

SBI-publ.

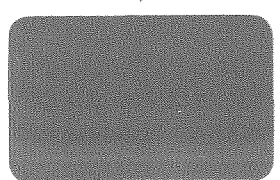
UDK 532.685  
SfB Aa4

# Fukt og fukttransport i porøse materialer

*Moisture and Migration of Moisture in Porous Materials*  
*Norwegian Text with English Summary*

ANNANIAS TVEIT

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT · SBI-RAPPORT 50  
SAMTIDIG UDSENDT SOM RAPPORT 39 FRA NORGES BYGGEFORSKNINGSINSTITUT  
I KOMMISSION HOS TEKNISK FORLAG · KØBENHAVN 1964



Statens Byggeforskningsinstitut  
biblioteksoksempel 2

## SBI-anvisninger

er byggeforskningens resultater i praktisk form til brug ved projektering og byggeri. Fortegnelsen omfatter kun anvisninger, der endnu ikke er udsolgt. Priserne er incl. oms.

6. *Fugt i nye huse*. Plakat til ophængning. 1949. 10. oplag 1960. A4. 100 stk: 5.50 kr.
8. *Brug og valg af betonblandere*. Niels H. Krarup og K. Malmstedt-Andersen. 1951. 66 s. A5. 3.25 kr.
10. *Kunstig belysning på byggepladser*. Jens Thorsen og Mogens Voltelen. 1951. 2. oplag 1953. 20 s. A5. 2.25 kr.
13. *Byggeprisens bestanddele beregnet ved et 3-etagers boligbyggeri i provinsen i april 1951*. 1952. 5. oplag 1960. 28 s. A5. 2.25 kr.
15. *Dækforme i boligbyggeri*. 1955. 62 s. A5. 3.25 kr.
16. *Mekaniseret håndværktøj på byggepladsen*. Fleming Nielsen. 1955. 48 s. A5. 4.50 kr.
17. *Betonstøbning om vinteren*. Poul Nerenst, Erik Rastrup og Gunnar M. Idorn. 1953. 2. reviderede udgave 1958. 91 s. A5. 8.75 kr.
20. *Undgå fugt*. Folder til ophængning. 1954. 3 s. A6. 1 stk: 0.40 kr. 100 stk: 26.75 kr.
21. *Hvilket dæk?* Folder til ophængning. 1954. 20 s. A5. 2.75 kr.
24. *Udarbejdelse af instruks for varmemestre*. Poul Becher og Frederik Olsen. 1953. 16 s. A5. 1 stk: 2.25 kr. 50 stk: 62.50 kr.
25. *Simpelt regnskabsystem for muremestre*. Fleming Nielsen. 1954. 2. oplag 1956. 24 s. A5. Incl. prøvesæt af formularer i samlemappe 5.50 kr. *Blokke med for- og efterkalkulationsskemaer* kan købes særskilt.
26. *Plan over byggepladsen*. 1956. 2. oplag 1962. 30 s. A5. 6.50 kr.
27. *Vejledning i betonkontrol*. 1956. 122 s. A5. 13 kr.
28. *Bygningsfundering*. Ved Geoteknisk Institut. 1955. 2. oplag 1959. 82 s. A5. 4.50 kr.
29. *SBI betonberegner*. Poul Nerenst og Johannes Landbo. 1955. Plasticskyder med tilhørende vejledning. A6 og A5. 4.50 kr.
30. *Beslagningslister til normalvinduer af træ*. Klaus Blach og Johannes Brixen. 1956. 28 s. A5. 4.50 kr.
35. *Teglprodukter*. 1956. 105 s. A5. 8.75 kr.
41. *Jernbetondek i boligbyggeri*. 1958. 56 s. A5. 8.75 kr.
42. *Vinduer, forbedring og vedligeholdelse*. Klaus Blach, Preben Ankerstjerne og Johannes Brixen. 1958. 16 s. A5. 4.50 kr.
43. *Normalrum og normalspændvidder for etagebyggeri*. Aage Dalgas Rasmussen og Finn Vedel-Petersen. 1958. 64 s. A5. 8.75 kr.
45. *Enfamiliehuseets arbejdsplan - en vejledning for arkitekter og håndværksmestre*. Udarbejdet i samarbejde med Håndværksrådet. 1959. 2. oplag 1963. 16 + 8 s. A5. 6.50 kr. *SBI-skema til arbejdsplaner A3*. Blok med 20 skema-ark. 8.75 kr. *SBI-datostokke 1961-65*. 5 ark i omslag. A4. 4.50 kr.
46. *Plan i køkkenet*. Finn Vedel-Petersen. 1959. 3. oplag 1963. 36 s. A5. 6.50 kr.
48. *Byggeri hele året 1. Planlægning og materiel*. 1959. 64 s. A5. 8.75 kr.
49. *Byggeri hele året 2. Arbejdets udførelse*. 1959. 52 s. A5. 8.75 kr.
50. *Før De bygger eget hus*. 1960. 2. reviderede udgave 1960. 32 s. A5. 4.50 kr.
51. *Små oliefyr - valg, installation, drift*. Ny udgave i 1964.
52. *Luftvarmeanlæg for småhuse*. 1960. 59 s. A5. 4.50 kr.
53. *Planlægning af byggeprisen ved enfamiliehuse*. Erik Allin og Fleming Nielsen. 1961. 28 s. A5. 4.50 kr.
54. *Letheton 1*. Erik V. Meyer og P. Nerenst. 1961. 33 s. A5. 5.50 kr.
55. *Vinterplanen*. 1961. Folder til ophængning. 12 s. A5. 1 stk: 3.25 kr. 10 stk: 22.50 kr. 50 stk.: 87.50 kr.
56. *Arbejdsplaner ved etagebyggeri - med eksempler fra det traditionelle boligbyggeri*. Udarbejdet i samarbejde med Håndværksrådet. 1961. 36 s. A5 + 4 bilag A2 + 2 SBI-skema til arbejdsplaner. 10.75 kr. *SBI-skema til arbejdsplaner 1½ A2*. Rulle med 10 skema-ark. 26.75 kr. *SBI-datostokke 1961-65*. 5 ark i omslag. A4. 4.50 kr.
57. *Boligens mål*. Aage Dalgas Rasmussen. 1961. 28 s. A5. 5.50 kr.
58. *Støj i boliger*. Preben Ankerstjerne og Johannes Brixen. 1962. 48 s. A5. 10.75 kr.
59. *Kalkulation af tømrer- og snedkerarbejde*. Erik Allin. 1963. 56 s. A5. 10.75 kr. *Blokke med for- og efterkalkulationsskemaer* kan købes særskilt.
60. *Skorstene*. Poul Becher og K. O. Juel Rasmussen. 1963. 93 s. A4. 32.25 kr.
61. *Fjernvarmeledninger*. Peter Olufsen. 1963. 44 s. A4. 26.75 kr.

Foruden SBI-anvisninger udsendes bl. a. SBI-rapporter, Landbrugshyggeri, SBI-byplanlægning og SBI-særtryk. Alle instituttets publikationer kan købes i boghandelen og hos Teknisk Forlag, Skelbækgade 4, København V. Telefon HI 6801. Samme steder fås SBI-publikationsliste, der er en bestillingsseddel med en kort omtale af hver publikation. SBI-abonnement kan tegnes ved indbetaling af 30 kr. til Teknisk Forlag, giro 20490.

# FUKT OG FUKTTRANSPORT I PORØSE MATERIALER

En litteraturstudie  
utført i forbindelse med et samarbejde mellem  
Statens Byggeforskningsinstitut i Danmark,  
Statens Råd for Byggnadsforskning i Sverige,  
Statens Tekniska Forskningsanstalt i Finland  
og Norges byggforskningsinstitut  
om undersøkelser vedrørende  
fukttransport i porøse materialer.

*Av Annanias Tveit*

OSLO 1964  
NORGES BYGGFORSKNINGSINSTITUTT

00887 P  
STATENS BYGGFORSKNINGSINSTITUTT

## Innhold

	Side
Innledning .....	5
Materialers porestruktur .....	5
Fuktbindinger .....	6
Sorpsjon .....	9
Fukttransport .....	10
Fukttransport i dampfasen .....	10
Fukttransport i væskefasen .....	11
Kombinert damp- og væsketransport .....	14
Permeabilitet .....	15
«Varmeledningstall» for fuktige materialer .....	16
Bestemmelse av fuktinnhold i materialer .....	17
Sammendrag og konklusjon .....	17
Litteraturfortegnelse .....	18
Summary in English .....	19

## Innledning

Statens Byggeforskningsinstitut i Danmark, Statens Råd för Byggnadsforskning i Sverige og Norges byggforskningsinstitut startet i 1961 et samarbeid om fukt og fukttransport i porøse materialer. Senere har også Statens Tekniska Forskningsanstalt i Finland sluttet seg til.

Formålet med undersøkelsene er å forsøke å bidra litt til økt kjennskap til den kompliserte prosess som fukt- og varmetransporten i porøse materialer er. Første del av undersøkelsene tar sikte på å fremskaffe data for de transportkoeffisienter som brukes for beregning av fukt- og varmetransporten og hvordan disse avhenger av temperatur- og fuktinnhold for forskjellige materialer, fortrinnsvis typiske bygge- og isolasjonsmaterialer. Målingene utføres dels for å dekke et eksisterende behov for slike data, dels for å skaffe et stort erfaringsmateriale som skal danne grunnlaget for de videre forsøk. Disse er

tenkt å skulle omfatte undersøkelser av fukt- og varmetransporten i bygningskonstruksjoner under forskjellige klimaforhold.

Første del av programmet, bestemmelse av vanndamppermeabilitet og fuktlikevekt for en hel rekke materialer ved forskjellige temperatur- og klimaforhold, er startet opp. Disse målinger blir utført i Norges byggforskningsinstituttets laboratorium i Trondheim.

Denne rapport er basert på en litteraturstudie som ble foretatt i forbindelse med forberedelsen av undersøkelsene og inneholder ingen resultater av disse. På grunn av den enorme mengde publikasjoner som finnes om dette emnet, vil en slik litteraturstudie alltid bare kunne omfatte en meget begrenset del av disse, og det vil alltid være en hel del verdifull litteratur som ikke blir tatt med.

## Materialers porestruktur

De aller fleste bygningsmaterialer er porøse eller kapillarporøse stoffer. I tørr tilstand består de av en fast grunnsubstans som inneholder eller er gjennombrutt av et mer eller mindre sammenhengende system av luftrom og luftsjikt. De porøse materialer kan inndeles i tre hovedgrupper:

1. Materialer i hvilke den faste substans danner en kontinuerlig fase og poresystemet en diskontinuerlig.
2. Så vel den faste substans som poresystemet danner kontinuerlige faser.
3. Den faste substans danner en diskontinuerlig og poresystemet en kontinuerlig fase.

Materialegenskapene er bestemt av den gjensidige virkning mellom molekylene i grunnmaterialet og molekylene i det tilstøtende medium, hvilket vil si at vannet i et materiales poresystem er utslagsgivende på materialets mekaniske, fysikalske og kjemiske egenskaper. Et fuktig porøst materiale er et flerkomponentsystem hvor de prosesser som foregår ved fukting, fuktighetstransport og uttørring ikke bare avhenger av de forskjellige komponenters energitilstand, men i vesentlig grad også av formfaktorer.

De porøse materialers strukturelle oppbygning er meget komplisert og lar seg ikke beskrive geometrisk som f. eks. ved forskjellige

krystallinske stoffer. Selv om strukturen makroskopisk sett enkelte ganger virker svært regelmessig oppbygget, endrer den seg fra punkt til punkt i materialet. Det har vært forsøkt en hel rekke metoder for beskrivelse av porestrukturer. I den senere tid er det gjort forsøk med statistiske metoder [1].

For beskrivelse av porøse materials struktur, benyttes derfor vanligvis eksperimentelt bestemte, karakteristiske størrelser som porevolum, porevolumets fordeling m.h.t. porestørrelser, korn-, fiber- og poreradier, total adsorpsjonsflate osv.

Med porevolumet menes den luftfylte del av et tørt porøst materiale. Det uttrykkes gjerne i prosent av det totale materialvolum eller som volum pr. vektandel av materialet. Porevolumet bestemmes i alminnelighet ved neddyknings- eller penetrasjonsmetoder.

Porevolumets fordeling med hensyn til porestørrelsen uttrykkes ved hjelp av en fordelingsfunksjon som angir hvor stor del av porevolumet de forskjellige porestørrelser utgjør. Porestørrelsen angis ved hjelp av poreradien. Dette er en karakteristisk lengde som kan defineres for forskjellige hovedtyper av poreformer. Den kan f. eks. være radien i en sylindrisk pore eller avstanden mellom poreveggene i en spaltformet pore osv.

Porefordelingen kan undersøkes på forskjellige måter alt etter porenes størrelse og form. Ved hjelp av hensiktsmessige etse- og kontrastvæsker kan materialene undersøkes f. eks. ved hjelp av et optisk mikroskop Elektronmikroskopet lar seg bare bruke for enkelte typer av materialer da prepareringen av objektene gjerne byr på store, til dels uoverkommelige vanskeligheter. Porene inndeles derfor gjerne etter størrelsen i:

- 1) Makroporer, poreradius  $r > ca. 0.1 \text{ mm}$ .
- 2) Mikroporer,  $0.001 < r < 0.1 \text{ mm}$ .
- 3) Submikroporer,  $r < 0.001 \text{ mm}$ .

### Fuktbindinger

Materialer som bringes i kontakt med vann eller vanddamp vil, avhengig av forskjellige faktorer, bl. a. materialets art, ta opp en større eller mindre fuktighetsmengde. Når vannet bindes i materialene, gir det fra seg en energimengde som er desto større jo sterkere bindingen er. Den gjensidige virkningen mellom det faste stoff og vannet gjør at begge komponenters egenskaper forandres. Bindingsformen kan et-

Det gjøres oppmerksom på at det finnes en rekke andre definisjoner av begrepene makro- og mikroporer. Eksempelvis er i *tabell III* (side 8) porer med poreradius  $r > 10^{-5} \text{ cm}$  kalt makrokapillarer og porer med  $r < 10^{-5} \text{ cm}$  er kalt mikrokapillarer. Dette er gjort ut fra betraktninger vedrørende størrelsen av de porer som fylles ved kapillarkondensasjon under normalt atmosfæretrykk.

I litteraturen er vanligvis begrepene porer og kapillarer brukt om hverandre, og det samme er gjort i den følgende tekst.

Submikroskopiske poresystemer blir gjerne undersøkt ved hjelp av kvikksølvpenetrasjon og suctionsmålinger. Ved kvikksølvpenetrasjon presses kvikksølv inn i materialets poresystem. Det trykk som må anvendes, avhenger av porestørrelsen og av fuktinkelen. Desto mindre porene er, desto større overtrykk må det anvendes for å få presset kvikksølvet inn i porene. Suctionsundersøkelsene er basert på det omvendte prinsipp. For å få en væske som fukter et materiale ut av materialets poresystem, anvendes et undertrykk som må være desto lavere jo trangere den pore er som skal tømmes. Undertrykkets størrelse avhenger også av fuktinkelen.

Materialenes totale overflate kan bestemmes ved hjelp av adsorpsjonsundersøkelser. Disse kan for eksempel utføres med kvelstoff eller vanddamp. Tydningen av resultatene av adsorpsjonsmålingene er imidlertid svært omdiskutert [2].

For enkelte typer av materialer lar strukturen seg anskueliggjøre ved hjelp av modeller, hvor de faste partiklene og porene har elementære geometriske former som sfærer, sylindre, polyedre osv. Slike modeller er til dels meget anvendt, såvel ved teoretiske betraktninger som eksperimentelle undersøkelser av hvilke faktorer som bestemmer fuktighetens oppførsel og sammenhengen mellom disse [3]. For virkelige materialer må disse størrelsene alltid bestemmes eksperimentelt.

ter størrelsen på bindingsenergien inndeles i 3 hovedgrupper [4]:

1. Kjemisk binding.
2. Kjemisk-fysikalsk binding.
3. Fysikalsk-mekanisk binding.

De forskjellige bindingsformer er beskrevet i *tabell I-III*.

Tabell I. Kjemisk binding (Binding i nøyaktige mengdeforhold).

Bindingsform	Ionebinding	Molekylar binding (hydratvann)
Betingelser for dannelse av fuktbindingen	Kjemiske reaksjoner (hydratasjon)	Krystallisasjon av oppløsninger (Dannelse av krystallhydrater)
Arsak til fuktbindingen	Primæervalens	Sekundæervalenser
Eksempler på materialer ved hvilke bindingsformen opptrer	$Ca^{++} = O^{--} + \begin{matrix} H^+ \\ OH^- \end{matrix} \rightarrow Ca^{++} < \begin{matrix} OH^- \\ OH^- \end{matrix}$	$CuSO_4 \cdot 5 H_2O$
Bindingsintensitet (energi)	Meget sterk binding	Sterk binding
Betingelser for opphevelse av bindingen	Kjemisk vekselvirkning, mange gangers gjennomglødning	Gjennomglødning
Fuktbindingens innflytelse på materialets og vannets egenskaper	Det danner seg et nytt materiale. Vannet som sådant forsvinner og går inn i sammensetningen av et nytt materiale	Materialet endrer plutselig sine egenskaper. Vannet går inn i krystallstrukturen

Inndelingen av bindingsformene i tabellene 1-3 er foretatt etter et skjema av P. A. Rebinder (4, side 2-3).

Tabell II. Fysikalsk-kjemisk binding (Binding i forskjellige, ikke nøyaktig bestemte mengdeforhold).

Bindingsform	Adsorpsjonsbinding. (Fuktbinding i hydratskall)	Adsorpsjonsbinding (Fuktbinding i hydratskall)	Adsorpsjonsbinding (Fuktbinding i hydratskall)
Betingelser for dannelse av fuktbindingen	Oppløsning i vann. Fuktadsorpsjon i molekyl- og ioneform. Dannelse av solvatskall	Fuktadsorpsjon	Fuktadsorpsjon
Arsak til fuktbindingen	Molekylart kraftfelt fra alle molekyler	Molekylart kraftfelt fra molekyler og mizeller i ytre og indre overflate	Molekylart kraftfelt fra molekyler i ytre overflate
Eksempler på materialer ved hvilke bindingsformen opptrer	Legemer som oppløses ione- eller molekylar-dispergert i vann	Hydro-(lyo-)phile legemer	Hydro-(lyo-)phobe legemer
Bindingsintensitet (energi)	Middelsterk binding, irreversibel	Middelsterk binding, vanskelig omvendbar	Middelsterk binding, reversibel
Betingelser for opphevelse av bindingen	Fordunstning	Desorpsjon	Desadsorpsjon
Fuktbindingens innflytelse på materialets og vannets egenskaper	Materialet dispergerer øyeblikkelig i ioner eller molekyler, da solvatdannelsesenergien er større enn kohesjonskraften mellom materialpartiklene. Vannet går inn i solvatskallene og befinner seg i fri tilstand. Det dannes en virkelig oppløsning. Vannet i solvatskallene endrer ikke sine egenskaper.	Materialet endrer sine egenskaper og blir plastisk. Vannet nedsetter fastheten og virker som mykner. Materialet svelter på grunn av at det vanddispergerte medium trenger inn mellom cellene. I grensetilfelle dannes en kolloidal oppløsning. Vannet endrer meget sterkt sine egenskaper	Overflatesjiktene endrer sine egenskaper p.g.a. at det dannes et sterkt bundet væskesjikt på overflaten. Den bundne væskemengde endrer meget sterkt sine egenskaper.

Tabell IIa. Fysikalsk-kjemisk binding (i forskjellige, ikke nøyaktig bestemte mengdeforhold).

Bindingsform	Osmotisk binding	Strukturell binding
Betingelser for dannelse av fuktbindingen	Diffusjon gjennom halv-gjennomtrengelig skall	Geldannelse
Arsak til fuktbindingen	Osmotisk trykk	Vannet blir revet med ved geldannelsen
Eksempler på materialer ved hvilke bindingsformen opptrer	Planteceller med konsentrert oppløsning	Geldannende legemer (1 % fast fase + 99 % vann)
Bindingsintensitet (energi)	Svakt reversibel	Vannet er mekanisk fastholdt, adsorptivt bundne mono-molekylare sjikt
Betingelser for opphevelse av bindingen	Fuktekstraksjon, dannelse av en sterkere konsentrert oppløsning utenfor cellen	Fordunstning, utpresning av fuktighet ved hjelp av trykk
Fuktbindingens innflytelse på materialets og vannets egenskaper	Materialet sveller	Materialet endrer sine egenskaper og danner et quasifast materiale. Det inntreer en immobilisering av vannet og det endrer meget sterkt sine egenskaper

Tabell III. Fysisk-mekanisk binding (Binding av vann i ubestemte mengdeforhold).

Bindingsform	Binding i mikrokapillarer	Binding i makrokapillarer	Kontaktbinding
Betingelser for dannelse av fuktbindingen	Fuktopptak fra fuktig luft eller ved umiddelbar kontakt med vann	Fuktopptak i de åpne kapillarer ved umiddelbar kontakt med vann og fra fuktig luft i lukkede kapillarer	Fastholding av vannet ved umiddelbar kontakt med materialoverflaten
Arsak til fuktbindingen	Kapillartrykk, oppstått p.g.a. meniskens krumning	Som i mikrokapillarer	Overflatespenning karakterisert ved at fuktinkelen $\theta < 90^\circ$
Eksempler på materialer ved hvilke bindingsformen opptrer	Materialer med kapillarer $r < 10^{-5}$ cm	Materialer med kapillarer $r < 10^{-5}$ cm	Ikke-porøse hydrophile materialer
Bindingsintensitet (energi)	Mekanisk binding av vannet. (Adsorptivt bundne sjikt på poreveggene)	Mekanisk binding av vannet. (Adsorptivt bundne sjikt på poreveggene)	Mekanisk binding av vannet. (Adsorptivt bundne sjikt på poreveggene)
Betingelser for opphevelse av bindingen	Fordunstning	Fordunstning	Mekaniske metoder, fordunstning
Fuktbindingens innflytelse på materialets og vannets egenskaper	Storparten av det fastholdte vannet er fritt og beholder sine egenskaper. Det adsorptivt bundne vann endrer sine egenskaper. Materialet beholder sine vesentlige egenskaper, noen egenskaper endrer seg p.g.a. tilstedeværelsen av det adsorptivt bundne vann	Storparten av det fastholdte vannet er fritt og beholder sine egenskaper. Det adsorptivt bundne vann endrer sine egenskaper. Materialet beholder sine vesentlige egenskaper, noen egenskaper endrer seg p.g.a. tilstedeværelsen av det adsorptivt bundne vann	Storparten av det fastholdte vannet er fritt og beholder sine egenskaper. Det adsorptivt bundne vann endrer sine egenskaper. Materialet beholder sine vesentlige egenskaper, noen egenskaper endrer seg p.g.a. tilstedeværelsen av det adsorptivt bundne vann

## Sorpsjon\*)

Når et tørt, porøst materiale bringes i kontakt med vanddamp, vil det avhengig av materialets art, temperatur og dampens partialtrykk ta opp en viss mengde fuktighet. Under stasjonære forhold vil det etterhvert innstille seg en likevekt slik at damptrykket over de sorberte væskesjikt er like stort som damptrykket i den omgivende luft. Det tilsvarende fuktinnhold betegnes gjerne som materialets likevektsfuktinnhold og illustreres i alminnelighet ved hjelp av materialets fuktisotemer (se fig. 1).

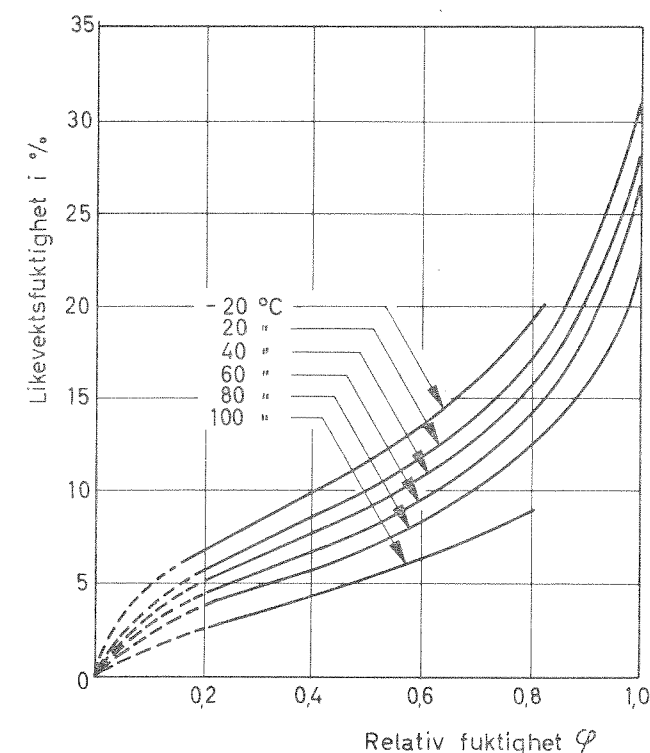


Fig. 1. Fukt-isotemer.

Sorpsjonsprosessen har vært og er til stadighet gjenstand for inngående teoretiske og eksperimentelle undersøkelser. Til tross for det enorme arbeidet som er utført på dette området, har det ikke lyktes å gi en generell beskrivelse av sorpsjonen, og det er sterkt divergerende meninger om det kjemisk-fysikalske og termodynamiske forløp av sorpsjonsprosessen [5].

De vanlige teorier går ut på at sorpsjonen enten skjer som adsorpsjon i distinkte punkter eller i sjikt av mono- eller multimolekylare tykkelser på grunn av umettede bindinger i materialoverflaten, Langmuir [6], Polanyi [7], eller som kapillarkondensasjon på grunn av damptrykkreduksjon over konkave menisker i mikrokapillarene, Zsigmondy [8]. Det er idag

\*) Med sorpsjon menes her generelt opptak av vanddamp, enten det skjer ved absorpsjon, adsorpsjon eller kapillarkondensasjon.

svært vanlig å anta at alle disse sorpsjonsformer kan forekomme, avhengig av materialets art og damptrykkets størrelse, Brunauer [9]. Det er gjort en hel rekke forsøk såvel ad teoretisk som empirisk vei på å stille opp ligninger for sorpsjonsisotermen. De fleste av disse har imidlertid et meget begrenset gyldighetsområde. Av de mest kjente skal nevnes Langmuirs ligning som opprinnelig ble utledet på grunn av kinetiske betraktninger, og som senere er utledet ad termodynamisk og statistisk vei bl. a. av Fowler [10].

Likevektsfuktigheten i et materiale er ikke entydig bestemt av omgivende damptilstand, men avhenger også av om likevekten oppnås under sorpsjon eller desorpsjon. Fuktighetsinnholdet er høyere ved desorpsjon enn ved sorpsjon, fig. 2. Det er stillet opp en rekke hypote-

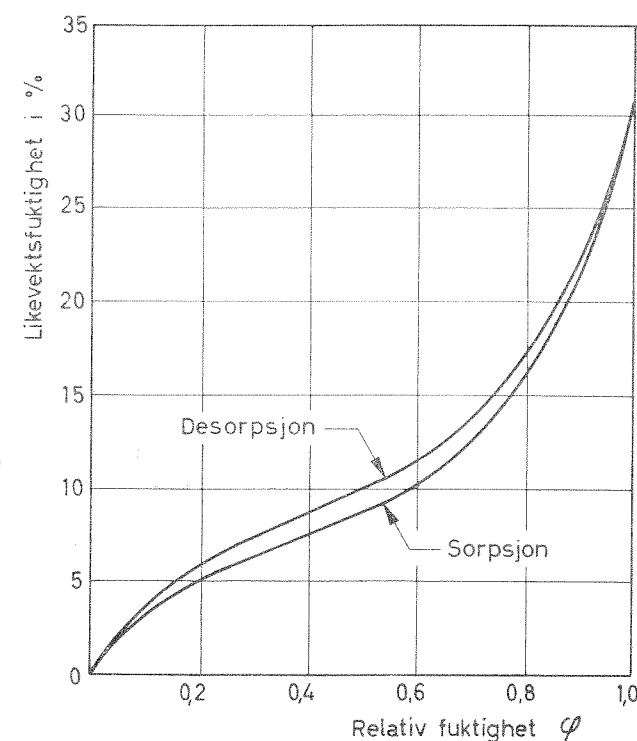


Fig. 2. Fukt-isoterm.

ser til forklaring av hysteresen. Disse teorier går bl. a. ut på at:

1. Hysteresen skyldes ufullstendig fukting under sorpsjon p. g. a. tilstedeværelsen av adsorberte luftmolekyler, som gjør at fuktinkelen er større under sorpsjon enn desorpsjon.
2. Fyllingen av kapillarene skjer ved adsorpsjon på poreveggene, mens desorpsjonen skjer delvis ved fordunstning fra menisker [11].

- Spesielle poreformer virker som feller, hvor vannet holdes tilbake inntil de trange kapillarer som fører vann til porene tømmes.
- Den hygrottermiske likevekt innstiller seg så sent at den iakttakbare likevekt ikke er endetilstanden.

Sorpsjonsundersøkelser som er utført i ren vanddampatmosfære, har ikke gitt noen hysteresevirkning, hvilket tyder på at hysteresen kan skyldes ufullstendig fukting under sorpsjonsfasen, Lykow [4], s. 49.

Det er i tidens løp utført en rekke bestemmelser av fuktisotemer for forskjellige materialer, slik at det foreligger bra med data, bort-

sett fra for nyere materialtyper. Det er imidlertid ofte svært vanskelig å benytte de data som foreligger på grunn av ufullstendig beskrivelse av materialene. Særlig ved partialtrykk nær metningstrykket kan dessuten de tall som oppgis være nokså usikre alt etter hvordan målingene er utført.

Det finnes en rekke forskjellige metoder for bestemmelse av sorpsjonsfuktigheten for byggematerialer. Noen av disse metodene er enkle, andre mer kompliserte. Av enkle målemetoder kan nevnes metoder beskrevet av Jespersen [12], Lykow [4] og Persson [13]. Mer kompliserte metoder med større krav til utstyr er beskrevet av bl. a. Cronney, Coleman og Bridge [14].

## Fukttransport

Fuktigheten transporteres i byggematerialer såvel i dampfasen som i væskefasen. Bindingsmåten og bindingskreftene er avgjørende for vannets mobilitet. Fukttransporten i dampfasen kan foregå som en molar massestrøm p.g.a. totaltrykkgradienter, eller i molekyllar form som effusjon og diffusjon p.g.a. partialtrykkgradienter, eller som termodiffusjon p.g.a. temperaturgradienter. Fukttransporten i væskefasen skjer som molare strømmer p.g.a. totaltrykkgradienter forårsaket av statisk væsketrykk, vindtrykk eller kapillarktrykk. Videre kan den foregå som molekyllare strømmer p.g.a. osmotiske trykkdifferanser eller som termo-osmose. Endelig kan det foregå en overflatekryping i adsorberte sjikt [12] på grunn av reaksjonskrefter etter molekylsammenstøt med poreveggene (termisk glidning) og p.g.a. forskjellig bindingsstyrke i overflaten av de adsorberte sjikt [12.4]. Den fuktvandring som man observerer i byggematerialene, foregår i alminnelighet som et samspill mellom flere eller færre av de forannevnte transportmåter. Fukttransporten er svært kompleks, og bidragene fra de enkelte strømningstyper kan i alminnelighet ikke bestemmes.

### Fukttransport i dampfasen.

Gassarters diffusjon kan beregnes etter Fick's eller Stefan's formler, som for det endimensjonale stasjonære tilfelle kan skrives:

$$G = D \cdot \frac{\Delta C}{\Delta L} \text{ (Fick)}$$

Fick's formel sier at den diffunderede gassmengde avhenger av gassartens diffusjonstall og av forskjellen i gasskonsentrasjon.

$$G = D' \cdot \frac{P}{\Delta L} \cdot \frac{1}{R_D \cdot T} \cdot \ln \frac{P - p_1}{P - p_2} \text{ (Stefan)}$$

Stefan's formel, som egentlig er utledet for fordunstningen av en væske fra et kapillar, sier at diffundert dampmengde avhenger av dampens diffusjonstall og gasskonstant, dessuten av gassblandingens trykk og temperatur og av partialtrykkforskjellen. Stefan's formel er senere korrigeret av W. K. Lebedew [4], s. 70.

For vanddampdiffusjon i luft betyr de forskjellige betegnelsene:

G	= diffundert dampmengde pr. tids- og flateenhet
D, D'	= vanddampens diffusjonstall i luft
$\Delta C$	= fall i dampkonsentrasjonen
$\Delta L$	= diffusjonsvegen
P, T	= totaltrykk og abs. temperatur
$R_D$	= gasskonstanten for vanddamp
$p_1, p_2$	= vanddampens partialtrykk
$P_1 - P_2$	= vanddamptrykkfall over lengden $\Delta L$ .

I et porøst materiale foregår diffusjonen gjennom de luftfylte porer og kapillarer og er derfor avhengig av det frie gjennomstrømningstverrsnittet. For et porøst materiale kan diffusjonstallet D uttrykkes lik  $D = \mu \cdot D_L$  hvor  $D_L$  er vanddampens diffusjonstall i luft, og hvor faktoren  $\mu$  bl. a. er bestemt av det frie gjennomstrømningstverrsnittet.

Ved de trykkforhold som vanlig opptrer i bygningsmaterialer og bygningskonstruksjoner

under normale driftsforhold, kan en forenklet utgave av Stefan's formel anvendes. I alminnelighet vil nemlig vanddampens partialtrykk bare utgjøre en liten del av totaltrykket, og det logaritmiske trykkforholdet  $\ln \frac{P - p_1}{P - p_2}$  som inngår i formelen, kan erstattes med partialtrykkdifferensen  $\frac{p_2 - p_1}{P}$  (finnes ved rekkeutvikling av  $\ln \frac{P - p_1}{P - p_2}$ ).

Innsatt i formelen gir dette:

$$G = D' \cdot \frac{1}{R_D \cdot T} \cdot \frac{p_2 - p_1}{\Delta L} = D' \cdot \frac{1}{R_D \cdot T} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta L}$$

For isoterme forhold fåes Fick's formel da:

$$C = \frac{P}{R_D \cdot T} \text{ for } T = \text{konstant.}$$

Formelens gyldighet avhenger forøvrig av at vanddampen ikke reagerer kjemisk med materialet, og at det ikke opptrer noen kondensasjon.

Diffusjonshastigheten avhenger av sammenstøtene mellom molekyllene og vil øke med økende molekylhastighet og økende fri veglengde. Diffusjonstallet vil følgelig øke med økende temperatur og med avtakende tetthet, dvs. med avtakende trykk. Diffusjonstallets trykk- og temperaturavhengighet kan uttrykkes ved å

sette  $D = D_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^n \cdot \frac{p_0}{p}$ , hvor  $D_0$  er vanddampens

diffusjonstall ved bestemte normale trykk- og temperaturforhold  $P_0$  og  $T_0$ . For reale gasser er potenssekspONENTEN n omkring 2.0. For vanddamp har Krischer og Rohalter funnet  $n = 2.3$  [15].

Når pore- eller kapillardiameteren er mindre enn ca.  $0.4 \cdot 10^{-5}$  cm, hvilket tilsvarer vanddampmolekyllenes frie veglengde ved normale trykk- og temperaturforhold, vil damptransporten i kapillarene ikke lenger foregå som diffusjon, men som effusjon. Molekylbevegelsene bestemmes ikke lenger av sammenstøtene med nabomolekyllene, men av sammenstøtene med kapillarveggene. I slike trange kapillarer vil damp- og luftmolekyllene bevege seg uavhengig av hverandre, og den transporterte dampmengde vil avhenge av antallet molekyllar som støter mot den flate som tilsvarer kapillarets eller porens åpninger. Dette antall må være proporsjonalt dampens tetthet og den midlere molekylhastighet i de porene som kapillaret forbinder.

Effusjonen blir bestemt av potensialet  $\frac{P}{\sqrt{T}}$ . Netto

transportert dampmengde kan uttrykkes som en

differans mellom de mengder som effunderer i de to retningene. Hvis to porer A og B forbindes med et kapillar av radius r og lengde L, kan netto damptransport uttrykkes lik:

$$G_{AB} = G_A - G_B = \frac{8\pi}{3} \frac{r^3}{L} \cdot \sqrt{\frac{1}{2\pi R_D}} \left( \frac{p_A}{\sqrt{T_A}} - \frac{p_B}{\sqrt{T_B}} \right)$$

for isoterme forhold kan dette skrives:

$$G_{AB} = \frac{8\pi}{3} r^3 \sqrt{\frac{1}{2\pi R_D T}} \cdot \frac{p_A - p_B}{L} \text{ eller}$$

$$G = \frac{8\pi}{3} r^3 \sqrt{\frac{1}{2\pi R_D T}} \cdot \frac{dp}{dL}$$

G = netto damptransport pr. tidsenhet

$p_A, T_A$  og  $p_B, T_B$  = damptrykk og temperatur i pore A resp. pore B.

$R_D$  = gasskonstanten for vanddamp.

Dersom damptrykket i porene er det samme, vil temperaturforskjellen forårsake en effusjon i retning av høyeste temperatur.

I en gassblanding vil det ved en temperaturgradient oppstå en termodiffusjon på grunn av de forskjellige molekylvektene for blandingens bestanddeler. Termodiffusjonen arter seg som en separasjonsprosess, hvor de tyngre molekyllene anrikes der hvor temperaturen er lavest, mens de letteste molekyllene anrikes der hvor temperaturen er høyest.

I porøse materialer vil det ved et temperaturfall gjennom materialet oppstå en termodiffusjon på grunn av de forskjellige molekylvektene for surstoff ( $m = 32$ ), kvelstoff ( $m = 28$ ) og vanddamp ( $m = 18$ ). Ved et temperaturfall vil derfor surstoff- og kvelstoffmolekyllene diffundere mot lavere temperatur og vanddampmolekyllene mot høyere temperatur. Termodiffusjonen vil derfor kunne gå i samme eller i motsatt retning av en diffusjon på grunn av en konsentrasjonsgradient, og vil derfor kunne forsterke eller svekke denne. Termodiffusjonen kan uttrykkes ved hjelp av diffusjonstallet og en dimensjonsløs termodiffusjonsfaktor som er karakteristisk for en kombinasjon av to gasser, og som avhenger av deres innbyrdes blandingforhold. Termodiffusjonens størrelse avhenger foruten av forskjellen i molekylstørrelse også av temperaturgradienten, og ved store temperaturgradienter vil derfor termodiffusjonen kunne spille en rolle for damptransporten i porøse materialer. Da termodiffusjonen er direkte avhengig av materialenes diffusjonstall, vil den være størst ved høgporøse materialer [4].

I materialer med liten lufttetthet vil det kunne foregå en damptransport på grunn av egenkonveksjon og påtvunget konveksjon.

### Fukttransport i væskefasen.

Med fukttransport i væskefasen tenker en først og fremst på kapillarsugingen. Kapillarsugingen kan forklares ut fra fri overflateenergi og umettede bindingskrefter som ytrer seg som en overflatespenning.

Kapillarsugingen kan sies å oppstå på grunn av kapillarpotensialgradienter som kan skyldes fuktgradienter, temperaturgradienter, forskjell i porestruktur eller forskjell i overflateenergi. Den mengde som transporteres ved kapillarsuging, uttrykkes vanligvis ved hjelp av en kapillarsugingskoeffisient som gir uttrykk for materialets evne til å transportere vannet kapillært og ved en potensialgradient. Kapillarsugingskoeffisienten er ingen konstant for et bestemt materiale, men avhenger av materialets fuktinnhold. Den går mot null for absolutt tørt materiale og øker med økende fuktinnhold til en viss maksimalverdi for det helt vannmettede materiale. Hvordan kapillarsugingskoeffisienten endres med fuktinnholdet, bestemmes av porestrukturen som f. eks. porefordeling, poreorientering og forbindelsen mellom porene osv.

For et homogent materiale kan under isoterme forhold fuktinnholdet betraktes som potensial, og en fuktvandring vil normalt oppstå på grunn av en fuktgradient. Som det imidlertid fremgår av sorpsjonsisotermene, er likevektsfuktinnholdet angitt av en øvre og en nedre grensekurve, hvilket betyr at det kan herske en fuktlikevekt innenfor et materiale, selv om ikke fuktigheten er jevnt fordelt. Betingelsen er at i en del av materialet er fuktlikevekt oppstått under sorpsjon, i en annen del ved desorpsjon. En ujevn fuktfordeling som ikke har noen tilknytning til sorpsjonshysterese, og som heller ikke behøver å fremkalle noen fuktvandring, kan oppstå i materialer med jevn porestruktur, f. eks. i tegl.

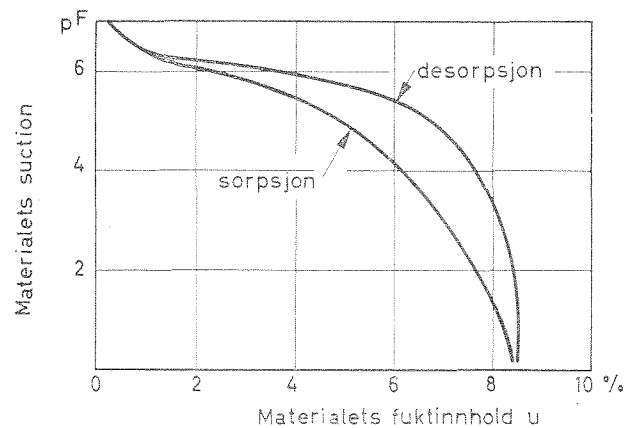


Fig. 3a. Eksempel på avhengigheten mellom et materiales suction og fuktinnhold.

Ved fuktovergang fra et materiale til et annet avhenger fuktutvekslingens retning av materialenes sugeegenskaper ved forskjellige fuktinnhold. Dette uttrykkes ved materialenes suction eller kapillarpotensial. Et materiales suction gir bare uttrykk for det hydrauliske undertrykk som bindingskreftene forårsaker og sier ingen ting om dets fukttransportevne som angis ved kapillarsugingskoeffisienten. Et materiales suction er sterkt avhengig av fuktinnholdet. Eksempel på dette er vist på fig. 3a, som viser sammenhengen mellom suction og fuktinnhold for et materiale. Det fremgår at materialets suction ikke er entydig bestemt av fuktinnholdet, men avhenger også av om dette er oppnådd under sorpsjon eller desorpsjon, jfr. forrige avsnitt. Materialets fuktisoterm ved 20°C er angitt på fig. 3b.

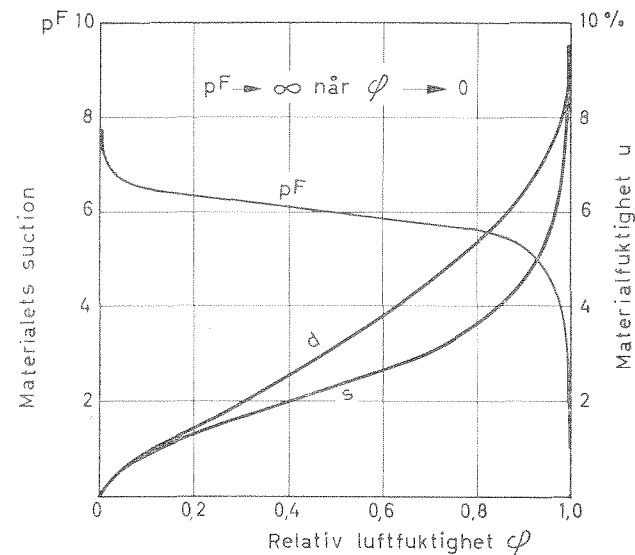


Fig. 3b. Avhengigheten mellom suction ( $pF$ ) og rel. fukt.  $\varphi$  ved 20 °C.  $S$  og  $d$  er materialets fuktisotermene.

Det er gjort en rekke forsøk på å stille opp en skala for potensialet som bestemmer fuktvandringen, og eksempler på dette er Schoefields suctionsskala og Lykows massepotensialskala [16.4].

Etter Schoefields suctionsskala angis materialets fuktspotensial med dets  $pF$ -verdi, som er lik  $\log_{10} h_s$ , hvor  $h_s$  er materialets sugehøyde i cm ved det bestemte fuktinnhold. Materialets suction bestemmes under isoterme forhold ved direkte eller indirekte målemetoder alt etter potensialets størrelse. Av forskjellige metoder til måling av et materiales suction kan nevnes: «porøplate metoden», tensiometriske målinger, sentrifugering, bestemmelse av sorpsjonsisotermene. «Porøplate metoden» er vist på fig. 4. Ved suctionundersøkelser måles potensialet i absolutte enheter, og temperaturavhengigheten kan bestemmes. Enkelte av de metoder som

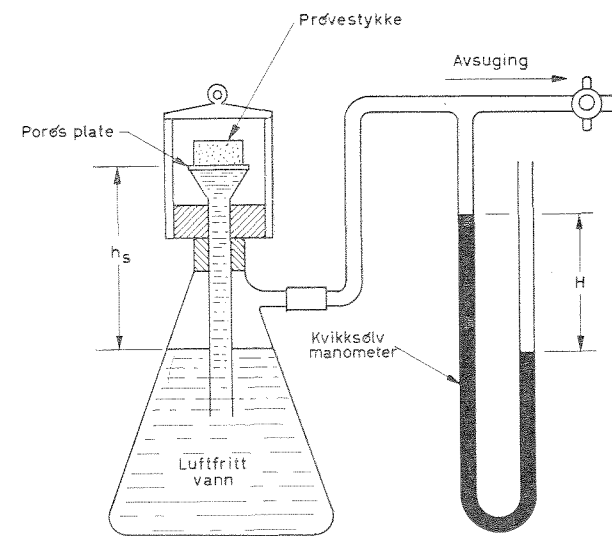


Fig. 4. Suctionmålinger med «porøs plate metoden». Provematerialet bringes i kontakt med en porøs «filterplate» hvis suction kan endres ved hjelp av å endre sugetrykket i filterflasken. Om materialet i startøyeblikket har høyere suction enn den porøse platen, suges vann opp gjennom denne inntil balanse oppnås. Om provematerialet har lavere suction, avgis vann til den porøse platen. Materialets suction regnet i  $pF$ -enheter er:  $pF = \log_{10} (h_s + 13.6 \cdot H)$ ,  $h_s$  og  $H$  angis i cm.

Metoden egner seg bare i området  $pF 1 - pF 3$ . For å oppnå  $pF 3$  må anvendes meget gode «porøse filtere» som ikke slipper luften gjennom ved 1 atmosfæres overtrykk.

anvendes for suctionundersøkelser, må antas være mindre pålitelige ved undersøkelser av materialer som inneholder oppløselige bestanddeler.

Innenfor det hygroskopiske området kan teoretisk sett et materiales suction bestemmes ved hjelp av fuktisotermen.

$$\text{Sugehøyden } h_s = \frac{2\sigma_v}{\gamma_v \rho}$$

$\sigma_v$  = vannets overflatespenning mot luft

$\gamma_v$  = vannets sp.vekt

$\rho$  = meniskens krumningsradius

$$\text{Kelvins formel } \frac{p_p}{p_s} = \text{eksp} \left( - \frac{2 \sigma_v \gamma_d}{p_s \cdot \gamma_v \cdot \rho} \right)$$

$$\text{kan skrives } \frac{p_p}{p_s} = \text{eksp} \left( -h_s \cdot \frac{\gamma_d}{p_s} \right)$$

$p_p$  = damptrykket over menisk med krumningsradius  $\rho$

$p_s$  = vanndampens metningstrykk

$\gamma_d$  = vanndampens sp.vekt

$$\text{Av dette finnes } h_s = \frac{p_s}{\gamma_d} \cdot \ln \frac{p_s}{p_p}$$

Forutsatt at ligningen for ideale gasser  $p \cdot v = RT$  kan anvendes på vanndamp, fåes:

$h_s = RT \cdot \ln \left( \frac{1}{\varphi} \right)$  hvor  $\varphi$  er den relative luftfuktighet, se fig. 3b.

Forskjellen i fri energi for fritt vann og kapillært bundet vann er:

$$\Delta F = v_s \int v_p p dv$$

hvor  $v_s$  er vanndampens sp. volum i metnings-tilstand, og  $v_p$  er vanndampens sp. volum i porene.

For isoterme forhold fåes:

$$F = v_s \int v_p \frac{RT}{v} dv = RT \ln \frac{v_p}{v_s}$$

$$\text{eller } \Delta F = RT \ln \frac{p_s}{p_p}$$

Dette er helt analogt uttrykket for materialets suction. Ifølge Kuzmak [17] er det fordelaktig å bruke den fri energi som potensial, idet den tar i betraktning alle faktorer som bidrar til fuktbevegelsen.

Lykow [4], s. 113, har forsøkt å konstruere en enhetsskala for all fukttransport i kapillarporøse materialer. Hans massepotensialskala er oppstilt på grunnlag av sammenhengen mellom fuktinnholdet og sugingen i et standardmateriale som brukes som sammenligningsmateriale. Som standardmateriale er valgt cellulose p.g.a. dens høye hygroskopiske fuktinnhold og p.g.a. at alle fuktbindinger forekommer, spesielt den kjemisk-fysikalske og fysikalsk-mekaniske binding. Vedrørende selve metoden vises til litteraturen.

Det er mulig å bruke denne potensialskala for isoterme forhold, men potensialets temperaturavhengighet er vanskelig å bestemme, idet sammenligningsmaterialets og provematerialets potensial endrer seg omtrent likedan med temperaturen. Lykows metode kan heller ikke være brukbar for materialer som inneholder oppløselige bestanddeler, idet disse vil kunne transporteres over i sammenligningsmaterialet og endre dets fukttegenskaper.

Til slutt må nevnes væsketransport på grunn av osmose, termo-osmose, overflatekryping og statisk overtrykk.

Osmose vil kunne opptre i materialer som inneholder oppløselige bestanddeler, som f. eks. salter. På grunn av forskjellig konsentrasjon av den oppløselige komponent, vil det oppstå en osmotisk trykkdifferans som fremkaller en molekylær transport (diffusjon) av vann. Konsentrasjonsforskjellen vil også gi seg uttrykk i forskjell i svellingstrykket.

En termo-osmose kan oppstå i væskefylte kapillarer under innflytelse av en temperaturgra-



dient og kommer av at væskesjiktet som er i kontakt med materialet, har andre egenskaper enn væsken ellers i kapillaret, spesielt er enthalpien forskjellig.

I et tynt sjikt nærmest poreveggene vil væsken bevege seg mot varmemstrømmen med en hastighet som er proporsjonal temperaturgradienten. Den midlere glidehastighet kan uttrykkes lik  $v = \frac{x}{T} \cdot \frac{\Delta t}{L}$  hvor T er absolutt temperatur,  $\frac{\Delta t}{L}$  gir uttrykk for temperaturgradienten

og x er en konstant som avhenger av randsjiktets tykkelse og av væske-egenskaper. Den termo-osmotiske effekt er påvist eksperimentelt i mikrokapillarer ved store temperaturdifferanser, men er helt ubetydelig i makrokapillarer. I sluttede kapillarer kan det oppstå en sirkulasjon [4], s. 67.

Powers [11] antyder en termo-osmose på grunn av frienergiforskjeller som oppstår ved temperaturgradienter på grunn av forskjellig entropi for fritt og bundet vann.

Lykow [4], s. 37—42, beskriver en overflatekrypning eller termisk glidning som kan oppstå i dampfylte porer på grunn av en temperaturgradient. Glidningen fremkommer som en reaksjon på molekylenees støtimpuls på poreveggene, og vil gå mot varmemstrømmen. Glidehastigheten er proporsjonal temperaturgradienten og en glidekoeffisient  $K_{gl}$  som kan settes lik  $\frac{3}{2} \frac{D}{T}$  hvor D er vanndampens diffusjonstall og T er absolutt temperatur. Da D er proporsjonal  $T^2$  og omvendt proporsjonal trykket P, blir den termiske glidning av særlig betydning ved fortynnede gasser. Lykow sier at selv om den termiske glidning er svært liten, har den likevel vesentlig innflytelse på diffusjonstransporten, da glidehastigheten er sammenlignbar med diffusjonshastigheten. Som ved termo-osmosen kan det ved sluttede kapillarer oppstå en sirkulasjon.

Foruten den termiske glidningen antas det at det kan oppstå en overflatekrypning på grunn av forskjell i bindingskreftene i det adsorberte sjikt.

Av andre årsaker til fuktvandring må endelig nevnes vindtrykk eller vanntrykk. På grunn av overtrykk kan vannet bli presset inn i og eventuelt gjennom materialer. Massetransporten er bestemt av overtrykkets størrelse og av porestrukturen. I grovporose materialer med forholdsvis liten lufttetthet presses vannet gjerne lett gjennom materialene. I kapillarporose materialer derimot er strømningsmotstanden vesentlig større, og kapillarkreftene er normalt utslagsgivende m.h.t. væsketransporten.

Av andre årsaker til fuktforskyvning er i litteraturen nevnt deformasjoner av materialet [11], ekspansjon eller kontraksjon av luftfylte porer under temperaturvariasjoner [4], elektriske potensialer [18], osv.

#### Kombinert damp- og væsketransport.

I den grad de måtte forekomme vil flere eller færre av de foran nevnte transportmåter kunne opptre samtidig, og hver for seg bidra til en resulterende fukttransport. Da de forskjellige transportmåter er gjensidig svært avhengig av hverandre, lar størrelsen av de enkelte bidrag seg i alminnelighet ikke bestemme.

Hvilke fuktmengder som transporteres i dampform og væskeform avhenger bl.a. av materialstrukturen og av fuktinnholdet. Ved et lavt fuktinnhold kan eksempelvis effusjonen, diffusjonen og overflatekrypningen være dominerende. Ved økende fuktinnhold i materialet vil imidlertid flere og flere diffusjonsveier blokeres, og etterhvert blir væsketransporten dominerende.

Under transiente forhold ved hygroskopiske materialer antas en fukttransport å arte seg som en diffusjons- og kapillarsugningsprosess med en samtidig fordampnings- og kondensasjonsprosess, og varme- og fukttransport er helt avhengige av hverandre. Fukttransporten vil under slike forhold være sterkt avhengig av materialenes fuktkapasitet som er bestemt av poreveggens fuktkapasitet. Forsøk har vist at selv moderate fuktmengder kan forandre totalt varmemstrømsforholdene. Solvason [19] har undersøkt varme- og fukttransport gjennom tre fiberplater og glassvattmatter under transiente forhold og mener at fordampnings- og kondensasjonsprosessen gir en betraktelig økning av varmemstrømmen under transiente forhold, men at fuktigheten har mindre betydning under stasjonære forhold.

Det er vanlig å anta at det foregår en kombinert diffusjons- og tilbakesugningsprosess i hygroskopiske materialer under ikke isoterme forhold. I varmemstrømmens retning foregår en diffusjon av vanndamp på grunn av en damptrykkdifferans, mens væske suges tilbake på grunn av et fuktpotensial. Til støtte for denne teori finnes en hel rekke publikasjoner bl. a. av McDermott [20], Rowley [21], Munters [22], Krischer [23], Hanson [24], Chlusov [25] osv. Ifølge Saare [26] skulle teoretisk sett den ikke stasjonære tilstand av fuktvandringen la seg beskrive ved hjelp av en differensiallikning. Dette vil i så fall muliggjøre en beregning av fuktopptakets og uttørkningens tidsforløp.

Det er gjort en rekke forsøk på å stille opp differensiallikninger til beskrivelse av fuktvandringen i porøse materialer. Merkverdig nok er imidlertid så å si alle disse likningene stilt opp ved å betrakte fuktbevegelsen som en isolert prosess, og likningene inneholder derfor ingen størrelser som gir uttrykk for varmetransport, faseoverganger osv. Det er videre vanlig å betrakte alle transportkoeffisienter som konstanter, uavhengige av koordinater og tid. Dette kan ikke gi riktige resultater, og for en teoretisk behandling av fuktvandringen er det ikke tilfredstillende. **For rent praktisk bruk derimot avgjøres ikke likningenes brukbarhet av om de gir absolutt korrekte resultater, men om beregningene kan utføres med rimelig krav til nøyaktighet.**

Differensiallikninger til beregning av varme- og massetransport under tørking av hygroskopiske materialer er foreslått bl. a. av Krischer [27], s. 340—363, Lykow [4], s. 136—140.

Den matematiske behandling av varme- og fuktvandringen er uhyre komplisert, og selv de enkleste av de differensiallikninger som er oppstilt, lar seg bare løse eksakt ved forenklete randvilkår. Det er ikke trolig at en rent teoretisk metode fører frem, og Hutcheon [28] mener at det er bare én vei å gå, nemlig å bruke empiriske metoder. Det kan vel imidlertid tenkes at det går an å kombinere en teoretisk og empirisk behandling av varme- og fukttransporten ved å bruke dimensjonsanalyse, som ved beregning av varmeoverganger, forbrenningsprosesser osv. Dette er bl. a. forsøkt i Russland [4], s. 140.

#### Permeabilitet.

Det har innen bygningsteknikken vært svært vanlig å kalle all fukttransport innenfor det hygroskopiske område for vanndampdiffusjon. Dette er noe misvisende, idet fuktbevegelsen også innenfor dette fuktområdet kan foregå som et samvirke mellom de forskjellige transportmåter. Et nytt begrep – vanndamppermeabilitet eller gjennomslipplighet – har derfor idag fått stadig større anvendelse. Vanndamppermeabiliteten er som varmeledningstallet en karakteristisk egenskap for et homogent materiale. Den avhenger av materialets fukt- og temperaturtilstand, og forsøksbetingelsene må angis ved angivelse av denne størrelse. Som enhet for vanndamppermeabilitet er valgt den dampmengde som passerer enhetstykkelsen av materialet pr. tidsenhet, flateenhet og enhet partialtrykkforskjell. Den inverse verdi av vanndamppermeabiliteten kan betegnes som materialets spesifikke dampmotstand.

For tynne materialsjikt som plater, folier,

papp, malingfilmer og sammensatte eller laminerte materialer, er det ikke hensiktsmessig å bruke materialenes permeabilitet, men angi fuktgjennomgangen for den bestemte tykkelse av materialsjiktet. Dette kan en i overensstemmelse med bl. a. den amerikanske terminologi kalle materialenes vanndamppermeans. Som enhet for vanndamppermeans er valgt den dampmengde som passerer et materialsjikt pr. flateenhet, tidsenhet og enhet partialtrykkforskjell. Dens inverse verdi kan betegnes som materialsjiktets dampmotstand.

Om permeansen er målt for en bestemt tykkelse av et hygroskopisk materiale av homogen struktur, så kan strengt tatt denne ikke omregnes til andre tykkelser av materialet. Dette kommer av at ved måling av permeansen er det i materialet en bestemt fuktfordeling alt etter de damptrykk og temperaturer som anvendes, og permeansen bestemmes av denne fuktfordelingen. For et ikke hygroskopisk materiale vil det antakeligvis være annerledes, idet fukttransporten i et slikt materiale er mer entydig bestemt av partialtrykkdifferansen.

Som det fremgår av det foregående, er permeabiliteten og permeansen avhengig av den dampstilstand som opprettholdes i prøvestykket under målingene. Med vårt nåværende kjennskap til fuktvandringens avhengighet av damptrykk og temperatur i de forskjellige typer materialer, kan det ikke foretas noen direkte omregning for andre dampstilstander.

Endringen i permeabiliteten med dampstilstanden (med hvilken materialfuktigheten er i likevekt) må derfor bestemmes eksperimentelt. Det finnes i litteraturen forholdsvis få undersøkelser av permeabiliteten for forskjellige slags materialer ved forskjellig temperatur og damptrykk, men de målinger som er gjort, viser at for mange materialer er permeabiliteten sterkt avhengig av fuktnivået [29, 30]. For asfaltsjikt fant Rowley, Ahlgren & Lund også en meget sterk temperaturavhengighet.

Den mest vanlige metode til måling av permeabilitet og permeansen er boksmetoden. Metoden egner seg best for undersøkelse av papp og platematerialer og er i flere land brukt som standard målemetode for undersøkelse av sådanne materialer. Bare en ubetydelig del av resultatene fra slike målinger blir publisert, da de normalt blir utført som privatoppdrag ved en eller annen institusjon for materialprøving. For papp og platematerialer er en del data tilgjengelig [31, 32, 33].

Målinger etter boksmetoden utføres vanligvis ved én temperatur og ved et eller to fuktnivåer (tørrboks – våtboks). Tørrboksmetoden er ikke helt bra ved materialer med stor permeabilitet,

da det er vanskelig å holde damptrykket inne i boksen konstant. Ved stor dampstrømning vil det nemlig ikke skje en rask nok fuktutjevning i tørremidlet, og det blir en sjiktlagring av fuktighet i dette. En bedring oppnås ved å holde boksene i bevegelse, for eksempel ved rystelser eller rotasjoner. De tørremidler som vanligvis brukes er absorpsjonsmidler som calcium-chlorid, magnesium-perchlorat eller adsorpsjonsmidler som silikagel. En undersøkelse av forskjellige tørremidler anvendt ved tørboksmetoden er utført bl. a. i Canada [34]. Foruten de skarpe tørremidlene blir det også anvendt krystallinske salter av forskjellige slag, eventuelt i mettede oppløsninger. Fordelen ved disse er at fuktkapasiteten er større, hvilket er

### «Varmeledningstall» for fuktige materialer

Fuktigheten kan på forskjellige måter bidra til å øke et porøst materiales varmeledningsegenskaper. I et tørt, porøst materiale foregår en varmetransport som ledning i den faste substans og som konveksjon, ledning og stråling i de luftfylte porene og kapillarene. Mikroporene og mikrokapillarene bidrar til en meget sterk reduksjon av varmetransporten, dels ved at den frie strålingsveg blir meget kort, dels ved at varmeledningen i porer hvis lineære dimensjoner er mindre enn molekylene frie veglengde, vil avta med avtakende porestørrelse. Fuktigheten i et porøst materiale øker varmetransportevnen ved at den fyller mikroporesystemet eller at den danner en godt varmeledende film på poreveggene og eventuelt også fyller makroporene og makrokapillarene som da kan danne en sammenhengende «varmebro» gjennom materialet. I dertil egnede materialer antas dessuten fuktigheten å kunne ta del i en latent varmetransport, da det på grunn av en temperaturgradient normalt vil oppstå partialtrykkforskjeller og kapillarpotensialforskjeller som setter fuktigheten i bevegelse, slik at det oppstår en sirkulasjon av fuktigheten ved en fordampning og diffusjon og en kondensasjon og kapillar tilbakesuging. Da fuktigheten i et porøst materiale ikke står i ro, men beveger seg under innflytelsen av en temperaturgradient, er det vanskelig å definere et varmeledningstall for et slikt materiale. Det er imidlertid svært vanlig å anta at varmeledningstallet for et fuktig materiale er lik den varmeledningsevne et fuktig materiale vil ha dersom fuktigheten ikke forskyver seg. Dette vil si at fuktigheten bare bidrar til økning av varmeledningsevnen ved at de volumer som er fylt av væske har en høyere ledningsevne enn om de

av betydning ved undersøkelse av hygroskopiske materialer, hvor tiden før stasjonære forhold oppnås kan bli forholdsvis lang. Av andre målemetoder må nevnes Joy's permeometer [35] og «Penn State-Armstrong cell» eller «banjocell» [36, 37]. Målinger av permeabilitet under påvirkning av en temperaturgradient er svært vanskelig å utføre. Det har vært utført en del slike undersøkelser bl. a. av Watzinger [38].

Med hensyn til kapillarsugingsegenskaper, så foreligger det forholdsvis få og spredte opplysninger. De data som finnes er stort sett alle fremkommet ved vanlige oppsugingsforsøk under stasjonære forhold uten temperaturfall. For materialer som lettbetong og tegl er det utført en del målinger i Sverige [39, 40].

var fylt med luft. I litteraturen kan en derfor finne en rekke angivelser av varmeledningstall for forskjellige materialer ved forskjellige fuktinnhold. Disse varmeledningstallene er funnet såvel ved målinger under stasjonære som ikke stasjonære forhold. For å unngå nevneverdig forskyvning av fuktigheten under målingene, er disse gjerne utført ved anvendelse av minimale temperaturdifferanser og kortest mulig forsøks-tider. Woodside [41] har således målt varmeledningstallet for fuktige materialer under stasjonære forhold ved å måle varmeledningsevnen for materialene ved anvendelse av forskjellige temperaturdifferanser, men ved å holde middeltemperaturen og det midlere fuktinnholdet i prøveplatene konstante. Ved å ekstrapolere til null temperaturdifferans har han funnet varmeledningstallet for materialet med jevnt fordelt fuktinnhold.

Ved å anvende små temperaturdifferanser kan en riktignok redusere fuktforskyvningen i prøvematerialene, men samtidig reduseres også den latente varmetransport. Denne kan bli meget stor, avhengig av materialets art, fuktinnholdet og av temperatur- og damptrykkforholdene. Varmeledningstallet  $\lambda_t$  for et fuktig materiale angis vanligvis som funksjon av varmeledningstallet  $\lambda_t$  for det tørre materialet og av fuktighetsinnholdet  $u$ , som f.eks. ved at  $\lambda_t = \lambda_t + a \cdot u$ , hvor  $a$  er en faktor som avhenger av materialets art. Dersom sammenhengen mellom varmeledningsevnen og fuktinnholdet var så enkel, var jo alt vel og bra. Det er imidlertid temmelig sikkert at funksjonssammenhengen mellom  $\lambda$  og  $u$  er atskillig mer komplisert, men først og fremst må det presiseres hva en mener med varmeledningstallet for et fuktig materiale.

### Bestemmelse av fuktinnhold i materialer

Et av de mange problemer en støter på ved eksperimentelle undersøkelser m.h.t. fuktighet i materialer, er vanskeligheten med å måle fuktinnholdet og dets fordeling i materialer og konstruksjoner. Ved laboratorieundersøkelser er gravimetrisk metode det sikreste. Den alminneligste metode til bestemmelse av fuktinnhold er derfor tørking i godt luftet tørkeskap og veiing. Ved organiske materialer med lett flyktige bestanddeler anvendes koking i xylol i spesiell apparatur [26]. For å finne fuktfordelingen må imidlertid prøvestykkene deles opp, hvorved de ødelegges. For å unngå dette kan det enten brukes blindprøver eller prøvestykkene kan bygges opp av skiver som kan tas fra hverandre. Ingen av disse metodene er særlig hensiktsmessige, dog er bruk av blindprøver å foretrekke ved homogene materialer, selv om antall prøver kan bli nokså stort.

Det er forsøkt en hel rekke forskjellige metoder for direkte måling av materialers fuktinnhold og/eller fuktfordeling. De forskjellige metoder er basert på måling av fuktighetsinnflytelsen på materialenes elektriske ledningsevne, elektriske kapasitet, temperaturledningstall,  $\gamma$

stråleabsorpsjon, nøytron moderasjon og nøytron diffusjon, radiobølge attenuasjon osv. Noen av målemetodene kan brukes i hele fuktområdet, andre bare innen området for fri fuktighet. For bestemmelse av bunden fuktighet kan f. eks. brukes måling av den elektriske ledningsevnen eller frekvensuavhengigheten av  $\epsilon \tan \delta$  hvor  $\epsilon$  er dielektrisitetkonstanten og  $\delta$  er tapsvinkelen. Av andre metoder kan nevnes de hygrometriske metoder hvor et legeme hvis fuktinnhold på en eller annen måte kan bestemmes, puttes inn i materialet som skal undersøkes og antar en viss likevektsfuktighet avhengig av materialfuktigheten. Denne likevekt må på forhånd bestemmes, og målingene er usikre på grunn av hysteresese. De aller fleste av de forannevnte metoder egner seg best til laboratorieundersøkelser, dels på grunn av at måleutstyret på forhånd må kalibreres mot det materiale som skal undersøkes, dels på grunn av at det er for komplisert utstyr for alminnelige undersøkelser i praksis. Ved slike undersøkelser vil det derfor vanligvis være mest hensiktsmessig å bruke boreprøver eller ta ut prøvestykker på annen måte.

### Sammendrag og konklusjon

Ved hjelp av teoretiske betraktninger og eksperimentelle undersøkelser har en kommet frem til en rekke enkeltprosesser som hver for seg kan bidra til fukttransport i porøse materialer. Avhengig av materialets art og struktur og av dets fukt- og temperaturtilstand, vil de forskjellige transportmåter bidra mer eller mindre til en resulterende fukttransport i retning av det laveste totale fuktpotensial. Med det totale fuktpotensial menes her et potensial som kan betraktes som en resultant av alle de potensialer som kan sies å bestemme enkeltprosessene, som for eksempel konsentrasjon, temperatur, partialtrykk, osmotisk trykk, gravitasjonskrefter, fri overflatekrefter osv. Den massestrøm som de enkelte potensialgradienter forårsaker, kan beskrives dels kvantitativt, dels bare kvalitativt. Det er selvsagt ønskelig å kjenne mekanismen i fuktvandringen så detaljert som mulig, men det er et stort spørsmål om det er riktig å foreta en så sterk differensiering av transportmåtene, da de i større eller mindre grad opptrer samtidig og er så gjensidig avhengig av hverandre at de egentlig ikke kan betraktes enkeltvis. Det-

te har også medført at de uttrykk en kommer frem til for massetransporten, blir så uoversiktlige og inneholder så mange ukjente størrelser at likningene har mest teoretisk interesse. Det en trenger for fuktberegninger i praksis, er et enkelt mulig beregningsgrunnlag som gir resultatene med et rimelig krav til nøyaktighet. Dessuten må de størrelser som er spesifikke for de forskjellige materialer, kunne måles ved hjelp av relativt enkle og ikke for tidkrevende målemetoder.

Det foreligger et svært erfaringsmateriale fra undersøkelser av varme- og fukttransport i byggematerialer og bygningskonstruksjoner, slik at det er vanskelig å få en god oversikt over det. Det ser imidlertid ut for at storparten av materialforsøkene har vært utført under stasjonære forhold, mens undersøkelsene av fullstendige eller deler av bygningskonstruksjoner for en stor del har foregått under hva en kan kalle naturlige forhold. Dessverre gir en hel del av undersøkelsene lite å bygge videre på, på grunn av manglende og ufullstendige opplysninger av forskjellige slag.

## Litteraturfortegnelse

1. Flood, E. A. «Statistical Descriptions, Correlation Factors, and Physical Properties of Granular and Porous Solids.» The Structure and Properties of Porous Materials. Proceedings of The tenth Symposium of the Colston Research Society 1958.
2. Everett, D. H. «Some Problems in the Investigation of Porosity by Adsorption Methods.» The Structure and Properties of Porous Materials. Proceedings of The tenth Symposium of the Colston Research Society 1958.
3. Boer, J. H. de «The Shape of Capillaries» The Structure and Properties of Porous Materials. Proceedings of The tenth Symposium of the Colston Research Society 1958.
4. Lyklow, A. W. «Transporterscheiningen in Kapillarporösen Körpern.» Akademieverlag, Berlin 1958.
5. Malmquist, L. «Sorption as Deformation of Space.» Særtrykk av Kylvteknisk Tidsskrift nr. 4. Stockholm august 1958.
6. Langmuir, J. «The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum.» Journ. Am. Chem. Soc., 40, 1361 (1918).
7. Polanyi, M. Verh. deut. physik. Ges., 15, 55 (1916).
8. Zsigmondy, R. «Über die Struktur des Gels der Kieselsäure. Theorie der Entwässerung.» Z. anorg. Chem. 71, 356 (1911).
9. Brunauer, Stephen. The Adsorption of Gases and Vapours. Vol. I. Physical Adsorption.
10. Fowler, R. H. Proc. Cambridge Phil. Soc., 31, 260 (1935).
11. Powers, T. C. «Moisture Effects in Concrete.» Proceedings of the Conference on Building Research, Ottawa 21/23 Oct. 1953. Bulletin No. 1 of the Division of Building Research, Ottawa 1955.
12. Jespersen, H. B. «Rapport over forsøg vedrørende ligevægts- og diffusionsfugtindhold i vægmateriale.» Teknologisk Institut, København, juni 1954.
13. Johansson, D. H. og Persson, G. «Fuktabsorptionskurvor för byggnadsmaterial.» Byggnadsmästaren 17, 1946.
14. Cronney, D., Coleman, J. D. and Bridge, Pamela M. «The Suction of Moisture held in Soil and other Porous Materials.» Road Research Technical Paper no. 24, London 1952.
15. Krischer, O. & Rohmhalter, H. «Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gütern.» VDI Forschungsheft 402. Ausgabe B. Mai-Juni 1940.
16. Schoefield, R. K. «The pF of the Water in Soil.» Transaction 3rd International Congress Soil Science, 1935, 2, 37-48. Discussion, 3, 183-186.
17. Kuzmak, J. M. «Moisture Content – Suction Relationships.» Proceedings of the Conference on Building Research, Ottawa 21/23 Oct. 1953. Bulletin No. 1 of the Division of Building Research, Ottawa 1955.
18. Winterkorn, H. F. «Potentials in Moisture Migration.» Proceedings of the Conference on Building Research, Ottawa 21/23 Oct. 1953. Bulletin No. 1 of the Division of Building Research, Ottawa 1955.
19. Solvason, K. R. «Moisture in Transient Heat Flow.» Heating, Piping & Air Conditioning, Nov. 1955.
20. Mc Dermott, P. F. «Moisture Migration. A Survey of Existing Theory and Knowledge.» Refrig. Eng. Vol. 42. Aug. 1941.
21. Rowley, F. B. «A Theory Covering the Transfer of Vapour through Materials.» ASHVE Transactions. Vol. 45. 1939. p. 545.
22. Munters, C. «Moisture in Walls of Cold Storage Rooms.» Refrig. Eng. Aug. 1949, p. 795.
23. Krischer, O. «Wärmeleitung und Dampfdiffusion in Kälteschutzstoffen.» Wärme- und Kältetechnik. 1941, Heft 1.
24. Hanson, R. «Fukt i ytterväggar och yttertak.» Særtrykk av Byggnadsmästaren B 10 og B 12, 1957, B 1 og B 3, 1958.
25. Chlusov, I. E. «Determination of Moisture in Flat Roof Constructions.» Moskva 1958.
26. Saare, Eric. «Forskning om fukt i byggnadsmaterial.» Statens Nämnd för Byggnadsforskning. Særtrykk 6, 1958.
27. Krischer, O. «Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik.» Springer – Verlag 1957.
28. Hutcheon, N. B. «Combined Heat and Moisture Flow Philosophy and Review of a Canadian Research Program.» Research Paper No. 10. NBR. Ottawa, Febr. 1961.
29. Chang, S. C. & Hutcheon, N. B. «Dependence of Water Vapour Permeability on Temperature and Humidity.» Research Paper No. 21, NBR, Ottawa, March 1956.
30. Doty, P. M., Aiken W. H., Mark, H. «Temperature Dependence of Water Vapour Permeability.» Ind. & Eng. Chem. 38, No. 8, 1946.
31. Babbit, J. D. «The Permeability of Building Papers to Water Vapour.» Reprint Canadian Journal of Research A, 18, 1940. «The Diffusion of Water Vapour Through Various Building Materials.» Canadian Journal of Research, 1939.

32. Egner, K. «Feuchtigkeitsdurchgang und Wasserdampfkondensation in Bauten.» Stuttgart 1950. Fortschritte und Forschungen im Bauwesen, Reihe C, 1.
33. Tveit, A. «Vanndampdiffusjonstall for papp og trefiberplater.» NBI Rapport No. 9, 1954.
34. Chang, S. C. & Hutcheon, N.H.B. «Performance of Desiccants in the Dry Pan Test for Water Vapour Permeance of Membranes.» Canadian Journal of Technology, 31. Sept. 1953.
35. Joy, F. A. & Sherdon, A. W. «Automatic Permeance Measurements by the Permeometer.» Trans. ASHVE 1953, s. 435.
36. Joy, F. A. & Queer, E. R. «Permeance Measurements Improved by Special Cell.» Technical Paper No. 46. Penn State University Engineering Experiment Station.
37. Joy, F. A., Queer, E. R., Schreiner, R. E. «Water Vapour Transfer Through Building Materials.» Bulletin 61, Penn State University Engineering Experiment Station «Proposed Method of Test for Water Vapour Transmission of Building Materials Utilizing the Penn State – Armstrong Cell.» ASTM Bulletin, July 1956.
38. Watzinger, A. «Et nytt apparat til bestemmelse av vanndampdiffusjon gjennom porøse materialer.» Foredrag ved NIM4 i Helsingfors, juni 1951.
39. Jonell, P., Karamustafaogly, V., Topfers, R. «Determinations of the Coefficient of Capillary Absorption for Steam-cured Lightweight Concrete.» Diskusjonsinnlegg. Rilem Symposium om lettbetong, Göteborg 1960.
40. Hanson, R. «Moisture in Lightweight Concrete Roofs.» Diskusjonsinnlegg. Rilem Symposium om lettbetong, Göteborg 1960.
41. Woodside, N. og Cliffe, J. B. «Heat and Moisture Transfer in Closed Systems of two Granular Materials.» Research Paper No. 77. DBR, Ottawa, April 1958.

## Summary in English

The author gives an account of a study of the technical literature carried out in connection with a system of cooperation between The National Danish Institute of Building Research, the National Swedish Council for Building Research, The Finnish State Institute for Technical Research, and the Norwegian Building Research Institute, concerning investigations of the transport of moisture in porous materials. By means of theoretical considerations and experimental inquiries certain individual processes have been discovered which singly may serve to the migration of moisture in porous materials. All according to the nature and structure of the material and of its state of moisture and temperature, the different modes of transport will serve more or less to bring about a transport of moisture in the direction of the lowest total moisture potential. By the total moisture potential is meant here a potential which can be regarded as a resultant of all the potentials which can be said to determine the individual processes, such, for example, as concentration, temperature, partial vapour pressure, osmotic pressure, gravitational forces, free surface forces etc. The mass-flow which is caused by the individual potential gradients can be described in some cases quantitatively, in other cases only qualitatively. It is, of course, desirable to have as detailed knowledge of the mechanism of the movement of moisture as possible, but it is rather doubtful whether it is

proper to undertake such an extreme differentiation of the modes of transport, as they manifest themselves more or less simultaneously and are so interdependent that they cannot properly be considered singly. This has also had the result that the expressions found for the mass-transport are so vague and contain so many unknown magnitudes that the equations have for the most part only a theoretical interest. What is needed for calculations of moisture in practice is the simplest possible basis of calculation, which will give results having a reasonable claim to accuracy. Moreover, the magnitudes which are specific for the different materials must be capable of being measured by means of relatively simple and not too time-consuming methods.

There exists a huge fund of experience from investigations of the conveyance of heat and moisture in building materials and building constructions, so much so that it is difficult to obtain a clear survey of it. It looks, however, as if most of the tests of materials have been performed under stationary conditions, whilst the investigations of complete building constructions or parts of these have in a large measure been performed under what can be called natural conditions. Unfortunately, owing to defective and incomplete information of various kinds, a great many of the investigations afford little on which to build further.

## SBI-rapporter

er beretninger om selvstændige forskningsarbejder, som udføres for eller af instituttet, referater af byggetekniske møder afholdt af instituttet m. m. Fortegnelsen omfatter kun rapporter, der endnu ikke er udsolgt. Priserne er incl. oms.

This series are reports on original research works carried out for or by the institute, reports of meetings concerning building construction arranged by the institute, etc. The list does not comprise reports which are out of print. English titel in ( ) indicates an English summary.

13. *Byggetiden ved 10 enfamiliehuse (The Construction Time of 10 Detached Houses)*. 1956. 53 p. A4. 13 kr.
14. *Prøvning af tre kontinuerlige betonblandere (Testing of Three Continuous Concrete Mixers)*. Per Bredsdorff, Johannes Landbo, Poul Nerenst og Niels Munk Plum. 146 p. A4. 17,25 kr.
16. *Nyere etageboligplaner. Plantypekatalog og forslag til planvurdering. (Contemporary Plans of Flats. A Catalogue of Plans with Suggested Criteria for Comparative Evaluation)*. Aage Dalgas Rasmussen og Finn Vedel-Petersen. 1956. 92 p. A4. 30 kr.
19. *Problemer vedrørende installation og drift af oliefyrringsanlæg*. Otto Juul Jørgensen og Frederik Olsen. 1957. 42 p. A4. 13 kr.
20. *El-installationer i boligbyggeri*. H. Justesen. 1957. 26 p. A4. 8,75 kr.
21. *Fejl og mangler ved betonelementer i montagebyggeri*. B. J. Rambøll. 1957. 24 p. A4. 8,75 kr.
23. *Akustiske problemer i skolebygninger (Acoustics in School Buildings)*. Fritz Ingerslev, Jørgen Petersen og Jørgen Kristensen. 1957. 45 p. A4. 13 kr.
24. *Pudsfri beton (Plaster-free Concrete)*. V. Galloë. 1958. 32 p. A4. 8,75 kr.
25. *Korrosionsproblemer i byggeriet*. H. H. Arup. 1958. 25 p. A4. 8,75 kr.
26. *Anlægsudgifter ved centraliserede og decentraliserede opvarmningsanlæg (The Investments at Centralized and Decentralized Hot-water Heating Systems)*. Kristian Engelsen. 1958. 36 p. A4. 13 kr.
27. *Det lille enfamiliehus. Planeksempler og vejledning i planudformning. (The Small Single Family House. Plan Examples and Guiding Lines)*. Ole Dybbroe og Grethe Meyer. 1959. 152 p. A4. 25,75 kr.
28. *Om tegls frostfasthed. En litteraturgennemgang (On Frost Resistance of Tiles. A Survey of Literature)*. Jørn Jessing og H. P. Nielsen. 1958. 12 p. A4. Bilag 20 ark A4 med ialt 160 kartotekskort. 17,25 kr.
29. *Problemer ved licitations- og udførelsesgrundlaget for beton- og jernbetonarbejder*. R. A. Larsen. 1958. 18 p. A4. 4,50 kr.
30. *Træskeletvæggen som ydervæg i lavt boligbyggeri (Timber Frame Walls as Load-bearing Exterior Walls in One Storey Houses)*. Jørgen Bryrup. 1958. 107 p. A4. 13 kr.
31. *Brandtekniske forsøg med entredøre (Testing of Fire-Resisting Front Doors)*. Gerhard Hansen og H. Winckelmann. 1959. 18 p. A4. 8,75 kr.
32. *Beregning af bærende konstruktioner ved hjælp af elektronisk cifferregnemaskine. 1. Plane konstruktioner sammensat af lige stænger (Analysis of Loadbearing Structures by means of Electronic Digital Computer. 1. Two-Dimensional Structures Composed of Straight Members)*. V. Galloë. 1959. 68 p. A4. 17,25 kr.
34. *Virkningen af byggetekniske fejl og mangler på vedligeholdelsesomkostningerne*. Erik Allin. 1959. 46 p. A4. 13 kr.
35. *Afløbsledninger og dræn*. O. Hyllested. 1959. 22 p. A4. 8,75 kr.
36. *Røgundersøgelser ved større centralvarmeanlæg (Smoke Problems at Big Heating Plants)*. Knud Hansen. 1960. 60 p. A4. 17,25 kr.
37. *Om rengøringsudgifter, deres afhængighed af bygningens materialer og udformning*. Alfred Born. 1960. 36 p. A4. 8,75 kr.
38. *Samlingsproblemer i montagebyggeri. (Problems of joining Room-Sized Building Units)*. Johs. F. Munch-Petersen og Owe Eriksson. 1960. 2. reviderede udgave 1963. 23 p. A4. 10,75 kr.
41. *Bedre arbejdstegninger - et svensk forslag udarbejdet af HALTH-gruppen*. Sven A. Tyrén. 1960. 32 p. A4. 8,75 kr.
42. *Facadebeklædningselementer*. Knud E. C. Nielsen. 1961. 28 p. A4. 10,75 kr.
43. *Projektmaterialets rationalisering*. Bjørn Bindselev. 1961. 80 p. A4. 16,25 kr.
45. *Villakvarterets udformning*. Peter Bredsdorff. 1962. 22 p. A4. 10,75 kr.
46. *Bibliography on Building Documentation 1938-1962*. R. Mølgaard-Hansen. 1962. 39 p. A5. 8,75 kr.
47. *Dagophold og sovesteder i etageboligen. En undersøgelse af rummenes brug i 3- og 4-rums lejligheder (Living Areas and Sleeping Places in Flats. A Study of the Utilization of the Rooms in 3- and 4-Room Flats)*. Aage Dalgas Rasmussen. 1962. 48 p. A4. 19,50 kr.
48. *Vejledning i bedømmelse af kvaliteten af den ældre bygningsbestand til brug ved kondemnering efter lov om boligtilsyn (Manual in Appraisal of the Quality of the Older Housing Stock According to the Rules for Condemnation Established by the Danish Building Inspection Act)*. Troels Smith. 1963. 64 p. A4. 26,75 kr.
49. *Spredningen på radiatorventilers strømningsmodstand (A Study of the Dispersion Displayed by Radiator Valves)*. Sven Mandorff, Kaj Ovesen og Hanne Spøhr. 1963. 82 p. A4. 26,75 kr.

Alle instituttets publikationer kan købes i boghandelen og hos Teknisk Forlag, Skelbæk-gade 4, København V. Telefon HI 6801. Samme steder fås SBI-publikationsliste, der er en bestillingsseddel med en kort omtale af hver publikation.

## STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

*Borgergade 20, København K. Telefon Minerva 5630*

*SBI er en selvstændig institution, der ledes af en bestyrelse udpeget af boligministeren, SBI er oprettet ved lov nr. 123 af 19. marts 1947, SBI har til opgave » - at følge, fremme og samordne teknisk, økonomisk og anden undersøgelses- og forskningsvirksomhed, som kan bidrage til en forbedring og billiggørelse af byggeriet, samt at udøve oplysningsvirksomhed angående byggeforskningens resultater«.*

## NORGES BYGGFORSKNINGSINSTITUTT

*Forskningsveien 1, Oslo 3. Telefon 69 58 80*

*NBI er et selvstendig institutt under Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd, som oppnevner styret. NBI ble opprettet 1953 og avløste det midlertidige Kontoret for byggforskning fra 1949.*

*NBI skal fremme byggforskningen ved å klargjøre oppgavene og få dem løst; ved å virke for frivillig koordinering av tiltak og sørge for at forsøksresultater blir gjort kjent.*

*NBI skal samarbeide med myndigheter, organisasjoner o. a. og bistå offentlige og private oppdragsgivere.*

## STATENS RÅD FÖR BYGGNADSFORSKNING

*Linnégatan 64, Stockholm Ö. Telefon 63 56 20*

*BFR - Byggforskningsrådet - sorterar under Socialdepartementet.*

*BFR skall främja forskning och rationalisering inom byggnadsfacket och verka för att verksamheten inriktas på särskilt viktiga uppgifter, lämna medelsbidrag för forsknings- och försöksverksamhet inom byggnadsområdet samt draga försorg om att resultaten av denne verksamhet blir på lämpligt sätt offentliggjorda.*

*BFR sprider under samlingsnamnet *Byggforskningen* forsknings- och försöksresultat i form av handböcker, handlingar, rapporter, småskrifter, särtryck av tidskriftsartiklar m. m.*

## STATENS INSTITUT FÖR BYGGNADSFORSKNING

*Linnégatan 64, Stockholm Ö. Telefon 63 56 20*

*SIB sorterar under Socialdepartementet.*

*SIB bedriver sådan forsknings- och försöksverksamhet, som är ägnad att främja en rationell utveckling av planering, produktion och förvaltning inom byggnadsområdet (företrädesvis problem, som ej är föremål för uppmärksamhet från andra forskningsinstitutioners eller enskilda forskares sida).*

## STATENS TEKNISKA FORSKNINGSANSTALT

*Lönrotsgatan 37, Helsingfors. Telefon 30 771*

*Anstalten som konstituerades 16. 1. 1942 (förfatningssamling n:o 44) är underställd handels- och industriministeriet.*

*På Statens tekniska forskningsanstalt ankommer att bedriva teknisk forskningsverksamhet i vetenskapligt och allmännyttigt syfte m. m. på byggnadstekniska området, att utföra materialprovningssuppdrag jämte andra forskningsuppdrag samt att bistå tekniska högskolan i undervisnings- och forskningsarbete.*

PRIS KR. 8,75 i.o.