LUND UNIVERSITY

# Byggnadsmaterialforskning vid LTH : Del 1. En översikt

Bergström, Sven Gabriel

*Published in:*
Cement & Betong

1971

Link to publication

*Citation for published version (APA):*
Bergström, S. G. (1971). Byggnadsmaterialforskning vid LTH : Del 1. En översikt. *Cement & Betong*, *46*(2), 139-158.

*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

# Byggnadsmaterialforskning vid LTH

## *Del I. En översikt*

Av professor SVEN G. BERGSTRÖM,
Tekniska Högskolan i Lund, Lund.

UDK 691

### 1. Bakgrund

Avdelningen för byggnadsmateriallära vid LTH startade 1964, till en början som självständig institution, numera, efter institutionsreformen, som en avdelning inom storinstitutionen för byggnadsteknik. I denna ingår professurerna i byggnadsteknik I, byggnadsteknik II, byggnadsmateriallära och byggproduktionsteknik, bitr. professuren i byggnadsakustik samt speciallärarbefattningarna i geologi och geoteknik, totalt sålunda sju läroämnen.

Avdelningen består i dag av 16 personer, varav 7 forskare (civ. ing., tekn. lic., prof.). Ej mindre än sju personer är anställda på forskningsanslag från BFR eller STU, vilket belyser forskningsrådens stora betydelse för uppbyggnaden av forskningen vid högskolor och universitet.

I en serie artiklar skall författaren redovisa den forskning som avdelningen bedriver. I denna del ges en översikt över samtliga forskningsprojekt medan följande artiklar behandlar specialområdet betongforskning samt några intressanta skadeutredningar. Författaren vill understryka att prioriteten till vårt eget försöksmaterial och våra teoretiska betraktelser tillkommer de namngivna projektledarna.

### 2. Forskningsområden och forskningsprojekt

Praktiskt taget sedan starten 1964 har avdelningen bedrivit forskning inom de tre stora och enligt vår egen uppfattning centrala problemområdena

beständighet
reologi samt
fuktfixering och fukttransport.

Vi anser oss ha fått stöd i vår uppfattning om dessa områdens betydelse i Statens Planverks rapport "FoU-behov för SBN" (1), i Byggforskningens programskrift nr 12 om byggnadstekniska fuktproblem (2) och i det förhållandet att vi mycket ofta har ombetts att tillämpa våra forskningsrön och metoder på praktiska problem, t. ex. i samband med skador orsakade av fukt.

Vår *beständighetsforskning* började med en undersökning av kalkutlösning ur betong och korrosion på armering i anslutning till sprickor i betongkonstruktioner. Detta projekt är avrapporterat (3). Numera koncentrerar vi oss till kartläggning av kritiska fukttillstånd hos olika byggnadsmaterial. Ett typiskt sådant är kritisk vattenmättnadsgrad med hänsyn till frostbeständighet hos porösa och spröda byggnadsmaterial. Målsättningen för detta studium är att finna en gemensam nämnare för värdering av frostbeständigheten. Men även i andra sammanhang kan man tala om kritiska fukttillstånd, t. ex. med hänsyn till biologiskt angrepp på trä och träbaserade produkter. Även detta tema har vi tagit upp i beständighetsforskningen, där dock den mest koncentrerade attacken riktats mot frostbeständighetsproblemet.

Våra *reologistudier* har koncentrerats till krypdeformationer hos konstruktionsmaterial i allmänhet samt experimentella studier för att komplettera kunnandet inom vissa materialgrupper – autoklaverad gasbetong, betong, trä- och träbaserade produkter samt plastbetong. Studierna syftar inte bara till att ta fram kryptal för de olika materialen utan vill även belysa de allmänna lagarna för krypförlopp, t. ex. matematiska kryputtryck, beskrivning av återhämtning efter avlastning och inverkan av växlande fukttillstånd med koppling till konstruktionens dimensioner.

Ett speciellt reologiprojekt avser klassificering av fogmassor med utgångspunkt från deras reologiska egenskaper. Undersökningen syftar till att ge möjligheter att beräkna spänningarna i fogmassa, angränsande material och i förbandet mellan dem vid given fogdeformation.

Vår *fuktforskning* inleddes med en studie rörande behovet av forskning om byggnadstekniska fuktproblem, genomförd i samarbete med två andra avdelningar vid LTH (byggnadskonstruktionslära och byggnadsteknik I) och numera avrapporterad (2). Vid vår avdelning har vi speciellt inriktat fuktforskningen på följande delområden:

*Fuktisotermer,* dvs. sambandet mellan jämviktsfuktkvot och omgivningens fuktighet. Isotermer anger vilka jämviktstillstånd som kommer att uppnås och alltså hur stor mängd fukt som skall avges eller upptas räknat från utgångsläget.

*Icke-stationära* fuktförlopp, dvs. förändringar i konstruktionsdelens fuktinnehåll som funktion av tiden. Exempel på sådana förlopp är uttorkning och anfuktning.

*Stationär fukttransport,* under vilken ingen ändring sker av konstruktionsdelens fuktinnehåll.

*Metoder att mäta* fuktinnehållet i konstruktioner eller mindre materialprov.

Man finner en mycket tydlig koppling mellan fuktforskningen och vår övriga forskning. I t. ex. beständighetsforskningen eftersträvar vi att bestämma kritiska fukttillstånd för olika material, dvs. de fukttillstånd som kan innebära att materialet förstörs eller att dess funktionsduglighet nedsätts i oacceptabel grad. I fuktforskningen eftersträvar vi att kunna bestämma eller förutse det fukttillstånd som kommer att råda i givet material i en given miljö. Inom reologin konstaterar man även att materialens beteende är starkt beroende av fukttillstånden. Detta gäller t. ex. fuktbetingade rörelser och krypdeformationer.

Vår strävan i forskningen rörande beständighet, reologi och fukt har varit att hålla samman de olika projekten så att de ömsesidigt påverkar varandra och beaktar varandras framsteg eller bakslag. Vi har också eftersträvat *forskning tvärs över materialgränserna så att samma grundsyn och samma värderingar tillämpas på olika material i samma funktion.*

Det senare medför att vi i allmänhet inte arbetar med materialbundna projekt, t. ex. betongs frostbeständighet, utan med funktionsbundna projekt, t. ex. frostbeständighet hos porösa, spröda material. Vi når då måhända inte så djupt inom ett visst materialområde, men vi vinner i bredd. Vi vinner möjligheten att kunna jämföra olika material i samma funktion *på lika villkor.*

Ett forskningsprojekt är dock klart materialbundet, nämligen projektet

Betong–polymer–fiberkompositer.

Kompositer är sammansatta material, i vilka man försökt att kombinera i och för sig kända delar till en helhet med gynnsamma egenskaper. Kompositerna kan vara partikelkompositer, t. ex. betong, fiberkompositer, t. ex. glasfiberarmerad plast, eller skiktkompositer, t. ex. plywood. Vissa egenskaper, t. ex. hållfastheten hos den välkända partikelkompositen betong, kan förbättras

genom inblandning av fibrer av olika slag, och man kan då tala om en betong–fiberkomposit. Man kan också fylla betongens porsystem med plast genom att först suga eller trycka in monomeren som med värme- eller strålningsbehandling bringas att polymerisera i porerna. Man får då en betong-polymer komposit. En kombination av båda metoderna är möjlig, därav projektets namn. De hållfasthetsvinster som kan förväntas är av nivån några hundra procent. Detta projekt skall behandlas närmare i nästa artikel i denna serie.

Forskning och utredning bedrives också i anslutning till examensarbeten och uppdrag. Många examensarbeten anknyts till pågående forskningsprojekt, t. ex. betr. krypdeformationer hos trä. I andra fall utnyttjas examensarbetena för en sonderande undersökning på något område, där vår nyfikenhet blivit väckt men där vi inte vet om vi ännu skall göra någon större satsning eller ännu inte har personella resurser för detta. Sådana examensarbeten har t. ex. avsett volymstabiliserat trä, korrosion på armering i betong av HCl från PVC-bränder och fiberarmerad betong.

Examensarbeten har också anknutits till uppdrag, t. ex. betr. användning av enbart krossad ballast i betong.

Uppdrag har ofta avsett skador, särskilt i samband med fuktförhållanden i undergolv. Men även mer konstruktiv uppdragsforskning har utförts. Vi har t. ex. genomfört en ganska omfattande studie av betong med enbart krossmaterial som ballast, vi har förhandberäknat krypdeformationer i en betongkonstruktion med successivt stegrad belastning och vi utreder metoder att beräkna oarmerad betongs krympning. Uppdragsverksamheten är ett mycket stimulerande inslag i avdelningens liv. Den ger oss möjlighet att testa användbarheten av våra forskningsmetoder och forskningsresultat och den ger oss även utmärkt stoff för exemplifiering i undervisningen.

### 3. Frostbeständighet hos porösa och spröda material

Projektledare: Civilingenjör Göran Fagerlund

Alla porösa och spröda material kan skadas av frysning om de vid frysningstillfället innehåller tillräcklig mängd vatten. Till den aktuella materialtypen räknas t. ex. tegel och annan byggnadskeramik, betong, lättbetong, asbestcement och kalksandsten. Frostskador på dessa material är tämligen vanliga i länder med vår klimattyp, och problemet har också blivit intensivt studerat i väl ett halvt sekel. Denna forskning har självfallet inte varit förgäves. Många ytterst värdefulla förhållanden har klarlagts, t. ex. bränningens avgörande betydelse för teglets frostbeständighet och luftinblandningens för betongens frostbeständighet.

En betydande del av de experimentella studierna har ägnats problemet att skapa en provningsmetod som rätt avspeglar olika materials rangordning ifråga om resistens mot de frostpåverkningar som förekommer i den verkliga konstruktionen. Man har därvid utvecklat olika metoder och olika värderingar i olika materialgrupper vilket omöjliggör en direkt jämförelse mellan olika material även om de skall användas i samma funktion i byggnaden, t. ex. i en fasad.

Man saknar med andra ord en över hela fältet gemensam syn på frostbeständighetsproblemet. Man saknar vidare kopplingen mellan provningsmetodens resultat och resultatet på fältet, uttryckt i livslängd i viss miljö.

Emellertid finns det faktiskt en lösning på problemet, en lösning som är utomordentligt enkel. Denna lösning utgår ifrån begreppet vattenmättnadsgrad, som anger hur stor andel av porsystemet som är vattenfylld. Man har i laboratorie- och fältförsök och i studier av olika provningsmetoder konstaterat att vattenmättnadsgraden vid frysning är avgörande för förstöringens snabbhet och omfattning. Detta är närmast

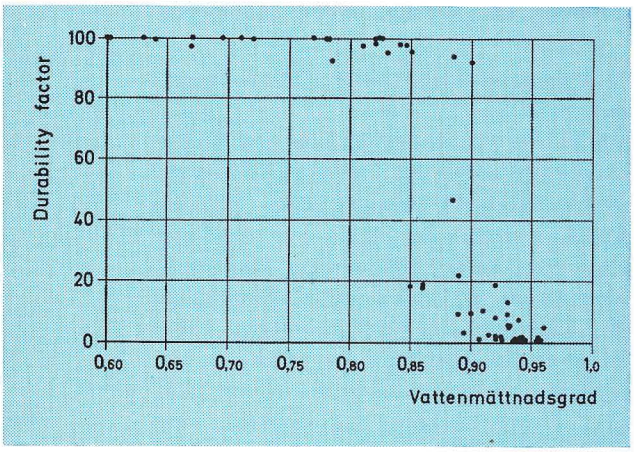



*Fig. 1. Vattenmättnadsgradens inverkan på "durability factor" enl. Whiteside och Sweet.*

en självklarhet. Förstöringen orsakas ju av de påfrestningar som uppstår i materialet när vattnet expanderar 9 % vid isbildning. Utan vatten uppstår ingen förstöring, och om porsystemet är hundraprocentigt vattenfyllt förstörs alla porösa och spröda material mycket snabbt vid frysning. (Att problemet är av betydelse huvudsakligen för spröda material beror på att dessa inte kan avlasta trycket av isens expansion genom stora deformationer före brott).

I en numera klassisk undersökning visade *Whiteside* och *Sweet* (4) diagrammet i fig. 1. Den horisontala axeln visar vattenmättnadsgraden hos provkroppar av betong, den vertikala axeln "durability factor" ett mått på frostbeständighet. Man observerar att provkropparna inte skadas förrän vattenmättnadsgraden är uppe i nivån 0,85 och att förstöringen vid högre värden på vattenmättnadsgraden blir mycket omfattande. Detta *kritiska värde* på vattenmättnadsgraden bestäms av flera faktorer: porsystemets karakteristika, hållfastheten, deformationsegenskaperna, permeabiliteten, isbildningshastigheten. För betong har det kritiska värdet beräknats av *Warris* (5), men det måste nästan betraktas som ogörligt att genomföra sådana beräkningar för alla material och materialvarianter. Däremot är det möjligt att experimentellt bestämma den *kritiska vattenmättnadsgraden* för alla i sammanhanget intressanta material. Detta värde betecknar vi $S_{krit}$, och det får karaktär av materialkonstant. Materialet ifråga tål högst denna vattenmättnadsgrad vid frysning.

Detta är emellertid endast den ena sidan av problemet. Den kritiska vattenmättnadsgraden kan jämföras med hållfastheten vid en dimensionering av konstruktionen med hänsyn till belastningar. I det senare fallet måste den pålagda spänningen understiga hållfastheten, annars brister materialet och därmed konstruktionen. *I frostbeständighetsfallet måste vattenmättnadsgraden i konstruktionen vid frysning understiga den kritiska vattenmättnadsgraden, annars brister materialet.* Om den vattenmättnadsgrad, som uppstår i konstruktionen, betecknas $S_{akt}$, så gäller alltså följande villkor för frostbeständighet.

$$S_{krit} > S_{akt}$$

Ju större differensen är mellan $S_{krit}$ och $S_{akt}$, desto större är säkerheten mot frostskador. Man kan som ett mått på graden av frostbeständighet skriva:

grad av frostbeständighet = $S_{krit} - S_{akt}$.

I våra undersökningar har vi först och främst försökt påvisa att en kritisk vattenmättnadsgrad verkligen existerar. Frysförsök har genomförts med förseglade provkroppar med varierande vattenmättnadsgrad. Provkropparna är prismor med dimensionen 30 × 30 × 120 mm, temperaturspannet är +5°C till −18°C, medelhastigheten hos temperatursänkningen är 4,6°C/tim. Uppkomna frysskador har indikerats med flera olika observationsmetoder bl. a. bestämning av dynamisk E-modul. Försök har gjorts med 14 olika materialvarianter ur materialgrupperna tegel, gasbetong, kalksandsten, asbestcement, cementbruk och kalkcementbruk. För samtliga material kunde en kritisk vattenmättnadsgrad fastställas med god precision. Fig.

2 och 3 visar två exempel, avseende lösbränt och välbränt tegel från samma tegelbruk. Som framgår av figurerna är $S_{krit} = 0.85$ för det lösbrända teglet och 0.75–0.76 för det välbrända. Om man inte beaktar ovan angivna definition på grad av frostbeständighet så skulle man kunna dra den helt felaktiga och av praktisk erfarenhet motsagda slutsatsen att det lösbrända teglet har högre frostbeständighet än det välbrända. Felet orsakas av att man bara räknar med den ena delen, nämligen $S_{krit}$, i frostbeständighetsuttrycket. Beaktar man även den andra delen, $S_{akt}$, så blir resultatet annorlunda. *Ett* värde på $S_{akt}$ kan man bestämma genom att låta materialet suga kapillärt från en fri vattenyta. Den vattenmättnad som då uppstår motsvarar vattenmättnaden hos en oskyddad utomhuskonstruktion efter långvarigt regn. Man ser då att $S_{akt} = S_{krit}$ redan efter 140 timmars vattensugning för det lösbrända teglet (fig. 2), medan $S_{akt} < S_{krit}$ för det välbrända teglet ännu efter 240 timmars vattensugning. Det välbrända teglet har med andra ord högre grad av frostbeständighet.

Det är frestande att i detta sammanhang kommentera begreppet S-värde för tegel. På grund av att frostbeständighetprovning är en tämligen tidsödande och omständlig procedur, har man sökt efter indirekta metoder att bedöma materialets frostbeständighet. Man har bl. a. försökt med begreppet S-värde som är

$$\text{S-värde} = \frac{\text{vattenupptagning "frivilligt"}}{\text{vattenupptagning "tvångsvis"}}$$

Med "frivilligt" menas en fri kapillärsugning, med "tvångsvis" en fyllning under inverkan av vakuum. Nämnartermen blir helt enkelt ett mått på den öppna porvolymen, och *S-värdet blir identiskt med vårt* $S_{akt}$. Man försöker m.a.o. att karakterisera materialets frostbeständighet med endast den ena delen av uttrycket och försummar delen $S_{krit}$. I stora drag finns en korrelation mellan S-värde och frostbeständighet, men stora

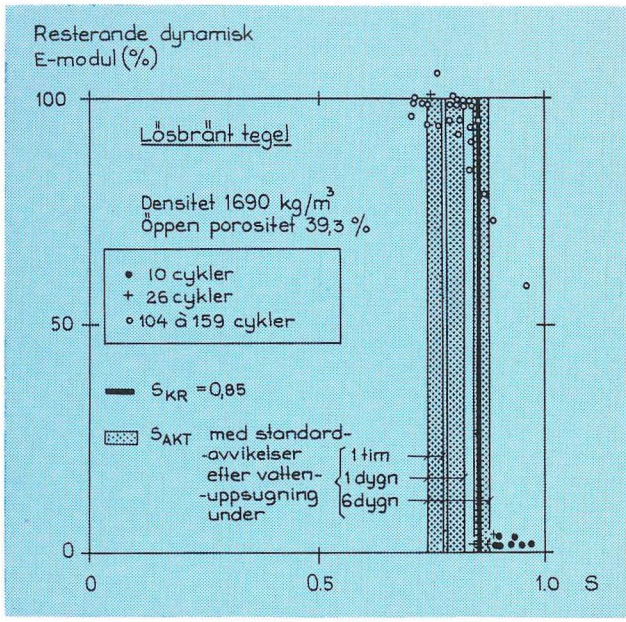
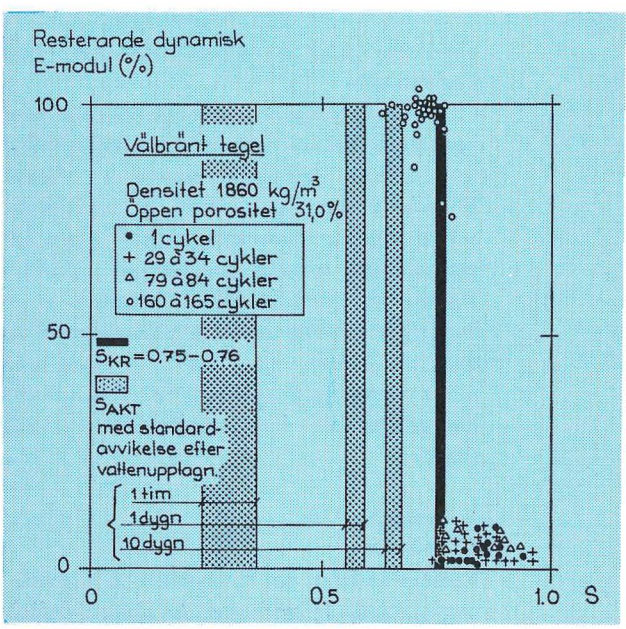



*Fig. 2. Kritisk ($S_{KR}$) och aktuell ($S_{AKT}$) vattenmättnadsgrad hos lösbränt tegel.*

*Fig. 3. Kritisk ($S_{KR}$) och aktuell ($S_{AKT}$) vattenmättnadsgrad hos välbränt tegel.*



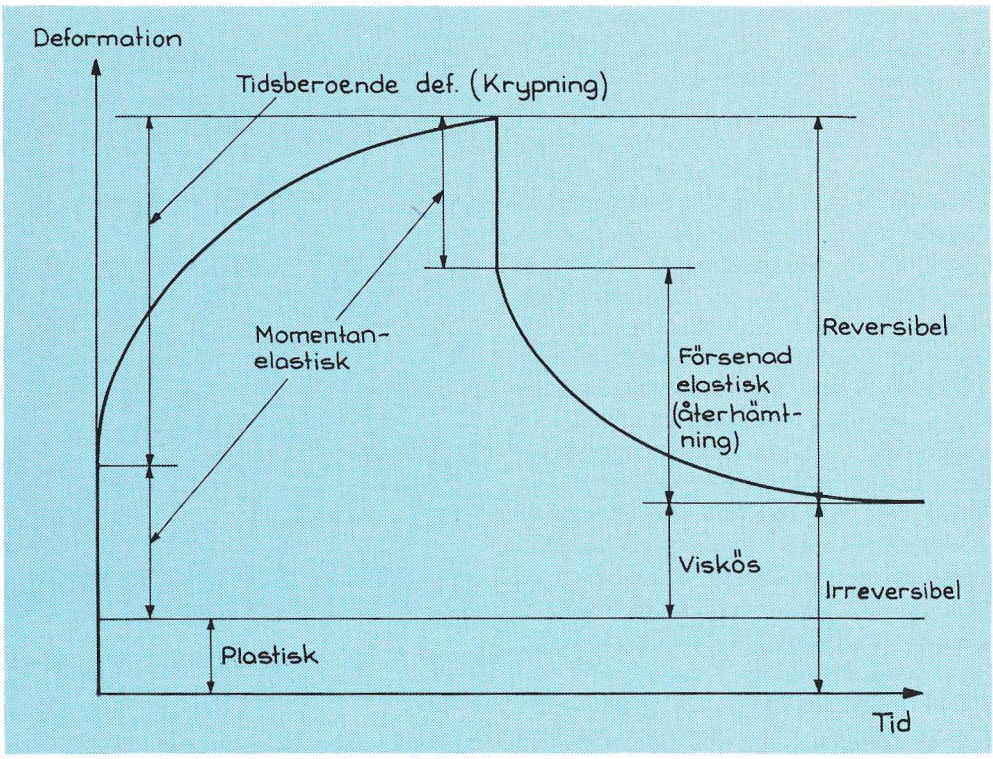



*Fig. 4. Deformations-tids-diagram för ett hypotetiskt material.*

avvikelser från huvudtendensen har också konstaterats.

Civilingenjör Göran Fagerlund, som leder våra frostbeständighetsstudier, sammanställer f. n. hittills uppnådda resultat i avhandlingsform. En uppsats med de principiella och teoretiska resonemangen och några experimentella resultat kommer att tryckas i Rilems tidskrift Materials & Structures inom kort. De fortsatta undersökningarna inriktas dels på fortsatt datainsamlande med den redan uppbyggda apparaturen, dels på tillämpningar på konstruktionsdelar i full skala.

## 4. Reologi

### 4.1 Allmänt

Reologi är läran om materialens deformationer, speciellt de tidsberoende. Denna definition inkluderar också materialens fuktberoende deformationer – krympning och svällning – som kan vara svåra att skilja från deformationer orsakade av belastning. Fig. 4 visar det vanliga utseendet hos deformations-tidsförloppet hos byggnadsmaterial och den vanligen använda terminologien. När materialet pålastas uppstår en momentan deformation, som för konstruktionsmaterialen till största delen är elastisk (återgående) men som också till en mindre del kan vara plastisk. Många byggnadsmaterial visar sedan en med tiden ökande deformation – krypning. Sådana material är betong och närbesläktade material, trä, aluminium, stål vid höga temperaturer eller höga spänningar, plaster m. fl. Krypdeformationerna hos de uppräknade materialen är av sådan storlek att de inte kan försummas. För betong

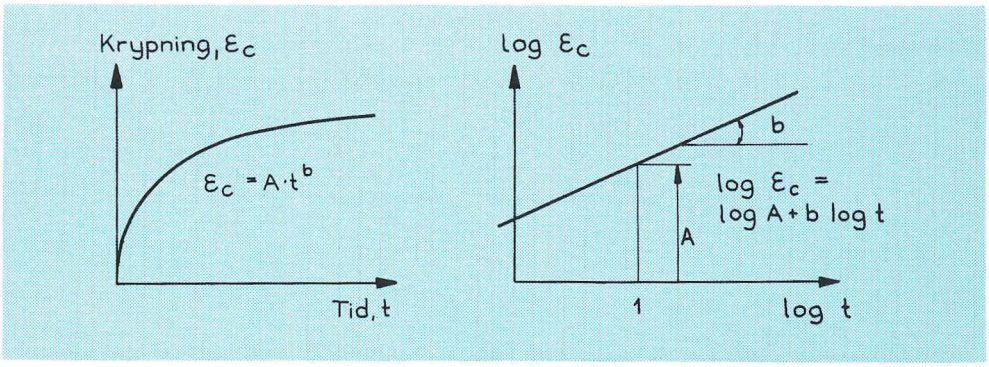



*Fig. 5. Krypfunktion $\varepsilon_c = A \cdot t^b$ bildar en rät linje i log-log-diagram.*

och trä är de efter något års belastning lika stora som, eller större än den momentana deformationen. När materialet avlastas, återgår den momentana elastiska deformationen och en del av krypdeformationen. Den återgående tidsberoende deformationen kallas försenad elastisk deformation eller återhämtning. Kvar står den plastiska deformationen samt en del av krypdeformationen, kallad viskös deformation.

Vår reologiforskning har vad avser konstruktionsmaterial inriktats på krypdeformationerna vid på- och avlastning. Ett speciellt reologiprojekt avser fogmassor. För betong gör vi dessutom en studie av krympning som dock behandlas i nästa artikel i denna serie.

### 4.2 Krypdeformationer hos konstruktionsmaterial

Projektledare: Tekn. lic. Anders Nielsen

För att man skall kunna handskas med krypdeformationerna är det värdefullt om krypningens tidsberoende kan beskrivas matematiskt. Litteraturen om krypning är rik på matematiska kryputtryck. Ofta utnyttjas exponentialfunktioner, som t. ex. kan härledas ur reologiska modeller, sammansatta av de enkla grundelementen fjäder, stötdämpare och friktionskoppling. I våra egna experiment och vid bearbetning av andras försök har vi funnit att följande enkla funktion – tidigare använd av flera författare, t. ex. Kajfasz (6) – mycket väl beskriver krypningens tidsberoende

$$\varepsilon_c = A.t^b \qquad (1)$$

där $\varepsilon_c$ = kryptöjningen
t = tiden för pålastning
A och b = empiriska konstanter, b ofta av nivån 0.25

Funktionen har tillämpats på cementpasta, betong, gasbetong, trä parallellt med och vinkelrätt mot fibrerna, board, spånskiva, plywood, aluminium, vissa plaster och spännstål. Funktionen är lätt att handskas med vid bearbetning av försöksresultat. Den bildar en rät linje i log-log-diagram, där A bestäms vid tiden t = 1 och b anger linjens lutning (fig. 5). Fig. 6 och 7 visar anpassning av funktionen till försöksvärden för plywood, board och gasbetong.

Potensfunktionen (1) är helt empiriskt bestämd. Man har inte lyckats ange någon grundvetenskaplig förklaring till dess allmängiltighet. Det är värt att observera att krypningen enligt denna funktion inte går mot något slutvärde. Huruvida ett slutvärde finns är för övrigt diskutabelt.

Det har stor principiell och praktisk betydelse om krypkurvan efter avlastning har samma form som pålastningskurvan. Vi analyserar f. n. några av våra egna försökskur-

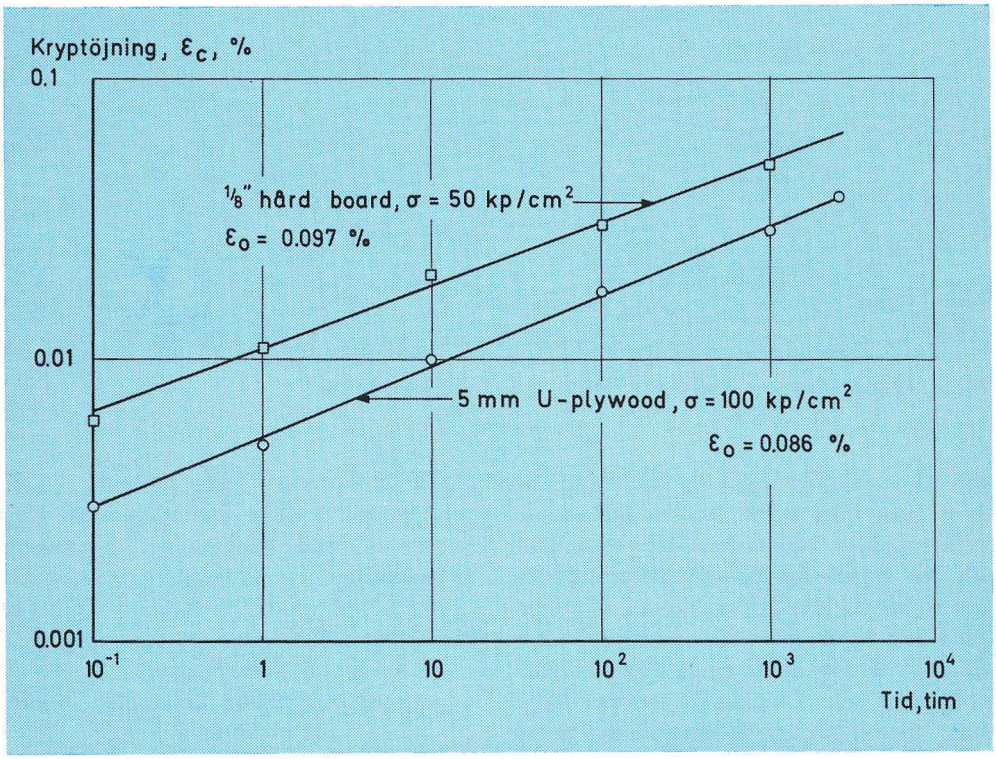
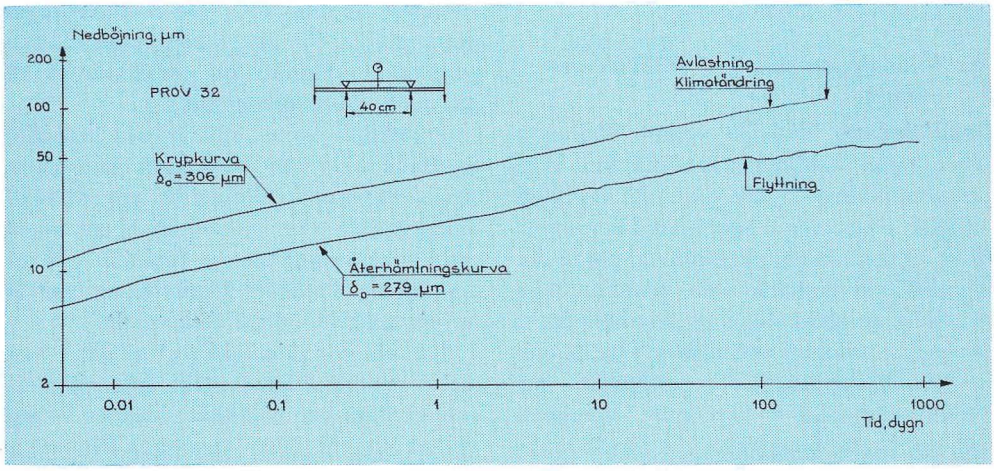



*Fig. 6. Krypkurvorna för 5 mm U-plywood och 1/8" hård board, enl. Lundgren. Spänningarna avser dragbelastning. Krypkurvorna är räta linjer i det dubbellogaritmiska diagrammet.*

*Fig. 7. Krypkurva och återhämtningskurva för Dalby Siporex, nr 32. Vattenmättad. Spänning 4 kp/cm² Böjbelastning.*



vor för att belysa den frågan. Något enhetligt svar kan man inte ge ännu.

De flesta krypförsök utförs med konstant fukttillstånd hos materialet, s. k. grundkrypning. Man har emellertid påvisat, t. ex. för trä och betong, att krypningen blir större om materialets fukttillstånd ändras medan lasten ligger på.

Detta gäller ändringar både uppåt och nedåt i fukthalt. Krypning under samtidig ändring av materialets fukttillstånd kallar vi sorptionskrypning. Eftersom de flesta konstruktioner genomgår sorptionskrypning borde forskningen i långt högre grad än vad som hittills skett, syssla med denna krypform och försöka att klarlägga hur man tar hänsyn till sorptionseffekten. Vi försöker att koppla denna effekt till de parametrar som bestämmer uttorknings- och anfuktningsförloppen i en materialvolym. Inte heller här är vi ännu beredda att ge ett svar på frågan hur man bör göra i ett praktiskt fall.

Förutom dessa mer principiella studier av krypning i allmänhet har vi gjort omfattande försök avsedda att komplettera det stundom bristfälliga förrådet av data för olika material. Två materialgrupper har intresserat oss i synnerligen hög grad, nämligen den autoklaverade gasbetongen och trä i virkesdimension.

Gasbetongstudierna har avsett material från fyra svenska fabriker. Försöken gjordes vid olika spänningsnivåer och olika men konstanta fuktnivåer.

Försöken visade att

medelvärdet för grundkrypningens kryptal*) efter 1 års belastning är 0.24 för torrt och 0.33 för vått material,

variationsområdet för ett enskilt fabrikats kryptal är stort – 60 % för torrt material och 100 % för vått,

de fyra fabrikaten hade ungefär samma krypning i torrt tillstånd men visade väsentliga skillnader i vått tillstånd – krypningen var i vått tillstånd 100 % större än i torrt tillstånd för två fabrikat, 50 % större för ett fabrikat och oförändrat för ett fabrikat (fig. 8),

krypningen är med god approximation direkt proportionell mot spänningen så länge denna är lägre än $\cong$ 50 % av brottspänningen.

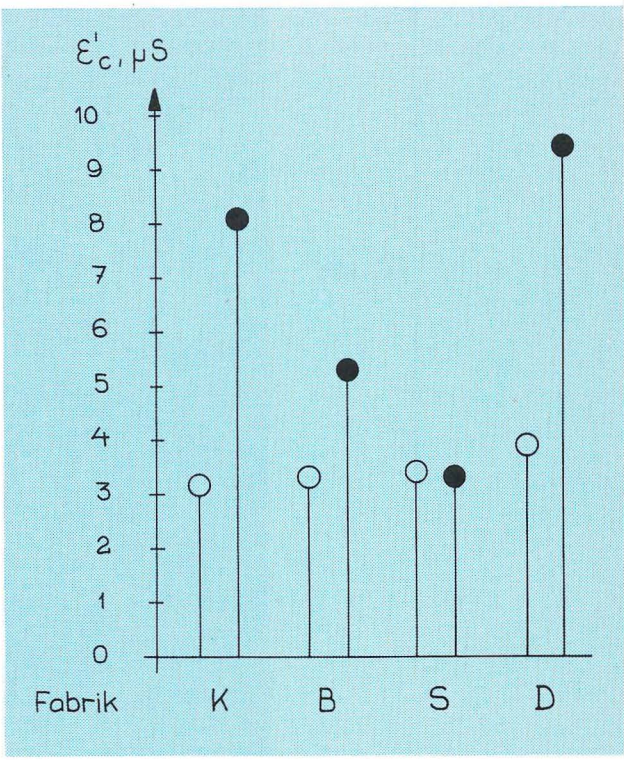



*Fig. 8. Gasbetongs krypning. Krypningen under det första dygnet per kp/cm² för fyra fabrikat och två olika klimat.*
*° anger material i jämvikt vid 43 % r. f.*
*• anger vattenmättat material.*
*Det framgår att materialet från fabrik S kryper lika i vått som i torrt tillstånd.*

*) Kryptal $\phi = \dfrac{\text{krypdeformation}}{\text{momentandeformation}}$

Den totala deformationen $\varepsilon_{tot}$ blir sålunda $\varepsilon_0 (1 + \phi)$ där

$\varepsilon_0$ = momentandeformationen.

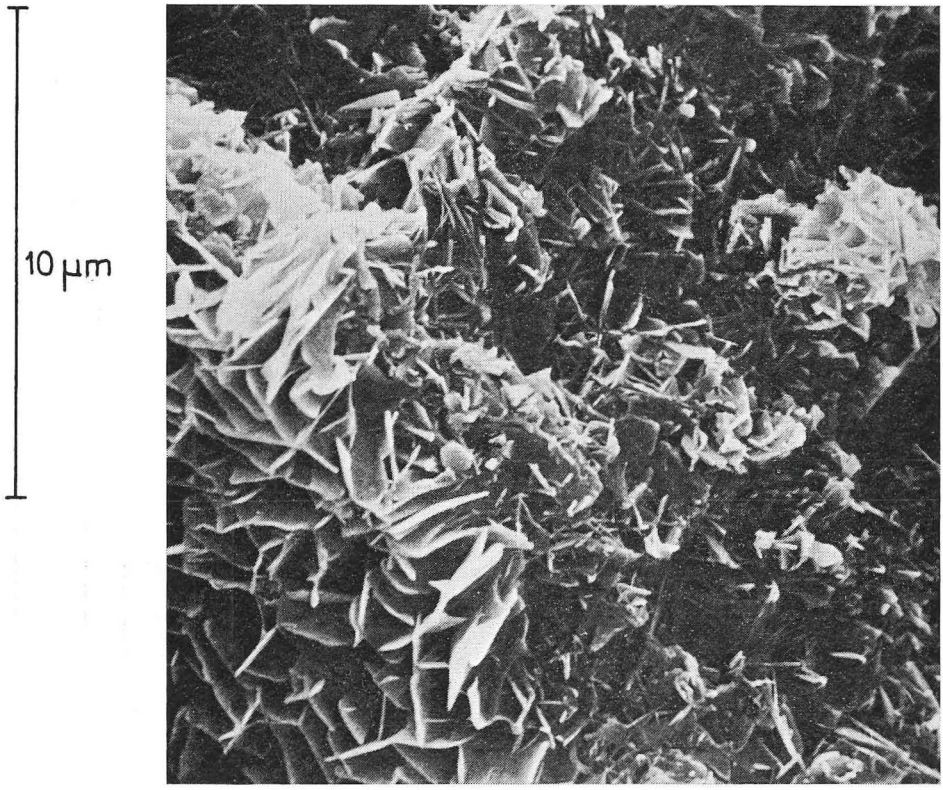



*Fig. 9. Gasbetong-struktur sett i scanning-elektronmikroskop. I nedersta vänstra hörnet syns strukturen i en blåsas yta. Den övriga delen av bilden visar en brottyta i en porvägg. De enstaka kornen är kristaller av hydratiserade kalciumsilikater. (Södertälje Siporex).*

Samtliga krypkurvor kan beskrivas med ekv. (1) varvid b är $\cong 0.21$, se t. ex. fig. 7.

Den märkliga skillnaden i de olika fabrikatens beteende i vått tillstånd har föranlett oss att göra vissa strukturstudier för att om möjligt finna de strukturella orsakerna till skillnaderna. Scanningelektronmikroskop har avslöjat att materialet är höggradigt kristallint (fig. 9) men ännu har vi inte funnit de sökta orsakerna.

Krypförsöken med trä har redovisats i en tämligen rikhaltig litteratur, som dock till största delen handlar om krypning hos små helrena provkroppar. Försök med trä av virkesdimension och med normala virkesfel är sparsammare förekommande, likaså försök med sorptionskrypning och försök med mycket lång varaktighet (flera år).

Vi har gjort vissa undersökningar i berörda avseenden, huvudsakligen genom noggrant förberedda och ledda examensarbeten. I ett examensarbete gjordes en fältstudie av långtidsdeformationer hos existerande träbjälklag, byggda i perioden 1850–1969. Totaldeformationen, eller rättare sagt, den totala avvikelsen från en horisontell linje mellan upplagan – bestämdes med en mätbrygga (fig. 10). Med provbelastning bestämdes böjstyvheten vid mätningstillfället, och krypdeformationen deducerades sedan under oli-

*Fig. 10. Mätbrygga för mätning av nedböjning på träbjälkar.*

ka antaganden om bjälkarnas krökning i initialskedet. Av naturliga skäl måste spridningen i en studie av detta slag bli betydande, men icke desto mindre var resultaten intressanta. Resultaten sammanfattas i fig. 11 som bl. a. visar att vi i extrema fall efter 100 års belastningstid deducerat fram så höga kryptal som 10. Efter 10 års belastning skulle kryptalet enligt denna studie i genomsnitt ligga på nivå 2.5. Fig. 11 visar också att en krypfunktion enligt ekv. (1) tämligen väl anpassar sig till de deducerade medelnivåerna.

I en annan studie har vi låtit examensarbetare göra krypförsök med små, helrena provkroppar och provkroppar av konstruktionsträ med virkesdimension, dels vid konstant klimat (65 % rf i konditionering och under belastning), dels vid ändrat fukttillstånd (t. ex. konditionering före pålastning vid 80 % rf, efter pålastning vid 65 % rf). Försöken gjordes som böjprovning, där de små provkropparna hade dimension 5 × 10 × 300 cm. Några av resultaten framgår av fig. 12, som bl. a. tydligt visar den ökade krypningen vid sorption. Sammanställning och bearbetning av dessa och liknande försök pågår.

Från våra krypundersökningar har en hel del material publicerats (7, 8, 9, 10).

### 4.3 Fogmassors reologi

Projektledare: Civilingenjör Per Gunnar Burström

Fogmassor klassificeras för närvarande dels efter ingående bindemedel (thiokol, akrylat osv.) och dels efter appliceringsmetoden. Vidare förekommer sådana begrepp som elastiska, plastiska och plastisk-elastiska massor utan någon närmare förklaring och

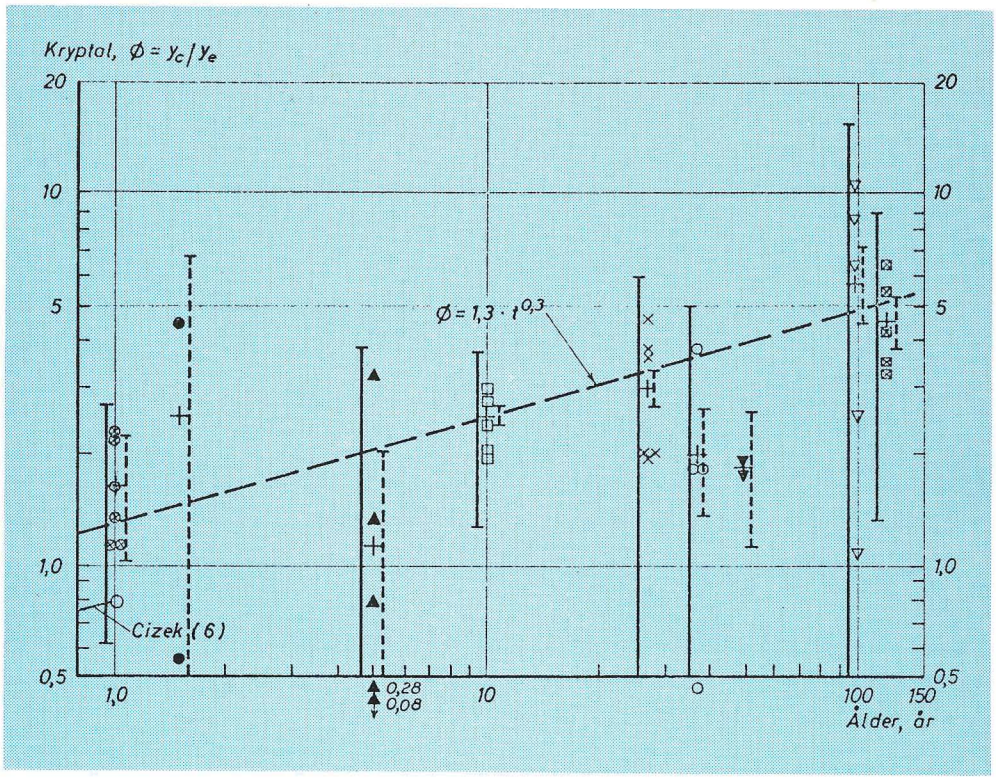



*Fig. 11. Långtidsdeformationer i träbjälklag. Kryptal som funktion av belastningstid.*
*+ = medelvärde*
*I = 95 %-konfidensintervall*
*= maximalt metod- och mätfel.*

utan att man är övertygad om att fogmassornas verkliga deformationsegenskaper beskrivs av de angivna reologiska termerna.

Den existerande klassificeringen ger anledning till en del begreppsförvirring och osäkerhet vid val av fogmaterial till en fogkonstruktion. En klassindelning bör i stället ta hänsyn till materialets funktion i fogen.

Funktionsdugligheten hos en fogmassa är i högsta grad kopplad till fogmassans reologiska egenskaper. I fogen uppstår rörelser med olika hastighet och av olika typ – jämna eller ryckiga – och vid olika temperaturförhållanden. Fogmassan påtvingas då en töjning och motsvarande spänning kan ge brott i fogmassan, i förbandet mellan fogmassa och anslutande element eller i materialet i anslutande element.

För att kunna beskriva de uppkommande påfrestningarna och brottriskerna behöver man i princip arbetskurvorna för de olika fogmassorna, dvs. $\sigma$–$\varepsilon$–diagrammen. För denna typ av material är den mot viss töjning svarande spänningen mycket känslig för vissa faktorer, särskilt belastningshastighet och temperatur. Fig. 13 visar arbetskurvor för två mycket vanliga fogmassor, en thiokolbaserad och en akrylbaserad. I fallet a har provning gjorts vid rumstemperatur och vid två olika rörelsehastigheter. Thiokol-

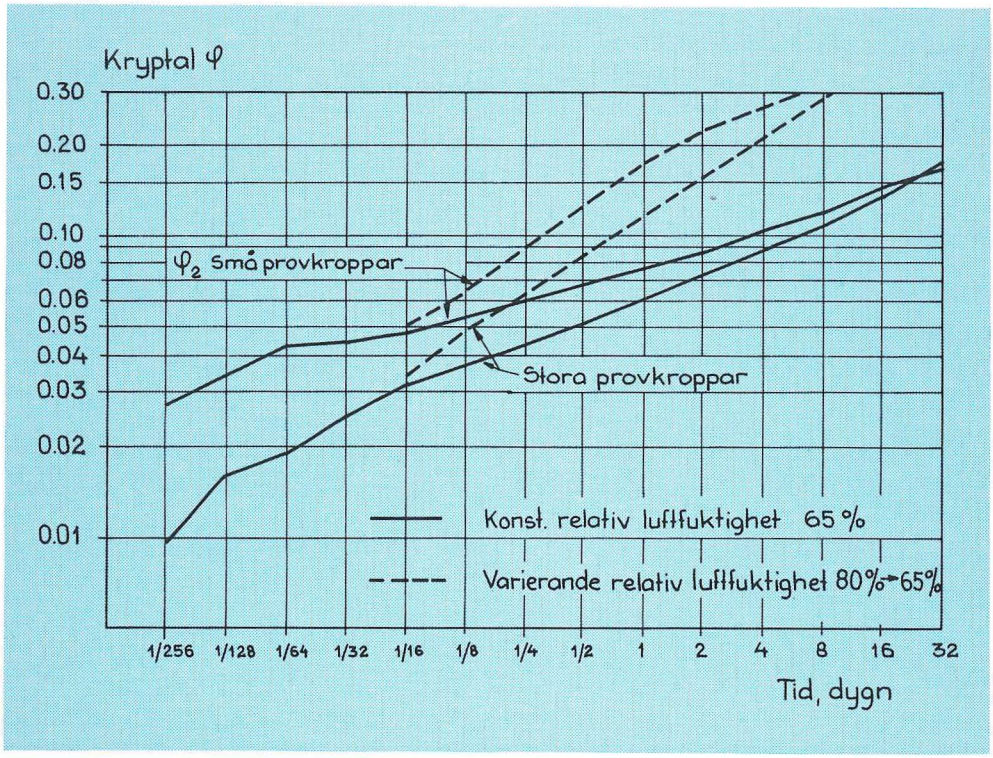



*Fig. 12. Resultat av krypförsök med konstruktionsträ och helrent virke. Kryptal som funktion av belastningstid. Heldragna kurvor: Konstant klimat 65 % r. f. Streckade kurvor: Uttorkning 80 % till 65 % r. f.*

massan bjuder c:a 5–10 ggr större motstånd mot fogrörelsen än vad akrylmassan gör. I fig. b visas effekten av temperatursänkning till –20°C. Thiokolmassans motstånd ökar då något, akrylmassans synnerligen kraftigt, varför spänningsskillnaden i detta fall blir betydligt mindre.

I detta fall var deformationshastigheten inte realistisk. Vi bygger f. n. en provningsmaskin som skall möjliggöra simulering av de olika typer av fogrörelser som är aktuella i praktiken. Målet för undersökningen är en metod att reologiskt klassificera fogmassorna så att man klarlägger samspelet mellan spänning, töjning, töjningshastighet, tid, temperatur och möjligen även miljöeffekter.

**5. Fuktfixering och fukttransport**

Projektledare: Civilingenjör Lennart Ahlgren

5.1 Fuktisotermer

Fuktisotermer är kurvor som anger sambandet mellan relativ luftfuktighet och materialets fuktkvot*).

De får för byggnadsmaterial i allmänhet ett utseende av den typ som visas i fig. 14. Normalt förekommer s. k. sorptionshysteresis, vilket innebär att kurvorna inte följs åt vid uttorkning (desorption) och anfuktning (absorption). Uttorkningskurvan ligger högre än anfuktningskurvan.

*) Fuktkvot anges i denna artikel genomgående i viktprocent.

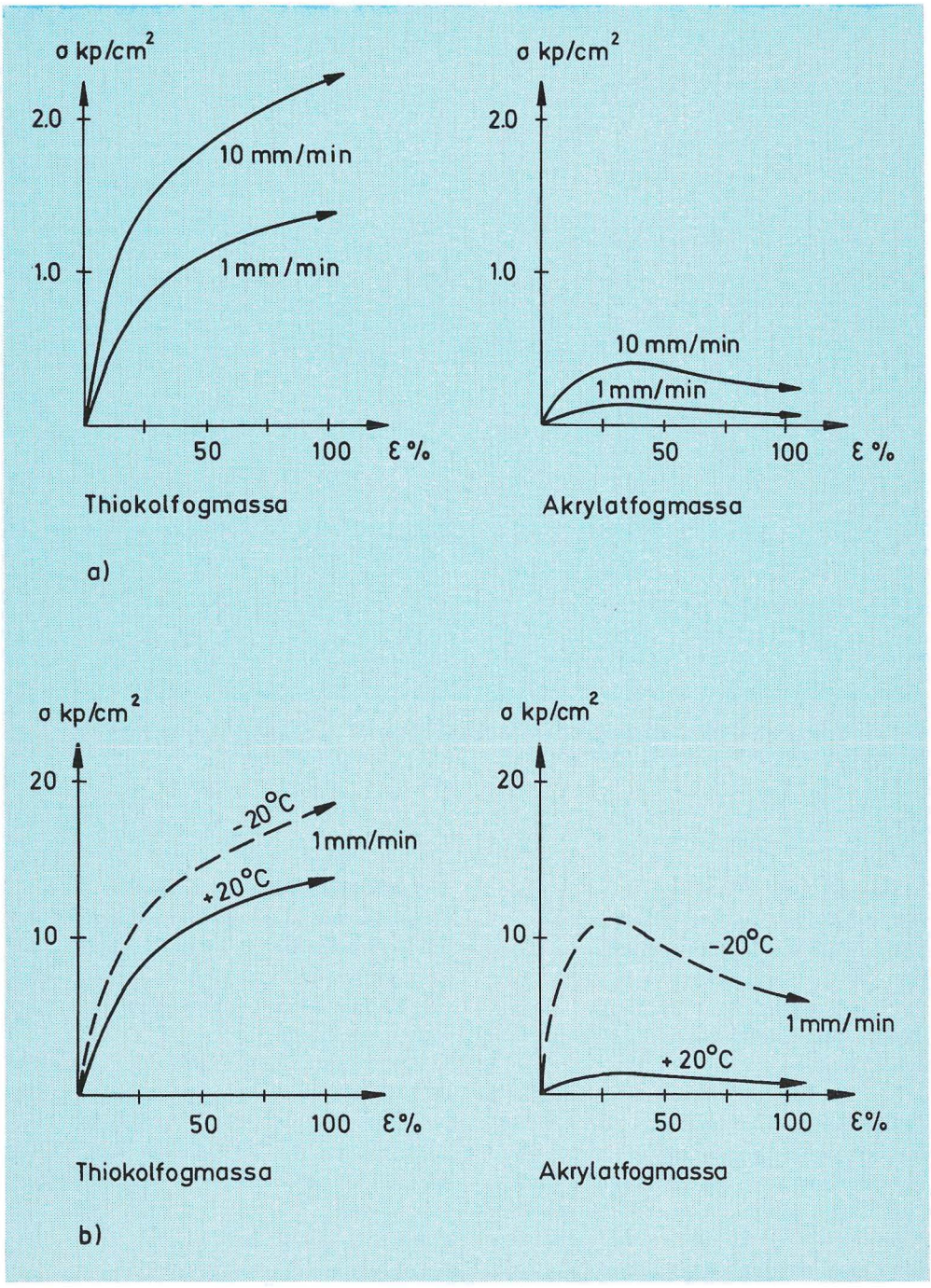



*Fig. 13. a) σ-ε-diagram vid olika töjningshastigheter för två vanliga typer av fogmassor. b) Provningstemperaturens inflytande på två vanliga fogmassor.*

Kurvorna i fig. 14 gäller bara inom det s. k. hygroskopiska området, som uppåt begränsas av en relativ luftfuktighet strax under 100 %. Betydligt högre fuktkvoter än vad som motsvarar övre gränsen för det hygroskopiska området kan uppnås genom kapillärsugning, vattentryck, kondensation och inte minst på grund av byggfukt.

Övergången mellan det hygroskopiska området och områden med högre fuktkvoter är ibland diffus, ibland mycket distinkt. Det senare gäller t. ex. för trä där den tydligt urskiljbara s. k. fibermättnadspunkten (fuktkvot 25–30 %) motsvarar $\simeq$ 100 % rf.

Isotermerna anger alltså jämviktstillstånden för materialet i en viss miljö. Om man tänker på ett uttorkningsförlopp från byggfukttillstånd till husets fortvarighetstillstånd så inser man att detta förlopp inte kan beräknas om vi inte känner det sluttillstånd som materialet inställer sig på och detta anges av isotermen. Isotermerna är alltså utomordentligt viktiga förutsättningar för våra möjligheter att förutsäga vilket fukttillstånd som kommer att uppstå i olika byggnadsdelar vid olika tidpunkter.

I allmänhet kommer den omgivande luftens relativa fuktighet att variera, t. ex. mellan vinterhalvår och sommarhalvår. Detta innebär att ett och samma material i en och samma konstruktionsdel kommer att utsättas för omväxlande desorption och absorption. Det blir då också av betydelse att klarlägga hur övergång sker från desorptions- till absorptionskurvor och tvärtom, en fråga som förvånande nog har behandlats mycket knapphändigt i den byggnadstekniska litteraturen.

För att kunna beräkna isotermer för olika material har vi byggt en klimatkammare (fig 15), i vilken luftfuktigheten kan varieras mellan 15 och 99 % med en ungefärlig precision på $\pm$0.3 %. Temperaturen kan varieras mellan 0 och +60°C. I denna apparat har vi bestämt isotermerna för ett femtiotal materialvarianter inom materialgrupperna betong, lättbetong, kalksandsten, asbestcement, tegel, gips, natursten, mineralull, trä, board, spånskiva, plywood, plast, kork, linoleum och jute. Fig. 16 visar ett exempel (asbestcement, densitet 1880 kg/m$^3$) där också övergång mellan absorptions- och desorptionskurvorna studerats.

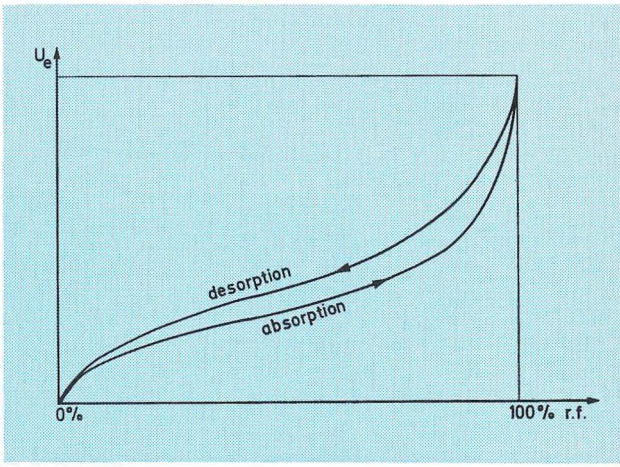



*Fig. 14. Absorptions- och desorptionsisotermer.*

En väsentlig del av målsättningen för våra isotermstudier är att finna metoder att beräkna isotermerna för olika material om deras sammansättning är känd och om delarnas egenskaper är kända. För många material av kompositttyp kan man helt enkelt addera de olika delmaterialens bidrag till det totala fuktinnehållet under förutsättning att delarna inte påverkar varandra, så att egenskaperna förändras, t. ex. genom kemisk reaktion eller försegling.

För betong har vi utarbetat en beräkningsmetod, som gör det möjligt att förutsäga isotermen om man känner cementhalten, vct, härdningsförhållandena och ballastens typ (11). Fig. 17 visar beräknade och uppmätta värden för en porballastbetong och fig. 18 för en tämligen normal betong med vanlig ballast. Isotermstudierna sammanställs f. n.

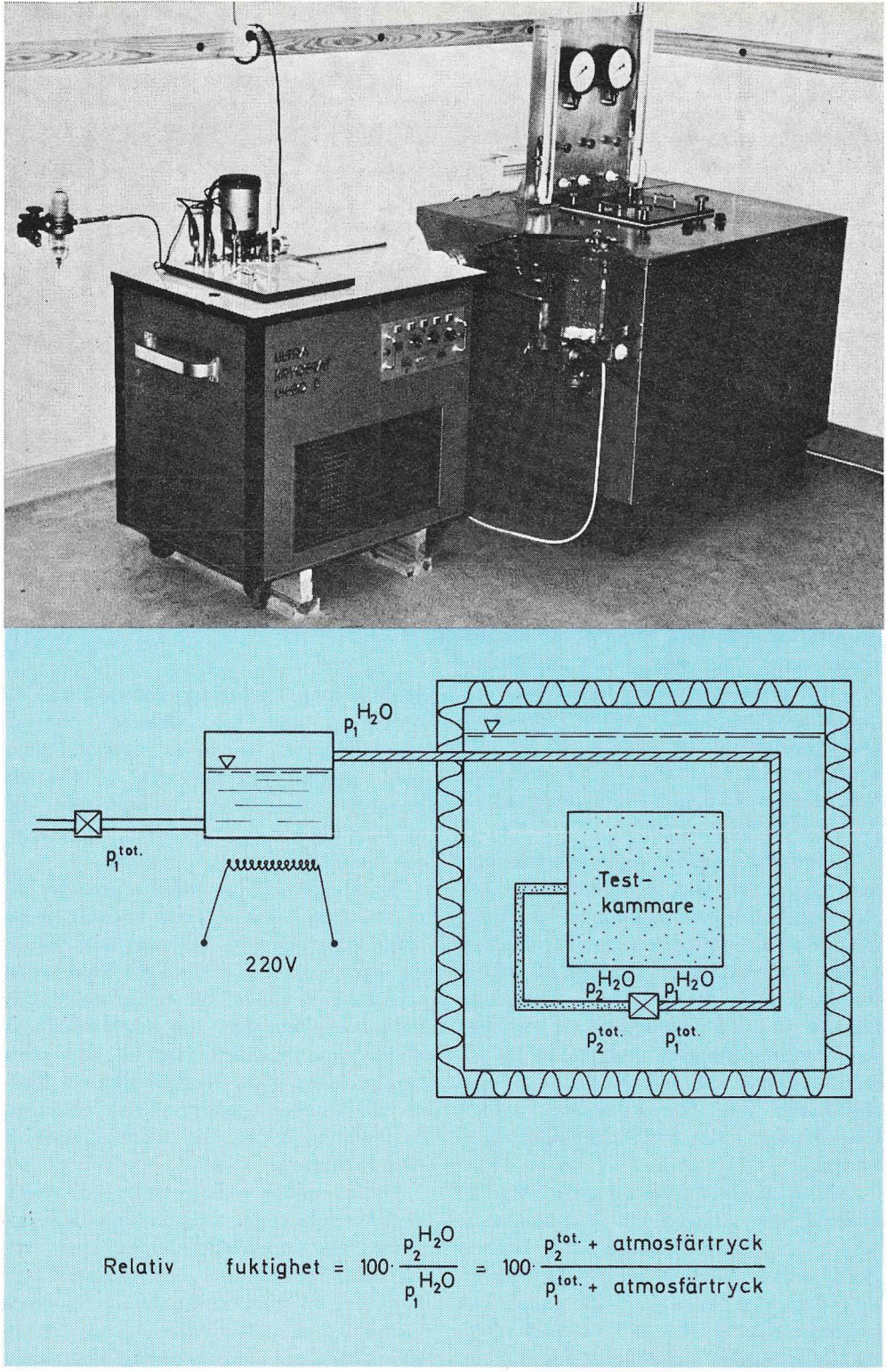



*Fig. 15. Klimatkammare för noggrann styrning av relativ fuktighet och temperatur.*

till en rapport som beräknas utkomma under år 1971. En delstudie återfinns i (11).

### 5.2 Icke-stationära fuktförlopp

Våra studier av icke-stationära fuktförlopp har i första hand inriktats på metoder att beräkna uttorknings- och anfuktningsförlopp. Flera beräkningsmetoder har redovisats i facklitteraturen, och det har varit möjligt att genom lämpligt val av beräkningskoefficienter få beräknade och uppmätta förlopp att överensstämma hyggligt, åtminstone med avseende på den genomsnittliga fuktkvoten i konstruktionsdelen. Ett större krav på beräkningsmetoden är att den också skall rätt beskriva fuktfördelningen i tvärsnittet vid varje tidpunkt mellan begynnelse- och sluttillstånd. Fördelningarna blir synnerligen ojämna som framgår av fig. 19 som visar den relativa fuktigheten hos luften i porsystemet hos gasbetong ($\gamma = 500$ kg/m$^3$, materialtjocklek 20 cm) vid endimensionell uttorkning från jämvikt med $\simeq$ 98 % till jämvikt med 43 % rf. Det ser ut som om ytskikten omedelbart inställer sig på jämvikt med omgivningen, ett förhållande som utnyttjats i vissa beräkningsmetoder.

I fig. 19 utspelas hela händelseförloppet i det hygroskopiska området. I ett verkligt fall måste man utgå från högre fukthalter, t. ex. vid uttorkning av en vägg. Man stöter då på ett mer komplicerat problem, beroende på att olika fukttransportmekanismer dominerar i olika skeden. Fig. 20 visar uttorkningshastigheten som funktion av tiden för samma material som i fig. 19. Här sker emellertid uttorkningen från full vattenmättnad. Vi får då till en början vätsketransport i materialet fram till en viss fuktkvot, då kontinuiteten hos vattnet i porsystemet bryts och även ångtransport äger rum med betydligt lägre uttorkningshastighet.

Våra studier av icke-stationära fuktförlopp pågår ännu. En orienterande studie av uttorkningsförloppet i ett betonggolv har pub-

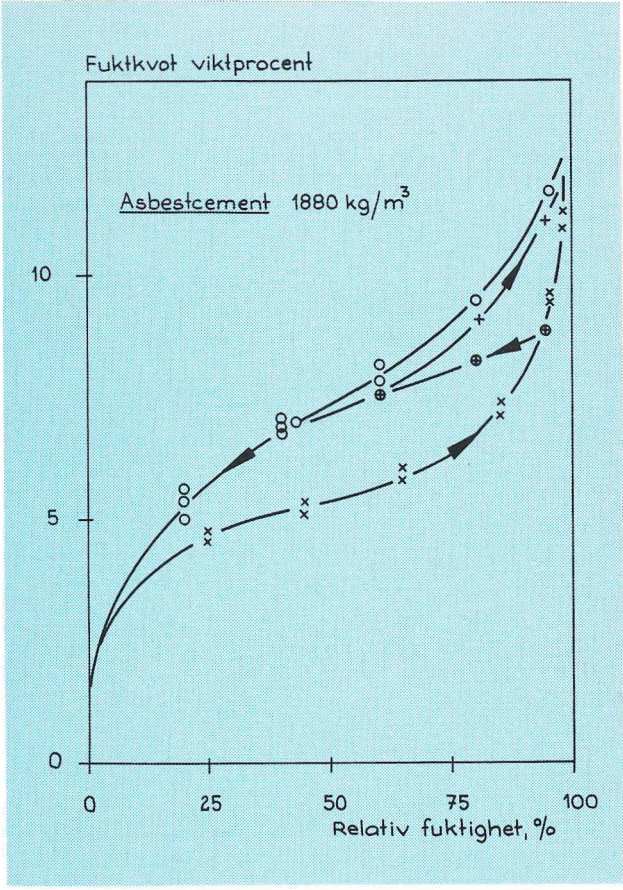
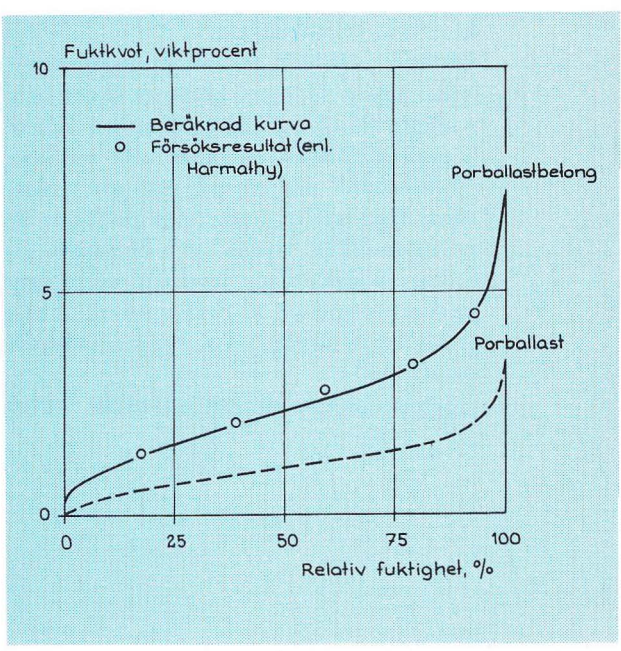



*Fig. 16. Absorptions- och desorptionsisotermer för asbestcement, densitet 1880 kg/m$^3$.*

*Fig. 17. Absorptionsisoterm för porballastbetong ($C = 170$ kg/m$^3$, $vct = 0{,}50$, $w_n/C = 0{,}22$). Porballastens absorptionsisoterm framgår av streckad kurva.*



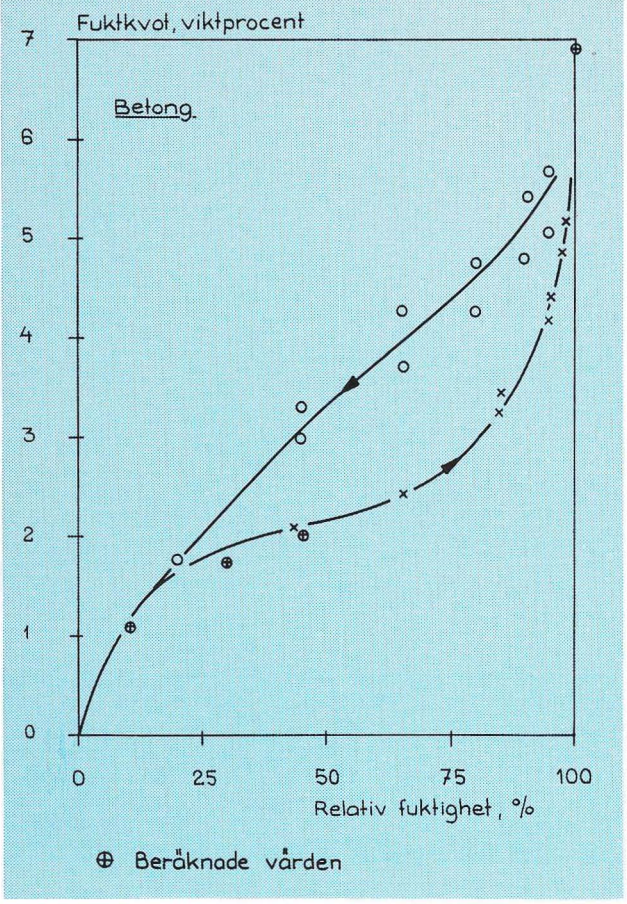



*Fig. 18. Absorptions- och desorptionsisotermer för betong ($C = 400$ kg/m³, $vct = 0{,}55$, $w_n/C = 0{,}23$) med beräknade värden inlagda.*

licerats (12). Vi räknar med att kunna sammanställa en fyllig rapport under år 1971.

### 5.3 Stationär fukttransport

Stationär fukttransport genom byggnadsmaterial brukar vanligen beräknas under hänsynstagande endast till skillnader i vattenångans partialtryck på ömse sidor om konstruktionen. I våra studier som görs i samarbete med och på initiativ av professor Bo Adamson LTH, vill vi även undersöka inverkan av skillnader i totaltryck och i temperatur. Betydelsen av dessa faktorer är inte uttömmande utredd i den byggnadstekniska litteraturen.

I dessa undersökningar bestämmer vi även

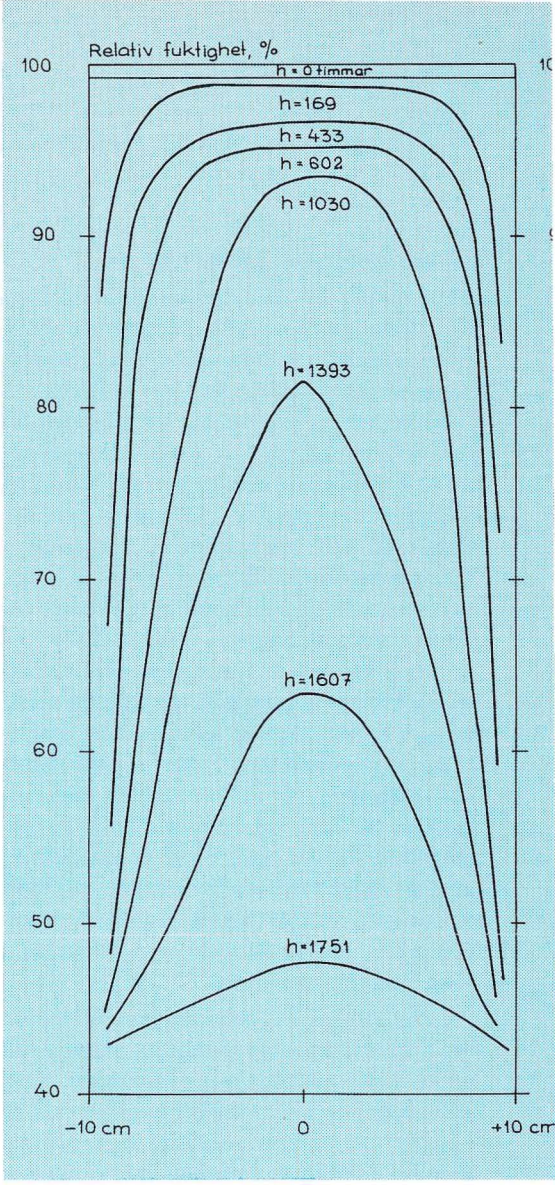



*Fig. 19. Relativa fuktighetens fördelning i gasbetong (500 kg/m³) vid olika tidpunkter under utorkning i 43 % rel. fuktighet.*

olika materials vattenångpermeabilitet som funktion av relativa luftfuktigheten. Detta har gjorts tidigare i andra undersökningar, t. ex. av Tveit (13). För ett hygroskopiskt material som gasbetong konstaterar vi liksom Tveit, att permeabiliteten stiger med ökande relativ luftfuktighet hos omgivningen. Det större fuktinnehållet i materialet bloc-

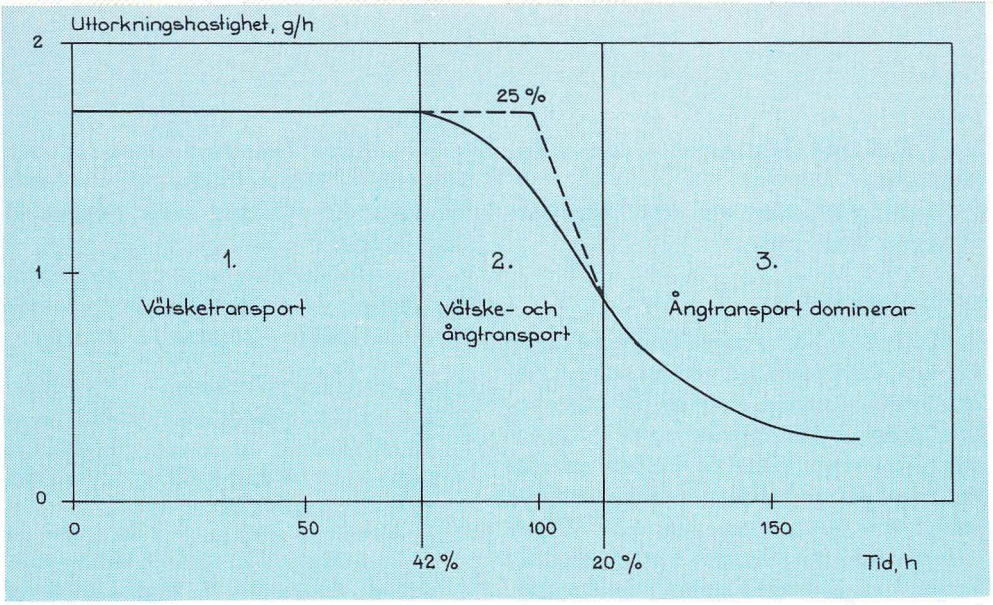



*Fig. 20. Uttorkningsförloppet hos gasbetong (500 kg/m³) med gränser (fuktkvoter i viktprocent) mellan de olika transportfenomenen.*

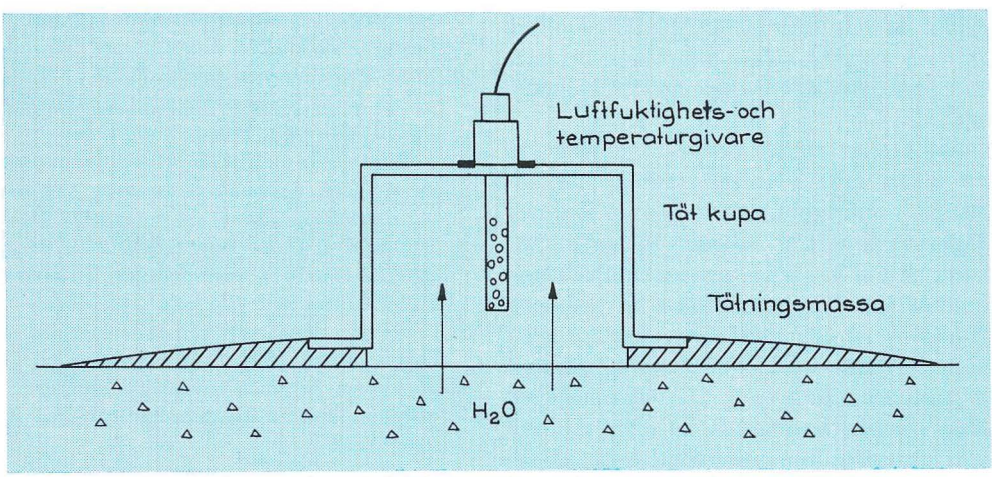
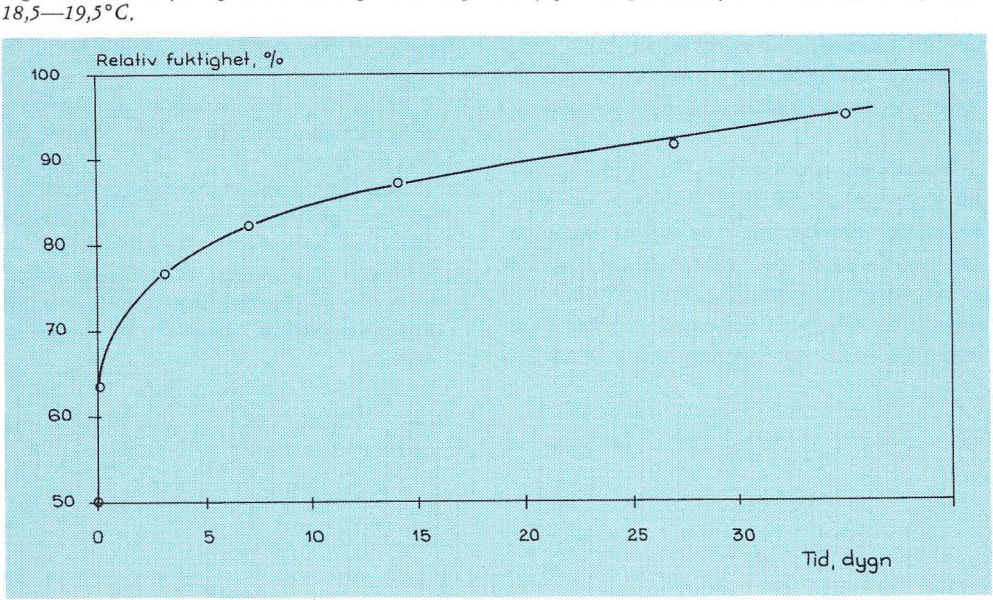



*Fig. 21. Kupa för mätning av relativa fuktigheten under tät beläggning på undergolv av betong.*

*Fig. 22. Relativa fuktighetens ändring under kupa (se fig. 21) på undergolv av betong. Temperatur 18,5—19,5°C.*



kerar alltså inte fukttransporten utan underlättar den.

Någon publicering om detta delprojekt föreligger ännu inte.

### 5.4 Fuktmätning

Parallellt med den egentliga fuktforskningen har vi studerat olika mätmetoder och försökt att utveckla lämpliga metoder för olika behov. Behoven är definitivt mycket olika i olika situationer. Ibland är det helt tillräckligt med en indikation om genomsnittligt fukttillstånd i en konstruktionsdel, ibland vill man med stor precision mäta fukthalten in situ' i en godtycklig punkt i konstruktionen och ibland vill man indikera vilket fukttillstånd som kan komma att uppstå om man vidtar en viss åtgärd. Slutligen finns alltid behovet att göra sådana mätningar att man kan bestämma erforderliga materialkonstanter.

Ett mycket viktigt praktiskt problem är att kunna mäta eller karaktärisera fukttillståndet i undergolv av betong som skall beläggas med ett tätt övergolv. Vi har i samband med olika skade- och andra utredningar med viss framgång använt metoden att placera en tät kupa med instrument för mätning av relativ luftfuktighet och temperatur ovanpå betongytan, fig. 21. Fukttillståndet inne i kupan kommer då att efter viss tid vara detsamma som omedelbart under en tät beläggning, och man kan avgöra om lim och spackel tål tillståndet ifråga. Fig. 22 visar ett exempel. Man måste dock från fall till fall bearbeta resultaten något, bl. a. med beaktande av skillnader mellan mätningstillfällets och driftförhållandenas temperaturer.

Andra mätmetodstudier har gällt givare för mätning av fuktkvot i betong. Givaren är baserad på elektrisk ledningsförmåga och kan användas i alla fuktområden. Andra givare baseras på mätning av relativ luftfuktighet i en hålighet i materialet och kan bara användes inom det hygroskopiska området.

Tillsammans med institutionen för kärnfysik vid LTH har försök gjorts att mäta fukttillståndet i betong med gammastrålning. Metoden baseras på att absorption av gammastrålning beror av materialets tillfälliga densitet som i sin tur beror av materialets fuktinnehåll. Resultaten är lovande.

LITTERATURFÖRTECKNING


1. FoU-behov för SBN. Behov av forsknings- och utvecklingsarbete som underlag för samhälleliga normer för husbyggandet. Statens Planverk — rapport nr 10, 1970.
2. *B Adamson, L Ahlgren, S G Bergström* och *L E Nevander:* Fukt-byggnadstekniska fuktproblem. Statens Råd för Byggnadsforskning, Programskrift 12 Stockholm 1970.
3. *U A Halvorsen:* Korrosion och kalkurlakning vid sprickor i betongkonstruktioner. Inst f byggnadsteknik LTH, Bull 1, Lund 1966.
4. *T M Whiteside* och *Sweet:* Effect of water saturation in concrete freezing and thawing tests. Highw. Res. Board. Proc. 1950.
5. *B Warris:* The influence of air-entreinment on the frost resistence of concrete. Cement- och Betonginst. Handl. 36 Stockholm 1964.
6. *Kajfasz & I Szulc:* Approximation of experimental data by a creep function. Materiaux & Constr. Vol 3, nr 18, 1970. 381—394.
7. *A Nielsen:* Byggnadsmaterials reologi. Inst f byggnadsteknik LTH, Bull 3, Lund 1969.
8. *A Nielsen:* Krypning hos högtrycksånghärdad gasbetong. Inst f byggnadsteknik LTH, Bull 4, Lund 1969.
9. *A Nielsen, L Eriksson* och *J Gustavsson:* Långtidsdeformationer i träbjälklag. Byggmästaren nr 8, 1970.
10. *S G Bergström* och *A Nielsen:* Beräkning av krypning hos betong. Byggmästaren nr 6, 1969.
11. *L Ahlgren* och *S G Bergström:* Beräkning av absorptionsisotermer för betong. Nordisk Betong nr 2, 1969.
12. *L Ahlgren:* Uppföljning av uttorkningsförloppet hos golvbetong. Inst f byggnadsteknik LTH. Int. rapport nr 3, Lund 1968.
13. *A Tveit:* Measurement of moisture permeability of porous materials. Statens Inst för Byggnadsforskning. Rapport 8. Stockholm 1966.