasthet. Detta styrker hypotesen att ASTM C 666 tillämpad på högpresterande betong i första hand ger ytskador vilka påverkar egenfrekvensen kraftigt medan provets inre är tämligen oskadat. Detta innebär naturligtvis inte att betongen är beständig eftersom ytan uppenbarligen skadats.



Figur 13.6:3. Tryckhållfastheten som funktion av antalet fryscykler hos icke lufttillsatt betong med olika *vct* och utan silikastoft; Li et al (1994). Frysprovning av typ ASTM C 666, Metod A.
Figure 13.6:3. The compressive strength as function of the number of freeze-thaw cycles of non-air-entrained concrete with various water-cement ratio and no silica fume. Test method ASTM C 666 Method A. Li et al (1994).



Figur 13.6:4. Dynamisk E-modul som funktion av antalet fryscykler hos icke lufttillsatt betong med olika *vct* och utan silikastoft; Li et al (1994). Frysprovning av typ ASTM C 666, Metod A.
Figure 13.6:4. Dynamic E-modulus as function of the number of freeze-thaw cycles of non-air-entrained concrete with various water-cement ratio and no silica fume. Test method ASTM C 666 Method A. Li et al (1994).



Figur 13.6:5. Inverkan av mängden silikastoft på frostbeständigheten hos betong med konstant *vbt*=0,24; Li et al (1994). Frysprovning av typ ASTM C 666, Metod A.
Figure 13.6:5. nfluence of the amount of silica fume on the frost resistance of concrete with constant water-binder ratio 0,24. Test method ASTM C 666 Method A. Li et al (1994).

13.6:4 Inre frostbeständighet - slutsatser

Alla redovisade flercykelfrysningar visar att högpresterande betong som saknar luftinblandning är känslig för frostangrepp trots att *vbt* är mycket lågt. Det förefaller alltså som om högpresterande betong är mera känslig för inre frostskador än för saltavskalning. En del undersökningar - men inte alla- tyder på att inblandning av silikastoft reducerar den inre frostbeständigheten bestämd med en provning av tradtionell typ, vilket inte behöver innebära att frostbeständigheten i verkligheten påverkas negativt av silikastoft.

Genomförda undersökningar visar att sättet att prova frostbeständigheten har stor betydelse. Uppenbarligen ger traditionella flercykelfrysningar, där vatten kan forceras in i betongen, mycket större påfrestningar än encykelfrysningar av prover som fått suga vatten fritt under lång tid och som sedan testas fuktisolerade. Detta har stor betydelse eftersom provningsmetoden bör återspegla de verkliga fuktförhållandena. Oisolerade flercykelfrysningar kan vara alltför stränga för betong som aldrig utsätts för denna typ av klimatbelastning.

13.7 TIDIG FRYSNING

För att en betong inte skall skadas av tidig frysning måste en självuttorkning motsvarande en ungefärlig hydratationsgrad av 0,48·*vbt* ha uppnåtts; Fagerlund (1997b). Denna självuttorkningsgrad nås mycket snabbt hos högpresterande betong; troligen inom kortare tid än vad som motsvarar en mognadsålder av 10 timmar. Tidig frysning är därför inget allvarligt problem hos högpresterande betong.

13.8 PROVNINGSMETODER FÖR HÖGPRESTERANDE BETONGS FROSTBESTÄNDIGHET

13.8:1 Indirekta provningsmetoder

Indirekta mått på en betongs frostbeständighet, såsom lufthalt hos färsk och hårdnad betong och avståndsfaktor, har inte visat sig vara särskilt användbara för normalbetong. Man har därför i stor utsträckning övergivit dessa metoder och ersatt dem med direkta frysförsök. Det finns ingen anledning att anta att dessa indirekta metoder skulle fungera bättre på högpresterande betong. De bör därför inte användas annat än som en kvalitetskontroll under pågående byggnation, varvid nivåerna på de indirekta egenskaperna skall bestämmas för varje betong individuellt baserat på en kalibrering mot direkta frysförsök.

13.8:1 Saltfrysprovning

Vid saltfrysprovning förefaller högpresterande betong att påverkas mindre av variationer i den yttre salthalten än normalbetong. Så kallade "pessimala" yttre saltkoncentrationer har nämligen inte kunna observeras för betong med *vbt* < 0,35. Det finns inte heller något som tyder på att det skulle finnas någon yttre saltkoncentration som skulle vara mer aggressiv än de 3% som används i den svenska standardmetoden. Därför föreslås att denna metod i oförändrad form används även för högpresterande betong.

Det finns vissa indikationer på att betong med silikastoft kan få en accelererande saltavskalning när ett stort antal fryscykler genomförts. Kravet i BRO 94 att betong med silikastoft skall provas till 112 cykler förefaller därför vara rimligt. Samma föreslås även gälla för betong med flygaska och slagg eftersom även dessa material vid fältförsök visat sig försämra frostbeständigheten; Bremner et al (1989).

Genom variationer i förbehandlingen av frysprovkropparna påverkas karbonatiseringsgraden hos ytan. Effekten av karbonatisering kan vara positiv för vissa betongtyper; t ex betong baserad på rent portlandcement, men negativ för andra betonger; tex betong baserad på slaggcement. Enligt svensk standard förbehandlas därför betongen på ett väl definierat sätt innan frysprovningen startar. Det finns ingen anledning att ändra på nuvarande regler för förprovning av betong med rent portlandcement eller med begränsade mängder silikastoft (≤ 5%).

För betong med bindemedel som påverkas negativt av karbonatisering kommer den nuvarande frysprovningsmetoden att ge resultat på osäkra sidan eftersom betongen inte har någon möjlighet att karbonatisera under provningen, men däremot i naturen. Nuvarande frysprovningsmetod bör därför kompletteras med en karbonatiseringsmätning ur vilken karbonatiseringshastigheten bedöms. Ett ur denna mätning extrapolerat karbonatiserat skikt motsvarande frysprovningstiden 112 dygn adderas till uppmätt avskalning i frysförsöket. Avskalningen redovisas som summan av uppmätt avskalning och extrapolerat karbonatiseringsdjup.

Tills vidare föreslås att samma temperaturkurva används som i dagens svenska metod, SS 13 72 44. Det vore dock önsvärt att genomföra studier av om någon annan fryskurva kan ge större avskalningar hos högpresterande betong. Så tex kan det teoretisk tänkas att en längre tids lagring vid lägsta temperatur ökar risken för saltavskalning eftersom möjligheten till iskristalltillväxt då ökar. Även i naturen kan långa frysperioder förekomma.

13.8:2 Provning av inre frostbeständigheten

13.8:2.1 Alternativ 1: Mätning av dilatation

Prover som inte är alltför stora (ca 3 gånger max stenstorlek) förses med en vattenhalt som anses motsvara den maximala, som kan uppnås i verkligheten. Därefter fuktisoleras provet och utsätts för en enstaka eller ett antal upprepade frysnings-upptiningscykler inom området +15°C till -20°C. Provets längdändringar uppmäts som funktion av temperaturen. Med "dilatation" avses att provet expanderar under frysningen i förhållande till den från plussidan extrapolerade längd-temperaturkurvan. Om dilatationen överstiger provets töjbarhet (ca 0,1‰) kan provet anses vara obeständigt vid den aktuella fuktnivån. Förstörelse kan också mätas genom dynamisk *E*-modul eller permanent längdökning efter upptining.

Provet är till sina principer detsamma som användes av Vuorinen (1970). Förlagringstiden i vatten är dock konstant i Vuorinens metod. En liknande provningsmetod är den amerikanska ASTM C 671 *"Critical Dilation of Concrete Specimens Subjected to Freezing"*. I denna metod används dock en successivt ökande vattenlagringstid tills provet börjar dilatera påtagligt.

Eftersom högpresterande betong är mycket tät kan det ta mycket lång tid att nå det önskade fukttillståndet före frysningen. Vid fri vattenupptagning kan det vara fråga om flera års kontinuerlig vattenlagring. Ett alternativ är att trycka in vatten under högt tryck, tex 100 bar. Därvid kan man dock få något högre fukttillstånd än det som uppnås i naturen, varvid man riskerar att frostbeständigheten underskattas. Det finns anledning att utveckla dilatationsmetden så att den blir praktiskt tillämpbar även på högpresterande betong.

13.8:2.2 Alternativ 2: Kritiska vattenmättnadsgradsmetoden; Fagerlund (1977a)

I denna metod bestäms den kritiska vattenhalt som ger frostskador. Detta görs med frysförsök. Parallellt studeras hur mycket vatten som tas upp under fri vattensugning under olika lång tid. De båda vattenhalterna jämförs. Om den kritiska vattenhalten är högre än den som nås vid fri vattenupptagning är betongen frostbeständig vid den aktuella vattenabsorptionstiden. Om den kritiska vattenhalten är lägre är betongen obeständig.

Denna metod har använts med framgång för normalbetong; Fagerlund (1977b). Den är oprövad för högpresterande betong. Det största problemet är att få in tillräckligt höga vattenhalter i proverna inom rimlig tid. Metoden förutsätter därför att man använder små prover. Såväl kritisk vattenhalt som vattenhalt under fri vattenupptagning måste därför bestämmas på tunna prover. Försök har visat att man kan använda likadana tunna cirkulära skivor för båda mätningarna; Fagerlund (1980).

13.8:2.3 Alternativ 3: Flercykelprovning enligt ASTM C 666

I de båda ovan beskrivna metoderna utfördes frysförsöken på fuktisolerade prover, dvs fukthalten är oförändrad under själva frysförsöket. Ett alternativ är att låta provet ta upp vatten under själva

frysförsöket. Den mest använda metoden av denna typ är ASTM C666 *"Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing"*. Den förekommer i två olika varianter:

* Metod A. Frysning och upptining i vatten
* Metod B. Frysning i luft, upptining i vatten.

Prismatiska prover med ett tvärmått mellan 75 och 125 mm fryses och tinas tämligen snabbt. Maximalt genomförs 300 fryscykler. För var 30:e cykel bestäms dynamisk *E*-modul. (Lämpligen bestäms även längdändring och viktförlust.) Försöket fortsätter tills resterande *E*-modul är 60% av det initiella värdet, eller till max 300 cykler.

En beständighetsfaktor *DF (Durability Factor)* beräknas enligt:

$$DF = P_c \cdot N/300 \qquad (13.8:1)$$

Där P_c är resterande *E*-modul vid *N* cykler. Om P_c är 46% efter 160 cykler är alltså DF = 46·160/300 = 24%. Om P_c är 75% efter 300 cykler är DF = 75·300/300 = 75%.

Metoden har kritiserats eftersom den ger orealistiskt höga fuktnivåer i betongen; se tex Philleo (1986). Metod B är dock i detta hänseende mildare än Metod A. ASTM C 666 har också kritiserats eftersom den medger stora variationer i utförandet och därmed i resultatet. Jämförande laboratorieundersökningar saknas. Inte heller har metoden kalibrerats mot verkligheten.

Som påpekades i avsnitt 13.6:3 kommer högpresterande betong troligen att enbart skadas i ytan eftersom fukten tränger in mycket långsamt. Det gör att frostbeständigheten underskattas hos den inre delen av provet eftersom skadorna baseras på mätningar av egenfrekvens vid böjsvängning. Ytan får därvid oproportionellt stor betydelse.

I brist på bättre metod föreslås dock att ASTM C 666 används, men att bedömningen av resultatet även baseras på mätningar av permanenta längdändringar och viktförlust och inte enbart på dynamisk E-modul (egenfrekvens).

13.9 LITTERATUR

Bremner, T.W., Carette, G.G. & Malhotra, V.M. Role of supplementary cementing materials in concrete for the marine environment. Ingår i "Durability of concrete. Aspects of admixtures and industrial by-products", 2nd Int. Seminar, Gothenburg, June 1989, Document D9:1989, Byggforskningsrådet, Stockholm, 1989.

Cordon, W.A. Freezing-and-thawing of concrete. Mechanisms and control. ACI Monograph No 3, Detroit, 1966.

Dhir, R.K, Hewlett, P.C. & Chan, Y.N. Near-surface characteristics of concrete: abrasion resistance. Materials and Structures, Vol 24, No 140, 1991.

Everett, D.H. The thermodynamics of frost damage to porous solids. Trans. of the Farad. Soc., No 57, 1961.

Fagerlund, G. Non-freezable water contents of porous building materials. Inst. byggnadsteknik, LTH, Report 42, 1974.

Fagerlund, G. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Materials and Stuctures, Vol 10, No 58, 1977a.

Fagerlund, G. The international ccoperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Materials and Structures, Vol 10, No 58, 1977b.

Fagerlund, G. Prediction of the service life of concrete exposed to frost action. Ingår i "Studies on concrete technology". CBI, Stockholm, 1979.

Fagerlund, G. Testing of frost resistance. Ingår i "Int. Colloquium Frost-Resistance of Concrete". Vienna June 1980. Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der Österreichischen Zementfabrikanten. Heft 33, 1980.

Fagerlund, G. Inverkan av lufthalt, luftporstruktur, konsistens, vattencementtal och komprimeringssätt på betongens beständighet mot frost och salt. Ingår i " Betongs frostbeständighet", Nordiskt forskningsseminarium 23 oktober 1982, Rapport Ra 2.83, CBI, Stockholm, 1983.

Fagerlund, G. Frostbeständighet. Kapitel i Betonghandbok Material, Svensk Byggtjänst, 1994.

Fagerlund, G. Frost resistance of high performance concrete. Some theoretical considerations. Ingår i "Durability of high performance concrete", Proc of the Int. Workshop, Vienna, Febr. 14-15, 1994, RILEM , Cachan, 1995.

Fagerlund, G. Predicting the service life of concrete exposed to frost action through a modelling of the water absorption process in the air-pore system. Ingår i "The modelling of microstructure and its potential for studying transport properties and durability". Editors: Jennings, H., Kropp, J. & Scrivener, K.. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996.

Fagerlund, G. Undersökningar av den inre frostbeständigheten hos högpresterande betong. Avd byggnadsmaterial, LTH. Högpresterande Betong, Rapport M2:06, 1997a.

Fagerlund, G. Effect of self-desiccation on the internal frost resistance of concrete. Ingår i "Self-desiccation and its importance in concrete technology". Editors: Persson, B. & Fagerlund, G. Avd byggnadsmaterial, LTH, Report TVBM-3075, 1997b.

Fagerlund, G. & Yang, Q. Moisture conditions in high performance concrete stored in water or salt solutions for 20 months. Avd byggnadsmaterial, LTH. Högpresterande Betong, Rapport M2:08, 1997 (Under publicering).

Gagné, R. & Marchand, J. La résistance à l´écaillage des BHP. Ingår i "Freeze-Thaw Durability of Concrete". E&FN Spon, 1997.

Hammer, T.A. & Sellevold, E.J. Frost resistance of high-strength concrete. Ingår i "High strength concrete. Second Int. Symposium". Ed. Hester, W.T.. ACI Spec. Publ. SP 121, 1990.

Helmuth, R.A. & Turk, D. H. Elastic moduli of hardened portland cement and tricalcium silicate pastes, effect of porosity. Ingår i "Symposium on the Structure of Portland Cement Paste and Concrete", HRB Spec. Report No 90, 1966.

Hilsdorf, H.K. & Guse, U. Frost- and deicing salt resistance of high strength concrete. Ingår i "Durability of high performance concrete", Proc of the Int. Workshop, Vienna, Febr. 14-15 , 1994, RILEM , Cachan, 1995.

Kjellsen, K. O. Salt-frost resistance of normal and heat cured high-performane concrete - Relation to pore structure. CBI. Högpresterande Betong, Rapport P4:5, 1995.

Kukko, H. Frost effects on high strength concrete without air-entrainment. Ingår i "Concrete under severe conditions", Editors: Sakai, K., Banthia, N., Gjørv, O.E., E&FN Spon, 1995.

Lagerblad, B. & Utkin, P. Silica granulates in concrete - dispersion and durability aspects. CBI Report 3.95, 1993.

Li, Y., Langan, B.W. & Ward, M.A. Freezing and thawing: Comparison between non-air-entrained and air-entrained high-strength concrete. ACI Spec. Publ. SP 149, 1994.

Lindmark, S. Saltfrostbeständighet och luftporstruktur hos högpresterande betong. Avd byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-5020, 1991.

Lindmark, S. Influence of testing conditions on salt scaling resistance of concrete. Avd byggnadsmaterial, LTH, Högpresterande Betong, Rapport M2:05, 1995.

Lindmark, S. A hypothesis on the mechanism of surface scaling due to combined salt-and frost attack. Avd byggnadsmaterial, LTH, Report TVBM-7104, 1996.

Malhotra, M.V., Painter, K.A. & Bilodeau, A. Mechanical properties and freezing and thawing resistance of high strength concrete incorporating silica fume. ASTM Cement, Concrete and Aggregates, Vol 9, No 2, 1987.

Malmström, K. Cementsortens inverkan på betongs frostbeständighet. SP-Rapport 1990:07; Statens Provningsanstalt, Borås, 1990.

Matala, S. Effects of carbonation on the pore structure of granulated blast furnace slag concrete. Helsinki University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Surveying, Concrete Technology, Report 6, 1995.

Modéer, M. Opublicerade kalorimeterförsök. Avd byggnadsmaterial, LTH, 1974.

Nordström, K.& Fagerlund, G. Mätningar av inre frostbeständigheten hos betong som lagrats under ca 18 månader i vatten eller 3% NaCl-lösning. Högpresterande Betong, Rapport M2:07, 1997 (Under publicering).

Okada, E., Hisaka, M., Kazama, Y. & Hattori, K. Freeze-thaw resistance of superplasticized concretes. Ingår i ACI Spec. Publ. No 68, 1981.

Petersson, P-E. The use of air-entraining and plasticizing admixtures for producing concrete with good salt-frost resistance. SP-Rapport 1989:37, Statens Provningsanstalt, Borås, 1989.

Petersson, P-E. Betongs saltfrostbeständighet - Fältförsök. Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, SP Rapport 1995:73, Borås, 1995.

Petersson, P-E. Reflections on salt scaling of concrete. Ingår i "Selected Research Studies from Scandinavia", Avd byggnadsmaterial, LTH, Report TVBM-3078, 1997.

Philleo, R. Frost susceptibility of high-strength concrete. Ingår i "Concrete Durability. Katharine and Bryant Mather International Conference". ACI Special Publication SP-100, 1986.

Popovics, S. Effect of porosity on the strength of concrete. J. of Materials, Vol 4, No 2, 1969.

Powers, T.C. The air-requirement of frost resistant concrete. Highway Research Board, Proceedings No 29, 1949.

Powers, T.C. & Helmuth, R.A. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing. Highway Research Board, Proceedings, No 32, 1953.

RILEM CDF Test - Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - test with sodium chloride solution (CDF). Recommendation. Materials and Structures, Vol 29, 1996.

Sellevold, E.J. & Bager, D.H. Low temperature calorimetry as a pore structure probe. Ingår i "7th International Congress on the Chemistry of Cement", Paris 1980. Editions Septima, Paris, 1981.

Sellevold, E.J., Bager, D.H., Klitgaard Jensen, E. & Knudsen, T. Silica fume cement pastes: Hydration and pore structure. Ingår i "Condensed silica fume in concrete". Institutt for Bygningsmateriallære NTH, Report BML 82.610, Trondheim, 1982.

Setzer, M. Muntlig information till RILEM-kommitté TC117-FDC, 1996.

Stark, J. & Ludwig, H-M. The influence of the type of cement on the freeze-thaw/freeze-deicing salt resistance of concrete. Ingår i "Concrete under Severe Conditions", Editors: Sakai, K., Banthia, N., Gjørv, O.E., E&FN Spon, 1995.

Stark, J. & Chelouah, N. Bauhaus-Universität Weimar, F.A. Finger Institut für Baustoffkunde, Manuskript, 1995.

Utgenannt, P. & Petersson, P-E. Influence of preconditioning on scaling resistance for different types of test surfaces. Ingår i "Frost resistance of concrete", Editors: Setzer, M. och Auberg, R. E&FN Spon, 1997.

Vesikari, E. The effect of ageing on the durability of concrete including by-products. Ingår i "Durable concrete with industrial by-products". Technical Research Centre of Finland, VTT, Symposium 89, Esbo, 1988.

Vuorinen, J. On use of dilation factor and degree of saturation in testing concrete for frost resistance. Nordisk Betong, No 1, 1970.

Vuorinen, J. On determination of effective degree of saturation of concrete. Intern rapport, Imatran Voima OY, Betong- och jordlaboratoriet, Uleåborg, 1973.

Zhang, M-H. och Gjørv, O.E. Effect of silica fume on pore structure and chloride diffusivity of low porosity cement pastes. Cement and Concrete Research, Vol 21, No 6, 1991.