

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING  
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

meddelelse nr. 25



FUGTTRANSPORTKOEFFICIENTER  
FOR GASBETON

Moisture transfer coefficients of cellular concrete

Asta Nicolajsen

JUNI 1973



# INDHOLDSFORTEGNELSE

|                                                                                                       | side |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Forord.....                                                                                           | 5    |
| Symbolliste.....                                                                                      | 7    |
| 1. Indledning.....                                                                                    | 9    |
| 2. Grundlæggende begreber.....                                                                        | 11   |
| 2.1. Lufttilstand.....                                                                                | 11   |
| 2.2. Gasbetons fugtindhold.....                                                                       | 12   |
| 2.2.1. Porestruktur.....                                                                              | 12   |
| 2.2.2. Fugtbinding.....                                                                               | 17   |
| 2.2.3. Sorptionskurve.....                                                                            | 20   |
| 3. Fugttransport.....                                                                                 | 24   |
| 3.1. Indledning.....                                                                                  | 24   |
| 3.2. De enkelte fugttransportprocesser.....                                                           | 24   |
| 3.2.1. Fugttransport dirigeret af et damptrykspotential                                               | 24   |
| 3.2.2. Fugttransport dirigeret af et fugtindholds-<br>potential.....                                  | 27   |
| 3.2.3. Fugttransport dirigeret af et temperatur-<br>potential.....                                    | 28   |
| 3.2.4. Fugttransport dirigeret af et totaltryks-<br>potential.....                                    | 30   |
| 3.2.5. Fugttransport dirigeret af andre porepotentialer....                                           | 31   |
| 3.3. Den totale fugttransport.....                                                                    | 32   |
| 3.3.1. Muligheden for sammenkædning af de enkelte<br>fugttransportformer til en "3-leddet" ligning... | 32   |
| 3.3.2. Fænomenologiske ligninger ("2-leddet" ligninger)                                               | 34   |
| 3.3.3. De fænomenologiske ligningers konditionstal.....                                               | 35   |
| 3.4. De i litteraturen benyttede ligninger.....                                                       | 38   |
| 4. Forsøgsprogram.....                                                                                | 48   |
| 4.1. Formålet med forsøget.....                                                                       | 48   |
| 4.2. Forsøgsområde.....                                                                               | 51   |
| 5. Prøvelegemer.....                                                                                  | 53   |
| 6. Forsøgsapparat.....                                                                                | 57   |
| 6.1. Princip.....                                                                                     | 57   |
| 6.2. De enkelte komponenter i forsøgsapparatet.....                                                   | 60   |
| 6.2.1. Prøvelegemets anbringelse.....                                                                 | 60   |
| 6.2.2. Radiatorerne.....                                                                              | 61   |
| 6.2.3. Boblekarrene.....                                                                              | 63   |

|        |                                                                              |     |
|--------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2.4. | Termostatbadene.....                                                         | 64  |
| 6.2.5. | Luftpumperne.....                                                            | 64  |
| 6.2.6. | Systemets lufttæthed.....                                                    | 66  |
| 7.     | Udførelse af forsøg.....                                                     | 69  |
| 8.     | Beregninger.....                                                             | 76  |
| 8.1.   | Beregning af fugtstrømmen $g$ .....                                          | 76  |
| 8.2.   | Beregning af fugttransportkoefficienterne<br>samt af deres usikkerheder..... | 80  |
| 9.     | Forsøgsresultaterne.....                                                     | 86  |
| 9.1.   | Diffusionstallet $\delta_T$ .....                                            | 86  |
| 9.2.   | Termodiffusionstallet $K_p$ .....                                            | 89  |
| 9.3.   | Kapillarledningstallet $k_T$ .....                                           | 93  |
| 9.4.   | Termodiffusionstallet $K_\psi$ .....                                         | 96  |
| 9.5.   | Diffusionstallet $\delta_\psi$ .....                                         | 99  |
| 9.6.   | Kapillarledningstallet $k_p$ .....                                           | 102 |
| 10.    | Bekræftelse af relationerne mellem fugt-<br>transportkoefficienterne.....    | 105 |
| 11.    | Bedømmelse af forsøgsopstillingen.....                                       | 108 |
| 12.    | Konklusion.....                                                              | 111 |
| 13.    | Appendix.....                                                                | 113 |
| 13.1.  | Matematiske relationer mellem fugttrans-<br>portkoefficienterne.....         | 113 |
| 13.2.  | Fysiske relationer mellem fugttrans-<br>portkoefficienterne.....             | 114 |
|        | Resumé.....                                                                  | 116 |
|        | Summary.....                                                                 | 119 |
|        | Litteraturfortegnelse.....                                                   | 122 |

## FORORD

Det foreliggende arbejde er udført på Laboratoriet for Varme-isolering med professor, civilingenior Vagn Korsgaard som faglærer.

Jeg vil gerne takke professor Korsgaard, civilingenior Mogens Byberg, som har været den daglige støtte, og laboratoriets anden licentiatstuderende Anker Nielsen, der også har arbejdet med fugtproblemer, for Deres interesse og hjælp.

Statens teknisk-videnskabelige Fond har bevilget midlerne til opbygning af forsøgsapparatet, og forsøgsmaterialet er velvilligst stillet til rådighed af firmaet H+H Gasbeton A/S.

Endvidere takkes laboratoriets værkstedspersonale Poul Erik Pedersen og Børge Nyholm, som har udført et stort arbejde med udvikling og opbygning af forsøgsapparatet, og sidst men derfor ikke mindst en tak til laboratoriets sekretær Elin van Kooten for hendes store arbejde med renskrivning af manuskriptet.

Lyngby, juni 1973

Asta Nicolaisen



# ANVENDTE SYMBOLER OG ENHEDER

|             |                                        |                                           |
|-------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| c           | $[\text{kg}/\text{m}^3]$               | vanddampindhold $c = \frac{m}{V}$         |
| d           | $[\text{m}]$                           | diameter                                  |
| g           | $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}]$     | fugtstrøm                                 |
| h           | $[\text{m}]$                           | højde                                     |
| k           | $[\text{kg}/\text{m s kg}/\text{m}^3]$ | kapillarledningstal                       |
| l           | $[\text{m}]$                           | længde                                    |
| m           | $[\text{m}^2 \text{ K}/\text{W}]$      | varmemodstandstal                         |
| m           | $[\text{kg}]$                          | masse                                     |
| p           | $[\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2]$    | damptryk (umættet)                        |
| p'          | $[\text{Pa}]$                          | vanddamps mætningstryk                    |
| q           | $[\text{W}/\text{m}^2]$                | varmestøm                                 |
| r           | $[\text{m}]$                           | radius                                    |
| t           | $[\text{s}]$                           | tid                                       |
| v           | $[\text{m}/\text{s}]$                  | hastighed                                 |
| x           | $[\text{m}]$                           | koordinat                                 |
| A           | $[\text{m}^2]$                         | areal, overflade                          |
| D           | $[\text{m}^2/\text{s}]$                | diffusionskoefficient for vanddamp i luft |
| G           | $[\text{g}/\text{s}]$                  | fugttransport pr. tidsenhed               |
| K           | $[\text{kg}/\text{m s K}]$             | termo-diffusionstal                       |
| P           | $[\text{Pa}]$                          | totaltryk                                 |
| R           | $[\text{J}/\text{kg K}]$               | gaskonstant                               |
| T           | $[\text{K}]$                           | temperatur                                |
| V           | $[\text{m}^3]$                         | volumen                                   |
| $\delta$    | $[\text{kg}/\text{m s Pa}]$            | (fugt)diffusionstal                       |
| $\vartheta$ | $[\text{°C}]$                          | temperatur                                |
| $\lambda$   | $[\text{W}/\text{m K}]$                | varmeledningstal                          |
| $\rho$      | $[\text{kg}/\text{m}^3]$               | massefylde                                |
| $\sigma$    | $[\text{Pa m}]$                        | overfladespænding                         |
| $\varphi$   | $[-]$                                  | relativ fugtighed                         |
| $\psi$      | $[\text{m}^3/\text{m}^3]$              | fugtindhold                               |

# SYMBOLS AND UNITS APPLIED

|             |                                                    |                                      |
|-------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|
| c           | $[\text{kg/m}^3]$                                  | moisture content $c = \frac{m}{V}$   |
| d           | $[\text{m}]$                                       | diameter                             |
| g           | $[\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}]$                   | density of mass flow rate            |
| h           | $[\text{m}]$                                       | height                               |
| k           | $[\text{kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{kg/m}^3]$ | water diffusivity                    |
| l           | $[\text{m}]$                                       | length                               |
| m           | $[\text{m}^2 \cdot \text{K/W}]$                    | specific heat resistance             |
| m           | $[\text{kg}]$                                      | mass                                 |
| p           | $[\text{Pa} = \text{N/m}^2]$                       | pressure                             |
| p           | $[\text{Pa}]$                                      | maximum vapour pressure              |
| q           | $[\text{W/m}^2]$                                   | density of heat flow rate            |
| r           | $[\text{m}]$                                       | radius                               |
| t           | $[\text{s}]$                                       | time                                 |
| v           | $[\text{m/s}]$                                     | velocity                             |
| x           | $[\text{m}]$                                       | cartesian coordinate                 |
| A           | $[\text{m}^2]$                                     | area, surface                        |
| D           | $[\text{m}^2/\text{s}]$                            | air diffusivity                      |
| G           | $[\text{g/s}]$                                     | mass flow rate by time unit          |
| K           | $[\text{kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}]$      | thermal moisture conductivity        |
| P           | $[\text{Pa}]$                                      | pressure                             |
| R           | $[\text{J/kg} \cdot \text{K}]$                     | gas constant                         |
| T           | $[\text{K}]$                                       | temperature                          |
| V           | $[\text{m}^3]$                                     | volume                               |
| $\delta$    | $[\text{kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}]$     | coefficient of moisture conductivity |
| $\vartheta$ | $[\text{°C}]$                                      | temperature                          |
| $\lambda$   | $[\text{W/m} \cdot \text{K}]$                      | coefficient of thermal conductivity  |
| $\rho$      | $[\text{kg/m}^3]$                                  | specific mass, density               |
| $\sigma$    | $[\text{Pa} \cdot \text{m}]$                       | surface tension                      |
| $\phi$      | $[-]$                                              | relative humidity                    |
| $\psi$      | $[\text{m}^3/\text{m}^3]$                          | moisture content                     |



## 1. INDLEDNING

I det ældre, traditionelle byggeri har der ikke været særlige fugtproblemer, idet man brugte de samme efterhånden godt gennemprøvede konstruktioner. Da man gik i gang med at bygge mere utraditionelt og benytte nye konstruktioner, enten det nu var nye materialer eller nye måder at sammensætte gamle materialer på, begyndte fugtproblemerne i form af fugtskader af forskellig art at dukke op og dermed behovet for at kunne beregne fugttransporten.

Hidtil har man beregnet fugttransporten i en konstruktion ved stationære metoder ud fra kendskabet til damptryksforskellen over konstruktionen og konstruktionens fugtdiffusionstal. Dette har i mange tilfælde, f. eks. ved beregning af den fugtisolering, der var nødvendig i en væg for at undgå kondens i isoleringen og dermed nedsat varmeisoleringsevne, været en fuldt tilstrækkelig beregningsmodel, der gav rimelige resultater.

I andre tilfælde er denne metode alt for grov, f. eks. ved beregning af fugtforholdene i flade tage, som er afsluttet med en fugttæt membran. I disse tagkonstruktioner vil fugtindholdet i løbet af en vinter stige kraftigt, specielt hvis der i lokalet er et meget højt fugtindhold, og man har derfor brug for at kunne beregne, hvor stort et fugtindhold konstruktionen når op på i løbet af en vinter for at kunne bedømme, om der kan opstå fugtskader. Der kan blive tale om følgende skader: nedsat varmeisoleringsevne, råd og svamp i en evt. trækonstruktion af uimprægneret træ og korrosion på en evt. jernkonstruktion. Desuden skal man kunne beregne, om den fugtmængde, der ophobes i løbet af vinteren, bliver fjernet i løbet af sommeren, da man ellers vil få et fra vinter til vinter stigende fugtindhold; ved beregningerne skal der tages hensyn til, at konstruktionen ofte starter med et meget højt fugtindhold i form af byggefugt.

Udviklingen inden for EDR-teknikken har gjort det muligt at beregne fugttransporten ved ikke-stationære metoder ved anven-

delse af endelige differenser. Laboratoriet for Varmeisolering har udviklet et EDB-program til beregning af ikke-stationær fugttransport, men programmet kræver, at man har et nøjagtigt kendskab til de i konstruktionen indgående materials materialværdier og til materialværdiernes afhængighed af fugt- og temperaturniveau.

Laobratoriet har derfor planlagt et større fugtundersøgelelsesprogram, og det foreliggende arbejde er en selvstændig del heraf. Arbejdets formål var at undersøge de eksisterende fugttransportligninger, at udvikle en forsøgsopstilling, der kan benyttes til bestemmelse af de materialværdier, der indgår i fugttransportligningerne, og endelig at finde disse materialværdier for gasbeton i den relativt tørre del af fugtskalaen, d.v.s. for en relativ fugtighed mindre end ca. 80% samt ved forskellige temperaturniveauer.

Efter gennemførelsen af dette arbejde samt et andet ved laboratoriet igangværende arbejde, der også behandler fugttransport i gasbeton, men især betragter forholdene i den relativt våde del af fugtskalaen, skulle det være muligt for materialet gasbeton at foretage fyldstgørende fugtmæssige beregninger ved ikke-stationære metoder.

## 2. GRUNDLÆGGENDE BEGREBER

### 2.1. Lufttilstand

Atmosfærisk luft er en blanding af tør luft og vanddamp. Denne blanding kan karakteriseres på en række forskellige måder, men kun de måder, der bliver benyttet i de følgende afsnit, skal her kort omtales, idet der ellers henvises til LUND-HANSEN [16] eller LÜCK [15].

I en vand-luft blanding yder vanddampen et damptryk  $p$ , der er lig med det tryk, den samme mængde vanddamp ville yde, såfremt man lod det fordampe i vakuum, ved samme volumen.

Atmosfærisk luft kan kun indeholde en vis mængde vanddamp. Denne mængde angivet i kg vand pr. kg tør luft afhænger af luftens temperatur og af barometerstanden. Når luften indeholder al den vanddamp den kan, er luften mættet, og det hertil svarende damptryk  $p'$  kaldes mætningstrykket. Mætningstrykket afhænger alene af luftens temperatur, damptrykskurven, fig 1, angiver denne afhængighed.

Med en afvigelse, der er mindre end 0,2%, kan damptrykskurven i det viste interval angives ved følgende formel:

$$p' = 612 + 44,65 \cdot \vartheta + 1,333 \cdot \vartheta^2 + 0,02946 \cdot \vartheta^3 + 0,0003746 \cdot \vartheta^4 \quad [\text{Pa}]$$
$$0^\circ \leq \vartheta \leq 40^\circ\text{C}$$

Forholdet mellem damptrykket og mætningstrykket kaldes luftens relative fugtighed.

$$\varphi = \frac{p}{p'} \quad [\text{RF}] \quad \text{eller} \quad \varphi = \frac{p}{p'} \cdot 100 \quad [\% \text{RF}]$$

Afkøles umættet luft med damptrykket  $p$ , vil mætning indtræde, når luften når den temperatur  $\vartheta$ , ved hvilken  $p$  er mætningstrykket. Denne temperatur kaldes luftens dugpunktstemperatur eller dugpunkt,  $\vartheta_{\text{dug}}$ , idet et spejl anbragt i den pågældende atmosfære vil dugge, når det bliver kølet ned til denne temperatur, dvs.  $\vartheta_{\text{dug}}$  og  $p$  er synonyme angivelser af luftens fugtindhold; deres indbyrdes sammenhæng fås af damptrykskurven (fig. 1), når  $p = p'$  og  $\vartheta_{\text{dug}} = \vartheta$ .

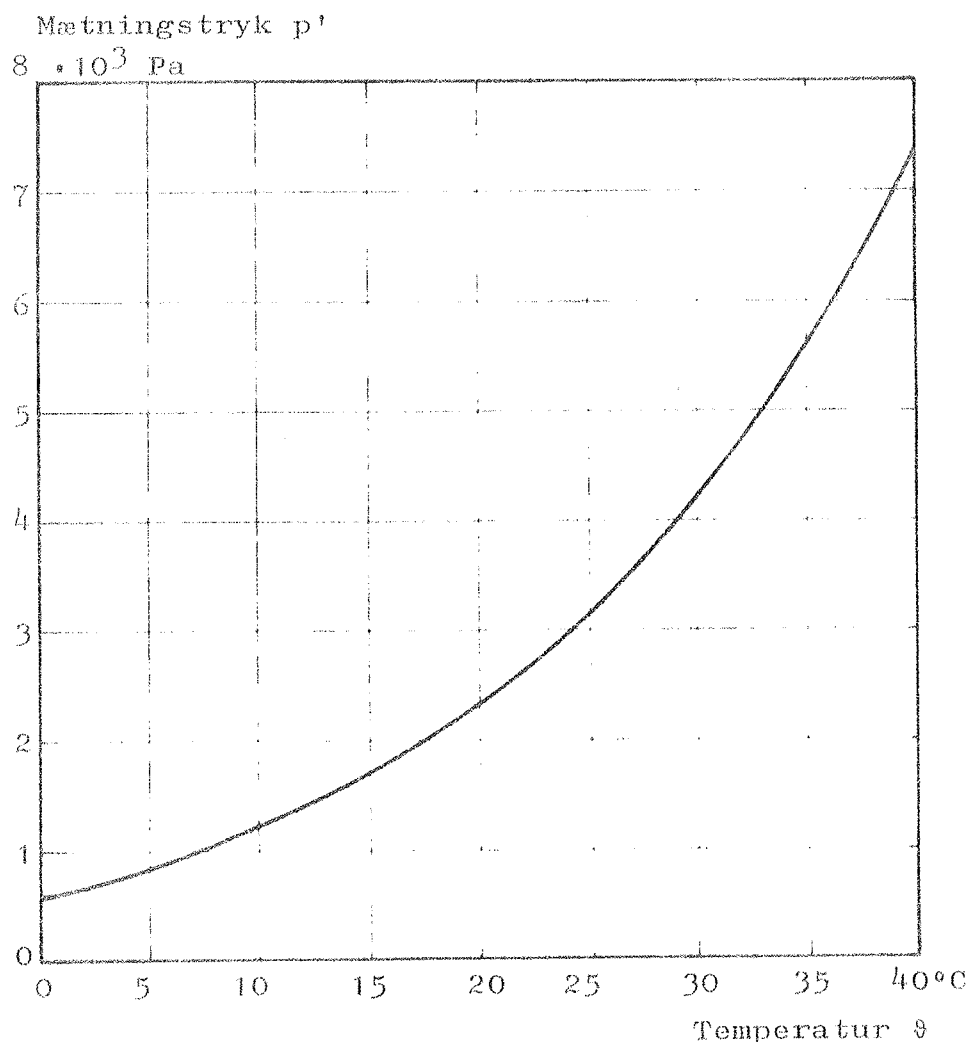


Fig. 1. Damptryksskurve for mættet vanddamp.

Saturated water vapour pressure.

Heraf ses, at lufttilstanden er fuldstændig karakteriseret ved 2 af følgende 4 størrelser: lufttemperaturen  $\vartheta$ , damptrykket  $p$ , den relative luftfugtighed  $\varphi$  og dugpunktet  $\vartheta_{\text{dug}}$  (dog ikke ved  $p$  og  $\vartheta_{\text{dug}}$ ).

## 2.2. Gasbetons fugtindhold

### 2.2.1. Porestruktur

Gasbeton er et porøst materiale, og dets porestruktur er derfor bestemmende for dets fugtindhold og fugttransport.

Fig. 2 viser gasbeton forstørret 100 gange, idet en prøve af gasbeton er blevet indstøbt i kunstig harpiks, knust og slebet glat på den ene side.

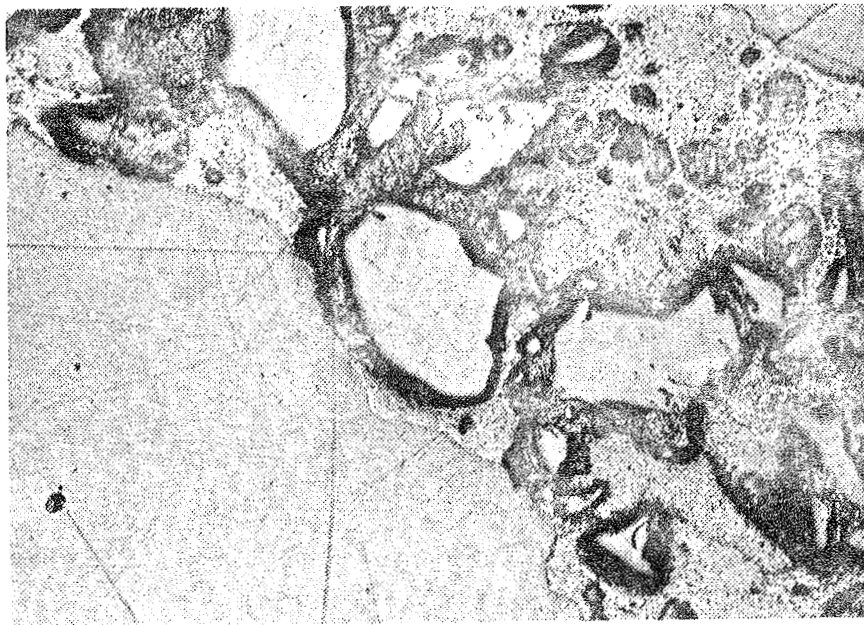


Fig. 2. Mikroskopisk fotografi af gasbeton indstøbt i kunstig harpiks, forstørret 100 gange.  
(efter VAN DER KOOI [12]).

Microscopical photograph of cellular concrete embedded in artificial resin at 100 magnification.



Fig. 3. Elektron mikroskopisk optagelse af cement-kalk massen i gasbeton, forstørret 3500 gange.  
(efter VAN DER KOOI [12])

Electron microscopic exposure of cement mass in cellular concrete at 3500 magnification.

På figuren ses:

- 1) de oprindelige luftfyldte hulrum, nu fyldt med kunstig harpiks og genkendelige på slibestregene i den kunstige harpiks.
- 2) sandkornene, idet de er omgivet af en skarp skygge, da de er så hårde, at de stikker en anelse op over den ellers glatte overflade.
- 3) cement-kalk massen, som udgør forbindelsen i letbeton.

Cement-kalk massen er vist på fig. 3, forstørret 3500 gange. Der ses krystaller af størrelsesordenen  $10^{-6}$  m, og disse er fuldstændigt tilfældigt spredt.

Ved planimetrisk opmåling af disse og lignende figurer er følgende volumenfordeling fundet:

40% luftfyldte hulrum

15% sandskorn

45% cement-kalk masse bestående af  $\begin{matrix} < 15\% \text{ fast stof} \\ < 30\% \text{ porevolumen} \end{matrix}$

Dette giver ialt en porevolumen på 70%.

Porevolumet kan også måles rent fysisk, f. eks. ved centrifugering (KRISCHER [13]) eller ved kviksølv tryk-metoden (SNECK [24]). Men for at finde fordelingen på de forskellige pore-størrelser, må der først angives en model, der kan illustrere porestrukturen. Af fig. 2 og 3 fremgår det, at strukturen er meget indviklet, og en virkelig dækkende model vil derfor blive uhåndterlig. Som model vælges som regel en række parallelle rør med cirkulært tværsnit, hvor deres til porestørrelserne ækvivalente radier bliver defineret ved den valgte forsøgsmetode.

Ved porefordelingsmåling ved centrifugering bliver der udført en række forsøg med stigende omdrejningshastighed, og dermed med stigende centrifugalkraft, på et fra starten helt vandfyldt prøvelegeme. Ved hvert forsøg kan man beregne fugtindholdet og centrifugalkraften og dermed det tryk  $p_c$ , der prøver at presse vandet ud af kapillarerne. De kapillarer, der forbliver væske i, er dem, hvis kapillare undertryk er større end  $p_c$ , d.v.s. hvor  $r < \left| \frac{\sigma}{p_c} \right|$ , hvor  $\sigma$  er overfladespændingen.

Sammenhængen mellem porevolumet  $V$ , der er lig med fugtindholdet, og den ækvivalente kapillarradius  $r = - \frac{\sigma}{p_c}$  er dermed fundet og vist på fig. 4.

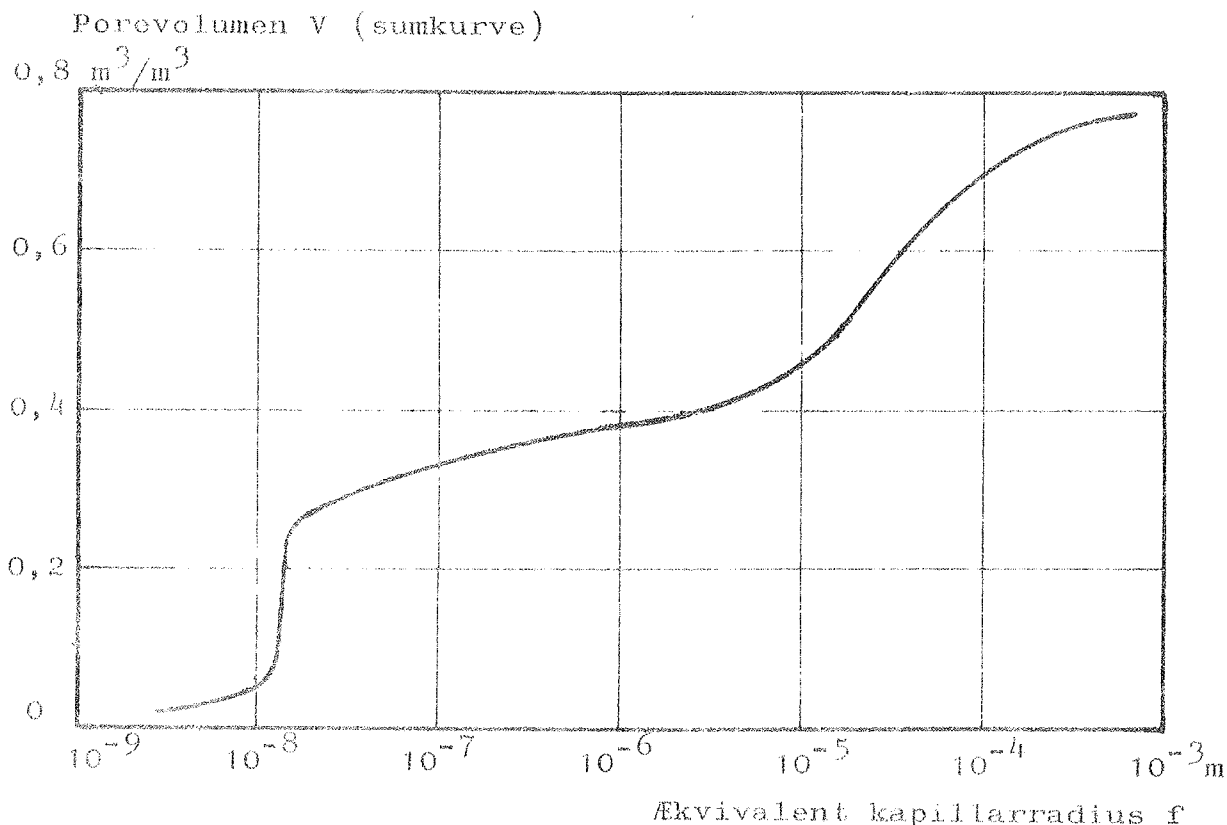


Fig. 4. Gasbetons porevolumen som funktion af ækvivalent kapillarradius ( $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$ ) (efter KRISCHER [13]).  
The pore volume of cellular concrete as a function of equivalent capillary radius.

Ved at differentiere porevolumet  $V$  med hensyn til  $\log r$  ( $\log r$ , fordi  $r$  er afsat ud ad en logaritmisk skala) får man kapillarfordelingskurven  $\frac{dV}{d(\log r)}$ , se fig 5.

Porerne deles efter deres størrelse i to grupper, de mikrokapillare med  $r < 10^{-7} \text{ m}$  og de makrokapillare med  $r > 10^{-7} \text{ m}$ . Der er to grunde til at vælge  $r = 10^{-7} \text{ m}$  som grænse mellem mikrokapillare og makrokapillare porer:

- 1) Den frie middelvejlængde for luftarter ved atmosfæretryk er ca.  $10^{-7} \text{ m}$ , det vises senere, at ved denne værdi sker

der en ændring i måden, hvorpå luftartens molekyler "transporteres" igennem kapillaren.

- 2) Damptryksnedsættelsen over en konkav meniskos gør sig kun gældende for  $r < 10^{-7}$  m. Ifølge Thomson fås damptrykket af følgende formel:

$$p = p' \cdot \exp\left(\frac{-2\sigma}{\rho \cdot r \cdot R \cdot T}\right)$$

hvor  $p$  er damptrykket,  $p'$  mætningstrykket,  $\sigma$  overfladespændingen,  $\rho$  vandets massefylde,  $r$  kapillarradius,  $R$  gaskonstanten for vanddamp og  $T$  temperaturen i K. Formlen gælder dog kun for  $r > 0,5 \cdot 10^{-9}$  m.

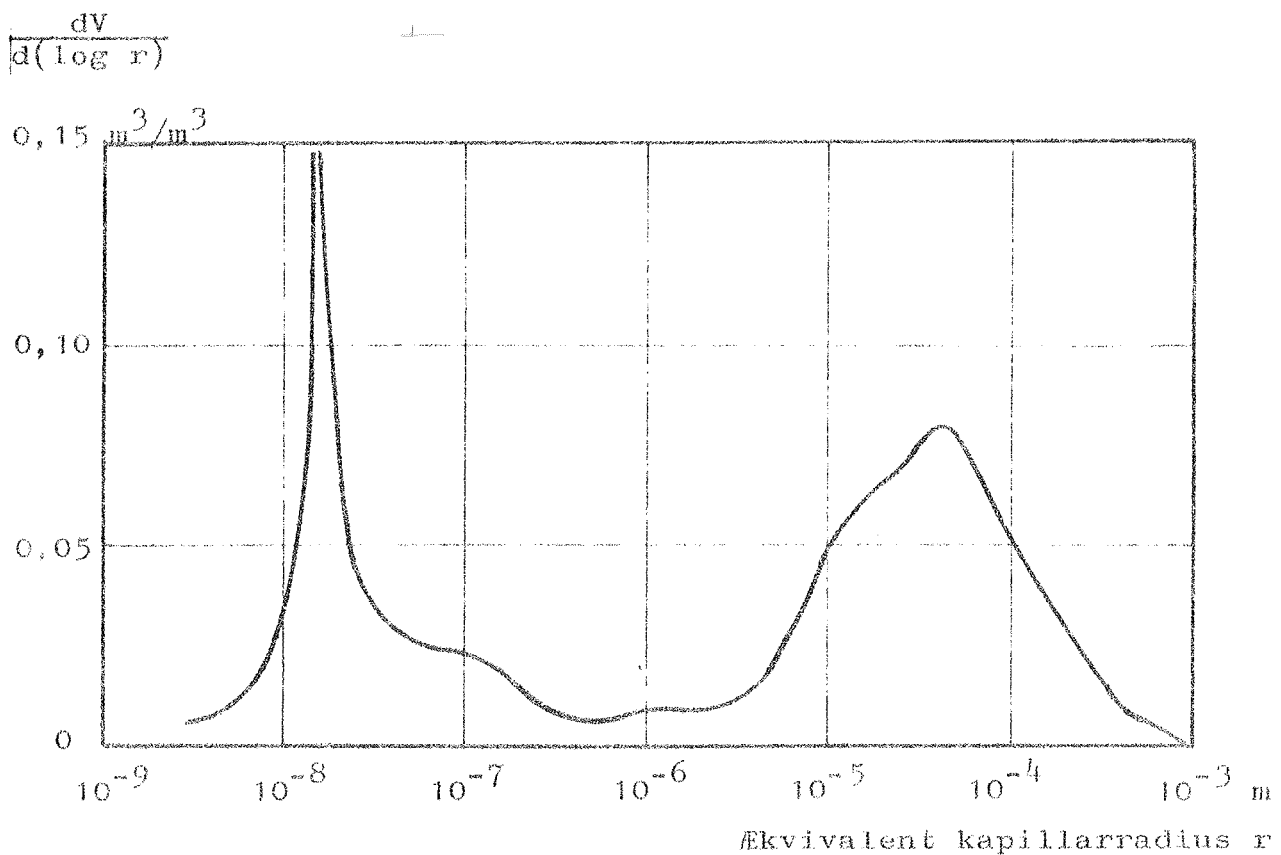


Fig. 5. Kapillarfordelingskurve for gasbeton ( $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$ ) (efter KRISCHER [13]).

Capillary distribution curve for cellular concrete.



Af fig. 5 ses, at porerne anskueliggjort ved deres ækvivalente kapillarradius falder i to områder, en omkring  $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}$  og en omkring  $4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ . Af fig. 4 ses,

- at det totale porevolumen er 77%
- at de mikroporene udgør 33%
- at de makroporene udgør 44%.

En sammenligning med den ved planimetrisk opmåling fundne volumenfordeling viser, at fordelingen mellem makroporene og mikroporene er den samme som fordelingen mellem luftfyldte hulrum og porer i cement-kalk massen.

#### 2.2.2. Fugtbinding

Fugten kan bindes til et materiale på forskellige kemiske og fysiske måder, og med hertil svarende bindingskræfter. Bindingsområderne kan grupperes efter forskellige kriterier (AHLGREN [ 2 ]), men en inddeling i de to hovedgrupper

- 1) kemisk binding
- 2) fysisk binding

er hensigtsmæssig, da inddelingen er i overensstemmelse med den opdeling i bundet og ikke-bundet vand, som fås ved den i praksis mest anvendte teknik til bestemmelse af materialets tørre tilstand, nemlig udtørring ved  $105^{\circ}\text{C}$ .

Det kemisk bundne vand er først og fremmest det vand, der ved fremstillingen af materialet indgår i dets struktur, desuden kan vandet bindes som hydroxidioner eller som krystalvand. Der er her tale om bindinger med meget store bindingskræfter, og vandet forbliver som nævnt i materialet ved udtørring ved  $105^{\circ}\text{C}$ .

De fysiske bindingsmåder kan deles i tre undergrupper efter bindingskræfternes type:

- 1) Adsorption, hvor vandmolekyler ved adsorptionskræfter bliver bundet til materialet i monomolekylære lag. Antallet af molekyler, der bliver bundet, afhænger af koncentrationen af vandmolekyler i luften. Det er ikke de samme molekyler, der sidder bundet hele tiden, idet der sker en konstant udveksling, og der kan derfor sidde molekyler i et

givet lag, selv om de underliggende lag ikke er fyldt op (se fig. 6), men da bindingskræfterne aftager med afstanden fra materialet, vil antallet af molekyler også aftage hermed.

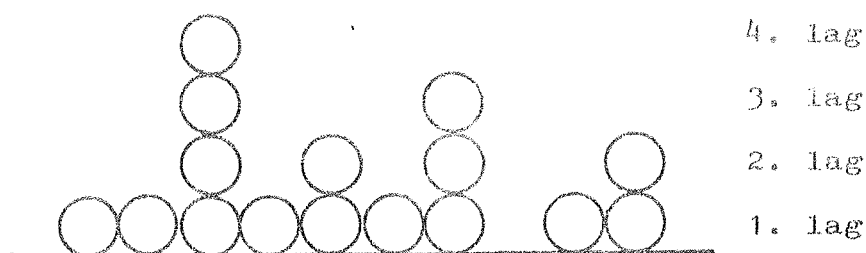


Fig. 6. Adsorption af vandmolekyler i forskellige lag kan ske, selv om de tidligere lag ikke er fyldte.  
Adsorption of water molecules in different layers is possible even if earlier layers are not filled.

ROUNSLY [22] har ud fra nogle forudsætninger, blandt andet at det antal lag, der kan opbygges, er begrænset, beregnet fordelingen af antal molekyler mellem de enkelte lag i afhængighed af antal molekyler i luften, her angivet ved den relative luftfugtighed. På fig. 7 er vist et eksempel fra et materiale, hvor der bindes op til 5 lag, fig. 6 illustrerer dette forhold ved knap 50% RF.

- 2) Kapillarkondensation: Efterhånden som der adsorberes flere lag molekyler, når de to overflader hinanden, først i de små porer og derefter i større og større porer. I de nu væskefyldte porer er det kapillarkræfterne, der binder vandet. Disse kræfter kan udtrykkes ved formelen:

$$P_k = \frac{2\sigma \cos\theta}{r}$$

hvor  $\sigma$  er vands overfladespænding,

$\theta$  er randvinklen,

$\cos\theta$  kan for vand sættes lig med -1 og

$r$  er porens ækvivalentradius.

Lagets fyldningsgrad

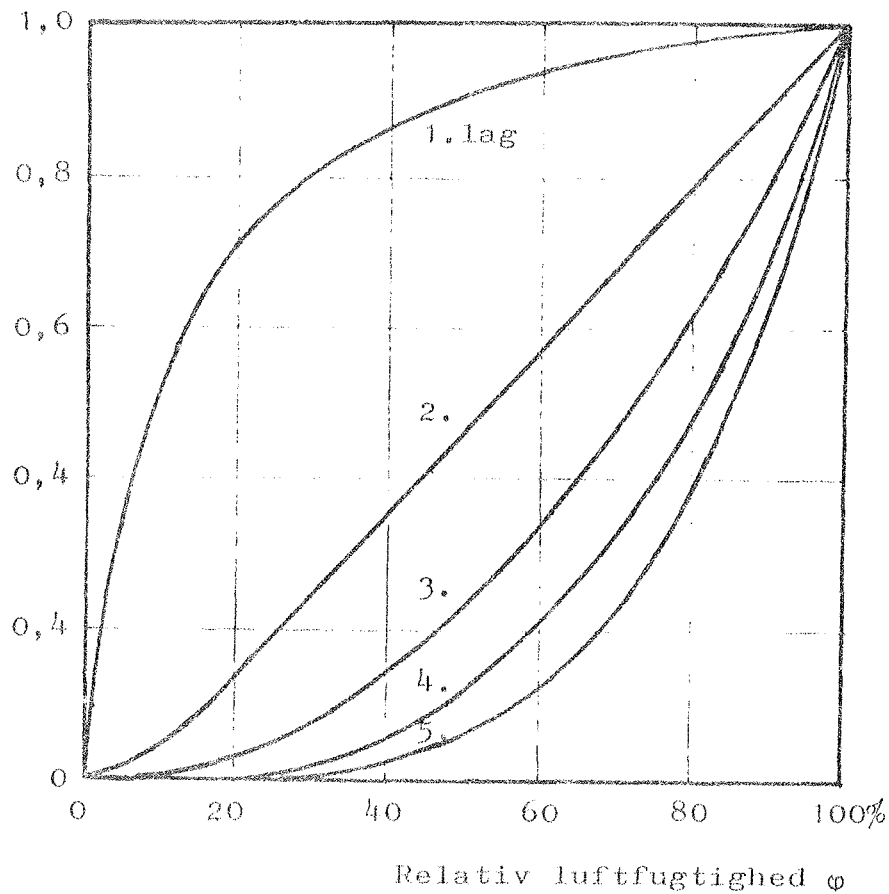


Fig. 7. Relativ opbygning af de enkelte lag ved adsorption (efter ROUNSLEY [22]).  
The relative build-up of individual layers by adsorption.

- 3) Osmotisk binding er den tredje type af de fysiske bindingsformer. Den osmotiske kraft skyldes tilstedeværelsen af salte i vandet, hvilket bevirker en nedsætning af vanddamptrykket, og fugtindholdet vil derfor stige, indtil den fremkomne slatopløsning er så fortyndet, at partikeltrykket er lig med luftens damptryk. Gasbeton indeholder en lille mængde løse salte, men BOMBERG [8] angiver, at den osmotiske binding spiller en uvæsentlig rolle i det hygroskopiske område, og der vil i det følgende blive set bort fra evt. osmotiske virkninger.

### 2.2.3. Sorptionskurve

Et materiale, der befinder sig i luft med en given relativ fugtighed og temperatur, vil efter et stykke tid være i ligevægt med den omgivne luft. De kurver, der for givne temperaturer angiver den mængde fugt, materialet indeholder som funktion af den relative luftfugtighed, kaldes sorptionskurver. Af fig. 8, der viser målinger udført af TVEIT [26], ses, at gasbetons fugtindhold er praktisk taget temperaturuafhængig, og man kan i det målte område bruge en middelskurve: sorptionskurven.

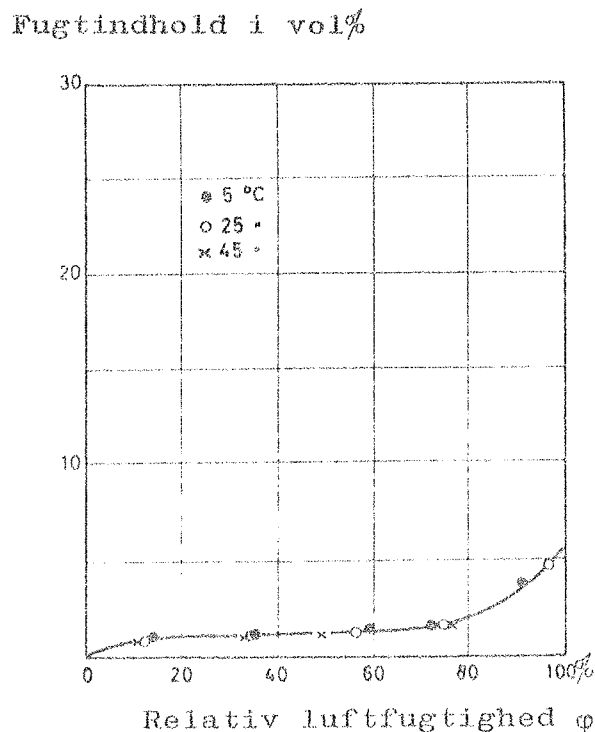


Fig. 8. Sorptionskurve for gasbeton,  
 $\rho = 510 \text{ kg/m}^3$  (efter TVEIT [26]).

Sorption isotherm for cellular  
concrete.

Det er ikke alene den omgivne lufts fugtighed og temperatur, der har betydning for ligevægtsfugtmængden, men også den måde, hvorpå ligevægtstilstanden nås. Hvis ligevægten nås under opfugtning, fås en absorptionskurve, og hvis ligevægten nås under udtørring, fås en desorptionskurve, se fig. 9.

Fugtindhold

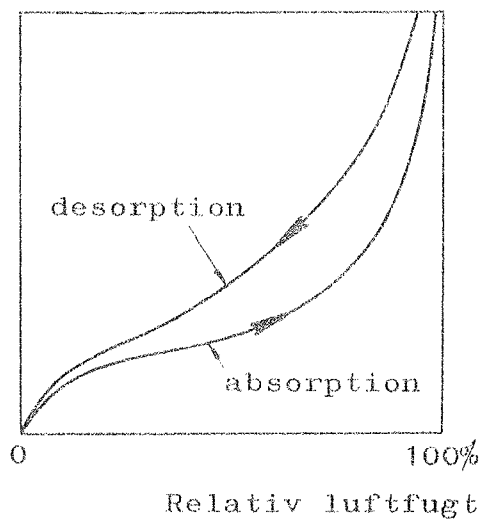


Fig. 9. Absorptions- og desorptionskurver.  
Absorption and desorption isotherms.

Forskellige ligevægtstilstande beliggende mellem disse to kurver fås enten ved at absorptionen afbrydes og efterfølges af en desorption, eksempel ABC på fig. 10, eller ved at desorptionen afbrydes og efterfølges af en absorption, eksempel DEF. Disse kurver kaldes "scanning-kurver".

Fugtindhold

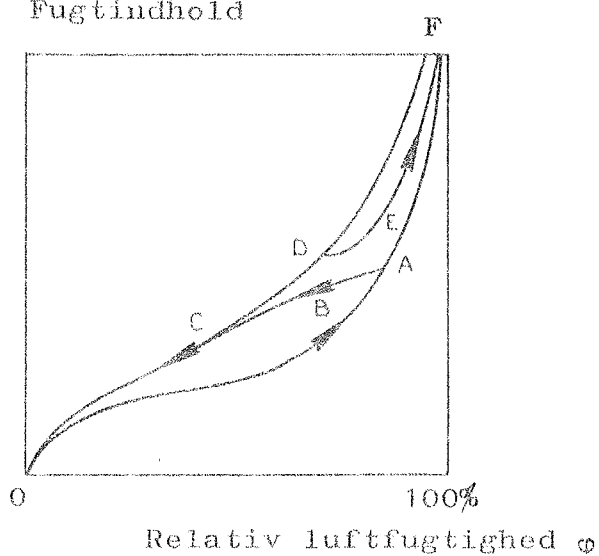


Fig. 10. Eksempel på "scanning-kurver".  
Examples of "scanning-curves".

Der er fremlagt mange teorier til forklaring af hysteresen, og de forskellige teorier og deres dertil svarende hysteresetyper er gennemgået af AHLGREN [ 2 ], men ingen af teorierne giver en fuldstændig forklaring på hysteresen i gasbeton. Det er sjældent angivet, om de i litteraturen viste sorptionskurver er absorptions- eller desorptionskurver, men AHLGREN [ 2 ] angiver, at det som regel er absorptionskurver.

Det har ikke været muligt at få målt absorptions- og desorptionskurver for den til forsøgene benyttede gasbeton, men laboratoriet har foretaget en række enkeltmålinger til bestemmelse af fugtindholdet. Disse kurver er indtegnet på fig. 11 sammen med AHLGRENS [ 2 ] absorptions- og desorptionskurver.

De ved forsøgene benyttede prøver bliver udsat for skiftende fugtpåvirkninger, blandt andet fra udefra kommende driftstop, og det er derfor ikke muligt at holde styr på det nøjagtige forløb af fugtændringerne. Til beregningerne er derfor benyttet en middelsorptionskurve (indtegnet punkteret på fig. 11). Med en afvigelse, der er mindre end 4% kan middelsorptionskurven angives ved følgende formler:

$$\psi = 0,0006 + 0,067 \cdot \varphi + 0,055 \cdot \varphi^2; \quad 0,20 \leq \varphi \leq 0,56$$

$$\psi = 0,0006 + 0,067 \cdot \varphi + 0,055 \cdot \varphi^2 + 0,288 \cdot (\varphi - 0,56)^2; \quad 0,56 \leq \varphi \leq 0,90$$

$\varphi$  skal indsættes i absolut værdi, og  $\psi$  fås i absolut værdi.

Middelsorptionskurven har en standardafvigelse  $s(\psi) = 0,4 \text{ vol\%}$  beregnet ud fra de ved laboratoriet målte punkter.

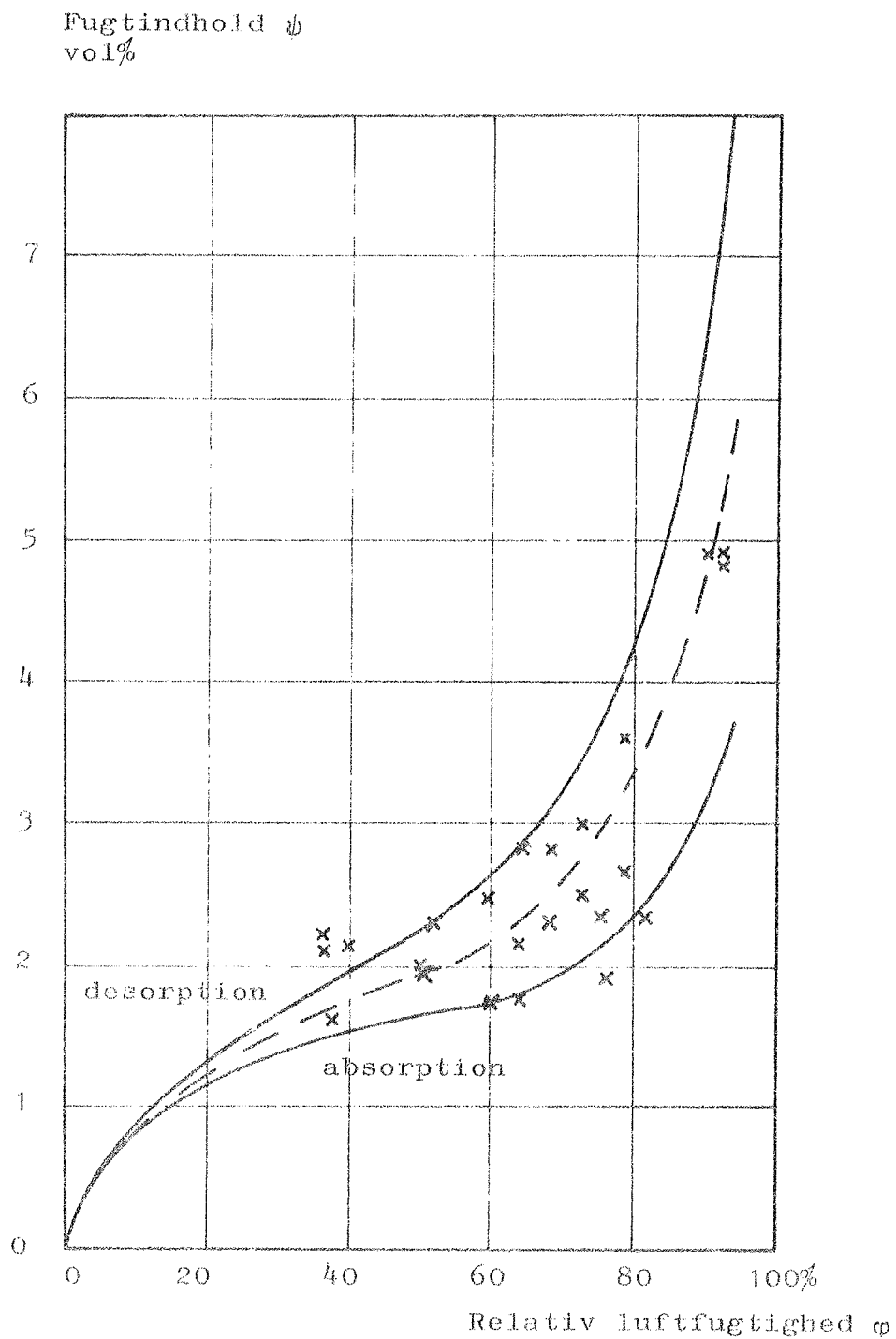


Fig. 11. Absorptions- og desorptionskurve efter AHLGREN [ 2 ] for gasbeton med  $\rho=510 \text{ kg/m}^3$  samt målinger på gasbeton med  $\rho=575 \text{ kg/m}^3$ .  
Absorption and desorption isotherms for cellular concrete with  $\rho=510 \text{ kg/m}^3$  and measurements for cellular concrete with  $\rho=575 \text{ kg/m}^3$ .

### 3. FUGTTRANSPORT

#### 3.1. Indledning

I analogi med forholdene ved varmetransport ønsker man at kunne behandle fugttransporten som en potentialstrømning og at kunne udtrykke den fugtmængde, der bliver transporteret, som produktet af en "fugt"transportkoefficient og et "fugt"-potential.

Fugtpotentialet kan kun blive et tænkt begreb, da man ikke har mulighed for at måle potentialet; dette svarer til, at man ville regne med "varmepotentialet" uden at kunne måle temperaturforskelle. Man forsøger derfor at forbinde og erstatte fugtpotentialet med nogle potentialer, man kender og kan måle. Ved hjælp af teoretiske betragtninger og eksperimentelle undersøgelser er man kommet frem til en række enkeltprocesser, som hver for sig kan bidrage til fugttransporten; disse enkeltprocesser bliver gennemgået nedenfor delt op efter deres potentialtype, og bagefter bliver den samlede fugttransport betragtet.

#### 3.2. De enkelte fugttransportprocesser

##### 3.2.1. Fugttransport dirigeret af et damptrykspotential

Atmosferisk luft består af luft- og vanddampmolekyler, der bevæger sig helt tilfældigt rundt mellem hinanden, det samme er tilfældet i det indre af et porøst materiale, der kan bestå af et system af mikro- og makrokapillarer. Hvis der er forskellige koncentrationer forskellige steder i systemet (se fig. 12 og 13), vil der ske en koncentrationsudjævning. Hvilke love der beskriver udjævningen, afhænger af, om udjævningen sker igennem makro- eller mikrokapillarer.

Når udjævningen sker gennem makrokapillarer, er det sammenstødene med nabomolekylerne, der bestemmer molekylets bevægelse, idet kapillarens ækvivalentradius er meget større end vanddampmolekylernes fri middelvejlængde. Denne proces kaldes diffusion (se fig. 12).

Diffusionen af vanddampe i luft beskrives af FICHs lov:

$$g = -D \cdot \frac{dc}{dx}$$



hvor  $g$  er fugtstrømmen,

$D$  er vanddamps diffusionskoefficient i luft og

$c$  er vanddampkoncentrationen i luft.

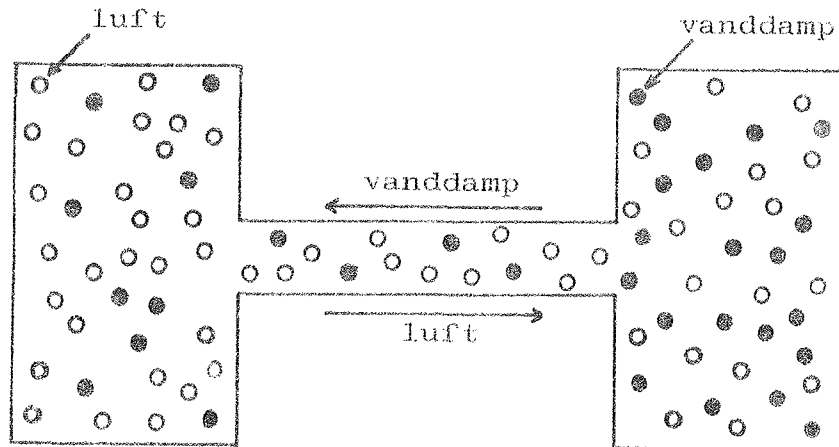


Fig. 12. Diffusion gennem makrokapillarer.

Diffusion through macrocapillaries.

Af luftarternes tilstandsligning:

$$p \cdot v = m R T$$

hvor  $p$  er damptrykket,

$v$  er systemets volumen,

$m$  er systemets masse,

$R$  er gaskonstanten og

$T$  er temperaturen

og som gælder temmelig nøje ved de lave tryk, som vanddamp har i luft, fås:

$$c = \frac{m}{v} = \frac{p}{RT}$$

Indsættes dette i FICHS lov, fås ved isoterme forhold partialtryksgradienten i stedet for vanddampkoncentrationsgradienten, idet  $\frac{dc}{dx} = \frac{1}{RT} \frac{dp}{dx}$ , og deraf fås:

$$g = - \frac{D}{RT} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

Når fugtudjævningen sker gennem mikrokapillarer, er det ikke mere sammenstødene med nabomolekylerne, der bestemmer molekylets bevægelse, men sammenstødene med porevæggen, idet porernes

ækvivalentradius er mindre end eller lig med vandmolekylernes fri middelvejlængde. Denne fugtudjævningsproces kaldes effusion (se fig. 13).

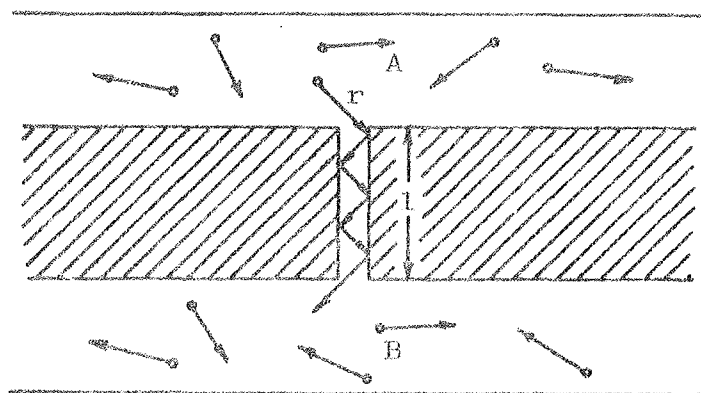


Fig. 13. Effusion gennem mikrokapillar.

Effusion through microcapillar.

Den fugtmængde, der transporteres igennem mikrokapillaren ved isoterme forhold, er:

$$g = g_A - g_B = \frac{8}{3} \cdot \frac{r}{l} \sqrt{\frac{M}{2\pi R_M T}} (p_A - p_B) \quad (2)$$

(efter LYKOW [17])

hvor  $g$  er den resulterende fugtstrøm, der pr. areal og tidsenhed går fra side A til side B,

$g_A$  er den fugtmængde, der effunderer fra A til B,

$g_B$  er den fugtmængde, der effunderer fra B til A,

$r$  er mikrokapillarens ækvivalentradius,

$l$  er kapillarens længde,

$M$  er molekylvægten for vanddamp,

$R_M$  er den almene gaskonstant,

$T$  er temperaturen og

$p_A$  og  $p_B$  er damptrykkene på de 2 sider.

For små trykforskelle og korte kapillarer kan formelen omskrives til:

$$g = -\frac{8}{3} \cdot r \sqrt{\frac{M}{2\pi R_M T}} \frac{dp}{dx} \quad (3)$$

I gasbeton sker den fugttransport, der er dirigeret af damptrykspotentialet, gennem et indviklet system af makro- og mikroporer, idet disse dels er forbundet både i serie og parallelt. Det er derfor ikke muligt at sammensætte diffusionen (1) og effusionen (3) rent matematisk, men den resulterende fugtstrøm kan skrives som:

$$g = -\delta \frac{dp}{dx} \quad \text{eller} \quad g = -\delta \text{ grad } p \quad (4)$$

hvor  $\delta$  er et diffusionstal, der angiver fugtstrømmen pr. tids-, areal- og damptrykspotentialenhed, når der ikke er andre potentialer til stede,  $\delta$  skal bestemmes ved forsøg.

### 3.2.2. Fugttransport dirigeret af et fugtindholdspotential.

For væsketransporten i en kapillar gælder DARCYs lov:

$$g = -k_w \rho \frac{dw}{dx} \quad (5)$$

hvor  $k_w$  er en transportkoefficient svarende til potentialet  $w$  og  $\rho$  er vands massefylde.

Potentialet  $w$  består af 2 dele:

$$w = w_k + w_g$$

hvor  $w_k$  er kapillarpotentialet:

$$w_k = \frac{P_k}{\rho} = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho r}$$

og  $w_g$  er tyngdepotentialet:

$$w_g = g_T h$$

$P_k$  er kapillarkraften,

$\rho$  er vands massefylde,

$\sigma$  er overfladespændingen,

$\theta$  er randvinklen,

$r$  er ækvivalent kapillarradius,

$g_T$  er tyngdekraftens acceleration og

$h$  er sugenhøjden

Når (5) differentieres med hensyn til fugtindholdet, fås:

$$g = -k_w \rho \frac{dw}{dx} = -k_w \rho \frac{dw}{d\psi} \frac{d\psi}{dx}$$

Ved at sætte  $k_w \frac{dw}{d\psi} = k$  fås

$$g = -k \rho \frac{d\psi}{dx} = -k \rho \text{ grad } \psi \quad (6)$$

hvor  $k$  er et kapillarledningstal, der angiver fugtstrømmen pr. tids-, areal- og fugtindholdspotentialenhed,

$\psi$  er fugtindholdet [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ] og

$\rho$  er vands massefylde,

$k$  skal bestemmes ved forsøg

Den drivende kraft er forskellen i fugtindholdet, og ifølge (6) skulle fugtmængden i for eksempel en gasbeton prøve fordele sig således, at der efter et stykketid er samme fugtindhold i hele prøven, men man kan tydeligt se, at dette ikke sker i praksis. VOS og MINNEN [27], [20] forklarer dette ved hjælp af det kritiske fugtindhold, idet de ud fra forskellige modeller af porerstrukturen viser, at der under et vist fugtindhold (det kritiske fugtindhold) ikke mere er en sammenhængende række af væskefyldte porer igennem materialet.

Når man alligevel bruger grad  $\psi$  til beregning af fugttransportmængden i tilfælde, hvor fugtindholdet er mindre end det kritiske fugtindhold, må man gøre sig klart, at der kun kan være tale om en tilsyneladende kapillartransport, idet der kun vil ske kapillartransport i enkelte små porer, og fugten vil blive transporteret videre til de mæste små porer gennem større porer ved for eksempel diffusion.

### 3.2.3. Fugttransport dirigeret af et temperaturpotential

Fugttransporten på grund af et temperaturpotential kan ske på flere fysisk forskellige måder.

- 1) Ved isoterme forhold angav (2) den fugtstrøm, der effunderede igennem en mikrokapillar, men hvis der også er et temperaturpotential over kapillaren, er fugtstrømmen bestemt af følgende formel:

$$g = \frac{8}{3} \frac{r}{l} \sqrt{\frac{M}{2\pi R_M}} \left( \frac{p_A}{\sqrt{T_A}} - \frac{p_B}{\sqrt{T_B}} \right)$$

hvor  $g$  er den resulterende fugtstrøm, der pr. areal- og tidsenhed går fra side A til side B,

$r$  er ækvivalent kapillarradius,

$l$  er kapillarens længde,

$M$  er molekylvægten for vanddamp,

$R_M$  er den almene gaskonstant,

$p_A$  og  $p_B$  er damptrykkene på de 2 sider og

$T_A$  og  $T_B$  er temperaturerne på de 2 sider

Når trykket er konstant ( $p_A = p_B = p$ ), angiver LYKOW [17], at den fugtstrøm, der transporteres på grund af temperaturforskellen, som en første approximation kan angives ved:

$$g = \frac{8}{3} \frac{r}{l} \sqrt{\frac{M}{2\pi R_M}} \left( \frac{p}{T_A \sqrt{T_B} + T_B \sqrt{T_A}} \right) (T_B - T_A) \quad (7)$$

idet størrelsen  $\frac{1}{T_A \sqrt{T_B} + T_B \sqrt{T_A}}$  varierer meget mindre end

$T_B - T_A$ .

(7) kan skrives på den generelle form:

$$g = K_1 \text{ grad } T \quad (8)$$

- 2) Ved et temperaturfald gennem et porøst materiale sker der en separationsproces af vanddamp-luft-blandingen på grund af forskelle i molekylvægt, idet de tunge luftmolekyler ( $M_L = 29$ ) vil diffundere mod lavere temperatur, og de lette vandmolekyler ( $M_V = 18$ ) vil diffundere mod højere temperatur. Denne proces kaldes termodiffusion. Den fugtmængde, der transporteres ved termidiffusion, er proportional med temperaturforskellen og kan angives på den generelle formel:

$$g = K_2 \text{ grad } T \quad (9)$$

- 3) I dampfyldte porer, over hvilke der er en temperaturforskell, kan der opstå en termisk glidning af de adsorberede vandmolekyler langs porens overflade. LYKOW [18] har beskrevet denne termiske glidning, som fremkommer som en reaktion på molekylernes stødimpuls på porevæggen, og som vil gå mod lavere temperatur. Den fugtmængde, der bliver transporteret på grund af

termisk glidning, er proportional med temperaturforskellen, d.v.s.

$$g = K_3 \text{ grad } T \quad (10)$$

- 4) I en væskefyldt kapillar med konstant tværsnit, men med forskellige temperaturer i de to ender, vil der ske en væskestrøm mod den ende med den højeste temperatur, idet den drivende kraft, kapillarpotentialet, er proportional med overfladespændingen  $\sigma$ , der er proportional med temperaturen  $T$ , d.v.s.

$$g = K_4 \text{ grad } T \quad (11)$$

- 5) I væskefyldte kapillarer angiver LYKOW [18], at der ligesom i dampfyldte kapillarer kan ske en glidning i væskens grænselag proportional med temperaturforskellen, d.v.s.

$$g = K_5 \text{ grad } T \quad (12)$$

Fugtstrømmen på grund af et temperaturpotential bliver et resultat af disse enkelttransporter, men man kan ikke finde den totale fugtstrøm ud fra de enkelte fugtstrømme, da man ikke har en model, der beskriver porestrukturen og dermed angiver, hvorledes de enkelte fugtstrømme skal kombineres, men den totale fugtstrøm vil være en vejet sum af de enkelte fugtstrømme (8) - (12).

$$g_{\text{total}} = \sum_{n=1}^5 a_n \cdot g_n = \sum_{n=1}^5 a_n \cdot K_n \text{ grad } T$$

der analogt med (4) og (6) kan skrives som:

$$g = -K \text{ grad } T \quad (13)$$

hvor  $K$  er et termodiffusionstal, der angiver fugtstrømmen pr. tids-, areal- og temperaturpotentialenhed, når der ikke er andre potentialer til stede,  $K$  skal bestemmes ved forsøg.

### 3.2.4. Fugttransport dirigeret af et totaltrykspotential.

Den luftstrøm, der bliver presset gennem et lufttæt materiale på grund af forskellen i totaltrykket på de to sider af materi-

alet, vil medføre vanddamp. Den fugtmængde, der bliver transporteret, er:

$$g = c \cdot v = c \cdot b \cdot \text{grad } P$$

hvor  $g$  er fugtstrømmen,

$c$  er vanddampindholdet på den side med det største absolute tryk,

$v$  er lufthastigheden igennem materialet,

$b$  er luftgennemslippelighedstallet og

$P$  er det absolute tryk

Hvis der samtidig sker en fugttransport på grund af damptryksforskelle, har SANDBERG [23] vist, at den totale fugtstrøm ikke er lig med summen af de to enkeltstrømme, men den kan findes af:

$$g = v \left( c_1 - \frac{c_1 - c_2}{1 - \exp\left(\frac{v}{\delta_c} \cdot 1\right)} \right)$$

hvor  $c_1$  og  $c_2$  er vanddampindholdet på de 2 sider,

$\delta_c$  er et diffusionstal i  $[m^2/s]$  defineret ud fra vanddampindholdspotentialiet i stedet for damptrykspotentialiet og

$l$  er konstruktionens tykkelse

Man kunne dog angive fugtstrømmen på formen:

$$g = -\delta \text{ grad } p - f \text{ grad } P$$

men hvis man for  $\delta$  anvender det fugtdiffusionstal, man finder ved forsøg ved isobare forhold, skal  $f$  findes ved forsøg og vil bl.a. være afhængig af grad  $p$  og af, om de 2 fugtstrømme går samme eller modsatte vej,  $f$  er altså et totaltryksdiffusionstal og vil have enheden  $kg/m \cdot s \cdot Pa$  og angiver fugtstrømmen pr. tids-, areal- og totaltrykspotentialenhed, d.v.s fugtstrømmen på grund af totaltrykspotentialiet bliver:

$$g = -f \text{ grad } P \quad (14)$$

### 3.2.5. Fugttransport dirigeret af andre potentialer.

Ud over de her nævnte fugttransportprocesser, der er de vigtigste, findes der yderligere en række transportformer (hovedsagelig efter TVEIT [25]):

- 1) Ved slagregn på en facade bliver denne udsat for et vindtryk, som kan presse vandet ind i og evt. igennem væggen.
- 2) I et materiale, der indeholder opløste salte, evt. fordi materialet er opbygget af vandopløselige bestanddele, kan der være forskellige salt koncentrationer forskellige steder i materialet, hvilket giver forskellige osmotiske tryk og dermed et osmotisk potential til at dirigere en fugtstrøm.
- 3) På grund af forskelle i bindingskræfterne i det adsorberede vandlag i porerne kan der opstå en overfladekrybning.
- 4) Deformationer af materialet kan være årsag til fugtforskydninger.
- 5) Udvidelse eller sammentrækning af luftfyldte porer på grund af temperaturvariationer kan give fugtforskydninger.
- 6) Elektriske potentialer kan give fugttransport.

### 3.3. Den totale fugttransport

#### 3.3.1. Muligheden for sammenkædning af de enkelte fugttransportformer til en "3-leddet" ligning.

Den totale fugttransport er et resultat af de i det foregående nævnte enkelttransporter, men da man som før nævnt ikke har nogen virkelig dækkende model af porestrukturen, er det ikke muligt at sammensætte fugttransporterne i de enkelte porer til en samlet fugttransport. Men det er vist, at der vil ske en fugttransport, når en eller flere af de i det foregående nævnte potentialer er til stede, og at fugtstrømmen er proportional med fugtpotentialet, d.v.s. den kan skrives som et produkt af en transportkoefficient og et fugtpotential, hvor de vigtigste er:

$$g = -\delta \text{ grad } p \quad (4)$$

$$g = -k \rho \text{ grad } \psi \quad (6)$$

$$g = -K \text{ grad } T \quad (13)$$

$$g = -f \text{ grad } P \quad (14)$$

Da de senere omtalte forsøg er udført under isobare forhold, d.v.s. med  $\text{grad } P = 0$ , og da leddet  $f \text{ grad } P$  ikke har indflydelse på de følgende ræsonnementer, vil leddet ikke blive taget med.



$$K_p \simeq -1 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m s Pa}$$

$$K_\psi \simeq +5 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m s Pa}$$

Indice p på  $K$  angiver altså, at det er termodiffusionstallet  $K_p$ , man skal benytte i ligningen med grad p, og at  $K_p$  er fugtstrømmen pr. tids-, areal- og temperaturenhed, når grad p = 0, og analogt, at det er  $K_\psi$ , man skal benytte i ligningen med grad  $\psi$ , og at  $K_\psi$  er fugtstrømmen pr. tids-, areal- og temperaturenhed, når grad  $\psi$  = 0.

De 3 fugttransportligninger (17), (18) og (19) kan hver især anvendes for alle værdier af  $\varphi$  og T. Hvilken ligning, man bestemmer sig for at benytte i hvert enkelt tilfælde, kan f. eks. afhænge af, hvilke af gradienterne man kan måle med den bedste nøjagtighed, da koefficienterne er kædet sammen af følgende matematiske relationer:

$$\delta_T \cdot k_p = (\delta_T - \delta_\psi) k_T$$

$$K_p \cdot k_T = (K_p - K_\psi) k_p$$

$$\delta_T \cdot K_\psi = (K_\psi - K_p) \delta_\psi$$

Disse relationer er udledt i et appendix (afsnit 13.1). Kender man koefficienterne i den ene ligning, kan man også finde koefficienterne i de to andre, idet der også gælder en række fysiske relationer mellem koefficienterne. Disse relationer er udledt i et appendix (afsnit 13.2) og er angivet i tabel 1, (side 36).

Kendskabet til relationerne mellem fugttransportkoefficienterne kan også være til hjælp, hvis man vil benytte andre forfatteres værdier for fugttransportkoefficienterne, og disse værdier f. eks. er angivet som  $k_T$  og  $K_\psi$ , der hører til ligning (18), medens man selv vil bruge ligning (17) og derfor skal kende  $\delta_T$  og  $K_p$  (dette er ofte tilfældet ved EDB-programmer).

### 3.3.3. De fænomenologiske ligningers konditionstal.

Som nævnt i afsnit 3.3.1. kan et ligningssystemets konditionstal give et mål for usikkerheden på resultaterne. En nærmere gen-

|                 | $\delta_T$                                                                                            | $K_P$ | $K_T$                                                                                     | $K_\psi$ | $\delta_\psi$                                                                                        | $K_P$ |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| $\delta_T =$    |                                                                                                       |       | $K_T \rho \left( \frac{d\psi}{dp} \right)_T$                                              |          | $\delta_\psi + K_P \rho \left( \frac{d\psi}{dp} \right)_T$                                           |       |
| $K_P =$         |                                                                                                       |       | $K_\psi + K_T \rho \left( \frac{d\psi}{dT} \right)_P$                                     |          | $K_P \rho \left( \frac{d\psi}{dT} \right)_P$                                                         |       |
| $K_T =$         | $\delta_T \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1}{\left( \frac{d\psi}{dp} \right)_T}$                     |       |                                                                                           |          | $K_P + \delta_\psi \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1}{\left( \frac{d\psi}{dp} \right)_T}$           |       |
| $K_\psi =$      | $K_P \div \delta_T \cdot \frac{\left( \frac{d\psi}{dT} \right)_P}{\left( \frac{d\psi}{dp} \right)_T}$ |       |                                                                                           |          | $\div \delta_\psi \cdot \frac{\left( \frac{d\psi}{dT} \right)_P}{\left( \frac{d\psi}{dp} \right)_T}$ |       |
| $\delta_\psi =$ | $\delta_T \div K_P \frac{\left( \frac{d\psi}{dp} \right)_T}{\left( \frac{d\psi}{dT} \right)_P}$       |       | $\div K_\psi \frac{\left( \frac{d\psi}{dp} \right)_T}{\left( \frac{d\psi}{dT} \right)_P}$ |          |                                                                                                      |       |
| $K_P =$         | $\frac{1}{\rho} K_P \frac{1}{\left( \frac{d\psi}{dT} \right)_P}$                                      |       | $K_T + K_\psi \frac{1}{\rho} \frac{1}{\left( \frac{d\psi}{dT} \right)_P}$                 |          |                                                                                                      |       |

Tabel 1. Relationer mellem fugttransportkoefficienterne.

Relation between the moisture transfer coefficients.

nemgang af konditionstallet er givet af KAJ MADSEN [19], og princippet skal her kort gennemgås.

Et ligningssystems konditionstal  $k_{kon}$  kan beregnes af følgende formel:

$$k_{kon} = \sqrt{\frac{\max \lambda \left( \underline{\underline{\bar{A}}}^T \underline{\underline{A}} \right)}{\min \lambda \left( \underline{\underline{\bar{A}}}^T \underline{\underline{A}} \right)}}$$

hvor  $\underline{\underline{A}}$  er ligningssystemets matrix

$\underline{\underline{\bar{A}}}^T$  er  $\underline{\underline{A}}$ 's komplekst konjugerede, transponerede matrix,

$\max \lambda \left( \underline{\underline{\bar{A}}}^T \underline{\underline{A}} \right)$  er den største egen værdi for matricen  $\left( \underline{\underline{\bar{A}}}^T \underline{\underline{A}} \right)$  og

$\min \lambda \left( \underline{\underline{\bar{A}}}^T \underline{\underline{A}} \right)$  er den mindste egen værdi,

desuden ses, at  $k_{kon} \geq 1$ , ( $k_{kon} = 1$ , når alle egen værdier er lige store).

De tre andre typer potentialer kan alle give en fugtstrøm, og det synes derfor rimeligt at opstille en ligning, der angiver den totale fugtstrøm ved summen af de tre enkeltstrømme, idet det derved også er angivet, hvilke bidrag de enkelte typer fugtpotentialer yder til den totale fugttransport.

$$g = -\delta_{\psi,T} \text{ grad } p - k_{p,T} \rho \text{ grad } \psi - K_{p,\psi} \text{ grad } T \quad (15)$$

Der er her tale om en kvasi-stationær transport, d.v.s. en transport hvor transporthastigheden er så lille i forhold til molekylernes middelhastighed, at ethvert delement, f. eks. en "luftterning" i en kapillar til ethvert tidspunkt er i ligevægt, delementets fysiske tilstand er derfor, jvf. afsnit 2.1., beskrevet ved angivelse af 2 parametre, d.v.s. ligningen (15) er overbestemt, da de 3 gradienter altså ikke er uafhængige variable.

Denne overbestemmelse ses også af, at man f. eks. med  $\delta$ 's indices  $\psi, T$  har tilkendegivet, at den fysiske betydning af  $\delta_{\psi,T}$  er, at den angiver fugtstrømmen pr. tids-, areal- og damptryksenhed, når grad  $\psi$  og grad  $T$  er nul, men dette er uden mening, idet grad  $p$  også er nul, når grad  $\psi$  og grad  $T$  er nul, d.v.s. der sker ingen fugttransport, og  $\delta_{\psi,T}$  er derfor ubestemt.

Der er altså ikke fysisk dækning for at angive den totale fugtstrøm ved en ligning, der samtidig "forklarer", fra hvilke kræfter fugtstrømmen stammer. Dette underbygges yderligere af usikkerhedsbetragtninger:

Hvis man ville bestemme  $\delta$ ,  $k$  og  $K$  i ligning (15) og derfor opstillede ligningssystemet  $\underline{A} \underline{x} = \underline{y}$ , hvor  $\underline{A}$  er en  $3 \times 3$  matrix i grad  $p$ , grad  $\psi$  og grad  $T$ ,  $\underline{x}$  er  $\delta$ ,  $k$ ,  $K$  vektoren, og  $\underline{y}$  er de 3 hertil svarende  $g$ -værdier, er ligningssystemets konditionstal  $k_{\text{kon}}$  (se afsnit 3.3.3.) et mål for usikkerhederne på løsnings-sættet, idet den relative usikkerhed på  $\underline{x}$  er  $\leq k_{\text{kon}}$  gange den relative usikkerhed på  $\underline{y}$ , og da de ved beregninger fundne værdier for  $k_{\text{kon}}$  er af størrelsesordenen  $10^6$ , bekræfter dette, at det valgte ligningssystem er overbestemt.

Man må derfor acceptere, at det ikke er muligt ad denne vej at få forklaret, hvilke kræfter der er årsag til den totale fugtstrøm og nøjes med at opstille fænomenologiske ligninger, der kan beskrive den totale fugtstrøm.

### 3.3.2. Fænomenologiske ligninger ("2-leddede" ligninger)

Den "3-leddede" ligning (15) kan ud fra kendskabet til sammenhængen mellem  $p$ ,  $\psi$  og  $T$  omskrives til en "2-leddet" ligning.

Man kan f. eks. angive  $\psi$  som en funktion af  $p$  og  $T$ , idet

1:  $\psi = f_1(\varphi)$ , hvor  $f_1$  er de i afsnit 2.2.3. angivne form-  
ler for middelsorptionskurven

2:  $\varphi = \frac{p}{p'}$

3:  $p' = f_2(T)$ , hvor  $f_2$  er den i afsnit 2.1. angivne formel  
for damptrykskurven

Heraf fås:

$$\frac{d\psi}{dx} = \frac{d\psi}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dp} \cdot \frac{dp}{dx} + \frac{d\psi}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dp'} \cdot \frac{dp'}{dT} \cdot \frac{dT}{dx}$$

der kan skrives som

$$\text{grad } \psi = A \text{ grad } p + B \text{ grad } T \quad (16)$$

hvor  $A$  og  $B$  er funktioner af  $p$  og  $T$ .

Indsættes (16) i (15), fås:

$$\begin{aligned} g &= -\delta_{\psi, T} \text{ grad } p - k_{p, T} \rho (A \text{ grad } p + B \text{ grad } T) - K_{p, \psi} \text{ grad } T \Rightarrow \\ g &= -(\delta_{\psi, T} + k_{p, T} \rho \cdot A) \text{ grad } p - (k_{p, T} \rho \cdot B + K_{p, \psi}) \text{ grad } T \Rightarrow \\ g &= -\delta_T \text{ grad } p - K_p \text{ grad } T \end{aligned} \quad (17)$$

På analog måde kan der udledes en formel i  $\psi$  og  $T$  eller i  $p$  og  $\psi$ :

$$g = -k_T \rho \text{ grad } \psi - K_\psi \text{ grad } T \quad (18)$$

$$g = -\delta_\psi \text{ grad } p - k_p \rho \text{ grad } \psi \quad (19)$$

Man må stadigvæk huske på, at (17), (18) og (19) er fænomenologiske ligninger, og at de enkelte led ikke angiver de enkelte fugttransportpotentialers bidrag til totaltransporten. Hvis leddet  $K \text{ grad } T$  skulle angive den fysiske fugttransport, der sker på grund af temperaturforskellen over prøven, skulle termodiffusionstallene  $K_p$  og  $K_\psi$  være lig med hinanden, men dette er langt fra tilfældet, idet:

Ud fra kendskabet til  $k_{kon}$  kan man bedømme to ting i ligningssystemet  $\underline{A} \underline{x} = \underline{y}$  :

1. Virkningen af en ændring i ligningssystemets højre side:

Hvis vektoren  $\underline{y}$  ændres til  $(\underline{y} + \underline{r})$ , vil løsningsvektoren  $\underline{x}$  ændres til  $(\underline{x} + \underline{e})$ , størrelsesordenen af  $\underline{e}$  kan vurderes ved uligheden:

$$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i)^2}} \leq k_{kon} \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i)^2}}$$

d.v.s. den relative usikkerhed på  $\underline{x}$  er  $\leq k_{kon}$  gange den relative usikkerhed på  $\underline{y}$ . Deraf følger, at hvis konditionstallet er stort, kan man ikke være sikker på, at en lille relativ ændring på  $\underline{y}$  medfører en lille relativ ændring på  $\underline{x}$ .

Selv om konditionstallet er lille, skal man passe på, hvis der er væsentlige forskelle på løsningsvektorens koordinater, idet en relativ stor usikkerhed på en lille koordinat kan blive "dækket" af en relativ lille usikkerhed på en stor koordinat. Omvendt skulle dette forhold kunne benyttes til at bedømme den relative fejl på de enkelte koordinater i løsningsvektoren, men dette har KAJ MADSEN ikke fået gennemarbejdet.

2. Virkningen af en ændring i matricen:

Hvis matricen  $\underline{A}$  ændres, således at den relative ændring på matrixens enkelte elementer er mindre end  $\xi$ , kan den relative fejl  $\underline{f}$  vurderes ved uligheden:

$$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i)^2}} \leq \frac{\xi \sqrt{n \cdot k_{kon}}}{1 - \xi \sqrt{n \cdot k_{kon}}}$$

Konditionstallet er udregnet for en række 2.2 matricer i grad  $p$ , grad  $T$  og grad  $\psi$ , svarende til ligning (17), (18) og (19) og svarende til de værdier af grad  $p$ , grad  $T$  og

grad  $\psi$ , der fås i det senere omtalte forsøgsarbejde. Der blev fundet følgende værdier for konditionstallet i de tre forskellige ligninger:

| ligningssystem | konditionstal |
|----------------|---------------|
| (17)           | 2,4 - 8,7     |
| (18)           | 1,5 - 2,4     |
| (19)           | 1,4 - 34      |

Dette viser at det er sandsynligt, at man kan få rimelige løsninger til ligningssystemerne.

### 3.4. De i litteraturen benyttede ligninger

Vi skal i dette afsnit se på, hvilke ligninger der bliver benyttet til beregning af fugttransporten, hvilke værdier der angives for fugttransportkoefficienter og enkelte eksempler på, hvilke resulterende fugttransporter der fås. I slutningen af afsnittet er der i tabel 5, side 47 angivet nogle værdier for fugttransportkoefficienterne for gasbeton. Denne tabel skulle give en ide om fugttransportkoefficienternes store variation.

I nyere publicerede værker er det hovedsageligt ligninger af følgende fire typer, man finder angivet:

$$g = -\delta \text{ grad } p \quad (20)$$

$$g = -\delta_T \text{ grad } p - K_p \text{ grad } T \quad (21)$$

$$g = -k_T \rho \text{ grad } \psi - K_\psi \text{ grad } T \quad (22)$$

$$g = -\delta_\psi \text{ grad } p - k_p \rho \text{ grad } \psi \quad (23)$$

Ligning (20) kan være et specialtilfælde af ligning (21), hvilket er tilfældet, når man kun ser på isoterme forhold, hvor leddet  $K_p \text{ grad } T$  i ligning (21) er nul. Et eksempel herpå er bestemmelsen af  $\delta_T$  ved "cup"-metoden.

ASTM [6] angiver i sin standard C355-64 to "cup"-metoder til bestemmelse af diffusionstallet  $\delta_T$  for materialer med en tykkelse over 3 mm. De to metoder er "desicant"-metoden og "water"-metoden. I begge tilfælde monterer man prøven som "låg" over en "cup" og anbringer det hele i et klimakammer ved 50% RF. Ved "desicant"-metoden er der et tørremiddel i "cup'en" og

derfor ca 0% RF på undersiden af prøven. Ved "water"-metoden er der vand i "cup'en" og dermed 100% RF på undersiden af prøven. Man får altså samme damptryksgradient over prøven, men bestemmelsen af  $\delta_T$  bliver udført ved to forskellige niveauer (25 og 75% RF i middel), og de to målte  $\delta_T$ -værdier vil være forskellige.

I ASHRAE [ 5 ] er angivet  $\delta_T$ -værdier for en række materialer, men desværre ikke for gasbeton. Men KÜNZEL og BERNHARDT [14], der har bestemt  $\delta_T$ -værdien for en række byggematerialer ud fra ASTM standard C355-64, har også bestemt  $\delta_T$ -værdien for gasbeton. For gasbeton med  $\rho = 640 \text{ kg/m}^3$  er  $\delta_T = 3,8 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$  ved et middelfugtindhold svarende til 25% RF (henholdsvis 0 og 50% RF på de to sider), og  $\delta_T = 5,2 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$  ved et middelfugtindhold svarende til 75% RF (henholdsvis 100 og 50% RF på de to sider). For gasbeton med  $\rho = 535 \text{ kg/m}^3$  er  $\delta_T$ -værdierne henholdsvis  $2,5 \cdot 10^{-11}$  og  $3,5 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$ .

TVEIT [26] har målt diffusionstallet  $\delta_T$  ved forskellige temperatur- og fugtniveauer med en modificeret "cup"-metode, idet han har anvendt forskellige absorbenter i "cup'en" for at kunne få forskellige relative fugtigheder deri. Da det ikke er muligt at måle den relative fugtighed i "cup'en" under forsøget, har han lavet en sekundær forsøgsrække til bestemmelse af den relative fugtighed i afhængighed af temperaturniveauet og fugtstrømmen gennem "cup'ens" låg. Der er udført forsøg ved 3 temperaturniveauer og 5 fugtniveauer. For gasbeton (rumvægt  $510 \text{ kg/m}^3$ ) fandt han, at diffusionstallet var praktisk taget uafhængig af temperaturniveauet i forsøgsområdet ( $5^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}$ ), men afhængig af fugtniveauet, idet  $\delta_T$  varierede næsten retlinet fra  $1,3 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$  ved 10% RF til  $2,6 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$  ved 90% RF.

LUND-HANSEN [16] benytter ligningen  $g = -\delta \text{ grad p}$ , selv om der er en temperaturgradient over prøven, men angiver  $\delta$  som det tilsyneladende diffusionstal og undersøger blandt andet  $\delta$ 's afhængighed af temperaturgradienten. Målingerne er foretaget på gasbeton prøvelegemer ( $\rho = 730 \text{ kg/m}^3$ ) anbragt mellem en varm og en kold kasse, hvori temperatur- og fugtniveau kunne reguleres. Målingerne er udført ved 4 forskellige fugtniveauer, men da der

var kondens ved de to højeste niveauer, vil der her kun blive set på de to lave niveauer, hvor middelfugtniveauet i prøven svarer til henholdsvis 56% RF og 65% RF. Alle forsøgene er blevet udført med en temperaturforskel over prøven. Denne varierede fra 22°C til 32,2°C og var i middel henholdsvis 26,2°C og 27,6°C (prøvens tykkelse var 0,05 m). Ved forsøgene kunne der ikke spores nogen sikker virkning fra ændringer i temperaturforskellen, og gennemsnittet af de målte tilsyneladende diffusionstal var henholdsvis  $2,2 \cdot 10^{-11}$  kg/m s Pa og  $2,5 \cdot 10^{-11}$  kg/m s Pa.

SBI [11] har målt det tilsyneladende diffusionstal for en række materialer, bl.a. for en væg, der er limet op af gasbetonblokke, men der er ikke angivet rumvægten for gasbeton, og da der ved optegning af mætningsdamptrykskurven ikke er taget hensyn til varmeovergangsmodstande (væggens overfladetemperaturer er sat lig med lufttemperaturerne), er det ikke muligt at bedømme, om der evt. har været kondens i væggen. De fundne diffusionstal varierer fra  $3,5 \cdot 10^{-11}$  kg/m s Pa til  $8,1 \cdot 10^{-11}$  kg/m s Pa, men der er ikke angivet de til resultaterne svarende middelfugtindhold i væggen.

AHLGREN [4] og VOS og TAMMES [28] benytter begge ligningen:

$$g = -\delta_T \text{ grad } p - K_p \text{ grad } T$$

til beregning af fugttransporten.

AHLGREN [4] har udført en række forsøg til bestemmelse af  $\delta_T$  og  $K_p$  for gasbeton ( $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$ ) ved henholdsvis isoterme og isobare forhold, idet han har anbragt prøvelegemet mellem to konditionerede kamre. Han har fundet følgende værdier for  $\delta_T$ :  $3,8 \cdot 10^{-11}$ ,  $4,6 \cdot 10^{-11}$  og  $5,5 \cdot 10^{-11}$  kg/m s Pa ved et middelfugtindhold svarende til henholdsvis 49, 53 og 85% RF. For  $K_p$  har han kun rapporteret en enkelt værdi ved 58% RF og 29°C, nemlig  $-0,4 \cdot 10^{-9}$  kg/m s °K.

VOS og TAMMES [28] har udledt deres fugttransportligning teoretisk. Som udgangspunkt for udledningen har de benyttet følgende teori: Fugtstrømmen kan beskrives ved en potentialforskel:



$$g = -\delta \frac{p}{R T} \text{ grad } e \quad (24)$$

hvor  $\delta$  er diffusionstallet,  $p$  er damptrykket,  $R$  er gaskonstanten,  $T$  er temperaturen og  $e$  er potentialet, hvor potentialet kan udtrykkes ved:

$$e = R T \ln \varphi ,$$

hvorefter (24) kan omskrives til:

$$g = -\delta_T \text{ grad } p + \delta_T \varphi p' \left[ \frac{1}{p'} \frac{dp'}{dT} - \frac{1}{T} \ln \varphi \right] \text{ grad } T$$

der kan skrives som:

$$g = -\delta_T \text{ grad } p - K_p \text{ grad } T$$

hvor 
$$K_p = -\delta_T \varphi p' \left[ \frac{1}{p'} \frac{dp'}{dT} - \frac{1}{T} \ln \varphi \right] \quad (25)$$

For  $\delta_T$  angiver VOS og TAMMES de værdier, som TVEIT [26] har fundet for gasbeton med  $\rho = 460 \text{ kg/m}^3$ , d.v.s. varierende fra  $\delta_T = 3,4 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$  for  $\varphi = 10\% \text{ RF}$  til  $\delta_T = 8,0 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$  for  $\varphi = 90\% \text{ RF}$ .

Af (25) kan  $K_p$  beregnes for forskellige værdier af  $\varphi$  og  $\vartheta$ :

| $\varphi$ | $\vartheta$ | $K_p$                |
|-----------|-------------|----------------------|
| % RF      | °C          | kg/m s °K            |
| 0         |             | 0                    |
| 60        | 10          | $-2,5 \cdot 10^{-9}$ |
| 60        | 25          | $-5,5 \cdot 10^{-9}$ |
| 60        | 40          | $-11 \cdot 10^{-9}$  |

Ved 29°C og 58% RF, hvor AHLGREN's  $K_p$ -værdi er fundet, giver lign (25):  $K_p = -6,4 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m s °K}$ , d.v.s. en numerisk set 16 gange større værdi end AHLGREN's.

Forskellen mellem de to  $K_p$ -værdier træder endnu tydeligere frem, når man ser, hvilke fugtstrømme (i afhængighed af temperaturforskellene) man får, når man benytter henholdsvis den ene og den anden værdi:

VOS og TAMMES har beregnet fugttransporten gennem en 0,2 m tyk gasbetonplade med de i tabel 2 angivne fugt- og temperaturforhold, med  $\delta_T = 4,5 \cdot 10^{-11}$  kg/m s Pa og med de i tabellen angivne  $K_p$ -værdier (kolonne  $K_p$  (VOS)). Den resulterende fugtstrøm er angivet i kolonne  $g$  (VOS).

AHLGREN har beregnet fugtstrømmen ved de samme betingelser, bortset fra  $K_p$ -værdien, hvor han har benyttet sin eksperimentelt fundne værdi (kolonne  $K_p$  (AHL)). Den resulterende fugtstrøm er angivet i kolonne  $g$  (AHL).

Beregningerne efter VOS og TAMMES angiver, at temperaturgradienten har en meget stor indflydelse på fugtstrømmen, og denne store indflydelse finder man ikke angivet hos andre forfattere. VOS og TAMMES' omskrivning af ligning (24) synes helt i orden, men det er dog spørgsmålet, om det er korrekt at tage en ligning (24), der er bygget op ud fra potentialforskelle i væskefyldte kapillarer og omskrive ligningen og derefter benytte den ved fugtniveauer, hvor der er et meget lille antal væskefyldte kapillarer, og hvor hovedparten af fugttransporten sker dels som diffusion og dels ved forskellige forskydninger i det til de indre overflader absorberede vandlag.

Ligningen  $g = -k_T \rho \text{ grad } \psi - K_\psi \text{ grad } T$  bliver benyttet af KOOL [12] til EDB-beregning af fugttransport i tage af gasbeton, og han har til dette formål eksperimentelt fundet værdier for  $k_T$  og  $K_\psi$ .

$k_T$  værdierne er fundet ved udtørningsforsøg ved fugtindhold fra 1-70 vol% og ved 20°C. For gasbeton ( $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ ) varierede  $k_T$  fra  $7 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m s kg/m}^3$  til  $1 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m s kg/m}^3$ , når fugtindholdet varierede fra 1 vol% til 6 vol% svarende til en variation i den relative fugtighed fra 20% til 95%.

For  $K_\psi$  er følgende værdier fundet:  $5 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m s } ^\circ\text{K}$  ved et fugtindhold på 2 vol% stigende til  $1 \cdot 10^{-8} \text{ kg/m s } ^\circ\text{K}$  ved 5 vol%.

VOS og TAMMES [28] har også omskrevet ligning (24):

$$g = -\delta \frac{P}{RT} \text{ grad } e \quad \text{til}$$

$$g = -\delta_T \rho' \frac{d\varphi}{d\psi} \text{ grad } \psi - \delta_T \varphi \rho' \frac{\ln \varphi}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT} \text{ grad } T$$

| T <sub>1</sub> | P <sub>1</sub> | φ <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> | φ <sub>2</sub> | K <sub>p</sub> (VOS) | -δ <sub>T</sub> grad p | -K <sub>p</sub> grad T | g (VOS)              | K <sub>p</sub> (AHL)  | -δ <sub>T</sub> grad p | -K <sub>p</sub> grad T | g (AHL)              |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| °K             | Pa             | %              | °K             | Pa             | %              | kg/m s °K            | kg/m <sup>2</sup> s    | kg/m <sup>2</sup> s    | kg/m <sup>2</sup> s  | kg/m s °K             | kg/m <sup>2</sup> s    | kg/m <sup>2</sup> s    | kg/m <sup>2</sup> s  |
| 300            | 1782           | 50             | 300            | 530            | 15             |                      | 285 10 <sup>-9</sup>   | 0                      | 285 10 <sup>-9</sup> |                       | 285 10 <sup>-9</sup>   | 0                      | 285 10 <sup>-9</sup> |
| 300            | 1782           | 50             | 290            | 530            | 28             | 3,4 10 <sup>-9</sup> | 285 10 <sup>-9</sup>   | -170 10 <sup>-9</sup>  | 115 10 <sup>-9</sup> | -0,4 10 <sup>-9</sup> | 285 10 <sup>-9</sup>   | -20 10 <sup>-9</sup>   | 265 10 <sup>-9</sup> |
| 300            | 1782           | 50             | 275            | 530            | 78             | 3,0 10 <sup>-9</sup> | 285 10 <sup>-9</sup>   | -375 10 <sup>-9</sup>  | 90 10 <sup>-9</sup>  | -0,4 10 <sup>-9</sup> | 285 10 <sup>-9</sup>   | -50 10 <sup>-9</sup>   | 235 10 <sup>-9</sup> |

Tabel 2. Fugtstrøm gennem en gasbetonplade i afhængighed af temperaturgradient og K<sub>p</sub>-værdi.

Moisture flow through a slab of cellular concrete in dependence of temperature gradient and K<sub>p</sub>-value.

der kan skrives som:

$$g = -k_T \rho \text{ grad } \psi - K_\psi \text{ grad } T$$

hvor  $k_T = \frac{\delta_T p'}{\rho} \frac{d\varphi}{d\psi}$  (26)

og  $K_\psi = \delta_T \varphi p' \frac{\ln \varphi}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT}$  (27)

Af (26) kan  $k_T$  beregnes, og af (27) kan  $K_\psi$  beregnes, og der fås f. eks. følgende:

| $\varphi$ | $\vartheta$ | $k_T$                    | $K_\psi$             |
|-----------|-------------|--------------------------|----------------------|
| % RF      | °C          | kg/m s kg/m <sup>3</sup> | kg/m s °K            |
| 20        | 10          | $1 \cdot 10^{-9}$        | $0,4 \cdot 10^{-10}$ |
| 90        | 10          | $0,4 \cdot 10^{-9}$      | $0,1 \cdot 10^{-10}$ |
| 20        | 40          | $6 \cdot 10^{-9}$        | $2,4 \cdot 10^{-10}$ |
| 90        | 40          | $2 \cdot 10^{-9}$        | $0,9 \cdot 10^{-10}$ |

Der er ikke særlig stor forskel mellem de  $k_T$ -værdier, som angives af henholdsvis KOOI og VOS og TAMMES, men der er forskel på  $K_\psi$ -værdierne. Hvis man beregner fugtstrømmen gennem den samme plade som gjort i tabel 2 og med de samme tryk- og temperaturforhold, fås følgende, idet koefficienter og resultater fra VOS og TAMMES er markeret (VOS), og koefficienter og resultater fra KOOI er markeret (KO) (tabel 3).

Hvis man sammenligner resultaterne i tabel 3 med resultaterne i tabel 2, ses, at VOS begge steder får en fugtstrøm, der er meget afhængig af temperaturgradienten, og at KOOI ligesom AHLGREN får en transport, der kun er svagt temperaturafhængig. At KOOI får en større fugttransport end AHLGREN skyldes sikkert, at KOOI's værdier er for gasbeton med  $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$ , medens AHLGREN's er for gasbeton med  $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$ .

| $\psi_1$<br>$m^3/m^3$ | $\psi_2$<br>$m^3/m^3$ | $k_T$ (VOS)<br>$kg/m \cdot s \cdot kg/m^3$ | $-k_T \cdot p$ grad $\psi$<br>$kg/m^2 \cdot s$ | $K_{\psi}$ (VOS)<br>$kg/m \cdot s \cdot ^\circ K$ | $-K_{\psi}$ grad $T$<br>$kg/m^2 \cdot s$ | $\sigma$ (VOS)<br>$kg/m^2 \cdot s$ | $k_T$ (KO)<br>$kg/m \cdot s \cdot kg/m^3$ | $-k_T \cdot p$ grad $\psi$<br>$kg/m^2 \cdot s$ | $K_{\psi}$ (KO)<br>$kg/m \cdot s \cdot ^\circ K$ | $-K_{\psi}$ grad $T$<br>$kg/m^2 \cdot s$ | $\sigma$ (KO)<br>$kg/m^2 \cdot s$ |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| 0,02                  | 0,009                 | $5,2 \cdot 10^{-9}$                        | $286 \cdot 10^{-9}$                            | $1,3 \cdot 10^{-10}$                              | 0                                        | $286 \cdot 10^{-9}$                | $6,5 \cdot 10^{-9}$                       | $258 \cdot 10^{-10}$                           | $20 \cdot 10^{-10}$                              | 0                                        | $358 \cdot 10^{-9}$               |
| 0,02                  | 0,015                 | $5,2 \cdot 10^{-9}$                        | $130 \cdot 10^{-9}$                            | $1,1 \cdot 10^{-10}$                              | $5,5 \cdot 10^{-9}$                      | $136 \cdot 10^{-9}$                | $6,1 \cdot 10^{-9}$                       | $152 \cdot 10^{-9}$                            | $30 \cdot 10^{-10}$                              | $150 \cdot 10^{-9}$                      | $302 \cdot 10^{-9}$               |
| 0,02                  | 0,033                 | $2,3 \cdot 10^{-9}$                        | $-150 \cdot 10^{-9}$                           | $0,8 \cdot 10^{-10}$                              | $10,0 \cdot 10^{-9}$                     | $-140 \cdot 10^{-9}$               | $5,0 \cdot 10^{-9}$                       | $-325 \cdot 10^{-9}$                           | $50 \cdot 10^{-10}$                              | $625 \cdot 10^{-9}$                      | $300 \cdot 10^{-9}$               |

Tabel 3. Fugtstrøm gennem en gasbetonplade i afhængighed af temperaturgradient og  $k_T$ - og  $K_{\psi}$ -værdier.

Moisture flow through a slab of cellular concrete in dependence of temperature gradient and  $k_T$ - and  $K_{\psi}$ -values.

Det ville være af interesse at sammenligne  $k_T$ - og  $K_\psi$ -værdierne ved høje fugtindhold, men allerede fra  $\psi = 5\%$  svarende til  $\phi = \text{ca. } 90\%$  RF mangler vi kendskabet til  $\delta_T$  og kan derfor ikke beregne  $k_T$  og  $K_\psi$  ud fra ligning (26) og (27), men man kan se på forholdet mellem  $K_\psi$  og  $k_T$ , for her går  $\delta_T$ -værdien ud. VOS har i en af sine andre bøger [27] beregnet forholdet  $\frac{K_\psi}{k_T}$ , og KOOI

har angivet det eksperimentelt fundne forhold mellem  $K_\psi$  og  $k_T$ . I området fra 40 til 99% RF har de to kurver samme form, men KOOI's eksperimentelt fundne forhold er ca. 100 gange større end det forhold, VOS har mellem sine teoretisk udledte værdier.

HANSON [9] angiver ligningen:

$$g = -\delta_\psi \text{ grad } p - k_p \rho \text{ grad } \psi$$

til bestemmelse af fugttransporten og har fundet  $\delta_\psi$ - og  $k_p$ -værdierne ved kondensforsøg og angiver følgende værdier for  $\rho = 530$  og  $3 < \psi < 14$  vol%:  $\delta_\psi = 4,0 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$  og  $k_p = 5,5 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m s kg/m}^3$ , og for  $\rho = 560$  og  $3,5 < \psi < 20$  vol%:  $\delta_\psi = 2,9 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$  og  $k_p = 4,2 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m s kg/m}^3$ .

Hvis man beregner fugtstrømmen gennem den samme plade som gjort i tabel 2 og 3 og med de samme tryk og temperaturforhold, fås følgende (tabel 4):

| $P_1$ | $\psi_1$                | $P_2$ | $\psi_2$                | $\delta_\psi$        | $-\delta_\psi \text{ grad } p$ | $k_p$                  | $-k_p \rho \text{ grad } \psi$ | $g$                       |
|-------|-------------------------|-------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Pa    | $\text{m}^3/\text{m}^3$ | Pa    | $\text{m}^3/\text{m}^3$ | $\text{kg/m s Pa}$   | $\text{kg/m}^2 \text{ s}$      | $\text{kg/m s kg/m}^3$ | $\text{kg/m}^2 \text{ s}$      | $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ |
| 1782  | 0,02                    | 530   | 0,009                   | $4,0 \cdot 10^{-11}$ | $250 \cdot 10^{-9}$            | $5,5 \cdot 10^{-10}$   | 30                             | 280                       |
| 1782  | 0,02                    | 530   | 0,015                   | $4,0 \cdot 10^{-11}$ | $250 \cdot 10^{-9}$            | $5,5 \cdot 10^{-10}$   | 14                             | 264                       |
| 1782  | 0,02                    | 530   | 0,033                   | $4,0 \cdot 10^{-11}$ | $250 \cdot 10^{-9}$            | $5,5 \cdot 10^{-10}$   | -36                            | 214                       |

Tabel 4. Fugtstrøm gennem en gasbetonplade i afhængighed af temperaturgradienten.

Moisture flow through a slab of cellular concrete in dependence of the temperature gradient.

| Symbol        | Variationsområde                                                                                                                                                                                                                                                                             | $\rho$ i $\text{kg/m}^3$                       | Nåleområde                                                                                                                                                                                                 | Reference                                                                                                  |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\delta$      | $1,9 - 3,0 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$<br>$2,7 - 8,1 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$                                                                                                                                                                                                 | 750                                            | $48 < \varphi < 77\% \text{ RF}$                                                                                                                                                                           | LUND-HANSEN [16]<br>KJÆR & CHRISTENSEN [11]                                                                |
| $\delta_T$    | $2,0 - 3,8 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$<br>$3,0 - 5,2 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$<br>$1,3 - 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$<br>$3,4 - 8,0 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$<br>$3,8 - 5,5 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$<br>$3,4 - 8,0 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$ | 535-640<br>535-640<br>510<br>460<br>500<br>460 | $\varphi = 25\% \text{ RF}$<br>$\varphi = 75\% \text{ RF}$<br>$10 < \varphi < 90\% \text{ RF}$<br>$10 < \varphi < 90\% \text{ RF}$<br>$19 < \varphi < 85\% \text{ RF}$<br>$10 < \varphi < 90\% \text{ RF}$ | KUNZEL & BERNHARD [14]<br>TVEIT [26]<br>TVEIT [26]<br>AHLGREN [4]<br>VOS & TAMMES [28]<br>after TVEIT [26] |
| $\kappa_p$    | $-0,4 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m s } ^\circ\text{K}$<br>$0 - -2,5 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m s } ^\circ\text{K}$<br>$-2,5 - -11 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m s } ^\circ\text{K}$                                                                                                                  | 500                                            | $\varphi = 58\% \text{ RF}$<br>$0 < \varphi < 60\% \text{ RF}, \vartheta = 10^\circ\text{C}$<br>$\varphi = 60\% \text{ RF}, 10 < \vartheta < 40^\circ\text{C}$                                             | AHLGREN [4]<br>VOS & TAMMES [28]                                                                           |
| $\kappa_T$    | $70 - 10 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m s kg/m}^3$<br>$10 - 4 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m s kg/m}^3$<br>$60 - 20 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m s kg/m}^3$                                                                                                                                            | 700                                            | $1 < \phi < 6 \text{ vol}\%, \vartheta = 20^\circ\text{C}$<br>$20 < \varphi < 90\% \text{ RF}, \vartheta = 10^\circ\text{C}$<br>$20 < \varphi < 90\% \text{ RF}, \vartheta = 40^\circ\text{C}$             | KOOI [12]<br>VOS & TAMMES [28]                                                                             |
| $\kappa_\psi$ | $0,5 - 10 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m s } ^\circ\text{K}$<br>$0,04 - 0,01 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m s } ^\circ\text{K}$<br>$0,24 - 0,09 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m s } ^\circ\text{K}$                                                                                                          | 700                                            | $2 < \phi < 5 \text{ vol}\%, \vartheta = 20^\circ\text{C}$<br>$20 < \varphi < 90\% \text{ RF}, \vartheta = 10^\circ\text{C}$<br>$20 < \varphi < 90\% \text{ RF}, \vartheta = 40^\circ\text{C}$             | KOOI [12]<br>VOS & TAMMES [28]                                                                             |
| $\delta_\phi$ | $4,0 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$<br>$2,0 \cdot 10^{-11} \text{ kg/m s Pa}$                                                                                                                                                                                                             | 530<br>560                                     | $3 < \phi < 14 \text{ vol}\%$<br>$3,5 < \phi < 20 \text{ vol}\%$                                                                                                                                           | HANSEN [9]                                                                                                 |
| $\kappa_p$    | $5,5 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m s kg/m}^3$<br>$4,2 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m s kg/m}^3$                                                                                                                                                                                                     | 530<br>560                                     | $1 < \phi < 14 \text{ vol}\%$<br>$3,5 < \phi < 20 \text{ vol}\%$                                                                                                                                           | HANSEN [9]                                                                                                 |

Tabel 5. Oversigt over variationen af fugttransportkoefficienterne for gasbeton.

Summary of the variation for the moisture transfer coefficients of cellular concrete.

#### 4. FORSØGSPROGRAM

##### 4.1. Formålet med forsøget

Det er ikke ualmindeligt, at man som afslutning på en forsøgsrække, hvor man har villet sammenligne den teoretisk beregnede fugtvariation og fugttransport i f. eks. et tag med de ved langtidsforsøg målte værdier, kan læse: "Uoverensstemmelsen mellem de beregnede og de målte værdier skyldes sikkert, at der trods alt har været tale om to forskellige materialer", f. eks. om gasbeton med to forskellige rumvægte, idet de værdier, man i litteraturen har fundet for fugttransportkoefficienterne og har benyttet til de teoretiske beregninger, har været for en gasbeton med en rumvægt, der er forskellig fra rumvægten for den gasbeton, der er blevet brugt til langtidsforsøget.

Dette er baggrunden for de forsøg, der her skal refereres, idet forsøgene er en selvstændig del af en større forsøgsrække til belysning af fugtforholdene i gasbeton, idet man vil bruge gasbetonprøver, der er fremstillet samtidig, og som derfor er praktisk taget ens til en række forskellige fugtforsøg. Formålet med denne forsøgsrække er primært at bestemme fugttransportkoefficienterne som funktion af temperatur og fugtniveau i det relativt tørre område, d.v.s. for fugtindhold svarende til relative fugtigheder mindre end ca. 80% RF.

Der er en hel række parametre, man kunne tænke sig, at fugttransportkoefficienterne var afhængige af, nemlig:

$$T, \varphi, T_{\text{dug}}, p, \psi, P, \Delta T, \Delta \varphi, \Delta T_{\text{dug}}, \Delta p, \Delta \psi \text{ og } \Delta P$$

Som angivet i afsnit 2.1. er temperatur og fugtniveau angivet ved to af de fire parametre,  $T$ ,  $\varphi$ ,  $T_{\text{dug}}$  og  $p$ , og ligeledes er  $\psi$ -niveauet angivet ved  $\varphi$ -niveauet (afsnit 2.2.3.). På analog måde er det tilstrækkeligt at finde afhængigheden af to af de fem parametre  $\Delta T$ ,  $\Delta \varphi$ ,  $\Delta T_{\text{dug}}$ ,  $\Delta p$  og  $\Delta \psi$ . Afhængigheden af de sidste fem parametre er udnyttet ved anvendelse af en to-leddet transportligning, d.v.s. fugttransportkoefficienterne vil ikke være afhængige af disse 5 parametre. Da variationen i niveauet for totaltrykket  $P$  er lille i forhold til totaltrykket, er en evt. afhængighed af det totale trykniveau ikke undersøgt. Da



forsøgene udføres under isobare forhold, kan fugttransportkoefficienternes afhængighed af  $\Delta P$  ikke undersøges, og dette har heller ikke været ønsket.

Det er først og fremmest fugttransportkoefficienterne  $\delta_T$  og  $K_p$  i transportligningen:

$$g = -\delta_T \text{ grad } p - K_p \text{ grad } T$$

der bliver behandlet. Denne ligning er blevet valgt fremfor de to andre:

$$g = -k_T \rho \text{ grad } \psi - K_\psi \text{ grad } T \quad \text{og}$$

$$g = -\delta_\psi \text{ grad } p - k_p \rho \text{ grad } \psi$$

fordi det næsten altid er  $T$  og  $T_{\text{dug}}$  eller  $\varphi$ , der direkte kan måles i det relativt tørre område og dermed via damptrykskurven (fig. 1) bestemme  $p$  med en rimelig nøjagtighed, medens  $\psi$  skal bestemmes ud fra sorptionskurven (fig. 11) via kendskabet til  $\varphi$ , hvilket på grund af hysteresen giver en relativ dårlig bestemmelse af  $\psi$ . For  $T = 15^\circ\text{C}$  og 40% RF fås følgende maksimum-værdier for afvigelserne:

| x      |                  | s(x)           | $\frac{s(x)}{x}$ |                                                      |
|--------|------------------|----------------|------------------|------------------------------------------------------|
| T      | $^\circ\text{C}$ | $\frac{1}{10}$ | 0,7%             |                                                      |
| p      | Pa               | 6              | 0,8%             | for $s(T_{\text{dug}}) = \frac{1}{10}^\circ\text{C}$ |
| p      | Pa               | 12             | 1,6%             | for $s(\varphi) = 1\% \text{ RF}$                    |
| $\psi$ | vol%             | 0,4            | 20%              | beregnet side 22                                     |

I de tilfælde, hvor det er fugtindholdet der kan måles, vil en af de to andre ligninger være at foretrække.

De fundne  $\delta_T$ - og  $K_p$ -værdier kan angives på flere måder, her er følgende to måder tænkt anvendt:

1. En grafisk afbildning af  $\delta_T$  og  $K_p$  som funktion af  $T$  og  $\varphi$  (se fig. 14), hvilket giver en hurtig og tydelig oversigt over variationerne.

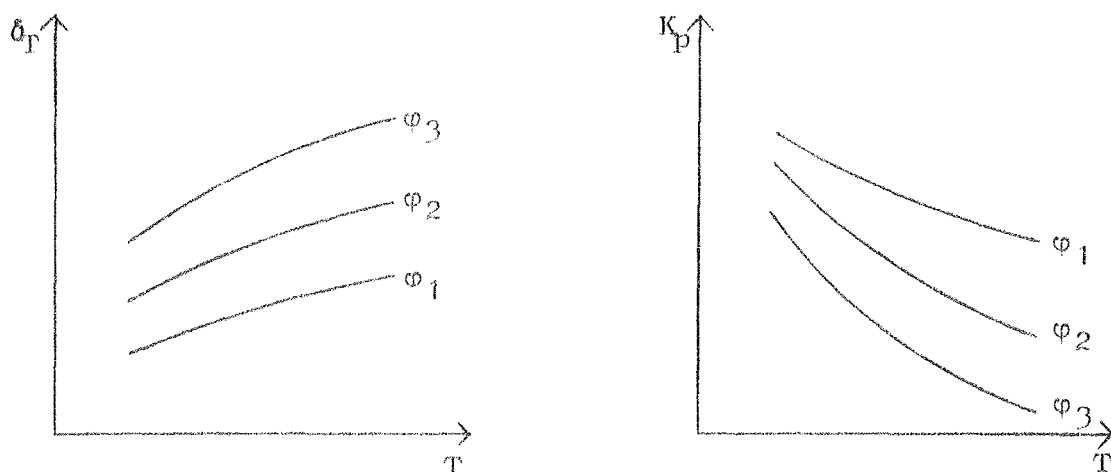


Fig. 14.  $\delta_T$  og  $K_p$  som funktioner af  $T$  og  $\varphi$ , hvor  $T$  og  $\varphi$  er middelværdier for prøven.

$\delta_T$  and  $K_p$  as functions of  $T$  and  $\varphi$ , where  $T$  and  $\varphi$  are the mean values of the specimen.

2. Som ligninger, der findes ved regressionsanalyse, og som kan angives på formen:

$$\delta_T = \alpha_1 + \alpha_2 T + \alpha_3 \varphi + \alpha_4 T^2 + \alpha_5 \varphi^2 + \alpha_6 T \varphi \quad \text{og}$$

$$K_p = \alpha_7 + \alpha_8 T + \alpha_9 \varphi + \alpha_{10} T^2 + \alpha_{11} \varphi^2 + \alpha_{12} T \varphi$$

hvor  $T$  er prøvens middeltemperatur

$\varphi$  er den relative luftfugtighed, der svarer til prøvens middelfugtindhold.

Ligningerne er bekvemme, når man skal bruge  $\delta_T$  og  $K_p$  til EDB-mæssige beregninger, og regressionsanalysen viser også, hvor "god" den fundne kurve er.

Det sekundære formål med forsøgsrækken er at bekræfte de i afsnit 3.3.2. udledte og de i tabel 1 angivne relationer mellem fugttransportkoefficienterne  $\delta_T$ ,  $K_p$ ,  $k_T$ ,  $K_\psi$ ,  $\delta_\psi$  og  $k_p$ .

#### 4.2. Forsøgsområde

Det område af  $T, \varphi$ , indenfor hvilket man kan bestemme fugttransportkoefficienterne, er bestemt af forsøgsopstillingens begrænsninger. Der er to ting, forsøgsopstillingen kræver opfyldt:

1. Dugpunktstemperaturerne skal være positive. Dette medfører, at man ikke kan udføre forsøg ved kombinationer af både lave temperatur- og fugtniveauer. Det er ikke muligt at opstille faste grænser, da disse er afhængige af, hvor store fugt- og temperaturgradienter man vil have over prøven.
2. Der må ikke være steder i forsøgsopstillingen, hvor temperaturen er lavere end dugpunktstemperaturen, da der i så fald vil ske en ukontrolabel kondensation. Dette bevirker, dels at forsøgsopstillingen ikke er egnet til forsøg ved høje relative fugtigheder (da der skal være en fugt- eller en temperaturgradient over prøven, er 75% RF desværre ved at være den øvre grænse), og dels at man ikke kan udføre forsøg ved høje temperaturer, når man har høje relative fugtigheder, da det lokale, hvori forsøget er opstillet, skal have en temperatur, der er højere end dugpunktet, og det kan da blive et spørgsmål om at kunne udholde at udføre forsøget ved de høje temperaturer.

De temperatur- og fugtniveauer, ved hvilke der udføres forsøg, er angivet i fig. 15. Der udføres to forsøg ved de fleste niveauer, men ved nogle niveauer udføres der tre eller fire forsøg.

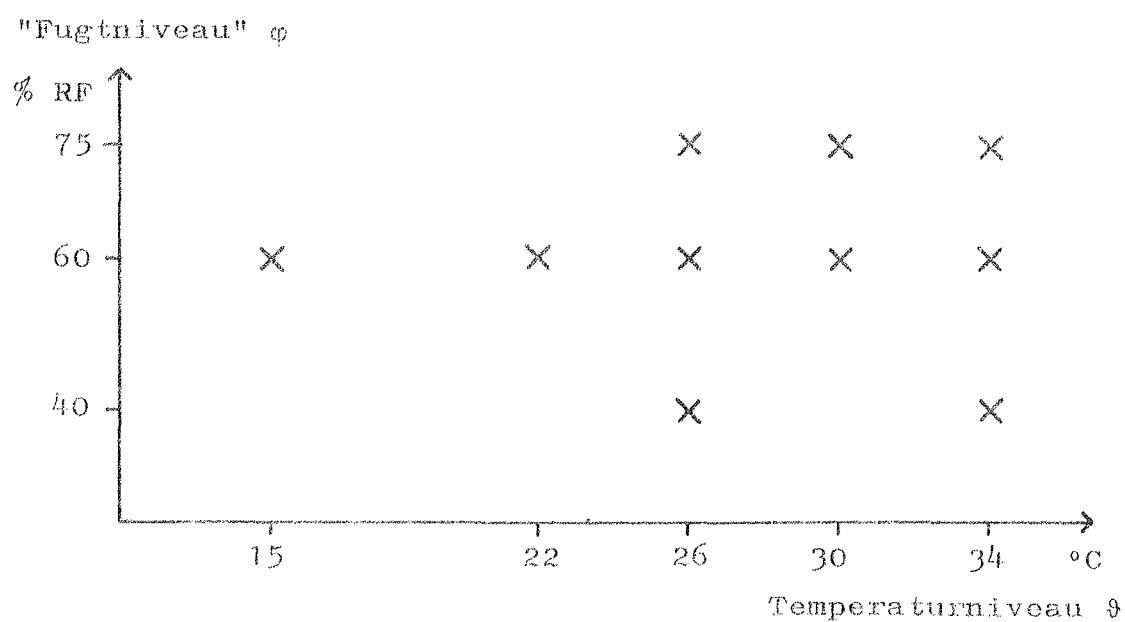


Fig. 15. Temperatur- og fugtniveauer, ved hvilke der udføres forsøg.

The levels of temperature and moisture by which the experiments are carried out.

## 5. PRØVELEGEMER

Som forsøgsmateriale er anvendt gasbeton. Heraf er fremstillet cylindriske prøver med en diameter på ca. 121 mm og en tykkelse på ca. 50 mm (se fig. 16). Der blev udtaget 50 prøver, som var uden revner i overfladen. Prøvernes højde og diameter blev målt, hvorefter tørrumvægten for prøverne blev bestemt ved udtørring i varmeskab ved 105°C. Tørrumvægten var i middel 577 kg/m<sup>3</sup> og varierede fra 564 til 587 kg/m<sup>3</sup>.

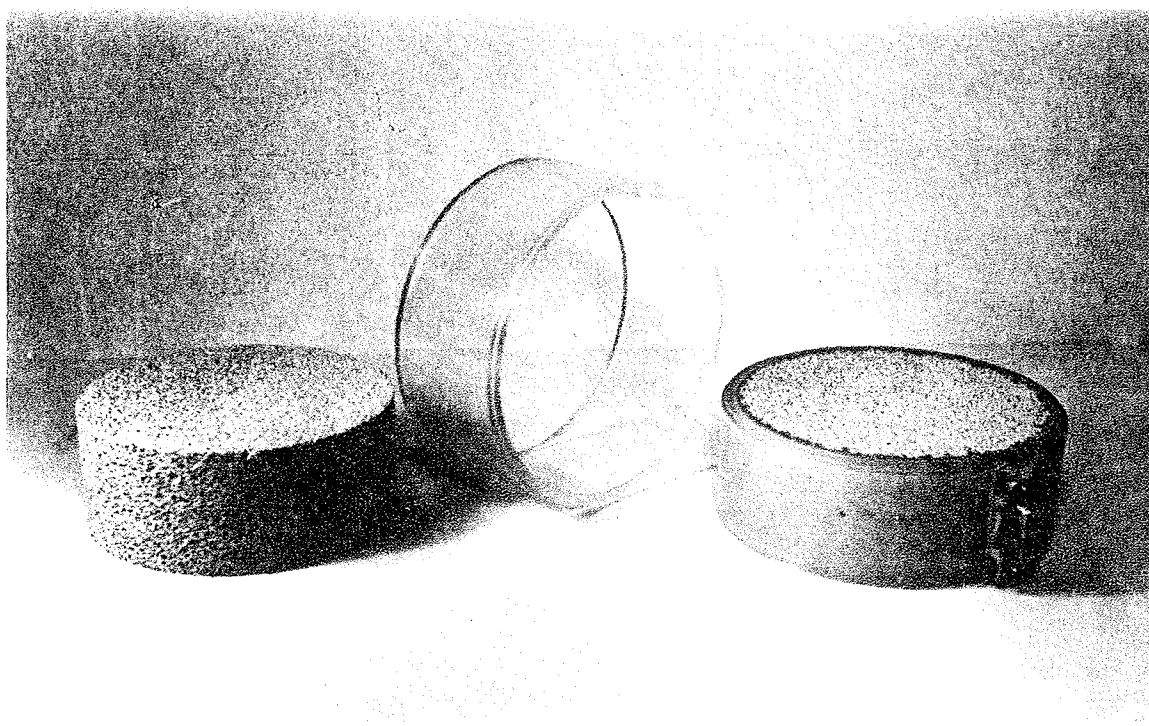


Fig. 16. Gasbetonprøve, plexiglasring og færdigmonteret prøvelegeme.

Specimen of cellular concrete, ring of acryl and the assembled specimen.

For at frasortere de inhomogene prøver blev prøverne målt med laboratoriets gammatransmissionsmåleudstyr, kaldet  $\gamma$ -kanonen.  $\gamma$ -kanonen består af en kilde: 100 mCi Am<sup>241</sup> og en detektor, der måler strålingsintensiteten N.  $\gamma$ -kanonen er beskrevet af

NIELSEN [ ]. Da strålingsintensiteten er proportional med den mængde materiale, strålen passerer, vil større lufthuller eller sten give en ændring i strålingsintensiteten, og prøver med disse inhomogeniteter kan derfor frasorteres. Prøverne blev målt ved 6 forskellige vinkler og i 5 forskellige højder. Et eksempel på målingen af en prøve ses på fig. 17, hvor de til strålingsintensiteterne svarende rumvægte samt middelværdien og standardafvigelsen er indtegnet.

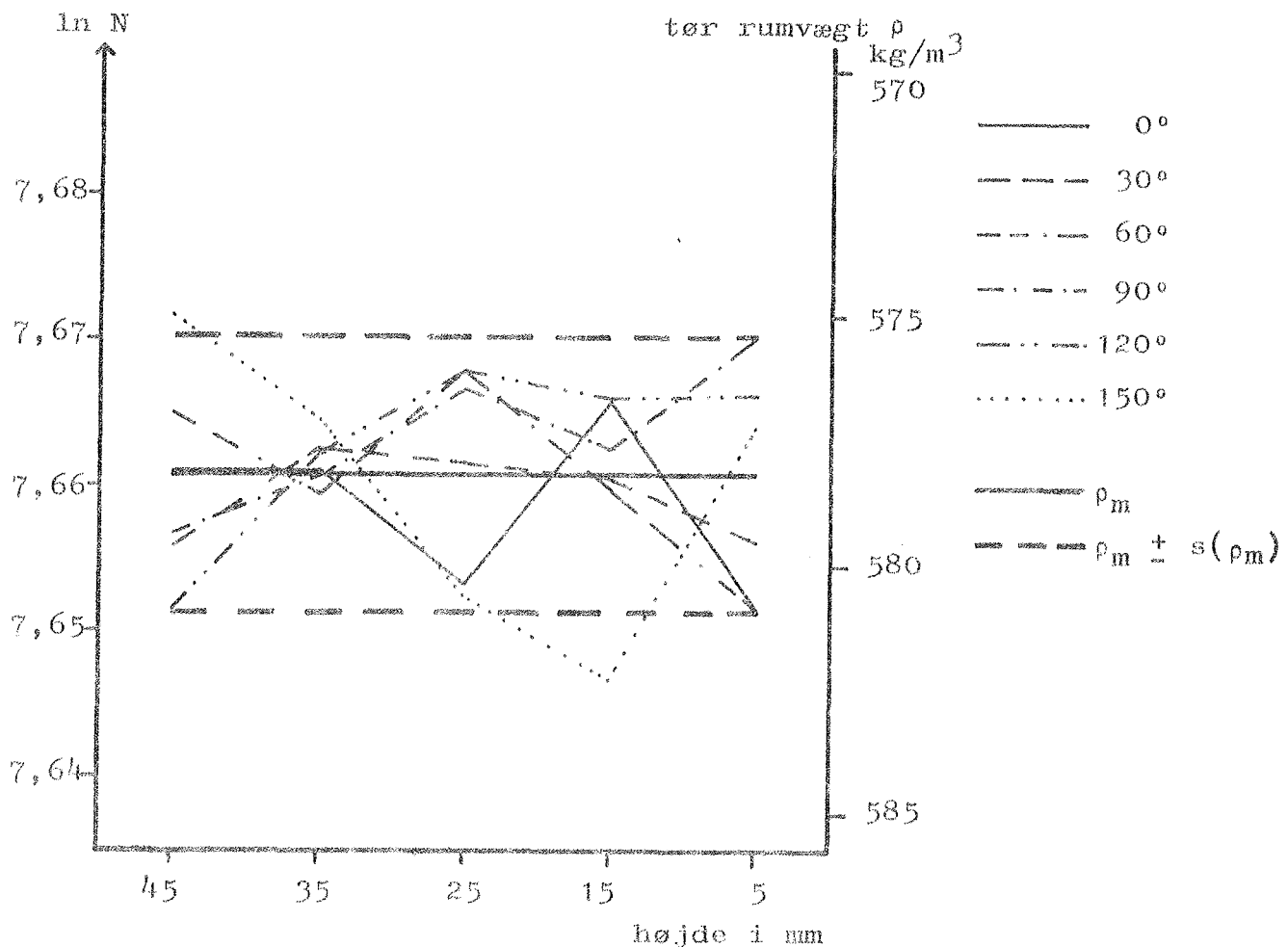


Fig. 17. Variation af intensiteten N for prøvelegeme nr. 131 og den dertil svarende variation i tørrumvægten  $\rho$ .

The variation of the intensity N for specimen No 131 and the corresponding variation in the dry density  $\rho$ .

Til forsøgene er udvalgt de prøver, der har mindst rumvægtsvariation, de valgte prøver har en variation, der er mindre end 10 kg/m<sup>3</sup>.

Prøverne blev derefter limet ind i plexiglasringe (133 x 123 mm), se fig. 16 og 18, og monteret med 5 termoelementer, de yderste 5 mm fra overfladerne, de øvrige med 10 mm's afstand. Termoelementerne er limet i borede 1 mm huller, og de ender i et stik, da prøverne skal kunne fjernes fra forsøgsopstillingen for at vejes.

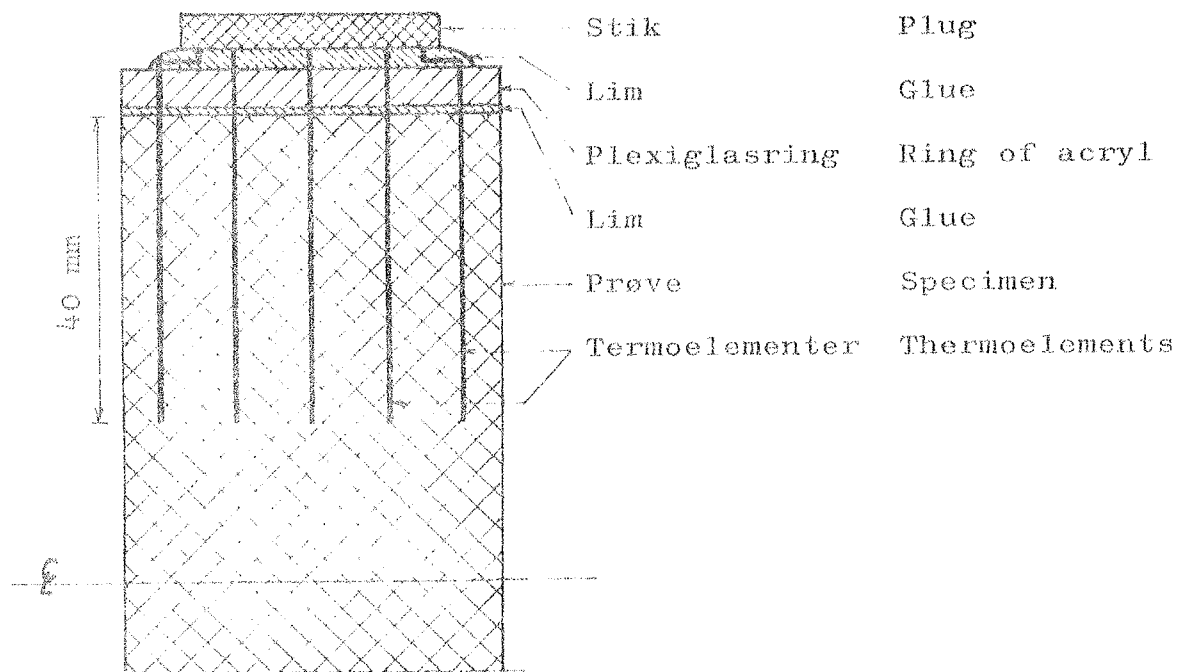


Fig. 18. Færdig-monteret prøvelegeme.  
Assembled specimen.

Prøverne bliver endnu engang målt med  $\gamma$ -kanonen for at finde strålingsintensiteten gennem gasbetonprøve + lim + plexiglasring, idet denne intensitet  $N_0$  skal benyttes til beregning af prøvens fugtindhold ud fra målinger på det "fugtige" prøvelegeme. Prøvens fugtindhold  $\psi$  kan beregnes af følgende ligning:

$$\psi = \frac{\ln N_0 - \ln N}{\mu \times \rho}$$

hvor  $\psi$  er fugtindholdet

$N_0$  er strålingsintensiteten, når der ikke er vand tilstede

$N$  er strålingsintensiteten, når der er vand tilstede

$\mu$  er absorptionskoefficienten for vand

$x$  er prøvens diameter

$\rho$  er vands massefylde



## 6. FORSØGSAPPARATUR

### 6.1. Princip

Forsøgsapparatet består af 6 ens borde (se fig. 19), der hver indeholder 3 prøvelegemer, som bliver udsat for ens klimabetingelser, de tre rum, som prøvelegemerne anbringes i, benævnes henholdsvis A, B og C. Forsøgsapparatet er opstillet i et klimakammer i laboratoriets forsøgshal.

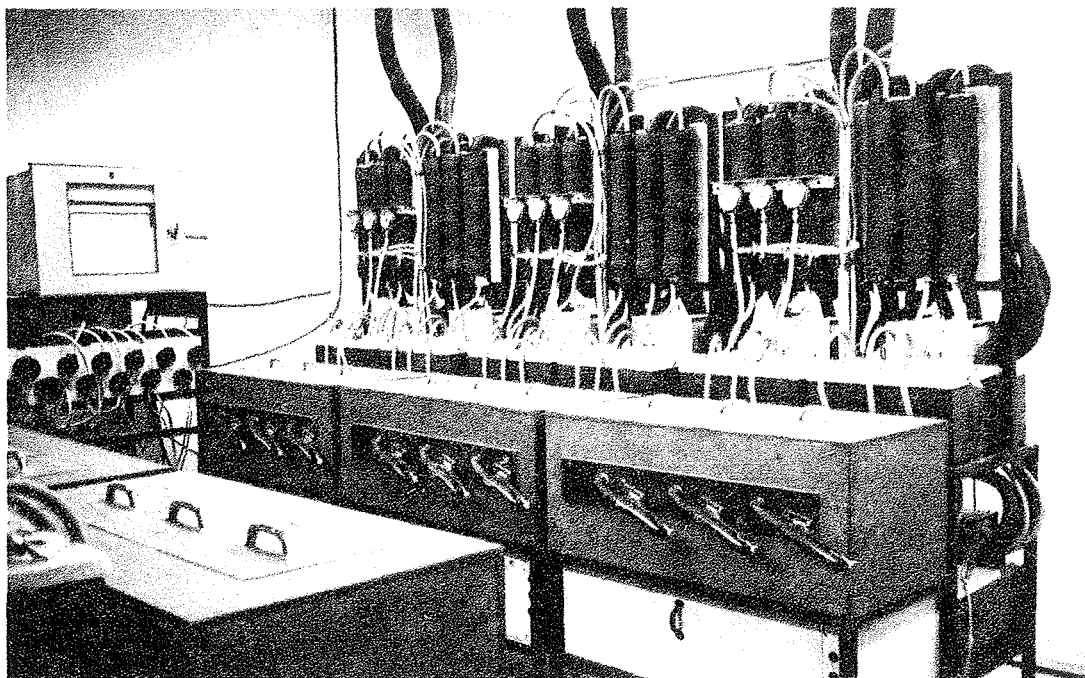


Fig. 19. Forsøgsapparat til bestemmelse af fugttransporten i gasbeton.

General arrangement for the measurement of moisture transfer in cellular concrete.

Princippet i forsøgsopstillingen fremgår af fig. 20. Forsøgsopstillingen er symmetrisk omkring prøvelegemet (1). (2) er en radiator, der sammen med den tilsvarende radiator på den anden side af prøvelegemet holder temperaturfeltet over prøven. Radiatoren bliver forsynet med vand af konstant temperatur fra et termostatbad (3). For at holde det fastlagte fugtindhold i prøven bliver der blæst konditioneret luft forbi prøvens overflade.

Fra spalten mellem prøven og radiatoren går luften til en kølespiral (4), der køles med vand fra termostatbad (5). Luften bobler derefter op igennem vandet i boblekar (6) og bliver her ved mættet med vanddamp, d.v.s. luftens dugpunkt bliver lig med boblekarrets temperatur. (7) er en membranpumpe, der pumper luften rundt i systemet. I varmeveksleren (8) bliver luften tempereret, inden den igen blæses forbi prøvelegemet.

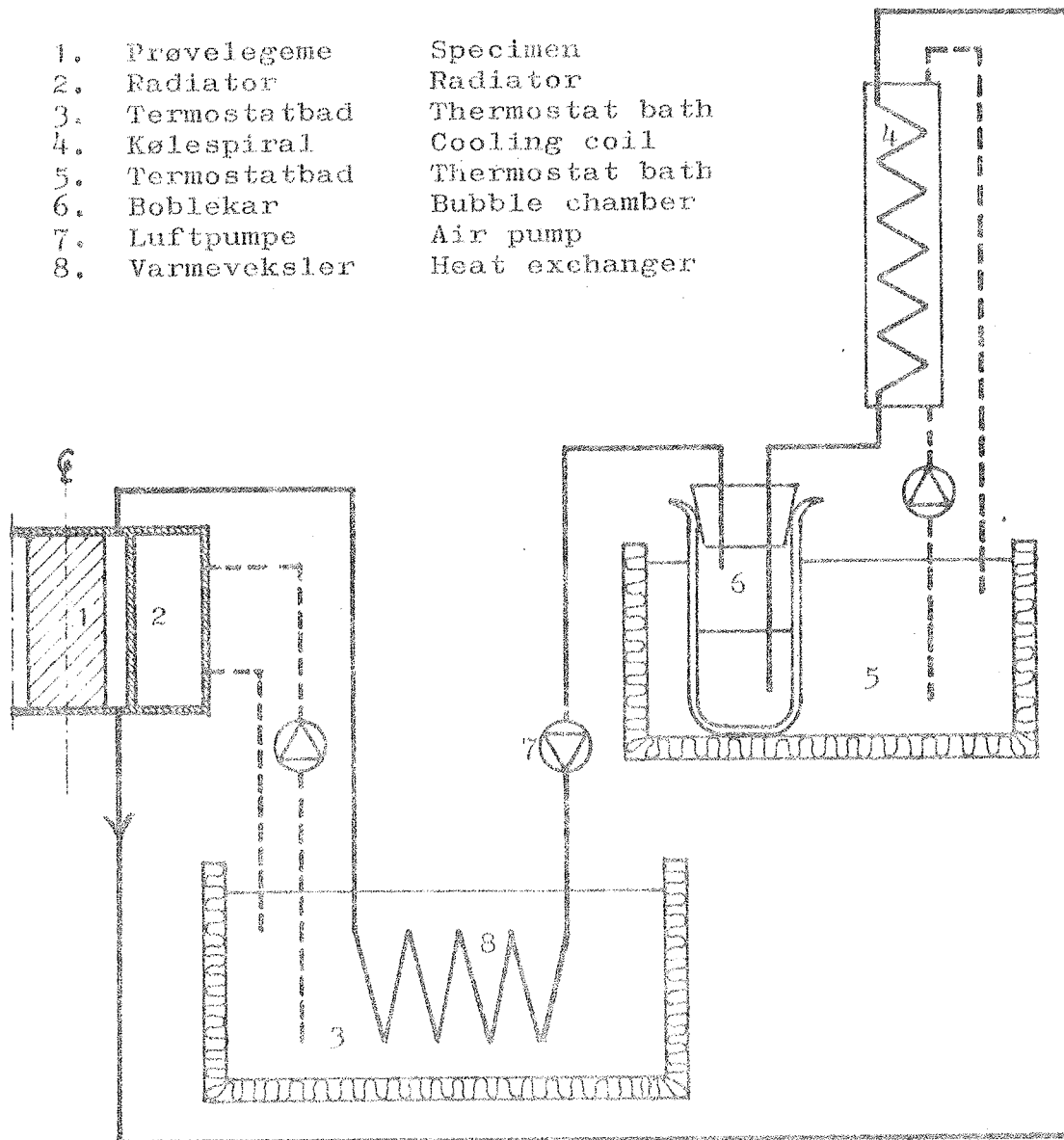


Fig 20. Principdiagram af forsøgsopstilling.  
Principle diagram of test setup.

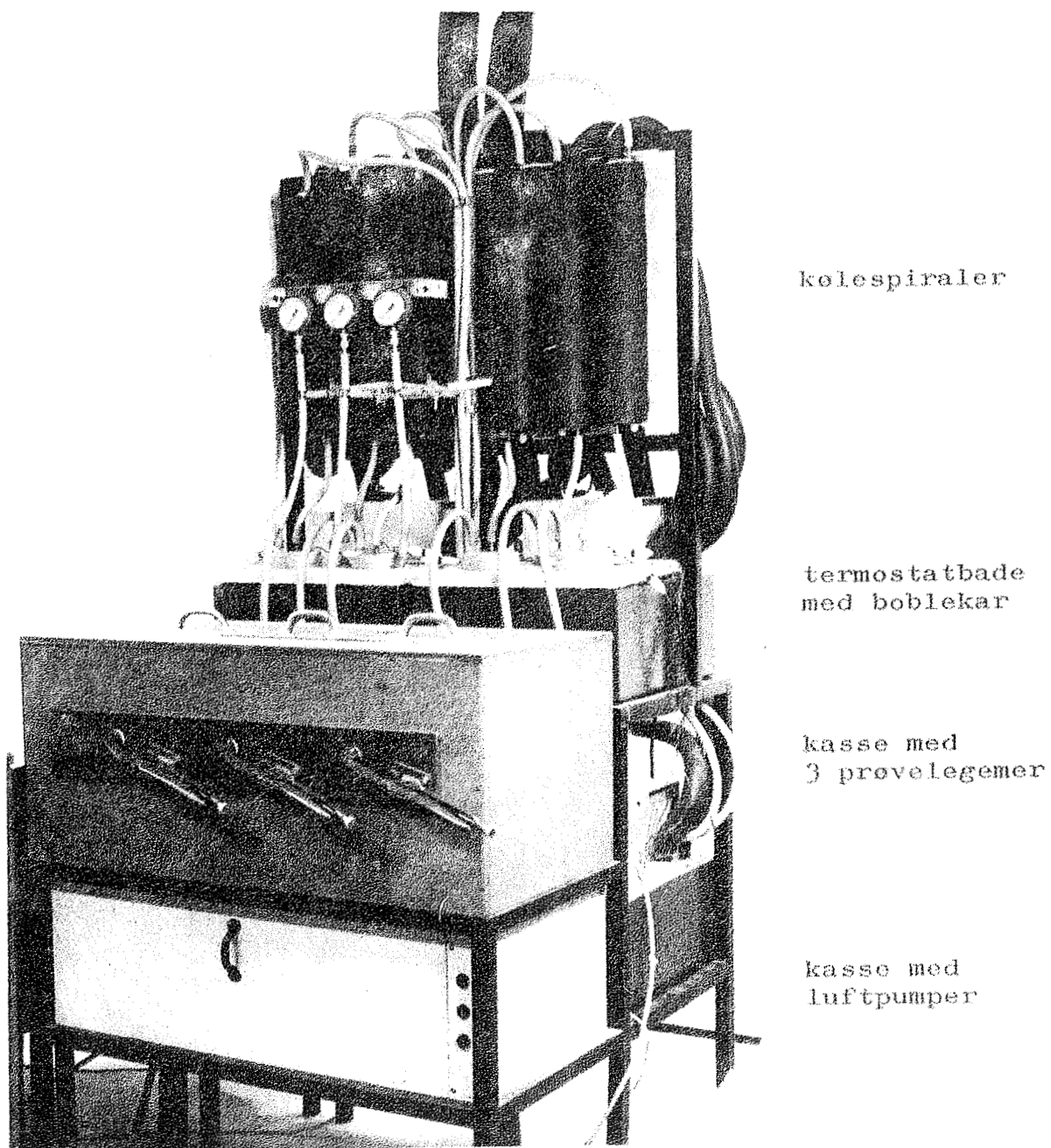


Fig. 21. Forsøgsbord set forfra.

Front view of test setup.

## 6.2. De enkelte komponenter i forsøgsapparatet

### 6.2.1. Prøvelegemets anbringelse

For at få en éndimensional varmetransport gennem prøvelegemet er dette anbragt i en kasse og isoleret med min. 10 cm roofmate, se fig. 21 og 22. Denne isolering giver ved en temperaturforskel mellem prøven og lokalet på  $10^{\circ}\text{C}$  en temperaturforskel mellem prøvens midte og dens kant på  $0,3^{\circ}\text{C}$ , hvilket er beregnet med laboratoriets EDB-program til beregning af to-dimensional varmetransport.

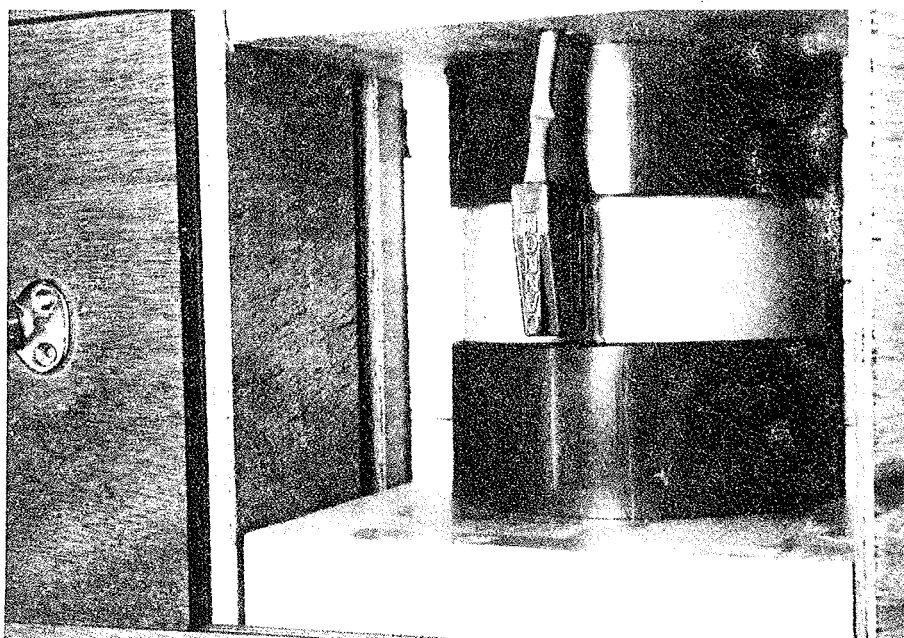


Fig. 22. Prøvelegeme fastspændt mellem PVC-kapperne (set ovenfra).

Specimen mounted in the test setup (seen from above).

Prøvelegemet er spændt fast mellem to PVC-kapper ved hjælp af en gripex-tang, se fig 21 og 22. For at få en tæt samling mellem prøvelegemet og PVC-kappen er der her anbragt en O-ring, se fig. 23.

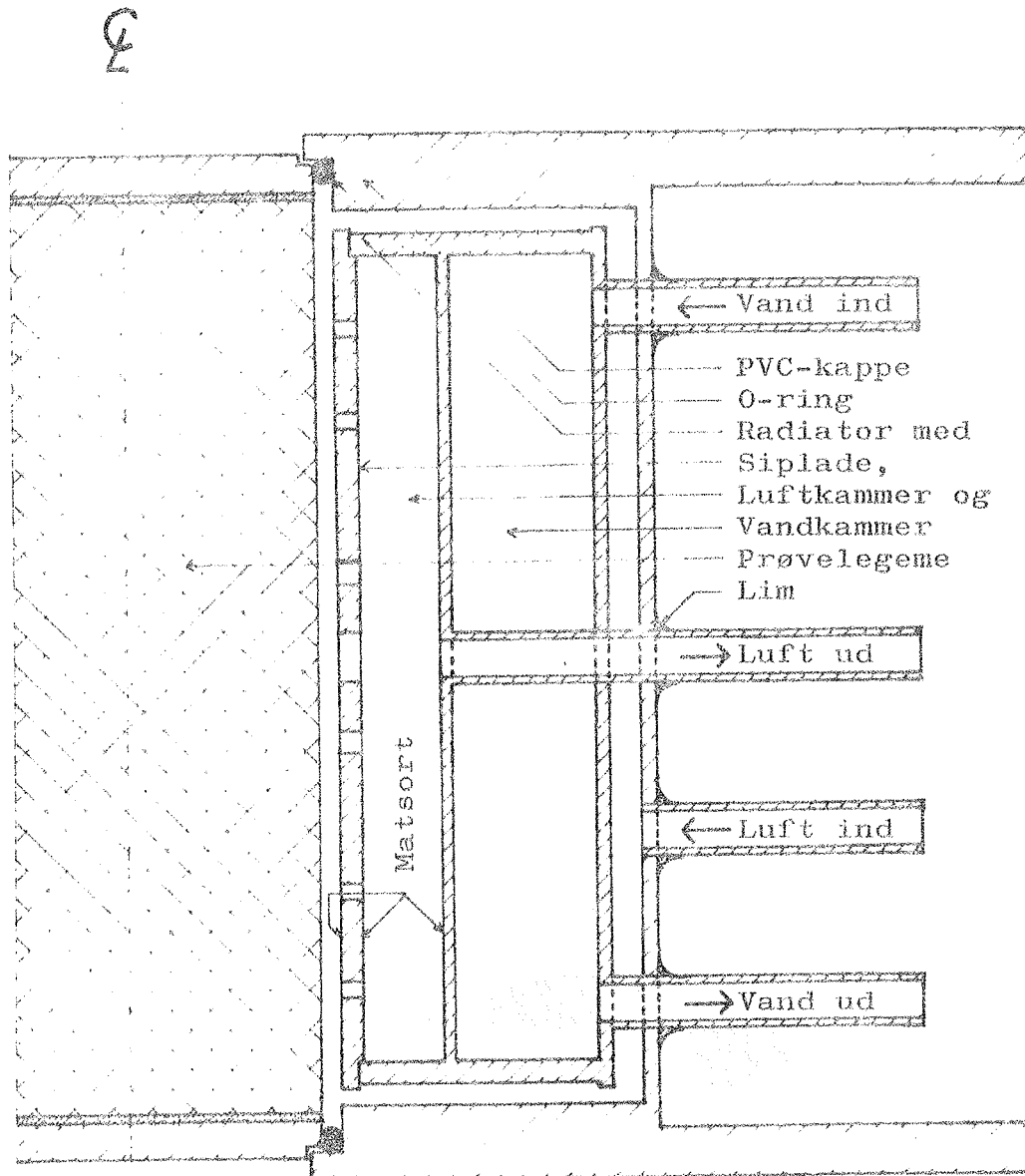


Fig. 23. Samling af prøvelegeme, PVC-kappe og radiator.

Assembling of specimen, PVC-hood and radiator.

#### 6.2.2. Radiatorerne

Radiatorens opbygning med en siplade, et luftkammer og et vandkammer (se. fig. 23) skyldes kravet om at få en "jævn" luftstrøm hen forbi prøvens overflade, d.v.s. dels en luftstrøm, der har samme hastighed i ethvert punkt, og dels en luftstrøm, hvor fugtindholdet varierer meget lidt.

Da prøvelegemet er rotationssymmetrisk, skal luftstrømmen også være det. Dette opnås ved at tage luften ind langs kanten, men hvis al luften skulle ud gennem et hul i midten, ville lufthastigheden stige voldsomt. Dette er baggrunden for sipladen, der er udformet, så man får en rimelig ens hastighed,  $\pm 10\%$  over hele overfladen. Sipladen ses på fig. 24.

For at luftens fugtindhold ikke skal ændre sig mere end  $0,5\%$ , målt i absolut værdi, fra luften passerer prøvens rand til den når prøvens midte, skal der være en luftmængde på ca 600 liter pr. time, idet fugttransporten gennem prøvelegemet ikke overstiger 1 g pr. døgn.

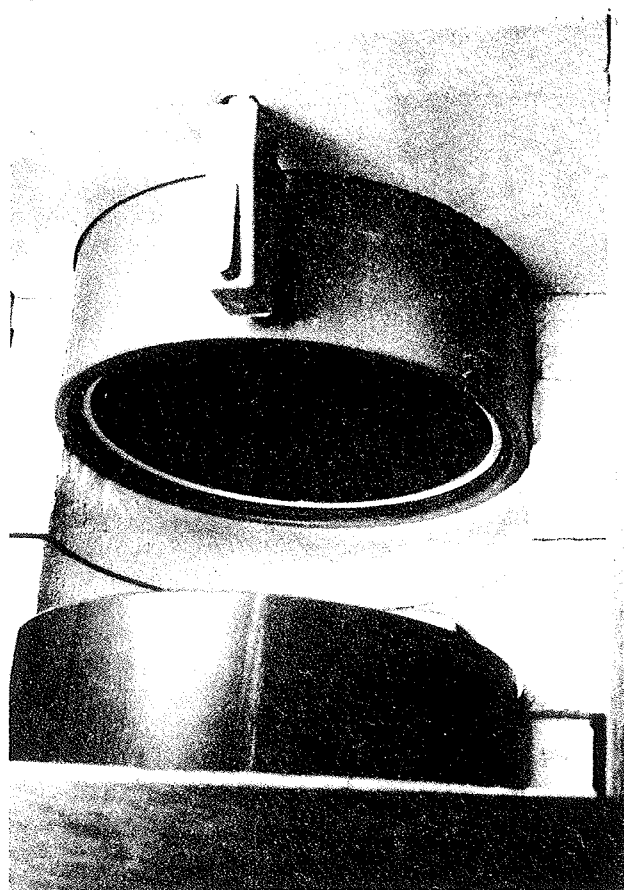


Fig. 24. Radiatorens siplade.

The radiator.

### 5.2.3. Boblekarrene

Ved at boble gennem vandet i boblekarret (se fig. 25) bliver luften mættet med vanddamp, og luftens dugpunkt bliver som før nævnt lig med boblekarrets temperatur. Boblekarrets temperatur bliver målt med et termoelement og registreret på en skriver. Termoelementet ender i et stik, da boblekarret skal kunne fjernes fra forsøgsopstillingen for at blive vejjet. For at få en god blanding af luft og vand og dermed en sikker mætning bliver luften trukket igennem to luftsten. Mætningen er kontrolleret med en spejl-dugpunktsmåler. Det var ikke muligt at konstatere forskelle mellem denne aflæsning og aflæsningen på skriveren, d.v.s. en eventuel fejl er mindre end aflæsningssikkerheden på ca.  $0,1^{\circ}\text{C}$ . For at forhindre, at luftstrømmen på ca. 8 m/s i afgangsrøret skal rive vanddråber med, er der monteret en dråbefanger i boblekarret.

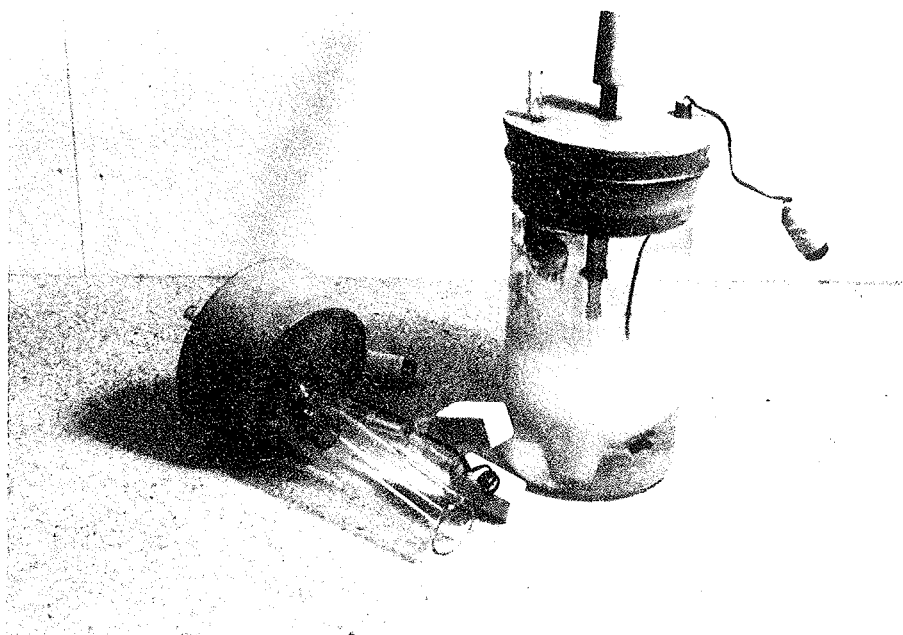


Fig. 25. Boblekar med luftsten, dråbefanger og termoelement.

Bubble chamber with air diffuser, drip-catcher and thermoelement.

Ved forsøg ved lave relative fugtigheder vil den luft, der skal boble igennem vandet, have en væsentlig højere temperatur end vandet, og man kan da ikke forvente at få stabile forhold. Luften bliver derfor først ledet gennem en kølespiral (fig. 20 og 21), som bliver kølet med vand fra det termostatbad, som boblekarret er anbragt i. Da man ikke kan udelukke kondensation i kølespiralen, er forbindelsen fra kølespiralen til boblekarret udført i en blød bue uden lommer, hvori evt. kondensat kunne samle sig, se fig. 21.

Specielt ved høje temperaturer vil der ske en forurening af vandet i boblekarrene, hvilket kan bevirke, at luften ikke får den dugpunktstemperatur, der svarer til boblekarrets temperatur. Boblekarrene bliver derfor med jævne mellemrum vasket og forsynet med nyt vand, som er blevet autoklaveret.

#### 6.2.4. Termostatbadene

Termostatbadene bliver styret af et kontakttermometer, der tilslutter et varmelegeme, når vandet bliver for koldt. Termostatbadene bliver kølet med kølemiddel fra laboratoriets stationære kølekompressor. På fig. 26 ses fordelingssystemet for kølemidlet. I området fra 5°C til 50°C kan en bestemt temperatur fastholdes med en nøjagtighed på  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ .

#### 6.2.5. Luftpumperne

For at få en tæt pumpe blev der valgt en membranpumpe (fig. 27), der yderligere er en tvillingpumpe, d.v.s. to membranventiler, der bliver drevet af en motor, hvilket giver den fordel, at pumperne virker samtidig, så man undgår større trykforskelle over prøvelegemet ved start og stop. Målingen viser, at der kan være en trykforskel  $P$  på 200 Pa ved starten, og efter 15 min er denne trykforskel faldet til maksimalt 5 Pa ( $=0,5 \text{ mmVS}$ ). En trykforskel på 5 Pa giver med et luftgennemslippelighedstal  $b$  på  $0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{m s Pa}$  (fra ADAMSON m.v. [1] tabel 7) et til-læg til fugttransporten på:



$$g = v \cdot c = b \cdot \frac{P}{h} \cdot c = 0,5 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{5}{0,05} \cdot 23 \cdot 10^{-3} = 0,07 \cdot 10^{-7} \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

= 0,6% (ved 30°C og henholdsvis 74 og 44% RF på de to sider og en fugttransport på  $12 \cdot 10^{-7} \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ ).

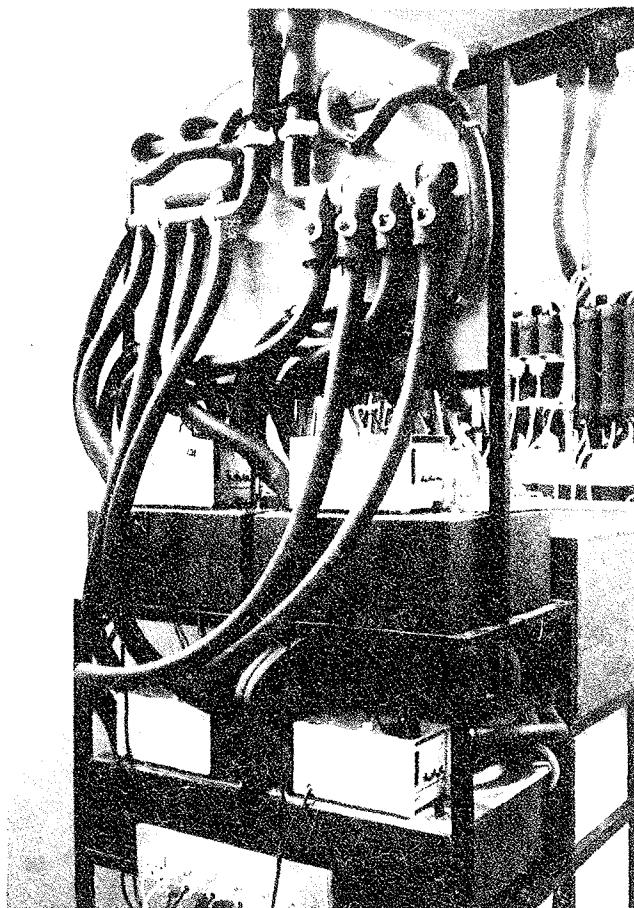


Fig. 26. Forsøgsbord set bagfra.

Rear view of test setup.

Pumpernes gumminembran er fastgjort til stempelstangen med 4 skruer, det viste sig nødvendigt at tætn disse gennemføringer med flydende pakning for at få pumperne helt tætte, tætningen blev kontrolleret ved trykprøvning. Da pumperne støjede meget, blev de fjederophængt i en "akustisk" isoleret kasse (fig. 21 og 27). Kasserne blev kølet med luft fra forsøgshallen, idet temperaturen i forsøgshallen var lavere end i klimakammeret.

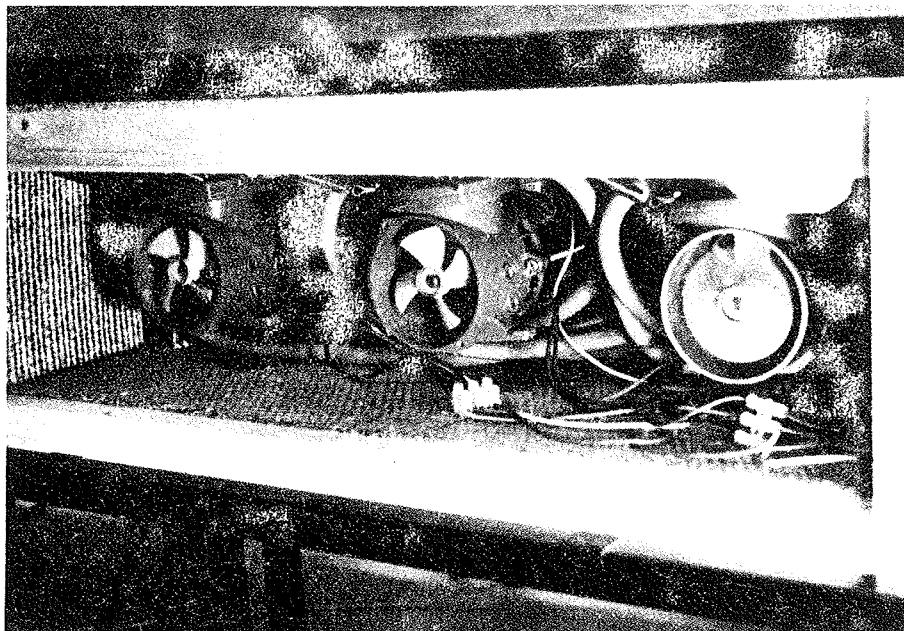


Fig. 27. Luftpumper i "akustisk" isoleret kasse.

Air pumps in an "acoustic" insulated box.

#### 6.2.6. Systemets lufttæthed

Det er ret svært at få anbragt prøvelegemet rigtigt i forsøgsopstillingen, og et skævt anbragt prøvelegeme giver en meget stor luftutæthed, hvorved der bliver tilført systemet luft med et andet fugtindhold end det, der er i systemet. Dette vil man umiddelbart konstatere næste gang man vejer, idet der da vil være forsvundet meget store fugtmængder fra systemet. Denne vejning kan så ikke benyttes. Dette er i sig selv ikke særlig væsentlig, men prøvelegemet bliver også bragt ud af ligevægt, og der kan gå lang tid, før det igen er i ligevægt.

For at sikre at systemet bliver samlet tæt efter hver vejning, bliver det hver gang trykprøvet. Hvis systemet kan pumpes op til et tryk på  $2 \cdot 10^4$  Pa (= 0,2 atm.), fig. 28, (prøven skal ikke sidde meget skævt, før systemet slet ikke kan pumpes op), og trykket kun falder til  $1 \cdot 10^4$  Pa i løbet af ca. 10 sec, er systemet tilstrækkeligt tæt. Grunden til, at trykket i det hele taget falder, er, at kun den ene side af systemet pumpes op, og

der sker derefter en trykudjævning mellem de to sider ved luftstrømning gennem prøvelegemet. Når man sætter et lufttæt prøvelegeme i istedetfor gasbetonprøvelegemet, falder trykket ikke i løbet af de 10 sec. Prøvningen er derfor kun en garanti for tætheden på den ene side, men hvis - hvad der er ret utænkeligt - prøvelegemet skulle være monteret tæt i den ene og ikke i den anden side, ville den næstfølgende vejning afsløre dette.

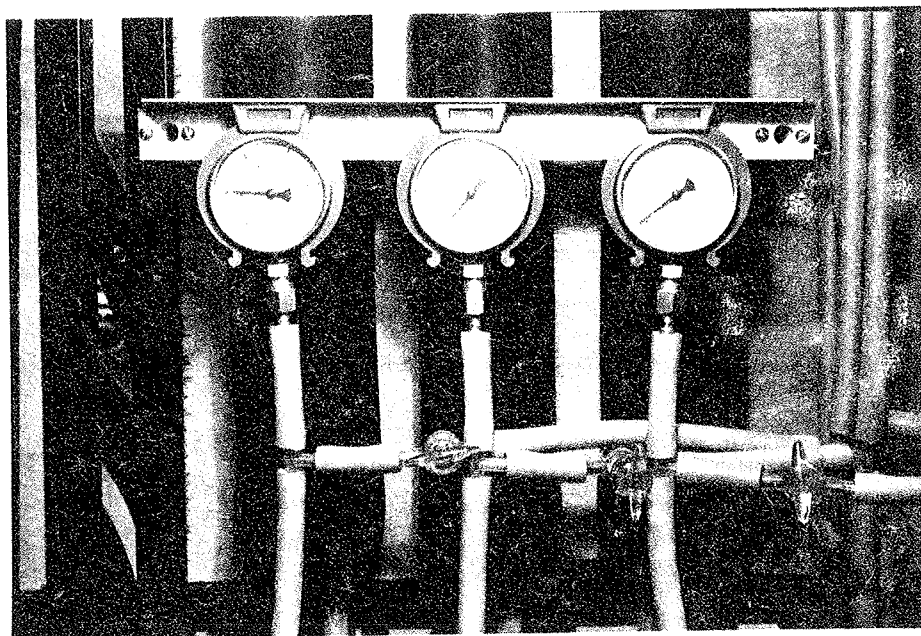


Fig. 28. Manometre til trykprøvning.

Manometers for pressure test.

Af andre større utætheder kunne man tænke sig en slange, der ikke var monteret rigtigt eller havde arbejdet sig løs, men dette ville blive konstateret ved trykprøvningen eller vejningen. Utætheder, der ikke vil blive afsløret ved trykprøvningen eller ved vejningen, er større konstante utætheder på den side, der ikke trykprøves, f. eks. en grat på en slangestuds, så slangen ikke slutter helt tæt. Men da der udføres tre forskellige forsøg ved hvert niveau, vil det resultat, der er beregnet ud

fra værdierne fra det utætte forsøg, give et væsentligt andet resultat end de andre to, hvorved lækagen opdages.

De mindre lufttætheder, der evt. kan være, og som vil være nogenlunde lige store i de to sider, vil give en fugttransport, der kan behandles på samme måde som den fugtdiffusion, der sker igennem slangerne. Denne diffusion er behandlet i afsnit 8.1.

## 7. UDFØRELSE AF FORSØG

Prøvelegemets forsøgsbetingelser er bestemt ved fastlæggelse af 4 temperaturer: de to overfladetemperaturer og de to dugpunktstemperaturer. Disse temperaturer bliver målt med termoelementer og registreret på en skriver. De fire termostatbades temperatur bliver reguleret indtil:

1. temperaturerne i boblekarrene er lig med de ønskede dugpunktstemperaturer.
2. overfladerne har de ønskede værdier. Overfladetemperaturerne findes grafisk ud fra de 5 temperaturer, der måles med termoelementerne i prøvelegemet.

Når prøvelegemet således er blevet påført de rigtige forsøgsbetingelser, bliver det vejjet med et par dages mellemrum, indtil det ikke viser væsentlige vægtændringer, hvilket er ensbetydende med, at det er i fugtmæssig ligevægt med omgivelserne (fig. 29). For at få så lille en fugtudveksling mellem prøvelegemet og omgivelserne ved vejningen som muligt bliver der lagt et plexiglaslåg på hver side af prøvelegemet. Indstillingsperioden strækker sig over 1-6 uger, hvorefter den egentlige måleperiode kan begynde.

I den egentlige måleperiode bliver der også vejjet med 2-3 dages mellemrum, men nu er det både prøvelegemet samt dets tilhørende to boblekar, der bliver vejjet, fig. 29. Af disse vejninger fås følgende: den fugtmængde, der forsvinder fra det varmeste boblekar, den fugtmængde, der optages i det koldeste boblekar, samt den fugtændring, der sker i prøvelegemet; det sidste er de små uundgåelige variationer, der sker på grund af variationer i temperaturerne. Ved at lægge disse fugtmængder sammen fås den fugtmængde,  $\Delta m$ , der (som regel) forsvinder fra systemet (fig. 30). Måleperioden strækker sig som regel over 8-10 uforstyrrede målinger.

I begyndelsen og slutningen af måleperioden samt ca. midt i denne bliver prøvelegemets samt boblekarrenes temperaturer aflæst, og prøvens fugtfordeling bliver målt med gammatransmissionsmåleud-

styret (fig. 31). Man får herved en kontrol af, at prøven virkelig er i fugtligevægt, idet man kunne tænke sig, at der skete en ændring af fugtfordelingen i prøven, uden at der skete en ændring af det samlede fugtindhold, som jo bliver kontrolleret ved vejningen (fig. 32).

|       |     |                                |       |
|-------|-----|--------------------------------|-------|
| BORD  | 3   | MIDDELTEMPERATUR               | 30 °C |
| RUM   | A   | MIDDEL RF                      | 60 %  |
| PRØVE | 102 | TEMPERATURDIFFERENS OVER PRØVE | 10 °C |

$$\Delta \psi = 0$$

| DATO     | KL.              | TIDS-<br>PUNKT | VARM<br>BOBLEKAR | PRØVE-<br>LEGENE | KOLD<br>BOBLEKAR | KOMMENTAR                                  |
|----------|------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|--------------------------------------------|
|          |                  | h              | g                | g                | g                |                                            |
| 16 10 72 |                  |                |                  | 618,32           |                  |                                            |
| 18 10 72 |                  |                |                  | 618,31           |                  |                                            |
| 20 10 72 |                  |                |                  | 618,35           |                  |                                            |
| 23 10 72 | 14 <sup>15</sup> | 6119,30        | 668,13           | 618,35           | 666,21           | 8. måling                                  |
| 27 10 72 | 9 <sup>00</sup>  | 6210,55        | 662,92           | 618,23           | 671,63           | slut påstand af state-<br>fugt, holdt fast |
| 30 10 72 | 9 <sup>15</sup>  | 6332,70        | 658,35           | 618,23           | 675,55           |                                            |
| 6 11 72  | 13 <sup>30</sup> | 6506,45        | 648,17           | 618,38           | 684,97           |                                            |
| 10 11 72 | 16 <sup>15</sup> | 6602,95        | 642,17           | 618,35           | 690,11           |                                            |
| 14 11 72 | 13 <sup>00</sup> | 6695,90        | 636,39           | 618,38           | 695,08           |                                            |
| 17 11 72 | 9 <sup>15</sup>  | 6764,15        | 632,91           | 618,42           | 698,74           | 8. måling                                  |
| -        | 13 <sup>00</sup> | 6761,90        | 627,80           | 618,35           | 697,68           | slut påstand af state-<br>fugt, holdt fast |
| 20 11 72 | 12 <sup>45</sup> | 6839,60        | 626,14           | 618,37           | 699,76           | 8. måling                                  |
| 23 11 72 |                  |                |                  | 618,35           |                  | slut påstand                               |

Fig. 29. Eksempel på vejejournal.

Example of weighing journal.

|       |     |                                |       |
|-------|-----|--------------------------------|-------|
| BORD  | 3   | MIDDELTEMPERATUR               | 30 °C |
| RUM   | 9   | MIDDEL RF                      | 60 %  |
| PRØVE | 102 | TEMPERATURDIFFERENS OVER PRØVE | 10 °C |

$$\Delta \psi = 0$$

| dato     | $\Delta t$<br>h | Varm boblekar   |                              | Prøvelegeme     |                              | Kold boblekar   |                              | $\Sigma \Delta m$<br>g |
|----------|-----------------|-----------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------|
|          |                 | $\Delta m$<br>g | $\Delta m / \Delta t$<br>g/h | $\Delta m$<br>g | $\Delta m / \Delta t$<br>g/h | $\Delta m$<br>g | $\Delta m / \Delta t$<br>g/h |                        |
| 27/10/72 | 91,35           | -5,81           |                              | -0,12           | -0,0013                      | +5,37           |                              | -0,56                  |
| 30/10/72 | 72,15           | -4,57           | -0,0633                      | 0               | 0                            | +3,92           | +0,0542                      | -0,65                  |
| 6/11/72  | 113,75          | -10,18          | -0,0888                      | +0,08           | +0,0008                      | +9,42           | +0,0542                      | -0,68                  |
| 10/11/72 | 96,50           | -6,00           | -0,0618                      | +0,04           | +0,0004                      | +5,74           | +0,0533                      | -0,82                  |
| 14/11/72 | 92,95           | -5,78           | -0,0619                      | +0,03           | +0,0003                      | +4,97           | +0,0535                      | -0,78                  |
| 17/11/72 | 68,25           | -4,08           | -0,0602                      | +0,04           | +0,0006                      | +3,66           | +0,0536                      | -0,38                  |
| 20/11/72 | 71,70           | -4,66           | -0,0660                      | -0,01           | -0,0001                      | +4,08           | +0,0568                      | -0,59                  |
|          |                 |                 |                              |                 |                              |                 |                              |                        |
|          |                 |                 | -0,0616                      | +0,0010         |                              |                 | +0,0543                      | +0,0005                |
|          |                 |                 |                              |                 |                              |                 |                              |                        |

Fig. 30. Eksempel på beregning af de fugtmængder,  $G_v$  og  $G_k$ , der pr. tidsenhed forsvinder fra det varme boblekar og optages i det kolde.

Example of calculation of the moisture,  $G_v$  and  $G_k$ , which per time unit disappears from the warm bubble-chamber and is taken up in the cold bubble-chamber.

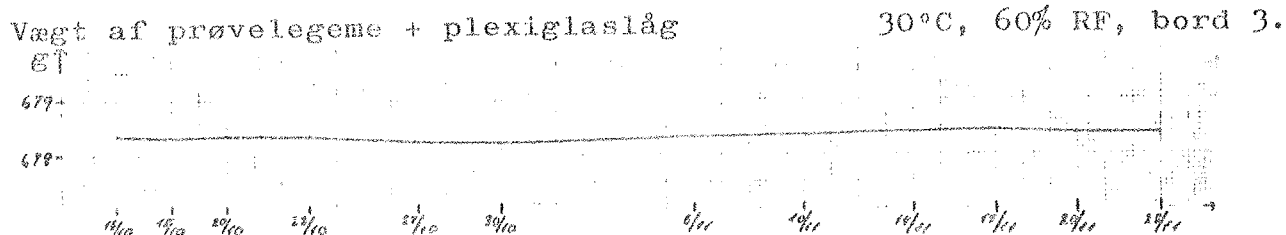


Fig. 32. Eksempel på fugtindholdet i prøven, fundet ved vejning.

Example of the moisture content in the specimen, found by weighing.

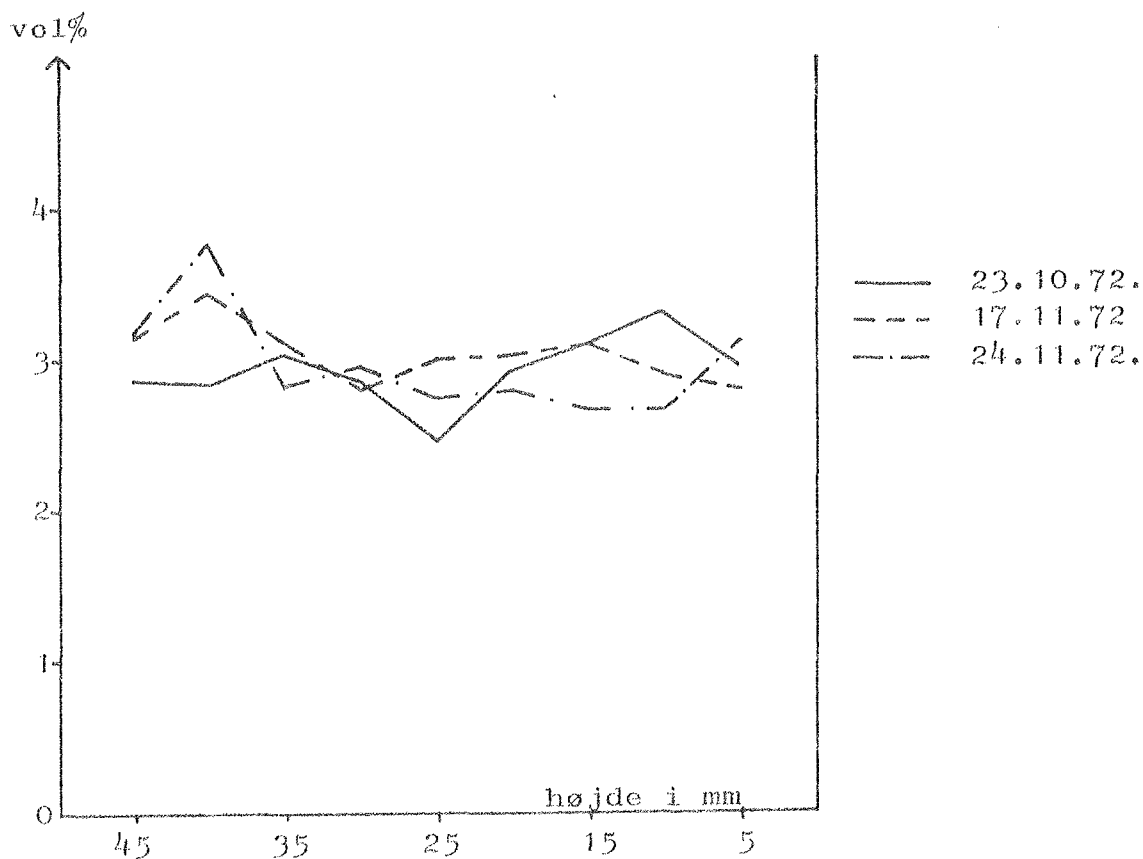


Fig. 31. Eksempel på  $\gamma$ -måling af fugtfordelingen i prøvelegeme nr. 102.

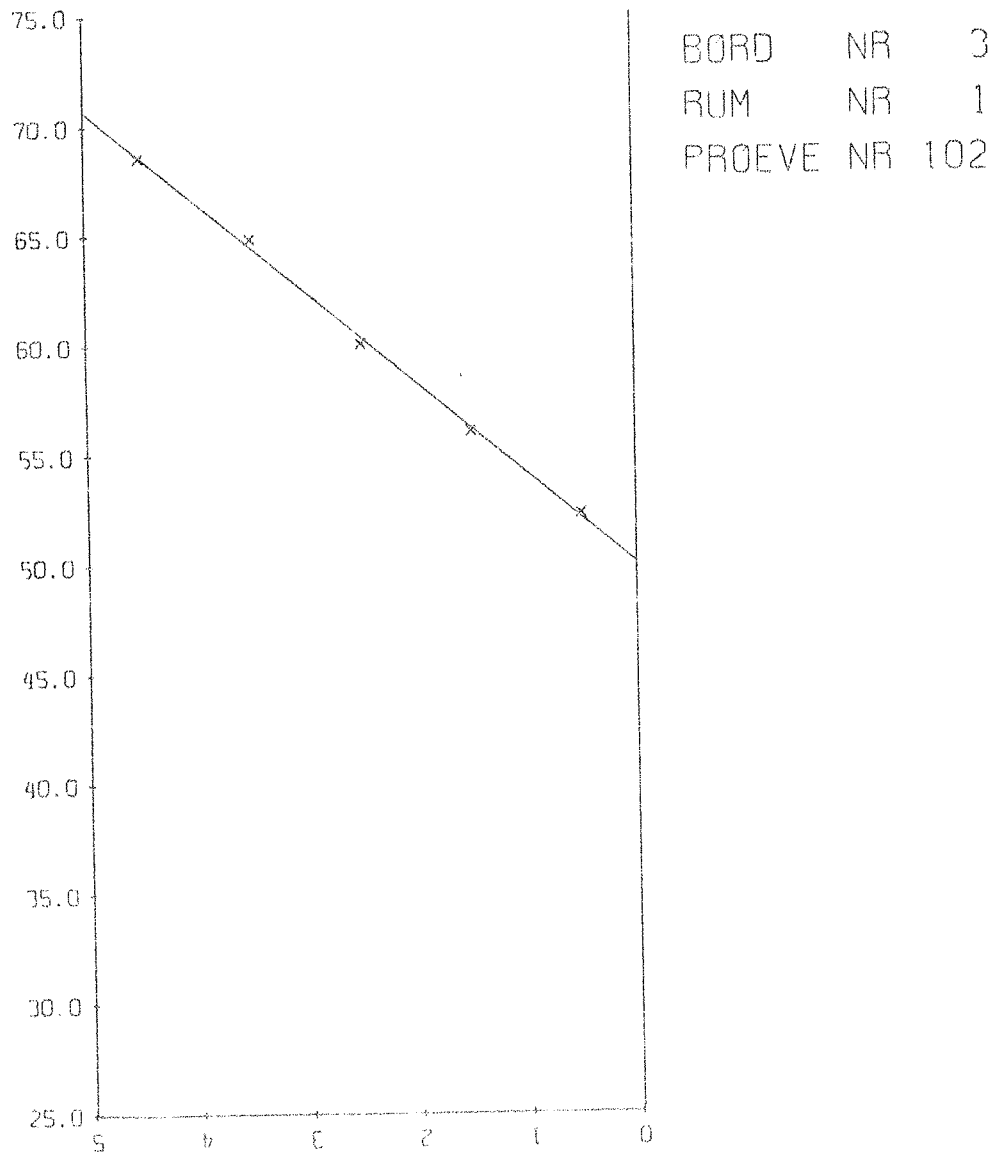
Example of  $\gamma$ -measurement of the moisture distribution in specimen no. 102.

Måleperioden forløber ikke altid i sammenhæng, idet diverse tekniske svigt (el-forsyning, køling) kan bringe prøven ud af ligevægt, så man må vente, til prøven er i ligevægt igen og så fortsætte med de egentlige målinger.

Ud fra de aflæste temperaturer i prøvelegemet beregnes overfladetemperaturerne (bedste tilnærmede rette linie, beregnet med EDB-program, ud fra krav om minimum for summen af kvadraterne på afvigelserne, fig. 33).



TEMPERATURNIVEAU = 30.0 DEG C  
FUGTINDHOLDSNIVEAU = 60.0 % RF



TEMPERATURFORDDELING I PROEVE ANGIVET  
I ANTAL STREGER I 2 MV OMRÅDET

Fig. 33. Eksempel på bestemmelse af prøvelegemets overfladetemperaturer.

Example of the determination of the surface temperatures of the specimen.

De til overflade- og dugpunktstemperaturer hørende mætningsdamptryk aflæses i damptrykstabellen. Heraf fås de til overfladetemperaturerne svarende relative fugtigheder, og af sorptionskurven kan man endelig finde fugtindholdet i overfladelagene. Af disse værdier samt prøvens tykkelse har man umiddelbart grad T, grad p og grad  $\psi$ , fig. 34, usikkerhederne på de enkelte værdier er beregnet på side 75.

|       |        |                   |        |
|-------|--------|-------------------|--------|
| 30 °C | 10 %RF | $\Delta \psi = 0$ | Bord 3 |
|-------|--------|-------------------|--------|

| Rum                         |                                     | A                |                | B                |                | C                |                |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| Prove                       | nr                                  | 102              |                | 117              |                | 136              |                |
| Areal                       | cm <sup>2</sup>                     | 115,22           |                | 115,28           |                | 115,41           |                |
| Højde                       | mm                                  | 50,2             |                | 50,48            |                | 50,2             |                |
| Overflade                   |                                     | varm             | kold           | varm             | kold           | varm             | kold           |
| Temperatur                  | °C                                  | 15,2             | 25,1           | 15,0             | 25,4           | 17,8             | 25,1           |
| $\Delta T$                  | °K                                  | 10,1             |                | 9,6              |                | 9,7              |                |
| grad T                      | °K/m                                | 201              |                | 190              |                | 193              |                |
| Dugpunkt                    | °C                                  | 25,1             | 15,7           | 25,7             | 16,1           | 25,7             | 16,2           |
| Damptryk                    | N/m <sup>2</sup> = Pa               | 3302             | 1783           | 3302             | 1829           | 3302             | 1841           |
| $\Delta p$                  | N/m <sup>2</sup> = Pa               | 1519             |                | 1473             |                | 1461             |                |
| grad p                      | N/m <sup>3</sup> = Pa/m             | 30259            |                | 29480            |                | 29164            |                |
| Mætningstryk                | N/m <sup>2</sup>                    | 5686             | 3186           | 5624             | 3243           | 5662             | 3156           |
| Relativ fugtighed/ $\phi$   |                                     | 0,581 / 0,0211   | 0,560 / 0,0209 | 0,587 / 0,0212   | 0,569 / 0,0209 | 0,583 / 0,0211   | 0,578 / 0,0210 |
| $\Delta \phi$               |                                     | 0,0002           |                | 0,0003           |                | 0,0004           |                |
| grad $\psi$                 | m <sup>-1</sup>                     | 0,004            |                | 0,006            |                | 0,007            |                |
| Måleperiode                 |                                     | 27.10 - 10.11.72 |                | 27.10 - 20.11.72 |                | 27.10 - 20.11.72 |                |
| Fugttransport ( $G_v/G_k$ ) | g/h                                 | 0,0616           | 0,0542         | 0,0575           | 0,0493         | 0,0656           | 0,0582         |
| Standardafvigelse           | g/h                                 | 0,0010           | 0,0005         | 0,0009           | 0,0006         | 0,0009           | 0,0006         |
| Fugtstrøm                   | $\cdot 10^{-7}$ kg/m <sup>2</sup> s | 14,85            | 13,07          | 13,93            | 11,88          | 15,79            | 14,01          |

Fig. 34. Eksempel på beregning af grad T, grad p, grad  $\psi$  og fugtstrømmene  $g_v$  og  $g_k$ .

Example of calculating grad T, grad p, grad  $\psi$  and the density of the moisture flow rates  $g_v$  and  $g_k$ .

## 8. BEREGNINGER

### 8.1. Beregning af fugtstrømmen $g$

Fugtstrømmen  $g$  er den fugtmængde, der pr. tids- og arealenhed "strømmer" gennem prøvelegemet i ligevægtstilstanden.  $g$  er lig med  $\frac{G}{A}$ , hvor  $G$  er den fugtmængde, der pr. tidsenhed "strømmer" gennem prøvelegemet, og  $A$  er prøvens tværsnitsareal.

Man kan ikke direkte veje sig til  $G$ , da der skal foretages nogle korrektioner, som nedenfor nævnt, for at beregne en slags middelværdi  $G_m$ .

Inden den egentlige beregning af  $G_m$  foretages, indregner man den fugtændring, der sker i prøvelegemet i boblekarrenes vægtændring. En evt. fugtstigning i prøvelegemet bliver trukket fra den fugtmængde, der forsvinder fra det varme boblekar, da denne fugtmængde ikke bliver transporteret igennem prøvelegemet. Et evt. fugtfald i prøvelegemet bliver trukket fra den fugtmængde, der optages i det kolde boblekar, idet denne fugtmængde ikke har været transporteret igennem prøvelegemet.

Til de videre beregninger benyttes middelværdierne af henholdsvis den fugtmængde,  $G_v = G_1$ , der forsvinder fra det varme boblekar, og den fugtmængde,  $G_k = G_7$ , der optages i det kolde boblekar, se fig. 32, 35 og 37.

$G_v$  er ikke lig med  $G_k$ , idet systemet ikke er helt tæt, og der derfor sker en fugtudveksling mellem systemets indre atmosfære og omgivelserne. Ved de fleste af forsøgene sker der en fugttransport, der på begge sider af prøvelegemet går fra systemet til omgivelserne som vist på fig. 35.

Den fugtmængde,  $G_4$ , der diffunderer gennem prøvelegemets sider (og som kan være positiv eller negativ), kan man se bort fra, idet  $G_4$  er mindre end usikkerhederne på de øvrige  $G$ 'er. BARRIE og PLATT [7] har ved måling på en 0,2 mm plexiglas-folie fundet en diffusionskoefficient på  $1,6 \cdot 10^{-14}$  kg/m s Pa, og ved forsøg med en plexiglasbeholder med en vægtykkelse på 5 mm har jeg fundet en diffusionskoefficient på  $2 \cdot 10^{-14}$  kg/m s Pa. Dette giver en diffusion gennem prøvelegemets sider på 0,0001 g/h ved en damptryksforskel på 3000 Pa, den maksimale damptryksforskel ved forsøgene har været 3040 Pa.

Usikkerhederne på de i fig. 34 beregnede værdier:

|                |                                                            |                                                                                                                        |                                   |
|----------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Diameter       | $s(d) = 0,5 \text{ mm}$                                    | $\frac{s(d)}{d} = \frac{0,5}{121} = 0,004$                                                                             |                                   |
| Areal          |                                                            | $\frac{s(A)}{A} = \sqrt{2} \frac{s(d)}{d} = 0,006$                                                                     | $s(A) = 0,7 \text{ cm}^2$         |
| Højde          | $s(h) = 0,05 \text{ mm}$                                   | $\frac{s(h)}{h} = \frac{0,05}{50,2} = 0,001$                                                                           |                                   |
| Temperatur     | $s(\vartheta) = 0,1^\circ\text{C}$                         |                                                                                                                        |                                   |
| $\Delta T$     | $s(\Delta T) = \sqrt{2} s(\vartheta) = 0,14^\circ\text{K}$ | $\frac{s(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{0,14}{10} = 0,014$                                                               |                                   |
| grad T         |                                                            | $\frac{s(ET)}{ET} = \sqrt{\left(\frac{s(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{s(h)}{h}\right)^2} = 0,014$        | $s(ET) = 3^\circ\text{K/m}$       |
| Dugpunkt       | $s(\vartheta_d) = 0,1^\circ\text{C}$                       |                                                                                                                        |                                   |
| Damptryk       | $s(p) = 6 \text{ Pa}$                                      | $\frac{s(p)}{p} = \frac{6}{1783} = 0,003$                                                                              |                                   |
| $\Delta p$     | $s(\Delta p) = \sqrt{2} s(p) = 8 \text{ Pa}$               | $\frac{s(\Delta p)}{\Delta p} = \frac{8}{1519} = 0,005$                                                                |                                   |
| grad p         |                                                            | $\frac{s(EP)}{EP} = \sqrt{\left(\frac{s(\Delta p)}{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{s(h)}{h}\right)^2} = 0,005$        | $s(EP) = 150 \text{ Pa/m}$        |
| Mætningsstryk  | $s(p') = 10 \text{ Pa}$                                    | $\frac{s(p')}{p'} = \frac{10}{3186} = 0,003$                                                                           |                                   |
| Rel. fugtighed |                                                            | $\frac{s(\varphi)}{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{s(p)}{p}\right)^2 + \left(\frac{s(p')}{p'}\right)^2} = 0,004$          | $s(\varphi) = 0,002$              |
| $\psi$         | $s(\psi) = 0,004 \text{ m}^3/\text{m}^3$                   |                                                                                                                        |                                   |
| $\Delta\psi$   | $s(\Delta\psi) = \sqrt{2} s(\psi) = 0,0056$                | $\frac{s(\Delta\psi)}{\Delta\psi} = \frac{0,0056}{0,0002} = 28$                                                        |                                   |
| grad $\psi$    |                                                            | $\frac{s(E\psi)}{E\psi} = \sqrt{\left(\frac{s(\Delta\psi)}{\Delta\psi}\right)^2 + \left(\frac{s(h)}{h}\right)^2} = 28$ | $s(E\psi) = 0,006 \text{ m}^{-1}$ |

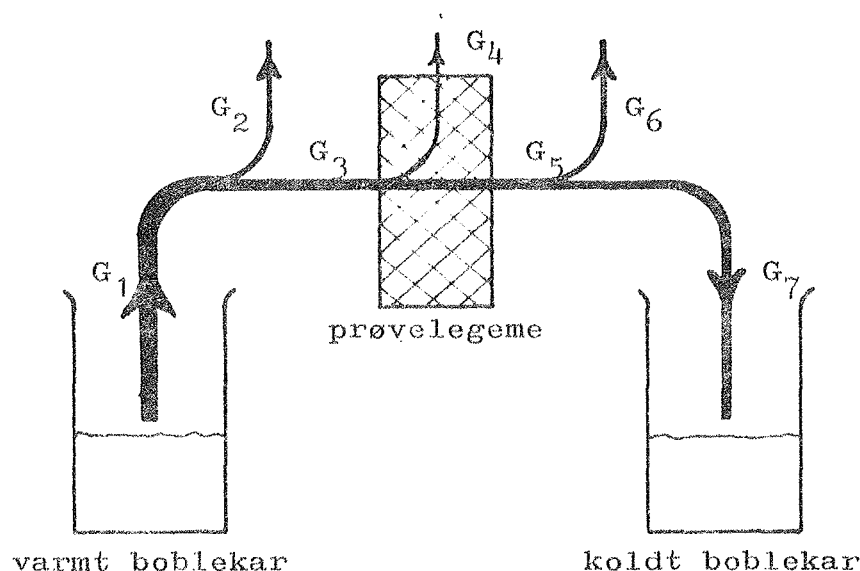


Fig. 35. Princip for fugtvandringen.

Principle for the moisture movement.

Størstedelen af den fugt, der forsvinder, diffunderer ud gennem slangerne, idet der er et højere damptryk i atmosfæren inde i slangerne end i omgivelserne. Desuden kan der forsvinde fugt igennem mindre luftutætheder i systemet som nævnt i afsnit 6.2.6, idet luft med systemets damptryk bliver udskiftet med luft med omgivelsernes damptryk, der er lavere.

Den fugtmængde, der forsvinder, er derfor proportional med damptrykforskellen, og det vil derfor være rimeligt at finde en middelværdi  $G_m$  ved at fordele den fugtmængde  $\Delta G$ , der forsvinder, således at den fugtmængde  $G_2$ , der forsvinder fra den varme side, forholder sig til den fugtmængde  $G_6$ , der forsvinder fra den kolde side, som damptrykforskellen  $\Delta p_v$  på den varme side til damptrykforskellen  $\Delta p_k$  på den kolde side (der skal dog her tages hensyn til en evt. forskel i længden  $l$  af slangerne),

$$\text{d.v.s.} \quad \frac{G_2}{G_6} = \frac{l_v \Delta p_v}{l_k \Delta p_k} \quad \text{og} \quad G_2 + G_6 = \Delta G \Rightarrow G_2 = k l_v \Delta p_v$$

$$\text{og} \quad G_6 = k l_k \Delta p_k$$

$$\text{hvor} \quad k = \frac{\Delta G}{l_v \Delta p_v + l_k \Delta p_k}$$

Da størstedelen af fugten som før nævnt forsvinder ved diffusion gennem slangerne, skal  $k$  beregnet ud fra de ved de forskellige forsøg fundne  $\Delta G$ 'er og  $\Delta p$ 'er være af samme størrelsesorden som slangens diffusionstal, der er fundet ved forsøg.  $k$  varierede mellem  $0,5 \cdot 10^{-6}$  og  $1,6 \cdot 10^{-6}$  med en middelværdi på  $0,8 \cdot 10^{-6}$  g/h Pa m slange, og ved forsøg blev diffusionstallet fundet til  $1 \cdot 10^{-6}$  g/h Pa m slange.

Som en rimelig tilnærmelse for den virkelige fugttransport  $G$  kan følgende værdi bruges:

$$G_m = G_v - G_2 = G_k + G_6$$

og deraf fås:

$$g_m = \frac{G_m}{A}, \text{ se fig. 36}$$

| 30°, 60%, $\Delta\psi=0$          |                               | A                  | B     | C     |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------|-------|
| forsøgsperiode                    | dato                          | 27/10 - 22/11 1972 |       |       |
| $p_{\text{lokale}}$               | Pa                            | 1508               | 1508  | 1508  |
| $\Delta p_v$                      | Pa                            | 1794               | 1794  | 1794  |
| $\Delta p_k$                      | Pa                            | 275                | 321   | 333   |
| $l_v \Delta p_v + l_k \Delta p_k$ | m·Pa                          | 10526              | 11290 | 12381 |
| $\Delta G$                        | $10^{-4}$ g/h                 | 73                 | 85    | 74    |
| $k$                               | $10^{-6}$ g/h Pa m            | 0,70               | 0,75  | 0,60  |
| $G_6 = k l_k \Delta p_k$          | $10^{-4}$ g/h                 | 12                 | 14    | 12    |
| $G_k$                             | $10^{-4}$ g/h                 | 543                | 493   | 582   |
| $G_m = G_k + G_6$                 | $10^{-4}$ g/h                 | 555                | 507   | 594   |
| $g_m = G_m / A$                   | $10^{-7}$ kg/m <sup>2</sup> s | 13,37              | 12,22 | 14,29 |

Fig. 36. Eksempel på beregning af  $g_m$ .

Example of calculation of  $g_m$ .

Som omgivelsernes damptryk er her benyttet damptrykket i det klimakammer, som forsøgsopstillingen er anbragt i, men da en del af slangen befinder sig i pumpekassen (omtalt i afsnit 6.2.5), skulle man anvende en efter slangelængde vejjet middelværdi af damptrykforskellene, men da begge middelværdier bliver mindre end de her anvendte forskelle mellem damptrykkene i slangerne og damptrykkene i klimakammeret, ændrer det næsten ikke forholdet mellem dem. Dette blev bekræftet ved forsøg med det lufttætte prøvelegeme, som også er diffusionstæt, idet det er en plexiglasbeholder af samme facon som prøvelegemet med en dampspærre fastlimet på hver side. Forholdet mellem de fugtmængder, der forsvandt på de to sider, varierede fra 1,1 til 1,35, medens forholdet mellem de tilsvarende damptryk var 1,2. I den resterende del af forsøgene er damptrykket i den ene side af systemet stadigvæk større end omgivelsernes damptryk, mens damptrykket i den anden side er mindre end omgivelsernes damptryk, hvorved der sker en fugttransport som vist på fig. 37 (vi kan også her se bort fra  $G_4$ ).

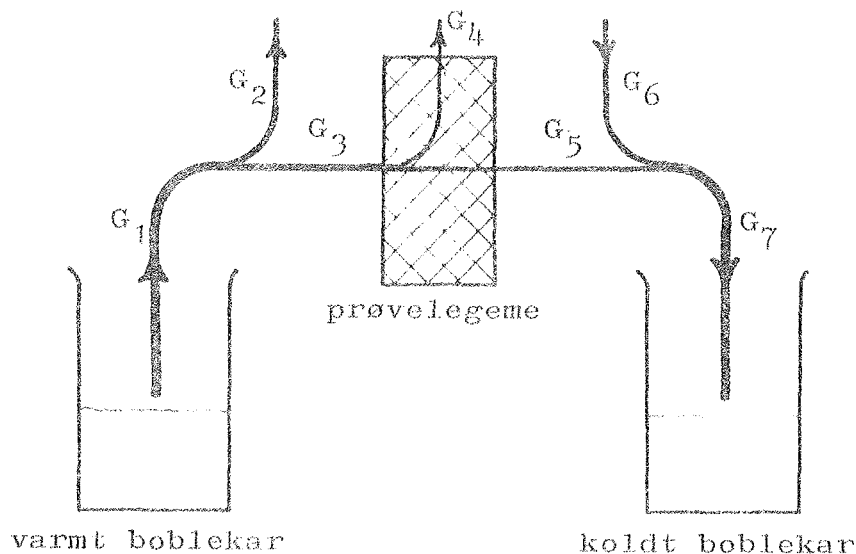


Fig. 37. Princip for fugtvandringen.

Principle for the moisture movement.

Den fugtmængde  $\Delta G$ , der forsvinder, er lig med  $G_2 - G_6$ . Analogt med de før omtalte forsøg kunne man prøve at fordele efter damptrykforskelle, d.v.s.  $\Delta G = G_2 - G_6 = k l_v \Delta p_v - k l_k \Delta p_k$ . De herved fundne k-værdier var meget svingende og stemte ikke med slangens diffusionstal, dette var altså ikke en farbar vej. Vi fandt derefter fordelingen ved forsøg, idet gasbetonprøvelegemet blev erstattet af det luft- og diffusionstætte prøvelegeme. Den totale fugtmængde, der forsvandt, når det luft- og diffusionstætte prøvelegeme var anbragt i forsøgsopstillingen, stemte pænt med den totale fugtmængde, der forsvandt, når gasbetonlegemet var anbragt i forsøgsopstillingen. Der forsvandt i gennemsnit henholdsvis 0,0012 og 0,0010 g/h.

Når det luft- og diffusionstætte prøvelegeme var anbragt i forsøgsopstillingen, svingede det kolde boblekars vægt omkring den samme værdi, d.v.s. der sker ingen fugttransport fra omgivelserne til slangen i den kolde side af systemet. Det er derfor rimeligt at antage, at det samme er tilfældet, når gasbetonprøvelegemet er anbragt i forsøgsopstillingen. Heraf ses, at en rimelig værdi for  $G_m$  må være  $G_k$ , d.v.s.

$$\varepsilon_m = \frac{G_m}{A} = \frac{G_k}{A}$$

Det virker mærkeligt, at der ikke skulle diffundere fugt ind i slangen på den kolde side, når omgivelsernes damptryk er højere. Der diffunderer da også fugt ind på et stykke af slangen, men et andet stykke af slangen, nemlig det stykke der befinder sig i pumpekassen, er i en atmosfære med et damptryk, der er lavere end damptrykket i slangen (pumpekassen bliver ventileret med luft fra forsøgshallen), og her diffunderer der altså fugt ud, og de to mængder er tilfældigvis praktisk taget lige store.

## 8.2. Beregning af fugttransportkoefficienterne samt af deres usikkerheder

For at finde  $\delta_T$  og  $K_p$  i ligningen  $g = -\delta_T \text{ grad } p - K_p \text{ grad } T$  ved et bestemt niveau, f. eks. 30°C og 60% RF, skal der udføres to forsøg, men da der er en vis usikkerhed på  $g$ ,  $\text{grad } p$  og  $\text{grad } T$  og dermed på  $\delta_T$  og  $K_p$ , er hvert forsøg udført med tre forskellige prøvelegemer under samme forsøgsbetingelser, hvor-



ved man får en bedre bestemmelse af  $\delta_T$  og  $K_p$  og får kendskab til usikkerhederne på  $\delta_T$  og  $K_p$ . På fig. 38 ses i kolonne 2 de fundne værdier for grad p og i kolonne 1 de fundne værdier for grad T (grad  $\psi$  benyttes ikke til beregning af  $\delta_T$  og  $K_p$ ).

I kolonne 4-6 er angivet 3 værdier for g:

$g_v$ : den fugtstrøm, der forsvinder fra det varme boblekar,  

$$g_v = \frac{G_v}{A}$$

$g_m$ : den fugtstrøm, der er beregnet som "middelværdi mellem  $g_v$  og  $g_k$  som beskrevet i afsnit 8.1.

$g_k$ : den fugtstrøm, der optages i det kolde boblekar,  

$$g_k = \frac{G_k}{A}$$

| TEMPERATUR |           | RELATIV FUGT | TEMP DIF |        | BORD   |
|------------|-----------|--------------|----------|--------|--------|
| 30.0       |           | 60.0         | 10.0     |        | 3.     |
| GRAD T     | GRAD P    | GRAD SI      | GV       | GM     | GK     |
| 201.000    | 30259.000 | 0.004        | 14.850   | 13.370 | 13.090 |
| 190.000    | 29180.000 | 0.006        | 13.930   | 12.220 | 11.880 |
| 193.000    | 29104.000 | 0.001        | 15.790   | 14.290 | 14.010 |

| TEMPERATUR |           | RELATIV FUGT | TEMP DIF |        | BORD   |
|------------|-----------|--------------|----------|--------|--------|
| 30.0       |           | 60.0         | 10.0     |        | 4.     |
| GRAD T     | GRAD P    | GRAD SI      | GV       | GM     | GK     |
| 0.0        | 26106.000 | 0.195        | 15.980   | 12.920 | 12.170 |
| 0.0        | 27733.000 | 0.229        | 14.160   | 12.570 | 12.450 |
| 0.0        | 26217.000 | 0.209        | 14.510   | 12.810 | 12.460 |

GRAD T ER ANGIVET I DEG C/M

GRAD P ER ANGIVET I PA/M

GRAD SI ER ANGIVET I N\*\*=1

G ER ANGIVET I KG/M\*\*2\*S \*10\*\*=7

Fig. 38. Eksempel på bearbejdede målinger fra 6 sammenhørende forsøg.

Example of adapted measurements from 6 connected experiments.

Der bliver beregnet 3 værdier for  $\delta_T$  (og analogt for  $K_p$ ) ud fra følgende betragtninger:

1. Hele den fugtstrøm  $g_v$ , der forsvinder fra det varme boblekar, strømmer igennem prøvelegemet, og vi får en hertil svarende  $\delta_T$ -værdi,  $\delta_{Tv}$ .
2. Den fugtstrøm, der strømmer igennem prøvelegemet, er den beregnede "middelstrøm"  $g_m$ , og vi får en hertil svarende  $\delta_T$ -værdi,  $\delta_{Tm}$ .
3. Kun den fugtstrøm  $g_k$ , der optages i det kolde boblekar, har gennemstrømmet prøvelegemet, og vi får en hertil svarende  $\delta_T$ -værdi,  $\delta_{Tk}$ .

$\delta_{Tv}$  og  $\delta_{Tk}$  bliver beregnet for at få en mulighed for at finde de grænser, inden for hvilke det er overvejende sandsynligt, at den virkelige  $\delta_T$  ligger.

BEREGNING AF KØEFFICIENTERNE TIL LIGNINGEN:  $G = - \Delta T \cdot P - K \cdot \Delta T$

B BEREGNING BASERET PÅ KORRIGERET FUGTTTRANSPORT

K ER UDREGNET I KG / (DEG \* M \* S) \* 10\*\*<sup>-7</sup>

DELTA ER UDREGNET I KG / (N/M\*\*2 \* M \* S) \* 10\*\*<sup>-7</sup> = S \* 10\*\*<sup>-7</sup>

| TEMPERATUR    | RELATIV FUGT    |
|---------------|-----------------|
| 30.0          | 60.0            |
| K             | DELTA           |
| -0.0079867765 | 0.0004945053    |
| -0.0017159812 | 0.0004532505    |
| -0.0070396997 | 0.0004866142    |
| -0.0116912611 | 0.0004945053    |
| -0.0052939691 | 0.0004532505    |
| -0.0107250772 | 0.0004866142    |
| -0.0005892571 | 0.0004945053    |
| 0.0056921840  | 0.0004532507    |
| 0.0003564288  | 0.0004866142    |
| MIDDEL K      | MIDDEL DELTA    |
| -0.0043322667 | 0.0004785233    |
| SPREDNING K   | SPREDNING DELTA |
| 0.0057007526  | 0.0000154425    |
| SIGMA K       | SIGMA DELTA     |
| 0.0032913347  | 0.0000112251    |

Fig. 39. Eksempel på beregning af  $\delta$ ,  $K$ ,  $s(\delta)$ ,  $s(K)$ ,  $\frac{s(\delta)}{\sqrt{n}}$  og  $\frac{s(K)}{\sqrt{n}}$  ud fra de i fig. 38 angivne værdier.

Example of calculating  $\delta$ ,  $K$ ,  $s(\delta)$ ,  $s(K)$ ,  $\frac{s(\delta)}{\sqrt{n}}$  and  $\frac{s(K)}{\sqrt{n}}$  from the values given in fig. 38.

På fig. 39 ses et eksempel på beregning af  $\delta_T$  og  $K_p$ , idet beregningerne er udført med  $g = g_m$ . De 9 værdier for  $\delta_T$  og  $K_p$  er fremkommet ved, at man har taget hvert forsøg i den ene gruppe og sammenholdt med hvert forsøg i den anden gruppe, idet man ikke kan give en kombinationsform præference frem for en anden. Ud fra de 9 værdier er gennemsnittet  $\delta_{Tg}$  (på fig. 39 angivet som middel delta) og standardafvigelsen  $s$  (på fig. 39 angivet som spredning delta) beregnet.

$s$  er beregnet af formelen:

$$s(\delta_T) = \sqrt{\frac{\sum(\delta_{Tg} - \delta_T)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum \delta_T^2 - \frac{(\sum \delta_T)^2}{n}}{n-1}},$$

hvor  $n = 9$ .

Standardfejlen  $f$  (på fig. 39 angivet som sigma delta) på gennemsnittet  $\delta_{Tg}$  er beregnet af formelen:

$$f(\delta_{Tg}) = \frac{s(\delta_T)}{\sqrt{n}}, \quad n \text{ er her 3, idet vi har 3 forskellige forsøg til bestemmelse af } \delta_{Tg}.$$

Standardfejlen  $f$  skal benyttes til beregning af konfidensgrænserne, HARSAAE [10], idet f. eks. 90% konfidensgrænserne er givet ved

$$P \left\{ \delta_{Tg} - \frac{s(\delta_T)}{\sqrt{n}} \cdot 2,92 < \delta_{Tm} < \delta_{Tg} + \frac{s(\delta_T)}{\sqrt{n}} \cdot 2,92 \right\} = 90\%$$

d.v.s. der er 90% sandsynlighed for, at  $\delta_{Tm}$  ligger mellem de to angivne grænser.

Analoge beregninger er udført med  $g = g_v$  og  $g_k$  til bestemmelse af  $\delta_{Tv}$  og  $\delta_{Tk}$ .

$\delta_{Tm}$  må være en rimelig værdi for den virkelige  $\delta_T$ , og det må være overvejende sandsynligt, at 90% konfidensgrænsen for  $\delta_{Tm}$  også er 90% konfidensgrænse for  $\delta_T$ . Det må ligeledes være overvejende sandsynligt, at  $\delta_T$  er mindre end  $\delta_{Tv}$ 's øvre 95% konfidensgrænse og større end  $\delta_{Tk}$ 's nedre 95% konfidensgrænse.

Analoge beregninger er udført med  $g = g_m$ ,  $g_v$  og  $g_k$  til bestemmelse af  $K_{pm}$ ,  $K_{pv}$  og  $K_{pk}$ .

$\delta_\psi$  og  $k_p$  i ligningen  $g = -\delta_\psi \text{ grad } p - k_p \rho \text{ grad } \psi$  samt  $k_T$  og  $K_\psi$  i ligningen  $g = -k_T \rho \text{ grad } \psi - K_\psi \text{ grad } T$  er bestemt på hel analog måde.

| Niveau | Temp.              | RF | Bord rum | Overfladetemp.     |                    | Dugpunkt           |                    | grad T               | grad p        | grad $\psi$             | Fugtstrøm                                    |       |       |
|--------|--------------------|----|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|---------------|-------------------------|----------------------------------------------|-------|-------|
|        |                    |    |          | $\theta$ varm      | $\theta$ kold      | $\theta$ dug, v    | $\theta$ dug, k    |                      |               |                         | $g_v$                                        | $g_m$ | $g_k$ |
|        | $^{\circ}\text{C}$ | %  |          | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{K/m}$ | $\text{Pa/m}$ | $\text{m}^3/\text{m}^3$ | $10^{-7} \cdot \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ |       |       |
| 26     | -                  | 40 | 4 A      | 31,4               | 21,1               | 16,4               | 6,0                | 205                  | 18506         | 0,015                   | 8,50                                         | 7,60  | 7,60  |
| -      | -                  | -  | 4 B      | 31,3               | 21,2               | 15,6               | 5,3                | 202                  | 17602         | 0,018                   | 6,72                                         | 7,01  | 7,01  |
| -      | -                  | -  | 4 C      | 31,3               | 21,0               | 15,7               | 5,9                | 206                  | 17117         | 0,009                   | 6,69                                         | 6,00  | 6,90  |
| -      | -                  | -  | 1 A      | 26,1               | 26,2               | 15,2               | 6,3                | -2                   | 15378         | 0,005                   | 6,84                                         | 6,32  | 6,52  |
| -      | -                  | -  | 1 B      | 25,9               | 26,2               | 15,4               | 6,4                | -6                   | 15744         | 0,109                   | 6,38                                         | 6,19  | 6,19  |
| -      | -                  | -  | 1 C      | 26,0               | 26,2               | 15,4               | 6,5                | -4                   | 15656         | 0,108                   | 6,90                                         | 6,64  | 6,64  |
| 34     | -                  | 40 | 5 A      | 39,2               | 28,8               | 22,7               | 13,5               | 207                  | 24100         | 0                       | 9,80                                         | 9,13  | 9,13  |
| -      | -                  | -  | 5 B      | 39,3               | 28,3               | 22,8               | 13,2               | 219                  | 25050         | -0,002                  | 9,98                                         | 9,11  | 9,11  |
| -      | -                  | -  | 5 C      | 39,0               | 28,5               | 22,6               | 13,4               | 208                  | 23838         | -0,001                  | 12,18                                        | 10,06 | 10,06 |
| -      | -                  | -  | 1 A      | 33,7               | 33,7               | 22,2               | 13,3               | 0                    | 22869         | 0,100                   | 10,61                                        | 10,01 | 10,01 |
| -      | -                  | -  | 1 B      | 33,7               | 33,7               | 22,5               | 13,3               | 0                    | 23936         | 0,102                   | 10,28                                        | 8,98  | 8,98  |
| -      | -                  | -  | 1 C      | 33,8               | 33,8               | 22,5               | 13,4               | 0                    | 23804         | 0,122                   | 10,61                                        | 10,32 | 10,32 |
| 15     | -                  | 60 | 4 A      | 17,1               | 13,2               | 9,1                | 5,2                | 78                   | 5400          | 0,004                   | 2,48                                         | 2,10  | 2,10  |
| -      | -                  | -  | 4 B      | 17,2               | 13,1               | 8,7                | 5,2                | 82                   | 4789          | -0,004                  | 2,80                                         | 2,25  | 2,25  |
| -      | -                  | -  | 4 C      | 17,2               | 12,9               | 9,0                | 5,2                | 86                   | 5247          | -0,003                  | 2,54                                         | 2,54  | 2,54  |
| -      | -                  | -  | 6 A      | 15,2               | 15,2               | 8,9                | 5,1                | 0                    | 5221          | 0,066                   | 3,27                                         | 3,34  | 3,34  |
| -      | -                  | -  | 6 B      | 14,6               | 14,6               | 8,7                | 5,0                | 0                    | 5015          | 0,081                   | 2,71                                         | 2,47  | 2,47  |
| -      | -                  | -  | 6 C      | 15,0               | 15,0               | 9,0                | 5,2                | 0                    | 5247          | 0,078                   | 2,36                                         | 2,29  | 2,29  |
| 22     | -                  | 60 | 1 A      | 25,3               | 19,3               | 16,6               | 10,3               | 120                  | 12695         | 0,006                   | 5,69                                         | 5,02  | 4,75  |
| -      | -                  | -  | 1 B      | 25,3               | 19,3               | 16,6               | 10,3               | 120                  | 12695         | 0,006                   | 5,91                                         | 5,21  | 4,94  |
| -      | -                  | -  | 1 C      | 25,3               | 18,9               | 16,9               | 10,3               | 128                  | 13413         | 0,008                   | 6,59                                         | 5,91  | 5,70  |
| -      | -                  | -  | 3 A      | 22,2               | 21,9               | 16,5               | 10,9               | 6                    | 11295         | 0,116                   | 6,85                                         | 6,34  | 6,10  |
| -      | -                  | -  | 3 B      | 22,5               | 22,4               | 16,7               | 10,9               | 2                    | 11802         | 0,117                   | 6,17                                         | 5,62  | 5,40  |
| -      | -                  | -  | 3 C      | 22,4               | 22,6               | 16,6               | 10,9               | -4                   | 11653         | 0,119                   | 6,91                                         | 6,10  | 5,80  |
| 26     | -                  | 60 | 3 A      | 31,1               | 21,0               | 21,8               | 12,0               | 201                  | 24084         | 0,003                   | 10,92                                        | 9,64  | 9,64  |
| -      | -                  | -  | 3 B      | 30,8               | 21,0               | 21,8               | 12,1               | 194                  | 23702         | 0,006                   | 11,42                                        | 10,07 | 10,07 |
| -      | -                  | -  | 3 C      | 30,6               | 20,9               | 21,8               | 12,4               | 193                  | 23447         | 0,005                   | 12,56                                        | 11,31 | 11,31 |
| -      | -                  | -  | 4 A      | 25,9               | 26,0               | 21,3               | 12,1               | -2                   | 22340         | 0,240                   | 12,55                                        | 10,87 | 10,87 |
| -      | -                  | -  | 4 B      | 25,8               | 26,0               | 21,5               | 12,0               | -4                   | 23184         | 0,270                   | 11,96                                        | 10,73 | 10,73 |
| -      | -                  | -  | 4 C      | 25,8               | 26,0               | 21,4               | 12,3               | -4                   | 22306         | 0,256                   | 11,78                                        | 10,41 | 10,41 |

Tabel 6. Gennemsnitlige forsøgsforhold.  
Average experiment conditions.

Tabeller med en oversigt over gennemsnittet af de beregnede fugttransportkoefficienter baseret på de i tabel 6 angivne gennemsnitlige forsøgsforhold findes forrest i afsnittene om de enkelte fugttransportkoefficienter (afsnittene 9.1. - 9.6.).

|    |   |     |      |      |      |      |     |       |        |       |       |       |
|----|---|-----|------|------|------|------|-----|-------|--------|-------|-------|-------|
| 30 | - | 3 A | 35,2 | 25,1 | 25,7 | 15,7 | 201 | 30259 | 0,004  | 14,85 | 13,37 | 13,09 |
| -  | - | 3 B | 35,0 | 25,4 | 25,7 | 16,1 | 190 | 29180 | 0,006  | 13,93 | 12,22 | 11,88 |
| -  | - | 3 C | 34,8 | 25,1 | 25,7 | 16,2 | 192 | 29104 | 0,001  | 13,79 | 14,29 | 14,01 |
| -  | - | 4 A | 30,5 | 30,5 | 25,3 | 16,9 | 0   | 26106 | 0,195  | 13,98 | 12,02 | 12,17 |
| -  | - | 4 B | 30,5 | 30,5 | 25,7 | 16,8 | 0   | 27733 | 0,229  | 14,16 | 12,57 | 12,45 |
| -  | - | 4 C | 30,5 | 30,5 | 25,5 | 17,1 | 0   | 26217 | 0,209  | 14,51 | 12,81 | 12,46 |
| 34 | - | 1 A | 38,6 | 28,5 | 29,5 | 19,5 | 202 | 31066 | 0,008  | 16,86 | 15,09 | 14,47 |
| -  | - | 1 B | 38,8 | 28,8 | 30,1 | 19,5 | 200 | 30940 | 0,019  | 17,39 | 15,28 | 14,67 |
| -  | - | 1 C | 38,6 | 28,3 | 29,8 | 19,5 | 206 | 30483 | 0,012  | 19,15 | 16,81 | 16,18 |
| -  | - | 2 A | 34,0 | 34,0 | 29,3 | 19,3 | 0   | 36672 | 0,256  | 19,82 | 17,80 | 17,12 |
| -  | - | 2 B | 34,2 | 34,1 | 28,6 | 19,2 | 2   | 59632 | 0,187  | 20,34 | 17,61 | 16,69 |
| -  | - | 2 C | 34,1 | 34,2 | 28,5 | 19,5 | -2  | 31474 | 0,171  | 21,41 | 18,94 | 18,17 |
| 34 | - | 3 A | 34,0 | 34,0 | 27,7 | 21,4 | 0   | 23227 | 0,119  | 11,67 | 10,14 | 9,21  |
| -  | - | 3 B | 33,7 | 33,7 | 27,6 | 21,5 | 0   | 22170 | 0,127  | 11,64 | 10,17 | 9,37  |
| -  | - | 3 C | 33,9 | 33,9 | 27,8 | 21,5 | 0   | 23317 | 0,129  | 13,00 | 11,17 | 10,28 |
| -  | - | 4 A | 39,8 | 28,3 | 28,6 | 21,6 | 229 | 26004 | -0,072 | 14,93 | 9,63  | 7,25  |
| -  | - | 4 B | 40,1 | 28,0 | 28,5 | 21,7 | 241 | 26177 | -0,072 | 14,01 | 12,33 | 10,92 |
| -  | - | 4 C | 39,7 | 27,8 | 27,7 | 21,9 | 237 | 21688 | -0,118 | 17,00 | 15,01 | 14,01 |
| 26 | - | 4 B | 28,0 | 24,0 | 22,5 | 19,1 | 79  | 10187 | -0,034 | 8,68  | 6,87  | 5,74  |
| -  | - | 4 C | 28,1 | 24,0 | 21,9 | 19,2 | 84  | 8025  | -0,091 | 7,24  | 5,92  | 5,07  |
| -  | - | 5 A | 26,4 | 26,2 | 21,4 | 20,0 | 4   | 4100  | 0,081  | 3,34  | 2,25  | 1,13  |
| -  | - | 5 B | 26,3 | 26,4 | 21,5 | 19,9 | -2  | 4770  | 0,109  | 3,76  | 2,56  | 1,52  |
| 30 | - | 1 A | 32,1 | 27,9 | 26,4 | 22,9 | 81  | 12933 | -0,039 | 12,51 | 9,50  | 6,89  |
| -  | - | 1 B | 32,2 | 28,0 | 26,7 | 23,1 | 85  | 13093 | -0,035 | 10,78 | 8,07  | 5,98  |
| -  | - | 1 C | 32,0 | 27,7 | 26,8 | 23,1 | 86  | 13571 | -0,038 | 9,38  | 7,80  | 6,71  |
| -  | - | 2 A | 30,4 | 30,2 | 26,0 | 24,5 | 1   | 5726  | 0,106  | 7,42  | 5,66  | 3,89  |
| -  | - | 2 B | 30,5 | 30,3 | 26,0 | 24,4 | 4   | 6464  | 0,117  | 6,05  | 4,23  | 2,60  |
| -  | - | 2 C | 30,4 | 30,3 | 26,1 | 24,5 | 2   | 6115  | 0,123  | 7,35  | 5,30  | 3,60  |
| 34 | - | 5 A | 34,8 | 31,8 | 30,8 | 26,6 | 60  | 19124 | 0,119  | 13,86 | 11,61 | 9,68  |
| -  | - | 5 B | 34,8 | 31,8 | 30,8 | 26,7 | 60  | 18819 | 0,115  | 14,31 | 11,44 | 9,24  |
| -  | - | 5 C | 35,4 | 31,7 | 30,2 | 27,0 | 74  | 15525 | -0,031 | 14,39 | 10,30 | 8,04  |
| -  | - | 6 A | 33,9 | 33,9 | 29,8 | 27,8 | 0   | 9127  | 0,162  | 8,17  | 4,35  | 3,16  |
| -  | - | 6 B | 33,9 | 33,9 | 30,0 | 28,2 | 0   | 8755  | 0,163  | 6,55  | 4,09  | 1,67  |
| -  | - | 6 C | 33,9 | 33,9 | 30,1 | 28,2 | 0   | 8833  | 0,169  | 8,27  | 4,24  | 0,89  |

Tabel 6 fortsat.

## 9. FORSØGSRESULTATERNE

### 9.1. Diffusionstallet $\delta_T$

I tabel 7 er de ved de enkelte niveauer beregnede gennemsnitsværdier af  $\delta_T$  angivet.

| Niveau |      | $\delta_{Tv}$        | $\delta_{Tm}$ | $\delta_{Tk}$ |
|--------|------|----------------------|---------------|---------------|
| °C     | % RF | kg/m s Pa $10^{-11}$ |               |               |
| 26     | 40   | 4,30                 | 4,14          | 4,15          |
| 34     | 40   | 4,46                 | 4,15          | 4,15          |
| 15     | 60   | 5,39                 | 5,23          | 5,23          |
| 22     | 60   | 5,74                 | 5,21          | 4,99          |
| 26     | 60   | 5,35                 | 4,71          | 4,71          |
| 30     | 60   | 5,59                 | 4,79          | 4,63          |
| 34     | 60   | 5,68                 | 4,97          | 4,66          |
| 26     | 75   | 7,89                 | 5,30          | 2,83          |
| 30     | 75   | 11,76                | 8,56          | 5,63          |
| 34     | 75   | 8,59                 | 4,74          | 2,12          |

Tabel 7. Beregnede gennemsnitsværdier af  $\delta_T$ .

Calculated average values of  $\delta_T$ .

Ved regressionsanalyse (program: REGR, udarbejdet af Henrik Spliid er benyttet) på alle de 9  $\delta_{Tm}$ -værdier, der ved hvert niveau er fundet ved permutation (side 83), er følgende ligning, der angiver  $\delta_{Tm}$ 's afhængighed af temperatur  $\vartheta$  og relativ fugtighed  $\varphi$ , fundet:

$$\delta_{Tm} = (0,104 + 0,235\vartheta - 0,0022\vartheta^2 + 11,34\varphi^2 - 0,24\varphi) 10^{-11}$$

Ved optegning af denne ligning viser det sig, at  $\delta_{Tm}$  kun er meget svagt temperaturafhængig, idet variationen af  $\delta_{Tm}$  på grund af variationen af temperaturen ligger inden for  $\delta_{Tm}$ 's 75% konfidensgrænse, når temperaturen varierer mellem 15 og 35°C. Det er derfor rimeligt at angive  $\delta_{Tm}$  som en funktion af  $\varphi$  alene, d.v.s.:

$$\underline{\delta_T = \delta_{Tm} = (5,24 - 7,326 \varphi + 11,48 \varphi^2) 10^{-11}}$$

hvor  $\varphi$  er middelfugtindholdet angivet i absolut værdi, og hvor  $\delta_T$  fås i  $\text{kg/m}^3 \text{ Pa}$ . Ligningen kan anvendes i området:  
 $15^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 35^\circ\text{C}$ ,  $40\% \text{ RF} \leq \varphi \leq 75\% \text{ RF}$ .

På fig. 40 er  $\delta_T$  afbildet sammen med sine 90% konfidensgrænser,

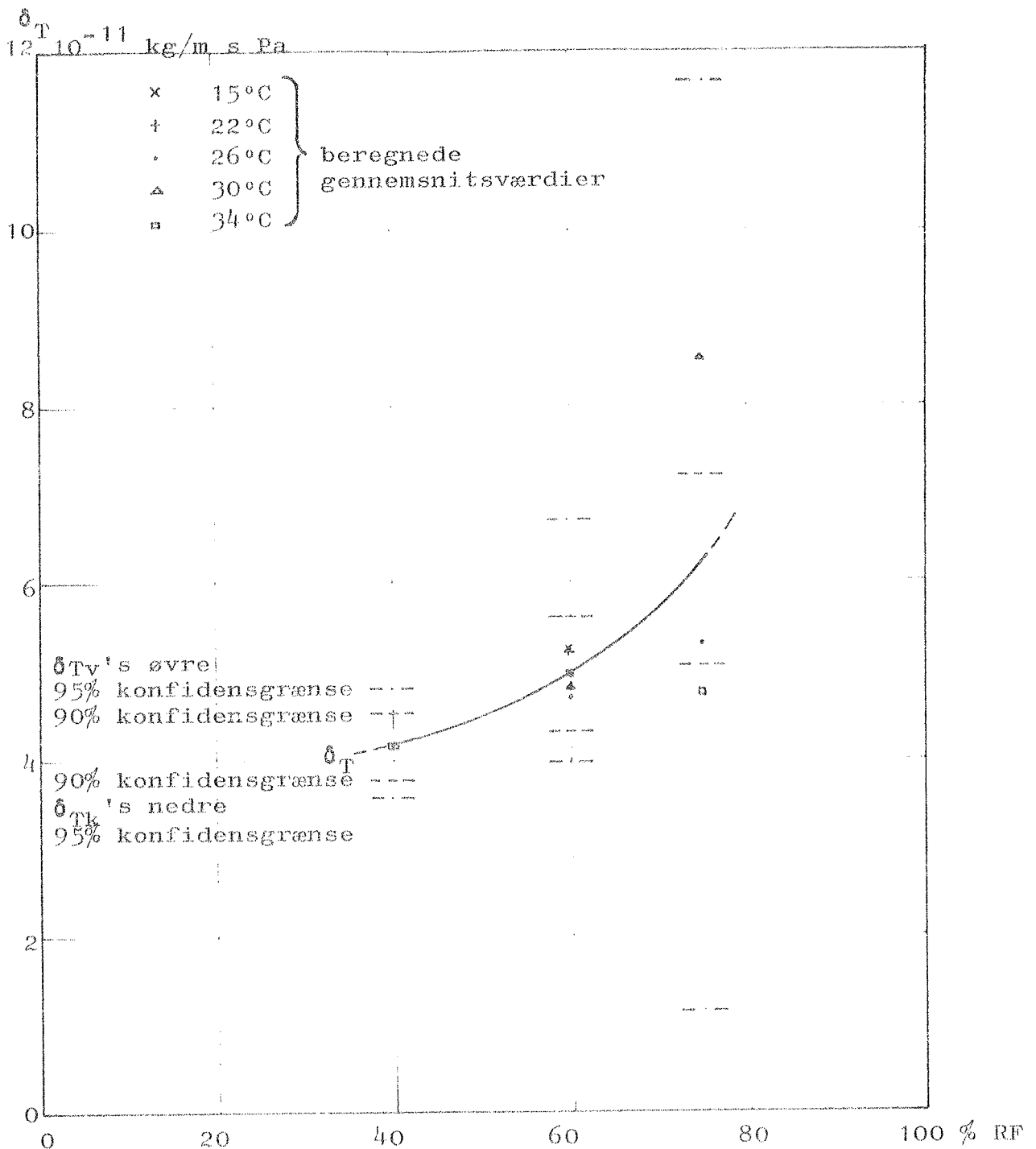


Fig. 40.  $\delta_T$  som funktion af middelfugtniveau.  
 $\delta_T$  as a function of mean moisture level.

desuden er  $\delta_{Tv}$ 's øvre 95% konfidensgrænse og  $\delta_{Tk}$ 's nedre 95% konfidensgrænse indtegnet, samt de i tabel 7 angivne gennemsnitsværdier for  $\delta_{Tm}$ .

På fig. 41 er  $\delta_T$  afbildet sammen med de af AHLGREN [4] og TVEIT [26] fundne værdier for  $\delta_T$ . Desuden er de af KÜNZEL og BERNHARDT [14] ved "cup"-metoden fundne værdier indtaget. De af LUND-HANSEN [16] fundne værdier for det tilsyneladende diffusionstal er også indtegnet som funktion af middelfugtindholdet.

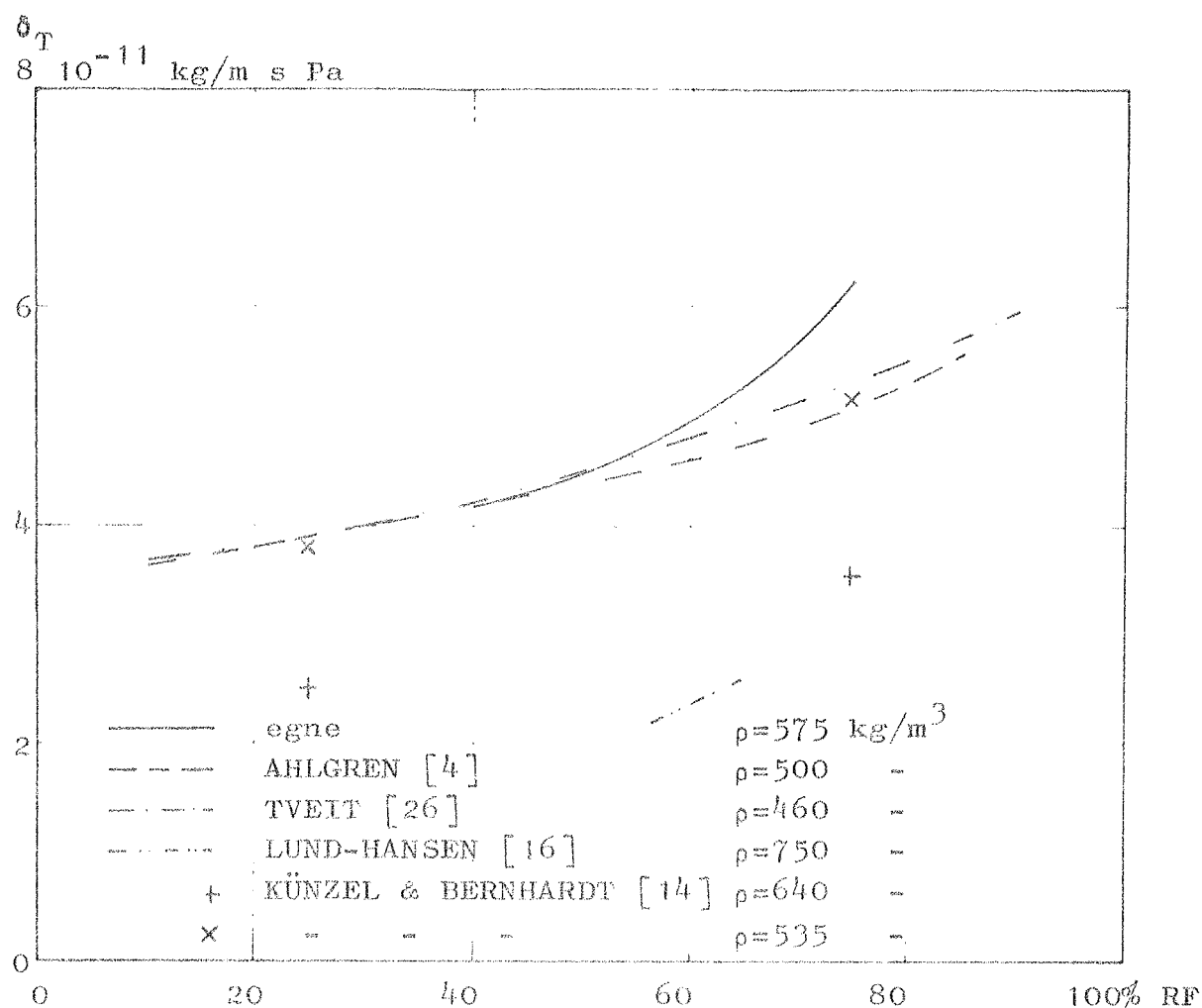


Fig. 41. Sammenligning af  $\delta_T$ -værdier. De af LUND-HANSEN målte værdier er det tilsyneladende diffusionstal (se side 39).

Comparison of  $\delta_T$ -values. The values measured by LUND-HANSEN are the apparent diffusion coefficients.



AHLGREN [4] har ikke undersøgt  $\delta_T$ 's evt. temperaturafhængighed, medens TVEIT [26] har fundet, at  $\delta_T$  er praktisk taget temperatur-uafhængig.

## 9.2. Termodiffusionstallet $K_p$

I tabel 8 er de ved de enkelte niveauer beregnede gennemsnitsværdier af  $K_p$  angivet.

| Niveau |      | $K_{pv}$            | $K_{pm}$ | $K_{pk}$ |
|--------|------|---------------------|----------|----------|
| °C     | % RF | kg/m s °K $10^{-9}$ |          |          |
| 26     | 40   | -0,16               | -0,08    | -0,08    |
| 34     | 40   | -0,09               | -0,31    | -0,31    |
| 15     | 60   | -0,21               | -0,49    | -0,49    |
| 22     | 60   | -1,11               | -1,11    | -1,09    |
| 26     | 60   | -0,53               | -0,43    | -0,43    |
| 30     | 60   | -0,84               | -0,43    | -0,35    |
| 34     | 60   | -1,38               | -1,01    | -1,09    |
| 26     | 75   | +0,95               | +1,92    | +3,48    |
| 30     | 75   | -5,79               | -3,60    | -1,23    |
| 34     | 75   | -2,05               | +4,35    | +8,27    |

Tabel 8. Beregnede gennemsnitsværdier af  $K_p$ .  
Calculated average values of  $K_p$ .

Der er en stor spredning på alle  $K_p$ -værdierne, men spredningen på værdierne ved 75% RF er specielt stor, og jeg har ikke ment det muligt at uddrage noget af disse værdier, og de vil derfor ikke blive taget med ved den videre behandling af  $K_p$ .

Det har ikke været muligt at finde årsagen til, at to af  $K_p$ -værdierne ved 75% RF er positive. Der er mindre variationer i prøvernes tørrumvægt og i deres fugtindhold under forsøget, men ingen signifikante forskelle. Man kunne tænke sig, at der var forskelle i porestrukturen, men der kan kun blive tale om mindre

forskelle, da prøvelegemer med større afvigelser i strukturen er blevet frasorteret ved måling med gammatransmissionsmåleudstyret.

LUND-HANSEN [16] har undersøgt påvirkningen fra en temperaturforskel på det tilsyneladende diffusionstal og finder en svag stigning i det tilsyneladende diffusionstal ved stigende temperaturforskel over prøvelegemet, dette svarer til positive  $K_p$ -værdier. Stigningen er ikke signifikant, og hvis man ser på de enkelte forsøgsgrupper, ser man, at i enkelte tilfælde falder det tilsyneladende diffusionstal ved stigende temperaturforskel over prøvelegemet, svarende til negative  $K_p$ -værdier. Ved regressionsanalyse på alle  $K_{pm}$ -værdierne ved 40 og 60% RF er følgende ligning, der angiver  $K_{pm}$ 's afhængighed af temperatur  $\vartheta$  og fugtighed  $\phi$ , fundet:

$$K_{pm} = (1,322 - 3,007\phi - 0,000347\vartheta^2) 10^{-9}$$

Ved optegning af denne ligning viser det sig, at  $K_{pm}$  næsten ikke er temperaturafhængig; temperaturvariationen ligger inden for  $K_{pm}$ 's 50% konfidensgrænse. Det er derfor rimeligt at angive  $\delta_{Tm}$  som en funktion af  $\phi$  alene, d.v.s.:

$$\underline{K_p = K_{pm} = (0,899 - 2,746\phi) 10^{-9}}$$

hvor  $\phi$  er middelfugtindholdet angivet i absolut værdi, og hvor  $K_p$  fås i  $\text{kg/m s } ^\circ\text{K}$ . Ligningen kan anvendes i området  $15^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 35^\circ\text{C}$ ,  $40\% \text{ RF} \leq \phi \leq 60\% \text{ RF}$ .

På fig. 42 er  $K_p$  afbildet på samme måde som  $\delta_T$ .

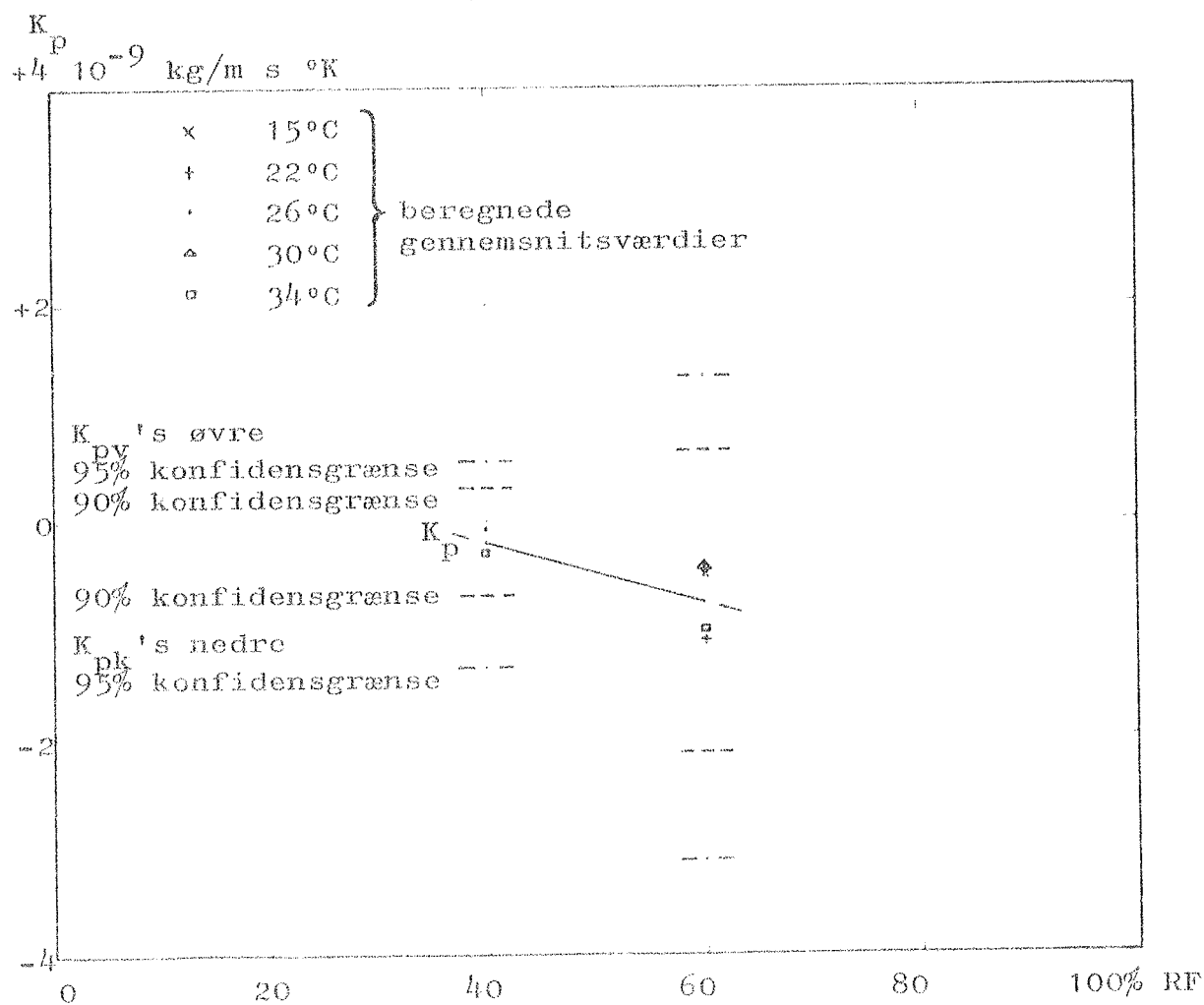


Fig. 42.  $K_p$  som funktion af middelfugtniveauet.

$K_p$  as a function of the mean moisture level.

På fig. 43 er  $K_p$  afbildet sammen med det af AHLGREN [4] fundne punkt og eksempler på de af VOS & TAMMES [28] teoretiske udledte værdier.

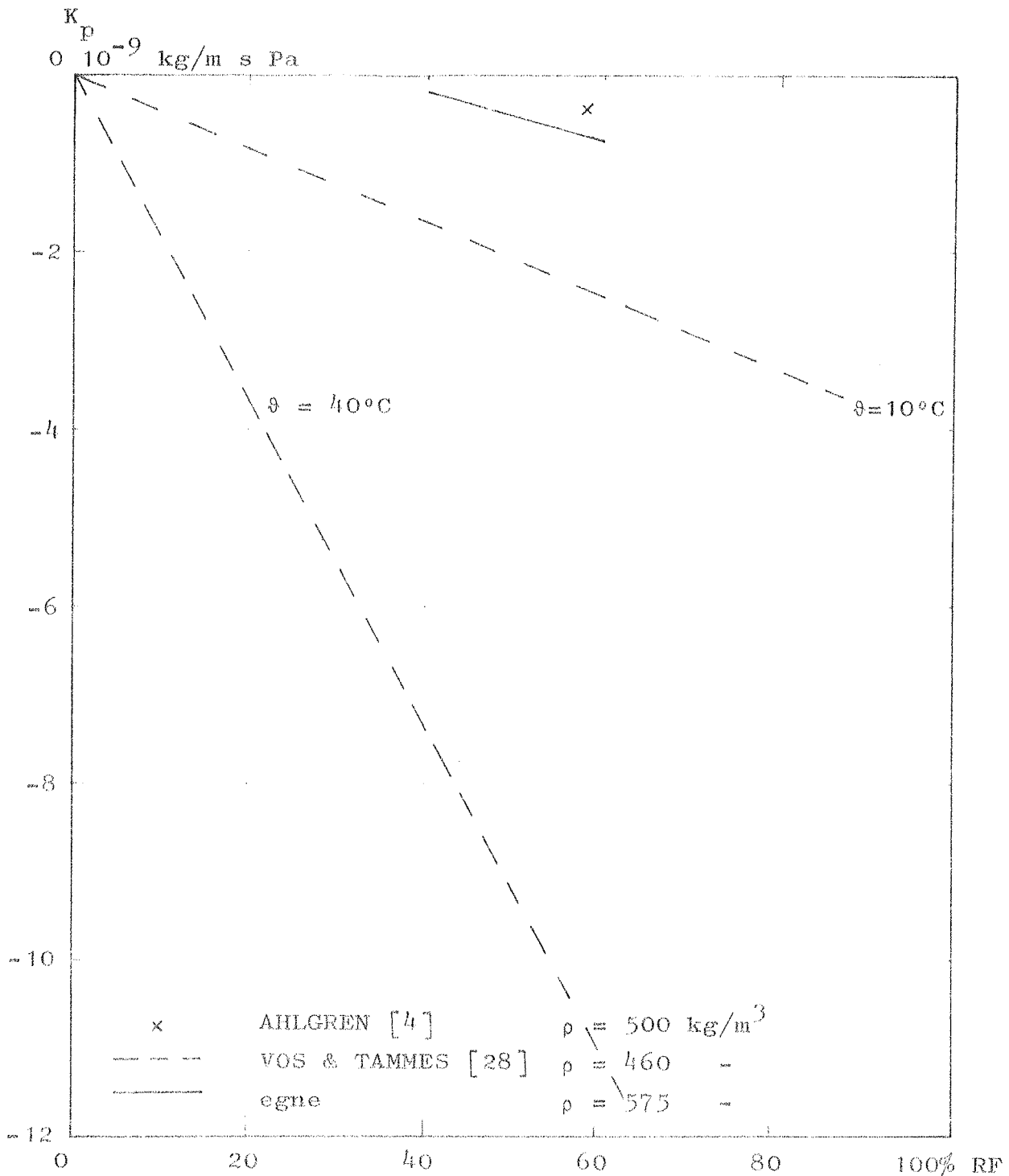


Fig. 43. Sammenligning af  $K_p$ -værdier. De af VOS & TAMMES angivne værdier er teoretisk udledte.

Comparison of  $K_p$ -values. The values given by VOS & TAMMES are theoretically calculated.

### 9.3. Kapillarledningstallet $k_T$

I tabel 9 er de ved de enkelte niveauer beregnede gennemsnitsværdier af  $k_T$  angivet.

| Niveau |      | $k_{Tv}$                                   | $k_{Tm}$ | $k_{Tk}$ |
|--------|------|--------------------------------------------|----------|----------|
| °C     | % RF | kg/m s kg/m <sup>3</sup> 10 <sup>-10</sup> |          |          |
| 26     | 40   | 66,0                                       | 63,5     | 63,5     |
| 34     | 40   | 98,0                                       | 90,9     | 90,9     |
| 15     | 60   | 37,8                                       | 36,8     | 36,8     |
| 22     | 60   | 56,1                                       | 50,8     | 48,7     |
| 26     | 60   | 48,3                                       | 42,6     | 42,6     |
| 30     | 60   | 71,1                                       | 60,8     | 58,8     |
| 34     | 60   | 100,5                                      | 87,7     | 82,2     |
| 26     | 75   | 11,3                                       | 7,6      | 4,0      |
| 30     | 75   | 56,0                                       | 40,7     | 26,8     |
| 34     | 75   | 46,5                                       | 25,7     | 11,7     |

Tabel 9. Beregnede gennemsnitsværdier af  $k_T$ .  
Calculated average values of  $k_T$ .

$k_T$ -værdierne ved 75% RF varierer så meget, at de ikke bliver medtaget ved den videre bearbejdning.

Ved regressionsanalyse på  $k_{Tm}$ -værdierne ved 40 og 60% RF er følgende ligning, der angiver  $k_{Tm}$ 's afhængighed af temperatur  $\vartheta$  og relativ fugtighed  $\varphi$ , fundet:

$$\underline{k_T = k_{Tm} = (30,77 + 0,07218 \vartheta^2 - 1,57 \varphi) 10^{-10}}$$

hvor  $\varphi$  er middelfugtindholdet angivet i absolut værdi, og  $\vartheta$  er middeltemperaturniveauet i °C, og hvor  $k_T$  fås i kg/m s kg/m<sup>3</sup>.

Ligningen kan anvendes i området  $15^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 35^\circ\text{C}$ ,

$40\% \text{ RF} \leq \varphi \leq 60\% \text{ RF}$ .

På fig. 44 er  $k_T$  afbildet som en funktion af temperaturniveauet ved henholdsvis 40 og 60% RF, desuden er indtegnet 90% konfidensgrænser for  $k_T$  samt  $k_{TV}$ 's øvre 95% konfidensgrænse og  $k_{TK}$ 's nedre 95% konfidensgrænse og endelig de i tabel 9 angivne gennemsnitsværdier for  $k_{Tm}$ .

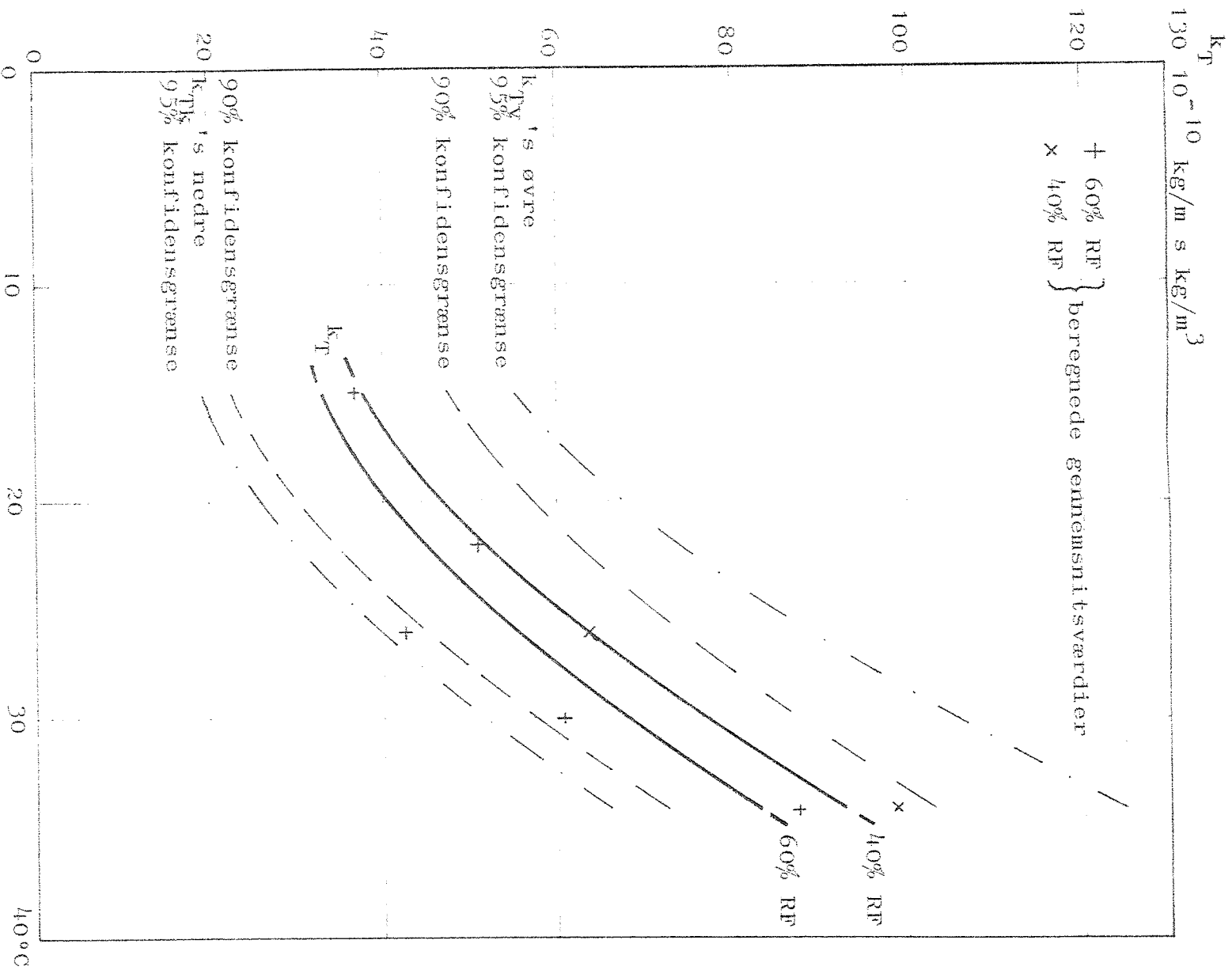


Fig. 44.  $k_T$  som funktion af middeltemperaturniveau ved to forskellige middelfugt niveauer.  
 $k_T$  as a function of the mean temperature level at two different mean moisture levels.

På fig. 45 er  $k_T$  afbildet sammen med de af KOOI [12] fundne værdier og eksempler på de af VOS & TAMMES [28] teoretisk udledte værdier.

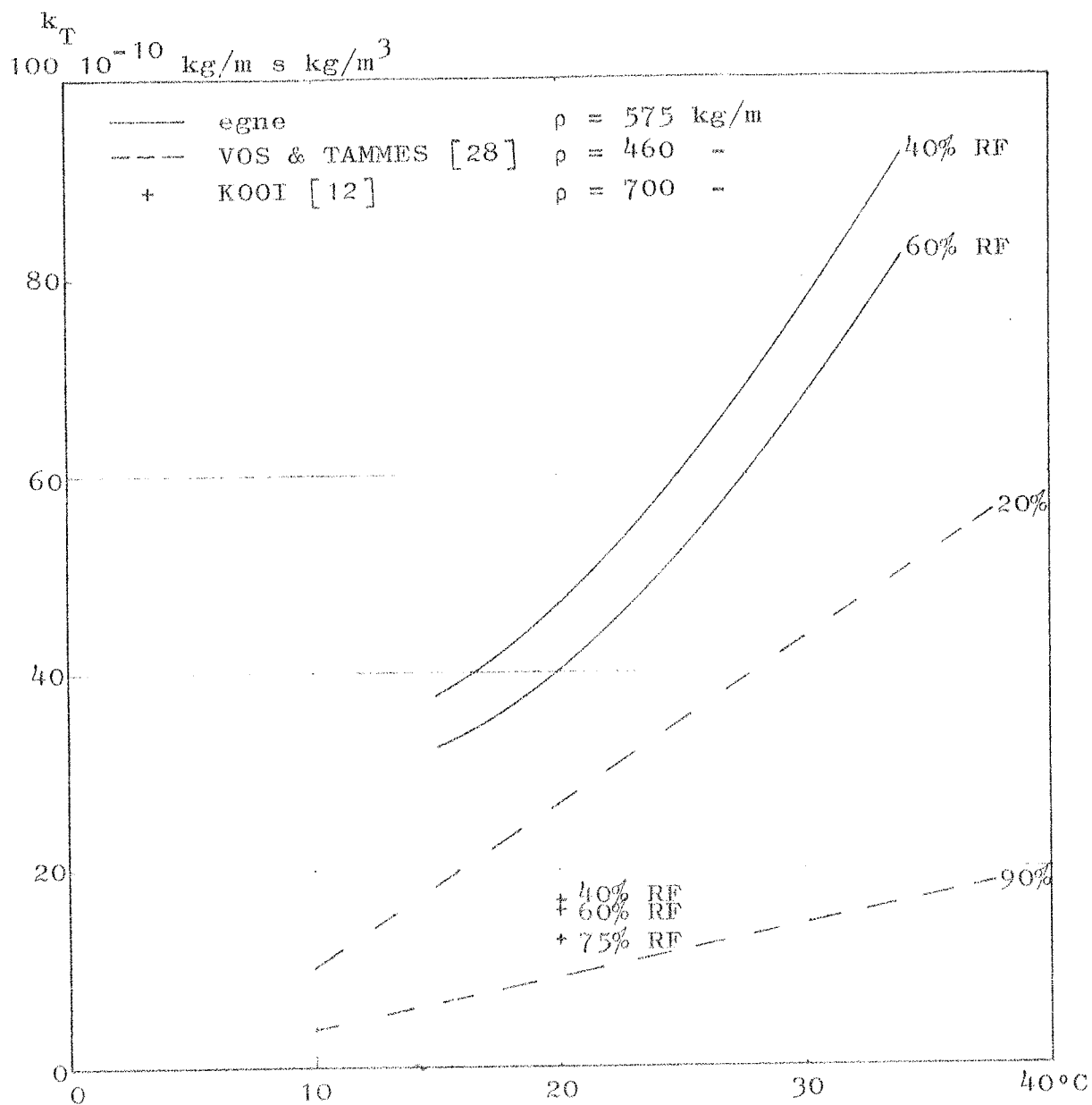


Fig. 45. Sammenligning af  $k_T$ -værdier. De af VOS & TAMMES angivne værdier er teoretisk udledte.

Comparison of  $k_T$ -values. The values given by VOS & TAMMES are theoretically calculated.

#### 9.4. Termodiffusionstallet $K_{\psi}$

I tabel 10 er de ved de enkelte niveauer beregnede gennemsnitsværdier af  $K_{\psi}$  angivet.

| Niveau |      | $K_{\psi_v}$        | $K_{\psi_m}$ | $K_{\psi_k}$ |
|--------|------|---------------------|--------------|--------------|
| °C     | % RF | kg/m s °K $10^{-9}$ |              |              |
| 26     | 40   | 3,12                | 3,07         | 3,07         |
| 34     | 40   | 5,09                | 4,51         | 4,51         |
| 15     | 60   | 3,22                | 2,84         | 2,84         |
| 22     | 60   | 4,63                | 4,11         | 3,91         |
| 26     | 60   | 5,83                | 5,18         | 5,18         |
| 30     | 60   | 7,50                | 6,71         | 6,56         |
| 34     | 60   | 9,02                | 7,75         | 7,14         |
| 26     | 75   | 12,02               | 9,37         | 7,45         |
| 30     | 75   | 15,34               | 11,79        | 8,89         |
| 34     | 75   | 16,35               | 14,49        | 12,79        |

Tabel 10. Beregnede gennemsnitsværdier af  $K_{\psi}$ .  
Calculated average values of  $K_{\psi}$ .

Ved regressionsanalyse på alle  $K_{\psi_m}$ -værdierne er følgende ligning, der angiver  $K_{\psi_m}$ 's afhængighed af temperatur  $\vartheta$  og relativ fugtighed  $\varphi$ , fundet:

$$\underline{K_{\psi} = K_{\psi_m} = (11,83 - 58,41\varphi + 57,64\varphi^2 + 0,5083\varphi\vartheta) 10^{-9}}$$

hvor  $\varphi$  er middelfugtindholdet angivet i absolut værdi, og  $\vartheta$  er middeltemperaturniveauet i °C, og hvor  $K_{\psi}$  fås i kg/m s °K.

Ligningen kan anvendes i området  $15^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq 35^{\circ}\text{C}$ ,

$40\% \text{ RF} \leq \varphi \leq 75\% \text{ RF}$ .

På fig. 46 er  $K_{\psi}$  afbildet på samme måde som  $k_T$ , de nedre 90 og 95% konfidensgrænser ved 75% RF er dog udeladt af hensyn til overskueligheden.



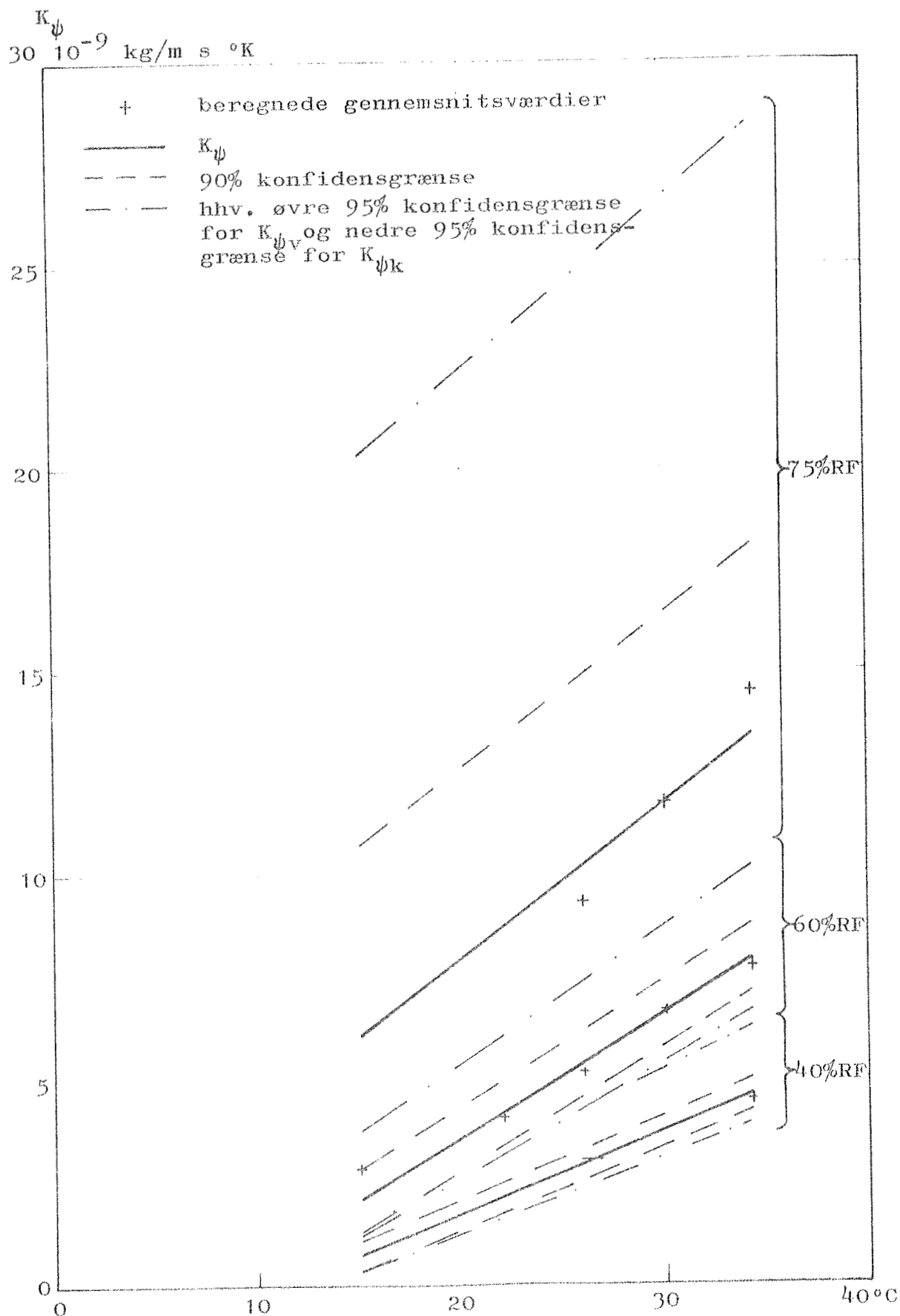


Fig. 46.  $K_{\psi}$  som funktion af middeltemperaturniveau ved 3 forskellige middelfugtniveauer.

$K_{\psi}$  as a function of the mean temperature level at 3 different mean moisture levels.

På fig. 47 er  $K_\psi$  afbildet sammen med de af KOOI [12] fundne værdier og eksempler på de af VOS & TAMMES [28] teoretisk udledte værdier.

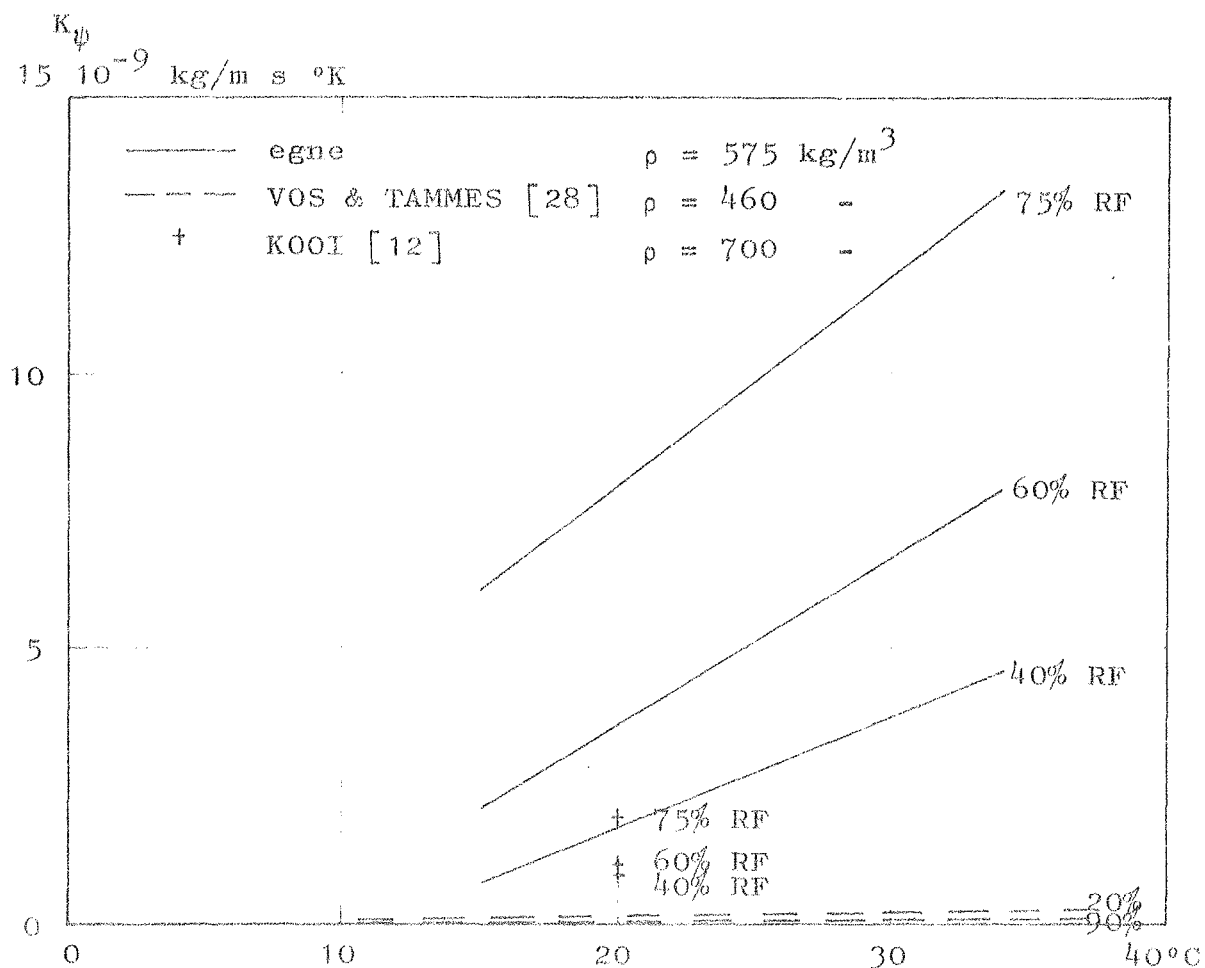


Fig. 47. Sammenligning af  $K_\psi$ -værdier. De af VOS & TAMMES angivne værdier er teoretisk udledte.

Comparison of  $K_\psi$ -values. The values given by VOS & TAMMES are theoretically calculated.

### 9.5. Diffusionstallet $\delta_\psi$

I tabel 11 er de ved de enkelte niveauer beregnede gennemsnitsværdier af  $\delta_\psi$  angivet.

| Niveau |      | $\delta_{\psi_v}$    | $\delta_{\psi_m}$ | $\delta_{\psi_k}$ |
|--------|------|----------------------|-------------------|-------------------|
| °C     | % RF | kg/m s Pa $10^{-11}$ |                   |                   |
| 26     | 40   | 4,07                 | 4,03              | 4,03              |
| 34     | 40   | 4,39                 | 3,88              | 3,88              |
| 15     | 60   | 5,08                 | 4,47              | 4,47              |
| 22     | 60   | 4,63                 | 4,10              | 3,91              |
| 26     | 60   | 4,90                 | 4,36              | 4,36              |
| 30     | 60   | 5,02                 | 4,50              | 4,38              |
| 34     | 60   | 4,95                 | 4,40              | 4,04              |
| 26     | 75   | 8,55                 | 6,54              | 4,94              |
| 30     | 75   | 8,56                 | 6,57              | 4,95              |
| 34     | 75   | 7,62                 | 6,77              | 5,98              |

Tabel 11. Beregnede gennemsnitsværdier af  $\delta_\psi$ .  
Calculated average values of  $\delta_\psi$ .

Ved regressionsanalyse på alle  $\delta_\psi$ -værdierne fås en ligning, der angiver, at  $\delta_\psi$  er afhængig af fugtindholdet, men ikke af temperaturniveauet, d.v.s.:

$$\delta_\psi = \delta_{\psi_m} = (12,06 - 35,14\varphi + 37,19\varphi^2) 10^{-11}$$

hvor  $\varphi$  er middelfugtindholdet angivet i absolut værdi, og hvor  $\delta_\psi$  fås i kg/m s Pa. Ligningen kan anvendes i området:  
 $15^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 35^\circ\text{C}, \quad 40\% \text{ RF} \leq \varphi \leq 75\% \text{ RF}.$

På fig. 48 er  $\delta_\psi$  afbildet på samme måde som  $\delta_T$ .

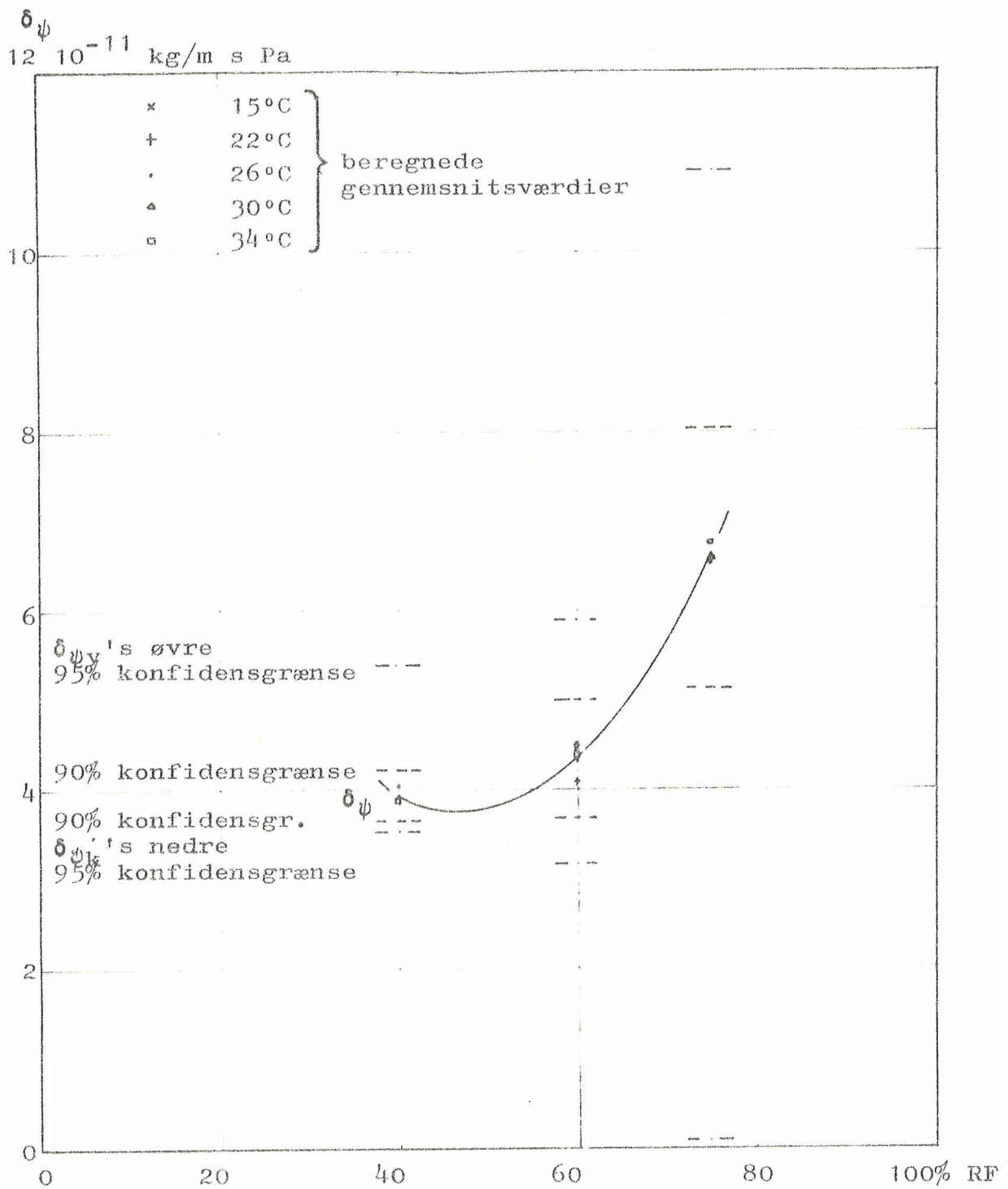


Fig. 48.  $\delta\psi$  som funktion af middelfugtniveau.

$\delta\psi$  as a function of the mean moisture level.

På fig. 49 er  $\delta_\psi$  afbildet sammen med de af HANSON [9] fundne værdier.

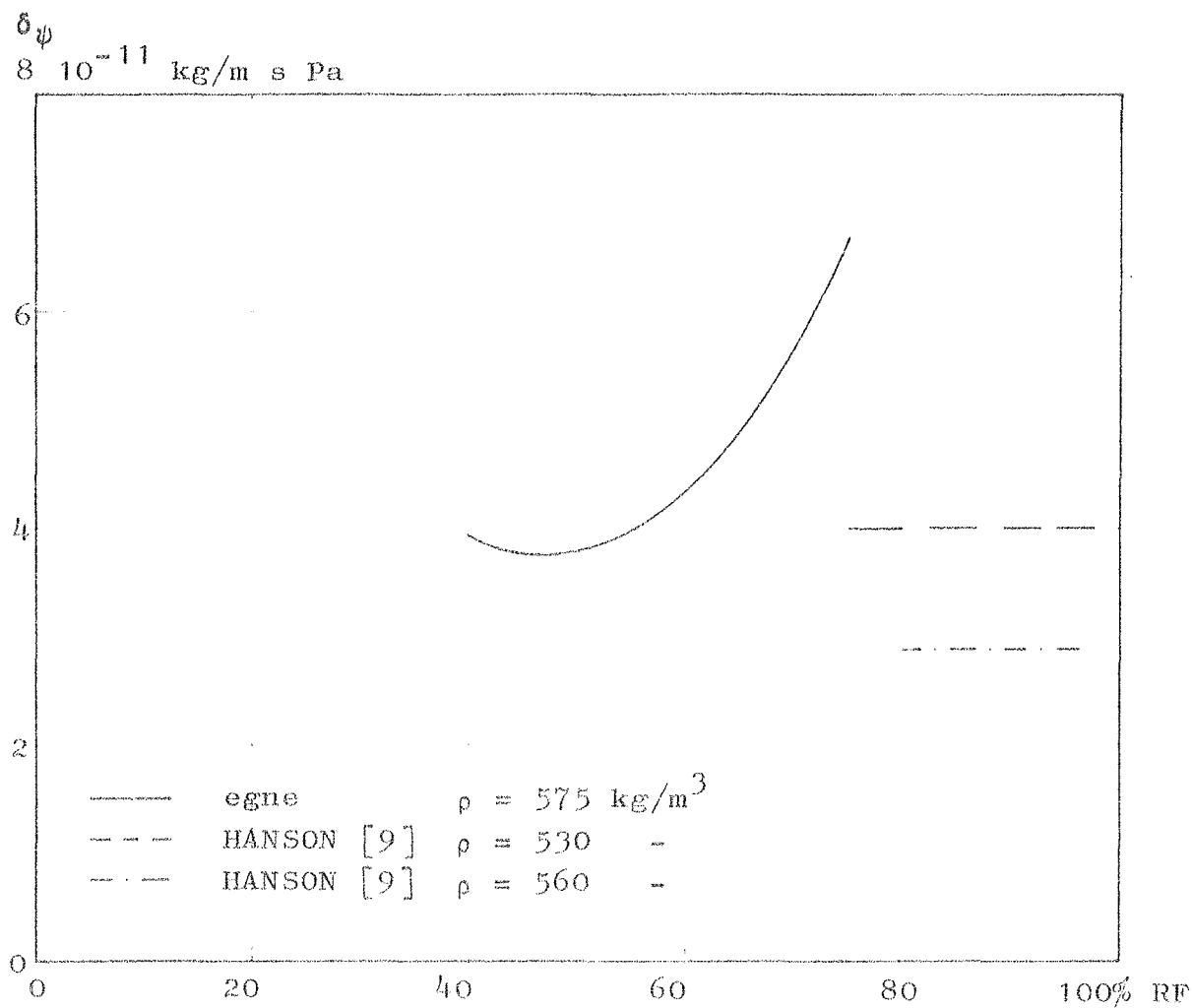


Fig. 49. Sammenligning af  $\delta_\psi$ -værdier.

Comparison of  $\delta_\psi$ -values.

### 9.6. Kapillarledningstallet $k_p$

I tabel 12 er de ved de enkelte niveauer beregnede gennemsnitsværdier af  $k_p$  angivet.

| Niveau |      | $k_{pv}$                              | $k_{pm}$ | $k_{pk}$ |
|--------|------|---------------------------------------|----------|----------|
| °C     | % RF | $\text{kg/m s kg/m}^3 \cdot 10^{-10}$ |          |          |
| 26     | 40   | 3,47                                  | 1,75     | 1,75     |
| 34     | 40   | 1,65                                  | 5,65     | 5,65     |
| 15     | 60   | 2,49                                  | 5,79     | 5,79     |
| 22     | 60   | 10,79                                 | 10,72    | 10,47    |
| 26     | 60   | 4,09                                  | 3,27     | 3,27     |
| 30     | 60   | 7,37                                  | 3,78     | 3,04     |
| 34     | 60   | 9,77                                  | 9,89     | 10,07    |
| 26     | 75   | -0,32                                 | -0,96    | -2,15    |
| 30     | 75   | 15,16                                 | 9,39     | 3,17     |
| 34     | 75   | 5,26                                  | -11,02   | -20,69   |

Tabel 12. Beregnede gennemsnitaværdier af  $k_p$ .  
Calculated average values of  $k_p$ .

$k_p$ -værdierne ved 75% RF varierer så meget, at de ikke bliver medtaget ved den videre bearbejdning. Ved regressionsanalyse på  $k_{tm}$ -værdierne ved 40 og 60% RF fås en ligning, der angiver, at  $k_p$  er afhængig af fugtindholdet, men ikke af temperatur-niveauet, d.v.s.:

$$k_p = k_{pm} = (-3,34 + 17,61\phi) \cdot 10^{-10}$$

hvor  $\phi$  er middelfugtindholdet angivet i absolut værdi, og hvor  $k_p$  fås i  $\text{kg/m s kg/m}^3$ . Ligningen kan anvendes i området:  
 $15^\circ\text{C} \leq \theta \leq 35^\circ\text{C}$ ,  $40\% \text{ RF} \leq \phi \leq 60\% \text{ RF}$ .

På fig. 50 er  $k_p$  afbildet på samme måde som  $\delta_T$ .

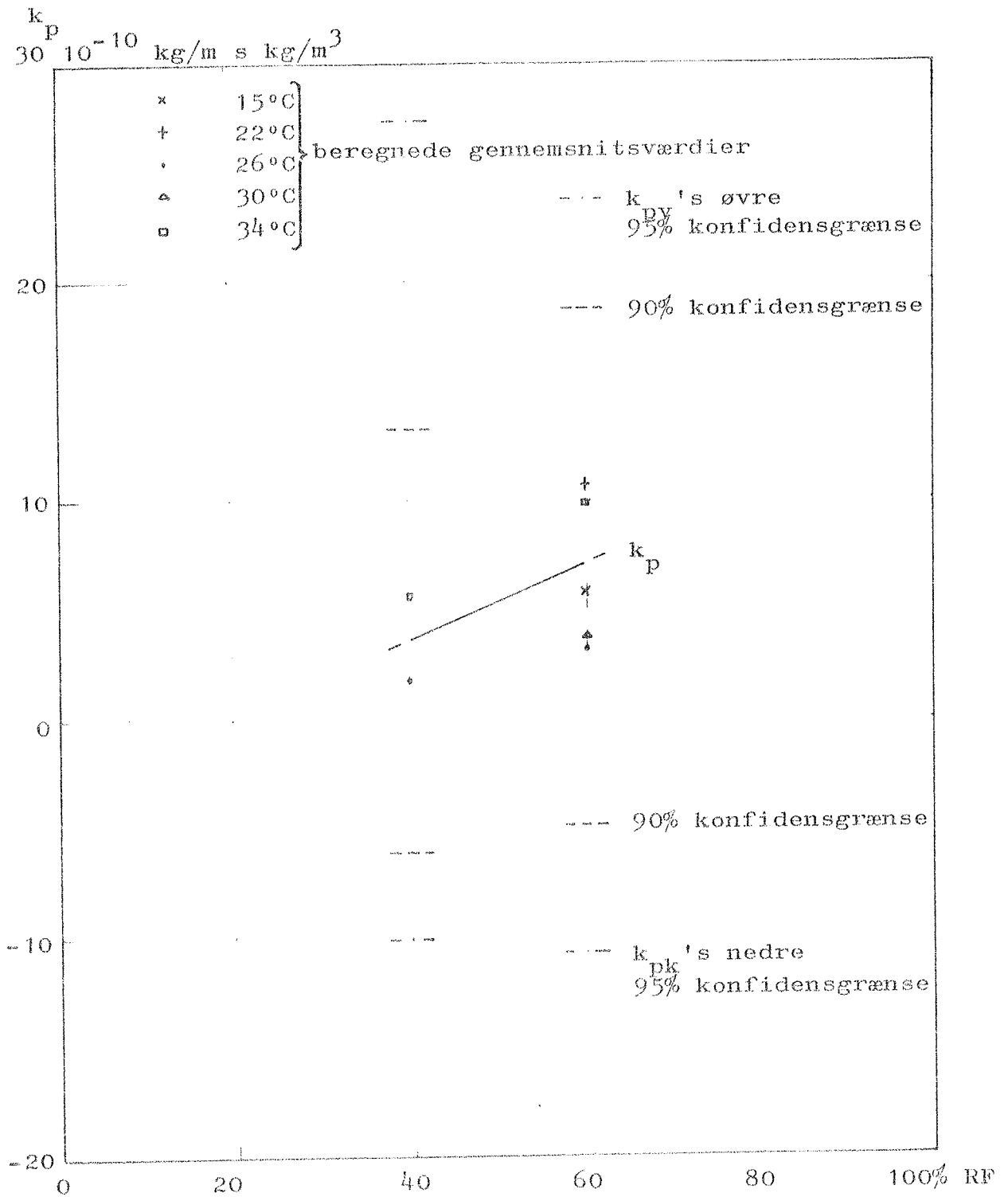


Fig. 50.  $k_p$  som funktion af middelfugtniveau.

$k_p$  as a function of the mean moisture level.

På fig. 51 er  $k_p$  afbildet sammen med de af HANSON [9] fundne værdier.

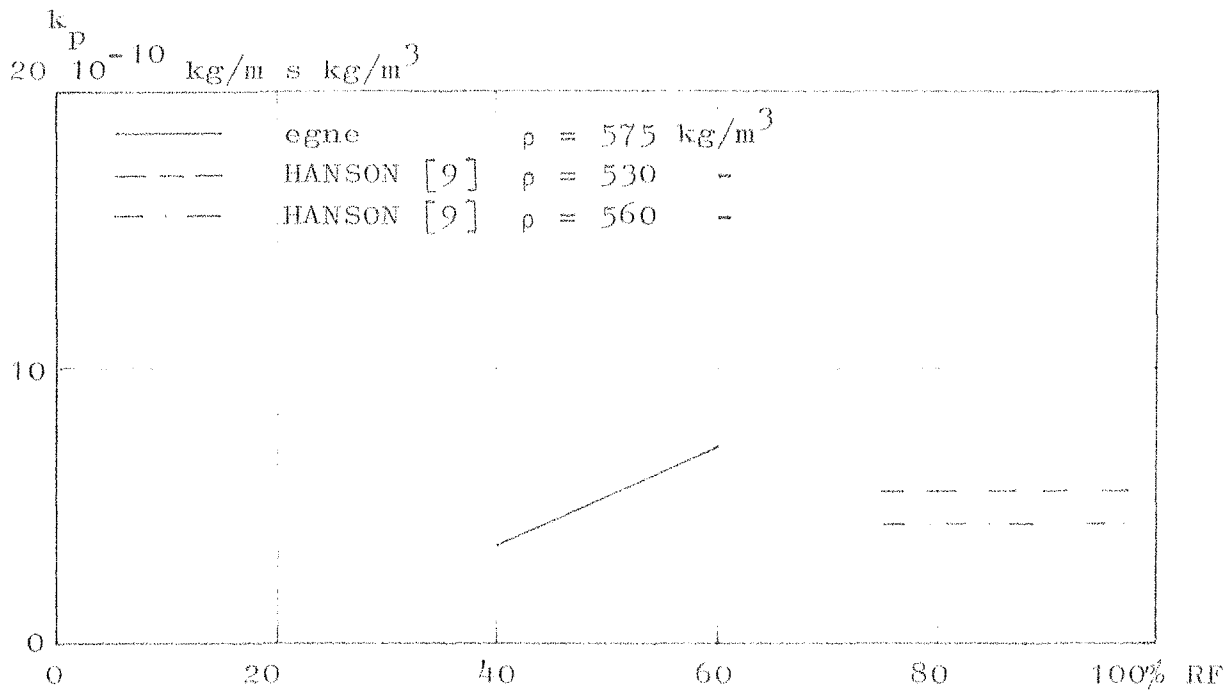


Fig. 51. Sammenligning af  $k_p$ -værdier.

Comparison of  $k_p$ -values.



10. BEKRÆFTELSE AF RELATIONERNE MELLEM FUGTTTRANSPORT-KOEFFICIENTERNE

I afsnit 3.3.2. tabel 1 er relationerne mellem fugtttransportkoefficienterne angivet. For at eftervise disse relationer skal man kende  $(\frac{d\psi}{dp})_T$  og  $(\frac{d\psi}{dT})_p$  ved de ønskede niveauer.

$(\frac{d\psi}{dp})_T$  og  $(\frac{d\psi}{dT})_p$  kan beregnes ud fra følgende:

1.  $\psi = f(\varphi) = \begin{matrix} 0,0006 + 0,067\varphi - 0,055\varphi^2, & 0,20 \leq \varphi \leq 0,56 \\ 0,0006 + 0,067\varphi - 0,055\varphi^2 + 0,288(\varphi - 0,56)^2, & 0,56 \leq \varphi \leq 0,90 \end{matrix}$
2.  $\varphi = \frac{p}{p'}$
3.  $p' = f(\vartheta) = 612 + 44,65\vartheta + 1,333\vartheta^2 + 0,02946\vartheta^3 + 0,0003746\vartheta^4$

Heraf fås:

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\psi}{dp}\right)_T &= \frac{d\psi}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dp} = \\ &\begin{cases} (0,067 - 0,11\varphi) \frac{1}{p'}, & 0,20 \leq \varphi \leq 0,56 \\ (0,067 - 0,11\varphi + 0,576(\varphi - 0,56)) \frac{1}{p'}, & 0,56 \leq \varphi \leq 0,90 \end{cases} \\ \left(\frac{d\psi}{dT}\right)_p &= \frac{d\psi}{d\varphi} \frac{-p}{(p')^2} \frac{dp'}{dT} = \\ &\begin{cases} (0,067 - 0,11\varphi) \frac{-p}{(p')^2} (44,65 + 2,666\vartheta + 0,08838\vartheta^2 + 0,001498\vartheta^3), & 0,20 \leq \varphi \leq 0,56 \\ (0,067 - 0,11\varphi + 0,576(\varphi - 0,56)) \frac{-p}{(p')^2} (44,65 + 2,666\vartheta + 0,08838\vartheta^2 + 0,001498\vartheta^3), & 0,56 \leq \varphi \leq 0,90 \end{cases} \end{aligned}$$

I tabel 13, kolonne 2 og 3, er  $(\frac{d\psi}{dp})_T$  og  $(\frac{d\psi}{dT})_p$  ved de enkelte niveauer angivet.

Ved beregning af de enkelte  $(\frac{d\psi}{dp})_T$  og  $(\frac{d\psi}{dT})_p$ -værdier er for  $\vartheta$  og  $p$  benyttet middelværdierne af  $\vartheta$  og  $p$ -værdierne fra forsøgene ved det pågældende niveau.

| Niveau | $\left(\frac{d\psi}{dt}\right)_T$ | $\left(\frac{d\psi}{dt}\right)_p$ | $\delta_T$                              | $K_p$                                         | $K_\psi = K_p - \delta_T$                     | $\left(\frac{d\psi}{dt}\right)_p$             | $K_\psi$                                      | $\delta_\psi = \delta_T - K_\psi$               | $\left(\frac{d\psi}{dt}\right)_T$               | $\delta_L$                                      |
|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| °C     | $\frac{m^3}{m^2}$<br>Pa           | $\frac{m^3}{m^2}$<br>Pa           | $\frac{kg}{m^2 \cdot Pa}$<br>$10^{-11}$ | $\frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot K}$<br>$10^{-9}$ | $\frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot K}$<br>$10^{-9}$ | $\frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot K}$<br>$10^{-9}$ | $\frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot K}$<br>$10^{-9}$ | $\frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot Pa}$<br>$10^{-11}$ | $\frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot Pa}$<br>$10^{-11}$ | $\frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot Pa}$<br>$10^{-11}$ |
| 26     | 5,8037                            | -5,4816                           | 4,14                                    | -0,08                                         | 3,26                                          | 3,26                                          | 3,07                                          | 4,64                                            | 4,64                                            | 4,03                                            |
| 34     | 4,2681                            | -3,0698                           | 4,15                                    | -0,31                                         | 4,82                                          | 4,82                                          | 4,51                                          | 3,80                                            | 3,80                                            | 3,88                                            |
| 15     | 12,2320                           | -7,9641                           | 5,23                                    | -0,49                                         | 2,92                                          | 2,92                                          | 2,84                                          | 4,48                                            | 4,48                                            | 4,47                                            |
| 22     | 7,2258                            | -7,0135                           | 5,21                                    | -1,11                                         | 3,95                                          | 3,95                                          | 4,11                                          | 4,07                                            | 4,07                                            | 4,10                                            |
| 26     | 6,8527                            | -8,1498                           | 4,71                                    | -0,43                                         | 5,17                                          | 5,17                                          | 5,18                                          | 4,75                                            | 4,75                                            | 4,26                                            |
| 30     | 5,1463                            | -7,6165                           | 4,79                                    | -0,43                                         | 6,66                                          | 6,66                                          | 6,71                                          | 4,70                                            | 4,70                                            | 4,50                                            |
| 34     | 4,3904                            | -7,7460                           | 4,97                                    | -1,01                                         | 7,74                                          | 7,74                                          | 7,75                                          | 4,40                                            | 4,40                                            | 4,40                                            |
| 26     | 23,2823                           | -33,8078                          | 5,30                                    | +1,92                                         | 9,62                                          | 9,62                                          | 9,37                                          | 6,62                                            | 6,62                                            | 6,54                                            |
| 30     | 20,8116                           | -38,0670                          | 8,56                                    | -3,60                                         | 12,06                                         | 12,06                                         | 11,79                                         | 6,68                                            | 6,68                                            | 6,57                                            |
| 34     | 19,2847                           | -42,8576                          | 4,74                                    | +4,35                                         | 14,88                                         | 14,88                                         | 14,49                                         | 6,70                                            | 6,70                                            | 6,77                                            |

Tabel 13. Eksempel på sammenligning af beregnede og ved forsøg fundne fugttransportkoefficienter.

Example of comparison of calculated and experimental moisture transfer coefficients.

I tabel 13, kolonne 4 og 5 er angivet de ved forsøg fundne værdier af  $\delta_T$  og  $K_p$ . I kolonne 6 og 8 er som eksempel angivet de ud fra  $\delta_T$  og  $K_p$  beregnede  $K_\psi$ - og  $\delta_\psi$ -værdier, og endelig er til sammenligning i kolonne 7 og 8 angivet de ved forsøg fundne  $K_\psi$  og  $\delta_\psi$ -værdier.

I tabel 14 er angivet den minimale og maksimale procentiske afvigelse mellem de beregnede fugttransportkoefficienter og de ved forsøg fundne fugttransportkoefficienter svarende til de i tabel 1, side 36 angivne relationer.

|                 | $\delta_T$ og $K_p$ | $K_T$ og $K_\psi$ | $\delta_\psi$ og $K_p$ |
|-----------------|---------------------|-------------------|------------------------|
| $\delta_T =$    |                     | 1 - 38%           | 0,2 - 16%              |
| $K_p =$         |                     | 3 - 200%          | 6 - 32%                |
| $K_T =$         | 1 - 33%             |                   | 1 - 34%                |
| $K_\psi =$      | 0,2 - 3%            |                   | 0 - 4%                 |
| $\delta_\psi =$ | 0,2 - 1,2%          | 0 - 4%            |                        |
| $K_p =$         | 0,7 - 32%           | 4 - 180%          |                        |

Tabel 14. Afvigelserne mellem de beregnede og de ved forsøg fundne fugttransportkoefficienter svarende til relationerne i tabel 1.

The divergences between the calculated moisture transfer coefficients and those found by experiment corresponding to the relations in table 1.

De med relationerne:  $K_p = K_\psi + K_T p \left( \frac{d\psi}{dT} \right)_p$  og  $K_p = K_T + K_\psi \frac{1}{p} \frac{1}{\left( \frac{d\psi}{dT} \right)_p}$  beregnede værdier af  $K_p$  og  $K_\psi$  afviger ved nogle niveauer meget fra de ved forsøg fundne værdier, for da  $\left( \frac{d\psi}{dT} \right)_p$  er negativ, bliver  $K_p$  og  $K_\psi$  bestemt som små differenser mellem 2 store tal, d.v.s. en relativ lille usikkerhed på de 2 store tal kan give en relativ stor usikkerhed på den lille differens. Når man tager dette i betragtning, må det være rimeligt at sige, at de i tabel 1 angivne relationer mellem fugttransportkoefficienterne er forsøgsmæssigt bekræftet.

## 11. BEDØMMELSE AF FØRSØGSOPSTILLINGEN

Som nævnt i afsnit 4.2. kan forsøgsopstillingen ikke anvendes ved alle temperatur- og fugtniveauer. Men ud fra temperaturmålinger på de udførte forsøg er det muligt at skønne over varmemodstanden mellem vandet i radiatorerne og prøvelegemet og dermed skønne over det fugtområde, der kan udføres forsøg i, når man kender det ønskede temperaturniveau og den ønskede temperaturdifferens over prøven.

Det er forholdene på den kolde side af prøvelegemet, der stiller betingelser, og det er derfor varmemodstandstallet  $m_k$  mellem vandet i den kolde radiator og prøvens kolde overflade, der skal benyttes. Når vandets temperatur er  $\vartheta_1$ , og prøvens overfladetemperaturer er henholdsvis  $\vartheta_2$  og  $\vartheta_3$ , bliver varmestrommen:

$$q = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{m_k} = \frac{\vartheta_3 - \vartheta_2}{m_p}$$

hvor  $m_p$  er prøvens varmemodstandstal  $= \frac{1}{\lambda} = \frac{0,05 \text{ m}}{0,16 \text{ W/m}^\circ\text{C}} = 0,31 \frac{\text{m}^2^\circ\text{C}}{\text{W}}$

Ved forsøg ved  $26^\circ\text{C}$  og 75% RF er følgende  $\vartheta$ -værdier målt:

$$\vartheta_1 = 21,9^\circ\text{C}, \quad \vartheta_2 = 23,9^\circ\text{C} \quad \text{og} \quad \vartheta_3 = 28,1^\circ\text{C}$$

Heraf fås:

$$q = \frac{\vartheta_3 - \vartheta_2}{m_p} = \frac{28,1 - 23,9}{0,31} = 13,55 \text{ W/m}^2, \quad \text{og heraf:}$$

$$m_k = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{q} = \frac{23,9 - 21,9}{13,55} = 0,15 \text{ m}^2^\circ\text{C/W}$$

Man kan nu ved et givet temperaturniveau skønne over det fugtområde, inden for hvilket der kan udføres forsøg.

Den øvre grænse er bestemt af, at radiatorens temperatur skal være højere end boblekarrets temperatur. En rimelig sikkerhed vil være  $2^\circ\text{C}$ , da såvel prøvens som radiatorvandets temperatur kan svinge, specielt i indreguleringsperioden. Hvis man ønsker en temperaturdifferens over prøven på  $4^\circ\text{C}$ , er det hertil svarende maksimale fugtniveau beregnet og angivet på fig. 52 i afhængighed af temperaturniveauet.

Den nedre grænse er bestemt af, at boblekarrets temperatur skal være over frysepunktet, og det vil være rimeligt at sætte dugpunktstemperaturen til  $2^{\circ}\text{C}$ . Hvis man som før ønsker, at radiatorvandets temperatur er  $2^{\circ}\text{C}$  højere end boblekarrets, og at temperaturdifferensen over prøven er  $4^{\circ}\text{C}$ , er det hertil svarende minimale fugtniveau beregnet og angivet på fig. 52 i afhængighed af temperaturniveauet

Middelfugtniveau

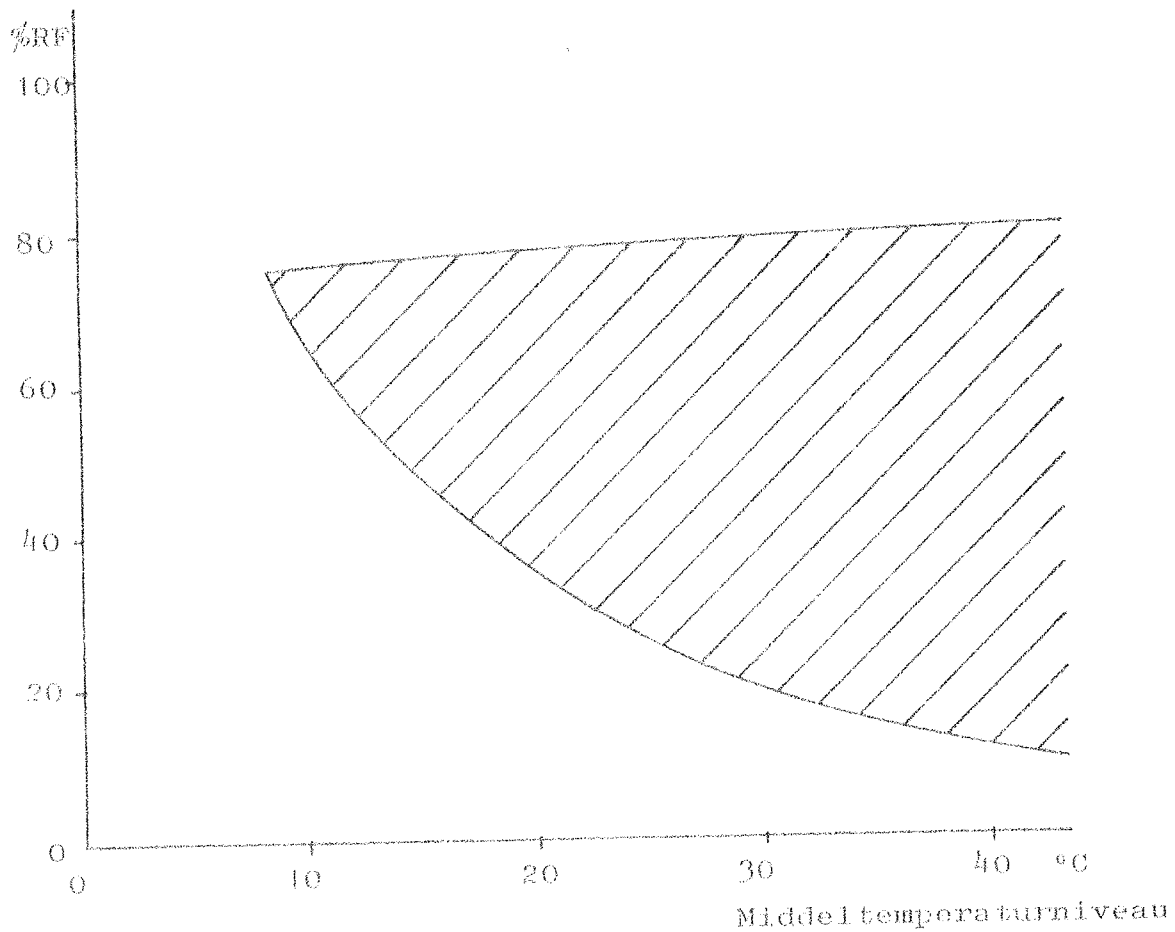


Fig. 52. Fugt- og temperaturområde, inden for hvilket der kan udføres forsøg med den eksisterende forsøgsopstilling.

Moisture and temperature area where experiments can be carried out with the existing test setup.

Hvis der skal kunne udføres forsøg i et større område, må man mindske varmemodstandstallet  $m_k$ , og der er her to muligheder:

1. man kan ændre radiatoren, så man får et mindre varmemodstandstal. Et forslag til ændring af radiatoren er vist på fig. 53.

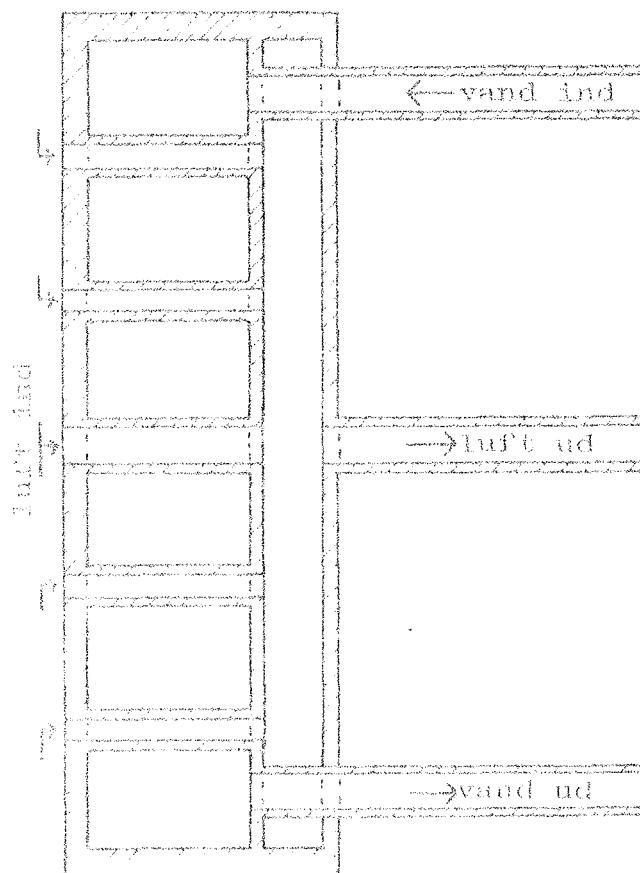


Fig. 53. Forslag til ændring af radiatoren.

Proposal for alteration of the radiator.

2. man kan køle luften, der blæses forbi prøvens overflade, så meget som muligt, men den skal dog hele tiden have en temperatur, der er et par grader højere end dens dugpunkt, for at undgå kondensation.

Disse to metoder giver ikke nogen særlig stor udvidelse af forsøgsområdet. Hvis man vil foretage forsøg i det lave temperaturområde og ved lave fugtniveauer, skal man benytte saltopløsninger i boblekarrerne. Herved bliver udførelsen af forsøgene kompliceret af, at man ikke kan måle luftens fugtniveau som en ren temperaturmåling.

## 12. KONKLUSION

Det er i det her udførte arbejde vist, at man ikke kan finde en transportligning, der samtidig med, at den giver den totale fugttransport, også angiver de enkelte typer transportkræfters (potentialers) andele af den totale fugttransport.

Der er derfor udledt 3 fænomenologiske ligninger, hvormed man kan beregne den totale fugttransport, men ligningerne angiver ikke, hvilke kræfter der er årsag til fugttransporten. De 3 ligninger er:

$$g = -\delta_T \text{ grad } p - K_p \text{ grad } T \quad (17)$$

$$g = -k_T \rho \text{ grad } \psi - K_\psi \text{ grad } T \quad (18)$$

$$g = -\delta_\psi \text{ grad } p - k_p \rho \text{ grad } \psi \quad (19)$$

Alle tre ligninger kan benyttes for alle værdier af temperatur- og fugtniveauer, og der er udledt relationer til beregning af fugttransportkoefficienterne i en ligning ud fra kendskabet til koefficienterne i en anden af ligningerne. Disse relationer er forsøgsmæssigt bekræftet.

I området  $15^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 34^\circ\text{C}$  og  $40\% \text{ RF} \leq \varphi \leq 75\% \text{ RF}$  er der udført forsøg til bestemmelse af fugttransportkoefficienterne  $\delta_T$ ,  $K_p$ ,  $k_T$ ,  $K_\psi$ ,  $\delta_\psi$  og  $k_p$ .

Ved regressionsanalyse på forsøgsresultaterne er polynomier, der angiver fugttransportkoefficienternes afhængighed af temperatur- og fugtniveau bestemt.

Det viser sig, at alle koefficienterne er afhængige af fugtniveauet, medens kun  $k_T$  og  $K_\psi$  også er signifikant afhængige af temperaturniveauet.

Fugttransportkoefficienterne er ikke alle bestemt lige godt ved de her udførte forsøg. Usikkerhederne på bestemmelsen af  $\delta_T$  og  $\delta_\psi$  er små, usikkerhederne på bestemmelsen af  $k_T$  og  $K_\psi$  er nogenlunde, men usikkerhederne på bestemmelsen af  $K_p$  og  $k_p$  er meget store, specielt på resultaterne fra forsøgene ved 75% RF, og disse resultater er derfor ikke medtaget.

De ved regressionsanalysen fundne polynomier til bestemmelse af fugttransportkoefficienterne er nedenfor angivet, samt de fugtområder indenfor hvilke polynomierne med rimelighed kan anvendes:

%RF

$$\delta_T = (5,24 - 7,326\varphi + 11,48\varphi^2) \cdot 10^{-11} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m s Pa}} \right] \quad 40 \leq \varphi \leq 75$$

$$K_p = (0,899 - 2,746\varphi) \cdot 10^{-9} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m s } ^\circ\text{K}} \right] \quad 40 \leq \varphi \leq 60$$

$$k_T = (30,77 + 0,07218\vartheta^2 - 1,57\vartheta\varphi) \cdot 10^{-11} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m s kg/m}^3} \right] \quad 40 \leq \varphi \leq 60$$

$$K_\psi = (11,83 - 58,41\varphi + 57,64\varphi^2 + 0,5083\vartheta\varphi) \cdot 10^{-9} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m s } ^\circ\text{K}} \right] \quad 40 \leq \varphi \leq 75$$

$$\delta_\psi = (12,06 - 35,14\varphi + 37,19\varphi^2) \cdot 10^{-11} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m s Pa}} \right] \quad 40 \leq \varphi \leq 75$$

$$k_p = (-3,34 + 17,61\varphi) \cdot 10^{-10} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m s kg/m}^3} \right] \quad 40 \leq \varphi \leq 60$$

$\vartheta$  skal indsættes i  $^\circ\text{C}$  og  $\varphi$  i absolut værdi. Ligningerne kan anvendes for  $15^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 34^\circ\text{C}$ .



### 13. APPENDIX

#### 13.1. Matematiske relationer mellem fugttransportkoefficienter

Udledning af relationerne mellem fugttransportkoefficienterne i følgende 3 ligninger:

$$g = -\delta_T \text{ grad } p - K_p \text{ grad } T \quad (A1)$$

$$g = -k_T \rho \text{ grad } \psi - K_\psi \text{ grad } T \quad (A2)$$

$$g = -\delta_\psi \text{ grad } p - k_p \rho \text{ grad } \psi \quad (A3)$$

(A1) og (A2)  $\Rightarrow$

$$\delta_T \text{ grad } p + (K_p - K_\psi) \text{ grad } T = k_T \rho \text{ grad } \psi \quad (A4)$$

(A1) og (A3)  $\Rightarrow$

$$K_p \text{ grad } T + (\delta_T - \delta_\psi) \text{ grad } p = k_p \rho \text{ grad } \psi \quad (A5)$$

(A4) ganges med  $k_p$  og (A5) med  $k_T$ , derved bliver højre siderne ens, og af venstre siderne fås:

$$k_p [\delta_T \text{ grad } p + (K_p - K_\psi) \text{ grad } T] = k_T [K_p \text{ grad } T + (\delta_T - \delta_\psi) \text{ grad } p]$$

der kan omskrives til:

$$[\delta_T k_p - (\delta_T - \delta_\psi) k_T] \text{ grad } p = [K_p k_T - (K_p - K_\psi) k_p] \text{ grad } T \quad (A6)$$

(A2) og (A3)  $\Rightarrow$

$$K_\psi \text{ grad } T + (k_T \rho - k_p \rho) \text{ grad } \psi = \delta_\psi \text{ grad } p \quad (A7)$$

(A4) leddene byttes om til:

$$k_T \rho \text{ grad } \psi - (K_p - K_\psi) \text{ grad } T = \delta_T \text{ grad } p \quad (A8)$$

(A7) ganges med  $\delta_T$  og (A8) med  $\delta_\psi$ , herved bliver højre siderne ens, og af venstre siderne fås:

$$\delta_T [K_\psi \text{ grad } T + (k_T \rho - k_p \rho) \text{ grad } \psi] = \delta_\psi [k_T \rho \text{ grad } \psi - (K_p - K_\psi) \text{ grad } T]$$

der kan omskrives til:

$$[\delta_T K_\psi + \delta_\psi (K_p - K_\psi)] \text{ grad } T = [\delta_\psi k_T \rho - \delta_T (k_T \rho - k_p \rho)] \text{ grad } \psi \quad (A9)$$

For at ligning (A6) og (A9) kan være tilfredsstillet for alle værdier af grad  $p$ ,  $T$  og  $\psi$  skal de "firkantede parenteser" være lig med 0, heraf fås følgende 3 relationer ((A9)'s højre [ ] = (A6)'s venstre [ ]):

$$\underline{\delta_T k_p = (\delta_T - \delta_\psi) k_T}$$

$$\underline{K_p k_T = (K_p - K_\psi) k_p}$$

$$\underline{\delta_T K_\psi = (K_\psi - K_p) \delta_\psi}$$

### 13.2. Fysiske relationer mellem fugttransportkoefficienterne

Fugttransportkoefficienterne i to af de tre fugttransportligninger kan beregnes ud fra fugttransportkoefficienterne i den tredje fugttransportligning, når man kender følgende fysiske sammenhæng:

$$d\psi = \left(\frac{d\psi}{dT}\right)_p dT + \left(\frac{d\psi}{dp}\right)_T dp \quad (A10)$$

Indsættes (A10) i (A2) fås:

$$g = -k_T \rho \left[ \left(\frac{d\psi}{dT}\right)_p \text{grad } T + \left(\frac{d\psi}{dp}\right)_T \text{grad } p \right] - K_\psi \text{grad } T =$$

$$g = -k_T \rho \left(\frac{d\psi}{dp}\right)_T \text{grad } p - \left[ k_T \rho \left(\frac{d\psi}{dT}\right)_p + K_\psi \right] \text{grad } T ,$$

der sammenholdt med (A1) giver:

$$\delta_T = k_T \rho \left(\frac{d\psi}{dp}\right)_T \quad (A11)$$

og

$$K_p = k_T \rho \left(\frac{d\psi}{dT}\right)_p + K_\psi \quad (A12)$$

Indsættes (A10) i (A3) fås:

$$g = -\delta_\psi \text{grad } p - k_p \rho \left[ \left(\frac{d\psi}{dT}\right)_p \text{grad } T + \left(\frac{d\psi}{dp}\right)_T \text{grad } p \right] \Rightarrow$$

$$g = -[\delta_\psi + k_p \rho \left(\frac{d\psi}{dp}\right)_T] \text{grad } p - k_p \rho \left(\frac{d\psi}{dT}\right)_p \text{grad } T ,$$

der sammenholdt med (A1) giver:

$$\delta_T = \delta_\psi + k_p \rho \left( \frac{d\psi}{dp} \right)_T \quad (A13)$$

og

$$K_p = k_p \rho \left( \frac{d\psi}{dT} \right)_p \quad (A14)$$

Af ligning (A11), (A12), (A13) og (A14) kan udledes relationer for  $k_T$ ,  $K_\psi$ ,  $\delta_\psi$  og  $k_p$ . Disse relationer er angivet i tabel 1 (side 36).

## RESUMÉ

Det foreliggende arbejde er delt i to hovedafsnit, et teoretisk, der behandler fugttransport i porøse byggematerialer, specielt i gasbeton, og et forsøgsteknisk, der omhandler de forsøg, der er udført vedrørende fugttransport i gasbeton.

I et indledende afsnit omtales kort de parametre, med hvilke luftens temperatur- og fugttilstand kan angives. Desuden omtales gasbetonens porestruktur, da denne har betydning for fugttransporten, samt de forskellige typer fugtbindinger, og sluttelig sorptionskurven, der angiver materialets fugtindhold i afhængighed af luftens relative luftfugtighed.

I det teoretiske afsnit om fugttransport betragtes de forskellige typer fugttransporter opdelt efter, hvilke kræfter (potentialer) der driver fugten. De vigtigste af de enkelte typer fugttransporter forsøges sammenkædet til en 3-leddet ligning i grad  $p$ , grad  $T$  og grad  $\psi$ , hvor  $p$  er damptrykket,  $T$  er temperaturen og  $\psi$  er fugtindholdet. Ligningen skulle både give den totale fugttransport og angive de enkelte typer deltransporter, men dette er ikke muligt, da den 3-leddede ligning er overbestemt. Der er derfor udledt 3 fænomenologiske ligninger, hvormed man kan beregne den totale fugttransport. Disse ligninger er:

$$g = -\delta_T \text{ grad } p - K_p \text{ grad } T \quad (17)$$

$$g = -k_T \rho \text{ grad } \psi - K_\psi \text{ grad } T \quad (18)$$

$$g = -\delta_\psi \text{ grad } p - k_p \rho \text{ grad } \psi \quad (19)$$

hvor  $\delta_T$ ,  $K_p$ ,  $k_T$ ,  $K_\psi$ ,  $\delta_\psi$  og  $k_p$  er fugttransportkoefficienter. Man kan ikke umiddelbart foretrække den ene ligning frem for de andre, og hvilken man vil vælge i det enkelte tilfælde, vil ofte afhænge af, hvilke af gradienterne man kender med den bedste nøjagtighed. Der er udledt relationer, med hvilke man ud fra kendskabet til koefficienterne i en af ligningerne kan beregne koefficienterne i de to andre.

Afsnittet slutter med en omtale af, hvilke ligninger andre forfattere har brugt, samt en oversigt over de af dem angivne

værdier for fugttransportkoefficienterne. Der er foretaget enkelte beregninger af fugtsrømmen gennem en gasbetonplade til belysning af, hvilke resultater man opnår ved anvendelse af de forskellige sæt af koefficienter.

Formålet med forsøgene er at finde de i ligningerne (17)-(19) benyttede fugttransportkoefficienter i afhængighed af middeltemperatur- og middelfugtniveau for gasbeton.

Ved Laboratoriet for Varmeisolering er der opført et forsøgsapparat bestående af 6 ens borde, der hver har plads til 3 prøvelegemer. Prøvelegemerne er af gasbeton og cylindriske med en diameter på 121 mm og en højde på 50 mm.

I forsøgsapparatet bliver prøverne anbragt som adskillelse mellem to ønskede atmosfærer med en damptryks-, temperatur- og/eller fugtindholdsgradient over prøven, og man kan så måle de til gradienterne svarende fugttransporter. De tre prøver i et bord er anbragt under ens betingelser og giver derved mulighed for beregning af en middelværdi, som bedre angiver den virkelige værdi end et enkelt resultat ville gøre, samt mulighed for at skønne over forsøgsusikkerhederne.

Ud fra resultaterne fra to forsøg ved samme temperatur- og fugtniveau, men med forskellige gradienter over prøven, kan man beregne de i ligning (17)-(19) angivne fugttransportkoefficienter ved de pågældende niveauer. Koefficienterne er beregnet ved ti niveauer inden for området:  $15^{\circ}\text{C} = \vartheta = 34^{\circ}\text{C}$  og  $40\% \text{ RF} = \varphi = 75\% \text{ RF}$ , hvor  $\vartheta$  er prøvens middeltemperatur og  $\varphi$  er den relative luftfugtighed, der svarer til prøvens middelfugtindhold.

Ved regressionsanalyse på forsøgsresultaterne er fugttransportkoefficienternes afhængighed af temperatur- og fugtniveau fundet. Samtidig er det polynomium, der, ud fra kravet om minimum af summen af afvigelseernes kvadrat, bedst angiver de enkelte fugttransportkoefficienter som funktion af temperatur- og fugtniveau, bestemt. De fundne polynomier er angivet for hver enkelt fugttransportkoefficient, desuden er koefficienternes temperatur- og fugtafhængighed optegnet sammen med deres kon-

fidensgrænser og sammen med eksempler på hvilke værdier andre forfattere har fundet for samme koefficienter.

Alle 6 fugttransportkoefficienter er afhængig af fugtniveauet, for stigende fugtniveau stiger  $\delta_T$ ,  $K_\psi$ ,  $\delta_\psi$  og  $k_p$ , samt  $K_p$  numerisk, medens  $k_T$  falder. Men det er kun  $k_T$  og  $K_\psi$ , der er signifikant afhængig af temperaturniveauet, idet de begge stiger med stigende temperaturniveau.

Endelig er der et afsnit med bedømmelse af forsøgsopstillingen, hvori der dels er foretaget en overslagsmæssig beregning af det fugt- og temperaturområde, inden for hvilket der kan udføres forsøg, og dels givet forslag til eventuelle forbedringer af forsøgsopstillingen.

## SUMMARY

The present study is divided into two main sections, a theoretical part dealing with moisture transfer in porous building materials, particularly in cellular concrete, and an experimental part describing experiments concerning moisture transfer in cellular concrete.

In an introductory chapter are mentioned the parameters by which the temperature and moisture conditions of the air can be given. Furthermore, the internal structure of cellular concrete is mentioned, as this is influencing the moisture transfer, and the various types of moisture binding, and at last the sorption isotherm giving the moisture content of the material in dependence of the relative humidity of the air.

In the theoretical section on moisture transfer the various types are examined according to the power (potentials) actuating the moisture. Attempts have been made to link together the most important of the single types of moisture transfer into a trinomial equation in grad  $p$ , grad  $T$  and grad  $\psi$ , where  $p$  is the vapour pressure,  $T$  is the temperature and  $\psi$  is the moisture content. The equation should give both the total moisture transfer and the single types of part-transfer, but this is not possible as the trinomial equation is overdetermined. Therefore three phenomenological equations are deduced, by which the total moisture transfer can be calculated. These equations are:

$$g = -\delta_T \text{ grad } p - K_p \text{ grad } T \quad (17)$$

$$g = -k_T \rho \text{ grad } \psi - K_\psi \text{ grad } T \quad (18)$$

$$g = -\delta_\psi \text{ grad } p - k_p \rho \text{ grad } \psi \quad (19)$$

where  $\delta_T$ ,  $K_p$ ,  $k_T$ ,  $K_\psi$ ,  $\delta_\psi$  and  $k_p$  are the moisture transfer coefficients. One equation cannot be preferred directly rather than the others, and which one is chosen in the single case will often be dependent of the gradients known with the best

accuracy. Relations are obtained by means of which the coefficients in two of the equations can be calculated from the knowledge of the coefficients of the third equation.

The section is finished by mentioning equations used by other authors with a summary of the values given for the moisture transfer coefficients. Single calculations of the moisture flow through a cellular concrete plate are carried out to show the results which can be obtained by using different sets of coefficients.

The purpose of the experiments is to find the moisture transfer coefficients used in the equations (17) - (19) in dependence of the mean temperature and mean moisture level for cellular concrete.

At the Thermal Insulation Laboratory a test apparatus has been constructed consisting of six equal tables, each holding three specimens. The specimens are made of cellular concrete and are cylindrical with a diameter of 121 mm and a height of 50 mm.

In the test apparatus the specimens are placed as dissociation between two water atmospheres giving a gradient of the vapour pressure, temperature and/or moisture content over the specimen, whereby the moisture transfer corresponding to the gradients can be measured. The three specimens in one table are placed under equal conditions thereby giving the possibility of calculating a mean value as a better expression of the real value than one single result would do, and the possibility of estimating the experimental uncertainties.

From the results of two experiments at the same temperature and moisture level but with different gradients over the specimen, the moisture transfer coefficients in the equations (17)-(19) can be calculated at the levels in question. The coefficients are calculated at ten levels within the area:  $15^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq 34^{\circ}\text{C}$  and  $40\% \text{ RF} \leq \varphi \leq 75\% \text{ RF}$ , where  $\vartheta$  is the mean temperature of the specimen and  $\varphi$  is the relative humidity corresponding to the mean moisture content of the specimen.



The dependence of temperature and moisture level for the transfer coefficients is found by regression analysis on the experimental result. The dependence is expressed in a polynomial giving the test fit, and are calculated for each of the coefficients. Besides the dependence of temperature and moisture for the coefficients is illustrated together with the confidence limits and together with values found by other authors for the same coefficients.

All six moisture transfer coefficients are dependent of the moisture level, for rising moisture level  $\delta_T$ ,  $K_\psi$ ,  $\delta_\psi$ ,  $k_p$  and  $K_p$  (numerical) are rising, while  $k_T$  is falling. But only  $k_T$  and  $K_\psi$  are significant dependent of the temperature level, both of them are rising with rising temperature level.

Finally a section containing considerations of the test setup an estimated calculation of the moisture and temperature area within which experiments can be carried out, and proposals for improvements of the test setup.

LITTERATURFÖRTEGNELSE

- [1] ADAMSON, B., AHLGREN, L., BERGSTRÖM, S.G. og NEVANDER, L.E.: Fukt. Statens råd för byggnadsforskning, programskrift 12. 1970.
- [2] AHLGREN, L.: Fuktfixering i poröse byggnadsmaterial. Lund 1972.
- [3] AHLGREN, L.: Grundläggande lagar för fuktvandring i porösa byggnadsmaterial. Tekniska Högskolan i Lund, Institutionen för byggnadsteknik, intern rapport nr. 2, 1966.
- [4] AHLGREN, L.: Measurements of vapour transfer. Preliminary report, Avd. för Byggnadsmateriallära, Lund 1972.
- [5] ASHRAE: Handbook of Fundamentals 1972.
- [6] ASTM Standards (published by the American Society for Testing and Materials) 1967.
- [7] BARRIE, J.A. og PLATT, B.: The Diffusion and Clustering of Water Vapour in Polymers. POLYMER, vol. 4, 1963.
- [8] BOMBERG, M.: Water flow through porous materials. Part I-III, Report 19-21, Byggnadsteknik, LTH, Lund 1971, 1972.
- [9] HANSON, R.: Fukttegenskaper hos lättbetong och tegel. Byggmästaren B 3, 1958.
- [10] HARSAAE, E.: Statistisk försøgsmetodik. Teknisk Forlag, 1966.
- [11] KJÆR, ALICE, og CHRISTENSEN, G.: Measurement of Moisture Transfer in Building Materials. SBI-rapport nr. 79, 1971.
- [12] van der KOOI, JAN: Moisture transport in cellular concrete roofs. 1971.
- [13] KRISCHER, O.: Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer Verlag, 1963.

- [14] KÜNZEL, H. og BERNHARDT, P.: Wasserdampf-Durchlässigkeit von Baustoffen bei verschiedenen Feuchtigkeitszuständen. Berichte aus der Bauforschung, Heft 80, 1972.
- [15] LÜCK, W.: Feuchtigkeit. Wien 1964.
- [16] LUND-HANSEN, P.: Fugttransport i byggematerialer. Danmarks tekniske Højskole, Laboratoriet for varmeisolerings, meddelelse nr. 15, 1967.
- [17] LYKOW, A.W.: Heat and Mass Transfer in Capillary-porous Bodies. London 1966.
- [18] LYKOW, A.W.: Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern. Berlin 1958.
- [19] MADSEN, K. og BRUUN NIELSEN, H.: Løsning af lineære ligningssystemer. Hæfte 23, Numerisk Institut, Danmarks tekniske Højskole, 1971.
- [20] van MINNEN & VOS, B.H.: Distribution and transport of water in porous materials. Report no. II-8/23 N 5, March 1965, TNO, Holland.
- [21] NIELSEN, A.F.: Gamma-Ray-Attenuation used for Measuring the Moisture Content and Homogeneity of Porous Concrete. Building Science, vol. 7, 1972.
- [22] ROUNSLEY, R.R.: Multimolecular absorption equation. J. of Am. Inst. Chem. Eng., 1961.
- [23] SANDBERG, P.I.: Samtidig ångdiffusion och luftströmning genom ett poröst material. Rapport nr. 27, Institutionen för Byggnadsteknik, Lund 1971.
- [24] SNECK, T., KINNUNEN, L. & OINONEN, H.: Measurements of pore size distribution of porous materials. The State Institute for Technical Research, intern foreløbig rapport, Finland 1966.
- [25] TVEIT, A.: Fukt og fukttransport i porøse materialer. Norges Byggeforskningsinstitutt, Rapport 39, Oslo 1964.

- [26] TVEIT, A.: Measurements of moisture sorption and moisture permeability of porous materials. Norwegian Building Research Institute, Oslo, 1966.
- [27] VOS, B.H.: Condensation in Structures. Report no. BJ-67-33/23p14, March 1967, TNO, Holland.
- [28] VOS, B.H. og TAMMES, E.: Moisture and moisture transfer in porous materials. TNO report no. BI-69-96/03.1.001, 1969.