

## 19.4 Frostangreb

Af Marianne Tange Hasholt



Figur 1. I Danmark bliver mange konstruktioner udsat for både frost og tøsalt om vinteren.

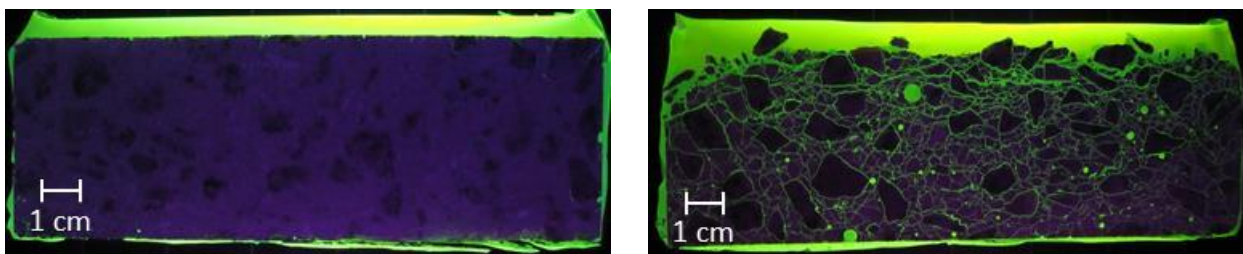
Hvis beton ikke er frostbestandig, kan et frostangreb føre til forskellige typer af skader:

- indre skader, hvor betonvolumenet revner
- ydre skader, hvor overfladen skaller af.

Nogle gange fremkalder frost begge typer af skader samtidigt. Andre gange vil den ene skadetype være dominerende. I alle tilfælde er vand en forudsætning for frostangreb, og jo højere grad af vandmætning af betons porer, jo større risiko for frostska-der. Erfaringen viser også, at saltvand medfører større risiko for frostska-der end ferskvand.

Figur 2 viser to betontværsnit. Begge betonprøver har været udsat for skiftevis frysning og optøning et antal gange. Herefter er betonen blevet imprægneret med fluoresce-rende epoxy, der lyser op under UV-lys. På den måde bliver revner og andre defekter synlige.

Det ses, at den ene prøve er gennemrevnet og overfladen er blevet ujævn pga. overfladeafskalning. Denne anden – frostbestandige - betonprøve har ikke taget skade i løbet af testen.



Figur 2. Epoxyimpregnerede tværsnit af beton, der har været udsat for gentagen frost/tø-påvirkning. Testfladen er overfladen øverst i billederne. Venstre: Frostbestandig beton. Højre: Beton, der ikke var frostbestandig.

Hvis der opstår revner inde i betonen, vil det reducere betonens styrke og derved forringe betonkonstruktionens bæreevne. Frostskeer kan derfor udgøre et sikkerhedsproblem.

Frostskeer kan også være et problem, selv om bæreevnen ikke reduceres. Frostskeer kan nemlig føre til kortere levetid for konstruktionen, dels fordi armeringens dæklag gradvist forsvinder pga. overfladeafskalning, og dels fordi revner gør det nemmere for skadelige stoffer at trænge ind i betonen. Således kan frostskeer accelerere både kloridindtrængning, se kapitel 19.3, og alkalireaktioner, se kapitel 19.1.

Selv hvis en begrænset overfladeafskalning ud fra et teknisk synspunkt er harmløs, kan mange bygningsejere finde, at skaderne skæmmer betonoverfladens udseende.

Dette kapitel i Betonhåndbogen omhandler udelukkende aspekter vedrørende frysning af hærdnet beton. Frysning af nyligt udstøbt beton er også et problem, selv om skadesbilledet er anderledes. Derfor kræver betonarbejde om vinteren grundig planlægning for at undgå, at beton udsættes for frost i tidlig alder. Der kan læses mere om dette i afsnit 9.4 Hærdestyring og i SBI-anvisningen Vinterstøbning af beton, se afsnit 19.4.5 Links.

#### 19.4.1 Hvordan frostskeer opstår

Når flydende vand fryser til is, udvider det sig ca. 9 %. Beton er i sin natur et porøst materiale, og hvis betonens porer er helt fyldte med vand, vil volumenforøgelsen sprænge betonen. Man kan beregne, at hvis betonens vandmætningsgrad er mindre end 91,7 % er der i princippet tilstrækkelig plads til volumenforøgelsen ved vandets frysning. Men også ved mætningsgrader, der er lavere end 91,7 %, kan der observeres frostskeer.

Årsagen til dette har givet forskerne hovedbrud i mange år. Der er endnu ikke en endelig afklaring af, hvad der sker i beton, der udsættes for frost og udvikler skader.

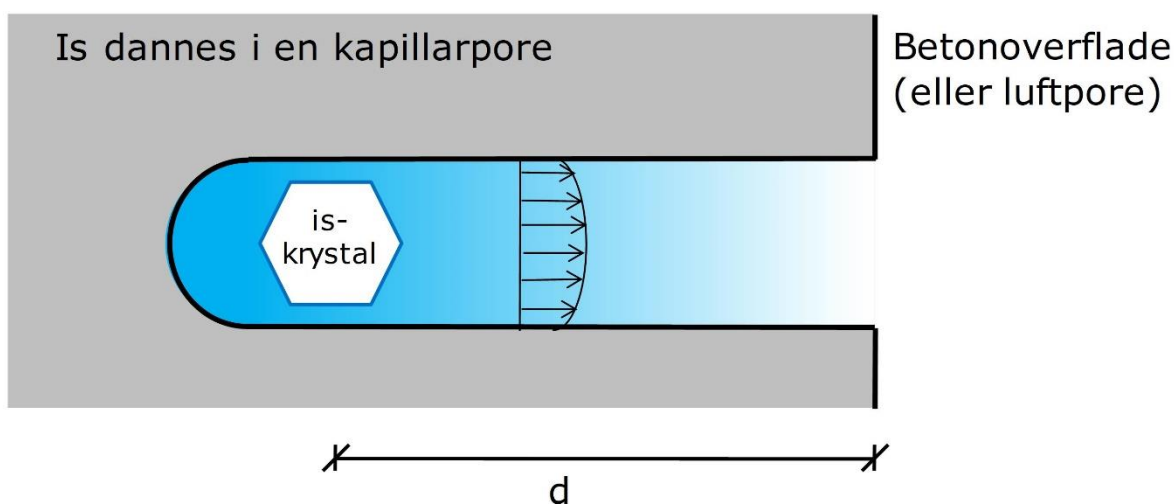
De nedenstående to teorier om henholdsvis **hydraulisk tryk** og **mikroskopisk islinsevækst** er de mest sandsynlige.

En brugbar teori skal ikke kun kunne forklare, at frostskafer kan udvikles i beton, hvor fugtmætningsgraden er mindre end 91,7 %. En brugbar teori skal også kunne forklare andre fænomener, som vi erfaringsmæssigt ved er rigtige:

- Frostbestandig beton skal have et "passende" lavt v/c-forhold. Et lavt v/c-forhold er en nødvendig betingelse, men det er som regel ikke en tilstrækkelig betingelse for at opnå frostbestandig beton. Andre faktorer som fx betonens luftporestruktur gør sig også gældende (se punkt b og c).
- En betonblanding bliver mere frostbestandig, hvis den indeholder luftporer. Luftporer er luftbobler, der i størrelse varierer fra få  $\mu\text{m}$  til få mm.
- For en given total mængde luft i betonen, giver mange små luftporer en bedre beskyttelse mod frostangreb end færre og grovere luftporer.
- Hvis betonens overflade er i kontakt med en vandig opløsning af et tømiddel som fx salt eller urea, resulterer det i mere overfladeafskalning under frysning, end hvis betonen er i kontakt med rent vand.
- En moderat koncentration af et tømiddel giver anledning til mere skade end både høje og lave koncentrationer. For et tømiddel som almindelig tøsalt (natriumklorid - NaCl) er den mest skadevoldende koncentration ca. 3 %, nogenlunde svarende til koncentrationen i verdenshavene.

#### 19.4.1.1 Hydraulisk tryk

Teorien om hydraulisk tryk beskriver en mekanisme, hvor dannelse af isen finder sted i betonens kapillarporer, dvs. porer, der er mindre end luftporerne. Når der først dannes en iskrystal i kapillarporen, sker der en lokal volumenforøgelse, og det vil fortrænge noget af det flydende vand rundt om iskrystallen, se figur 3. Betonens lave permeabilitet betyder, at der er modstand mod denne strømning, og derfor opstår der et hydraulisk tryk i væsken omkring iskrystallen. Det hydrauliske tryk forplanter sig til porevæggene, og hvis det bliver tilstrækkeligt stort, kan det ødelægge betonen.



Figur 3. Opbygning af et hydraulisk tryk, når der dannes is i en af betonens kapillarporer.

Teorien om hydraulisk tryk kan forklare en del af ovennævnte fænomener. I beton med lavt v/c-forhold er der mindre vand til stede, der kan fryse, og cementpastaens faststofstruktur er stærkere, så den bedre kan modstå det hydrauliske tryk (a). Væsken er stort set usammentrykkelig, men luften i luftporene er eftergivelig, så den fortrængte væske kan transporteres ud i luftporene, hvor det hydrauliske tryk udlignes (b). Størrelsen af det hydrauliske tryk afhænger af, hvor langt der er til en fri overflade, hvor der kan trykudlignes. Med mange, små luftporer bliver afstanden til en luftpore kortere, så mange små luftporer begrænser, hvor stort et hydraulisk tryk, der kan opbygges (c).

Teorien om hydraulisk tryk kan imidlertid ikke forklare, hvorfor salt og andre stoffer opløst i en væske udenfor betonen kan påvirke skadesudviklingen, da denne teori ikke indeholder noget om vekselvirkning med omgivelserne.

#### 19.4.1.2 Mikroskopisk islinsevækst

Teorien om mikroskopisk islinsevækst er inspireret af fænomenet frosthævning, der kendes fra geoteknikken, og som blev teoretisk beskrevet allerede i 1920'erne. Frosthævning skyldes, at (makroskopiske) islinser, der er dannet umiddelbart under jordoverfladen, kan tiltrække ufrosset vand fra dybereliggende jordlag. På den måde kan islinserne vokse sig så store, at de kan få jordoverfladen til at bule op og derved ødelægge fx en vejbane. Komprimeret jord og beton er begge porøse materialer, men betonens kapillarporer er meget mindre end jordens porøsiteter, og derfor tales der i beton om mikroskopisk islinsevækst.

Forklaringen på den potentielt skadelige islinsevækst hænger sammen med, hvordan faseovergangen fra flydende vand til is sker. Stoffer opløst i vand kan ændre på vandets frysepunkt, se faktaboks om frysepunktssænkning. Og selv om vandet bringes til en temperatur, der er lavere end frysepunktet, er det ikke sikkert, at det fryser momentant, se faktaboks om underafkøling.

##### **Frysepunktssænkning**

Frysepunktssænkning er en af de såkaldte kolligative egenskaber for en opløsning. Kolligative egenskaber er egenskaber, der ikke afhænger af hvilket specifikt stof, der er opløst, men derimod af hvor meget stof (målt i mol/l), der er opløst.

Når salte eller organiske forbindelser opløses i vand, ændres vandets tilstand, og derfor ændres frysepunktet også. Jo mere stof, der opløses, des lavere bliver frysepunktet.

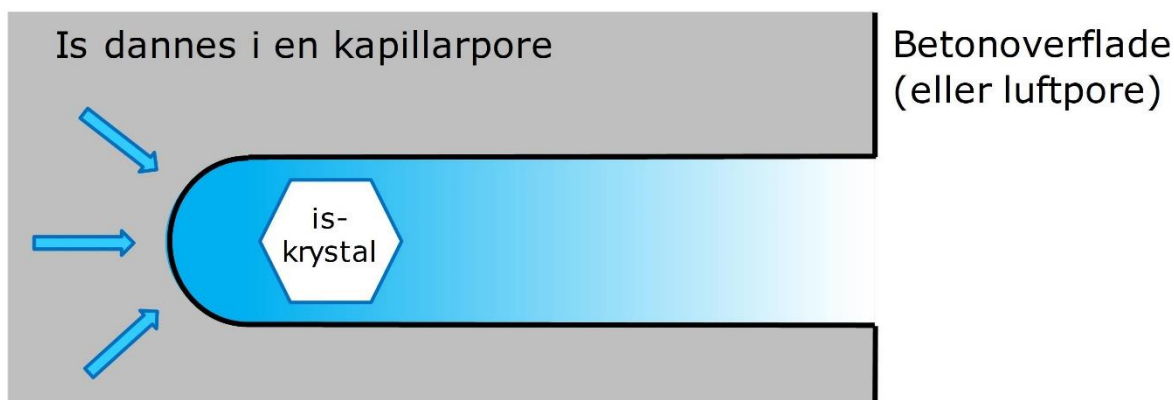
Havvand har et lavere frysepunkt end ferskvand, fordi havvandet indeholder opløst salt (primært NaCl). Vi udnytter frysepunktssænkningen aktivt, når vi salter vejene i frostvejr for at undgå at vejene bliver glatte af is. I Danmark er NaCl det mest udbredte tømiddel, fordi det er billigt og relativt ugiftigt for miljøet. Men man kunne i princippet anvende mange andre organiske eller uorganiske stoffer som tømidler, hvis blot de er tilstrækkeligt opløselige til, at de kan sænke frysepunktet så meget, som det danske klima kræver.

### Underafkøling

Når vand køles ned, kan temperaturen godt bringes nogle grader under frysepunktet, uden at det flydende vand omdannes til is. Vandet siges at være underafkølet. Underafkølingen skyldes – i en lidt populær udlægning – at selvom alle vandmolekylerne gerne vil danne is, så kan de ikke blive enige om, hvem der skal starte. Det kræver nemlig ekstra arbejde at etablere en ny krystal.

Situationen er ikke stabil. Selvom temperaturen er under frysepunktet, er frysepunktet ikke ændret. Jo mere temperaturen falder under frysepunktet, des større bliver sandsynligheden for at nogle vandmolekyler finder sammen og danner en iskrystal. Når først der er dannet en iskrystal, vil ufrosne vandmolekyler forsøge at slutte sig til den, og derfor kan krystallen tiltrække vand fra omgivelserne.

I betonsammenhæng betyder underafkølingen, at hvis der dannes en iskrystal i porevæsken i en kapillarpore, så vil den kunne tiltrække ufrossen – underafkølet - porevæske, der sikrer krystallens fortsatte vækst, se figur 4. Den voksende iskrystal vil presse på betonens porevægge, der til sidst kan bryde sammen.



Figur 4. Når en iskrystal dannes i en kapillarpore, vil den jf. teorien om mikroskopisk islinsevækst tiltrække vand og vokse sig større.

Der er en afgørende forskel på de to teorier om henholdsvis hydraulisk tryk og mikroskopisk islinsevækst: I førstnævnte fortrænges væske fra den zone, hvor isen dannes, mens der i sidstnævnte sker en tiltrækning af væske. Men på trods af forskellen kan teorien om mikroskopisk islinsevækst også forklare de fleste af de klassiske observationer.

Beton med et lavt v/c-forhold er mere tæt, og derfor foregår transport langsommere. Det vil lægge en dæmper på en iskrystals muligheder for vækst (a).

Betons porevæske er ikke rent vand; der er forskellige salte opløst i den. Hvis betonen er i kontakt med en væske, så vil isdannelse forløb afhænge af, om det er den ydre væske eller betonens porevæske, der har det laveste frysepunkt.

- Hvis betonen er i kontakt med rent vand, vil isdannelsen starte i den ydre væske, og is udenfor betonen kan trække noget af vandet ud af betonoverfladens porer. Dermed undgås frostskafer i betonens overflade (d).

- Hvis den ydre væske og porevæsken har nogenlunde samme frysepunkt, vil isdannelsen sandsynligvis starte i betonen, fordi der her er bedre kimdannelsesmuligheder. Iskrytaller i betonens overflade har mulighed for at tiltrække store mængder frysbar vand fra den ydre væske og dermed vokse meget, så der vil opstå alvorlige overfladeskader.
- Hvis den ydre væske har et frysepunkt, der er væsentligt lavere end porevæsken, vil der stadigvæk ske en isdannelse i betonoverfladen. Pga. den ydre væskes lave frysepunkt er den imidlertid ikke frysbar, og derfor vil den ikke tiltrækkes af iskrytallerne i betonoverfladen. Derfor bliver overfladeskaderne mindre end hvis porevæsken og den ydre væske har nogenlunde samme frysepunkt (e).

Ved mikroskopisk islinsevækst er luftporernes funktion ikke helt så indlysende som ved teorien om hydraulisk tryk. Følgende forklaring kræver en antagelse om, at den første isdannelse sker i overgangen mellem porevæske og luftpore. I så fald vil iskrytallen vokse ud i luftporen uden at trykke på betonens porevægge. Isdannelsen vil ikke brede sig ind i kapillarporen, for her vil isen blive udsat for tryk – og tryk sænker frysepunktet. Isen vil derfor altid vokse på den frie side.

Det er sandsynligt, at isdannelsen starter i overgangen mellem porevæske og luft, fordi vandmolekylerne i væskeoverfladen er struktureret lidt anderledes end i selve væsken. Endnu mangler der dog det endelige bevis for, at det er det, der sker. Men hvis antagelsen er korrekt, så kan den også forklare, hvorfor mange små luftporer giver bedre beskyttelse mod frostangreb end en tilsvarende mængde luft samlet i få, større porer. Mange små luftporer giver den største sandsynlighed for, at alle kapillarporerne er forbundet med luftporer (b-c).

## **19.4.2 Frostbestandig beton**

### **19.4.2.1 Miljøpåvirkning**

I Danmark er det i praksis kun beton i indendørs konstruktioner, der ikke udsættes for frost. Og selv for beton, der i den færdige bygning er placeret inden døre, skal det overvejes, om betonen i byggeperioden udsættes for vandpåvirkning og efterfølgende frysning i et sådant omfang, at det er nødvendigt at stille krav til betonens frostbestandighed.

I DS/EN 206 er der 4 eksponeringsklasser relateret til frostangreb: XF1-XF4. I Danmark blev der tidligere anvendt 4 miljøklasser: P, M, A og E. Disse miljøklasser er udgået, men svarer stort set til miljøpåvirkningerne med samme benævnelse. Tabel 1 beskriver eksponeringsklasser og miljøpåvirkninger.

Tabel 1. Eksponeringsklasser vedrørende frostpåvirkning.

Eksponeringsklasse i henhold til DS/EN 206	Benævnelse jf. DS/EN 206	Informativ beskrivelse af eksponeringsklassen fra DS/EN 206 DK NA Informative eksempler på, hvor eksponeringsklasser kan forekomme under danske klima- og miljøpåvirkninger er angivet i DS/EN 206 DK NA, Tabel DK NA-1
Moderat vandmætning, uden tøsalt <sup>1)</sup>	XF1	Moderat miljøpåvirkning, dvs. vertikale betonoverflader udsat for regn og frost
Moderat vandmætning, med tøsalt <sup>1)</sup>	XF2	Aggressiv miljøpåvirkning, dvs. vertikale betonoverflader udsat for frost og luftbåren tøsalt <sup>1)</sup>
Høj vandmætning, uden tøsalt <sup>1)</sup>	XF3	Aggressiv miljøpåvirkning, dvs. horisontale betonoverflader udsat for regn og frost
Høj vandmætning, med tøsalt <sup>1)</sup> eller Havvand	XF4	Ekstra aggressiv miljøpåvirkning, dvs. beton udsat for vand, frost og chlorider

Note 1) I DS/EN 206 DK NA er ordet "de-icing agent" fra DS/EN 206 oversat til tøsalt. I Danmark anvendes ofte NaCl som tøsalt, hvorfor der tilføres betonoverfladen chlorider, men der findes "de-icing agents" som fx urea, der ikke er salte, ikke tilfører chlorider og som er lige så problematiske med hensyn til frostskaader som NaCl.

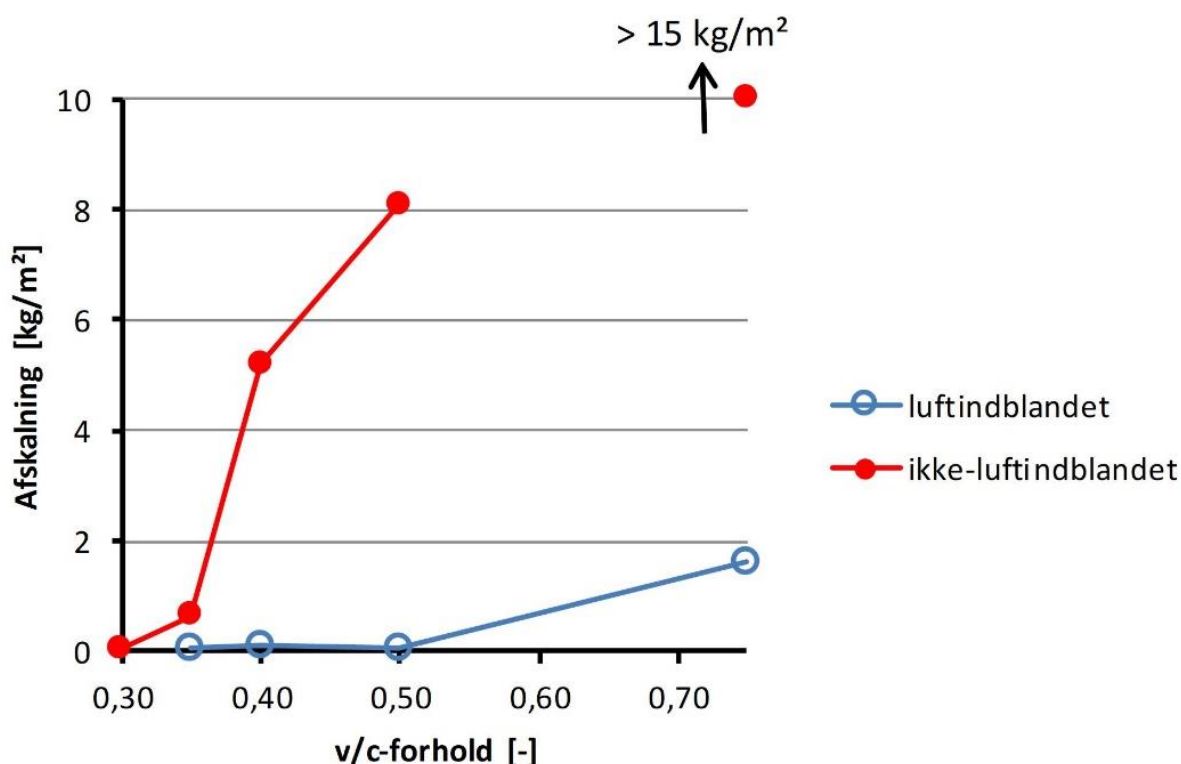
Både miljøpåvirkninger og eksponeringsklasser benyttes til at angive, hvor hårdt en given konstruktionsdel er belastet. Det ses, at en vandret (horisontal) betonoverflade er mere udsat for frostangreb end en lodret betonoverflade. Det skyldes, at på den lodrette betonoverflade kan regnvand løbe af, mens vand kan samle sig på den vandrette betonoverflade og langsomt sive ned i betonen. Den vandrette betonoverflade vil således indeholde mere vand, og derfor er der større risiko for, at et frostangreb resulterer i frostskaader. Tilsvarende giver et miljø, hvor betonen udsættes for tøsalt eller havvand, større risiko for at der opstår frostskaader, end hvis betonen kun udsættes for rent vand, jf. afsnit 9.4.1 om skadesmekanismer.

Når belastningen er klassificeret vha. miljøpåvirkninger eller eksponeringsklasser, kan det omsættes til krav til betonens frostbestandighed. Kravene er skrappe, jo mere aggressiv belastningen er.

#### 9.4.2.2 *Delmaterialer og betonsammensætning*

Beton kan betragtes som et kompositmateriale bestående af tilslag (sand og sten) bundet sammen af den hærdnede cementpasta. Både tilslag og cementpasta skal hver for sig være frostbestandige for at betonen er frostbestandig. Tilslags frostbestandighed er beskrevet i afsnit 3.2 Tilslag.

De vigtigste forudsætninger for cementpastaens frostbestandighed er et lavt v/c-forhold og en god luftporestruktur, se figur 5. Jo lavere afskalningen er, des bedre er betonens frostbestandighed.



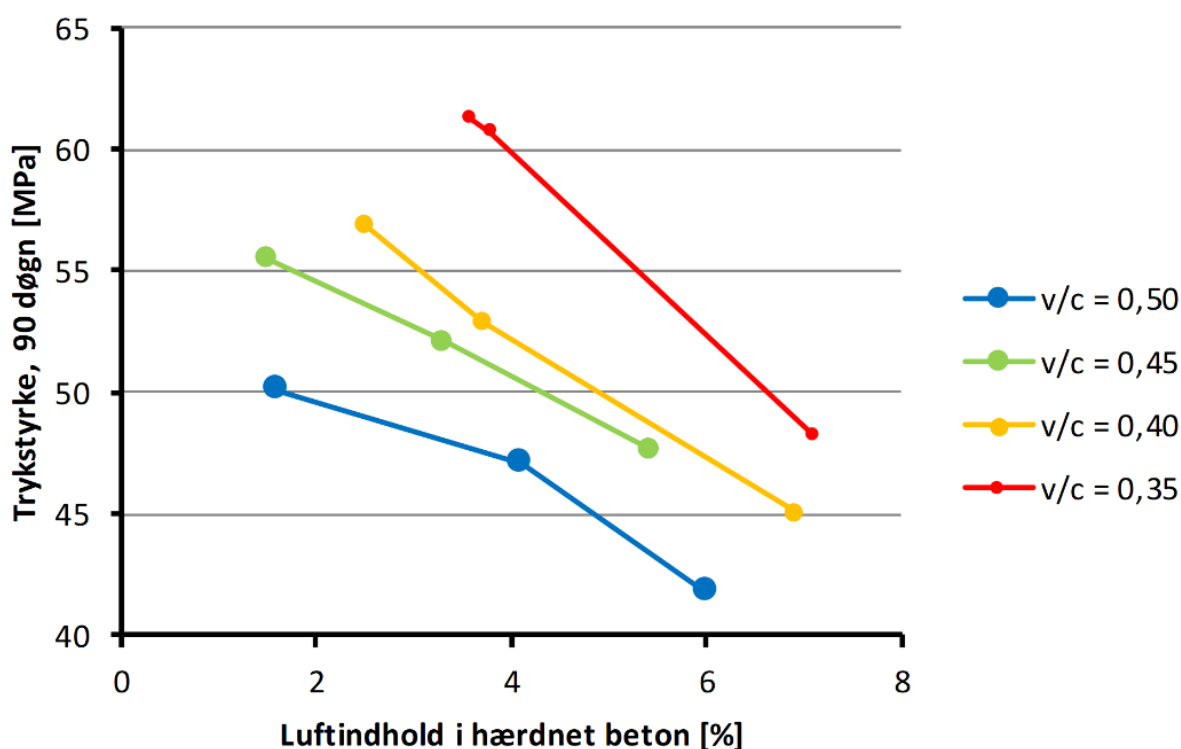
Figur 5. Afskalning efter accelereret frost/tø-test for beton med forskellige v/c-forhold [3]. Testen er en såkaldt Borås-test efter SS 137244, se afsnit 1.3.2. Bemærk at et lavt v/c-forhold ikke i sig selv sikrer mod frostskeer – betonen skal også være luftindblandet.

For at skabe en luftporestruktur med mange små luftporer, tilsættes et såkaldt luftindblandingsmiddel, når betonen blandes. Luftindblandingsmidlet stabiliserer luftporerne, så luften ikke går i opløsning, og de enkelte luftporer ikke smelter sammen – virkemåden minder om den måde, sulfo stabiliserer opvaskeskum. Det er svært at angive en præcis dosering, fordi virkningen af luftindblandingsmidlet afhænger af mange faktorer. Eksempelvis kan rest-kul i flyveaske nedsætte luftindblandingsmidlets virkning, og hvis luftindblandingsmidlet anvendes sammen med andre tilsætningsstoffer, fx superplastificerende tilsætningsstoffer, kan de forskellige tilsætningsstoffer påvirke hinanden. Du kan læse mere om luftindblandingsmidler og tilsætningsstoffer i afsnit 3.4.

Man kunne måske fristes til at overdosere luftindblandingsmidlet for at være på den sikre side. Men det har den uheldige bivirkning, at betonen vil få et højt luftindhold, og det reducerer betonens styrke, se figur 6. Som tommelfingerregel nedsætter hver % ekstra luft betonens trykstyrke med 5 %.

Man skal tænke på, at mængden af tilslag udgør omkring 70 % af betonvolumenet. Da betonens luftindhold alene befinder sig i cementpastaen – og ikke i tilslaget – vil et luftindhold på fx 5 % af betonen betyde et luftindhold på  $5\% \cdot (100/30) = 17\%$  af cementpastaen, mens et luftindhold i betonen på fx 8 % tilsvarende giver et luftindhold i cementpastaen på 27 %. Dette har selvfølgelig betydning for styrken af cementpastaen og dermed styrken af betonen.





Figur 6. Trykstyrke som funktion af luftindhold for betonblandinger med forskellige v/c-forhold [4].

Frostbestandig beton består altså af tilslag, der er frostbestandige i den relevante eksponeringsklasse, og blandingsforholdene skal være afstemte (lavt v/c-forhold og tilstrækkeligt med luftindblandingsmiddel). Den sidste ingrediens i frostbestandig beton er "det gode håndværk". Selv om denne del er sværere at definere, er den ikke mindre betydningsfuld. Det hjælper ikke meget, at betonen har det korrekte blandingsforhold og luftindhold, når den forlader betonfabrikken, hvis luftindholdet ændres under transport eller pumpning, eller hvis al luften vibreres ud på byggepladsen, når betonen placeres i formen. Ligeledes kan beton miste frostbestandigheden, hvis mangelfuld udtøringsbeskyttelse i tidlig alder fører til dårlig overfladekvalitet.

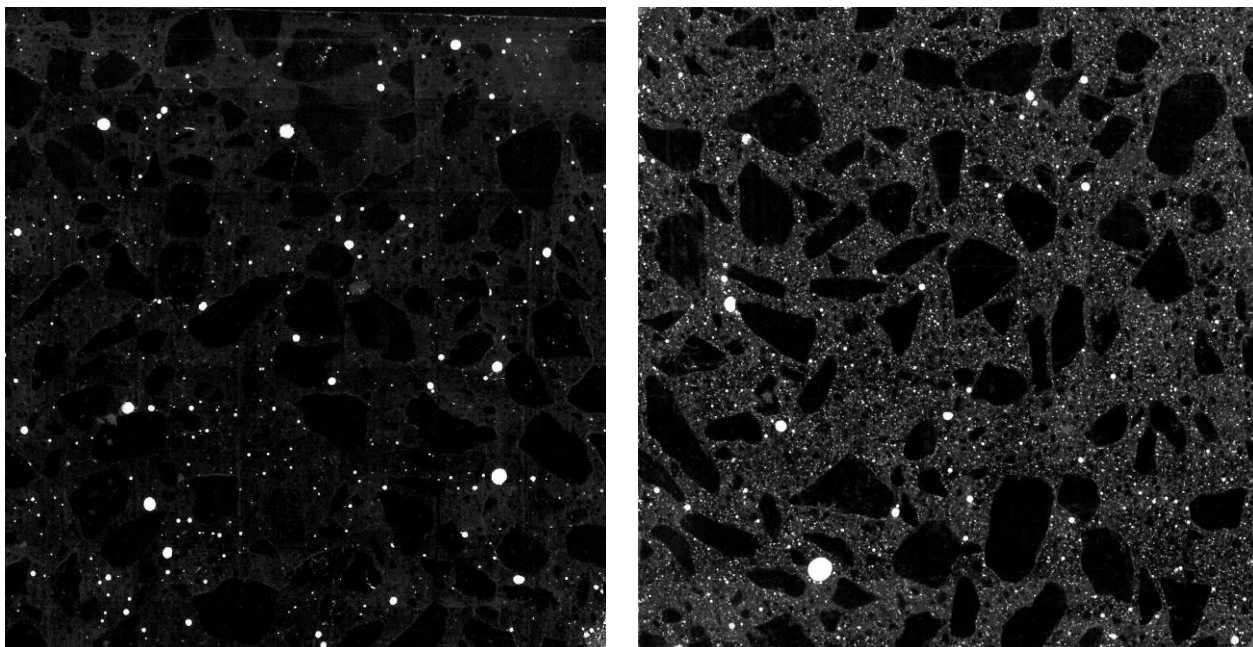
### 19.4.3 Prøvning

I Danmark skal beton, der udsættes for frost, være luftindblandet (undtagen jordfugtig beton), samt opfylde krav til betonens sammensætning og krav stillet til tilslagets kvalitet. Derudover skal betonens frostbestandighed dokumenteres ved forprøvning af en ny betonblanding og i den løbende kvalitetskontrol. I følge DS/EN 206 DK NA skal dette ske enten ved at måle luftindholdet i den friske beton og gennemføre en analyse af betonens luftporestruktur (afsnit 19.4.3.1) eller ved en accelereret frost/tø-test (afsnit 19.4.3.2).

#### 19.4.3.1 Luftporeanalyse (hærdnet beton)

Som nævnt tidligere, er det vigtigt at kunne kvantificere hvor meget luft, der er blandet i en beton, og om luftporerne er små eller store. Prøvningsmetoden, der er standardiseret i DS/EN 480-11, udføres på følgende måde:

Betonen gennemskæres, og den savede flade poleres, så den bliver helt plan. Luftporene er nu fordybninger i den plane flade. Først farves fladen sort, og derefter presses hvidt pulver ned i luftporene (overskydende pulver fjernes). På den måde kommer luftporene til at fremstå hvide på en mørk baggrund, se eksempler i figur 7:



Figur 7. Eksempler på betonoverflader, der er forberedt til luftporeanalyse. Venstre: Beton uden luftindblandingsmiddel, hvor luftporene er få og relativt grove. Højre: Beton med luftindblandingsmiddel, hvor der er et meget stort antal fine luftporer i pastaen (mens områder af tilslagspartikler er helt sorte). I begge tilfælde er det viste prøveudsnit ca. 100 x 100 mm.

Registreringen af luftporestrukturen kan udføres manuelt under mikroskop, men kontrasten mellem de hvide luftporer og den mørke flade gør det også muligt at udføre analysen vha. digital billedbehandling. Ved analysen måles:

- Det totale luftindhold  $A$  [% af betonvolumen]
- Luftporernes specifikke overflade  $S$  [ $\text{mm}^{-1}$ ]

Luftporernes specifikke overfladeareal er defineret som deres overfladeareal [ $\text{mm}^2$ ] i forhold til deres volumen [ $\text{mm}^3$ ]. Dette afhænger af den gennemsnitlige størrelse, idet den specifikke overflade er stor for små luftporer og omvendt. Da den specifikke overflade således er et mål for luftporernes gennemsnitlige størrelse, kan den bruges til at udregne den såkaldte afstandsfaktor  $L$ . Afstandsfaktoren indikerer hvor langt der højst kan være fra et punkt i betonens pasta til overfladen af en luftpore. Afstandsfaktoren udregnes på følgende måde for en beton, der har pastaindholdet  $p$  [% af betonvolumen]:

$$L = \begin{cases} \frac{p}{A} \cdot \frac{1}{S} & \text{for } \frac{p}{A} < 4,342 \\ \frac{3}{S} \left( 1,4 \left( \frac{p}{A} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right) & \text{for } \frac{p}{A} \geq 4,342 \end{cases}$$

For frostbestandig beton kræves det typisk, at afstands faktoren skal være mindre end 0,20 mm. Det er fx det krav, der stilles i DS/EN 206 DK NA [2], hvis frostbestandigheden dokumenteres vha. luftporeanalyse.

#### 19.4.3.2 Accelereret frost/tø-prøvning

Den accelererede frost/tø-prøvning er en funktionsprøvning, hvor betonen udsættes for et standardiseret frostangreb. I Danmark benyttes den svenske standard SS 137244 (fx i DS/EN 206 DK NA) eller referencemetoden i CEN/TS 12390-9 til denne type prøvning. De to metoder er stort set ens. Ved forberedelsen til testen forsynes prøveemnet af beton med en gummimanchet, der rager lidt op over prøveemnet, se figur 8.



Figur 8. 50 mm skive af betoncylinder forsynet med gummimanchet og klar til funktionsprøvning i henhold til SS 137244 eller CEN/TS 12390-9.

Ved hjælp af gummimanchetten er det muligt at etablere et væskeresevoir på prøveemnets overside, der benyttes som testflade. Når betonen er 28 dage gammel, hældes der først rent vand i reservoiret, så betonoverfladen kapillarmættes. Efter 3 dage udskiftes vandet med en saltopløsning (3 % NaCl), og prøveemnet sættes i et frostskaab. I frostskaabet fryses betonen ned til -20 °C og tøs efterfølgende op til +20 °C i løbet af en 24 timers cyklus. Cyklussen gentages normalt i alt 56 gange (dvs. selve frost/tøeksponeringen tager 8 uger).

Prøvningen kan også gennemføres med ferskvand, hvis betonen kun skal være frostbestandig i ferskvand. Især med saltvand vil der kunne opstå frostskaader i form af over-

fladeafskalning, hvis betonen ikke er frostbestandig. Afskallet materiale opsamles løbende, og den samlede afskalning [ $\text{kg}/\text{m}^2$  testflade] benyttes til at evaluere betonens frostbestandighed.

### **19.4.3.3 Luftporeanalyse vs. accelereret frost/tø-prøvning**

Luftporeanalysen kan påbegyndes, når betonen har tilstrækkeligt styrke til at den kan skæres og poleres, uden der fx rives sandkorn ud af overfladen (dvs. typisk 1 uge efter støbning). Herefter tager prøvepræparering og opmåling nogle få dage. For den accelererede frost/tø-test foreligger resultatet først ca. 3 måneder efter støbningen. Derfor er luftporeanalysen i de fleste tilfælde den foretrukne dokumentationsform. Men hvis betonens frostbestandighed ikke kan godkendes på baggrund af resultatet fra en luftporeanalyse, kan den accelererede frost/tø-test nogle gange vise, at frostbestandigheden alligevel er god nok. Den accelererede frost/tø-test finder også anvendelse i forskningssammenhænge.

### **19.4.3.4 Fremtidens prøvning**

Hverken luftporeanalysen eller den accelererede frost/tø-test er særligt nuancerede, og der stilles de samme krav til prøvningsresultat for både eksponeringsklasse XF2, XF3 og XF4. På den måde bliver spørgsmålet om frostbestandighed ofte til et absolut "enten er betonen frostbestandig, eller også er den det ikke". Men i virkeligheden er det ikke helt så sort/hvidt. Beton kan godt være frostbestandig under nogle eksponeringsforhold, selv om den ikke er det under andre. Det er derfor en udfordring, at laboratorieforsøgene ikke kan afspejle en konkret situation og afgøre, om betonen i det specifikke tilfælde vil være frostbestandig.

Acceptkriterierne for testresultater fra de forskellige prøvningsmetoder er baseret på erfaring. Der er foretaget feltforsøg, hvor beton fra samme blandinger er testet både i laboratoriet efter standarden og i felten, hvor den fx er blevet eksponeret i marint miljø i 10 år eller mere. Efter et antal år har man evalueret hvilke blandinger, der i det givne miljø har vist tilfredsstillende frostbestandighed, og så har man kigget tilbage på resultaterne fra de standardiserede laboratorieforsøg for at sætte en grænse, der kan skille frostbestandig beton fra ikke-frostbestandig beton. Acceptkriterierne kan benyttes, når der testes beton, der ligner den, man har baseret sine erfaringer på. Men kan man fx anvende de samme acceptkriterier til beton med et højt flyveaskeindhold, hvis man i de feltforsøg, som man benyttede til at fastsætte acceptkriterierne, slet ikke havde beton med flyveaske med i forsøgsserien? Dette er en hæmsko for at introducere nye betontyper og optimere kendte betontyper, så de fx får en grønnere miljøprofil. Vi kan i sagens natur ikke have årelang erfaring med nye betontyper og derfor er det svært at opstille præcise acceptkriterier.

Fremtidsvisionen må derfor være at udvikle en frostprøvningsmetode, der er funktionsbaseret, så den kan vise, om en given betontype kan modstå et nærmere defineret frostangreb eller ej. Måske bliver fremtidens prøvning endda virtuel, så man "blander" betonen på computeren, simulerer et hydratiseringsforløb, hvor betonen udvikler styrke- og transportegenskaber, og til sidst udsætter den hærdnede beton for en hård, virtuel vinter på computeren. Forståelsen af frostskeer er dog ikke entydig – se afsnit

19.4.1, så dette kan ikke lade sig gøre endnu, men noget lignende kan lade sig gøre på andre områder inden for betonbyggeriet. Når konstruktionsingeniøren skal vurdere bæreevnen af en bro, så starter han/hun ikke med at bygge en bro i mindre skala for dernæst fysisk at påføre belastning. Han/hun starter med at lægge geometrien ind i en computermodel, definere materialeegenskaber, og så teste forskellige lastkombinationer i modellen. På frostområdet er det dog nødvendigt, at der først opnås en bedre forståelse af de mekanismer, der fører til frostskader, for at kunne etablere retvisende computermodeller.

#### 19.4.4 Referencer

- [1] DS/EN 206: Beton – Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse, Dansk Standard.
- [2] DS/EN 206 DK NA: Beton – Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse - Regler for anvendelse af EN 206 i Danmark, Dansk Standard.
- [3] Utgenannt, Peter. (2004): *The influence of ageing on the salt-frost resistance of concrete*, Doktorafhandling (report TVBM-1021), Division of Building Materials, Lund University.
- [4] Pinto, Roberto, og Hover, Kenneth C. (2001): *Frost and scaling resistance of high-strength concrete*, Research and Development Bulletin RD112, Chicago, Portland Cement Association.

#### 19.4.5 Links

Hvis du vil vide mere:

- Frysepunktssænkning mv.:

Faseovergange, herunder den vigtige faseovergang fra flydende vand til is, hører videnskabeligt hjemme i den fysiske kemi (også kaldet termodynamik). På dansk findes en udmærket gennemgang med mange praktiske eksempler i:

Hansen, P. Freiesleben (1995): *Materialefysik for bygningsingeniører*, SBI-anvisning 183, Hørsholm, Statens Byggeforskningsinstitut (kan downloades på [www.danskybyggeskik.dk](http://www.danskybyggeskik.dk))

- De fysiske aspekter af isdannelse i beton (trykbygning mv.):

Naturlovene bliver ikke forældede. I 1991 gennemgik Hans Henrik Bache fysikken ved isdannelse i beton (formler mv.) i to artikler i bladet "Dansk Beton", og disse fysiske betragtninger gælder stadigvæk.

- *Beton* – *Frost* – *Fysik/1*, Dansk Beton nr. 2-1991
  - *Beton* – *Frost* – *Fysik/2*, Dansk Beton nr. 3-1991
- (kan downloades på [www.danskbeton.dk/magasinet-beton/udgivelser/](http://www.danskbeton.dk/magasinet-beton/udgivelser/))

- Frysning af beton i tidlig alder:

Se Hansen, Per Freiesleben, og Pedersen, Erik Jørgen (1982): *Vinterstøbning af beton*, SBI-anvisning 125, Hørsholm, Statens Byggeforskningsinstitut (kan downloades på [www.danskbyggeskik.dk](http://www.danskbyggeskik.dk).)