LUND UNIVERSITY

Studier av samband mellan betongs luftporsystem och dess saltfrostbeständighet : SBUF-projekt 9010

Lindmark, Sture

2000

Link to publication

Citation for published version (APA):
Lindmark, S. (2000). *Studier av samband mellan betongs luftporsystem och dess saltfrostbeständighet : SBUF-projekt 9010*. (Rapport TVBM; Vol. 3089). 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

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET

Avd Byggnadsmaterial

STUDIER AV SAMBAND MELLAN BETONGS LUFT-PORSYSTEM OCH DESS SALTFROSTBESTÄNDIGHET

SBUF-projekt 9010

Sture Lindmark

TVBM-3089 Lund, 2000

ISRN: LUTVDG/TVBM--00/3089--SE (1-51)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118

221 00 LUND

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se

SAMMANFATTNING

Som ett första led i att utveckla en metod för entreprenören att tidigt efter gjutning skaffa sig en uppfattning om huruvida den gjutna betongen kan komma att underkännas i den senare saltfrysprovningen, har sambandet mellan betongs luftporsystem och dess saltfrostbeständighet studerats. Totalt testades 58 betonger, varav 39 hade vct 0.40 och 19 hade vct 0.50.

Analysen av luftporsystemen gjordes dels med bildanalys och beräkning av porstorleksfördelningar baserad på en inmätning av tvådimensionella objekt, dels med mätning med linjär travers och beräkning av specifik yta och lufthalt enligt ASTM C457. Den senare mätningen utfördes vid Dansk Beton Teknik A/S, Köpenhamn.

Saltfrysprovningen gjordes genom att cirkulära provkroppar med diameter 94 mm och höjd 27 mm sänktes ned i 3% NaCl lösning och frystes en gång per dygn. 28 fryscykler genomfördes.

Försöken kompletterades med kapillärsugningsförsök i syfte att studera sambandet mellan fuktupptagning efter den s.k. knickpunkten och materialets saltfrostbeständighet.

Resultaten visar bättre samband mellan luftporsystemets olika parametrar och avskalningen för betongen med vct 0.40 än för den med vct 0.50.

De traditionella sätten att utvärdera försök av denna typ (genom att studera avskalning som funktion av nominell lufthalt, specifik yta eller avståndsfaktor) ger dåliga samband.

Bättre samband erhålls om man studerar avskalningarnas beroende av två av dessa parametrar samtidigt, t.ex. lufthalt och specifik yta (figur 29). En ekvation med vilken man utifrån dessa parametrar kan bedöma luftporsystemets kvalitet har givits (ekvation 25). Eftersom det inte finns något acceptanskriterium för den använda frystestmetoden, kan dock ännu inga exakta gränsdragningar göras. Ekvationen bör dock enkelt kunna anpassas till SS 13 72 44.

Bättre samband kan också erhållas om man istället för att jämföra avskalningarna med den totala lufthalten istället jämför dem med luftinnehållet i luftbubblor inom ett visst storleksintervall, t.ex. $250<D<750\mu m$ (figur 38).

Då lufthalten anges som den andel av totala traverslängden som utgörs av kordor kortare än 350 µm, erhålls, för vct 0.40, ett bra samband mellan lufthalt och slutgiltig avskalning. För betongen med vct 0.50 är sambandet dock inte användbart.

Fuktupptagningshastigheten efter knickpunkten har befunnits öka med ökande mantelyta hos luftporsystemet. Detta förefaller rimligt, eftersom en stor mantelyta kan vara orsakad dels av att luftporsystemet består av ett stort antal luftporer, dels av att luftporerna är små, vilket i bägge fallen teoretiskt skall leda till snabb upptagning av fukt i porsystemet. Detta resultat visar att det inte är önskvärt att åstadkomma luftporsystem med en hög andel mycket små luftbubblor, eftersom dessa ändå kommer att vattenfyllas så snabbt att de inte kan ha någon skyddande funktion.

I analysen av luftporsystemen har också införts några tekniker för att på matematisk väg reducera de fel som orsakas av att bildfältet är litet i förhållande till de större objekten.

I ett fortsatt arbete med utvecklingen av en metod för tidig bedömning av en betongs möjlighhet att klara ett saltfrosttest enligt 13 72 44, bör man i första hand inrikta sig på de två samband som nämndes ovan (ekvation 25 och bubblor med 250<luftpordiametern<750 µm).

ABSTRACT

The work presented in this report constitutes a first attempt to develop an "early-warning" method, intended to offer the contractor an opportunity to check, a day or two after casting, the quality of the concrete with respect to salt frost scaling resistance.

For this purpose, 58 concretes of varying air void structures were cast and tested for salt frost scaling. 39 of the concretes had w/c ratio 0.40 and 19 had w/c ratio 0.50.

The salt frost scaling resistance was tested by freezing the specimens, submerged in a 3% b.w. NaCl solution, to –20°C once a day for 28 days. The air void structures were determined by plane section analysis, using both the linear traverse technique, and a calculation of the 3D size distribution based on the size distribution of the "2D objects" on the plane section sample. Furthermore, tests on capillary suction were carried out and the relation between rate of moisture uptake and air void structure was studied.

Generally, the relations between the air void structure parameters and the salt frost scaling results were more distinct for the w/c ratio 0.40 concretes than for those of w/c ratio 0.50. However, in both cases, none of the traditional parameters (total air content, Powers' spacing factor, and specific surface of the voids), taken one by one, produced any distinct relation to the salt frost scaling results.

More pronounced relationships were found when relating the salt frost scaling results to two of these parameters at the same time (*e.g.* total air content and specific surface, fig. 29). An example of an equation suitable for such a comparison is given (eq. 25). It should be possible to fit this equation to the standard test procedure SS 13 72 44, or any similar one.

An improved relation between the air void system characteristics and the salt frost scaling result may also be obtained by comparing the total air content in bubbles of diameter $250<D<750\mu m$ to the scaling results.

The rate of moisture uptake at levels of moisture content higher than the "knick-point" was found to increase with an increasing total surface of the air voids. This indicates that an ideal air void system must not consist of too small bubbles, since too small bubbles will be filled to too high an extent much more rapidly than larger bubbles.

INNEHÅLL

Förord 6
Bakgrund och Strategi 7
Allmänt om betongs luftporsystem 7
Metoder 11
Frystestmetod 11
Kapillärsugningsförsök 11
Betongmaterial 12
Bildanalys 14
Resultat 24
Materialegenskaper 24
Allmänt om avskalningarna 26
Porsystem 28
Kapillärsugningsförsök 29
Diskussion 31
Slutsatser 49

FÖRORD

Detta projekt har utförts på uppdrag från Skanska AB och Vägverket med finansiering från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF (projektnummer 9010). Skanskas representant har varit adjungerade professor Kyösti Tuutti och Vägverkets representant har varit Dr. Katarina Kieksi.

Ingenjör Bo Johansson har utfört betongtillverkning och den omfattande saltfrysprovningen. Ingenjör Bengt Nilsson har utfört mikroskopidelen av bildanalysarbetet.

Civilingenjör Peter Laugesen vid Dansk Beton Teknik A/S (DBT) i Köpenhamn har varit oss till ovärderlig hjälp när det gäller konsten att preparera prover för bildanalys och även med detaljer i provningsstandarden ASTM C457. Jag har också fått värdefull hjälp av Dr. Mette Geiker vid Danmarks Tekniska Högskola med bakgrundsmaterial och information om danska undersökningar inom området betongs luftporsystem.

Professor Göran Fagerlund har haft en helt avgörande betydelse både för projektets tillkomst och för flera idéer till hur luftporsystemen skall analyseras.

De tillsatsmedel som använts i denna studie har tillhandahållits av Perstorp AB, Cementa AB och Svenska SIKA AB.

Till samtliga vill jag rikta ett varmt tack!

Lund i mars 2000

Sture Lindmark

BAKGRUND: ENTREPRENÖRENS BEHOV AV EGEN KVALITETSKONTROLL

För betongkonstruktioner på vilka det ställs krav på betongens saltfrostbeständighet kontrolleras denna normalt genom saltfrysprovning av utborrade kärnor. Detta gäller t.ex. broar, väg- och flygfältsbeläggningar, kajer och andra anläggningar i marin miljö. Flertalet av dessa konstruktioner omfattas av Bronormen i vilken det ställs krav på saltfrostbeständighet hos färdig konstruktion. Provning sker med den normerade provningsmetoden SS 13 72 44 ("Boråsmetoden"). Svar erhålls tidigast 3 månader efter det att konstruktionen göts, eftersom det först krävs 1 månads tid för härdning av provmaterialet och sedan 2 månaders frysprovning. Om betongen innehåller silikastoft utökas provningstiden till 4 månader, dvs. total tid fram till att den gjutna betongen är kontrollerad uppgår i detta fall till 5 månader.

Under denna tid fortsätter byggnationen utan att man vet huruvida den gjutna betongen uppfyller beständighetskraven. Möjligheten att i efterhand åtgärda betong med bristande beständighet är i regel mycket begränsad. Under alla förhållanden blir entreprenörens kostnader för reparationer, byte av undermålig betong eller för värdeminskningsavdrag mycket höga.

Det vore därför användbart, i första hand för entreprenörer men även för beställare, om man kunde utveckla en testmetod så att man i ett mycket tidigt skede kan få en *varning* om att den gjutna betongen eventuellt inte fyller kraven. Åtgärder kan då vidtas omedelbart och inbyggnation av stora volymer undermålig betong kan undvikas.

Avsikten med detta projekt har varit att för detta ändamål försöka utveckla en metod baserad på studier av betongens luftporsystem. Luftporsystemet är lämpligt att studera eftersom detta, till skillnad från själva cementpastan, redan något dygn efter gjutning har de egenskaper det kommer att ha vid den egentliga provningen vid 28 dygns ålder.

Syftet med projektet har alltså varit att lägga grunden till en metod som gör det möjligt för entreprenören att i ett tidigt skede på ett så säkert sätt som möjligt avgöra om den gjutna betongen kommer att godkännas vid saltfrysprovning.

Bristande saltfrostbeständighet behöver inte bero enbart på att luftporsystemet är undermåligt. Det kan istället vara brister i blandningsförfarandet (kan leda till att vct, och därmed storleksfördelningen av mikroporerna, varierar) eller olämplig gjutning och vibrering (kan leda till separationszoner med varierat vct och/eller bildning av fickor som lätt vattenfylls och lätt transporterar stora mängder vatten som följd). Detta kan studeras i ett eventuellt fortsättningsprojekt.

Strategi – Sambandet mellan saltfrostbeständighet och luftporsystemet

Det kan finnas flera olika sätt att utforma lämpliga metoder för att få fram en tidig varning om att betongen inte kommer att klara den senare saltfrysprovningen. T.ex. kan man studera cementpastafasens homogenitet med hjälp av impregnering av fluorescerande epoxi och UV-ljus. Just en sådan metod ger dock bara ett kvalitativt svar. I denna studie har vi valt att söka samband mellan betongens luftporsystem och dess saltfrostbeständighet av det enkla skälet att just luftporsystemet redan då betongen styvnar har samma egenskaper som det kommer att ha vid den efterföljande saltfrysprovningen (till skillnad från alla potentiella testmetoder som grundar sig på mikrostrukturens egenskaper, vilka kan fortsätta förändras ända fram till frysprovningen i takt med att hydratationen fortskrider).

ALLMÄNT OM BETONGS LUFTPORSYSTEM

Betongens totala porositet utgörs av flera typer av porer; *Cementpastans porer*, vilkas vidd ligger i området 1-1000 nm, samt luftporer och kompaktionsporer. *Kompaktionsporerna* utgör grova håligheter (flera millimeter i diameter) och skapas till följd av otillräcklig kompaktering av betongen. *Luftporerna* utgörs av nära perfekt sfäriska bubblor som drags in i betongen vid blandningen. Normalt sett kollapsar dessa luftporer omedelbart, men genom att använda så kallade luftporbildande tillsatsmedel kan man stabilisera de bildade luftporerna så att de blir kvar i den härdade betongen.

I ett välbildat luftporsystem ligger dessa luftporer fördelade i betongens hela cementpastafas utan kontakt med varandra. Genom att de är så mycket större än cementpastans porer, kommer de inte att kunna vattenfyllas annat än efter mycket lång tids kontinuerlig vattenlagring av betongen. Härvid löses den inne-

slutna luften i porlösningen och diffunderar ut till betongytan. Den erfordrade tiden för denna process varierar med luftporens storlek (och naturligtvis med materialets permeabilitet). Beräkningar av Fagerlund[1] visar att tiden för att fylla en sfärisk por med diameter 10 µm är av storleksordningen cirka 15 minuter, medan motsvarande tid för en por med diameter 100 µm är något tiotal dagar.

Luftporernas funktion vid frostangrepp

Att inblandning av luftporer i betong förbättrar dess beständighet mot frost (och saltfrost-) angrepp är allmänt känt. Eftersom mekanismerna bakom själva frostnedbrytningen (isbildnings- och därmed tryckbildningsmekanismer) inte är i detalj kända, är det inte heller känt exakt vilka krav som ställs på ett luftporsystem för att det skall ge fullgott skydd. Här ges en mycket kortfattad genomgång av de huvudmekanismer som anses ha betydelse för frostorsakad nedbrytning av betong. För en utförligare beskrivning hänvisas till litteraturen, t.ex. Nerenst[2] eller Fagerlund[3].

Frostnedbrytningsmekansimer

Mekanism 1: Sluten behållare ("Closed container")

Då porlösningen övergår från flytande till fast form ökar dess volym cirka 9%. Om porsystemet vore helt vattenmättat skulle detta leda till mycket höga sprängande tryck (ca 20 MPa per grad under 0°C). De ofyllda luftporerna utgör i detta fall expansionskärl i vilka denna expansion kan ske utan att orsaka sprängande tryck. För att kunna ta hand om hela denna volymökning behöver således den inneslutna luftvolymen uppgå till 9% av den frysbara vattenmängdens volym. I betong med vct 0.40-0.60, som en gång torkats och återfuktats, uppgår den frysbara vattenmängden till cirka 50-70 kg/m³ (Vuorinen[4]) vilket innebär att erfordrad lufthalt för att ta hand om volymökningen då detta vatten fryser skulle vara mindre än 1% av betongvolymen. Experiment har dock visat att detta inte räcker, varför någon annan mekanism än denna rena volymökningsmekanism måste ha betydelse för frostnedbrytningen.

Mekanism 2: Hydrauliskt tryck

För att förklara varför inblandning av luftporer förbättrar betongs beständighet mot frostangrepp, utvecklade Powers[5] en hypotes enligt vilken frostnedbrytningen orsakas av de hydrauliska tryck som uppstår i porlösningen då denna, till följd av den tillväxande isens expansion, flödar genom kapillärporerna. De tryck som uppstår till följd av detta (mättade) flöde, beräknas enligt Darcys ekvation.

Mekanism 3: Mikroskopisk, osmotisk islinstillväxt

Hypotesen om hydrauliska tryck kunde dock inte förklara alla fenomen som kunde iakttas med hjälp av dilatometermätningar på betong och cementpasta under frysning. Powers och Helmuth[6] anförde därför hypotesen att frostnedbrytningen orsakas av osmotisk islinstillväxt på mikroskopisk nivå. Enligt denna hypotes påbörjas isbildningen i de grövsta porerna. När temperaturen sedan sänks, uppstår en obalans i energinivåer mellan bildad is och resterande porlösning, vilken leder till att fukt ur den resterande porlösningen flödar (omättat flöde) mot den redan bildade isen. Genom denna process töms således de mindre porerna. En sådan mekanism förklarar varför cementpasta med ett välutvecklat luftporsystem krymper under frysning: Det är fråga om en uttorkningskrympning liknande den som kan iakttas vid normala uttorkningsförlopp.

Denna mekanism har senare tillmätts allt större betydelse (Helmuth[7], Powers[8]). Mekanismen leder till att volymen innesluten luft måste vara stor nog att kunna rymma både den frysbara vattenmängden och den expansion som denna undergår då den omvandlas till is.

De tre beskrivna mekanismerna leder till olika krav på total lufthalt i betongen. Oavsett vilken av mekanismerna som är den dominerande, måste luften dock vara jämnt fördelad över hela betongvolymen; Erfarenhet visar att det inte räcker att ha ett fåtal stora luftansamlingar per volymenhet för att uppnå god beständighet. Uppenbarligen finns ett krav på att flödesavstånden (antingen det är mättade eller omättade flöden) inte får vara alltför långa.

Luftporsystemets karaktäristiska parametrar

Med betongens **lufthalt** L [%] förstås volymen luft V_{air} [m³] i förhållande till hela betongvolymen V_{conc} [m³]:

$$L = \frac{V_{air}}{V_{conc}} \tag{1}$$

Luftporsystemets **specifika yta** definieras som summan av alla luftporers yta dividerad med summan av alla luftporers volym:

$$\alpha = \frac{\sum_{d=0}^{\infty} n_d A(d)}{\sum_{d=0}^{\infty} n_d V(d)} \tag{2}$$

där α [m²/m³] är specifika ytan, d avser luftporernas diameter [m], n avser antalet porer med diameter d samt där A och V avser ytan respektive volymen hos luftporer med diameter d. Specifika ytan uttrycks i regel i enheten mm²/mm³ (eller mm^{-1}).

Om samtliga luftbubblor i ett luftporsystem är av en och samma storlek (diameter d), kan specifika ytan beräknas som

$$\alpha = \frac{6}{d} = \frac{3}{r} \tag{3}$$

Normalt avses ytorna och volymerna för själva kaviteterna i den hårdnade betongen. Endast i undantagsfall avses ytan respektive volymen för de verkliga luftbubblorna i de (eventuellt) delvis vattenfyllda kaviteterna.

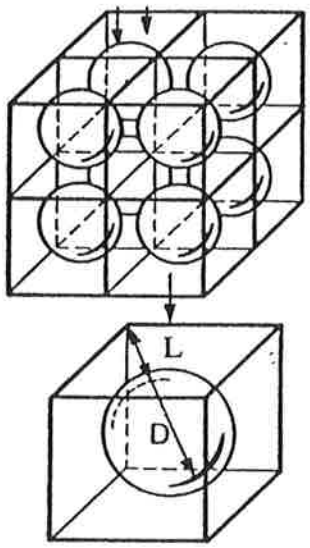
Powers[5] karaktäriserade luftporsystemet med hjälp av dess **avståndsfaktor**. Avståndsfaktorn är ett mått på det maximala avstånd vatten måste flöda i cementpastan för att nå randen av en luftbubbla: Ju mindre avståndsfaktor, desto bättre frostbeständighet. För sin modell förutsatte Powers att alla luftporer är av en och samma storlek samt att de är arrangerade i ett kubiskt gitter enligt figur 1. Det maximala avståndet för vattenflödet är avståndet från ett av hörnen i en av dessa kuber till ytan av luftporen. Detta avstånd beräknas:

$$\bar{a} = \frac{3}{\alpha}\left\{1.4\left(\frac{V_{paste}}{V_{air}}+1\right)^{1/3}-1\right\} \qquad \frac{V_{paste}}{V_{air}} \geq 4.33 \tag{4}$$

i vilken V_{paste} betecknar volymen pastafas per volymenhet betong och beräknas

$$V_{paste} = \frac{m_{cem}}{\rho_{cem}} + \frac{m_{w,0}}{\rho_w} \tag{5}$$

där m_{cem} och $m_{w,0}$ står för massan cement [kg/m³] respektive massan blandningsvatten [kg/m³] i den färska betongen och ρ_{cem} och ρ_w för cementets respektive vattnets densitet. Ekvation (4) gäller endast då kvoten av pasta- och luftvolymen överstiger 4.33, vilket dock är fallet för de flesta betonger.



Figur 1: Powers modell av luftporsystemet: Luftbubblorna är av en och samma storlek och är arrangerade i ett kubiskt gitter.

Betongens **pastahalt** beräknas som kvoten av volymen cementpasta i den färska betongen och betongens volym:

$$P = \frac{V_{paste}}{V_{conc}} = \frac{m_{cem} / \rho_{cem} + m_{w,0} / \rho_w}{V_{conc}} \qquad (6)$$

Generella krav på ett luftporsystem

Grundkravet på ett luftporsystem är att den verkliga mängd luft som finns innesluten i betongen då denna fryses är stor nog att ta hand om dels den volym vatten som transporteras från de fina kapillärporerna till de luftfyllda porerna och dels den volymökning som detta vatten genomgår då det ombildas till is. Om luftporsystemet inte uppfyller detta krav, kommer betongen att brytas ned, oavsett hur liten avstånds-faktorn är!

Luftporsystemet måste också vara jämnt fördelat över hela betongvolymen så att flödesavstånden mellan kapillärporerna och närmaste luftpor aldrig blir så stora att farligt höga tryck kan hinna byggas upp i is bildad i kapillärporerna.

FRYSTESTMETOD, KAPILLÄRSUGNINGSFÖRSÖK OCH BETONGMATERIAL I DENNA STUDIE

Frystestmetod

Ett fullständigt användande av den standardiserade frystestmetoden SS 137244 var varken möjligt eller eftersträvansvärt, eftersom risken för läckage och andra störningar ansågs alltför stor och eftersom den alltför komplicerade hanteringen av proverna skulle göra att projektet inte kunde utföras på utsatt tid.

Därför utformades en testmetod som är utförandemässigt enklare än Borås-metoden: Provkropparna var cirkulära skivor med diameter 94 mm och tjocklek cirka 27 mm. Av varje betongkvalitet testades 3 provkroppar. Dessa lagrades i kalkmättat vatten fram till en vecka före frysstart. Därefter togs de upp, vägdes, torkades 22±2 timmar i 18°C/38%RF, vägdes, sänktes i vatten 5 minuter för viss återfyllning av kapillärporsystemet, togs upp, plastades in och fick sedan ligga fyra dygn för utjämning av fukthalten i provet. 46±2 timmar före frysstart placerades proverna i vattenbad fram till frysstart. Omedelbart före frysstart vägdes proverna ytterligare en gång.

För frysningen placerades proverna i behållare av PVC enligt figur 2.

Proverna placerades i frysskåp och utsattes för en temperaturcykel enligt figur 3. Varje cykel tar ett dygn. 28 cykler genomfördes. Minimitemperaturen är något lägre än vad som föreskrivs i SS 13 72 44 (ca –21°C mot –18°) och nedkylning och upptining sker snabbare. Sammantaget innebär detta längre tid vid lägre temperatur i den cykel som använts här, vilket troligen innebär en något större påfrestning för proverna[9,10,11]. Den kortvarigare torkningsproceduren har troligen bidragit i samma riktning.

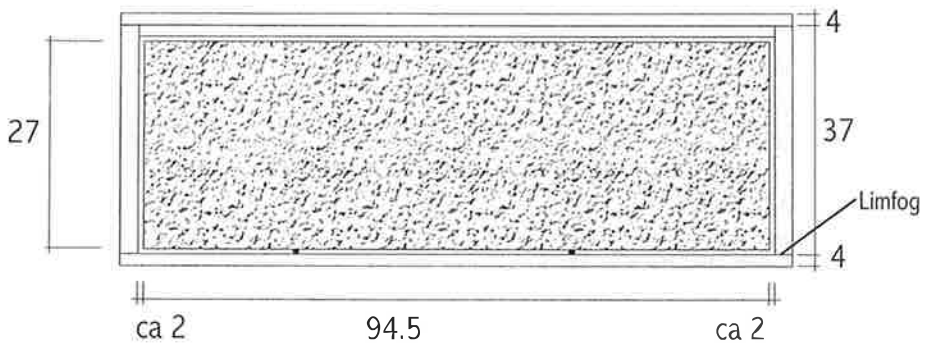
Efter 28 cykler var många prover så kraftigt nedbrutna att fortsatt provning inte gav tillförlitlig information, varför provningen avbröts.

Eftersom testmetoden avviker från den standardiserade kan man inte heller göra jämförelser med det acceptanskriterium som rekommenderas för standardmetoden.

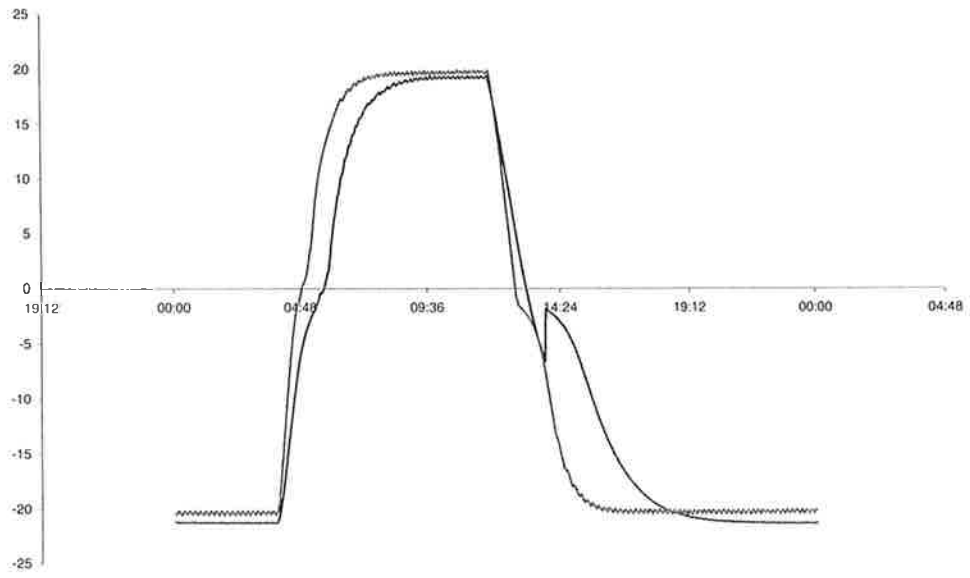
Kapillärsugningsförsök

I syfte att studera fuktupptagningshastigheten under lång tid, genomfördes kapillärsugningsförsök. Provkropparna var 10-11 mm tjocka skivor sågade ur samma cylindrar som frysprovkropparna (diameter ca 94 mm). Proverna placerades liggande på raster i vatten så att vattenytan nådde cirka 2 mm upp längs provernas sidor. Behållarna (fotoskålar) täcktes med glasskivor för att förhindra avdunstning. Ingen av provernas ytor tätades mot fuktutbyte.

Proverna hade först torkats två dygn i 105°C och vattenmättats med hjälp av vacuumbehandling i syfte att bestämma porositet och densitet, och därefter ånyo torkats ett dygn i 50°C inför kapillärsugningsförsöket. Viktökningarna registrerades under cirka 3 veckor.



Figur 2: Frysproverna placerades, upplagda på 2 mm höga distanser, i behållare av PVC. Lock av PVC ligger löst på behållaren.



Figur 3: Temperaturcykel. De två kurvorna avser två olika provkroppar och ger en indikation på den spridning i temperaturförlopp som kan orsakas av slumpmässig underkylning.

Betongmaterial

För studien tillverkades 60 olika betonger. Dessa utgjordes dels av betong med vct 0.40 och 20 olika luftporsystem, dels av betong med vct 0.50 och 10 olika luftporsystem. Till följd av ett par missöden kunde analysen ej genomföras på två av betongerna, varför det slutliga materialet endast omfattar 58 betonger.

Betongerna blandades i satser om 140 liter. Av varje betongblandning gjöts fyra göt med måtten 400×300×250 (mm): Två göt (A med kraftig vibrering, B med måttlig vibrerig) med viss halt luftporbildare men utan flyttillsats, ett göt (C) med måttlig halt flyttillsatsmedel, samt ytterligare ett göt (D) med hög halt flyttillsatsmedel. En detaljerad beskrivning av blandnings- och gjutningsproceduren ges nedan.

Betongernas grundrecept framgår av tabell 1. Det antogs att den naturliga lufthalten skulle uppgå till 1.5% i bägge betongerna.

Som flyttillsatsmedel användes ett lignosulfatbaserat medel med en torrhalt av cirka 40%. Luftporbildaren var ett syntetiskt, tensidbaserat medel med en torrhalt av cirka 10%. I tabellerna över tillsatsdoseringarna (tabellerna 2 och 3) anges bruttodoseringen.

Blandnings- och gjutningsprocedur

Grus vägs upp, cement vägs in i samma bask. (Satsstorleken är 140 l.) Grus och cement tippas i blandaren.
Sten vägs upp och tippas i blandaren.
Materialen torrblandas 5 minuter för att krossa ev. konglomerat av sandkorn.
¾ av vattnet tillsätts och blandas 1 minut.
Resten av vattnet med luftporbildaren tillsatt tillsätts. Blandandet fortsätter 4 minuter.
Cirka 70 l tippas ur blandaren. Blandaren stoppas.
Färsk lufthalt och densitet bestäms (med minimal vibrering).
Göt A och B utförs. (Formarna fylls i tre lager. Göt A vibreras 12 sekunder per lager, göt B endast 3-4 sekunder. (En timme efter gjutning eftervibreras göt A ytterligare 20 sekunder.)
Blandaren startas och tilläggsdos 1 av flyttillsatsen tillsätts. (140-70)/1000×0.1%×512.5= 35.9 g för vct 0.40, pss 28.7 g för vct 0+.50.

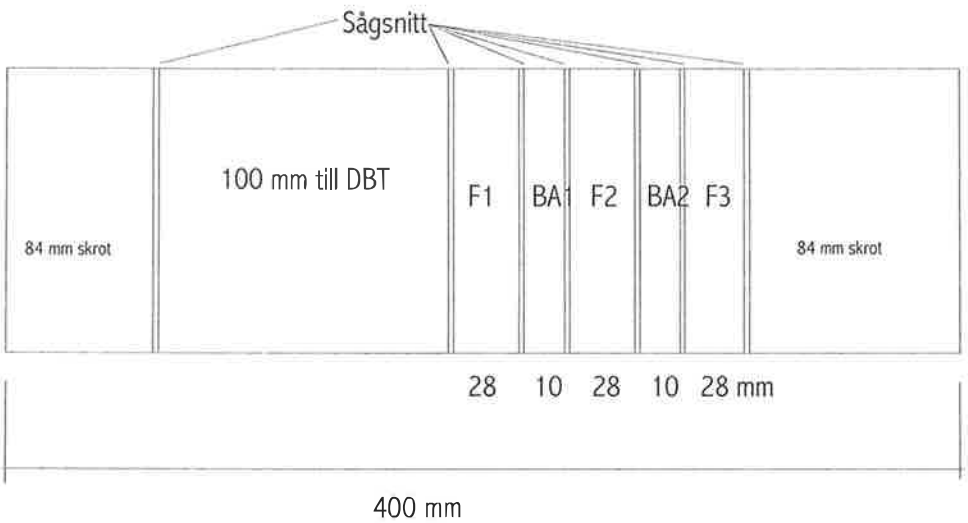
Betongen blandas 3 minuter.
Cirka 35 l tippas ur.
Blandaren stoppas.
Göt C utförs på samma sätt som göt B.
Blandaren startas och tilläggsdos 2 av flyttillsatsen tillsätts. (140-70-35)/1000×0.3%×512.5 = 53.8 g för vct 0.40, pss 43.05 g för vct 0+.50.
Betongen blandas 3 minuter.
Göt D utförs på samma sätt som göt B och C.
En timme efter gjutning eftervibreras göt A ytterligare 20 sekunder.

Betongerna avformades dagen efter gjutning och ställdes i vattenbad i väntan på borrning och sågning, vilket påbörjades cirka två veckor efter gjutning. Ur varje block borrades (tvärs gjutriktningen) en cylinder med diameter 94 mm och längd 400 mm, vilken sedan sågades till skivor med tjockleken 27 mm för frysprovningarna och till skivor med tjockleken 10 mm för bildanalysen. Dessutom sågades ett prov med längden 100 mm för analys av luftporsystemet vid Dansk Beton Teknik. Provernas placering i cylindern framgår av figur 4.

Avsikten var ursprungligen att borra två kärnor ur varje block, men till följd av två missöden detta omöjliggjordes detta. Därför blev tillgången till försöksmaterial betydligt mindre än vad som planerats. Följden blev att den skiva som betecknas BA2, på vilken en dubblering av bildanalysen ursprungligen var tänkt att utföras, istället kom att användas till bestämningar av porositet och densitet samt till kapillärsugningsförsök (se vidare nedan).

Tabell 1: Utgångsrecept för de olika betongerna (utan tillsatsmedel)

Vattencementtal:	**0.40**	**0.50**
Cement ("Anläggning") Dens 3200 kg/m³	512.5	410
Vatten	205	205
Grus 0-8 mm (Åstorp kvartsit)	919.85	967.38
Sten 8-12 mm (Hardeberga kvartsit)	722.74	760.09



Figur 4: Provernas placering i borrkärnorna. Sågsnitten 4 mm, total götlängd: 400 mm. F: provkropp för frysförsök, BA: Provkropp för bildanalys. Bildanalysen utfördes på BA1. Kapillärsugnngsförsök utfördes på BA2.

Tabell 2: Dosering av tillsatsmedel för betong med vct 0.50.

Blandning Nr (vct och löpnr.)	Övervibrerad (göt A)	Dos Luftporbildare (göt A och B)	Flytmedel, Dos 1 (göt C)	Flytmedel, Tilläggsdos (göt D)
501	X	0.010 %	0.1 %	0.3 %
502	X	0.0125	0.1	0.3
503	X	0.015	0.1	0.3
504	X	0.0175	0.1	0.3
505	X	0.020	0.1	0.3

Tabell 3: Dosering av tillsatsmedel för betong med vct 0.40.

Blandning Nr (vct och löpnr.)	Övervibrerad (göt A)	Dos Luftporbildare (göt A och B)	Flytmedel, Dos 1 (göt C)	Flytmedel, Tilläggsdos (göt D)
401	X (= utförd)	0.004 %	0.1 %	0.3 %
402	X	0.007	0.1	0.3
403	X	0.010	0.1	0.3
408	X	0.0115	0.1	0.3
404	X	0.013	0.1	0.3
409	X	0.0145	0.1	0.3
405	X	0.015	0.1	0.3
4010	X	0.0165	0.1	0.3
406	X	0.017	0.1	0.3
407	X	0.019	0.1	0.3

Litterering

Betonger med vct 0.50 littererades så att varje göt betecknades med blandningsnummer och göt-bokstav, t.ex. 501A. De enskilda provkropparna har sedan fått ett tillägg enligt beteckningarna i figur 4 (F1, F2,...)

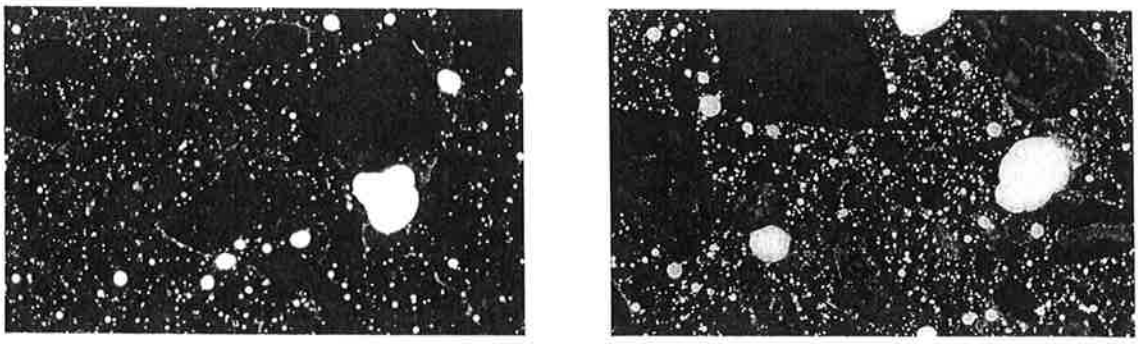
Betonger med vct 0.40 har littererats B4 följt av blandningsnumret (01-10), göt-bokstav och provkroppsbeteckning (enligt figur 4). Beteckningen B403DF1 avser således frysprovkropp nr. 1 ur göt D av blandning nummer 3 av betong med vct 0.40.

BILDANALYS

Luftporsystemens karaktäristika bestämdes dels med hjälp av automatiserad bildanalys (i vårt eget lab), dels med mätning med automatiserad linjär travers och utvärdering enligt ASTM C457 vid Dansk Beton Teknik A/S i Köpenhamn. För bägge analysteknikerna används planslipade provkroppar, på vilkas yta luftporerna framträder som gropar av varierande diameter och djup. Ytan infärgas med blå bakgrundsfärg och groparna efter luftporerna fylls med vit zinkpasta. Luftporerna framträder som vita cirklar (i fortsättningen kallade **kalotter**), medan bakgrunden är mörkt blå, se figur 5. Denna yta fotograferas under mikroskop och en dator analyserar bilden och bestämmer parametrar som *area, diameter, omkrets, form* och *rundhet* hos kalotterna.

För de mätningar som utfördes vid LTH/BML användes bildanalyssystemet LabEye (med tilläggsprogrammet Betong) levererat 1991 av Innovativ Vision AB, Linköping.

Det har tidigare rapporterats att mikroskopets förstoringsgrad kan ha en avgörande för vilka resultat som erhålls[12]. I de mätningar som utfördes vis LTH/BML användes en förstoring som gör att varje pixel i den digitaliserade bilden mäter cirka 3.14μm i x-led och 3.2μm i y-led. Bildskärmen utgörs av 512×512 pixel, varför maximal längd av registrerade objekt blir cirka 1610μm. I de mätningar som utfördes vid Dansk Beton Teknik används en teknik som gör det möjligt att detektera objekt som har en bredd från ca 2µm och uppåt. Hos DBT registreras dock inga objekt kortare än 7µm.



Figur 5: Exempel på preparat för bildanalys. Till vänster B1A med lufthalt 1.9%, till höger B3C med lufthalt 4.6% (bägge lufthalterna bestämda med bildanalys). Varje bild visar en yta av 24×36 mm².

Beräkningstekniker

Det finns många tekniker för att räkna om fördelningar av objekt observerade på en yta till fördelningar av tredimensionella objekt i en rymd. En utförlig beskrivning av sådana tekniker ges i Underwood[13]. Här beskrivs endast kortfattat de två tekniker som använts i detta projekt: Beräkning enligt Lord och Willis[14] med data från en linjär travers-mätning samt beräkning enligt Underwood[15] med data från en inmätning av fördelningen av kalotter på en yta. Denna senare beräkningsteknik finns också beskriven av Vesikari[16]. Beskrivningen nedan bygger i stor utsträckning på Vesikaris beskrivning.

Linjär travers – ASTM C457

Vid mätning med linjär travers-metoden följer man en rät linje över den polerade ytan hos ett prov. Denna linje skär ibland en kalott och bildar då en **korda**. Längden av dessa kordor samt den totala traverslängden registreras. Från kordornas storleksfördelning kan storleksfördelningen av de ursprungliga luftporerna enkelt beräknas (se vidare Lord och Willis[17]): Man delar in kordalängderna och porstorlekarna i klasser, t.ex. 0-20, 20-40, 40-60 µm etc. Dessa storleksklasser numreras från $i=1$ till $i=i_{max}$. Med mediandiametern för varje klass (dvs medelvärdet av klassgränserna, i detta fall 10, 30, 50 µm) betecknad D_{med} erhålls för den högsta klassen av porstorlekar:

$$n_{sphere,i_{max}} = \frac{2}{\pi}\left(\frac{n_{chord,i_{max}}}{D_{med,i_{max}}}\right) \qquad (7)$$

där $n_{sphere,imax}$ är antalet porer med diameter D_{max} per enhetsvolym av materialet och $n_{chord,imax}$ är antalet kordor i högsta klassen. För de mindre klasserna erhålls

$$n_{sphere,i} = \frac{2}{\pi}\left(\frac{n_{chord,i}}{D_{med,i}} - \frac{n_{chord,i+1}}{D_{med,i+1}}\right) \qquad (8)$$

Det kan ibland inträffa att termen inom parentes ger ett negativt tal. Detta beror på att man studerat en alltför kort sträcka traverslängd och därigenom inte skaffat ett tillräckligt gott statistiskt underlag. Om man inte har möjlighet att göra om mätningen måste därför antalet kordor justeras på något sätt.

Beräkning av specifika ytan enligt ASTM C457 (baserat på linjär travers)

Specifika ytan α beräknas från medelkordalängden, l_{mean}:

$$\alpha = \frac{4}{l_{mean}} \tag{9}$$

där medelkordalängden l_{mean} definierats som

$$l_{mean} = \frac{T_a}{N} \tag{10}$$

där T_a är den summerade längden av alla kordor och N är totala antalet kordor. Obs! För att ekvation (9) skall ge ett sant resultat, krävs att alla luftporer är av samma storlek. Eftersom de dock inte är det, kommer ekvationerna (9) och (2) att ge olika värden för ett och samma luftporsystem. Vid angivande av specifik yta för ett luftporsystem måste därför även beräkningstekniken anges! I detta projekt har specifika ytan huvudsakligen beräknats ur ekvation (2) med användande av den luftporstorleksfördelning som beräknats med data från bildanalys utförd vid LTH/BML (≠data från linjär travers).

Beräkning av porstorleksfördelning från en fördelning av kalottdiametrar (Vesikari/Underwood)

Sannolikheten för att man träffar en sfär med diameter D_i (=$2R_i$) när man skär ett plan genom en kub (med enhetsvolym) av materialet, är proportionell mot sfärens diameter:

$$P_{hit,i} = \frac{D_i}{l_{cube}} \tag{11}$$

där l_{cube} är kubens sidlängd. När man skär ett plan genom en enhetskub av ett material med ett luftporsystem, ger därför varje porstorleksklass i upphov till ett antal på snittytan synliga (tvådimensionella) kalotter $n_{2d,i}$ som kan beräknas

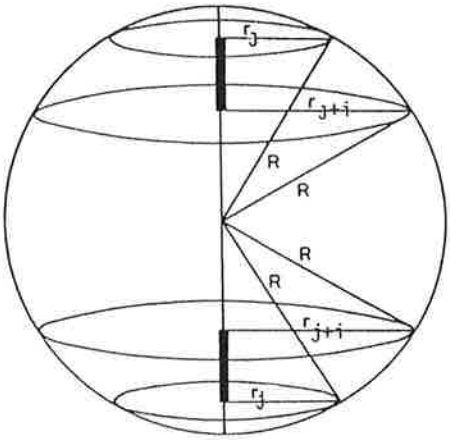
$$n_{2d,i} = n_{3d,i} \times P_{hit,i} \tag{12}$$

Sannolikheten att skära sfären med radie R_i så att man får en kalott med diameter i storleksklassen j (d=$2r_j$) kan beräknas enligt följande (illustrerat i figur 6.)

$$P_{i,j} = \frac{\left(R_i^2 - r_j^2\right) - \left(R_i^2 - r_{j+1}^2\right)}{R_i} \tag{13}$$

där r_j och r_{j+1} är nedre respektive övre intervallgränsen för kaottstorleksklassen j. Antalet kalotter i storleksklass j som produceras av sfärer i klass i kan därför beräknas

$$n_{2d,j} = P_{i,j} \times P_{hit,i} \times n_{3d,i} \tag{14}$$



Figur 6: Illustration till beräkning enligt Underwood[13]/Vesikari[16] (ur Vesikari[16]).

Beräkningen av storleksfördelningen för sfärerna görs genom att ställa upp ovanstående samband på matrisform och lösa ut $n_{3d,i}$.

Slutresultatet av denna beräkning är (det sannolika) antalet sfärer *i klass i*, dvs antalet sfärer med en diameter fallande *mellan* två gränsvärden. Här skiljer sig Vesikaris metod från den som beskrivs av Lord och Willis (vilken ger antalet sfärer med diameter *lika med* den övre klassgränsen).

Även i denna metod kan man råka ut för att det beräknade antalet sfärer blir negativt. Liksom i fallet med Lord och Willis metod beror detta på att man inte har registrerat ett tillräckligt stort statistiskt underlag. Felet åtgärdas normalt genom att absolutbeloppet av antalet sfärer i de klasser där man fått negativa tal, subtraheras från antalet sfärer *i* klassen närmast ovanför (ett steg större sfärer).

Inmätning av porsystem - Studier utförda vid LTH/BML

Ytpreparering

Provmaterialen, cirkulära skivor med diameter 94 mm, slipades först med diamantslipskivor (tre olika kornstorlekar) och sedan på roterande stålskiva med ett slipmedel bestående av kiselkarbidkorn uppslammade i vatten. Kiselkarbidkornen var av kvaliteterna 360, 600 och 1200 mesh (motsvarar cirka 70, 40 respektive 20 µm kornstorlek). Varje kornkvalitet slammades upp i vatten (ca 2 tsk slipkorn till 1.5 dl vatten samt någon milliliter betongplasticeringsmedel) och proverna slipades 10 minuter med respektive kornstorlek (proverna belastades härvid med cirka 3 kg och stålskivan roterade med 100 varv/min.). Vid byte till finare kornstorlek sköljdes provet omsorgsfullt under vatten (med spridarmunstycke), tvättades ca 5 sekunder i vattenbad med ultraljud och sköljdes sedan återigen.

Det slipade provet granskades i betraktningsmikroskop med snett infallande ljus. På detta sätt kan repor, söndertrasade luftporkanter och andra defekter upptäckas. En otillräcklig tvättning av proverna mellan slipningarna med de olika kornkvaliteterna leder lätt till att kvarblivna, grövre korn avsätter repor i materialytan då de sköljs/slits loss i den efterföljande slipningen med finare korn.

Sedan slipresultatet godkänts bakgrundsinfärgas ytan med hjälp av tuschpenna (i detta fall av typen Edding 800, mörkblå) i två lager. Provet torkas i 50°C, dels för att färgen skall torka ordentligt, dels för att värma provet inför nästa moment.

Nästa moment består av impregnering av provytan med vit zinkpasta (blandad på endast zink och vaselin). Denna pasta stryks ut över det varma provet varvid den mjuknar. Pastan inarbetas sedan med mjuk gummispatel (typ köksredskapet Lilleman). Ett överskott av zinkpasta lämnas kvar på ytan. Därefter kyls provet (antingen under kallt rinnande vatten, med skydd av t.ex. en pappershandduk, eller i kylskåp). Pastan krymper då och "kryper" ned i luftporerna. Det översta skiktet zinkpasta värms försiktigt med varmluftspistol och avlägsnas med hjälp av ett knivblad.

Denna avlägsnandeprocess är det svåraste momentet i hela prepareringsprocessen: Knivbladet får *ej* skrapa ytan (eftersom bakgrundsinfärgningen då förstörs), utan skall föras över densamma så nära som möjligt, men helt utan tryck. Momentet är svårt och kräver stor vana hos operatören.

Efter detta avdrag finns vissa små rester av zinkpasta kvar. Dessa avlägsnas genom att paraffinolja droppas på provytan (3-4 droppar/dm^2) och gnuggas ut med fingertopparna (utan tryck mot materialytan). Denna paraffinolja avlägsnas sedan med knivblad på samma sätt som zinkpastan.

Preparatet granskas i betraktningsmikroskop. Vita objekt som ej utgörs av luftporer (zinkpastafyllda sprickor i ballastkorn, mm.) retuscheras bort med tuschpenna. Denna måste vara av en kvalitet som fäster på zinkpastan och inte löser upp bakgrundsfärgen. I detta projekt har pennor av typen Stædtler Lumocolor 317 använts med tillfredsställande resultat.

Det färdiga preparatet är en färskvara: Zinkpastan torkar och krymper därvid så att den inte längre fyller ut groparna efter luftporerna på ett tillfredsställande sätt. Mikroskopanalysen måste därför göras omedelbart efter att preparatet färdigställts.

De avskurna luftporerna framträder nu som mer eller mindre cirkelformade, vita fält, vilka, som nämnts ovan, kallas **kalotter**. Ett par exempel på preparat använda i denna studie ges i figur 5.

För att i någon mån kontrollera att slipningen gav resultat av tillräckligt god kvalitet, planslipades ett prov av gabbro, vilket förväntades ge en svart yta helt utan porer. Genom att preparera denna på samma sätt som betongproverna, fick vi en indikation på om slipningen gav upphov till skador i materialytan som bildanalyssystemet felaktigt skulle kunna tolka som "luft". Försöket visade att datorn inte gjorde några sådana misstag (med samma inmätningsrutin "Slut 1"* som sedan användes i inmätningarna). Effekten av blänk från ballastkorn i betongen kunde naturligtvis dock inte kontrolleras på detta sätt.

Mätta parametrar, Några definitioner och Gallring av objekt

Datorprogrammet registrerar ett flertal parametrar hos objekten. I de beräkningar som använts här används parametrarna *area, diameter, längd, xlängd, ylängd, formfaktor* och *rundhet*.

Diameter är en parameter som *beräknas* ur objektets area, under antagande av att objektet är perfekt cirkulärt. Värdet på *Diameter* är således nära sanningen endast för objekt som är någorlunda perfekt cirkulära.

I bilderna registreras allt vitt som luftporer. Kvoten av sammanlagda arean av dessa vita partier och summan av alla exponerade bildytor ger provets lufthalt. Men inte alla registrerade vita partier är orsakade av fungerande luftbubblor. Istället kan det vara sprickor längs ballastkorn, rester av zinkpasta, håligheter i ballast, eller andra håligheter. Objekt av denna typ kan gallras bort genom att man studerar *form*en på objekten. I bildanalysprogrammet används begreppen ***form*** och ***rundhet*** för att karaktärisera objekten. *Form* definieras

$$Form = \frac{Omkrets^2}{4\pi \cdot area} \qquad (15)$$

En perfekt cirkel har *formfaktorn* 1.0, en kvadrat får 1.27 och mer oregelbundna objekt får ännu högre värden.

Rundhet är en alternativ *form*faktor och definieras i programmet som

$$Rundhet = \frac{\pi \cdot längden^2}{4 \cdot arean} \qquad (16)$$

* "Slut 1" innebär att vid randen av varje objekt tags ett pixel bort, varefter det läggs tillbaka till den nya randen. Förfarandet rundar i någon mån av objektens kanter, men tar framförallt bort brus (objekt bestående av upp till 4 pixel försvinner helt, liksom vissa långsträckta, smala objekt som till exempel kan ha orsakats av sprickor i övergångszonen mellan ballast och pasta.

En cirkel har *rundheten* 1.0, en kvadrat 1.57 och mer oregelbundna former ännu högre värden. *Rundhet* är således ett något känsligare instrument än *Form* för gallring av icke-runda objekt. (*Längd* beskrivs nedan)

Bägge dessa parametrar har sina begränsningar när det kommer till små objekt: Ett perfekt runt objekt med diameter motsvarande cirka 2 **pixel*** kan t.ex. komma att representeras med en kvadrat av 4 pixel. En sådan får således *rundheten* 1.57 och *formfaktorn* 1.27. I syfte att inte gallra bort dessa små objekt måste man således acceptera *rundhets-* och *form*faktorer upp till dessa värden. I en mer förfinad analys kan man möjligen låta kravet på *form* och *rundhet* variera med objektets storlek. Det är dock ingen idé att överdriva kraven på dessa parametrar, eftersom man då kommer att registrera en lufthalt betydligt lägre än den verkliga (även icke perfekt sfäriska kaviteter kan ju fungera som skyddande luftporer, förutsatt att de inte utgör ett sammanhängande kanalsystem i pastan). Denna typ av val, mellan olika sätt att förfina mätningarna, är vanligt förekommande och leder med nödvändighet till att det man slutligen registrerar är mer eller mindre förvrängt till följd av nödvändigheten av att anpassa mätningen till mätsystemets prestanda.

Erfarenhet från mätningsarbetet visar att faktorn *Rundhet* i regel gallrar objekten på ett sätt som är i bättre överensstämmelse med operatörens subjektiva bedömning än vad faktorn *Form* gör. Man kan uttrycka det som att faktorn *Form* hellre "skenar iväg" så snart objektet visar någon taggighet i kanterna. Eftersom objekten lätt blir sådana till följd av hur de har bildats, bör man således inte ställa något hårt krav på faktorn *Form*, däremot syns det rimligt att för objekt som inte skär bildfältskanten tillåta maximala värden på *Rundhet* av storleksordningen 2.5. Nedan redovisas några beräkningar i syfte att illustrera betydelsen av valet av tillåten *Form* och *Rundhet*.

I syfte att kunna bevara data så lika vad kameran såg som möjligt, har inga krav ställts på *formfaktor* och *rundhet* vid inmätningen av objekten. En sådan gallring har istället gjorts vid de efterföljande beräkningarna, se vidare nedan.

XMAX och YMAX

XMAX är det maximala värde på *xlängd* som ett objekt kan antaga. Detta blir identiskt med bildskärmens *xlängd* och således fås

$$XMAX = 512 \cdot xskala \qquad (17)$$

där 512 är antalet pixel i bildfältets x-ledd och *xskala* är den sträcka i x-led som varje pixel representerar. I dessa mätningar är denna sträcka cirka 3.1μm. På samma sätt erhålls ett värde på ***YMAX*** (i det använda bildanalyssystemet är *YMAX* någon procent större än *XMAX*).

Längd

För varje objekt datorn identifierar i bilden, placerar den ut en rektangel så att objektet precis innesluts i denna. Denna rektangel får en viss längd och bredd. Dessa utgör objektets ***xlängd*** och ***ylängd***. Ett objekts ***längd*** är den längsta sträcka mellan två punkter där objektet tangerar denna omskrivna rektangel.

Problemet med Hörn- och Kantobjekt

Vissa kalotter (ungefär 15%) skär alla fyra, tre, två eller endast en av bildfältskanterna. Dessa objekt bidrar till totala arean av kalotter och ger på så sätt ett korrekt bidrag till totala lufthalten, men ger ett fel i registreringen av kalottdiametrar; Hela porstorleksfördelningen förskjuts mot mindre luftporstorlekar. Det är därför önskvärt att med utgångspunkt i värdena på objektets olika parametrar fastställa den verkliga diametern hos varje objekt. Därefter lägger man till ett antal objekt i rätt storleksklass. Detta "antal" utgörs av den andel av objektets totala yta (vilken beräknas utifrån det fastställda värdet på verkliga diametern) som syns på bilden. För varje kantobjekt fås alltså ett "antal" objekt i intervallet [0 1] (medan korrekt registrerade objekt alltid registreras med antalet 1).

---

* Pixel: Bildskärmen består av 512×512 ljuspunkter som kallas pixel. Datorn gallrar objekt från bakgrund genom att avgöra vitheten i varje sådant pixel. Varje objekt i preparatet representeras därför av ett *helt* antal pixel.

Identifiering och justering av kant- och hörnobjekt

Samtliga objekt som skär bildfältskanten markeras i datamängden med en etta. Det är således inte svårt att vid de efterföljande beräkningarna identifiera dessa objekt. För att kunna beräkna den verkliga diametern måste man avgöra om objektet skär 1, 2, 3 eller alla 4 bildfältskanterna.

Justering av objekt som skär tre eller fyra bildfältskanter

Av alla objekt som skär bildfältskanten, gör några detta på ett sådant sätt att objektet har utsträckning längs två av bildskärmens kanter. Det kan även förekomma att ett enda objekt täcker delar av tre av bildkanterna (eller rent av alla fyra). Objekt av denna senare typ känns igen på att deras *xlängd* och/eller *ylängd* är lika stor som bildfältets längd i respektive riktning (XMAX respektive YMAX). I de beräkningar som gjorts i detta arbete har alla sådana objekt förutsatts ha diametern 1800 µm och de har registrerats med ett antal som beräknas ur

$$n = \frac{A_{obj}}{A_{kalott}} = \frac{4A_{obj}}{\pi d^2} = \frac{4A_{obj}}{\pi 1800^2} \qquad (18)$$

där A_{obj} är den registrerade arean av objektet. Detta sätt att hantera dessa stora objekt är naturligtvis inte helt korrekt, men objekt av denna storlek är så sällsynta att det inte inför något stort fel i slutresultaten; Det väsentliga är att man inte registrerar ett alltför litet objekt.

Justering av objekt som skär två av bildfältskanterna

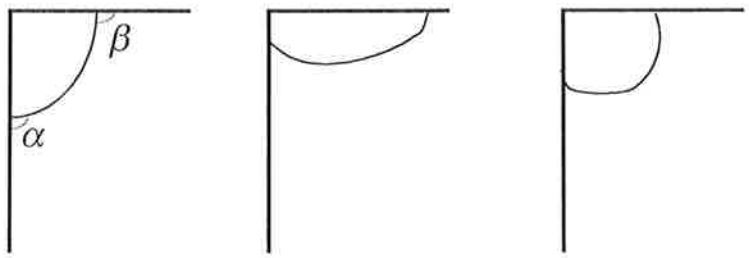
Dessa objekt kallas även hörnobjekt. Vid beräkning av korrekt diameter för denna typ av objekt måste man dela in dem i tre olika typer, se figur 7. De tre typerna av hörnobjekt skiljer sig från varandra genom att antingen två, endast en , eller ingen av vinklarna α och β är >90°.

I det första fallet, i vilket både a och b är större än 90° (till vänster i figur 7), är objektets *längd* lika med roten ur summan av kvadraterna på objektets *xlängd* och *ylängd* (enligt Pytagoras' sats). Den verkliga diametern D beräknas sedan iterativt ur ekvationerna

$$A_{obj} - \frac{x_l \cdot y_l}{2} = \left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180} - \cos(\alpha)\sin(\alpha)\right)\left(\frac{l}{2\sin(\alpha)}\right)^2 \qquad (19a)$$

$$D = \frac{l}{\sin(\alpha)} \qquad (19b)$$

där A_{obj} är den registrerade arean av objektet, x_l och y_l är objektets *xlängd* respektive *ylängd*, l är dess *längd* (enligt definitionen ovan) och α är halva den vinkel som bildas mellan två linjer dragna från de punkter där objektet möter bildfältskanterna till det ursprungliga (cirkulära) objektets centrum, som ligger utanför bildfältet. Ekvation (19) löses genom iteration.



Figur 7: Tre olika typer av hörnobjekt. Vänster: Vinklarna α och β båda >90°, mitten: endast en vinkel >90°, höger: Bägge vinklarna <90°.

Hörnobjekt av andra typen (en av vinklarna α och β <90°, mitten i figur 7) kännetecknas av att dess *längd* är kortare än roten ur summan av kvadraterna av *xlängd* och *ylängd*. Diametern hos det ursprungliga objektet beräknas på samma sätt som för hörnobjekt typ1 efter att den kortare av *xlängd* och *ylängd* ersatts med ett värde s, vilket beräknas

$$s = \sqrt{l^2 - S^2} \tag{20}$$

där S är den större av *xlängd* och *ylängd* och l liksom tidigare är objektets registrerade *längd*.

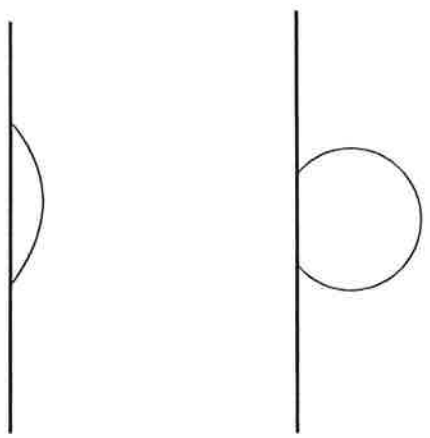
Den tredje typen av hörnobjekt har inte kunnat justeras på ett matematiskt korrekt sätt. Istället har det antagits att dessa objekt i genomsnitt framträder med 57% av sin yta. Diametern på det ursprungliga objektet beräknas sedan enligt

$$D = 2\sqrt{\frac{A_{obj}}{0.57\pi}} \tag{21}$$

Justering av objekt som skär en av bildfältskanterna

Övriga kantobjekt skär endast en av bildfältskanterna. Detta kan ske på två olika sätt, figur 8. Dessa två objekt särskiljs på förhållandet mellan den längre och den kortare av *xlängd* och *ylängd*. För det vänstra objektet i figur 8 är detta förhållande >2 och för det högra är det <2. För det senare fallet (figur 8, höger) inser man således att den längre av de två sträckorna är lika med diametern. För det fall att förhållandet överskrider 2 (figur 8, vänster) beräknas diameter ur ekvationen:

$$D = \frac{\max(x_l, y_l)^2}{4\min(x_l, y_l)} + \min(x_l, y_l) \tag{22}$$



Figur 8: De två huvudtyper av kantobjekt som skär endast en bildfältskant.

Alla de beskrivna beräkningarna förutsätter att objekten verkligen är cirkulära. Eftersom de i regel inte är perfekt cirkulära, blir de beräknade värdena inte heller perfekta, men beräkningarna tjänar ändå som en avsevärd förbättring av den diameter som inmätningsprogrammet registrerar, vilken är beräknad ur objektets area under förutsättningen att objektet är cirkulärt. Genom denna matematiska hantering av kantobjekten har således de problem som orsakas av att bildfältet är relativt litet i förhållande till de större objekten till stor del eliminerats.

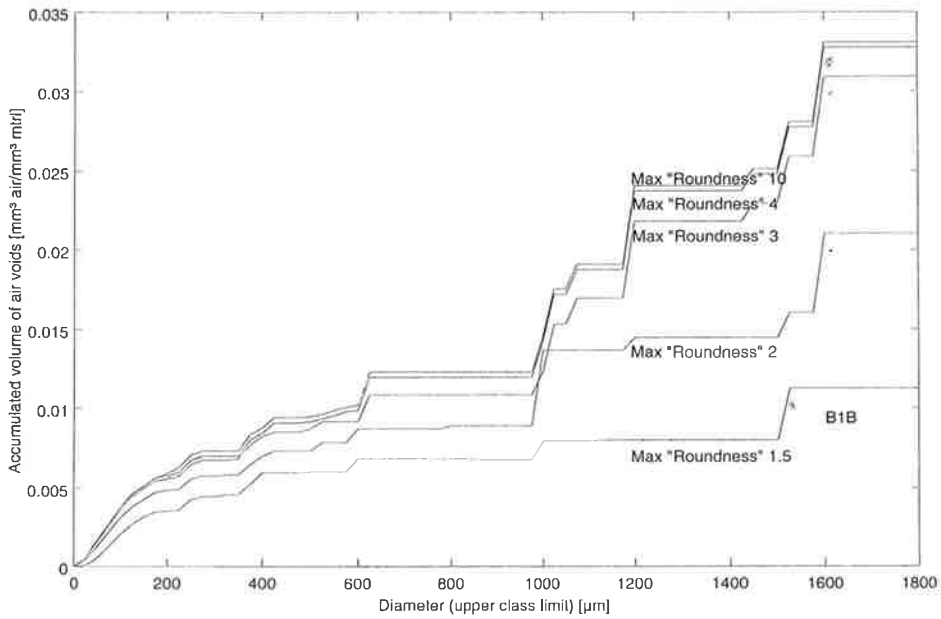
Studie av de beräknade porstorleksfördelningarnas beroende av valda värden på *Formfaktor* och *Rundhet*

Här ges några exempel på hur valen av tillåten *rundhet* och tillåten *formfaktor* påverkar beräkningsresultaten. Data kommer från proverna B1B (med låg lufthalt) och B7A (med hög lufthalt). Bägge har vct 0.40 och har valts slumpmässigt för detta exempel.

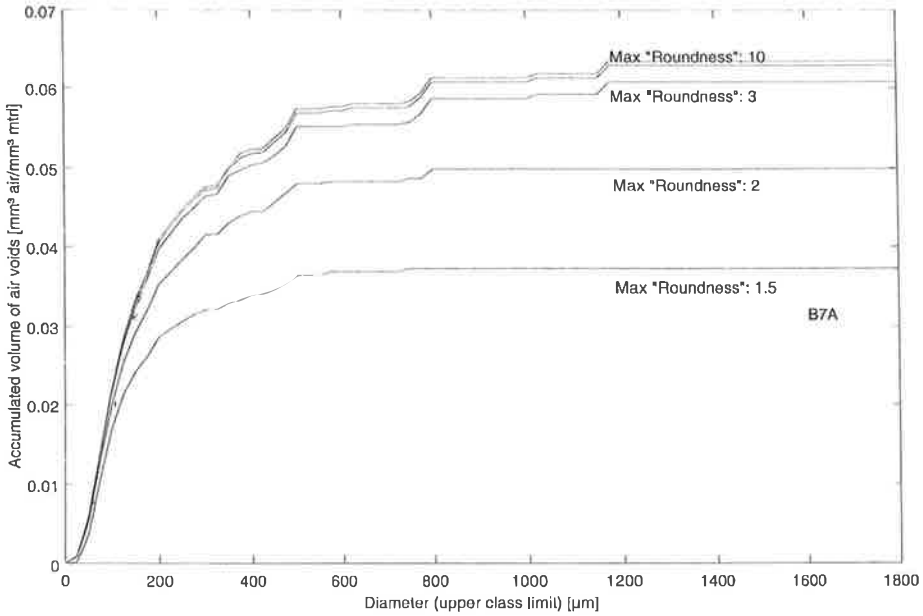
Variation av tillåten rundhetsfaktor, inget krav på formfaktor

Figurerna 9 och 10 visar hur den ackumulerade luftfördelningen påverkas av att kravet på *rundhet* varieras. Beräkningarna är gjorda med värdena 1.5, 2, 3, 4 och 10. Värdet 1.5 är orimligt lågt; Många objekt som, utan tvekan, är komna ur äkta luftporer kan få detta värde på *rundheten*, bland annat beroende på att datorn representerar varje objekt med ett *helt* antal pixel. Som framgår av figurerna har det stor betydelse om kravet är 1.5 eller 2. Steget mellan kraven 4 och 10 är försumbart litet.

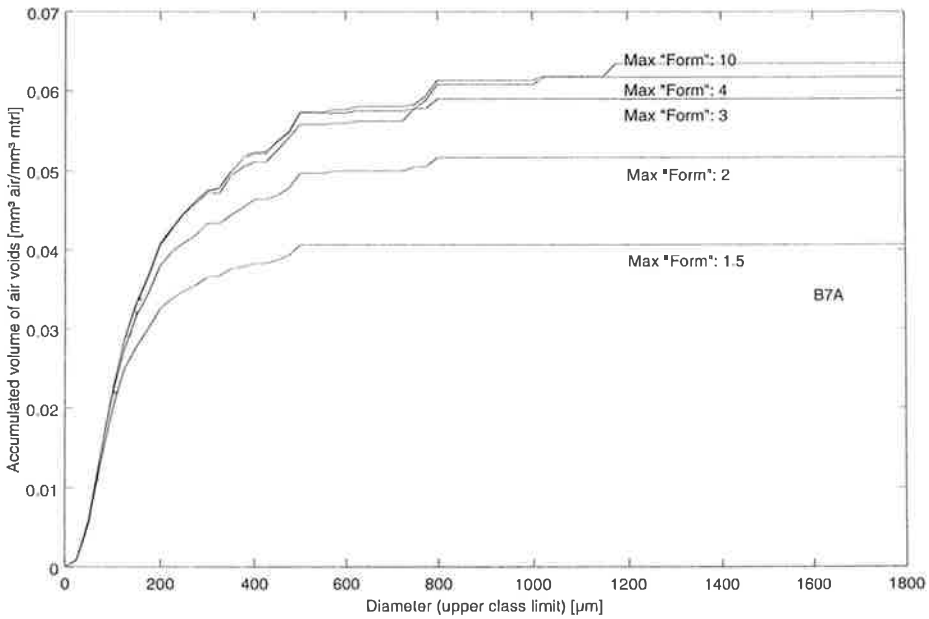
I de slutliga beräkningarna, vilka baseras på dataunderlaget efter justering av kantobjekten, har kraven på *Rundhet* och *Formfaktor* satts till 2.5 respektive 5 för objekt *som inte skär bildfältskanterna*. Detta har visat sig ge god överensstämmelse mellan den ackumulerade lufthalten i de beräknade fördelningarna och den lufthalt som mäts direkt på preparatens yta (som kvoten av arean av vita objekt och total bildyta). I regel har den ackumulerade lufthalten varit aningen lägre än den som mätts på ytorna. För perfekta preparat, dvs. där inget annat än verkliga luftporer framträder på ytan, är lufthalten såsom den bestäms ur areaförhållandena rätt. I regel medräknas dock även några felaktiga objekt (blänk i ballast, sprickor, etc.) varför den på så sätt registrerade lufthalten lätt kan bli aningen för hög. Genom att lufthalten i de beräknade fördelningarna genomsnittligt är något lägre, kan man således förvänta sig att denna är mycket nära den verkliga lufthalten.



Figur 9: Inverkan av krav på "Rundhet" på beräknad ackumulerad lufthaltsfördelning. Prov B1B (vct 0.40), utan matematisk justering av kantobjekt.



Figur 10: Inverkan av krav på "Rundhet" på beräknad ackumulerad lufthaltsfärdelning. Prov B7A (vct 0.40), utan matematisk justering av kantobjekt.



Figur 11: Inverkan av krav på "Form" på beräknad ackumulerad lufthaltsfärdelning. Prov B7A (vct 0.40), utan justering av kantobjekt.

Variation av tillåten formfaktor, inget krav på rundhetsfaktor

Motsvarande beräkningar som beskrevs ovan för *Rundhet* gjordes även för *Formfaktor* och redovisas för provet B7A i figur 11. Mönstret är detsamma för B1B: Ju högre tillåtet värde på *formfaktor*, desto högre ackumulerad lufthalt vid en given pordiameter.

RESULTAT

Grundanalys av erhållna data

Före diskussionen av eventuella samband mellan luftporkaraktäristika och mätta avskalningar, är det på sin plats med en allmän genomgång av de erhållna resultaten.

Materialens egenskaper

Materialens porositet, densitet och hydratationsgrad bestämdes på parallella prover vilka lagrats i kalkvatten en månad längre än frysproverna (proverna hade inte heller genomgått den förtorkning i 38%RF och återuppfuktning som frysproverna genomgick). Porositet och densitet bestämdes med vattenmättning efter vacuumbehandling och utvärdering enligt Arkimedes princip. Till följd av brist på material var det tvunget att utföra dessa bestämningar på ett enda prov av respektive materialkvalitet. Resultaten framgår av Tabell 1. Kompaktdensiteten bestämdes för vct 0.40 till 2620.4 kg/m^{3}med en standardavvikelse på 4.4 kg/m^3. Motsvarande siffror för vct 0.50 var 2619.9 och 4.0.

Hydratationsgraden bestämdes genom glödgning vid 1050°C till 0.72 för vct 0.40 och 0.82 för vct 0.50 (medelvärde av 6 prover av vardera vct)

Tabell 1. Densitet och porositet bestämda på prover lagrade i kalkvatten en månad längre än frysproverna (4 istf 3 månader). Vattenmättnadsgrad avser vattenmättnadsgrad efter 4 månaders förlagring i kalkvattenbad.

	vct	Porositet [-]	Torrdensitet [kg/m³]	Kompaktdensitet [kg/m³]	Vattenmättnadsgrad [-]
B1A	0.40	0.147	2235.5	2622.0	1.02
B1B	0.40	0.153	2221.2	2621.1	0.99
B1C	0.40	0.151	2221.5	2617.5	0.96
B1D	0.40	0.158	2202.1	2614.5	0.90
B2A	0.40	0.143	2253.1	2630.3	0.98
B2B	0.40	0.144	2247.7	2625.0	1.00
B2C	0.40	0.146	2243.0	2625.7	0.99
B2D	0.40		Ej analyserad		
B3A	0.40	0.147	2236.3	2621.2	0.99
B3B	0.40	0.152	2223.9	2622.4	0.95
B3C	0.40	0.155	2215.5	2621.6	0.97
B3D	0.40	0.167	2186.0	2623.3	0.89
B4A	0.40	0.158	2205.6	2619.7	0.96
B4C	0.40	0.173	2168.9	2623.3	0.88
B4D	0.40	0.184	2140.5	2624.3	0.84
B4E	0.40	0.185	2138.8	2625.6	0.85
B5A	0.40	0.168	2178.7	2619.8	0.93
B5B	0.40	0.175	2159.4	2617.8	0.90
B5C	0.40	0.177	2157.3	2621.7	0.87
B5D	0.40	0.197	2094.2	2609.6	0.81
B6A	0.40	0.173	2163.6	2617.1	0.89
B6B	0.40	0.177	2151.7	2615.1	0.86
B6C	0.40	0.194	2107.3	2614.1	0.85
B6D	0.40	0.204	2082.3	2616.0	0.79
B7A	0.40	0.187	2129.1	2617.9	0.84
B7B	0.40	0.185	2135.0	2619.5	0.85
B7C	0.40	0.196	2106.2	2620.9	0.81
B7D	0.40	0.214	2066.1	2627.9	0.74
B8A	0.40	0.161	2195.3	2615.5	0.94
B8B	0.40	0.170	2172.1	2618.0	0.93
B8C	0.40	0.177	2158.6	2622.7	0.90
B8D	0.40	0.188	2126.2	2617.6	0.85
B9A	0.40	0.173	2163.4	2616.8	0.92
B9B	0.40	0.178	2153.8	2618.6	0.89
B9C	0.40	0.185	2135.1	2620.9	0.86
B9D	0.40	0.189	2119.8	2614.9	0.85
B10A	0.40	0.180	2152.8	2625.8	0.99
B10B	0.40	0.183	2146.7	2627.7	0.84
B10C	0.40	0.185	2138.7	2622.7	0.85
B10D	0.40	0.194	2114.4	2624.4	0.80
501A	0.50	0.170	2172.7	2618.5	0.94
501B	0.50	0.176	2159.2	2621.3	0.91
501C	0.50	0.193	2112.8	2618.3	0.86
501D	0.50	0.193	2110.5	2615.4	0.85
502A	0.50	0.179	2147.6	2617.3	0.90
502B	0.50	0.180	2147.6	2620.1	0.90
502C	0.50	0.196	2109.9	2624.5	0.86
502D	0.50	0.202	2090.3	2619.2	0.84
503A	0.50	0.193	2114.9	2621.6	0.89
503B	0.50	0.186	2130.7	2617.1	0.88
503C	0.50	0.201	2089.5	2615.0	0.84
503D	0.50	0.204	2091.8	2626.3	0.82
504A	0.50	0.198	2107.1	2627.6	0.84
504B	0.50	0.185	2129.6	2612.1	0.87
504C	0.50	0.208	2076.8	2621.7	0.80
504D	0.50	0.205	2085.0	2622.4	0.78
505A	0.50	0.184	2135.6	2618.2	0.89
505B	0.50	0.198	2096.9	2615.0	0.89
505C	0.50	0.199	2099.8	2621.6	0.84
505D	0.50	0.202	2093.5	2623.9	0.83

Allmänt om avskalningarna

Uppsamling av avskalat material gjordes genom att proverna borstades med mässingsborste (spisplatteborste) *under* vatten. Genom detta förfarande slipper man att avskalat material sprätter utanför uppsamlingskärlet. Detta vatten hälldes sedan genom filter (vanligt kaffebryggarfilter) och kärlet spolades ur noggrant så att allt avskrapat material verkligen registrerades.

I några få fall har läckage ur frysningsbehållarna förekommit i sådan omfattning att provets överyta inte varit täckt av lösning. Ytorna har dock alltid varit våta. Detta gäller (med angivande av antal gånger inom parentes) 505DF3 (1), B8CF3 (1), 504AF2 (2). De två senare visar något lägre avskalning än sina två parallellprover. Ingen justering har dock gjorts.

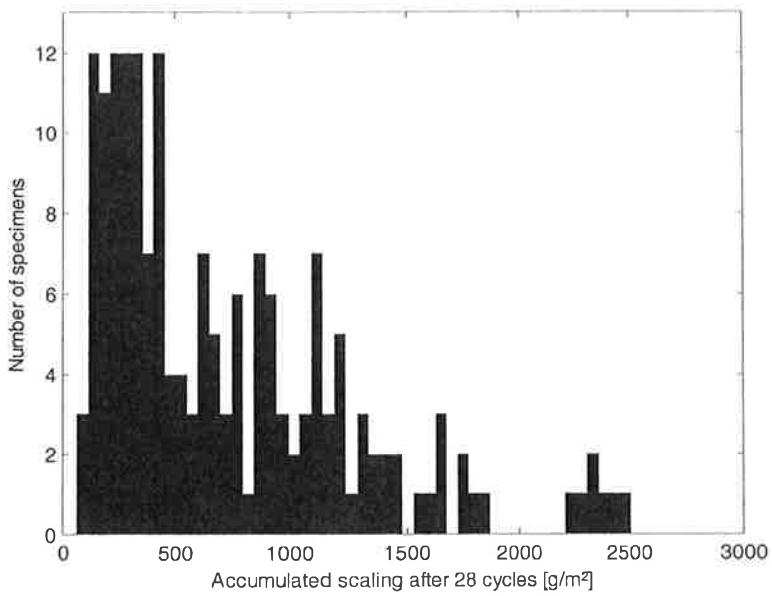
Av kvalitet B9A testades endast två provkroppar.

Vid ett av mättillfällena registrerades inte avskalningen för prov B10AF3 (till följd av en förväxling). Som ersättning har ett rimligt värde (medelvärdet av avskalningen före och efter) skrivits in i resultatmängden.

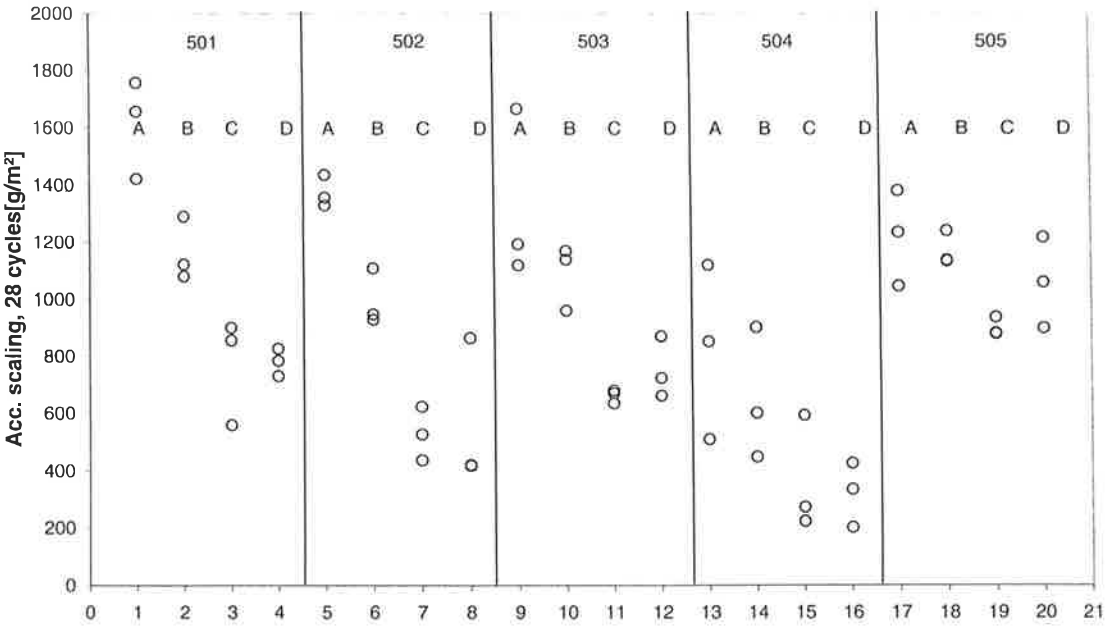
Provkropparna erhöll avskalningar i intervallet 91-2504 g/m² för enskilda provkroppar av vct 0.40 efter 28 cykler (beräknat på ursprunglig yta, vilken beräknats från provkroppsmåtten ø94×27 mm). Motsvarande värden för betong med vct 0.50 är 202-1756 g/m². Histogrammet (figur 12) visar fördelningen av antal provkroppar mot mängden avskalat material.

I figurerna 13 och 14 visas avskalningen för de enskilda provkropparna. Spridningarna är mindre för betong med vct 0.40 än för betong med vct 0.50. Detta är troligen orsaken till att sambanden mellan luftporsystemens karaktäristika och avskalningarna är tydligare för vct 0.40 än för vct 0.50 (se vidare nedan). Orsaken till den mindre spridningen är okänd, men troligen har ett luftporsystem av jämnare kvalitet erhållits i betongerna med vct 0.40.

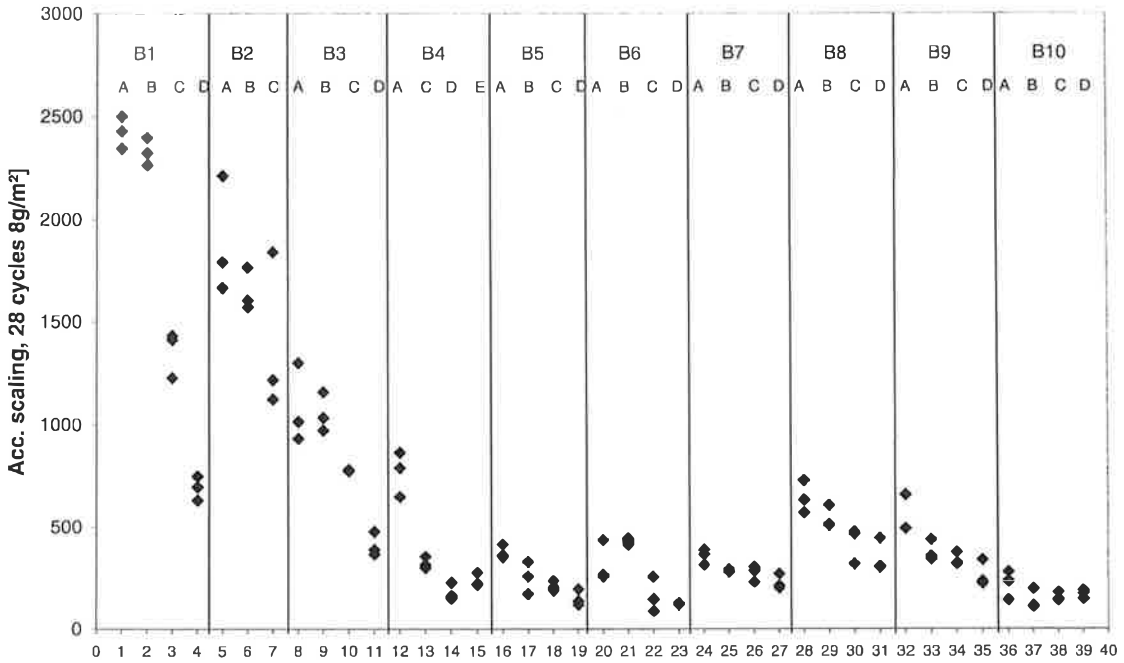
Lägg också märke till produktionssättets betydelse för avskalningarna: I samtliga fall är avskalningen störst för övervibrerade provkroppar (A) och sedan är trenden att avskalningarna minskar (B>C>D). En första kontroll av orsaken till detta visar att innehållet av luft med diameter mindre än ett visst värde ökar I ordningen A-B-C-D. Detta beror troligen på att blandningstiden ökade för varje göt, varigenom luftporsystemet kom att innehålla alltfler små bubblor.



Figur 12: Frekvens av provkroppar med viss avskalning.

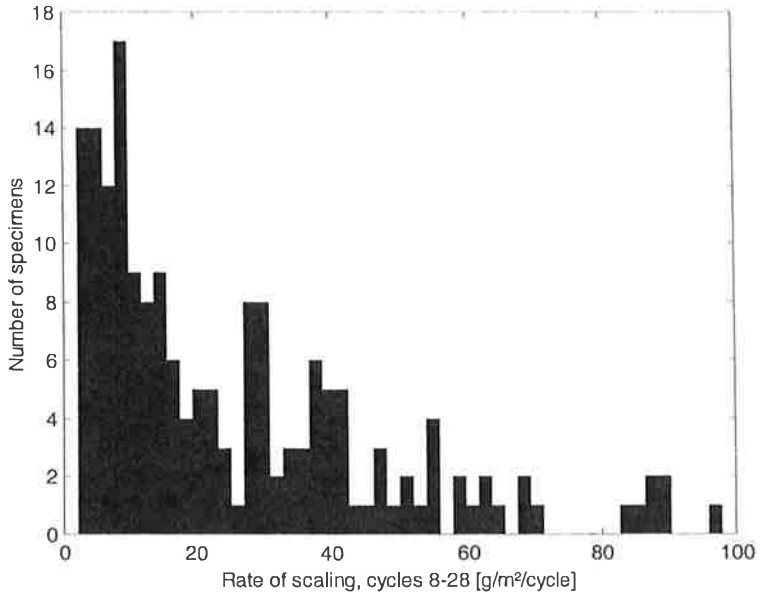


Figur 13: Spridning i ackumulerad avskalning (28 cykler) för betonger med vct 0.50. Av varje betong testades tre provkroppar. Där endast två ringar kan skönjas beror detta på att en ring täcker en annan.



Figur 14: Spridning i ackumulerad avskalning (28 cykler) för betonger med vct 0.40. (Betongkvalitet B2D testades inte och finns därför inte med i diagrammet.)

Eftersom den ackumulerade avskalningen efter de första 7 cyklerna är starkt beroende av vilken initiell vattenhalt provet hade, kan man inte förvänta sig konstant avskalningstempo förrän avskalning verkligen har kommit igång. Eftersom skador började uppstå mellan cykel 0 och 7, kan det vara idé att analysera sambandet mellan avskalningshastigheten och luftporsystemets karaktäristika från den 7:e cykeln och framåt. Fördelningen av antal provkroppar mot avskalningshastighet visas i figur 15. Avskalningshastigheterna varierade upp till knappt 100 g/m²/cykel. För betongerna med vct 0.50 är avskalningstempot i genomsnitt 18% högre under cyklerna 14-28 än under cyklerna 7-14. För betongerna



Figur 15: Frekvens av förekommande medelvärden för avskalningstempot mellan cykel 8 och 28.

med vct 0.40 förändras inte avskalningstempot med antalet cykler. Eftersom avskalningstempot är så pass konstant genom hela försöket görs ingen separat analys baserad på avskalningstempo istället för slutgiltig avskalning.

Temperaturcykel

Temperaturcykeln, så som den mätts i saltlösningen kring proverna, visas i figur 3. Minimitemperaturen i den aktuella fryscykeln är något lägre än vad som eftersträvas i SS 13 72 44 (Borås-metoden): -20°C istället för –18°C. Enligt försök rapporterade av Peterson[9] medför denna sänkning av minimitemperaturen en försumbart liten ökning av avskalningen (ca 10%).

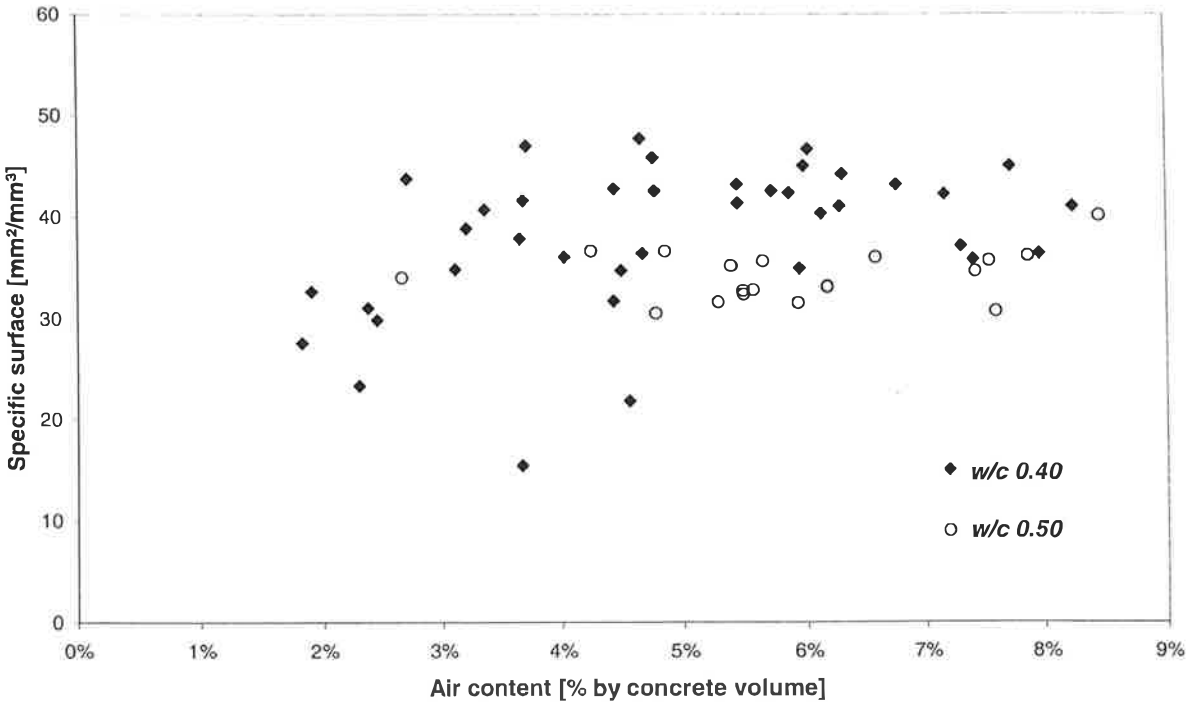
I syfte att eliminera de effekter som provernas position i skåpen kan ha haft på de temperaturcykler som de enskilda proverna utsattes för, flyttades proverna runt i skåpen (även mellan de två skåpen) i samband med uppsamlandet av avskalat material. Särskilt protokoll över provernas positioner upprättades.

Resultat av porsystemanalys med bildanalys, utförd vid LTH/BML

Endast i undantagsfall har beräkningarna givit negativa tal på antalet luftporer i någon klass. Således har beräkningsresultaten behövt justeras endast i undantagsfall och det statistiska underlaget kan därmed betraktas som tillräckligt bra.

Spridning i egenskaper hos de erhållna luftporsystemen

I figur 16 visas hur specifika ytan (enl. ekv 2) varierar med totala lufthalten. Som framgår av figuren ger den använda luftporbildaren lägre specifik yta i betong med vct 0.50 än i betong med vct 0.40, oavsett vilken av de fyra tillverkningsprocesserna A-D som använts. Vidare framgår att den specifika ytan är så gott som oberoende av totala lufthalten i betong med vct 0.50, men att den varierar i betong med vct 0.40, särskilt vid lufthalter lägre än 5%.



Figur 16: Samband mellan total lufthalt och specifik yta (bestämda med bildanalys vid LTH/BML).

Resultat av porsystemanalys med linjär travers, utförd vid Dansk Beton Teknik A/S

Liksom för mätningarna vid LTH/BML har kordafördelningarna blivit sådana att beräkningarna av porstorleksfördelningar endast i undantagsfall har givit negativa tal på antalet luftporer i någon klass. Således har beräkningsresultaten behövt justeras endast i undantagsfall och det statistiska underlaget kan därmed betraktas som tillräckligt bra.

Vidare analys av och beräkningar grundade på data från DBT kan göras i en fortsatt analys av resultaten från denna studie.

Resultat av Kapillärsugningsförsök

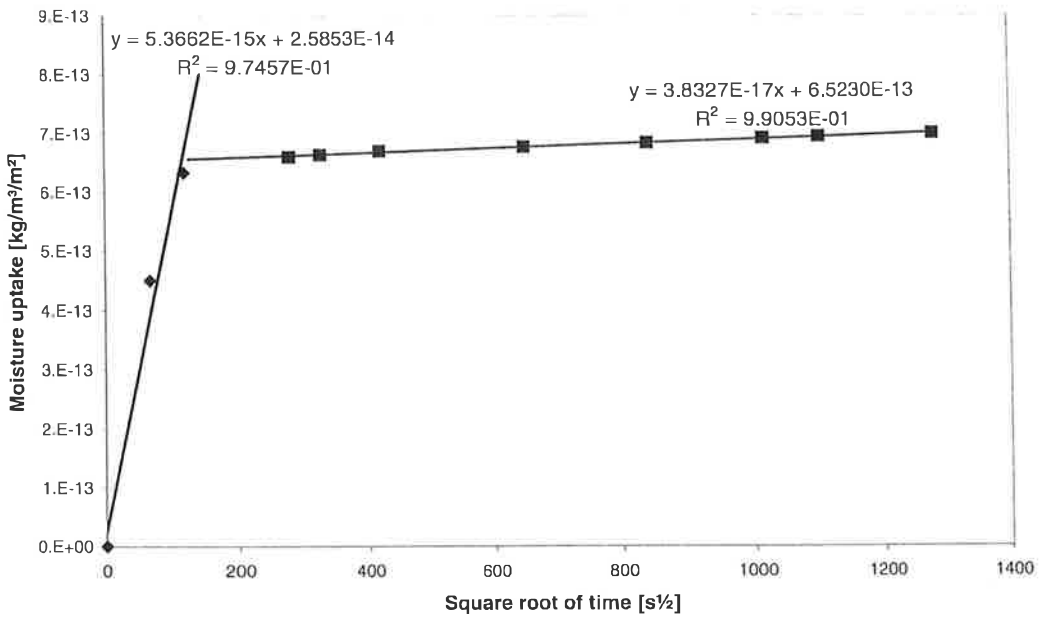
Ett exempel på resultat från kapillärsugningsförsök ges i figur 17. Fuktupptagningen sker snabbt upp till den så kallade knickpunkten, varefter fortsatt upptag sker i betydligt lägre takt. Tidsberoendet kan för bägge förloppen enkelt beskrivas med ekvationer av typen

$$\Delta m(t) = A \cdot \sqrt{(t - t_0)} + B \qquad (23)$$

där m är provets massa och

$$\Delta m = m(t) - m(t_0) \qquad (24)$$

A och B är konstanter som anpassas till varje enskilt provs resultat. I syfte att skilja på vattenupptagningshastigheterna före och efter knickpunkten, används indexen *pre* respektive *post* till konstanten A (A_{pre}, A_{post}). I dessa resultat (mätningarna pågick 3 veckor) ger anpassning med ekvationer av typen (23) mycket god anpassning till förloppen efter knickpunkten; Av 48 testade provkroppar är det

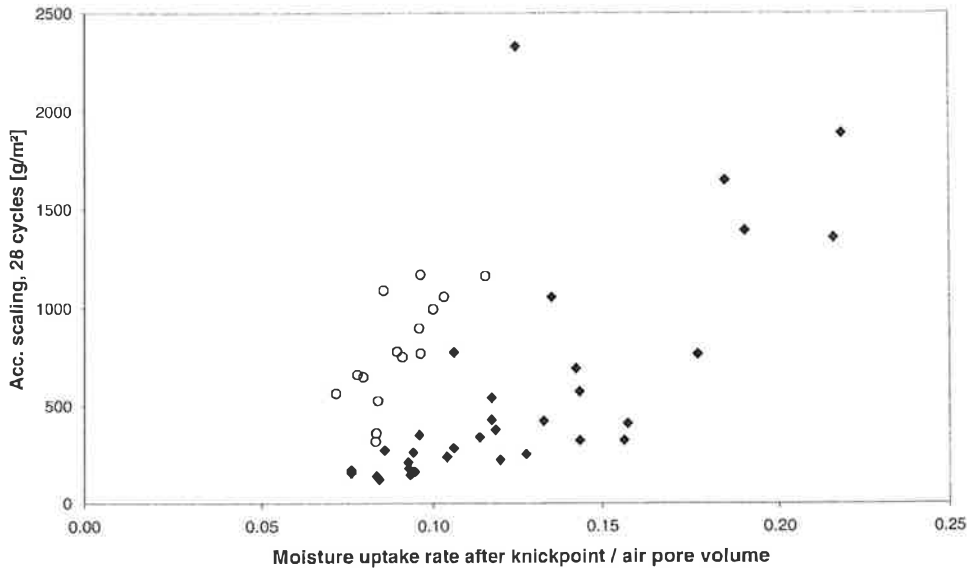


Figur 17: Resultat från kapillärsugningsförsök. Provkropp B4D (vct 0.40), torkad ett dygn i 50°C före försöksstart.

endast 4 som ger ett R^2-värde lägre än 0.98 (lägsta värdet är 0.96). Huruvida fuktupptagningen fortsätter enligt samma ekvation ända fram till full vattenmättnad av porsystemet är okänt.

Knickpunkten uppskattas som skärningspunkten mellan linjerna enligt de två ekvationerna i diagrammet över fuktupptagningen mot kvadratroten ur tiden, se figur 17.

Man kan förvänta sig att porsystem som ger snabb fuktupptagning efter knickpunktspassagen också ger dålig frostbeständighet. Detta är dock inte säkert, eftersom snabb fuktupptagning kan bero på att det finns många bubblor där upptaget sker så att totala fuktupptaget blir stort utan att varje enskild bubbla blir kritiskt fylld. Således bör man ställa upptagningshastigheten i relation till totala lufthalten. Ett exempel på detta visas i figur 18. Sambanden syns dock inte vara användbara för förhandsbedömning av en betongs potentiella saltfrostbeständighet.



Figur 18: Ackumulerad avskalning efter 28 cykler i förhållande till kvoten av uppsugningshastigheten efter knickpunkten och luftporernas samlade volym. ♦: vct 0.40, o: vct 0.50.

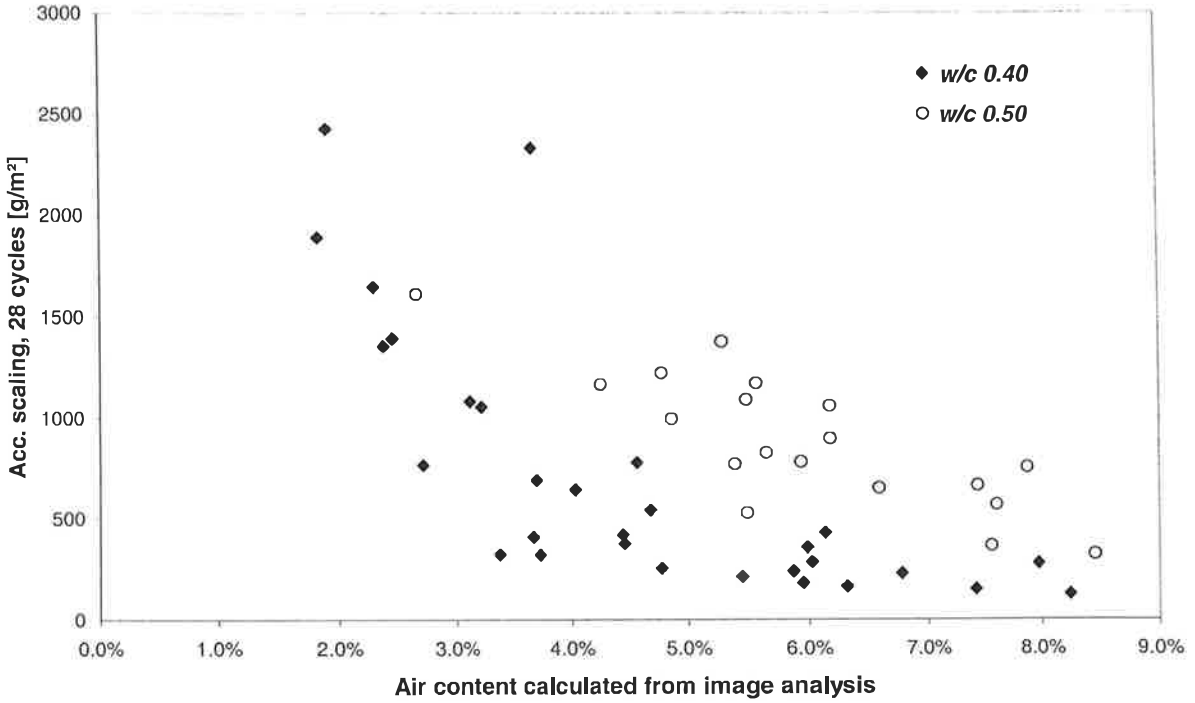
DISKUSSION - SAMBAND MELLAN PORSTORLEKSFÖRDELNING OCH AVSKALNING

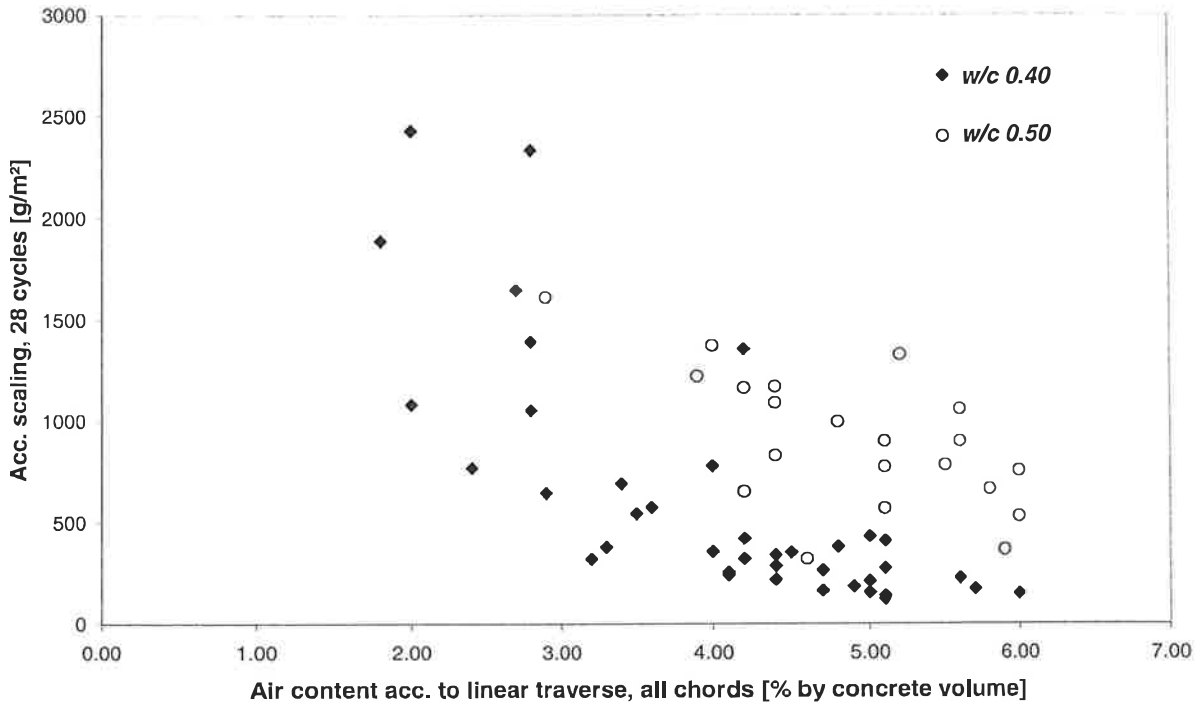
Traditionella samband

De enklaste, och vanligaste, samband man kan studera är den slutgiltiga ackumulerade avskalningens beroende av den totala lufthalten, den specifika ytan för luftporsystemet och luftporsystemets avståndsfaktor. I figur 19-21 redovisas dessa samband så som de bestämts dels med den diameterbaserade beräkningen av luftporsystemet, dels med linjär travers och beräkning enligt ASTM C457.

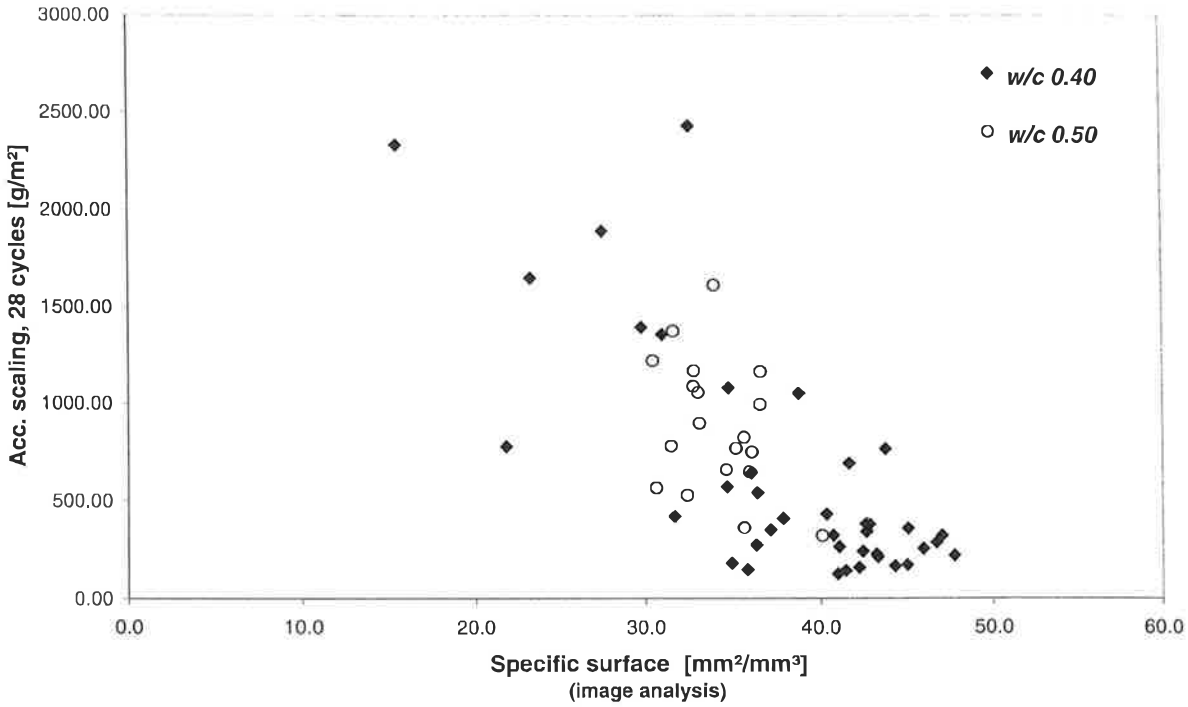
Medan man kan skönja ett visst samband mellan avståndsfaktor och avskalningar, är sambandet mellan total lufthalt och avskalning samt sambandet mellan specifik yta och avskalning direkt dåliga. I samtliga fall är sambanden tydligare för betongerna med vct 0.40 än för de med vct 0.50.

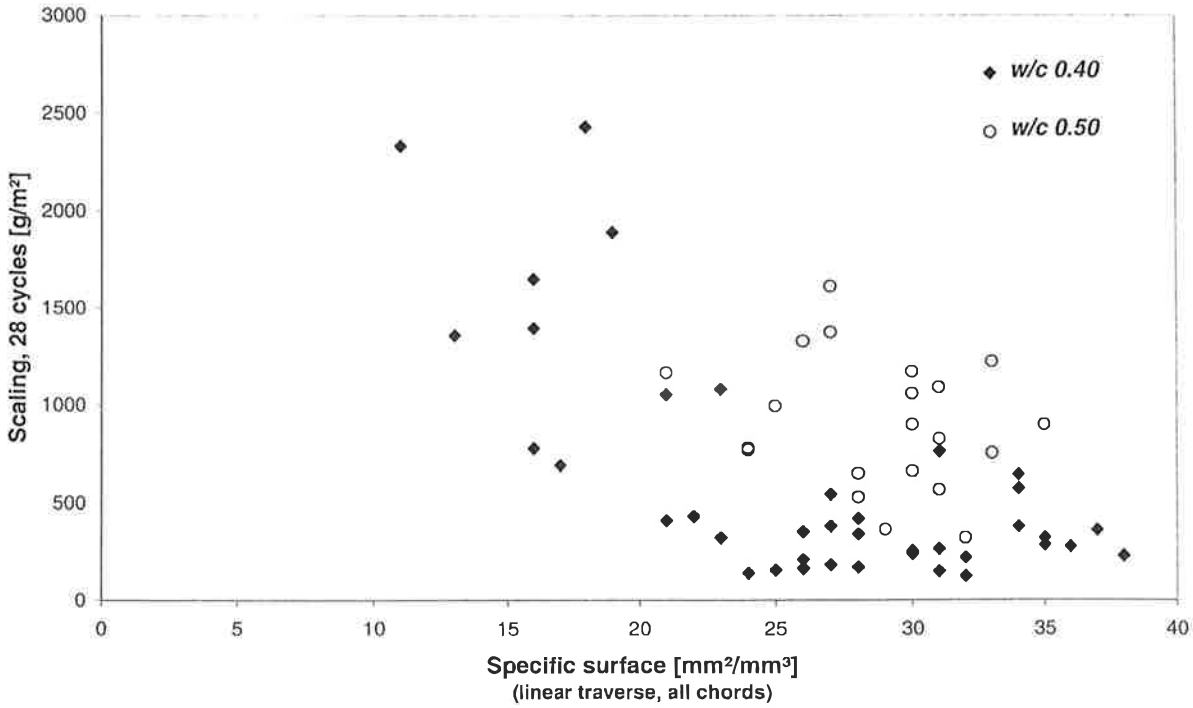
Inget av de testade sambanden ger någon säker koppling mellan å ena sidan total lufthalt, specifika yta eller avståndsfaktor och å andra sidan ackumulerad avskalning.



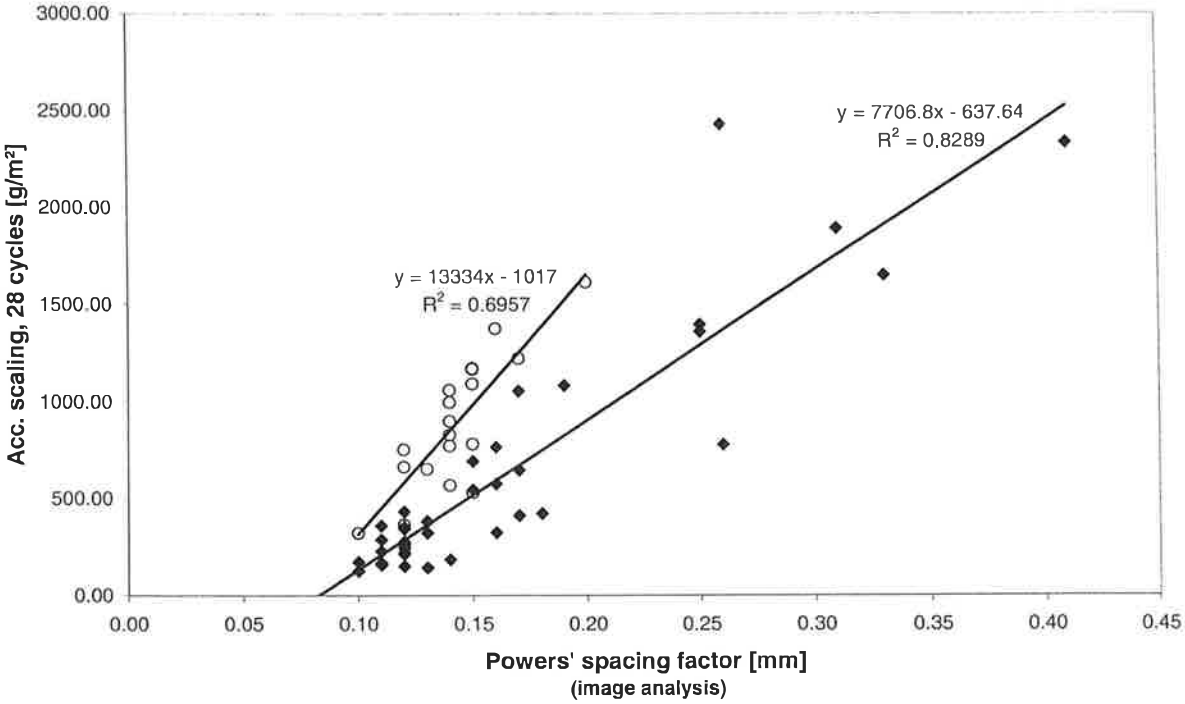


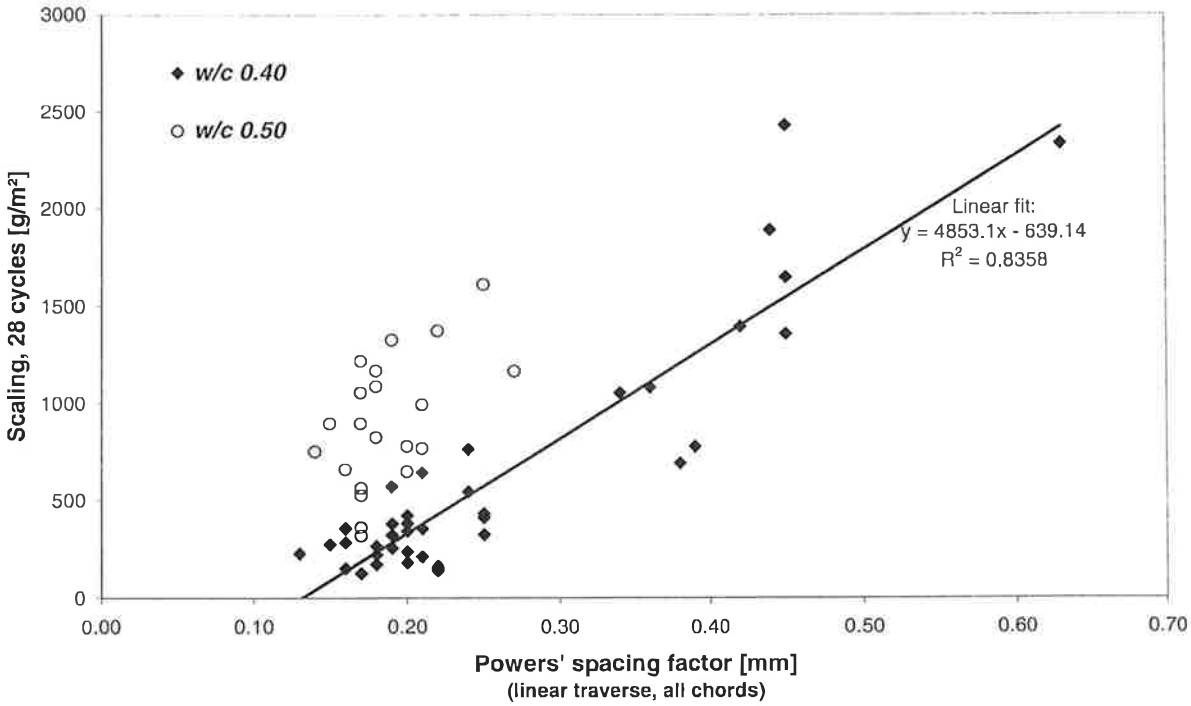
Figur 19: Samband mellan ackumulerad avskalning (medelvärde för tre provkroppar) och totalt luftinnehåll. Övre: Luftinnehållet bestämt som summerade volymen av de beräknade luftporsystemen. Nedre: Lufthalten bestämd enligt ASTM C457 från mätning med linjär travers.



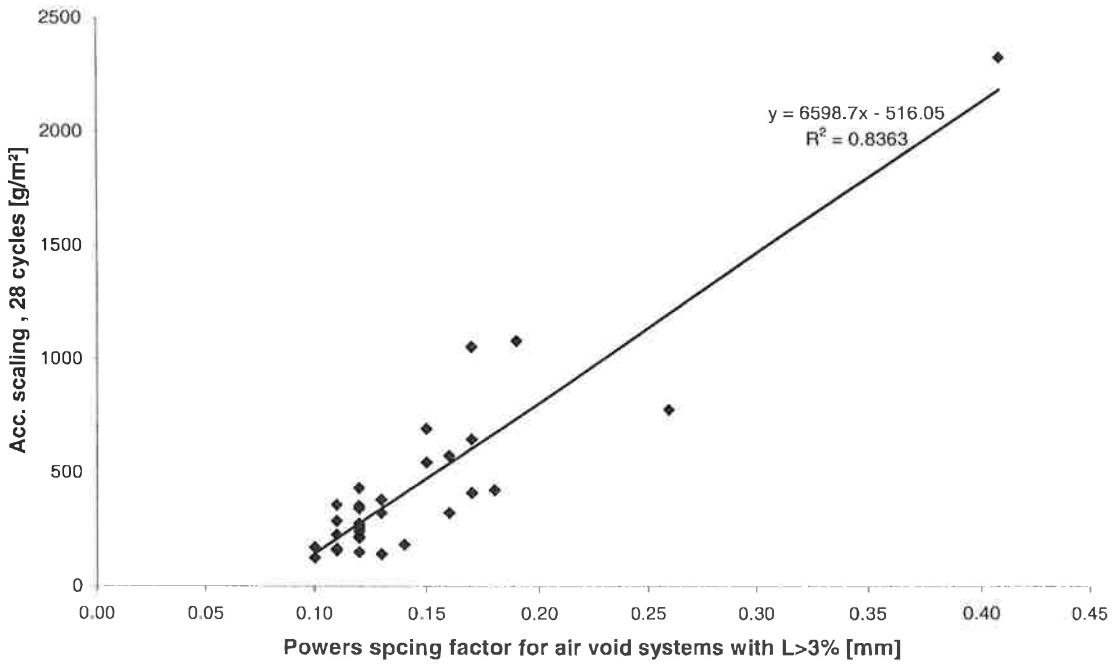


Figur 20: Samband mellan ackumulerad avskalning (medelvärde för tre provkroppar) och luftporsystemets specifika yta. Övre: Specifika ytan bestämd som summerade mantelytan dividerad med summerade volymen för de beräknade luftporsystemen (ekv. 2). Nedre: Specifika ytan bestämd enligt ASTM C457 från mätning med linjär travers (ekv. 9).



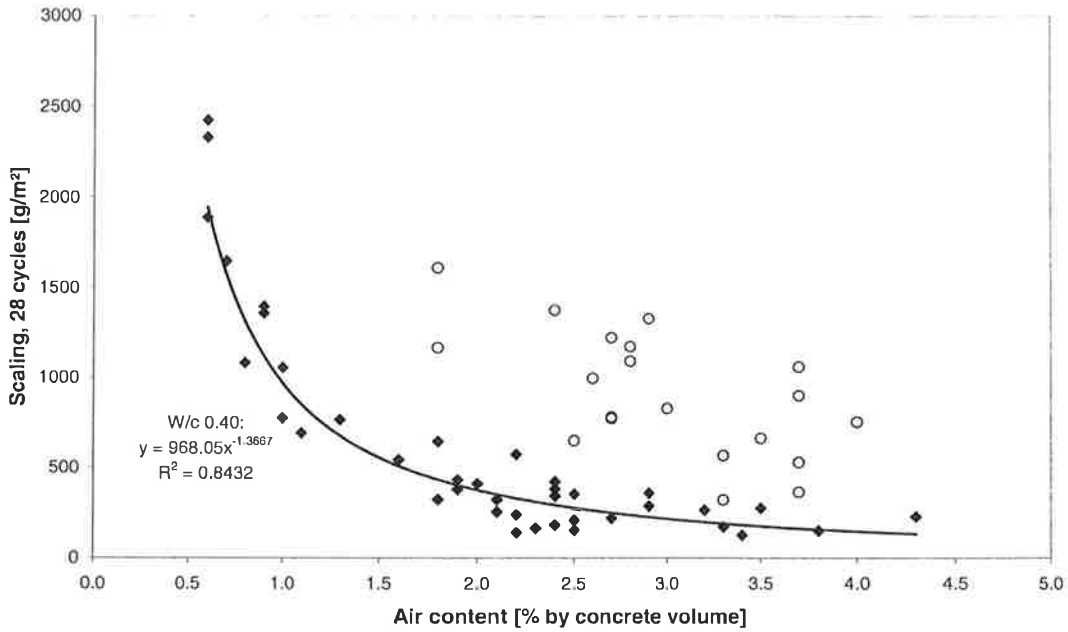


Figur 21: Samband mellan ackumulerad avskalning (medelvärde för tre provkroppar) och Powers avståndsfaktor (ekv. 4) för luftporsystemen. Övre: Avståndsfaktorn bestämd utifrån total lufthalt och specifik yta beräknade för de beräknade luftporfördelningarna. (ekv. 2). Nedre: Avståndsfaktor bestämd med total lufthalt och specifik yta bestämda enligt ASTM C457.



Figur 22: Samband mellan ackumulerad avskalning och Powers avståndsfaktor. Endast luftporsystem med total lufthalt >3%. Vct 0.40.

Som nämnts ovan spelar avståndsfaktorn ingen roll om inte lufthalten överskrider det kritiska värde som avgörs av hur stor volym is luftporerna måste ge utrymme för. Vid analysen av krav på avståndsfaktor bör man därför inrikta sig enbart på luftporsystem med lufthalt över en viss nivå. Av figur 19 kan man gissa att den lägsta acceptabla lufthalten är cirka 3% för betong med vct 0.40. En analys av sambandet mellan avskalningar och avståndsfaktor för de betonger som uppfyller detta krav visas i figur 22. Som figuren visar leder detta dock inte till någon nämnvärd förbättring av sambanden.



Figur 23: Ackumulerad avskalning efter 28 cykler ritade mot andelen kordor med längd <350μm av totala traverslängden.

Vid Dansk Beton Teknik ger man ett mått på luftporsystemets kvalitet genom att ange andelen kordor med längd<350μm av den totala traverslängd. När avskalningarna ritas mot denna parameter fås samband enligt figur 23. Sambandet är bra för betong vct 0.40, men dåligt för betong med vct 0.50.

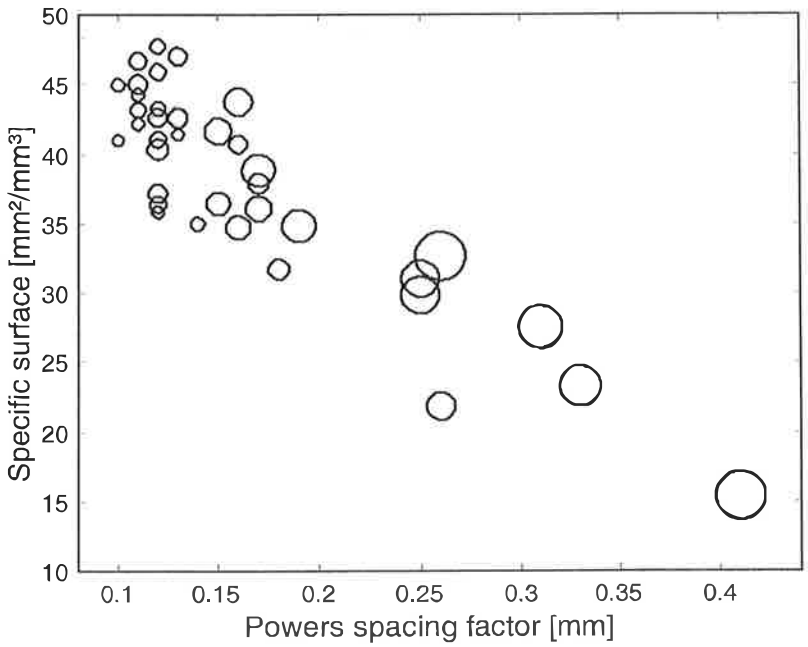
Alternativa samband

Eftersom det är orimligt att förvänta sig att enbart en hög specifik yta eller enbart en liten avståndsfaktor skulle kunna ge god beständighet, kan man studera hur dessa samverkar i diagram av den typ som visas i figur 24-26. Avskalningarnas storlek representeras här av storleken på de markerande ringarna.

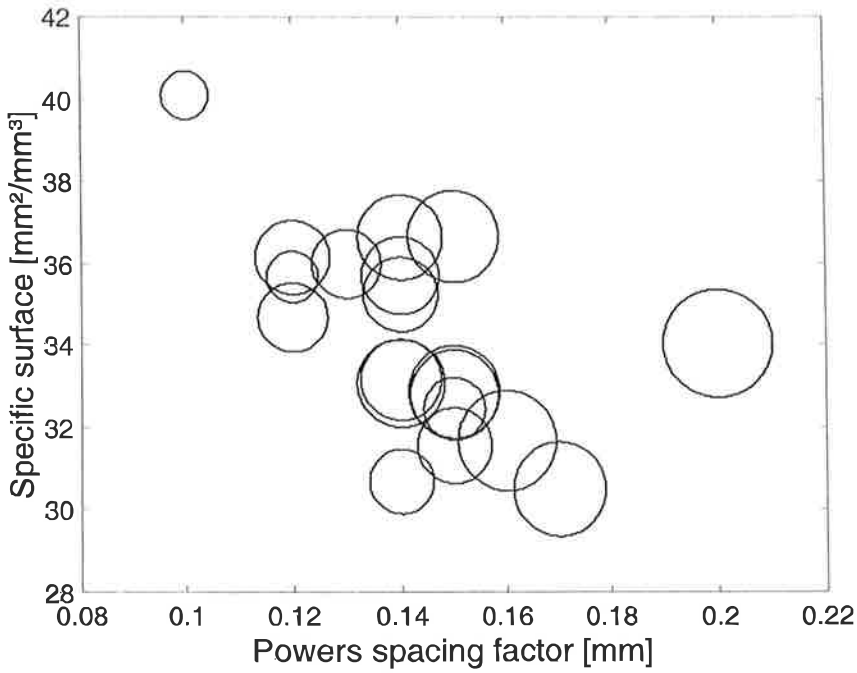
För betong med vct 0.40 kan man skönja ett visst samband: Det står klart att då avståndsfaktorn överskrider 0.14 mm ökar skadornas storlek (figur 24). På samma sätt ökar skadorna då specifika ytan för luftporsystemet (beräknad enligt ekv. 2) underskrider 35 mm²/mm³. För betong med vct 0.50 (figur 25) går det dock inte att urskilja något tydligt samband.

En del av figur 24 har förstorats i figur 26. Av denna framgår en svag trend att avskalningarna når ett minimum vid en specifik yta av omkring 42-43 mm²/mm³; Detta är logiskt, vilket kommer att framgå av de studier av vattenupptagningshastighetens beroende av luftporsystemets karaktäristika och den initiella lufthaltens betydelse för slutlig avskalning som redovisas nedan.

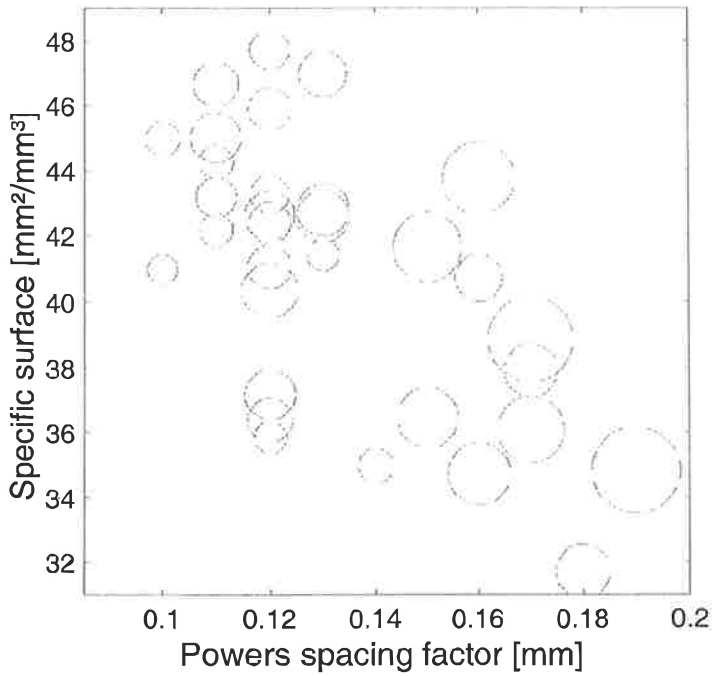
Det kan ifrågasättas om det är korrekt att utvärdera luftporsystemets funktion med hjälp av parametrarna specifik yta och avståndsfaktor, eftersom den senare är beräknad från ett mätt värde på den första och de två således är starkt beroende av varandra så länge man använder en och samma betongkvalitet. Jag har i alla fall valt att göra detta här för att visa hur sambanden ter sig.



Figur 24: Avskalningar för vct 0.40 efter 28 cykler (representerat av ringarnas area) i relation till specifik yta (ekv. 2) och Powers avståndsfaktor (ekv. 4).

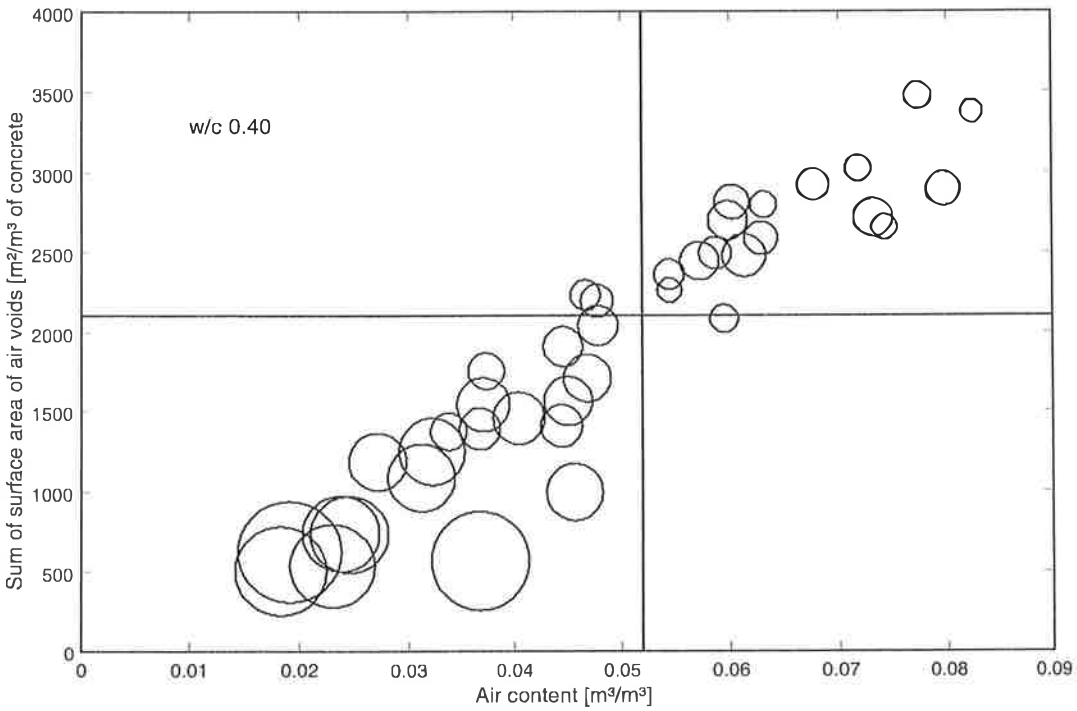


Figur 25: Avskalningar för vct 0.50 efter 28 cykler (representerat av ringarnas area) i relation till specifik yta (ekv. 2) och Powers avståndsfaktor (ekv. 4).

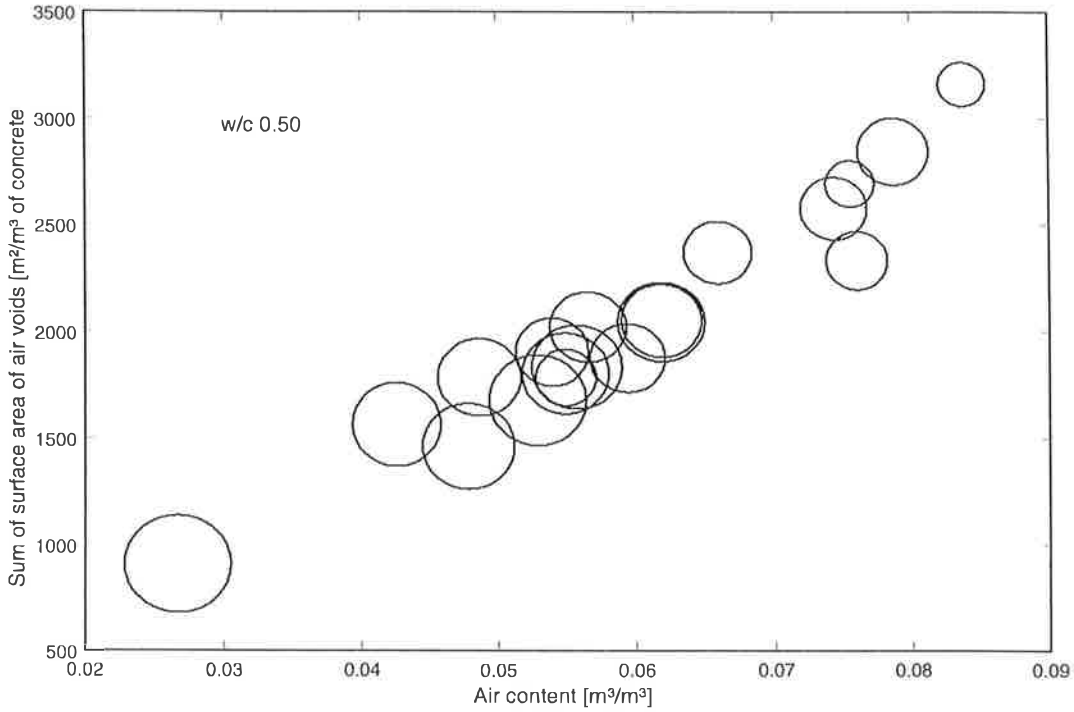


Figur 26: Förstorad del av figur 24.

Att söka samband av den typ som visas i figur 24-26 är vanskligt, eftersom den specifika ytan, beräknad enligt ekv. 2, är ett medelvärde för hela systemet. I figur 27 visas därför samband mellan luftporernas totala mantelyta, totala luftinnehåll och den slutliga avskalningen. Figuren antyder att både total mantelyta och total lufthalt bör överskrida vissa värden. I detta fall, betong med vct 0.40, kan man se att avskalningarna når någon sorts acceptabelt värde då mantelytan överskrider cirka 2100 m^2/m^3 betong och lufthalten samtidigt överskrider 5.2% (om alla luftbubblor vore av en enda storlek skulle de ha diametern 150µm, dvs en specifik yta av 40 mm^{-1}). Detta "acceptabla" värde är dock helt godtyckligt valt, eftersom det inte finns något acceptanskriterium för den här använda frystestmetoden. Dessutom visar figuren tydligt att luftporfördelningarna i denna studie är mycket likartade i formen (se t.ex. figur 41): Mantelytan växer direkt proportionellt med totala luftvolymen. Det hade varit önskvärt att nå en större spridning mellan de olika systemen. (Motsvarande samband för betong vct 0.50 visas i figur 28. Återigen är sambanden otydligare.)



Figur 27: Avskalningarnas storlek (representerad av storleken på markerande ring) i relation till luftporsystemets totala mantelyta och total lufthalt. Betong vct 0.40. Begränsningslinjerna godtyckligt placerade.



Figur 28: Avskalningarnas storlek (representerad av arean på markerande ring) i relation till luftporsystemets totala mantelyta och totala lufthalt. Betong vct 0.50.

Eftersom mantelyta och lufthalt samvarierar testas i stället om det finns något samband mellan avskalningarnas storlek i relation till *både* specifik yta och total lufthalt. Detta visas i figur 29 och 30. För betong med vct 0.40 kan ses att avskalningarna minskar dels då specifika ytan når höga värden, dels då totala lufthalten når höga värden. Ett försök till gränsdragning har placerats in i figur 29 (heldragen linje). Den inplacerade, heldragna linjen har ekvationen

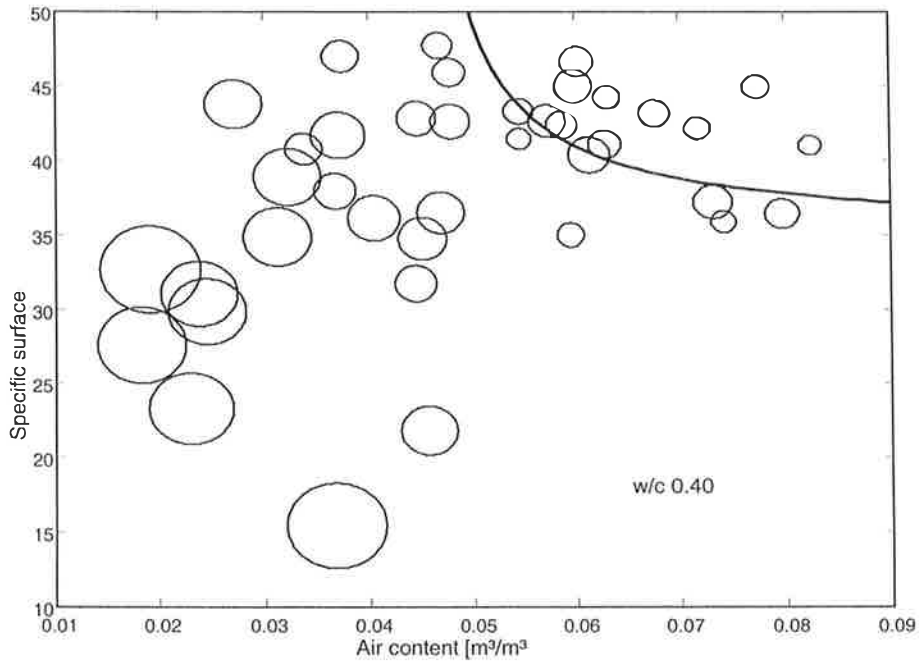
$$(\alpha - \alpha_{crit})(L - L_{crit}) > k \qquad (25)$$

där L uttrycks i m³ luft per m³ betong och k är det krav som ställs på produkten av de bägge differenserna.

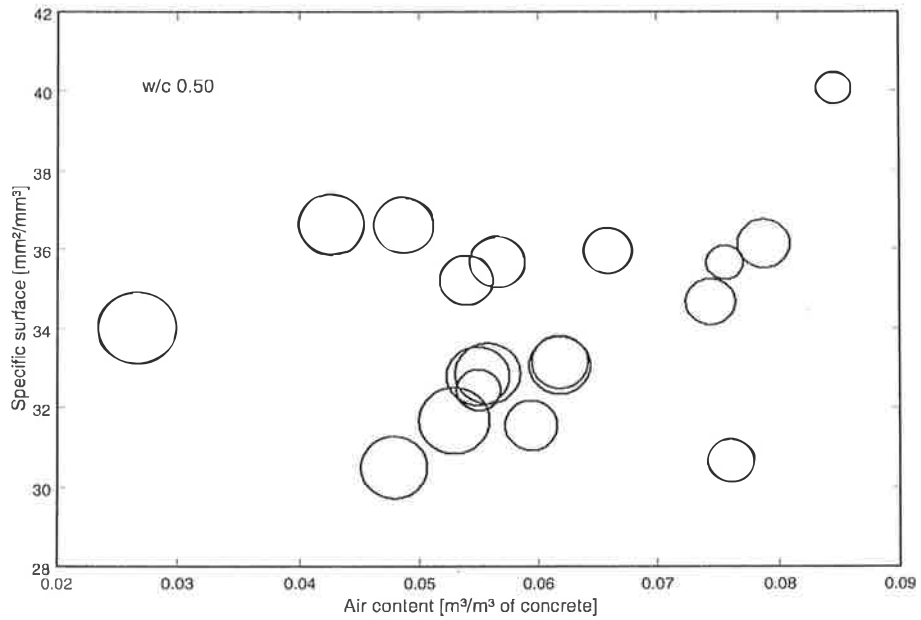
Ekvationen är baserad på kritiska värden på *både* lufthalt och specifik yta, eftersom det är orimligt att förvänta sig att t.ex. en oändligt hög specifik yta skulle kunna rädda en betong med 0% luftinnehåll. Ekvationen har därför två asymptoter, en vid α_{crit} och en vid L_{crit}. För den inlagda kurvan i figur 29 har k satts till 0.1, α_{crit} till 35 mm²/mm³ och L_{crit} till 0.043 m³/m³. Denna godtyckligt valda ekvation ger strängare krav på luftporsystemets egenskaper än vad som brukar anges i litteraturen: Vid en lufthalt av 5% ger ekvationen att det krävs en specifik yta på 49.3 mm²/mm³. Ett vanligt krav är 5% luft och α=30mm^{-1}. Detta förkaras dock av att kraven på specifik yta normalt (av tradition) är baserade på luftporanalyser utförda med linjär travers. Eftersom en sådan mätning ger avsevärt lägre specifik yta för ett och samma luftporsystem än vad en beräkning enligt ekvation (2) ger, är det också helt logiskt att kravet är lägre.

Kravet k>0.1 är godtyckligt valt för resultaten i denna studie och kan därför inte reservationslöst användas tillsammans med SS 13 72 44. Ekvationen visar endast vilken typ av samband som skulle kunna upprättas för provningar enligt SS 13 72 44. Konstanterna α_{crit} och L_{crit} torde t.ex. vara beroende av betongens sammansättning (vct, förekomst av silika, etc.)

För betong med vct 0.50 är det, i det aktuella testresultatet, svårt att urskilja någon trend liknande ekv. (25), men resultatet kan ändå bekräfta användbarheten av ekvation 25; Av figuren framgår att endast en av betongerna med vct 0.50 har en specifik yta som överträffar det krav, k>0.1, som ställdes ovan. Denna betong uppvisar också, som förväntat, ett av de lägsta värdena på slutlig avskalning bland betongerna



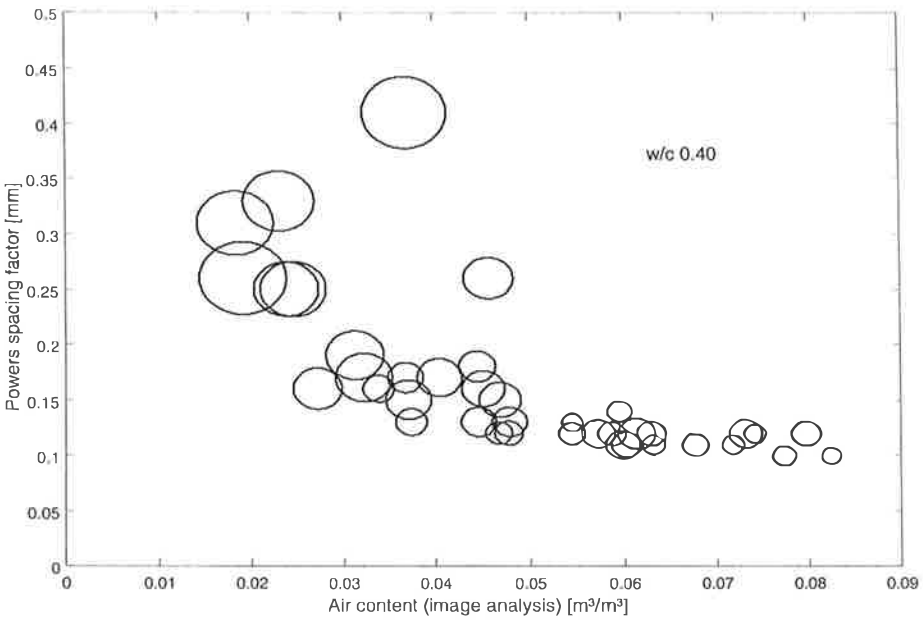
Figur 29: Avskalningarnas storlek (representerade av ringarnas storlek) i relation till specifik yta och total lufthalt, w/c 0.40. Heldragen linje: ekv. (25).



Figur 30: Avskalningarnas storlek (representerade av ringarnas storlek) i relation till specifik yta och total lufthalt, w/c 0.50. Observera skalorna!

med vct 0.50. Övriga prover klarar inte kravet och visar också generellt betydligt högre avskalning än betongerna med vct 0.40.

Ett likartad samband kan ställas upp mellan avståndsfaktor och lufthalt, figur 31. Trots sin något mer logiska grund (det förefaller enklare att förstå kraven på lufthalt och avstånd än kraven på lufthalt och specifik yta), ger detta inte samma möjlighet till enkel beskrivning med en ekvation, eftersom avstånds



Figur 31: Samband mellan lufthalt (summerade porstorleksfördelningen), Powers avståndsfaktor (ekv. 4) och avskalningar (representerade av ringstorlekarna).

faktorn måste *underskrida* ett visst, kritiskt värde samtidigt som lufthalten måste *överträffa* ett kritiskt värde. Här är det därför enklare att direkt fastställa att lufthalten skall vara större än 5% och avståndsfaktorn mindre än 0.13 mm (under de aktuella förhållandena och med ett godtyckligt valt acceptanskriterium).

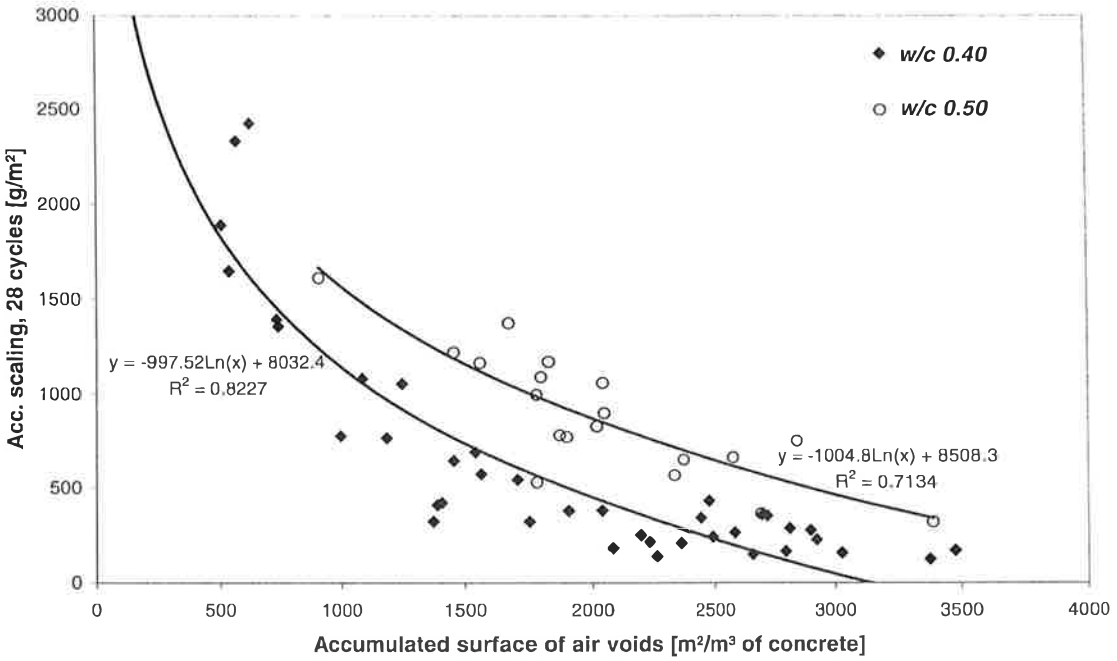
Krav på sfärernas totala mantelyta ("dräneringsyta")

Eftersom det krävs både korta avstånd och viss total volym hos luftporsystemet, dvs dels en viss specifik yta, dels en viss volym, kan man tänka sig att det går att hitta samband mellan luftporsystemets samlade mantelyta och materialets frostbeständighet. Hypotesen är alltså att om mantelytan är tillräckligt stor, blir lufthalten tillräcklig samtidigt som dräneringsvägarna blir korta, eftersom en stor mantelyta åstadkoms av ett stort antal små bubblor, så länge man använder normala luftporbildare. I ett system med α=30mm^{-1} och L=50 l/m³, är sfärytan 1500 m². Delar man upp 1 m³ av betongen i 1500/2=750 skivor, blir varje skiva 1.33 mm tjock, vilket är nära den s.k. kritiska tjockleken för betong, dvs den största tjocklek en skiva fullt vattenmättad betong kan ha utan att skadas vid frysning. Denna sammanlagda yta skulle således kunna ge tillräckligt korta dräneringsvägar, men är då totalvolymen tillräcklig? Volymkravet kan grundas antingen på att den 9 procentiga expansionen skall kunna tas om hand, eller på att hela den frysande vattenmängden (inkl de 9%) skall kunna tas om hand, eftersom man kan antaga att hela denna volym lämnar kapillärporerna och samlas i luftporerna. Om frysbara vattenmängden är 50 l/m³ kan då luftkravet vara allt från 0.09×50=4.5 l/m³ till 50×1.09 ≈ 55 l/m³. Troligen ligger verkliga kravet någonstans däremellan, eftersom en del fukt kan antagas frysa i kapillärporerna utan att ge skador. Om vi ställer kravet total mantelyta =2000 m²/m³, och antar att bubblorna är av en och samma storlek, t.ex. D = 200µm (motsvarande α = 30 mm²/mm³), blir totala volymen 67 l/m³, vilket således skulle vara mer än tillräckligt även för det fall att hela den frysbara vattenmängden transporteras in i luftporerna.

I ett mycket finfördelat luftporsystem kan man tänka sig att den totala volymen blir för liten om man endast ställer krav på totala mantelytan. Men om vi antar att bubblorna har det ovanligt låga värdet D =100 µm, svarande mot det mycket höga värdet α = 60 mm^{-1}) blir den totala lufthalten, då totala mantelytan är 2000 m²/m³, ändå 33 l/m³, vilket, med hänsyn till vad som visas i figur 33, skulle kunna vara tillräckligt, förutsatt att luftporsystemet *de facto* förblir fyllt med luft.

OBS! Ovanstående resonemang gäller naturligtvis endast prover med låst fuktinnehåll: Om provet tar upp fukt under pågående frysning kan kravet på total luftvolym behöva höjas.

I figur 32 visas sambandet mellan slutlig ackumulerad avskalning och luftporsystemets mantelyta för de båda testade betongerna. Sambandet är något bättre än sambandet mellan avskalningar och nominell luft



Figur 32: Avskalningen efter 28 cykler som funktion av (det ofyllda) luftporsystemets totala mantelyta.

halt som visades i figur 19. Anpassning av logaritmiska ekvationer ger ganska svaga korrelationer, men antyder att sambanden har samma form för bägge betongerna. Nivån ligger dock högre för vct 0.50 än för vct 0.40, vilket förstås är i enlighet med vad som kan förväntas. Särskilt för betong med vct 0.40 kan man av resultaten se att det tycks finnas någon form av kritiskt värde på den samlade mantelytan vid omkring 1800 m²/m³ betong: Sänkning av mantelytan under detta värde höjer avskalningarna, medan en ytterligare höjning utöver detta värde endast ger små minskningar av avskalningarna. Detta antyder att hur väl-utvecklat luftporsystem man än åstadkommer, kommer man inte att kunna undvika viss nedbrytning av betongen då den här använda testmetoden används.

Fler alternativa samband

Samtliga ovannämnda samband baserar sig på det torra luftporsystemets karaktäristika. Vid verklig frysprovning kommer dock vissa av luftporerna att vara delvis vattenfyllda då frysförsöken påbörjas och sedan kommer vattenhalten troligen att öka allteftersom provningen fortskrider. Denna fyllningsprocess har studerats teoretiskt av Fagerlund[1], som gör förutsättningen att små bubblor fylls fullständigt innan större bubblor börjar fyllas. Dessa teorier ger anledning att utföra följande studier:

- Finns det ett samband mellan resterande lufthalt i proverna före frysförsökens början och slutlig avskalning?
- Kan man finna tydliga samband genom att rita den slutliga avskalningen mot luftvolymen i luftporer i ett visst intervall av porstorlekar?
- OM det finns ett samband mellan resterande lufthalt och avskalningar, vilket samband finns då mellan luftporsystemets karaktäristika och dess förmåga att fylla sig med vatten (fuktupptagningstakten efter knickpunkten)?

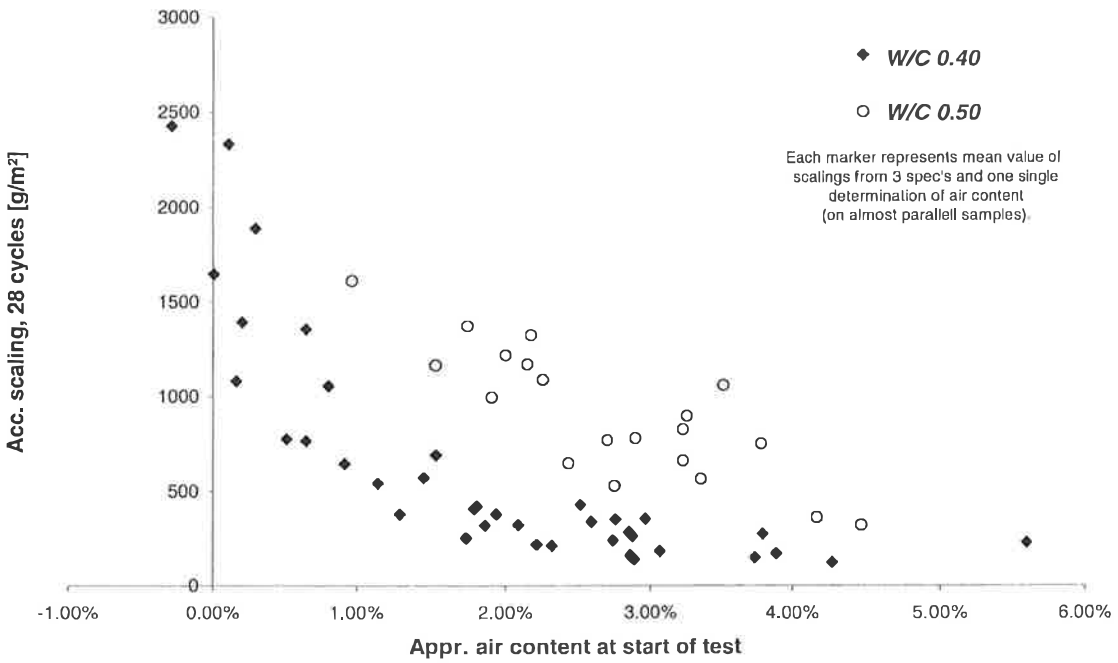
Finns det ett samband mellan resterande lufthalt i proverna före frysförsökens början och slutlig avskalning?

Lufthalten efter förlagringen kunde inte bestämmas utan att torka proverna i 105°C. I syfte att inte avvika alltför mycket från den specificerade förlagringen i SS 13 72 44 var det tvunget att undvika sådan torkning. Som mått på provernas lufthalt används därför den resterande lufthalt som de prover som användes för bestämning av porositet och densitet hade då dessa togs upp ur förlagringsbadet. Eftersom proverna för densitet och porositet hade lagrats 4 månader i kalkvatten då dessa bestämningar gjordes och frystest-

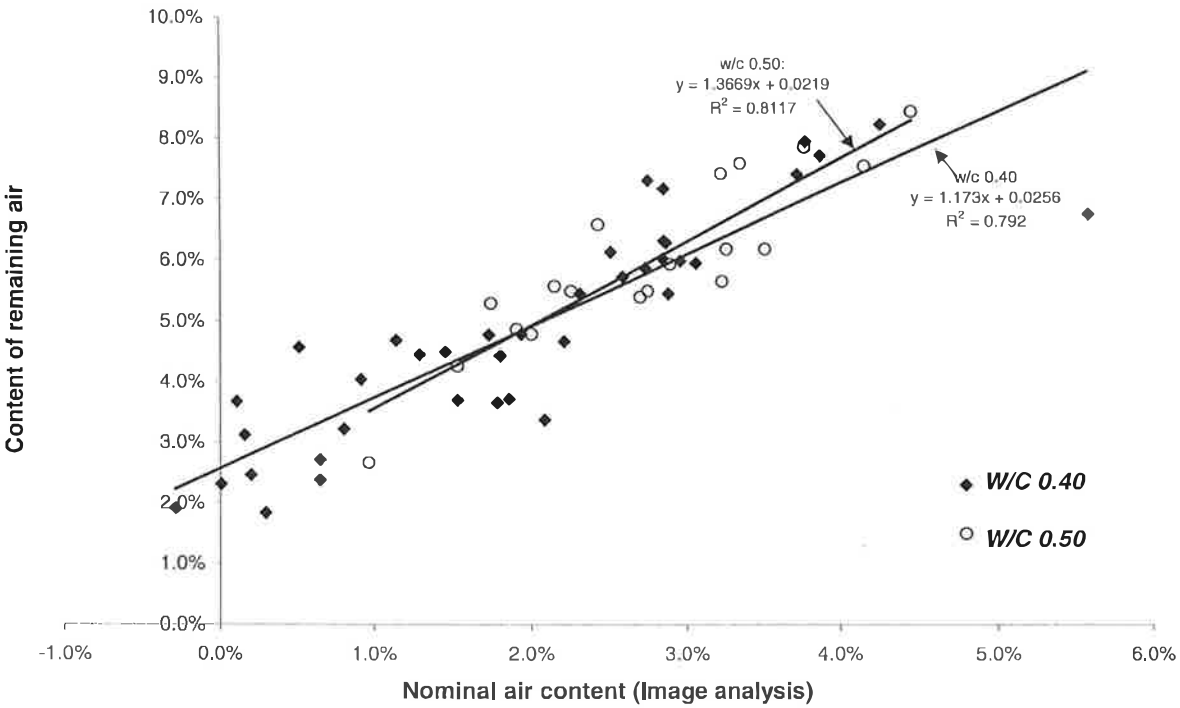
proverna hade lagrats 3 månader då dessa togs upp och genomgick den förbehandlingsprocess som beskrivits ovan ger det använda förfarandet naturligtvis inte helt korrekta värden, men förhoppningsvis ger det en god återspegling av de olika provernas lufthalt i förhållande till varandra. Troligen är luftinnehållet i frysproverna något högre än vad som mättes i porositets- och densitetsproverna. Kapillärsugningsförsöken visar dock att skillnaden i fuktupptagning mellan 3 och 4 månaders vattenlagring är mycket liten (se t.ex. figur 17).

För en av betongkvaliteterna är bestämningen av resterande lufthalt uppenbart oriktig (negativt värde). De andra ger dock ett samband mellan slutlig avskalning som är bättre än det mellan nominell lufthalt och avskalning (figur 19).

I figur 34 visas hur resterande lufthalt förhåller sig till den nominella lufthalten. Som en approximation kan sägas att i samtliga porsystem är den resterande lufthalten direkt proportionell mot den ursprungliga. Särskilt intressant är att bägge betongerna beter sig likadant. Detta antyder att den tätare porstrukturen i betong med vct 0.40 antingen kompenseras av det något högre pastainnehållet (36.5% mot 33.5% utan hänsyn tagen till de enskilda betongernas exakta lufthalt) eller inte har någon betydelse för den mekanism som reglerar fyllningen av luftporerna, dvs någon annan del i denna process sätter ett kraftigare hinder för processens hastighet än vad porstrukturen gör. I en fortsatt analys av dessa resultat bör effekten av exakt pastahalt studeras.



Figur 33: Samband mellan lufthalt vid början av frysförsöken och avskalningar. Lufthalten bestämd på liknande prover, se texten.



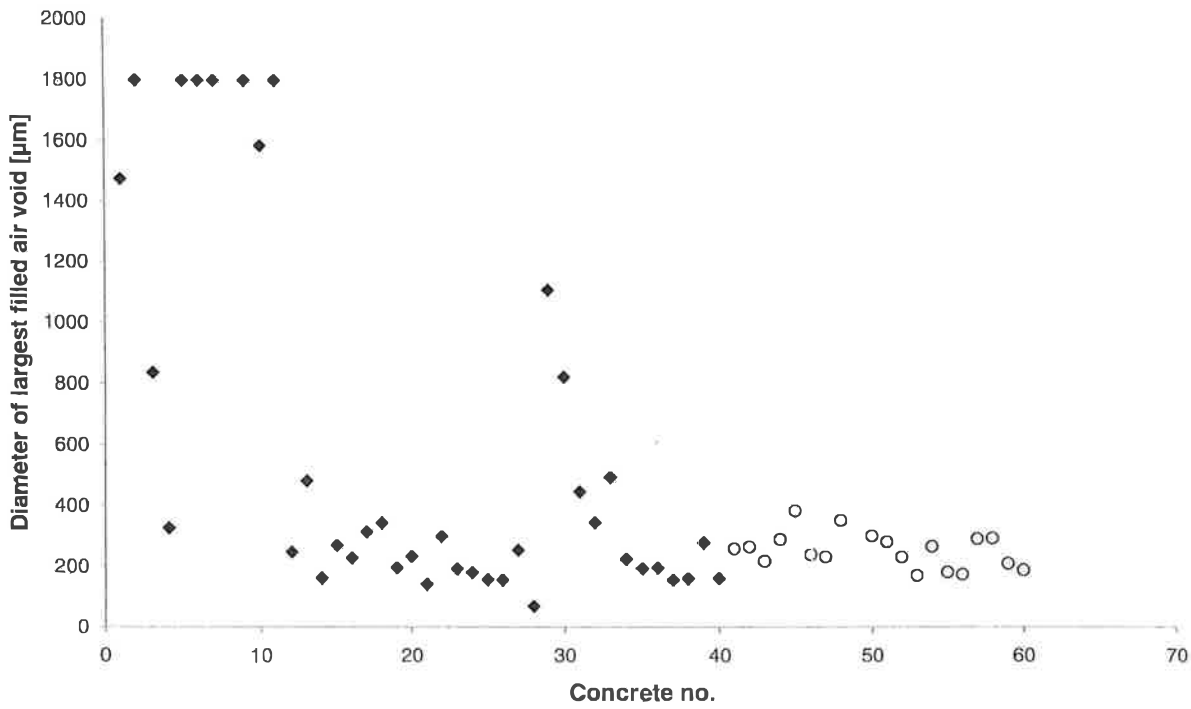
Figur 34: Samband mellan nominellt luftinnehåll enligt bildanalys (LTH/BML) och resterande luftinnehåll såsom det bestämts på (nästan) parallella prover (se texten)

Kan man finna tydliga samband genom att rita den slutliga avskalningen mot luftvolymen i luftporer i ett visst intervall av porstorlekar?

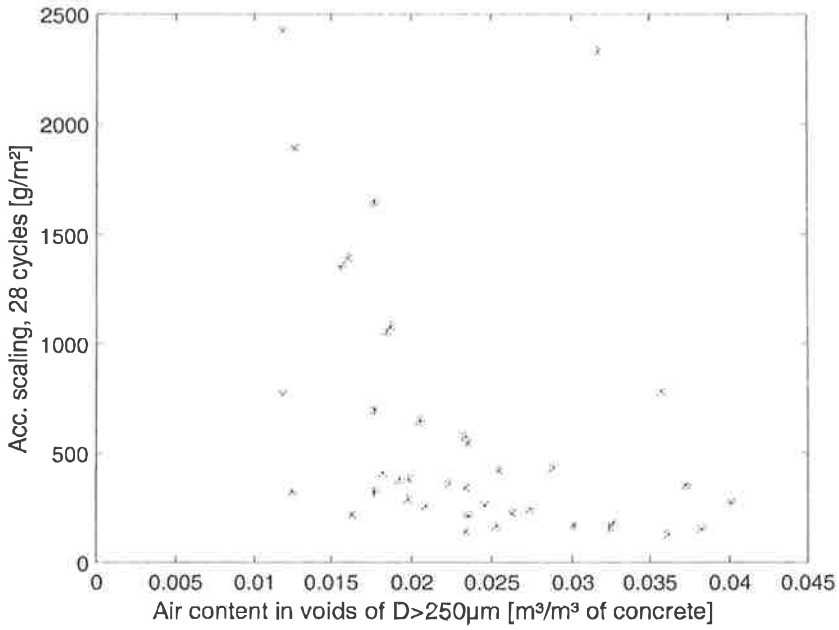
Enligt Fagerlunds hypotes[1] enligt vilken små luftporer fylls helt innan större börjar fyllas, skulle man kunna finna samband mellan luftvolymen i porer *större* än ett visst minsta belopp och den slutgiltiga avskalningen. Tidigare har föreslagits att det endast är luftbubblorna *under* en viss storlek som har någon betydelse, eftersom en tillräcklig volym av små bubblor också ger korta avstånd mellan bubblorna[18,19]. Dessa två idéer är således, i viss utsträckning, motstridiga varandra.

Vid beräkningen av luftporfördelningarna beräknades diametern på den största luftpor som skulle vara fylld med vatten om Fagerlunds hypotes är riktig. Beräkningen gjordes genom att från den ur bildanalysen beräknade lufthalten dra bort den resterande luftvolym som mätts på proverna för bestämning av porositet och densitet. Därefter hämtades värdet på diametern direkt ur porstorleksfördelningen. Resultatet visas i figur 35. Som framgår av figuren varierar värdet på den största fyllda porens diameter kraftigt mellan de olika betongerna. Detta visar att fyllningen av luftporerna inte sker i den ordningen att de minsta fylls fullständigt innan de större börjar fyllas. Troligen sker fyllningen parallellt i samtliga porer om dock något snabbare i de mindre. I en fortsatt analys av dessa data bör en modell kunna upprättas och kalibreras med vars hjälp varje porstorleks fyllnadsgrad som funktion av tiden skulle kunna beräknas.

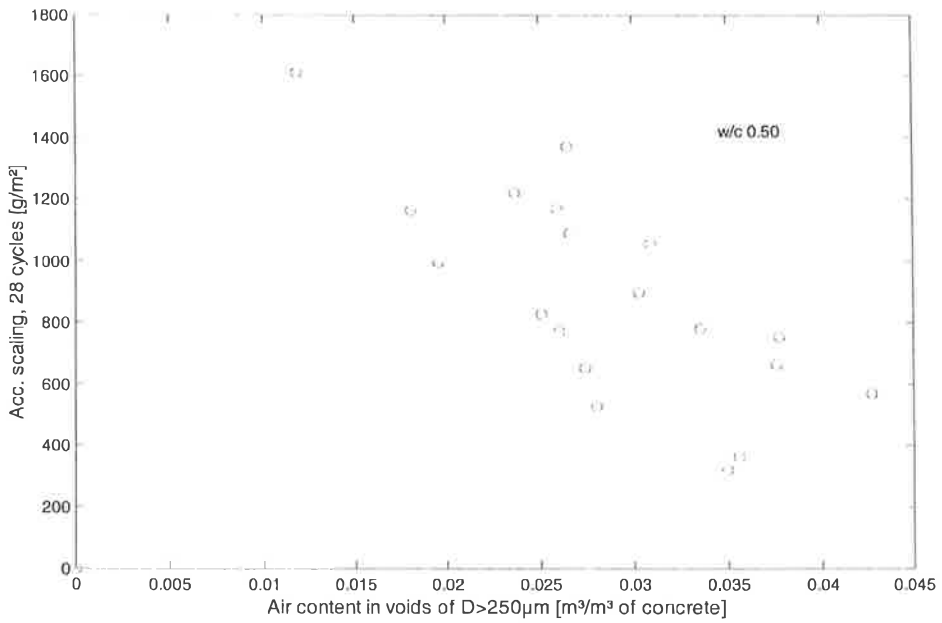
Trots att ingen väldefinierad diameter kunnat fastställas kan det vara intressant att se om det finns ett samband mellan avskalningar och luftinnehållet i porer med diameter större än ett värde som gissas med hjälp av resultaten i figur 35. I figurerna 36 och 37 visas exempel på sådant samband då den minsta diameter som tags med i lufthalten är 250 μm (dvs lufthalten i dessa figurer avser luftinnehållet i porer med diameter mellan 250 och 1800 μm).



Figur 35: Beräknad diameter hos den största luftpor i porsystemen som fyllts med vatten under förlagringen. ♦: vct 0.40, o: vct 0.50.

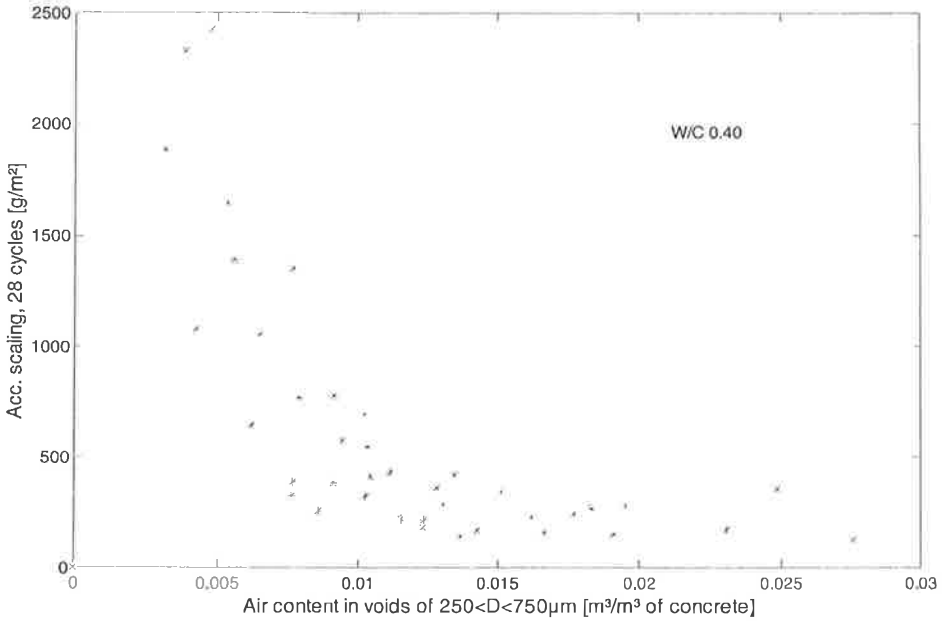


Figur 36: Samband mellan avskalning efter 28 cykler och beräknat luftinnehåll i luftbubblor med D>250 µm. Vct 0.40.

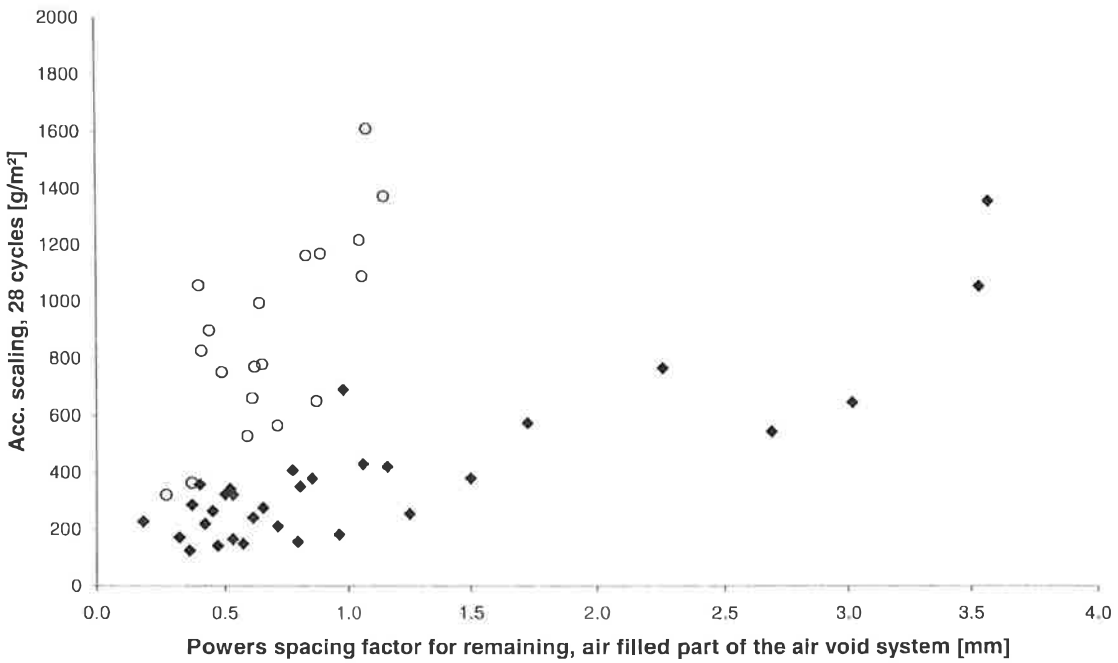


Figur 37: Samband mellan avskalning efter 28 cykler och beräknat luftinnehåll i luftbubblor med D>250 µm. Vct 0.50.

Som synes är sambanden dåliga. Ett bättre sätt kan därför vara att sätta även en övre gräns för vilka luftbubblor som skall inräknas. För betongen med vct 0.50 ger detta ingen förbättring. För betongen med vct 0.40 fås en viss förbättring, figur 38, i vilken avskalningarna ritats som funktion av innehållet av luft i luftbubblor med diameter i intervallet 250-750 µm. Detta samband är ungefär lika bra som det som råder mellan avskalningarna och den verkliga lufthalten vid start av frystest (figur 33). Ännu något bättre resultat kan erhållas om man sätter nedre gränsen till 150 µm och den övre i området 400-600 µm. Dessa sätt att relatera avskalningarna till luftporsystemet ger bättre samband än det som framgick i figur 19. Det går dock inte att säga, utifrån denna studie, huruvida det skulle räcka med cirka 1.2% luft i betongen för att nå avskalningar under 500 g/m² (såsom antyds i figur 38) om man kunde åstadkomma ett luftporsystem som enbart bestod av bubblor i intervallet 250<D<750 µm.



Figur 38: Samband mellan avskalning efter 28 cykler och beräknat luftinnehåll i luftbubblor med 250<D<750 µm. Vct 0.40.



Figur 39: Samband mellan ackumulerad avskalning och Powers avståndsfaktor beräknad för den del av luftporsystemet som kan beräknas förbli luftfylld under förlagringen.

Som framgått ovan ger Powers' avståndsfaktor, beräknad på hela luftporsystemets karaktäristika, ingen bra koppling till avskalningarna. Om man istället beräknar specifika ytan och lufthalten för den del av luftporsystemet som är ofylld (under förutsättning av att det beräknade värdet på diametern på den största, fyllda luftporen är korrekt) fås de samband som visas i figur 39. Jämfört med de samband som visades i figur 22 innebär denna förändring dock ingen förbättring.

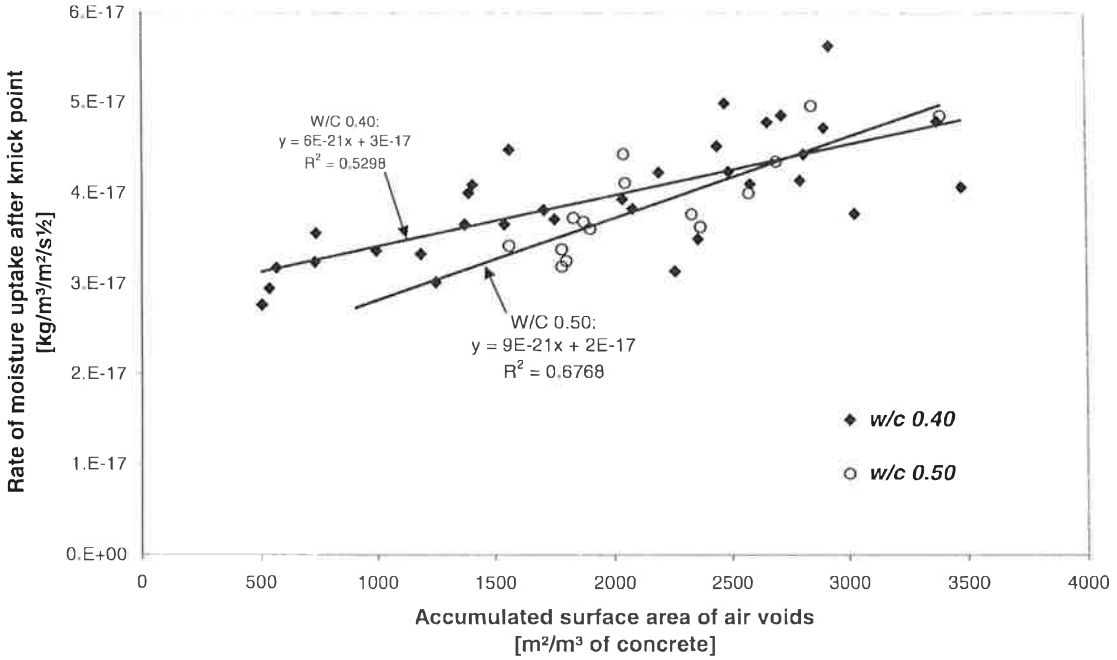
OM det finns ett samband mellan resterande lufthalt och avskalningar, vilket samband finns då mellan luftporsystemets karaktäristika och dess förmåga att fylla sig med vatten (fuktupptagningstakten efter knickpunkten)?

Ett visst samband mellan resterande lufthalt och avskalningar visades i figur 33. En intressant fråga är nu: Hur beror porsystemets fyllningstakt av dess karaktäristika? I figur 40 visas sambandet mellan A_{post} (ekv 23) och luftporsystemens totala mantelyta. Den senare parametern har valts eftersom den både ger information om antalet luftbubblor och dessas litenhet, vilket är lämpligt enligt Fagerlunds hypotes, eftersom små bubblor enligt denna fylls i högre tempo än stora bubblor, och eftersom totala upptaget naturligtvis är beroende av på hur många platser lösning av innestängd luft i porlösningen äger rum.

Två anpassningar av rätlinjiga ekvationer har lagts in. Regressionskoefficienterna för dessa är inte bra, men kurvorna antyder i alla fall att fuktupptagningen är något långsammare i betongen med vct 0.40 än i den med vct 0.50. Detta förklaras troligen med den lägre permeabiliteten som det lägre vct:t medför.

Den viktiga konsekvensen av dessa samband är att man inte kan förvänta sig god frostbeständighet hos en betong med ett extremt finfördelat luftporsystem med låg total lufthalt, trots att detta t.ex. skulle ge en acceptabel avståndsfaktor: I ett sådant system kommer fuktupptagningen att vara snabb och den lilla volym luft som finns i systemet kommer snart att ha förlorats. Figuren visar istället att det ideala luftporsystemet är ganska grovt, varigenom fyllningstempot blir lågt. I figur 26 finns en svag indikation på att avskalningarna når lägre belopp vid en specifik yta av cirka 42-43 mm^{-1} än vid högre värden, då samtidigt totala lufthalten hålls konstant.

Naturligtvis kan man dock inte bara göra luftporsystemet väldigt grovt och därigenom förvänta sig god frostbeständighet pga den långsamma vattenupptagningen i ett sådant system. Fortfarande ställs ett krav på maximalt avstånd mellan luftbubblorna!

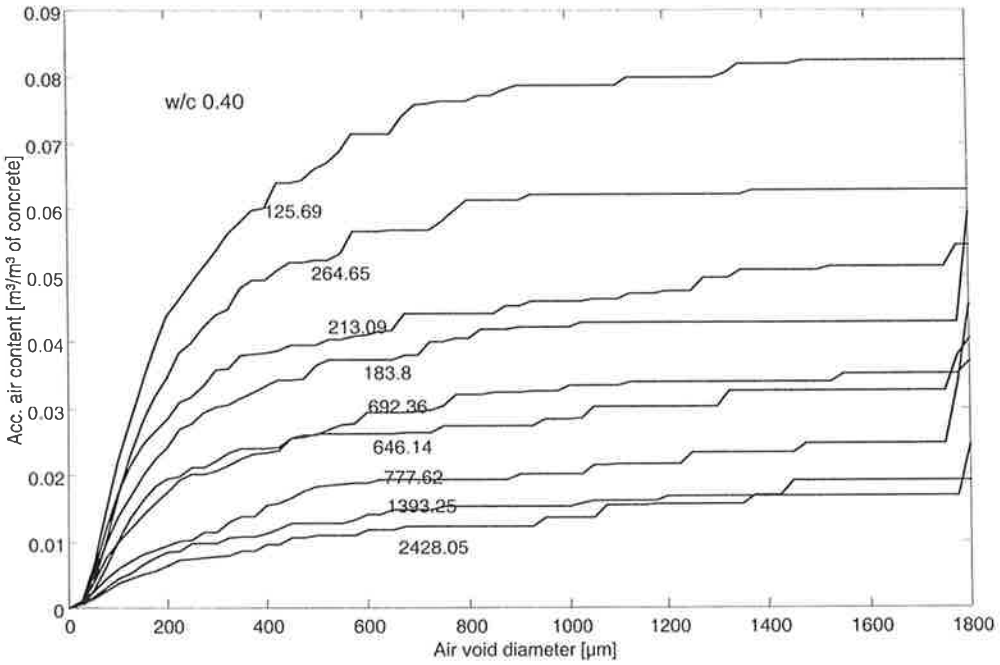


Figur 40: Fuktupptagningshastighetens efter knick-punkten beroende av luftporsystemets totala mantelyta.

I Fagerlunds beräkningar förutsätts att mindre luftporer fylls fullständigt innan större börjar fyllas. Detta förefaller orealistiskt, vilket också bekräftas av den ovanstående studien av vilken luftporstorlek som i så fall skulle ha fyllts då frysförsöken startades. Denna studie gav värden från 80 µm upp till 1 mm. Fyllningen torde snarare ske parallellt och gradvis i samtliga luftporer, om dock fortare i de mindre. Detta gör att luftporernas effektiva luftinnehåll minskar och att avståndsfaktorn ökar. Det resterande luftporsystemet, dvs. det luftporsystem som återstår sedan porerna fyllts till viss del, skulle kunna simuleras genom att man minskar diametern på samtliga porer, t.ex. i omvänd proportion till ursprunglig storlek. Denna mer raffinerade analys har dock inte kunnat utföras i detta projekt.

Direkt studie av den ackumulerade porstorleksfördelningen

Ytterligare en möjlighet att skaffa sig en uppfattning om en betongs förmåga att motstå saltfrostangrepp är att studera den ackumulerade luftporfördelningen direkt, figur 41. Här har ritats ett slumpmässigt urval av porstorleksfördelningar bland betongerna med vct 0.40. Värdet på den slutliga avskalningen har noterats vid respektive kurva. Som synes är trenden klar: Ju högre kurvorna ligger i området D<1000 µm, desto lägre avskalning. Dock förekommer det på ett par ställen att avskalningen är högre för en högre placerad kurva än en underliggande (kurvorna 2, 3,och 4 uppifrån räknat). Detta torde bero på att avskalningarna är medelvärden från tre provkroppar, vilkas luftporsystem inte med nödvändighet är identiskt likadant som i det prov på vilket porstorleksfördelningen bestämdes. Skall man kunna upprätta bättre samband måste luftporstrukturen analyseras i material som har legat så nära den testade ytan som möjligt, t.ex. på den motstående snittytan som bildas då proverna sågas ut, eller på resterna av provkroppen efter avslutat test. (I en fortsatt analys av resultaten skulle bildanalysresultaten kunna jämföras med avskalningsdata från endast frysprovkropp nr 1, se figur 4.)



Figur 41: Ackumulerade porstorleksfördelningar med angivande av slutlig mängd avskalat material [g/m²] för var och en. Vct 0.40.

SLUTSATSER

Generellt

Av de två vct som testats, är det relativt enkelt att hitta rimligt goda samband mellan beständighet och luftporsystemens karaktäristika för vct 0.40, medan det är svårt för betong med vct 0.50. Orsaken till detta är okänd. Slutsatserna nedan är därför i första hand grundade på vad som kunde iakttagas hos betong med vct 0.40. (Slutsatserna gäller de resultat som erhållits i denna studie – deras generella giltighet återstår att undersöka.)

De traditionella sätten att utvärdera sambanden mellan luftporsystemets karaktäristika och materialets saltfrostbeständighet (saltfrostavskalning visavi nominell lufthalt, specifik yta eller Powers' avståndsfaktor) ger inga tillförlitliga samband.

De bästa sambanden, i denna studie, mellan luftporsystemets karaktäristika och betongens saltfrostbeständighet erhålls då man

1. ställer avskalningen i relation till specifik yta *och* nominell lufthalt (dvs. lufthalt enligt beräknad porstorleksfördelning). För detta ändamål kan ekvation (25) tillämpas.
2. då man ställer avskalningen i relation till luftporsystemets innehåll av luft i luftbubblor inom visst storleksintervall, t.ex. 250<luftpordiametern<750 µm.

Exempel på detta ges i figur 29 och 38. Den senare relationen ger ungefär likadant samband som då avskalningarna relateras till den verkliga lufthalten i provet då frystestet startas.

För betong med vct 0.40 finns ett acceptabelt gott samband mellan "lufthalten" angiven som längdandelen kordor med längd mindre än 350µm. Detta underlättar utvärderingen, eftersom man slipper göra beräkningen av luftporernas storleksfördelning och de eventuella fel som denna beräkning kan medföra.

Saltfrostbeständigheten visar ett starkare samband med luftporsystemets samlade mantelyta än med dess nominella lufthalt.

För materialen i denna studie blev avskalningarna kraftigast för de betonger som gavs en överdriven vibrering (göt A av varje kvalitet). Flyttillsats förbättrade materialens saltfrostbeständighet, möjligen genom att materialen därigenom kompakterades bättre, men troligen genom att det förlängda blandningsförfarandet gav upphov till ett bättre luftporsystem. Detta visar på gjututförandets stora betydelse för materialets slutliga beständighet. Det visar också att det inte är säkert att en överdriven dos flytmedel fördärvar luftporsystemets egenskaper. Som nämns nedan bör detta analyseras vidare.

En teknik att på matematisk väg korrigera kantobjekten har införts, varigenom problematiken med kant-objekt till stor del elimineras.

Specifika ytan för ett luftporsystem får olika värden beroende på hur den beräknas (enl. ekv (2) eller ekv (9)). Detta måste beaktas vid rapportering av mätresultat.

I ett fortsatt arbete med utvecklingen av en metod för tidig bedömning av en betongs möjlighhet att klara ett saltfrosttest enligt 13 72 44, bör man i första hand inrikta sig på de två samband som nämndes ovan: ekvation 25 och luftporer med 250<diameter<750 µm.

Fortsatt analys av befintliga data

I en fortsatt analys av resultaten kan bildanalysresultaten jämföras med avskalningsdata från endast frysprovkropp nr 1 eller nr 2 (figur 4), eftersom luftporanalysen torde vara mest representativ för endera av dessa två. Provkropp nr 3 bör alltså uteslutas.

Sambandet mellan ursprunglig lufthalt (enligt den summerade luftporfördelningen) och den resterande lufthalten efter vattenlagringen bör analyseras närmare, med hänsyn tagen till varje provkropps exakta innehåll av pasta.

Tempot i kapillärsugningsförsöken, efter knickpunkten, kan användas som kalibreringsvärden för ett modellerande av fuktupptagningens beroende av luftporfördelningen. Sedan en sådan modell fastställts, kan det verkliga luftporsystemets värden (dvs specifik yta, avståndsfaktor och lufthalt, för den luft som finns kvar i betongens kaviteter) användas för analys av sambanden med avskalningarna.

Det bör kontrolleras huruvida gjutteknikens stora inverkan på slutgiltig avskalning berodde på dess inverkan på luftporsystemet. Om så inte är fallet måste fler parametrar än luftporsystemets karaktäristik studeras vid förhandsbedömning av en betongs saltfrostbeständighet.

Den från bildanalysen beräknade nominella lufthalten bör jämföras med den lufthalt som återstår då porsystemet fyllts upp till knickpunkten. Detta ger en god komplettering till den kontroll av beräknad nominell lufthalt som erhölls genom jämförelse med den lufthalt som bestämdes utifrån areafraktionerna. Härigenom kan man sedan fastställa vilka krav på parametrarna *rundhet* och *formfaktor* som bör ställas vid beräkning av en luftporstorleksfördelning. Denna beräkning kan också ge en uppfattning om hur stor del av luftporsystemets kaviteter som fylls omedelbart vid kapillärsugningen.

I syfte att ta reda på exakt vilken mängd is som kan tillåtas bildas i kapillärporerna utan att skador uppstår, bör försök med en kombinerad kalorimeter-dilatometer utföras. Detta kräver dock en ny försöksserie.

Förslag till fortsättningsprojekt

I ett eventuellt fortsättningsprojekt bör man utföra ett stort antal betonger med varierad sammansättning (vct, silika, lufthalter, etc.) och testa dem helt enligt SS 137244 i ett auktoriserat laboratorium. Från dessa resultat skulle sedan parametrarna α_{crit} och L_{crit} i ekvation 25 kunna bestämmas som funktion av materialsammansättningen.

Ett annat fortsättningsprojekt kan ha till syfte att vidareutveckla bildanalysteknik och standardprocedurer som gör det möjligt att få samstämmiga resultat från olika laboratorier. Ett sådant projekt skulle kunna finansieras med EU-medel och omfatta ett stort antal laboratorier runt om i Europa. Alternativt kan man begränsa sig till ett Nordtest-projekt.

Referenser

[1] 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", report TVBM-7085, Lund Institute of Technology, Div. of Building materials, 1994

[2] Nerenst, P: " ", 4th Int. Symp. On the Chemistry of Cement, Washington DC, 1960

[3] Fagerlund, G: "Frostangrepp – beskrivning av verkande mekanismer", Rapport TVBM-7056, Lunds Tekniska Högskola, Avd. Byggnadsmaterial, 1993

[4] Vuorinen, J: "On determination of effective degree of saturation of concrete", Betong- och Jordlaboratoriet, Imatran Voima OY, Uleåborg, 1973

[5] Powers, T C: "The air requirement of frost resistant concrete", Proceedings, Highway Research Board 29, PCA Bull. 33, 1949

[6] Powers, T.C, Helmuth, R.A: "Theory of volume changes in hardened Portland-cement paste during freezing", Proceedings, Highway Research Board 32, PCA Bull. 46, 1953

[7] Helmuth, R.A: "Discussion on a paper by Nerenst, 4th Int. Symp. On the Chemistry of Cement, Washington DC, 1960

[8] Powers, T.C: "Freezing effects in concrete", i *Durability of Concrete*, ACI SP-47, 1975

[9] Peterson, P-E: "Influence of Minimum Temperatures on the Scaling Resistance of Concrete", Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology, SP Report 1994:22, 1994.

[10] Jacobsen, S: "Scaling and Cracking in Unsealed Freze/Thaw testing of Portland Cement and Silica Fume Concretes"" Doktor ingeniøravhandling, Universitetet i Trondheim, Norges Tekniske Høgskole, NTH 1995:101, 1995

[11] Lindmark, S: "Inverkan på testresultatet av variationer i saltkoncentrationer, saltfördelningar och fryscykelutformning vid saltfrostprovning enligt SS 13 72 44", Tekniska Högskolan i Lund, Avd. Byggnadsmaterial, Rapport TVBM-7055, 1993

[12] Sommer, H: "The Precision of the Microscopical Determination of the Air-Void System in Hardened Concrete", Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP, Vol. 1, No. 2, 1979, pp.49-55.

[13] Underwood, E.E: "Quantitative Stereology", Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1970

[14] Lord,G.W, Willis, T.F: "Calculation of Air Bubble Size Distribution from Results of a Rosiwal Traverse of Aerated Concrete", ASTM Bulletin, Oct. 1951, pp 56-61

[15] Underwood, E.E: "Quantitative Stereology", Addison-Wesley Publishing Company, 1970

[16] Vesikari, E: "Image analysis in determining pore size distributions of concrete", Technical Research Centre of Finland, Report 437, Espoo 1985

[17] Lord, G.W, Willis, T.F: "Calculation of Air Bubble Size Distribution from Results of a Rosiwal Traverse of Aerated Concrete", ASTM Bull. October 1951

[18] Upphovsman till L300?

[19] Carlsson, T: "Luftporstrukturens inverkan på egenskaperna hos puts- och murbruk", Lunds Tekniska Högskola, Avd. Byggnadsmaterial, Rapport TVBM-3066, 1995