

Working Paper No 2

Editor: Research and Development Committee

Thomas Carlsson

Fukttransport i autoklaverad lättbetong

Inverkan av mikrostruktur

I samarbete med



KUNGL
TEKNISKA
HÖGSKOLAN

Inst. för byggd miljö i Gävle



**UNIVERSITY
OF GÄVLE**

Förord

I denna rapport diskuteras hur den kapillära fuktupptagningen beror av mikroskopiska strukturer hos autoklaverad lättbetong.

Rapporten utgör Del 2 av ett projekt som genomförts i samarbete mellan Högskolan i Gävle (HiG) och KTH Institutionen för Byggd Miljö (KTH-BMG), avdelning Materialteknik. Del 2 har genomförts vid KTH-BMG, medan Del 1 (vilken innehåller teoretiska simuleringar av fuktillstånd) har genomförts vid HiG. Projektet har finansierats av HiG.

En rapport från projektets Del 1 har publicerats av HiG med beteckningen "Working Paper No 46". Författare är Tekn. Dr. Peter Roots.

Thomas Carlsson
Gävle i augusti 1999

Innehållsförteckning

Förord

Innehållsförteckning

Sammanfattning

Summary

1 Inledning

1.1 Bakgrund

1.2 Uppläggnig

2 Genomförande

2.1 Material

2.2 Strukturundersökning

2.2.1 Prepareringsmetoder

2.2.2 Inmätningmetoder och stereologiska modeller

2.2.3 Anpassning av stereologisk beräkning

2.3 Laboratorieförsök

2.3.1 Beredning av provkroppar

2.3.2 Provning

3 Resultat

3.1 Allmänna strukturella samband

3.2 Struktursamband

3.3 Vattensugningssamband

3.4 Samband mellan struktur och vattensugning

4 Resultdiskussion

Bilaga; Mikrofoton från ljusoptiskt mikroskop
respektive svepelektronmikroskop (SEM)

Sammanfattning

I rapporten redovisas resultat från laborativa vattensugningsförsök samt mikroskopisk strukturanalys av autoklaverad lättbetong. Speciellt behandlas *sambanden* mellan materialets mikrostruktur och dess kapillära fuktegenskaper.

Trots att försöksmaterialet varit begränsat har vissa samband kunnat skönjas. Sålunda finns det ett klart samband mellan porstorleksfördelning och skrymdensitet, där volymen (antalet) små porer (med diameter mindre än 25 μm) ökar med ökande skrymdensitet. Detta sker på bekostnad av de större porerna. Vidare finns samband mellan uppsugningsförmågan och volymen kittmassa (porer < 25 μm + kompakt material), där uppsugningsförmågan ökar med ökande andel kittmassa.

Försök att formulera sambanden numeriskt har gjorts, i syfte att visa möjligheterna att använda strukturvariabler som ingångsparametrar vid till exempel datorsimulering av fuktflöden.

Summary

In this report the results from experimental studies of water suction and microscopic structure analysis of autoclaved aerated concrete (AAC) is presented. Particularly the *relationship* between the material micro structure and its capillary moisture properties is studied.

Although a limited number of samples were tested, some relationships have been found.

There is a clear relationship between the pore size distribution and the bulk density, where the volume (number) of small pores (diameter less than 25 microns) is increasing when the bulk density increases. At the same time the number of the bigger pores are decreasing.

Furthermore, there is a relationship between the suction ability and the fraction by volume of the microporous solid matrix (compact material including small pores), where the suction ability is increasing when the fraction by volume of the microporous solid matrix increases.

The report also includes an attempt to formulate the relationships numerical. The aim is to point out the possibility to use structure variables as input parameters, for example, in computer simulations of moisture flow.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Genom det Byggnadsproduktdirektiv som ställts från EU (Construction Products Directive, CPD), har krav ställts på byggnadsmaterialtillverkare att deklarerera bland annat livslängden för material och materialsystem.

För att möta dessa krav har Yxhult AB, som är moderföretag för tillverkning av autoklaverad lättbetong (Autoclaved Aerated Concrete, AAC) i Sverige, tillsammans med putstillverkare ,Optiroc AB, och tillverkare av tillsatsmedel, Wacker-Chemie GmbH, startat ett gemensamt projekt. Avsikten med projektet är att få fram underlag till en modell där livslängden för ytterväggssystem baserade på autoklaverad lättbetong, kan bedömas.

Livslängden hos ett materialsystem beror till stor del på dess fuktegenskaper. Genom att bestämma dessa egenskaper för såväl ingående enskilda material som hela system under olika klimatiska påfrestningar, kan en god bedömningsgrund erhållas.

Projektet genomförs dels i form av teoretiska studier och simuleringar, dels som laboratorieförsök och fältexponering. Syftet med föreliggande delprojekt är att utreda eventuella samband mellan kapillär fuktransport och mikrostruktur hos AAC.

1.2 Uppläggning

Undersökningen baserar sig på experimentella studier där AAC med olika densitet, och därmed också olika struktur, har utnyttjats. Materialet undersöktes med avseende på egenskaper vid vattensugning samt strukturella egenskaper. Strukturdata har bestämts i ljusmikroskop med automatisk bildanalys och efterföljande stereologisk behandling. För att, om möjligt, underlätta den mikroskopiska undersökningen gjordes även försök med alternativa preparationsmetoder.

2 Genomförande

2.1 Material

Autoklaverad lättbetong, AAC (Autoclaved Aerated Concrete), är en svensk uppfinning från mitten av 20-talet som 1929 fick en industriell tillämpning under varunamnet Ytong. En variant på recepturen fick några år senare varunamnet Siporex. Snabbt fick AAC en stor användning och spridning i världen på grund av dess unika egenskaper som ett obrännbart, värmeisolerande och samtidigt enkelt och formbart bärande material. En god förutsättning till framgången är att de ingående basmaterialen kiselrik sand, kalk och cement finns med god tillgång på de flesta platser i världen. Idag uppgår produktionen inom EU-länderna till ca 8 miljoner kubikmeter per år och med öststaterna och övriga världen är årsproduktionen ca 24 miljoner kubikmeter. I Sverige har åtskilliga miljoner kvadratmeter väggar av AAC uppförts som återfinns i bostäder, inte minst från det s k miljonprogrammets dagar på 60-talet, kontor, skolor och industriföretag. Ytbehandlingarna på uppförda väggar varierar från tunna avfärgningar till tjockputser. Även om goda generella empiriska erfarenheter finns av olika systems beständighet är de detaljerade kunskaperna om nedbrytningsfaktorer och -förlopp idag mycket begränsade.

Det provade materialet bestod av kalkbaserad autoklaverad lättbetong från kvalitetsklasserna 400, 500, 600 och 750. Materialet var jungfruligt, dvs det hade inte använts tidigare. Eftersom materialproverna är tagna från den normala produktionen innehåller de troligen även ett vattenavvisande preparat, vilket är normalt för AAC.

Förutom de kalkbaserade materialen, undersöktes två cementbaserade AAC. Dessa var från kvalitetsklass 400 och 450. Resultaten från dessa material används endast som jämförelse vid diskussion av huvudmaterialen.

Observera att de beteckningar som används i figurer hänvisar till nominella kvalitetsklasser. De verkliga skrymdensiteterna var som följer.

Prov 400,	skrymdensitet	350 kg/m ³ ,	kalkbaserad
-:- 500,	-:-	488	-:- , -:-
-:- 600,	-:-	612	-:- , -:-
-:- 750,	-:-	637	-:- , -:-
-:- 400N,	-:-	358	-:- , cementbaserad
-:- 450N,	-:-	416	-:- , -:-

De variabler som initiiellt bestämts vid strukturanalysen är:

Makroporer, halt (diameter > 25 µm)

Porstorleksfördelning, volym (diameter > 25 µm)

2.2 Strukturundersökning

AAC är en ur mikroskoperings synpunkt besvärlig produkt. Materialet består av såväl makroporer (mm-storlek) som mikroporer (μm -storlek), vilket innebär svårigheter med att detektera och mäta samtliga porstorlekar i samma mätning. De mellanliggande porstorlekarna, mesoporer (50-500 μm), förekommer ofta i något mindre antal än vad som borde förväntas.

Frekvenskurvan får härigenom två toppar, vilket kan ge problem vid senare tillämpning av stereologiska beräkningsmodeller, dvs överföring av pordata från 2-dimensionella värden till 3-dimensionella värden.

Det traditionella sättet att studera porer i AAC är via svepelektronmikroskop, SEM, vilket dock är en dyr metod. En ytterligare nackdel är att kvantifiering av porstorleksfördelning inte kan göras i ett sådant instrument, åtminstone inte på något rationellt sätt. Fördelarna med SEM ligger i möjligheten att studera porformer, den höga förstöringsgraden samt möjlighet till analys av ingående grundelement.

Strukturanalys med ljusoptiskt mikroskop är en betydligt billigare metod. En annan fördel är att det är relativt enkelt att samla in grunddata för bestämning av porstorleksfördelning, och därav följande strukturparametrar (specifik yta, avståndsfaktor mm). Metodens nackdelar är främst vissa svårigheter vid tillverkning av preparaten samt att minsta detekterbara objekt-diameter är begränsad.

2.2.1 Prepareringsmetoder

De prepareringsmetoder som normalt används vid ljusoptisk mikroskopering kan delas in i två grupper, tunnslipsteknik och planslipsteknik. Skillnaden är att ett tunnslip består av en tunn planparallell skiva, cirka 25 μm tjock, medan ett planslip endast är slipad på en sida. Tunnslipet kan alltså genomlysas, medan planslipet belyses med påfallande, reflekterande ljus. Kraven på planhet är lika stor i båda fallen. Tunnslipet kräver dock mer arbete eftersom två sidor ska bearbetas. I gengäld ger ett tunnslip information även om materialets övriga beståndsdelar, dvs inte enbart porer och andra håligheter.

Eftersom AAC är ett högporöst material, upp till 85 % porositet, måste materialet förstärkas, impregneras, innan bearbetning kan påbörjas. Kombinationen av makro- och mikroporer och hög porositet gör att preparaten måste återimpregneras 2 eller 3 gånger under processens gång, för att säkerställa full utfyllnad av samtliga porer. Samtidigt måste det skapas en kontrast mellan porer och bakgrund, för att kunna särskilja porerna vid senare inmätning. Beroende på prepareringsteknik kan denna kontrast erhållas på olika sätt. Vid tillverkning av tunnslip tillsätts normalt ett färgpigment till förstärkningsmediet (en speciell två-komponent epoxyplast). Färgpigmentet ger vanligtvis provet en gul-grön, genomskinlig kulör. Oftast innehåller färgpigmentet även en fluorescerande tillsats, vilket i vissa fall är användbart vid detektering av objekten.

Samma blandning av epoxyplast och färgpigment, inklusive fluorescenstillsats, kan användas vid preparering av planslip, dock endast vid fluorescensanalys. Det normala för planslip är att den färdigpolerade ytan infärgas med tryckfärg, oftast svart, varefter porerna fylls med en ogenomskinlig vit massa, oftast zinkpasta. Efter ytterligare behandling, bland annat med kyla, kan "överbliven" zinkpasta skrapas bort varvid ett tydligt kontrastmönster uppstår mellan vita, fyllda porer och den svarta bakgrunden. En nackdel med metoden är att zinkpastan måste återfyllas efter något dygn, eftersom zinkpastan torkar och krymper. En annan nackdel med metoden är att det är besvärligt att förstärka materialet under själva slip- och polerarbetet. Vanligtvis används ofärgat nagellack, vilket sedan tvättas bort från det färdigpolerade provet med acetone. Principen är dock vanskelig då lösningsmedlet kan påverka provets beståndsdelar.

Eftersom den traditionella tekniken att tillverka planslip har uppenbara bristen, åtminstone i samband med AAC, har några alternativa tekniker provats. Bland dessa kan nämnas infärg-

ning av materialet med svärta och ifyllnad med ljus epoxyplast, utnyttjande av materialets ljusa egenfärg och ifyllnad med mörk epoxyplast. Ingen av dessa varianter gav tillfredställande resultat. De färgpigment som provats, bland annat vit respektive svart tusch, lämpade sig inte för ändamålet. Den svärta som användes för infärgning av bakgrunden ville inte heller fästa ordentligt på underlaget.

Det har dock under 1997 introducerats en speciell impregneringsepoxy som har just de egenskaper som behövs, en djupt blodröd, opak, kulör. Med utnyttjande av att AAC i sig självt har en vit till vit-grå kulör har en god kontrast med samtidig god vidhäftning mellan underlag och epoxyplast uppnåtts. Epoxyplasten fungerar alltså i detta fall både som förstärkning och kontrastfärgning, vilket förenklar prepareringen väsentligt och dessutom ger ett hållbart preparat. Gjorda analyser visar att den modifierade tekniken, med användande av specielepoxy, har förutsättningar att ge goda resultat vad avser såväl tillverkning av planslip som detektion av objekt i mikroskop.

Metoden har än så länge endast använts i mycket begränsad skala, men kan troligen bli ett utmärkt alternativ till traditionell planslipspreparering. Ytterligare erfarenhet behövs dock innan standardmässig tillämpning kan komma till stånd.

2.2.2 Inmätningmetoder och stereologiska modeller

Som underlag för att analysera porer och andra håligheter, tex sprickor, är ett perfekt preparerat planslip att föredra. Orsaken är att kontrasten mellan objekt och bakgrund oftast är skarp. Dessutom är det möjligt att detektera objekt med en diameter på endast cirka 2 μm , eftersom analysytan består av ett plan utan djup. Tjockleken på analysmaterialet i ett tunnslip är cirka 25 μm , vilket innebär att luftporer mindre än 25 μm riskerar att "inbäddas". Porer mindre än 20 μm kan av denna orsak inte med tillräcklig säkerhet detekteras vid analys av tunnslip. Varken plan- eller tunnslip klarar dock att detektera de porer som ingår i själva "cellväggen" hos AAC. Man är i detta fall hänvisad till svepelektronmikroskopi. Förhållandet mellan antalet (volymen) makroporer och mikroporer i AAC är emellertid väl definierat, varför det oftast är tillräckligt att bestämma karakteristikan för makroporerna, vilket innebär att ljusmikroskopi är fullt tillräckligt i de flesta fall.

Då mikroskopanalys av porsystem började användas, samlades rådata (total objektyta, traverslängd, interceptions mm) in manuellt genom att provet fördes förbi ett hårkors i en rak linje, en linje-travers-analys. Ett alternativ var att lägga ut ett punktnät varvid antalet punkter i eller utanför objekten räknades, en punkträkning. Denna teknik kunde dock inte användas för beräkning av porstorleksfördelning. Så småningom kom även en kombination av dessa att användas, en modifierad punkträkning.

Allteftersom datortekniken utvecklades blev automatisk bildanalys allt vanligare och är numera helt dominerande vid insamling av rådata för mikroskopanalys av porsystem. Förfarandet vid bildanalys innebär att en bild från mikroskopet digitaliseras via en TV-kamera. Denna bild kan via datorprogram behandlas på olika sätt, beroende på vilken typ av objekt som är av intresse. Vanligtvis används en färgkamera för att kunna selektera de infärgade luftporerna. Datorprogrammet injusteras till att göra mätningar på alla objekt med en viss färgkulör, varefter en mängd parametrar kan mätas automatiskt. Genom att basera den efterföljande stereologiska beräkningen på areor istället för linjer eller punkter, har säkerheten i resultaten ökat.

Resultaten från en bildanalys måste bearbetas vidare för att strukturparametrar ska kunna erhållas. De på objekten inmätta areorna och diametrarna hänför sig till 2-dimensionella kalotter. Man har alltså fått en kalottdiameterfördelning. För att kunna överföra denna fördelning till en 3-dimensionell porstorleksfördelning används någon form av stereologisk beräkningsmodell.

2.2.3 Anpassning av stereologisk beräkning

Den använda stereologiska modellen baserar sig på Saltikovs Areamodell. Beräkningsschemat har dock anpassats för att ta hänsyn till de begränsningar, bland annat objektstorlek, som ges av analysmetoden.

Ett problem som ofta uppstår är att de aktuella objektens storlek spänner över ett stort område. För att, med rimlig säkerhet, kunna registrera små objekt krävs hög förstoringsgrad. Samtidigt minskar då bildytan, vilket gör att stora objekt nästan undantagslöst vidrör bildkanten. Dessa objekt kan (bör) då inte användas för beräkning av storleksfördelning, eftersom deras verkliga storlek inte är känd. Å andra sidan, om en låg förstoringsgrad används är risken stor att små objekt kommer att "drunkna" i bakgrundsbrus. En möjlig lösning på problemet är att analysera samma provyta vid två eller flera förstoringsgrader. Data lägges sedan samman innan den slutliga beräkningen av storleksfördelning och övriga strukturparametrar genomförs.

För att direkt kunna slå samman datamängder från olika förstoringsgrader, krävs att den inmätta ytan är lika stor för respektive datamängd. Detta innebär att en fördubbling av förstoringen, från t ex 2x-objektiv till 4x-objektiv, kräver fyra gånger så många bildfält. I praktiken är detta sällan möjligt, varför en justering på grund av olika stor inmätt yta måste göras. Genom att beräkna kvoten mellan inmätt yta för den lägsta förstoringsgraden och inmätt yta för den högre förstoringsgraden, fås en justeringsfaktor. Antalet objekt i respektive storleksklass för den högre förstoringsgraden multipliceras med justeringsfaktorn. På detta sätt anpassas antalet objekt vid den högre förstoringsgraden till den inmätta ytan vid den lägre förstoringsgraden, och datamängderna kan slås samman som om de vore registrerade vid ett och samma tillfälle. Principen bygger på det enkla faktum att, vid samma förstoringsgrad, en ökad inmätt yta ger fler registrerade objekt.

2.3 Laboratieförsök

2.3.1 Beredning av provkroppar

Ur varje provblock av AAC sågades tre kvadratiska provkroppar med 80 mm kantlängd. Provkropparnas höjd var lika med provbitarnas tjocklek som i det här aktuella fallet var cirka 34 mm. De utsågade provkropparna torkas vid 40°C tills jämvikt uppstår. Efter uttorkning vägs provbitarna. Provbitarna förseglades diffusionstätt på alla ytor, utom den exponerade ytan.

2.3.2 Provning

De rumstörta provkropparna placeras med sugytan (exponeringsytan) nedåt, nedsänkt cirka 2 mm i vatten.

Genom att även överytan är förseglad hindras avdunstning av provkroppens uppsugna vatten. Vid vissa tidsmellanrum tas provkropparna ur badet, avtorkas med ett sugande fuktigt hushållspapper, vägs och placeras tillbaka i vattenbadet. Vägningproceduren får inte ta i anspråk mer än 25 sek. Tidsmellanrummet bör under de första sex timmarna vara högst 30 minuter. Därefter kan man öka tidsperioden succesivt upp till ett eller två dygn.

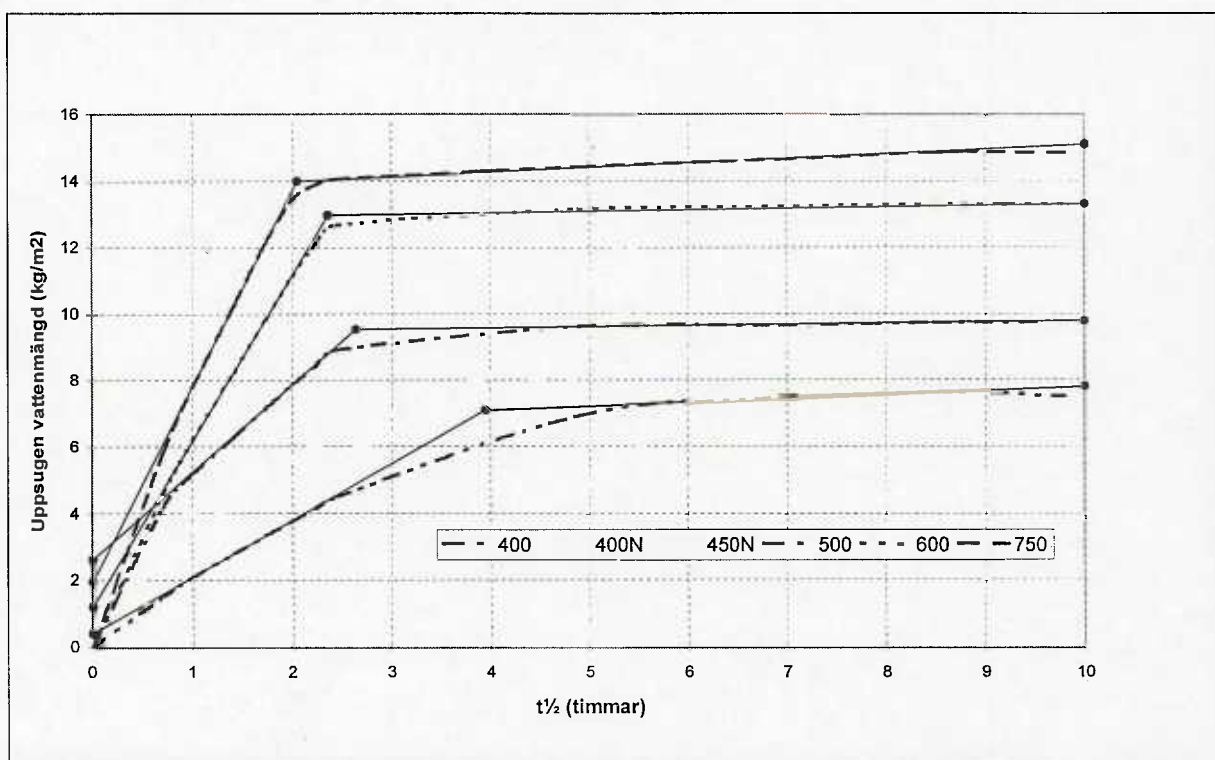
Tidpunkter för vägning och aktuell vikt noteras. Provkropparnas exponerade yta mäts och noteras. Av dessa data kan vattenupptagningen g_t (kg/m^2) vid olika tidpunkter beräknas och redovisas i diagramform.

Ur uttrycket $g_t = A_t \cdot \sqrt{t}$ där t är tiden i timmar och A är vatteninträningstalet, kan A efter 6 respektive 24 timmar beräknas.

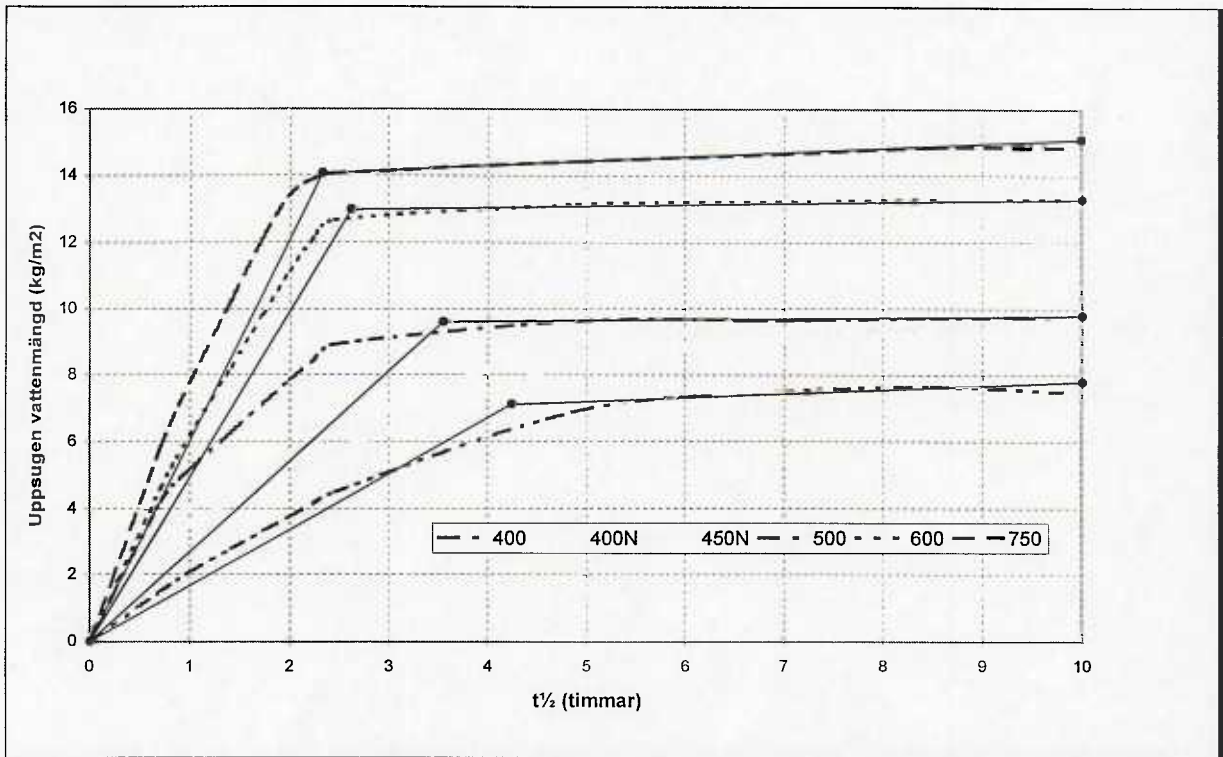
$$A_t = g_t / \sqrt{t} \quad (\text{ekvation 1})$$

Resultaten från provningen framgår av Figur 1. Om provkroppen vore oändligt hög, eller i varje fall högre än vattnets möjliga stighöjd, skulle uppsugningskurvan få en svagt böjd form. Eftersom de aktuella provkropparnas tjocklek (35 mm) är mindre än vattnets möjliga stighöjd i materialet kommer det att bildas ett "knä" på sugkurvan. Detta "knä", knickpunkten, anger att vattenfronten har nått provets överyta. Knickpunktens läge kan bli mer eller mindre tydligt beroende på provets tjocklek i förhållande till möjlig stighöjd. En stor skillnad mellan stighöjd och provhöjd ger en mycket tydlig knickpunkt.

För att få ett väl definierat läge på knickpunkten läggs två räta linjer in i diagrammet, en linje som ansluter till kurvans första uppåtgående del och en linje som ansluter till resterande mer eller mindre plana del. Knickpunkten definieras där dessa båda linjer skär varandra, enligt Figur 1. Lutningen på kurvans första del anger den hastighet med vilken vattnet kapillärt suges in i materialet. Dock måste denna linje oftast justeras något eftersom en icke representativ initialsugning inträffar då det torra provet kommer i kontakt med vattenytan. För att justera för denna effekt bör "hastighetslinjen" parallellförflyttas så att den går genom origo enligt Figur 2.



Figur 1. Kapillär vattenuppsugning



Figur 2. Origo-justerade uppsugningskurvor

Uppsugningskurvorna för de båda cementbaserade proverna (400N och 450N) är även inriktade i figurerna. Det kan tydligt ses att uppsugningshastigheten är lägre för dessa prover jämfört med motsvarande kalkbaserade prover. Den totalt uppsugna vattenmängden vid knickpunkten ligger däremot i paritet med övriga prover. En jämförelse mellan mikrofoto 1 och 5 visar tydligt att den "fasta" delen (cellväggarna) av materialen kan misstänkas ha olika egenskaper, eftersom AAC baserad på cement har en betydligt tätare struktur än AAC baserad på kalk. Den tätare strukturen påverkar tydligen inte nämnvärt den för vatten tillgängliga porvolymen. Däremot tycks cellväggarna utgöra ett större hinder för vattensugning, vilket har till följd att det tar längre tid att fylla porerna.

En enkel kontroll i svepelektronmikroskop visar att halterna av de ingående grundelementen inte skiljer sig signifikativt åt mellan kalk- respektive cementbaserat AAC. Däremot tenderar kristallformerna, enligt mikrofoto 7 och 8, att vara något olika vilket kan vara en del av förklaringen till varför materialet ser tätare ut i ett vanligt ljusmikroskop.

De variabler som bestämts vid vattenuppsugningsförsöken är:

Skrymdensitet

Porositet (antagen kompaktdensitet = 2600 kg/m³)

Uppsugningshastighet (kapillaritetskoefficienten)

Uppsugningsmängd (vid knickpunkt)

3 Resultat

Resultaten baserar sig endast på de fyra kalkbaserade kvaliteterna eftersom dessa i huvudsak endast skiljer sig åt med avseende på porositet och porstorleksfördelning. De cementbaserade proverna har en annorlunda inre kristallstruktur samt är för få för att kunna utvärderas.

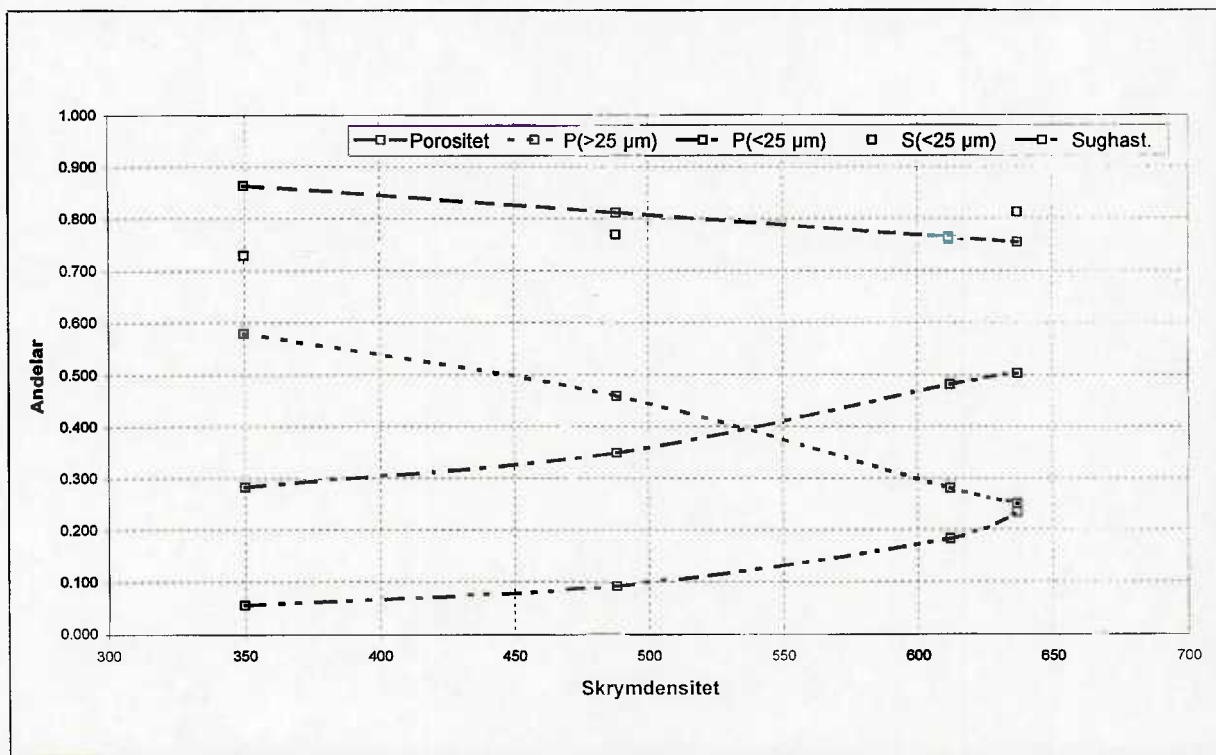
3.1 Allmänna strukturella samband

Skrymdensiteten (och därmed även porositeten) hos AAC regleras främst genom att mängden jäsmedel ändras. En ökande mängd jäsmedel ger lägre skrymdensitet. Kompaktdensiteten hos det färdiga materialet ändras eventuellt en aning, men kan beräkningsmässigt antas vara konstant, 2600 kg/m³, oavsett skrymdensitet. En förutsättning är dock att de olika materialkvaliteterna(-densiteterna) är baserade på samma bindemedel. Ett byte av bindemedlet *kan* ge en förändring av porernas tillgänglighet i den "fasta" delen av materialet.

Eftersom det endast är mängden jäsmedel som ändras vid olika skrymdensiteter, ligger det nära till hands att anta att även mängden porer i olika porstorleksklasser ändras proportionellt. *Så är dock inte fallet.* Porer med diameter *mindre än 25 µm* tycks inte påverkas nämnvärt. Däremot minskar volymen (antalet) porer med diameter *större än 25 µm* radikalt.

Porer <25 µm och materialets kompakta del kan tillsammans sägas utgöra en materialfas, *kittmassan*. Provingar visar att skrymdensiteten på kittmassan är cirka 850 kg/m³, motsvarande porositeten 0.67, oavsett vilken skrymdensitet materialet som helhet har.

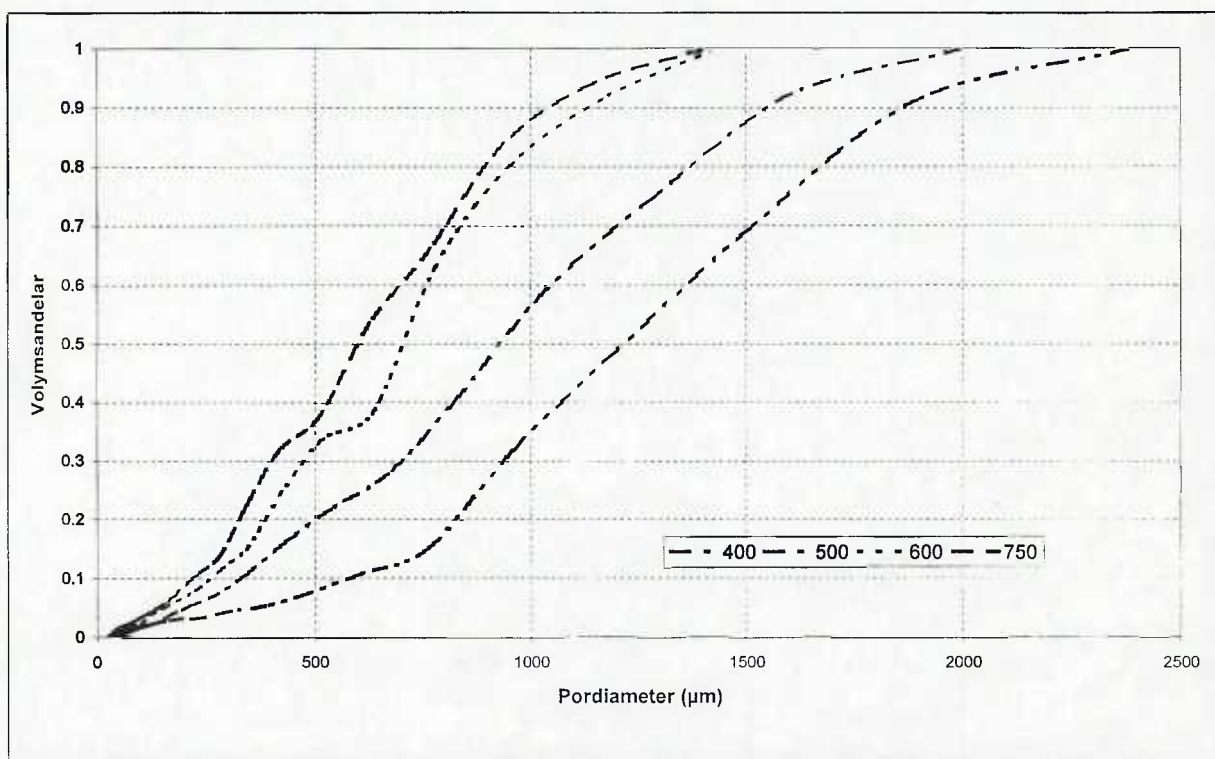
Då de stora porerna försvinner, ersätts dessa med kittmassa, vilket resulterar i att volymen små porer ökar med ökande skrymdensitet hos materialet, trots att den totala porositeten minskar.



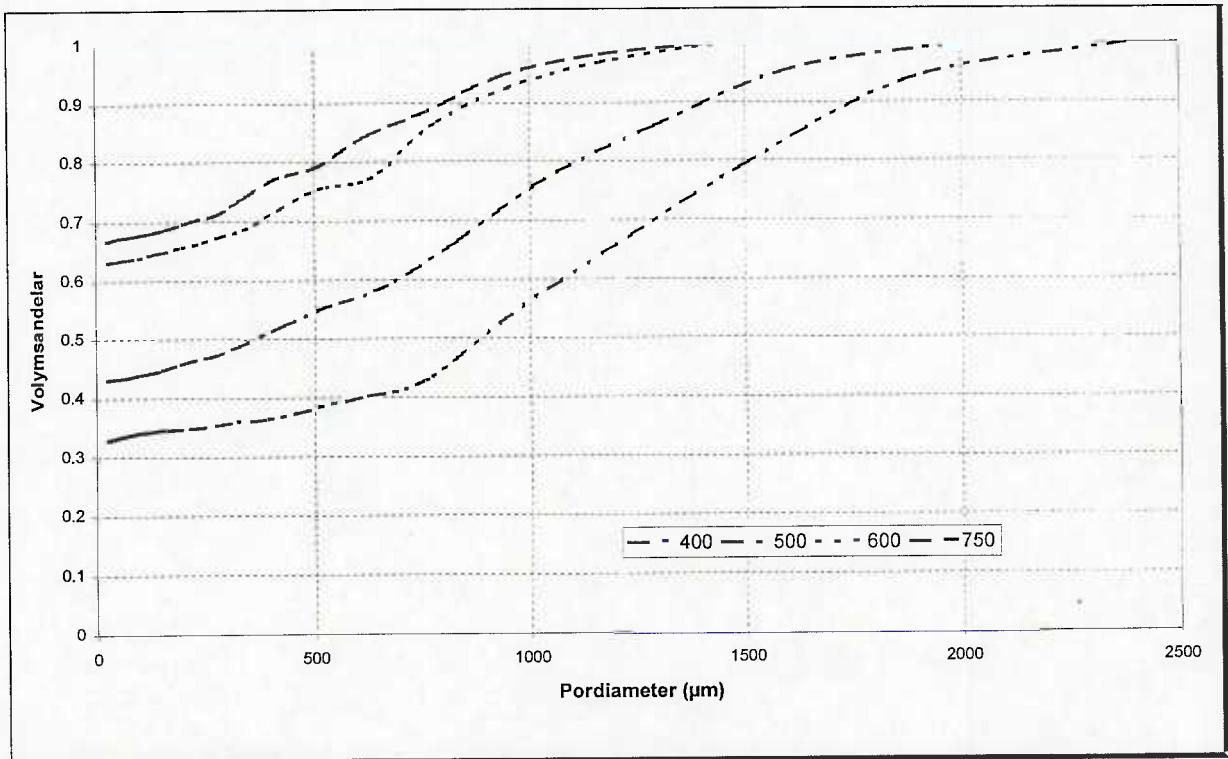
Figur 6. Struktur- och uppsugningsvariabler versus skrymdensitet

En tänkbar mekanism bakom detta beteende är att de gasbubblor som bildas vid processen, har en tendens att slå sig samman om de kommer nära varandra. Ju fler gasbubblor, desto närmare varandra hamnar de. Detta leder alltså till att luftporsystemet förgrovas vid ökande total porositet. För att porsystemet ska kunna vara i huvudsak stabilt (under jäsprocessen), kan man alltså tala om ett minsta avstånd mellan bubblorna. (Samma fenomen har observerats vid inblandning av luftporbildare i putsbruk, där stora luftmängder ledde till kollapsade luftpor-system vilka försämrade brukets egenskaper väsentligt.)

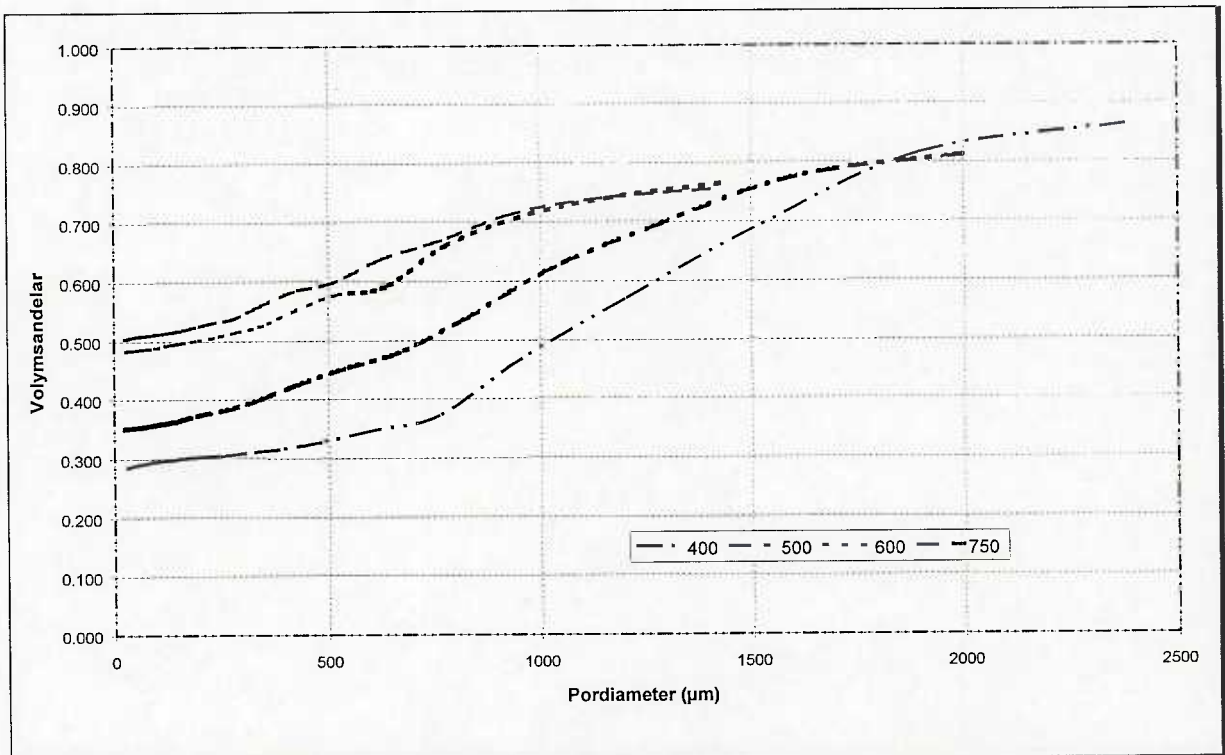
Ovanstående förgrovnig av porsystemet kan tydligt ses i mikrofoto 1 till 4, samt i Figur 3. Porstorleksfördelningen i Figur 3 är beräknad för luftporer större än 25 μm i diameter. Som komplement visas i Figur 4 och 5 även porstorleksfördelningar beräknade på totala porositeten samt beräknat på basis av alla faser. Den kompakta volymen i Figur 5 är beräknad med kompaktdensitet = 2600 kg/m^3 .



Figur 3. Porstorleksfördelning (volym) baserad på porositet för porer > 25 μm i diameter



Figur 4. Porstorleksfördelning (volym) baserat på totala porositeten



Figur 5. Porstorleksfördelning (volym) baserat på alla faser

3.2 Struktursamband

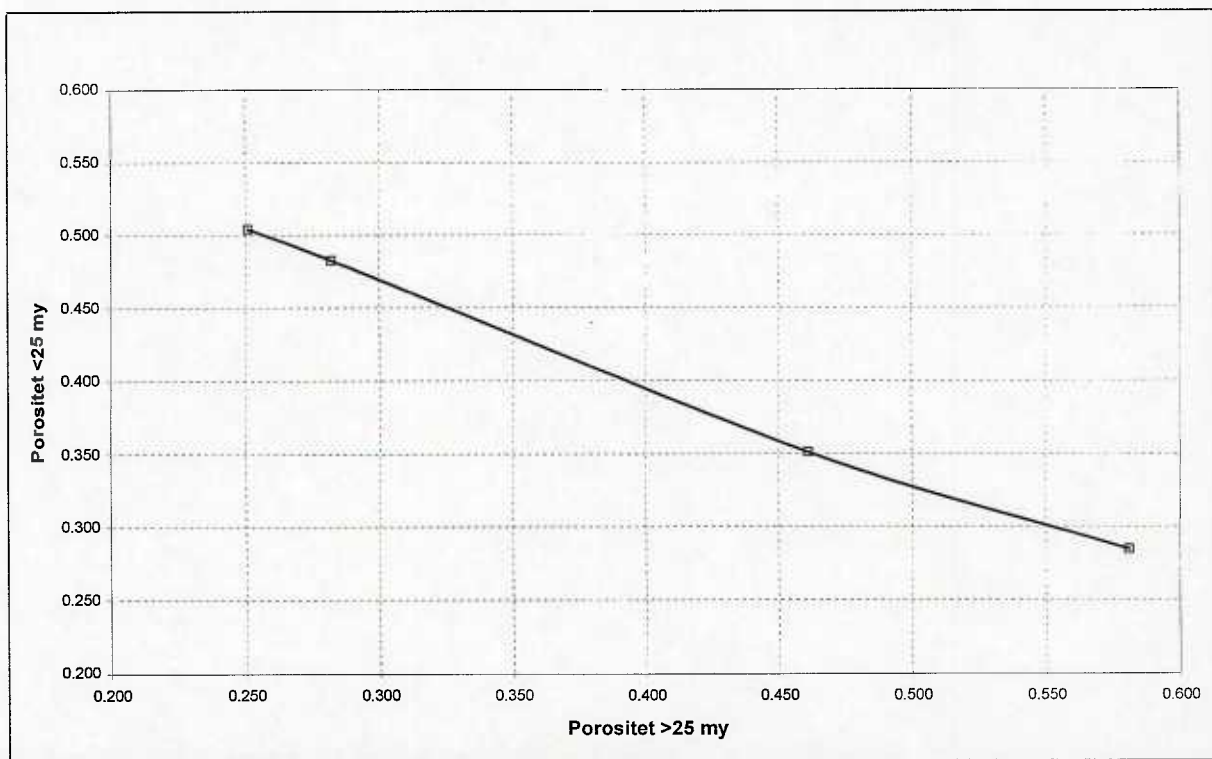
Förhållandet mellan porositet av porer med diameter < 25 my ($P_{<25}$) respektive porer med diameter > 25 my ($P_{>25}$) återfinns i figur 7 och kan approximativt beskrivas med en rät linje:

$$P_{<25} = - 0.68 * P_{>25} + 0.67 \quad (\text{ekvation 2})$$

där $P_{<25}$ = porositet av porer med diameter < 25 my (-)

$P_{>25}$ = porositet av porer med diameter > 25 my (-)

Förhållandet mellan $P_{<25}$ och $P_{>25}$ förutsätter att materialets kompaktdensitet är 2600 kg/m³ oavsett skrymdensitet. Detta är ett antagande som inte borde ställa till några problem, eftersom AAC i grund och botten består av ungefär samma mineral och beståndsdelar, oavsett skrymdensitet och ingående råvaror. Det har dock visat sig att uppgifter om kompaktdensitet hos AAC i referenslitteratur och artiklar inte varit enhetlig. Man kan finna uppgifter som varierar mellan 1975 kg/m³ till 2670 kg/m³. En trolig orsak till denna spridning är att provningen baserat sig på metoder som inte tagit full hänsyn till andelen slutna porer som förekommer i AAC. De flesta oorganiska material har emellertid ungefär samma kompaktdensitet, cirka 2600 kg/m³, varför det inte finns någon anledning att anta att AAC skulle skilja sig från de övriga. Antagandet att AAC har en kompaktdensitet lika med 2600 kg/m³ kan därför betraktas som rimligt.



Figur 7. Porositet för porer > 25 µm ($P_{>25}$) versus porositet för porer < 25 µm ($P_{<25}$)

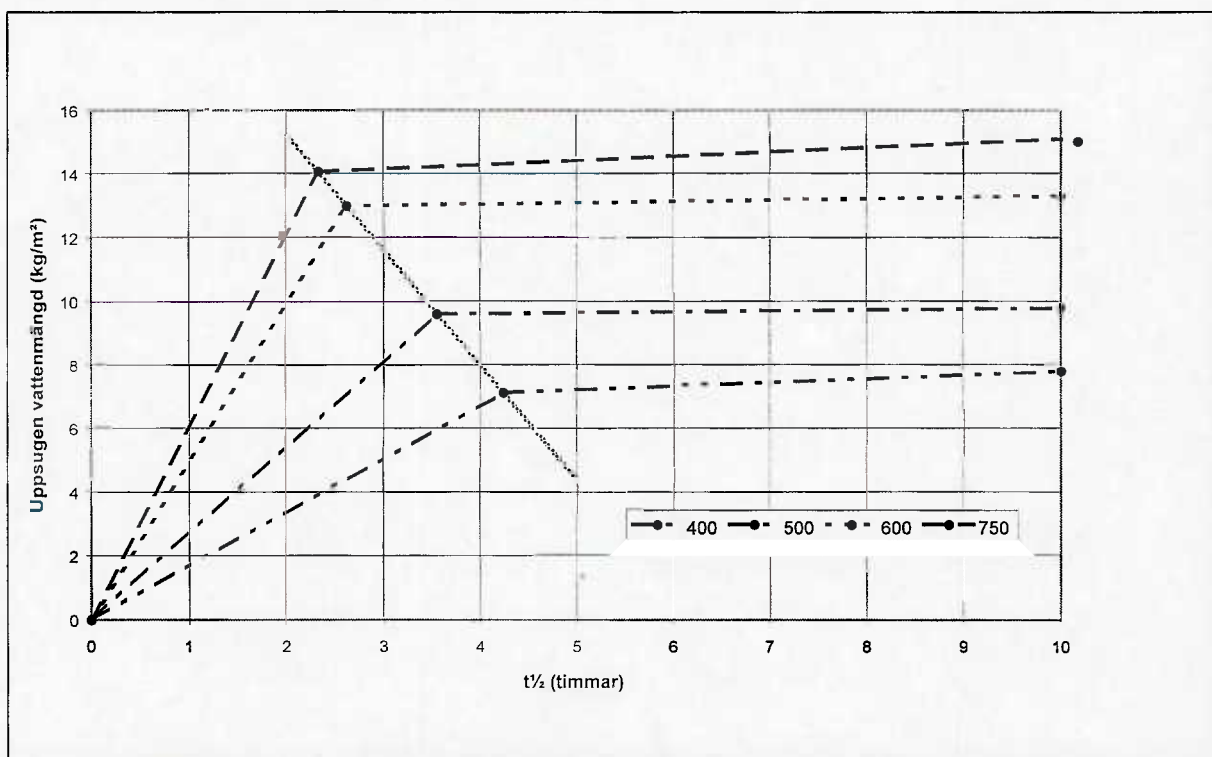
3.3 Vattensugningssamband

I figur 8 anges knickpunkten och justerade vattenupptagningskurvor för de olika proverna. Det finns ett tydligt samband mellan uppsugen vattenmängd vid knickpunkt, uppsugningshastighet och tid till knickpunkt. Detta samband har i figuren markerats med en grov, skuggad linje och ges av,

$$M = 0.0225 - 0.0036 \cdot \sqrt{t} \quad (\text{ekvation 3})$$

där M = uppsugen vattenmängd vid knickpunkt (kg/m^2)
 t = tid till knickpunkt (h)

Ekvation 3 kan användas för att beräkna knickpunkten för ett material av samma typ som de provade. Observera att provkroppen måste ha samma tjocklek som de prov vilka användes vid grundförsöket, dvs 35 mm. En generalisering, oavhängigt provtjockleken, kan dock göras med hjälp av strukturvariabler.



Figur 8. Samband mellan vattenfylld volym, sugningshastighet och tid till knickpunkt

3.4 Samband mellan struktur och vattensugning

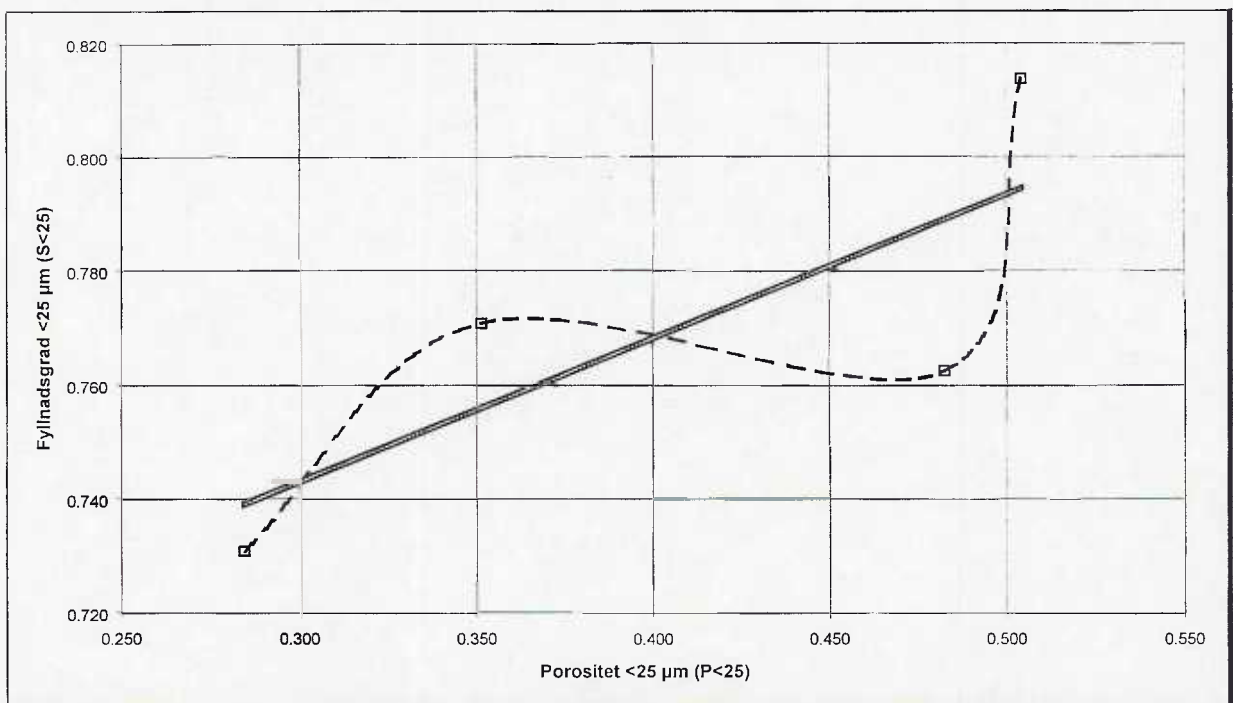
Den kapillära vattensugningsförmågan ökar med ökande skrymdensitet hos materialet. Det finns vidare ett direkt samband mellan sugförmågan och volymsandelen kittmassa (kompakt material + porer <25 µm). En ökande andel kittmassa ger ökande mängd uppsuget vatten. Fyllnadsgraden beräknat på volymen hos de i kittmassan ingående porerna är cirka 0.77 oavsett materialkvalitet. Detta indikerar att de stora porerna (<25 µm) har liten eller ingen betydelse för hur mycket vatten AAC kan suga upp från en fri vattenyta under en rimligt kort tid (1-2 dygn).

Det i föregående kapitel redovisade sambandet mellan uppsugen vattenmängd, uppsugningshastighet och tid till knickpunkt kan generaliseras med hjälp av strukturvariabler. Principen är att ersätta variabeln M med en variabel som beskriver den volym som förväntas vara tillgänglig för vattenfyllnad.

Fyllnadsgraden för porer < 25 µm ($S_{<25}$) definieras som uppsugen vattenmängd vid knickpunkt (M) i förhållande till porositet av porer med diameter < 25 µm ($P_{<25}$). **För de aktuella materialen återfinns fyllnadsgraden i intervallet 0.73-0.81**, med det högre värdet för materialet med den högsta tillgängliga porvolymen. Observera att variabeldefinitionen *inte* innebär att allt vatten faktiskt befinner sig i porer med diameter < 25 µm.

Genom att beräkna $S_{<25}$ vid knickpunkten för de olika materialproverna enligt figur 8 fås ett samband mellan $S_{<25}$ och $P_{<25}$ enligt figur 9 respektive ekvation 4.

$$S_{<25} = 0.25 * P_{<25} + 0.67 \quad (\text{ekvation 4})$$



Figur 9. Samband mellan porositet <25 µm och fyllnadsgrad

Den volym som, per areaenhet, ska fyllas med vatten är

$$V_{\text{till}} = S_{<25} * P_{<25} * d \quad (\text{ekvation 5})$$

där V_{till} = volym som förväntas vara tillgänglig för vattenfyllnad (m^3/m^2)

$S_{<25}$ = fyllnadsgraden för porositet $< 25 \mu\text{m}$ (-)

$P_{<25}$ = porositet $< 25 \mu\text{m}$ (-)

d = skiktets tjocklek (m)

vilket med hjälp av ekvation 4 kan omformas till

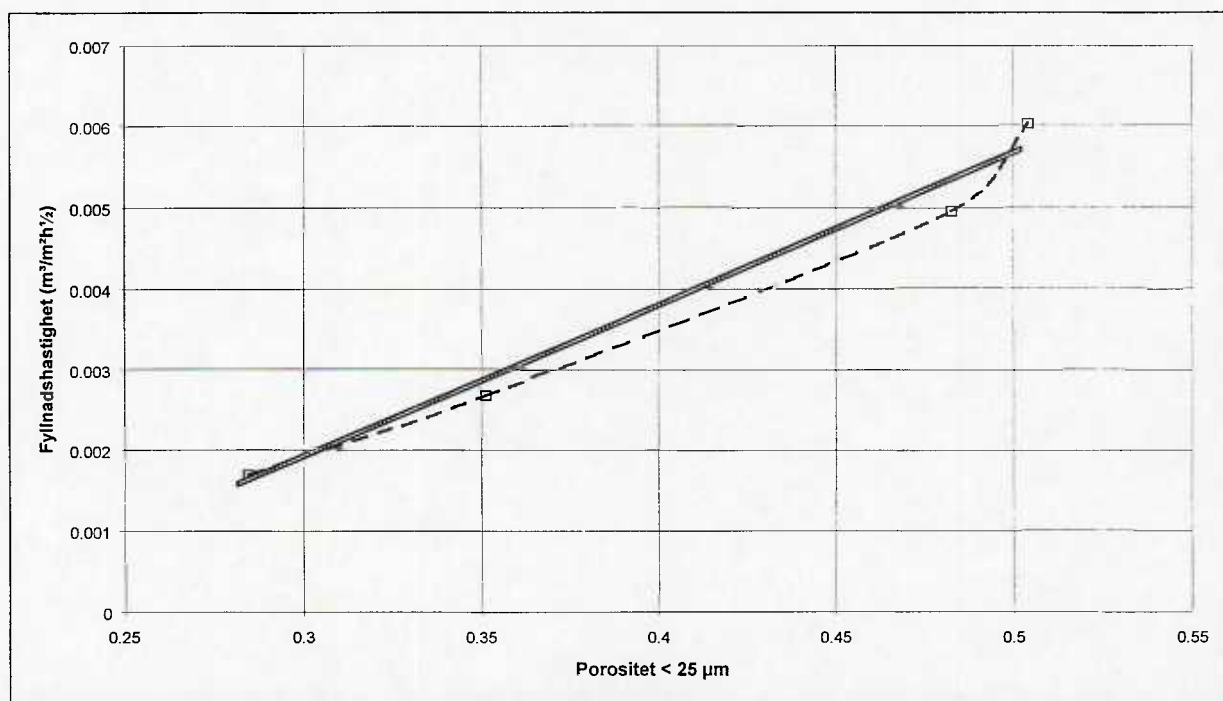
$$V_{\text{till}} = d [0.25 * (P_{<25})^2 + 0.67 * P_{<25}] \quad (\text{ekvation 6})$$

Ekvation 6 anger alltså den volym som förväntas bli fylld med vatten, med utgångspunkt från strukturvariabeln "porositet av porer $< 25 \mu\text{m}$ i diameter".

Hur lång tid det tar att fylla denna volym beror naturligtvis på uppsugningshastigheten hos det enskilda materialet. Med utgångspunkt från sambanden i figur 8 kan en fyllnadshastighet med avseende på volymen definieras. Fyllnadshastigheten (v_{fyll}) definieras som den hastighet med vilken porositeten av porer $< 25 \mu\text{m}$ ($P_{<25}$) fylls med vatten.

Genom att beräkna v_{fyll} vid knickpunkten för de olika materialproverna enligt figur 8 fås ett samband mellan v_{fyll} och $P_{<25}$ enligt figur 10 respektive ekvation 7.

$$v_{\text{fyll}} = 0.0189 * P_{<25} - 0.0038 \quad (\text{ekvation 7})$$



Figur 10. Samband mellan porositet $< 25 \mu\text{m}$ och fyllnadshastighet

Genom att multiplicera v_{fyll} med fyllnadstiden (t) och därefter sätta V_{till} och v_{fyll} lika erhålls

$$d * [0.25 * (P_{<25})^2 + 0.67 * P_{<25}] = \sqrt{t} * [0.0189 * P_{<25} - 0.0038] \quad (\text{ekvation 8})$$

Observera att i ekvation 8 ingår endast $P_{<25}$ som materialspecifik parameter. Det är alltså den enda parameter som behöver bestämmas via provning för att kunna beräkna antingen tiden tills ett visst materialskikt är kapillärt mättat eller för att bestämma hur tjockt skikt som blir mättat under en viss tid. Ekvation 8 gäller endast då materialet har fri tillgång på vatten, tex då det vid slagregn bildas en vattenfilm på ytan.

Exempel 1;

Antag att $P_{<25} = 0.35$ samt $t = 20$ minuter = 0.33 h.

Vattnet kommer då att sugas in till djupet,

$$d = \sqrt{0.33 * [0.0189 * 0.35 - 0.0038]} / [0.25 * (0.35)^2 + 0.67 * 0.35] = \\ = 0.00163 / 0.265 = 0.0062 \text{ m} = \mathbf{6.2 \text{ mm}}$$

Exempel 2;

Antag att $P_{<25} = 0.42$ samt skiktjockleken = 15 mm = 0.015 m.

Tiden tills materialet är kapillärt mättat blir då,

$$\sqrt{t} = 0.015 * [0.25 * (0.42)^2 + 0.67 * 0.42] / [0.0189 * 0.42 - 0.0038] = \\ = 0.0049 / 0.00414 = 1.18 \text{ h}^{1/2} \Rightarrow t = 1.39 \text{ h} = \mathbf{83 \text{ minuter}}$$

4 Resultatdiskussion

Försöken har visat att det för AAC är möjligt att koppla samman strukturvariabler och fukt-egenskaper. Om denna möjlighet kan användas vid tex datorsimuleringar av fuktflöden är en öppen fråga, vilken får utvärderas senare. Denna studie har gjorts med "ren" AAC som prov-material, men det finns god anledning att tro att motsvarande arbeten kan göras med andra material som utgångspunkt (putsbruk har redan tidigare studerats) eller med materialkombinationer.

Det begränsade materialurvalet, speciella blandningar har inte kunnat göras, samtidigt som tillgängliga analysytor varit små, innebär att de absoluta sifferresultaten och angivna ekvationer bör behandlas försiktigt. Det står emellertid helt klart att analystekniken kan användas under vissa förutsättningar.

En möjlig felkälla är osäkerheten angående materialets kompaktdensitet, vilket kan ändra siffervärdena kraftigt. En annan möjlig felkälla är begränsningen av nedre porstorleken till 25 μm i diameter. Att just denna gräns har använts i resultat beror endast på den använda analystekniken. En fullständigare bild av porstorlekar och porvolymen även för porer < 25 μm , möjligen via utökade analyser i svepelektronmikroskop, skulle vara mycket värdefullt vid fortsatta studier av sambanden mellan strukturella egenskaper och fukttegenskaper. Detsamma gäller för tillgång till data från uttorkningsförsök.

BILAGA 1

Bilder från ljusoptiskt mikroskop respektive svepelektronmikroskop (SEM).
Observera att bild 1-6 ursprungligen är färgbilder.
Av trycktekniska skäl återges de i gråskala, vilket tyvärr sänker såväl kvaliteten
som informationsmängden.

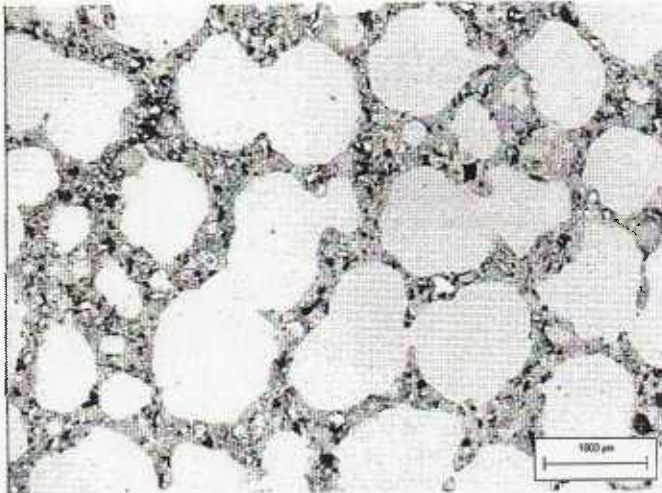


Bild 1. Kvalitet 400 (350) kalkbaserad

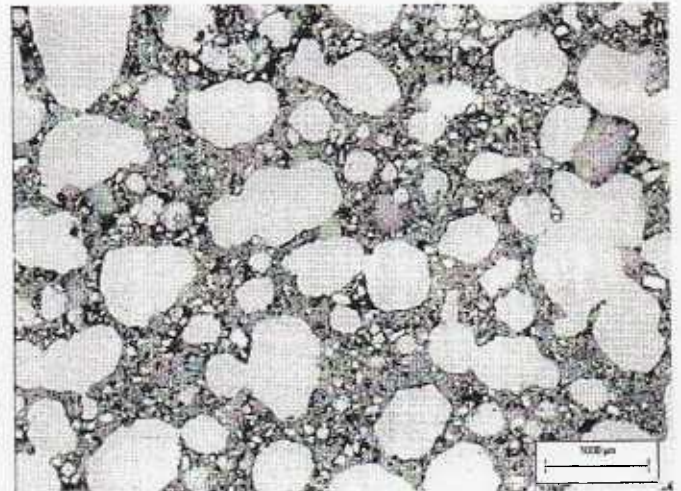


Bild 2. Kvalitet 500 (488) kalkbaserad

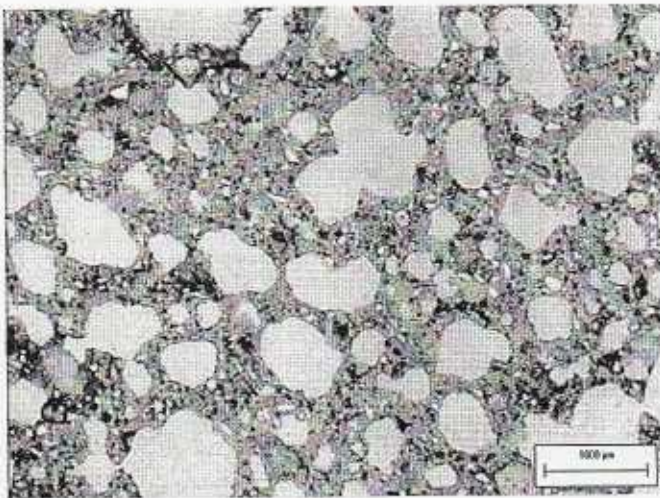


Bild 3. Kvalitet 600 (612) kalkbaserad

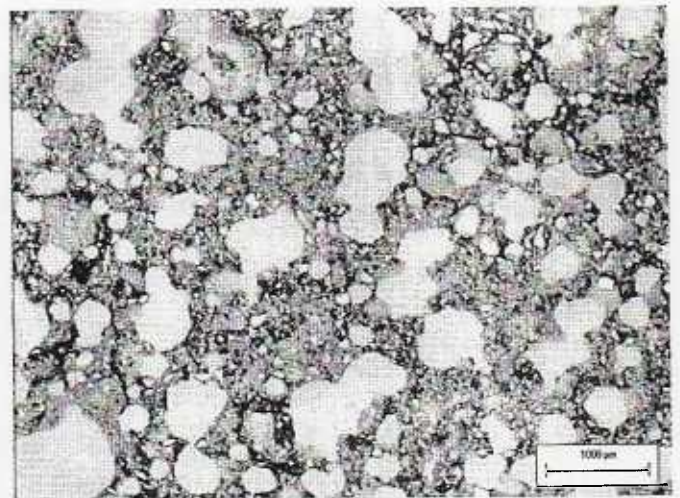


Bild 4. Kvalitet 750 (637) kalkbaserad

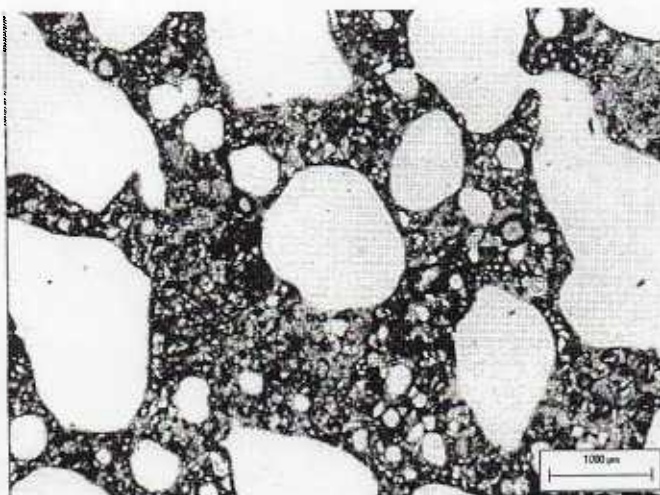


Bild 5. Kvalitet 400N (358) cementbaserad

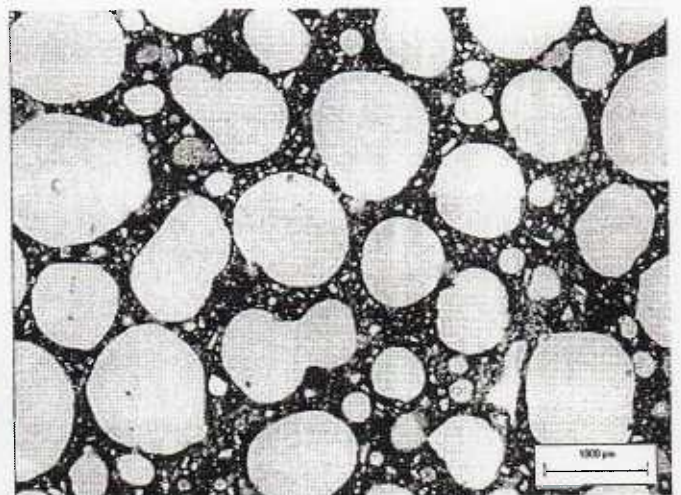


Bild 6. Kvalitet 450N (416) cementbaserad

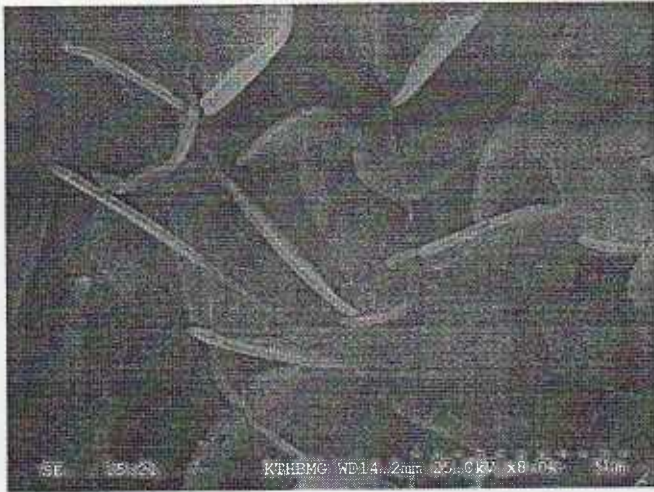


Bild 7. SEM Kvalitet 400 (350) kalkbaserad



Bild 8. SEM Kvalitet 400N (358) cementbaserad

Copies from Working Paper Series can be ordered from:
Research and Development Committee
University of Gävle, SE-801 76 Gävle, Sweden

Working Paper Series published until 31 December 1998 at
University College of Gävle-Sandviken No 1-52 = ISSN 1102-5476:

47. Westergren, K-E: Energy use in houses with heat pump. Department of Mathematics, Natural and Computer Sciences. 1998.
48. Ljungström, Niklas: En studie av hur tjänstemännen påverkas i sina yrkesroller vid en satsning mot TQM. Department of Technology. 1998.
49. Nilsson, R.: Nivågraderade betyg. En jämförelse mellan 28 gymnasieskolor. Department of Mathematics, Natural and Computer Sciences. 1998.
50. Nilsson, R.: Fysikprov och fysiklaborationer i det nivårelaterade betygssystemet på gymnasiet. Department of Mathematics, Natural and Computer Sciences. 1998.
51. Modiano, M.: Sexual Mysticism, Literary Politics, and the Myth of a "Normative" Lawrence. Department of Humanities and Social Sciences. 1998.
52. Roots, P.: Värmeförlust från en grund som utföres med golvvärme. Department of Technology. 1998.

Working Paper Series published as from 1 January 1999 at
University of Gävle No 1- = ISSN 1403-8757:

1. Westergren, K-E and Waller, T.: Virtual housing laboratory. A system for simulating the energy use for heating in single family houses. Department of Mathematics, Natural and Computer Sciences. Centre for Built Environment, Royal Institute of Technology, Gävle, Sweden. 1999.
-

Postal address: SE-801 76 Gävle
Visiting address: Kungsbäcksvägen 47
Telephone: +46 26 64 85 00 Fax: +46 26 64 86 86
E-Mail: has@hig.se