

FEJLKORREKTION

VED

KOPMÅLINGER

CARSTEN BREDAHL NIELSEN

INDHOLD

	SIDE
Forord	
Sammenfatning	
1. INTRODUCTION	
1.1 Rapportens omfang	1
1.2 Fejlkilder ved kopmåling	1
2. TEORETISK BAGGRUND	
2.1 Varierende barometertryk	5
2.2 Luftlags- og overgangsmodstande	11
2.3 Overlapping ved forsegling mellem prøve og kop	14
2.4 Samlet korrektion	16
3. FORSØG	
3.1 Varierende barometertryk	17
3.2 Luftlags- og overgangsmodstande	20
4. DISKUSSION	23
5. KONKLUSIONER	24
6. REFERENCER	25
APPENDIX	
A: Resultater fra kopforsøg til undersøgelse af barometereffekt	27

NORDTEST-projekt 897-90:

"NORDTEST-metoder i CEN-standard for bestemmelse af fugttransportkoefficienter med kopmetoden"

FORORD

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med Nordtest-projektet "NORDTEST-metoder i CEN-standard for bestemmelse af fugttransportkoefficienter med kopmetoden". Projektet er udført på Laboratoriet for Bygningmaterialer, DTH, med Ph.D Kurt Kielsgaard Hansen som videnskabelig ansvarlig. Projektet er udført i perioden oktober 1991 til februar 1992. Til udarbejdelse af denne rapport har civilingeniør Carsten Bredahl Nielsen sammenlagt været fulltidsansat i 1,5 måned. Kopforsøg er udført af laborant Robert Madsen. Projektet er finansieret af NORDTEST.

SAMMENFATNING

Rapporten behandler 3 fejlkilders betydning ved bestemmelse af fugttransportmodstanden med kopmetoden. De tre fejlkilder er varierende barometertryk, luftlags- og overgangsmodstande og overlapning ved forsegling mellem prøve og kop. Fejlkildernes betydning analyseres teoretisk og følsomheden overfor ændringer i klima og koppens udformning vurderes. Ligninger til beregning af en korrektion for de tre fejlkilder er angivet.

Fejlkildernes praktiske betydning belyses ud fra to måleserier i kopudstyret med materialer med en meget høj fugttransportmodstand (tagfolie, aluminium og plexiglas) og en meget lav fugttransportmodstand (gipsplader).

Ud fra teoretiske analyser og to eksperimenter i kopudstyret kan der drages følgende konklusioner om fejlkildernes betydning for kopmålinger:

Et varierende barometertryk har kun betydning for meget tætte materialer. De udførte forsøg har vist, at koppens tæthed er mere kritisk end den fejl, et varierende barometertryk giver. Det er nødvendigt at sikre koppens tæthed meget omhyggeligt. Koppens tæthedsgrad kan bestemmes med forsøg svarende til dem, der er beskrevet i denne rapport. Udbøjning af materialer har kun betydning, hvis materialet har et lavt E-modul og samtidig er tæt. I rapporten er angivet, hvordan der kan foretages en korrektion for udbøjning af materialet.

Luftlags- og overgangsmodstande har betydning for materialer med en lille fugttransportmodstand. For store luftlagstykkelser måles fugttransportmodstanden i et andet RF-område end det forventede, hvilket gør det vanskeligt at sammenligne målinger. Selv med korrektion bør det derfor tilstræbes at gøre luftlaget i koppen så lille som muligt.

Overlapning mellem prøve og kop kan give en ganske betydelig forøgelse af fugttransporten for tykke (sammensatte) prøver som gipsplader og betonskiver. Effekten er i denne rapport ikke eftervist eksperimentelt, men korrektion for effekten giver en mindre spredning på bestemmelsen af fugttransportmodstanden.

Det er karakteristisk, at de forskellige korrektioner ofte ophæver hinanden, og i middel ændres fugttransportmodstanden ikke ved korrektion. Spredningen uden korrektion er derimod større, og med få målinger er det derfor vanskeligt at sammenligne resultater. Med en korrektion for de forskellige fejlkilder opnås en mindre spredning og dermed bedre sammenlignelige resultater.

1. INTRODUKTION

Godkendelsen af nye byggematerialers fugtmekaniske egenskaber vil i fremtiden være baseret på prøvning efter CEN-prøvningsmetoden TC 88/WG1 DETERMINATION OF THE WATER VAPOUR PERMEABILITY OF BUILDING AND INSULATING MATERIALS. Det er derfor vigtigt, at prøvningen sker, så resultatet er ens fra land til land, og kriteriet for godkendelse dermed er ens i de forskellige lande.

Ved bestemmelse af fugttransportmodstande med kopmetoden (West og Hansen (1988)) optræder en række fejlkilder, der betyder, at det kan være vanskeligt at sammenligne målinger mellem forskellige laboratorier. Det er vigtigt at analysere og dokumentere disse fejlkilders betydning, så man kan få indarbejdet betydende fejlkilder i CEN-prøvningsmetoden. NORDTEST har metoderne NT-BUILD 130 og NT-BUILD 165 til mulig implementering i CEN-prøvningsmetoden. Denne rapport er en del af et NORDTEST projekt, der har til formål at give NORDTEST indflydelse på udarbejdelsen af CEN-prøvningsmetoden. Projektets titel er "NORDTEST-metoder i CEN-standard for bestemmelse af fugttransportkoefficienter".

1.1 RAPPORTENS OMFANG

Rapporten er en analyse af tidligere udførte forsøg (Lund 1990) og nye forsøg til vurdering af fejlkilder betydning ved bestemmelse af fugttransportmodstande med kopmetoden. Med udgangspunkt i en teoretiske beskrivelse vurderes fejkildens betydning teoretisk (følsomhedsanalyse). Den praktiske betydning vurderes udfra forsøg. I denne rapport er følgende fejlkilder behandlet

Varierende barometertryk
Luftlags- og overgangsmodstande
Overlapning ved forsegling mellem prøve og kop

1.2 FEJLKILDER VED KOPMÅLINGER

For bygningsingeniører er formålet med at bestemme fugttransportmodstande at kunne vurdere, hvor velegnet et materiale er i en bestemt konstruktion. Der er to måder at gøre dette på

1. Opbygning af konstruktionen med materialet og måling af fugttransport i brugstilstanden. Dette kan evt. gøres i laboratoriet.
2. Måling af materialets fugttransportmodstand og beregning af fugttransport i brugstilstanden udfra en teoretisk model.

Den første metode er naturligvis den, der kommer virkeligheden nærmest. Men da et materiale indgår i mange forskellige konstruktioner betyder det, at man skal opbygge og måle på mange typer konstruktioner, hvilket i praksis ikke er økonomisk overkommeligt. Desuden kan det være vanskeligt i praksis at gennemføre en måling på den færdige konstruktion.

Ved måling af materialets fugttransportmodstand reduceres antallet af målinger betydeligt, da materialerne kan kombineres på mange måder. Det kræver imidlertid, at målingen af fugttransportmodstanden er nøjagtig, og at man har en god teoretisk beregningsmodel.

Med en nøjagtig måling af fugttransportmodstanden menes, at det skal være den "rene" materialeparameter uden indflydelse af fejlkilder. Dette kan opnås ved at måle fugttransportmodstanden under givne standardbetingelser og derefter korrigere for de forskellige fejlkilder. Det kræver to ting

1. Der skal opstilles standardbetingelser, der med sikkerhed kan overholdes af prøvningslaboratorierne. Denne sikkerhed kræver opfyldelse af bestemte tolerancer under prøvningen og krav til dokumentation efter prøvningen.
2. Kendskab til fejlkilderne og en teoretisk model til beregning af deres effekt og korrektion for effekten.

Idag findes forskellige europæiske normer, der opstiller standardbetingelser for prøvningen. Eksempler på disse er

CEN TC88/WG1 N401 (nyeste version) eller ISO TC163/SCI/WG8 Draft N2E
ASTM E96-80
DIN 52 615
SIS 021582
NT-BUILD 130
NT-BUILD 165
ISO-DIS 1663-2
SIA 279 (ikke isotherm)

Indholdet af disse vil ikke blive diskuteret i denne rapport. Der er lavet flere sammenlignende undersøgelser af forskellige laboratoriers bestemmelse af fugttransportmodstande (Hansen og Bertelsen (1989), B.C.R. Project 151 (1991)). Konklusionen på disse undersøgelser er, at det er vanskeligt at opnå de samme resultater på forskellige laboratorier, selv om betingelserne for prøvningen er meget nøje fastlagt. Det skyldes dels at betingelserne ikke er tilstrækkeligt nøjagtige men især, at de enkelte laboratorier ikke opfylder de krav, der er stillet til prøvningen og dokumentationen af denne. Det peger på, at det kan være nødvendigt at autorisere nogle få laboratorier, der overfor en uvildig kontrolinstans kan dokumentere at opfylde de stillede krav.

Det andet krav om kendskab til fejlkilderne og en teoretisk model til beregning af deres effekt er søgt belyst i denne rapport. Nedenfor er optillettet en liste over de fejlkilder, der kan tænkes at have betydning ved kopmålinger. Listen er tænkt som en oversigt, og kun tre af fejlkilderne omtales nærmere i denne rapport. Det er varierende barometertryk, luftlags- og overgangsmodstande og overlapning ved forsegling mellem prøve og kop. Heri ligger der ikke en vurdering af, at de andre fejlkilder er ubetydelige, det er blot en vurdering af, at disse tre fejlkilder er væsentlige.

FEJLKILDER VED STATIONÆR, ISOTERM DAMPTRANSPORT

Geometrisk udformning af kop og prøve

- Forsegling af kanter
- Overlapning ved forsegling mellem prøve og kop
- Prøvetykkelse
- Overfladeareal af prøver
- Forhold mellem overfladeareal og prøvetykkelse

Fysiske egenskaber af prøve

- Inhomogeniteter i prøve
- Anisotropi i prøve
- Væsketransport ved høje RH
- Volumenændringer af prøve under måling
- Adsorption i materiale
- Hysteres, forskel mellem adsorption og desorption

Klima omkring prøve

- Svingninger i RH og temperatur i prøvekammer
- Svingninger i RH og temperatur over saltopløsning i kop
- Luftlagsmodstand (kan variere under prøvning)
- Overgangsmodstand (grænselag)
- Vindhastighed over prøve
- Barometertryk

Måleteknik

- Vægtens følsomhed
- Nøjagtighed af RH-føler
- Nøjagtighed af temperaturføler

Beregningsteknik

- Test for stationær transport
- Test for grove målefejl
- Grafisk afbildning

IKKE-STATIONÆRE EFFEKTER

- Stabilisering af dampflux
- Adsorption i kop materiale

2. TEORETISK BAGGRUND

I dette kapitel gives en teoretisk gennemgang af tre fejlkilder: Varierende barometertryk, luftlags- og overgangsmodstande og overlapning ved forsegling mellem prøve og kop. Fejlkildernes følsomhed overfor variation af de indgående parametre analyseres teoretisk. I kapitel 3 gives på baggrund af forsøg en vurdering af fejlkildernes praktiske betydning.

2.1 VARIERENDE BAROMETERTRYK

Problem

Ved vejning af koppen reduceres vægten på grund af luftens opdrift. Opdriften afhænger af luftens densitet, der varierer med barometertrykket, luftens fugtindhold og temperaturen. Opdriften har kun betydning ved meget små vægtændringer af koppen, altså for materialer med en meget lille fugttransportkoefficient.

Korrektion

Det forudsættes, at volumen af koppen er konstant og at koppen er lufttæt. Dette kræver et stift materiale, således at prøven ikke bøjer ud og koppens samlede volumen derved ændres.

Densiteten af fugtig luft kan ifølge CRC (1984) bestemmes som

$$(2.1) \quad \rho_{air} = 1,2929 \left(\frac{273,13}{T} \right) \left[\frac{B - 0,3783RF P_s}{101300} \right]$$

hvor

ρ_{air}	=	densiteten af fugtig luft [kg/m ³]
T	=	absolut temperatur [K]
B	=	barometertryk [Pa]
P_s	=	vanddamps mætningstryk [Pa]
RF	=	relativ luftfugtighed

Vanddamps mætningstryk kan ifølge DANVAK grundbogen bestemmes som

$$(2.2) \quad P_s = \exp \left(23,5771 - \frac{4042,9}{T - 37,58} \right)$$

Korrektionen af koppens vægt bestemmes ved hver vejning som

$$(2.3) \quad \Delta m_{bar} = V_c \cdot \Delta \rho_{air}$$

hvor

Δm_{bar}	=	korrektionen af vægten [kg]
V_c	=	volumen af koppen inklusiv godstykkelsen [m ³]
$\Delta \rho_{\text{air}}$	=	ændringen af luftens densitet [kg/m ³]

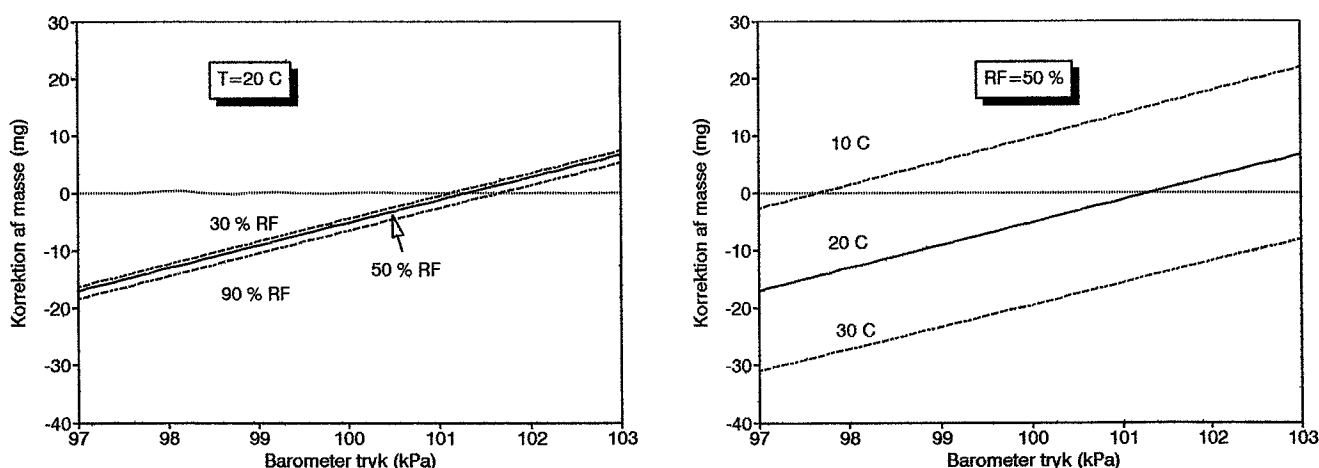
Koppens masse fås ved at addere korrektionen (2.3) ved hver vejning. Da man ved kopforsøg kun er interesseret i masseændringerne af kopperne som funktion af tiden er det tilstrækkeligt og mest praktisk kun at addere korrektionen i forhold til kopforsøgets start. I det følgende ses derfor på størrelsen af korrektionen i forhold til en given referencetilstand. Denne referencetilstand vælges som

Temperatur	= 20 °C
RF	= 50 %
Barometertryk	= 101,3 kPa
Volumen af kop	= 333 cm ³

Denne tilstand er typisk for det kopudstyr, der anvendes på LBM. Valget af en anden referencetilstand ville give tilsvarende resultater. Af figur 2.1 ses, at ved stigende barometerstand i forhold til referencetilstanden er korrektionen positiv, svarende til at luftens densitet stiger, og ved faldende barometerstand er korrektionen negativ, svarende til at luftens densitet falder.

Følsomhedsanalyse

I figur 2.1 er beregnet korrektionen i forhold til referencetilstanden ved en ændring af barometerstanden. Til venstre er beregnet korrektionen for forskellige relative fugtigheder for fastholdt temperatur og til højre korrektionen for forskellige temperaturer for fastholdt relativ fugtighed.



Figur 2.1. Korrektion af koppens vægt ved varierende barometertryk i forhold til referencetilstanden. Følsomhed overfor ændringer i RF og temperaturen.

Korrektionerne er af størrelsesordenen 20 mg hvilket viser, at korrektionen kun har betydning for damptætte materialer som plastfolier, gummimembraner, diffusionstætte malinger m.v.

Ændringer i relativ fugtighed under målingen er uden betydning for korrektionen (figur 2.1 højre) hvorimod ændringer i temperaturen påvirker korrektionen betydeligt. Ved beregning af barometerkorrektionen er det derfor unødvendigt at tage hensyn til ændringer i RF hvorimod ændringer i temperaturen må medregnes.

Det skal bemærkes, at ændringer i RF under målingen naturligvis giver ændringer i fugttransporten gennem materialet, og i den forbindelse er af største betydning, men for barometerkorrektionen alene er det uden betydning.

Koppens volumen har ifølge formel (2.3) indflydelse på barometerkorrektionens størrelse. Det ses, at korrektionen er proportional med koppens volumen, så af hensyn til barometereffekten bør koppen være så lille som muligt. Da prøvearealet af hensyn til fugttransporten bør være så stort som muligt, betyder det, at koppens højde bør være så lille som det er praktisk muligt.

Udbøjning af materialet

I det ovenstående er det antaget, at prøven er uendelig stiv, hvilket betyder at koppens volumen er konstant. I praksis er det ikke tilfældet, især ikke for tynde materialer som plastfolier, hvor barometereffekten har størst betydning, da de samtidig er tætte.

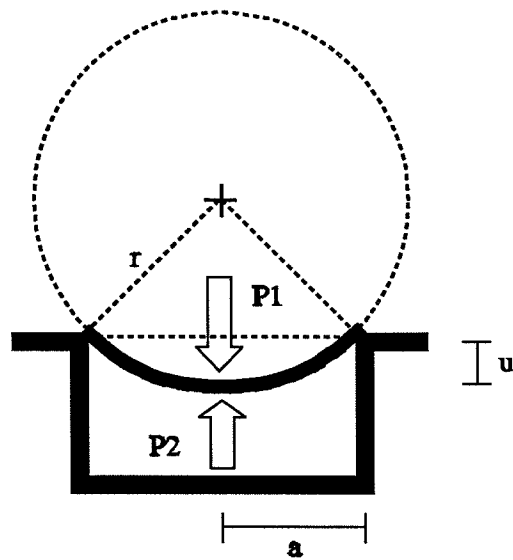
Hvis det antages, at samlingen mellem kop og prøve er lufttæt, vil en ændring i barometertrykket for ikke-stive materialer medføre en udbøjning af prøven og dermed en ændring af koppens volumen. Det vil igen betyde en vægtændring af koppen.

Ved stigende barometertryk vil materialet få en udbøjning ind i koppen, hvilket formindsker koppens volumen og dermed øger vægten, da opdriften bliver mindre. Samtidig vil luftens densitet stige, hvilket øger opdriften og dermed mindsker vægten.

Det modsatte vil være tilfældet ved faldende barometertryk. En udbøjning af materialet modvirker derfor den vægtændring, en ændring i barometerstanden giver.

Udbøjningen af prøven er principielt ikke stationær, da trykforskellen mellem kop og omgivelser vil bevirke, at luft transporteres igennem materialet og dermed med tiden udligner trykforskellen. Materialet kan dog have fået en blivende udbøjning som en følge af materialets krybning, hvorved koppens oprindelige volumen ikke genvindes, selvom trykforskellen udlignes. Denne effekt vil der dog blive set bort fra i det følgende.

Størrelsen af materialets udbøjning, og dermed ændring i koppens samlede volumen, kan beregnes udfra en mekanisk model (figur 2.2). Det ydre barometertryk giver materialet en udbøjning af form som en kuglekalot. Antages en hydrostatisk spændingstilstand som i en kugleskal med radius r og med et indre tryk P_1 (barometertryk) og et ydre tryk P_2 (tryk i kop, referencetryk) kan flytningen af kugleskallen i forhold til den situation, hvor de to tryk er lige store, ifølge Sokolnikof (1956) beregnes som



Figur 2.2. Mekanisk model til beregning af udbøjningen af en cirkulær membran påvirket af det ydre tryk P_1 (barometertryk) og det indre tryk P_2 (tryk i kop, referencetryk).

$$(2.4) \quad u = \frac{3 r (P_1 - P_2)}{5 E}, \quad P_1 > P_2$$

hvor

u	=	udbøjningen af materialet (m)
r	=	radius i kugleskal (m)
P_1	=	Indre tryk i kugleskal (Barometertryk) (Pa)
P_2	=	Ydre tryk mod kugleskal (tryk i kop) (Pa)
E	=	Elasticitetsmodulen af forsøgsmaterialet (Pa)

Materialet antages uendeligt tyndt, svarende til at flytningen af inderside og yderside af kugleskallen er ens. Tværkontraktionstallet er antaget at være 0,2, hvorved forskydningsmodulen $G=E/2,4$ og kompressionsmodulen $K=E/1,8$.

Ved kraftligevægt haves geometrisk (figur 2.2)

$$(2.5) \quad r^2 = a^2 + (r - u)^2$$

hvor

a	=	radius af forsøgsmaterialet (m)
-----	---	---------------------------------

Indsættes (2.5) i (2.4) fås

$$(2.6) \quad u = a \sqrt{\frac{3(P_1 - P_2)}{10E - 3(P_1 - P_2)}}, \quad P_1 > P_2$$

Udfra udbøjningen givet ved (2.6) kan volumet af kuglekalotten ifølge Teknisk Ståbi (1973) bestemmes som

$$(2.7) \quad V_{ud} = \frac{\pi u}{6} (3a^2 + u^2)$$

hvor

V_{ud} = volumen af den udbøjede kuglekalot [m^3]. V_{ud} regnes altid positiv.

Korrektionen af massen bestemmes udfra dette volumen som

$$(2.8) \quad \Delta m_{ud} = -V_{ud} \cdot \Delta \rho_{air}$$

hvor

Δm_{ud} = korrektionen af koppens vægt ved udbøjning af materialet [kg]

For stigende barometertryk fås en negativ korrektion svarende til at udbøjningen sker ind i koppen og vægten af koppen dermed bliver mindre end i referencetilstanden. For faldende barometertryk fås en positiv korrektion svarende til at udbøjningen sker ud af koppen og vægten af koppen dermed bliver større end i referencetilstanden. I dette tilfælde er P_1 trykket i koppen og P_2 barometertrykket.

Ved ændringer af temperaturen i forhold til referencetilstanden vil der ske en trykstigning i koppen, forudsat at den er lufttæt. En temperaturstigning vil få materialet til at bøje ud af koppen. Ved barometerstand lavere end reference barometerstanden vil dette forstærke udbøjningseffekten, mens det vil modvirke udbøjningseffekten over reference barometerstanden. Det modsatte vil være tilfældet ved et fald i temperaturen.

Ved en faldende temperatur fås en negativ korrektion på grund af udbøjningen ind i koppen. Dette vil modvirke barometereffektens positive korrektion ved et fald i temperaturen (figur 2.2). Det modsatte vil være tilfældet ved en stigning i temperaturen.

Hvis luften i koppen betragtes som en ideal gas kan trykket i koppen ved en temperaturstigning beregnes som

$$(2.9) \quad P_2 = \frac{T_2}{T_1} P_1$$

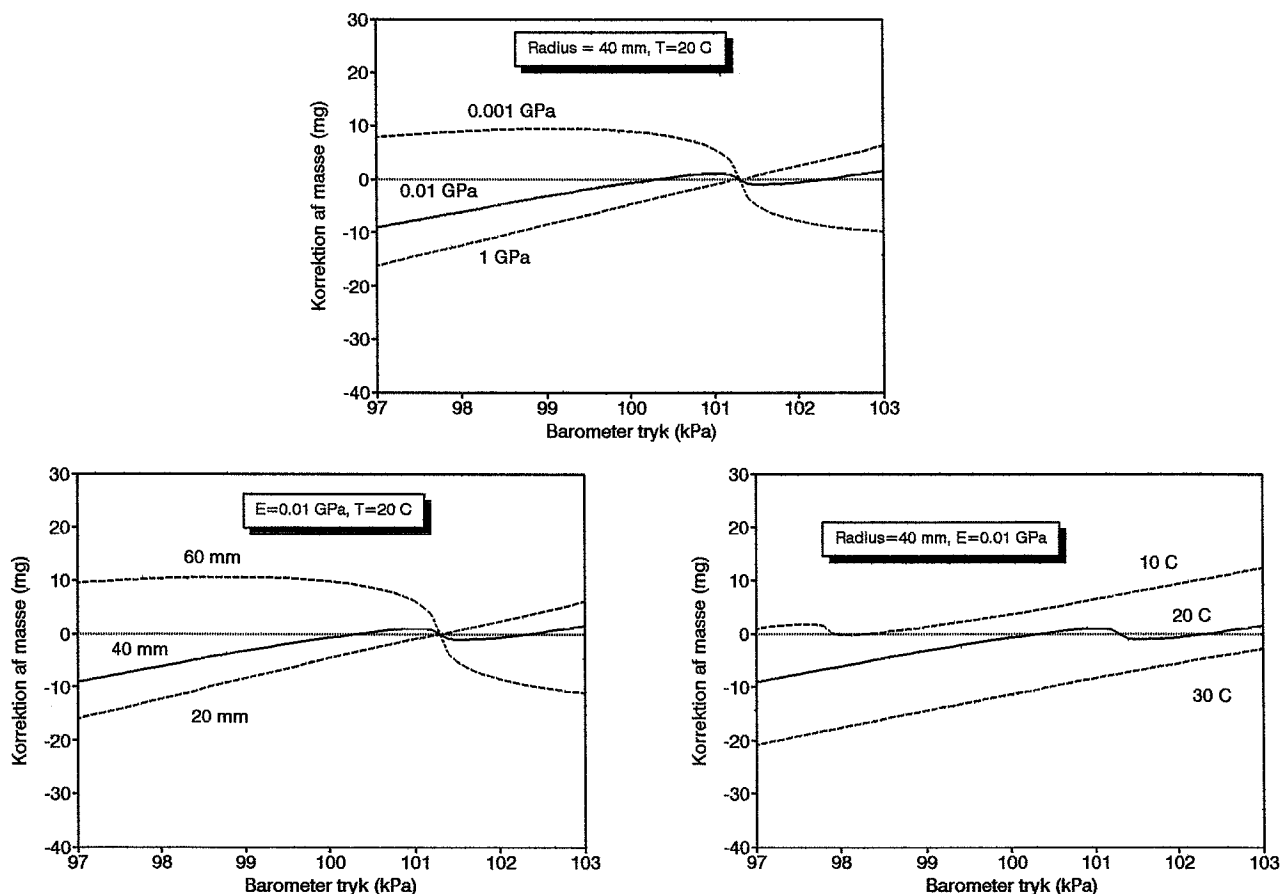
hvor

T_1 = reference temperaturen ved samling af kop [K]
 T_2 = den nye temperatur [K]
 P_1 = reference trykket ved samling af kop [Pa]
 P_2 = trykket i koppen ved temperaturen T_2 [Pa]

BEMÆRK, at temperaturerne er absolutte temperaturer [K].

Følsomhedsanalyse

I figur 2.3 er beregnet den samlede korrektion (summen af barometerkorrektion og udbøjningskorrektion) i forhold til referencetilstanden ved en ændring af barometerstanden. De to øverste figurer er beregnet for fastholdt klima (20 C, 50 % RF), mens den nederste graf viser følsomheden overfor en temperaturstigning.



Figur 2.3. Samlet korrektion af koppens vægt ved varierende barometertryk i forhold til referencetilstanden. Følsomhed overfor ændringer i E-modul, prøveradius og temperatur.

Det ses, at udbøjningskorrektionen i de angivne tilfælde er af samme størrelsesorden som barometerkorrektionen, og i nogle tilfælde ikke alene ophæver den barometerkorrektionen men bevirker en ligeså stor korrektion med modsat fortegn.

Til venstre i figur 2.3 er beregnet udbøjningskorrektionens følsomhed for ændringer i materialets elasticitetsmodul for fastholdt prøveradius (radius=40 mm), og til højre følsomheden for ændringer i prøvens radius for fastholdt elasticitetsmodul ($E=0.01$ GPa). Elasticitetsmodul og prøveradius påvirker ikke barometerkorrektionen, så de fundne variationer i figur 2.3 skyldes alene prøvens udbøjning.

Af figur 2.3 ses, at udbøjningseffekten kun har betydning for materialer, der har et lavt elasticitetsmodul (og samtidig er tynde, som det er forudsat i den mekaniske model). Dette er tilfældet for plastfolier og gummimembraner, der også er damptætte, så barometereffekten har betydning. For stive materialer nærmer korrektionen sig barometerkorrektionen alene.

Af figur 2.3 ses også, at udbøjningseffekten har betydning for prøver med en stor radius. For små radier nærmer korrektionen sig barometerkorrektionen alene. Af hensyn til udbøjningseffekten alene er det derfor en fordel at have et så lille overfladeareal som muligt. Dette er imidlertid i modstrid med kravet om et stort overfladeareal af hensyn til den transporterede fugtmængde.

Sammenholdes figur 2.3 nederst med figur 2.1 til højre ses, at en trykstigning i koppen ved en temperaturstigning modvirker barometereffekten. Det samme er tilfældet for et trykfald i koppen ved et fald i temperaturen.

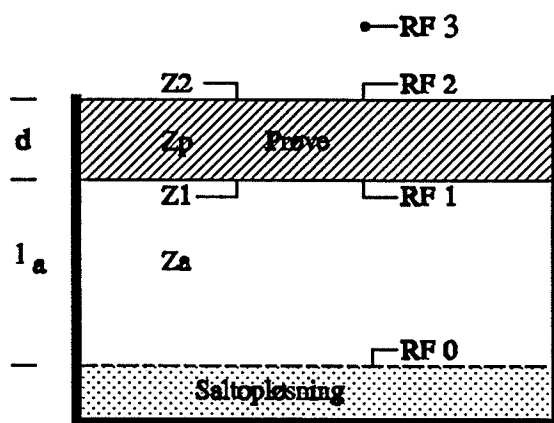
2.2 LUFTLAGS- OG OVERGANGSMODSTANDE

Problem

Luftlaget mellem saltopløsning i koppen og prøven giver en modstand mod damptransport, der ikke kan tilskrives materialet. Ligeledes giver overgangsmodstande på under- og overside af materialet en modstand mod damptransport. Disse modstande har betydning for materialer med en lille modstand mod damptransport, da luftlags- og overgangsmodstande kommer til at udgøre en forholdsvis stor del af transportmodstanden i koppen.

Korrektion

Udtryk til korrektion for luftlags- og overgangsmodstande er givet af Hansen og Lund (1990). Den samlede modstand mod damptransport i koppen betegnes Z_m . Det er den modstand, der måles i kopudstyret. Modstanden er en sum af overgangsmodstandene Z_1 og Z_2 ved materialets underside og overside, luftlagets modstand Z_a og materialets modstand Z_p (figur 2.4).



Figur 2.4. Damptransport modstande og relative fugtigheder i kop.

Den stationære damptransport gennem materialet bestemmes som

$$(2.10) \quad g = \frac{\Delta p}{Z_p + Z_1 + Z_2 + Z_a} = \frac{\Delta p}{Z_m}$$

hvor

g	=	fluxen gennem materialet [$\text{kg/m}^2 \text{ s}$]
Δp	=	damptryksforskellen [Pa]
Z_p	=	damptransport-modstanden for materialet alene [$\text{Pa s m}^2/\text{kg}$]
Z_1	=	overgangsmodstanden ved prøvens underside [$\text{Pa s m}^2/\text{kg}$]
Z_2	=	overgangsmodstanden ved prøvens overside [$\text{Pa s m}^2/\text{kg}$]
Z_a	=	luftlagets damptransport-modstand [$\text{Pa s m}^2/\text{kg}$]

Overgangsmodstandene ved 20 C kan ifølge Pedersen (1990) bestemmes som

$$(2.11) \quad Z = \frac{1,53 \cdot 10^8}{5,82 + 3,96v} \quad v \leq 5 \text{ m/s}$$

$$Z = 1,99 \cdot 10^7 v^{-0.75} \quad v > 5 \text{ m/s}$$

hvor

Z	=	overgangsmodstanden [$\text{Pa s m}^2/\text{kg}$]
v	=	vindhastigheden ved overgangen [m/s]

Overgangsmodstanden i koppen findes af (2.11) ved at sætte $v=0$. Luftlagets damptransport modstand beregnes som

$$(2.12) \quad Z_a = \frac{l}{\delta_a}$$

hvor

l_a	=	luftlagets tykkelse
δ_a	=	vanddamp-permeabilitetskoefficienten i luft [kg/Pa m s]

Den relative fugtighed ved overfladen af saltopløsningen eller tørremidlet i koppen betegnes RF_0 . Den relative fugtighed på prøvens under- og overside betegnes h.h.v. RF_1 og RF_2 , mens den relative fugtighed i prøvekommeret betegnes RF_3 figur 2.4). Ved stationær damptransport kan RF ved prøvens underside bestemmes som

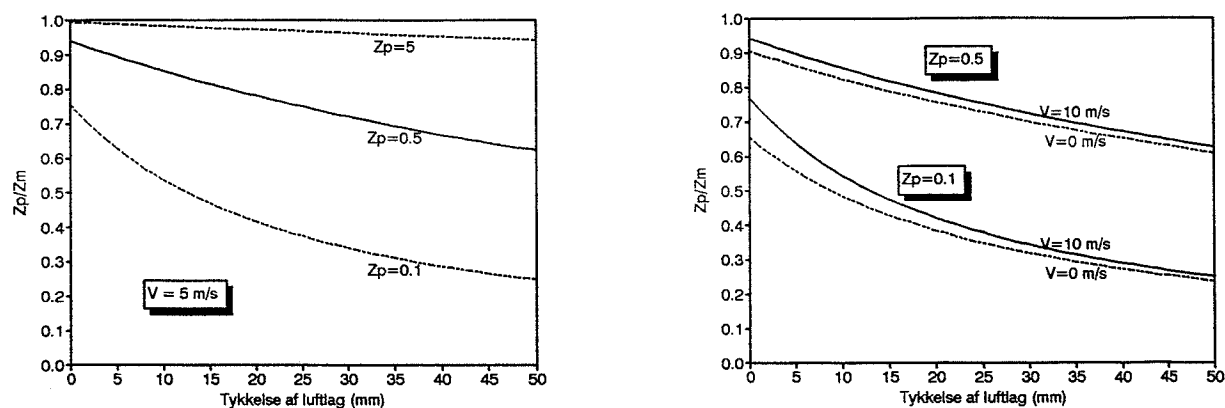
$$(2.13) \quad RF_1 = RF_0 + \frac{Z_a + Z_1}{Z_m} (RF_3 - RF_0)$$

hvor

RF_0	=	relativ fugtighed ved overfladen af saltopløsning eller tørremiddel i koppen
RF_1	=	relativ fugtighed ved undersiden af prøven
RF_2	=	relativ fugtighed ved oversiden af prøven
RF_3	=	relativ fugtighed i prøvekommeret

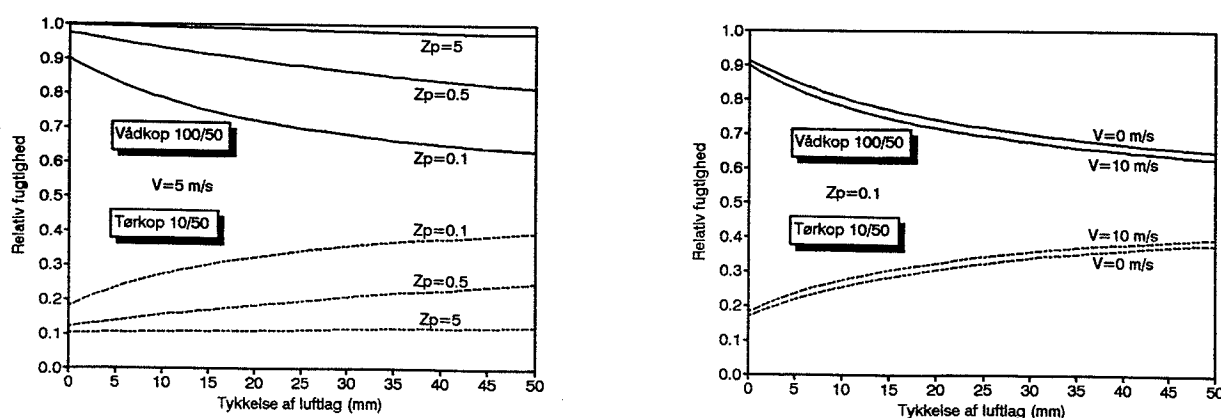
Følsomhedsanalyse

I figur 2.5 er beregnet forholdet mellem materialets damptransport modstand, Z_p , og den samlede (målte) damptransport modstand i koppen, Z_m , som funktion af luftlagets tykkelse. Til venstre er beregnet forholdet for tre forskellige værdier af Z_p for fastholdt vindhastighed over prøven (5 m/s), og til højre er beregnet forholdet for to forskellige værdier af Z_p for vindhastighederne 0 m/s og 10 m/s. Ved beregningen er antaget $\delta_a = 0,185 \cdot 10^{-9} \text{ kg/(m s Pa)}$. BEMÆRK, Z_p er angivet i enheden $10^9 \text{ (Pa s m}^2\text{)/kg}$.



Figur 2.5. Forhold mellem materialets damptransport modstand og den målte damptransport modstand i koppen for forskellige værdier af Z_p [$10^9 \text{ Pa s m}^2\text{/kg}$] og vindhastighed.

I figur 2.6 er beregnet den relative fugtighed på prøvens underside som funktion af luftlagets tykkelse for h.h.v. vådkop (100/50) og tørkop (10/50). Til venstre er beregnet RF for tre forskellige værdier af Z_p for fastholdt vindhastighed (5 m/s), og til højre er beregnet RF for vindhastighederne 0 m/s og 10 m/s for fastholdt $Z_p = 0.1 \cdot 10^9 \text{ (Pa s m}^2\text{)/kg}$.



Figur 2.6. Relativ fugtighed på prøvens underside som funktion af luftlagets tykkelse for vådkop og tørkop. Variation med Z_p [$10^9 \text{ Pa s m}^2\text{/kg}$] og vindhastighed.

Det ses, at luftlags- og overgangsmodstande kun har betydning for materialer med lille damptransport modstand. Her kan luftlags- og overgangsmodstandene udgøre mere end 75% for et 50 mm luftlag. For større værdier, $Z_p = 5 \cdot 10^9$ (Pa s m²)/kg, udgør luftlags- og overgangsmodstandene kun omkring 5% for et 50 mm luftlag i koppen.

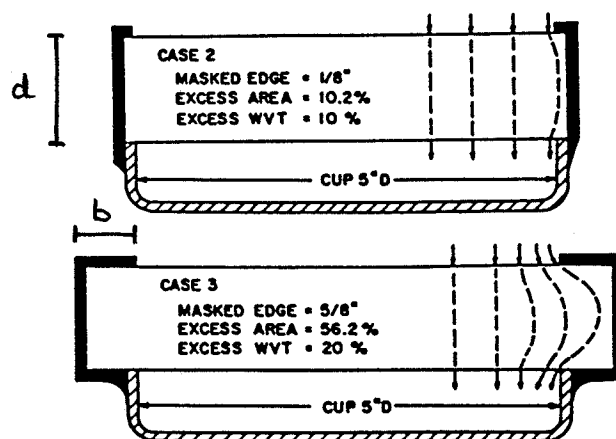
Det ses også, at forskelle i vindhastigheden over prøverne ikke med de givne forudsætninger har så stor indflydelse på målingen af damptransport modstanden. Størst indflydelse haves for lave værdier af Z_p og en lille luftlagstykkelser.

For små værdier af Z_p ændres den relative fugtighed på prøvens underside betydeligt. For en vådkop med et 50 mm luftlag og $Z_p = 0.1 \cdot 10^9$ (Pa s m²)/kg antages normalt, at RF er 100% på prøvens underside, men i virkeligheden er RF mindre end 70%. Luftlagets modstand betyder, at damptransporten bliver mindre, men selvom man korrigerer for dette, måler man damptransport-modstanden i et andet RF-område end antaget.

2.3. OVERLAPNING VED FORSEGLING MELLEML PRØVE OG KOP

Problem

For at opnå en tæt forsegling mellem prøve og kop er det nødvendigt at lade forseglingen overlappe prøven i kanten. Herved fås en flerdimensional damptransport i kanten, hvilket forøger damptransporten igennem prøven i forhold til det eksponerede areal.



Figur 2.7. Flerdimensional damptransport ved overlapning mellem prøve og kop. Joy and Wilson (1965).

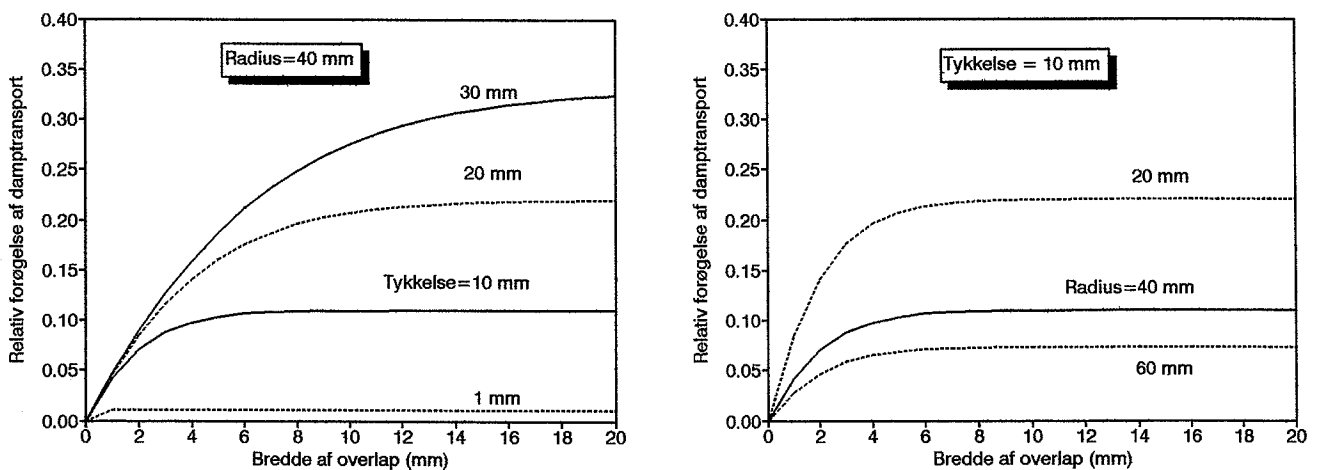
Korrektion

Beregningsudtryk for cirkulære kopper opstillet af Joy and Wilson (1965)

$$(2.14) \quad \frac{\Delta g_e}{g_e} = \frac{O d}{A \pi} \ln \left[\frac{2}{1 + \exp(-2\pi b/d)} \right]$$

hvor

- Δg_e = ekstra damptransport på grund af overlappingszonen [$\text{kg/m}^2 \text{ s}$]
- g_e = damptransport eksklusiv bidrag på grund af overlappingszonen [$\text{kg/m}^2 \text{ s}$]
- d = tykkelse af prøve [m]
- b = bredde af overlappingszone
- O = omkreds af eksponeret areal [m]
- A = eksponeret areal [m^2]



Figur 2.8. Relativ forøgelse af damptransport som funktion af overlappets bredde for forskellige værdier af prøvetykkelse (venstre) og prøveradier (højre).

Følsomhedsanalyse

I figur 2.8 er beregnet den relative forøgelse af damptransporten gennem et materiale på grund af flerdimensional damptransport som funktion af overlappets bredde. Til venstre er beregnet forøgelsen ved forskellige prøvetykkelser, og til højre forøgelsen ved forskellige prøveradier.

Det ses, at den relative forøgelse er uden betydning for tynde prøver, mens forøgelsen vokser med bredden af overlappet for tykkere prøver. Den relative forøgelse går dog mod en konstant værdi for store overlap. Den relative forøgelse er størst for prøver med en lille radius og aftager for voksende prøveradius.

Det skal naturligvis tilstræbes at undgå overlap mellem kop og prøve. Da overlappet imidlertid har betydning for koppens tæthed kan et lille overlap ikke i praksis undgås. I LBM's kopudstyr er overlappet 12 mm. For at undgå overlappingseffekten kan man istedet tilstræbe så tynde prøver som muligt med en så stor radius som muligt.

2.4 SAMLET KORREKTION

Ovenfor er omtalt tre forskellige korrektioner. De har hver især betydning for en bestemt type materiale eller en bestemt udformning af koppen. I tabel 2.1 er givet en oversigt.

Tabel 2.1. *Korrektioner ved kopforsøg og deres betydning*

Korrektion	Betydning for
Barometertryk Udbøjning, tryk i kop	Materialer med høj Z_p Tynde, ikke-stive materialer med stort prøveareal
Luftlags- og overgangsmodstande	Materialer med lav Z_p
Overlap mellem kop og prøve	Tykke prøver med lille radius. Anisotrope materialer

I praksis er det unødvendigt at foretage korrektion både for barometertryk og luftlags- og overgangsmodstande, da de to korrektioner har betydning for to forskellige typer materialer. På samme måde er det unødvendigt at foretage både barometerkorrektion og korrektion for overlap, da materialer med høj Z_p ofte er tynde (plastmaterialer). For beton- og cement-pastaprøver kan det dog være nødvendigt, da prøverne både har en høj Z_p og er tykke. Her har udbøjningseffekten dog ingen betydning.

Derimod bør man næsten altid foretage korrektion for både luftlags- og overgangsmodstande og korrektion for overlap, da materialer med lav Z_p ofte medfører tykke prøver (meget porøse materialer).

Foretages korrektionerne med computerberegning er det enkleste at foretage alle korrektionerne hver gang, da korrektionernes betydning automatisk vil fremkomme af beregningerne. *En undtagelse er dog tykke prøver med et lavt E-modul, hvor modellen for udbøjningskorrektion ikke er gyldig.*

Den naturlige rækkefølge for korrektionerne vil være

- 1. Barometerkorrektion (inklusive korrektion for udbøjning)**
Det er en korrektion alene på vejningerne og er derfor forudsætningen for korrekt beregning af masseændringer.
- 2. Korrektion for overlap**
For et givent flow i koppen giver overlappet anledning til et ekstra flow. Dette fratrækkes, hvorved man får koppers flow, hvis der ikke havde været noget overlap.
- 3. Korrektion for luftlags- og overgangsmodstand**
Med det fundne flow under punkt 2 kan den korrigerede damptransportmodstand nu bestemmes ved at fratrække luftlags- og overgangsmodstandene.

3. FORSØG

I dette kapitel beskrives to forsøg, der skal belyse fejlkorrekionernes praktiske betydning. Forsøgene med varierende barometertryk er lavet specielt til denne rapport, mens forsøgene med luftlags- og overgangsmodstande er udført tidligere og beskrevet af Hansen, Lund og Nielsen (1990).

3.1 VARIERENDE BAROMETERTRYK

Formål

Forsøgets formål er at vurdere effekten af varierende barometertryk ved kopmålinger for meget tætte materialer. Dette blev gjort med tomme kopper samlet i klimakammeret, så klimaet under kopforsøget var ens på begge sider af prøverne. Der kunne derfor ikke foregå nogen damptransport under forsøget.

Fremgangsmåde

Der blev anvendt 4 kopper med en 1,50 mm tyk tagfolie, 3 kopper med 0,76 mm tykke aluminiumsskiver og 5 kopper med 2,02 mm tykke plexiglasskiver. Desuden blev anvendt to 500 ml koniske glaskolber, den ene med en sleben glasprop og den anden med en gummiprop. Serien er benævnt SERIE 51.

Kopperne blev samlet ved et atmosfæretryk på 98,9 kPa, temperaturen 23,5 C og relativ fugtighed 48,2%. Der var ikke noget fugtoptagende eller fugtafgivende materiale i kopperne. Kopperne blev anbragt i kopudstyrets klimakammer og vejte daglig i en periode på knap 2 måneder. Temperatur og relativ fugtighed blev holdt konstant gennem perioden, mens barometertrykket varierede. Klimaet gennem perioden fremgår af tabel 3.1.

Tabel 3.1. *Klima i kammer under kopforsøg.*

KLIMA	Middel	Std.	Min.	Max.
Temperatur (C)	23,1	0,2	22,8	23,6
RF (%)	50,3	1,4	47,8	53,2
Barometertryk (kPa)	100,2	1,5	96,8	102,5

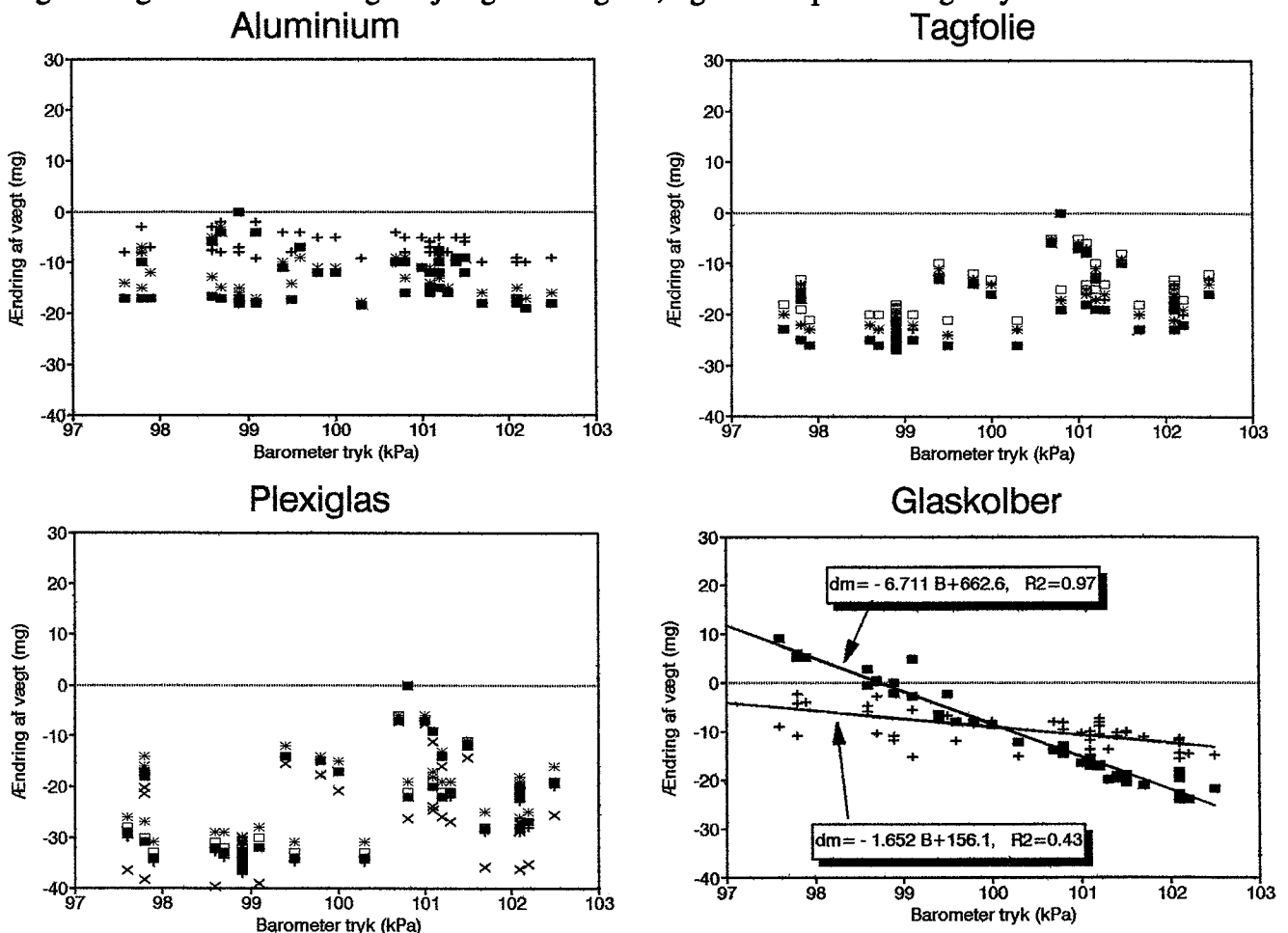
Som kontrol var der anbragt to koniske glaskolber i kammeret. Kolberne var tomme og lukket med h.h.v. en slebet glasprop (ø 19/17 mm) og en gummiprop (ø 38/30 mm). Propperne var ikke smurt med fedt. Kolberne blev vejte dagligt samtidig med kopperne.

Vejeproceduren er beskrevet af West og Hansen (1988). Efter kopforsøgets afslutning blev volumet af de samlede kopper med aluminiumsskiver bestemt ved vejning over og under vand.

Da de andre kopper var magen til bortset fra prøvetykkelsen, blev volumen af disse bestemt ud fra aluminium koppernes volumen og prøvetykkelserne. Volumen af glaskolberne blev bestemt ved vejning over og under vand med proppen påsat.

Resultater

I figur 3.1 er angivet vægtændringerne som funktion af barometertrykket for de tre materialer og de to glaskolber. Samtlige vejninger er angivet, og hver kop har sit eget symbol.



Figur 3.1. Vægtændringer som funktion af barometertrykket for de tre forskellige materialer og glaskolberne. Hvert punkt repræsenterer en vejning. Hver kop har sit eget symbol.

For hver kop er udregnet korrelationen (R^2) mellem vægtændring og barometertryk med lineær regressionsanalyse. Korrelationskoefficient og den rette linies ligning er angivet i figur 3.1 for de to glaskolber. For glaskolberne er yderligere udregnet korrelationskoefficienten mellem vægtændring og luftens densitet, hvorved man tager hensyn til ændringer i temperatur og RF. Korrelationskoefficienterne og den rette linies hældning α er beregnet for kopperne, men da korrelationskoefficienterne i alle tilfælde er meget lave, er værdierne ikke angivet for den enkelte kop.

Da temperatur og RF kun varierer svagt under forsøget vil luftens densitet med god tilnærmelse være proportional med barometertrykket (ligning (2.1)). Denne proportionalitetsfaktor kan ved 20 C, 50% RF bestemmes til $k=1,28 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^3 \text{ Pa}$. Ifølge ligning (2.3) skal der derfor teoretisk være en lineær sammenhæng mellem vægtændring og barometertryk med hældningskoefficienten $\alpha_{\text{teo}}=k V_c$, hvor V_c er volumenet af koppen. Der er i denne sammenhæng set bort fra udbøjningseffekten.

I tabel 3.2 er der for hvert materiale og for de to glaskolber angivet koppens middelvolumen og beregnet forholdet mellem α og α_{teo} . Desuden er angivet korrelationskoefficienten og koppens utæthed, bestemt som forskellen mellem α_{teo} og α . Tilsvarende data for de enkelte kopper er angivet i bilag A.

Tabel 3.2. Data fra kopforsøg til undersøgelse af barometereffekten. Korrelation mellem vægtændring og barometertryk.

BAROMETEREFFEKT	V_c (cm ³)	$\alpha/\alpha_{\text{teo}}$	R^2	Utæthed (mg/kPa)
Tagfolie, 1,50 mm	339,2	0,24	0,08	3,3
Aluminium, 0,76 mm	332,9	0,20	0,14	3,4
Plexiglas, 2,02 mm	343,7	0,18	0,02	3,6
Glaskolbe med glasprop	603,9	0,87	0,97	1,0
Glaskolbe med gummiprop	683,6	0,19	0,43	7,1

Diskussion

For glaskolben med sleben glasprop er der en god korrelation mellem vægtændring og barometertryk ($R^2=0,97$). Korrelationen er ikke bedre mellem vægtændring og luftens densitet hvilket viser, at variationerne af temperatur og RF er så små, at det ikke har nogen betydning for luftens densitet. Den beregnede proportionalitetsfaktor k er altså anvendelig. Forholdet $\alpha/\alpha_{\text{teo}}=0,87$ viser også en god overensstemmelse mellem teori og forsøg. Der kan altså ikke være tale om nogen betydelige usikkerheder i forbindelse med vejningerne.

For glaskolben med gummiprop er korrelationen mellem vægtændring og barometertryk dårligere ($R^2=0,43$). Samtidig ses, at kolben ved stigende barometertryk kun har haft et vægttab på 19% af det teoretisk forventede. Da der ikke kan have været tale om nogen fugttransport kan den eneste forklaring på afvigelsen være, at der på grund af det højere ydre tryk er strømmet luft ind i kolben, hvilket har reduceret vægttabet. Andre årsager synes udelukket på baggrund af resultatet for glaskolben med sleben glasprop.

Det er ikke usandsynligt, at kolben har været utæt, da gummiproppen kun var trykket ned i kolbens åbning, og at den igennem forsøgsperioden kan have løsnet sig. Det skal bemærkes, at der er tale om ganske små luftstrømninger. Ved sammenligning af α og α_{teo} kan strømmingen i middel beregnes til 7,1 mg/kPa svarende til 42 mg i hele området 97-103 kPa. Idet kolbens indre volumen er 577,2 cm³ ville kolben ved fuldstændig trykudligning veje 7,4 mg/kPa mere ($k V_c$). Dette er af samme størrelsesorden som den ovenfor bestemte vægtforøgelse (7,1 mg/kPa).

Til sammenligning kan strømmingen ind i glaskolben med glasprop beregnes til 1,0 mg/kPa. Da kolbens indre volumen er 514,7 cm³ ville en fuldstændig trykudligning betyde en vægtforøgelse på 6,6 mg/kPa, hvilket er langt mere end den beregnede vægtforøgelse. Glasproppen har altså været ganske tæt.

For kopperne med tagfolie, aluminium og plexiglas er korrelationen mellem vægtændring og barometertryk meget dårlig; der er ingen sammenhæng. På baggrund af målingerne på de to glaskolber må årsagen til den manglende korrelation være, at kopperne ikke er tætte. Ved stigning i barometertrykket udligner strømning af luft ind i kopperne vægttabet på grund af barometereffekten. Da denne strømning afhænger af tilfældige forhold omkring pakningernes tæthed, er trykudligningens tidsmæssige forløb også tilfældig, hvilket er årsagen til den manglende korrelation mellem vægtændring og barometertryk.

Utætheden er i middel 3,3 mg/kPa med en ringe variation. Da koppernes indre volumen er 237 cm³ ville en fuldstændig trykudligning betyde en vægtændring på 3,1 mg/kPa. Sammenholdt med den dårlige korrelation svarer dette til den beregnede utæthed. Ændringer i barometertrykket bliver altså fuldstændig ophævet af trykudligningen. På grund af dynamikken i trykudligningen fås samtidig en tilfældig usikkerhed på vejningerne, der kan være ganske vanskelig at korrigere.

Det skal dog bemærkes, at usikkerheden kun har betydning for meget nøjagtige målinger af små damptransport modstande. Den eneste måde at eliminere denne usikkerhed på er at gøre pakningerne tættere. Det her udførte forsøg kan bruges til at teste forskellige pakningers tæthed. Da tætheden sandsynligvis afhænger af det anvendte materiale, kan det tænkes, at sådanne blindforsøg indføres som en kvalitetssikring af meget nøjagtige målinger.

3.2 OVERLAPNING, LUFTLAGS- OG OVERGANGSMODSTANDE

Formål

Forsøgets formål er at vurdere effekten af en korrektion for overlapning, luftlags- og overgangsmodstande ved kopmålinger for materialer med lille damptransportmodstand. Forsøgene er beskrevet af Hansen, Lund og Nielsen (1990) og nedenstående er en bearbejdning af resultater herfra.

Fremgangsmåde

Der blev anvendt to typer gipsplader GN13 (13 mm tyk) og GU9 (9 mm tyk), hvoraf der blev udskåret ø100 mm prøveemner. Disse var monteret i retvendte vådkopper på følgende måder

- A. 1 lag gipsplade (GN13 og GU9)
- B. 2 lag gipsplader (GU9)
- C. 2 lag gipsplader med 3 mm luft imellem (GN13 og GU9)
- D. 3 lag gipsplader (GN13 og GU9)

For hver type forsøg blev anvendt 4 kopper og ud fra disse blev middelværdien af den samlede damptransportmodstand, Z_m , bestemt. Resultatet er angivet i tabel 3.3 og 3.4. Luftlagstykkelsen mellem vand i koppen og prøven var ved forsøgets start 5 mm. Der blev anvendt en særlig kopindsats så denne tykkelse var nøje fastlagt. Lysningsdiameteren i koppen var 79,8 mm og bredden af overlappet mellem prøve og kop dermed 10,1 mm.

Korrektion

Som angivet i afsnit 2.4 korrigeres først for overlap mellem kop og prøve. Korrektionen beregnes som angivet i ligning (2.14). Den korrigerede damptransportmodstand betegnes Z' og beregnes ud fra (2.10) og (2.14) som

$$(3.2) \quad Z' = \left(1 + \frac{\Delta g_e}{g_e} \right) Z_m$$

Det bemærkes, at korrektionen beregnes ud fra fugttransporten *uden* overlapeffekten. Da overlapeffekten forøger fugttransporten, bliver den korrigerede fugttransport mindre. Da damptransportmodstanden er omvendt proportional med fugttransporten bliver den korrigerede fugttransportmodstand Z' større end den målte, Z_m , hvilket fremgår af (3.2). Med betegnelserne fra figur 2.4 kan opstilles følgende ligninger til beregning af materialets damptransportmodstand i de 4 ovenstående tilfælde (A-D). Der ses her bort fra damptransportmodstanden Z_2 på koppers overside, da vindhastigheden over koppen er så høj, at overgangsmodstanden er uden betydning.

A.	1 lag	$Z' = Z_p + Z_1 + Z_a$
B.	2 lag	$Z' = 2 Z_p + Z_1 + Z_a$
C.	2 lag+ 3 mm luft	$Z' = 2 Z_p + 3 Z_1 + Z_a + Z_b$
D.	3 lag	$Z' = 3 Z_p + Z_1 + Z_a$

I de følgende beregninger angives Z altid i enheden $10^9 \text{ (Pa s m}^2\text{)/kg}$.

Z_a betegner damptransportmodstanden mellem vandet i koppen og materialet og Z_b damptransportmodstanden i luftlaget mellem de to gipsplader. Med $\delta_a = 0,185 \cdot 10^{-9} \text{ kg/(m s Pa)}$ kan damptransportmodstandene beregnes ud fra (2.13) til $Z_a = 0,03$ og $Z_b = 0,02$. Overgangsmodstanden Z_1 beregnes ud fra (2.11) til $Z_1 = 0,03$.

For at se effekten af korrektionen for overlapning, luftlag- og overgangsmodstande følges beregningsproceduren angivet i afsnit 2.4. Damptransportmodstanden *for ét lag gipsplade* beregnes uden korrektion (betegnet Z_m^* i tabel 3.3), alene med korrektion for overlapeffekten (betegnet Z'^* i tabel 3.3) og med korrektion for både overlapning, luftlag- og overgangsmodstande (betegnet Z_p i tabel 3.3). Til sammenligning beregnes middelværdi og spredning i de tre tilfælde.

Tabel 3.3. Resultat af korrektion for overlap, luftlag og overgangsmodstand for gipspladen GN13.

GN13	Z_m	A. Z_m^*	$\Delta g_e/g_e$	Z'	B. Z'^*	C. Z_p
1 lag	0,28	0,28	0,14	0,32	0,32	0,26
2 lag med luft	0,51	0,26	0,27	0,64	0,32	0,25
3 lag	0,57	0,19	0,32	0,75	0,25	0,23
Middel		0,24			0,30	0,25
Std.		0,047			0,040	0,017

Tabel 3.3. Resultat af korrektion for overlap, luftlag og overgangsmodstand for gipspladen GU9.

GU9	Z_m	A. Z_m^*	$\Delta g_e/g_e$	Z'	B. Z'^*	C. Z_p
1 lag	0,30	0,30	0,10	0,33	0,33	0,27
2 lag	0,53	0,27	0,19	0,63	0,32	0,29
2 lag med luft	0,56	0,28	0,22	0,68	0,34	0,27
3 lag	0,56	0,19	0,26	0,71	0,24	0,22
Middel		0,26			0,31	0,26
Std.		0,048			0,046	0,030

- A. Fugttransportmodstand pr. plade *uden* korrektion
 B. Fugttransportmodstand pr. plade *med* korrektion for overlapning
 C. Fugttransportmodstand pr. plade *med* korrektion for overlapning, luftlags og overgangsmodstand

Diskussion

Ovenstående er et eksempel på, hvordan korrektionen for overlapning og luftlags- og overgangsmodstand modvirker hinanden. Korrektion for overlapning resulterer i en større fugttransportmodstand (0,24 før og 0,30 efter for GN13. 0,26 før og 0,31 efter for GU9) mens den efterfølgende korrektion for luftlag- og overgangsmodstande resulterer i en lavere fugttransportmodstand (0,30 før og 0,25 efter for GN13. 0,31 før og 0,26 efter for GU9). Efter den samlede korrektion fås omtrent samme middelværdi for fugttransportmodstanden (0,24 før og 0,25 efter for GN13. 0,26 før og 0,26 efter for GU9). Det ses, at foretages kun den ene af korrektionerne fås en betydeligt ændring i middelværdien.

Mens middelværdien af damptransportmodstanden ikke ændrer sig væsentligt ses det, at standard afvigelsen ændres markant, især for GN13 (0,047 før og 0,017 efter). Korrektionerne

betyder altså et mere sikkert estimat af damptransportmodstanden. Det kan i praksis betyde, at man for en ønsket nøjagtighed af målingen kan nøjes med færre målinger. I ovenstående eksempel har både overlappning og luftlags- og overgangsmodstand betydning, men for tilsvarende tynde materialer vil kun luftlags- og overgangsmodstanden have betydning og for tilsvarende materialer med en høj damptransportmodstand vil kun overlappningen have betydning. I begge tilfælde vil korrektionen betyde en ændring af middelværdien. Korrektionen er således afgørende for en korrekt målt og dermed sammenlignelig damptransportmodstand.

4. DISKUSSION

I denne rapport er der gjort rede for 3 forskellige fejlkilder ved kopmålinger, og deres praktiske betydning er illustreret med to forsøg.

Et varierende barometertryk har kun betydning ved meget små vægtændringer af koppen. Korrektionen for en given kop er uafhængig af materialets tæthed og den relative fejl er derfor størst for meget tætte materialer, hvor koppen har ganske små vægtændringer. De udførte forsøg har imidlertid vist, at koppens tæthed er mere kritisk end den fejl et varierende barometertryk giver. De ganske små vægtændringer udlignes af en tilsvarende strømning af luft ind og ud af koppen. Denne strømning har givet også en absolut størrelse uafhængig af materialets tæthed, og har derfor også kun betydning for meget tætte materialer.

Ønsker man at lave målinger på meget tætte materialer er det nødvendigt at sikre koppens tæthed meget omhyggeligt. Hvordan det kan gøres, vil der ikke blive taget stilling til her. Men koppens tæthedsgrad kan bestemmes med forsøg svarende til dem, der er beskrevet i afsnit 3.1. Sådanne forsøg bør altid indgå i forsøgsserier med meget tætte materialer.

Den beskrevne effekt med udbøjning har kun betydning, hvis materialet har et lavt E-modul og koppen samtidig er tæt. Selv med nogen utæthed kan effekten dog have betydning, hvis trykkudligningen ikke sker umiddelbart ved ændringer i barometertrykket. Herved vil materialet ved trykændringer umiddelbart bøje ud, og i kombination med viskoelasticitet kan materialet få en blivende udbøjning.

Luftlags- og overgangsmodstande har i modsætning til barometerstanden betydning for materialer med en lille fugttransportmodstand. Her kan indflydelsen være ganske betydelig. Hvis man kender luftlagets tykkelse er det enkelt at korrigere for luftlagsmodstanden, men for store luftlagstykkelser får man yderligere den effekt, at fugttransportmodstanden måles i et andet RF-område. For at opnå sammenlignelige målinger er det derfor bedre at undgå luftlaget i koppen. Alternativt bør man angive det beregnede RF-område, materialet har befundet sig i under målingen.

Overlappningseffekten kan også være betydelig ved tykke materialer som det er illustreret med 3 lag gips i afsnit 3.2. Da den samtidig virker modsat effekten af luftlag og overgangsmodstande, kan den være vanskelig at bestemme i praksis. Forsøgene med gipspladerne viser, at man godt kan måle den korrekte fugttransportmodstand uden at foretage korrektioner, men spredningen på resultaterne bliver større og dermed vanskeligere sammenlignelige.

Ud fra de teoretiske overvejelser og de udførte forsøg beskrevet i denne rapport er det karakteristisk, at de forskellige korrektioner ofte ophæver hinanden, og i middel ændres fugttransportmodstanden ikke. Spredningen bliver derimod meget større, og da man af økonomiske grunde ofte kun kan udføre ganske få forsøg, er det vanskeligt at sammenligne målingerne. Med en korrektion for de forskellige fejlkilder opnås altså bedre sammenlignelige målinger.

5. KONKLUSIONER

Ud fra teoretiske analyser og to eksperimenter i kopudstyret kan der drages følgende konklusioner om fejlkildernes betydning for kopmålinger:

Et varierende barometertryk har kun betydning for meget tætte materialer. De udførte forsøg har vist, at koppers tæthed er mere kritisk end den fejl, et varierende barometertryk giver. Det er nødvendigt at sikre koppers tæthed meget omhyggeligt. Koppers tæthedsgrad kan bestemmes med forsøg svarende til dem, der er beskrevet i denne rapport. Udbøjning af materialer har kun betydning, hvis materialet har et lavt E-modul og samtidig er tæt. I rapporten er angivet, hvordan der kan foretages en korrektion for udbøjning af materialet.

Luftlags- og overgangsmodstande har betydning for materialer med en lille fugttransportmodstand. For store luftlagstykkelser måles fugttransportmodstanden i et andet RF-område, hvilket gør det vanskeligt at sammenligne målinger. Selv med korrektion bør det derfor tilstræbes at gøre luftlaget i koppen så lille som muligt.

Overlapning mellem prøve og kop kan give en ganske betydelig forøgelse af damptransporten for tykke (sammensatte) prøver som gipsplader og betonskiver. Effekten er i denne rapport ikke eftervist eksperimentelt, men korrektion for effekten giver en mindre spredning på bestemmelsen af fugttransportmodstanden.

Det er karakteristisk, at de forskellige korrektioner ofte ophæver hinanden, og i middel ændres fugttransportmodstanden ikke ved korrektion. Spredningen uden korrektion er derimod større, og med få målinger er det derfor vanskeligt at sammenligne resultater. Med en korrektion for de forskellige fejlkilder opnås en mindre spredning og dermed bedre sammenlignelige resultater.

6. REFERENCER

1. CRC (1984): "Handbook of chemistry and physics", 64th edition.
2. Galbraith, G.H., McLean, R.C, Tao, Zhi (1991): "BCR PROGRAMME. Inter-comparison on measurements of water vapour permeability". Final report for project 3366/1/0/151/90/1 - BCR - UK(30). Mechanical & Process Engineering, Strathclyde University (U.K.).
3. Hansen, K.K., Lund, H.B. (1990): "Cup method for determination of water vapour transmission properties of building materials. Sources of uncertainty in the method". Proceedings of the 2nd symposium BUILDING PHYSICS IN THE NORDIC COUNTRIES, Trondheim, Norway, August 20-22 1990. ISBN 82-519-0941-4, Tapir Publishers 1990.
4. Hansen, K.K., Lund, H.B. og Nielsen, C.B (1990): "Gipsplader - Indre struktur og fugtmekaniske egenskaber", LBM Teknisk Rapport 213/90, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH.
5. Hansen, K.K and Bertelsen, N.H. (1989): "Results of a Water Vapor Transmission Round-Robin Test Using Cup Methods". Water Vapor Transmission Through Building Materials and Systems: Mechanisms and Measurement, ASTM STP 1039, H.R Trenchsel and M. Bomberg, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 91-100.
6. Jensen, C.G. og Olsen, K. (1973): "Teknisk Ståbi", 13. udgave, 1. oplag, Teknisk forlag 1973.
7. Joy, F.A. og Wilson, A.G. (1965): "Standardization of the Dish Method for Measuring Water Vapor Transmission", in Humidity and Moisture, volume 4, pp. 259-270, 1963 International Symposium on Humidity and Moisture, Washington, D.C, Reinhold publishing corporation, New York.
8. Lund, H.B. (1990): "Fugtfysik. Kopmetoden - en kritisk analyse og metodeudvikling", LBM Teknisk Rapport 215/90, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH.
9. Pedersen, C.R. (1989): "Koblet fugt- og varmetransport i bygningsmonstrukturer - fugtfysik". Laboratoriet for Varmeisolering. Danmarks Tekniske Højskole. Rapport 89-2.
10. Sokolnikoff, I.S. (1956): "Mathematical Theory of Elasticity", 2nd edition, McGraw-Hill, New York 1956.
11. West, G.P. og Hansen, K.K (1988): "Kopudstyr til måling af fugttransport", LBM Teknisk Rapport 179/88, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, DTH.

PRØVNINGSMETODER

ASTM E96-80 N401 (nyeste version) eller CEN TC88/WG1
DIN 52 615
ISO TC163/SCI/WG8 Draft N2E
ISO-DIS 1663-2
NT-BUILD 165
NT-BUILD 130
SIA 279 (ikke isotherm)
SIS 021582

APPENDIX A

Resultater fra kopforsøg
til undersøgelse af
barometereffekt

BILAG A

KOPFORSØG TIL UNDERSØGELSE AF BAROMETEREFFEKT

	Kop	R2	a	a_teo	a/a_teo	Utæthed
TAGFOLIE						
V_c=339,2 cm3	1	0.61	-0.103	-0.434	0.24	0.33
V_ind=242,1 cm3	2	0.88	-0.110		0.25	0.32
	3	0.73	-0.101		0.23	0.33
	4	0.10	-0.100		0.23	0.33
	Mid	0.58	-0.104		0.24	0.33
	Std	0.30	0.004		0.01	0.004
ALUMINIUM						
V_c=332,9 cm3	5	0.06	-0.078	-0.426	0.18	0.35
V_ind=242,1 cm3	6	0.20	-0.074		0.17	0.35
	7	0.15	-0.105		0.25	0.32
	Mid	0.14	-0.085		0.20	0.34
	Std	0.06	0.014		0.03	0.01
PLEXIGLAS						
V_c=343,7 cm3	8	0.02	-0.087	-0.440	0.20	0.35
V_ind=242,1 cm3	9	0.01	-0.077		0.17	0.36
	10	0.02	-0.079		0.18	0.36
	11	0.02	-0.084		0.19	0.36
	12	0.01	-0.070		0.16	0.37
	Mid	0.02	-0.079		0.18	0.36
	Std	0.005	0.006		0.01	0.01
GLASKOLBER						
Glasprop	13	0.97	-0.671	-0.773	0.87	0.10
V_c=603,9 cm3						
V_ind=514,7 cm3						
Gummiprop	14	0.43	-0.165	-0.875	0.19	0.71
V_c=683,6 cm3						
V_ind=577,2 cm3						

Applications.

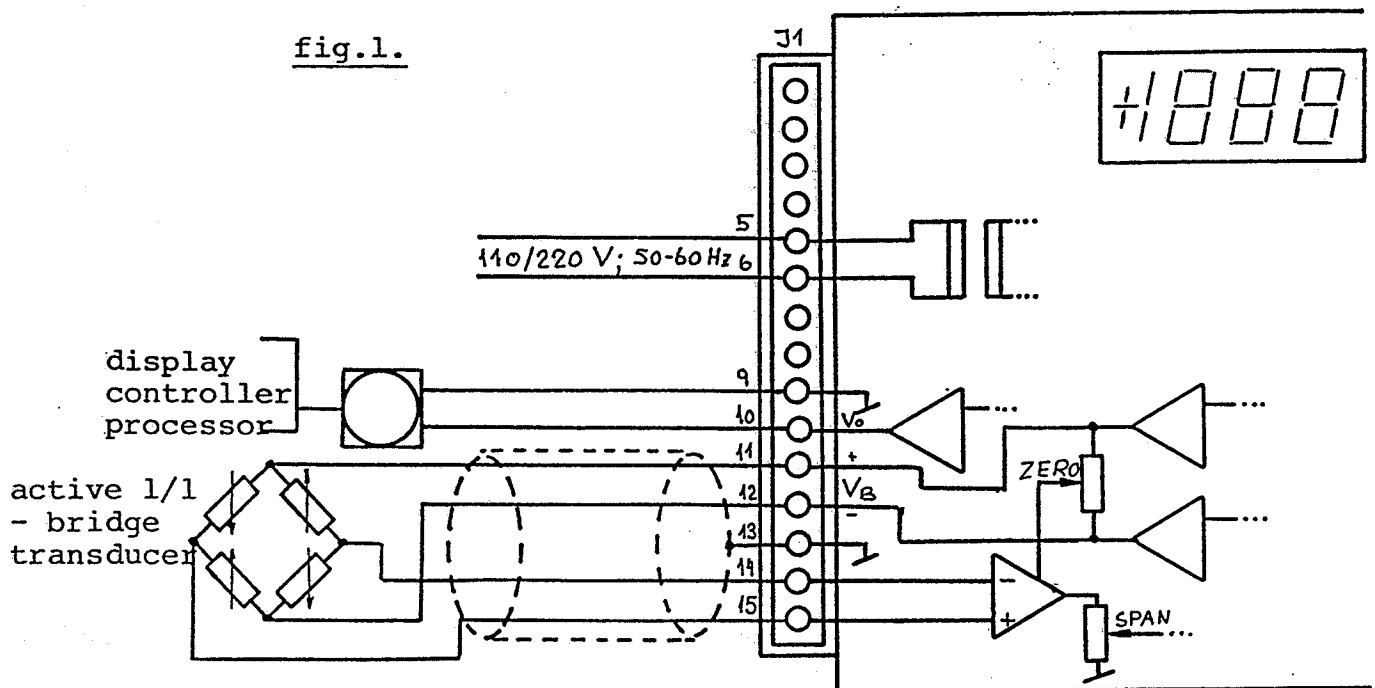
The UTI 2000 should be supplied with 110V or 220V/50-60Hz at terminal J1 and J2.

NB! Be sure that jumper S4 is placed correctly.

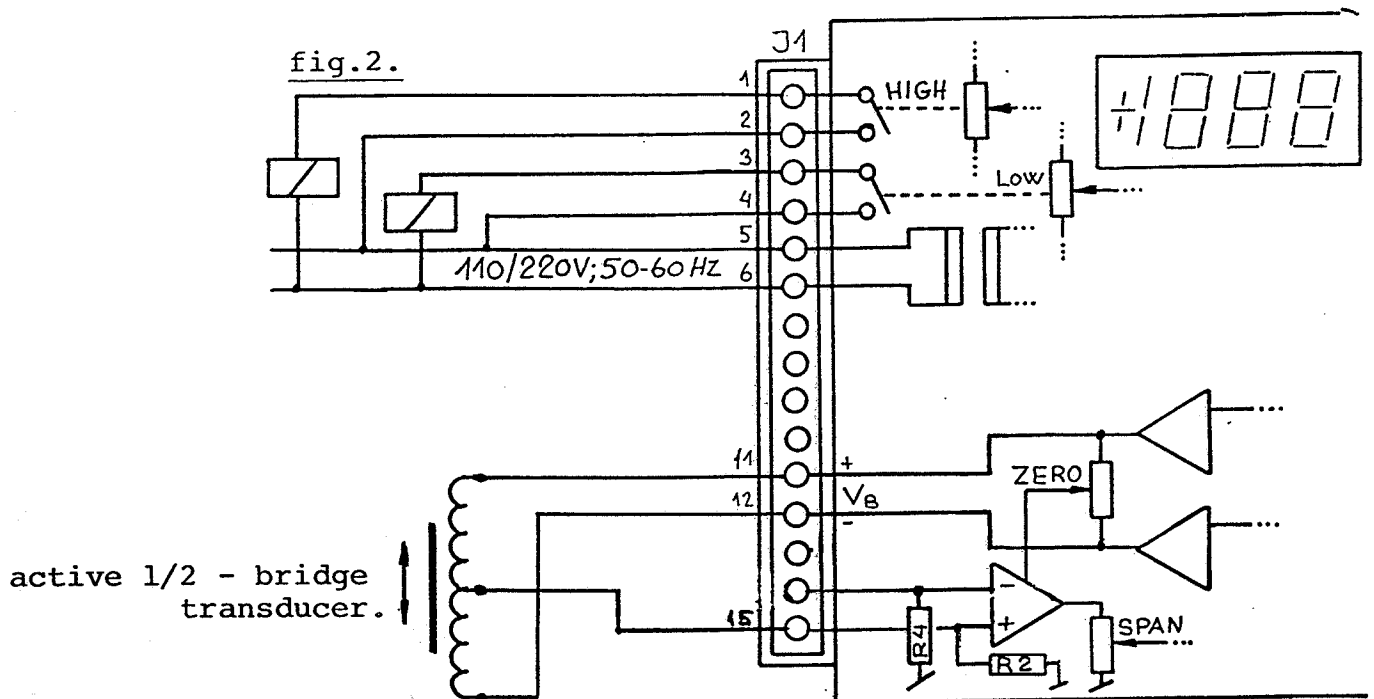
The unit functions either as a transducer amplifier - AC or DC operation - with readout (a) or as an indicator with voltage or current input (b+c).

- a) Connect the transducer to terminal 11-15 after fig. 1. When using a half bridge configuration, fig. 2, the other input must be connected to a non-active half-bridge or to ground. (Connection to GND can be made on the PCB with R2 or R4 as shown in fig. 2).

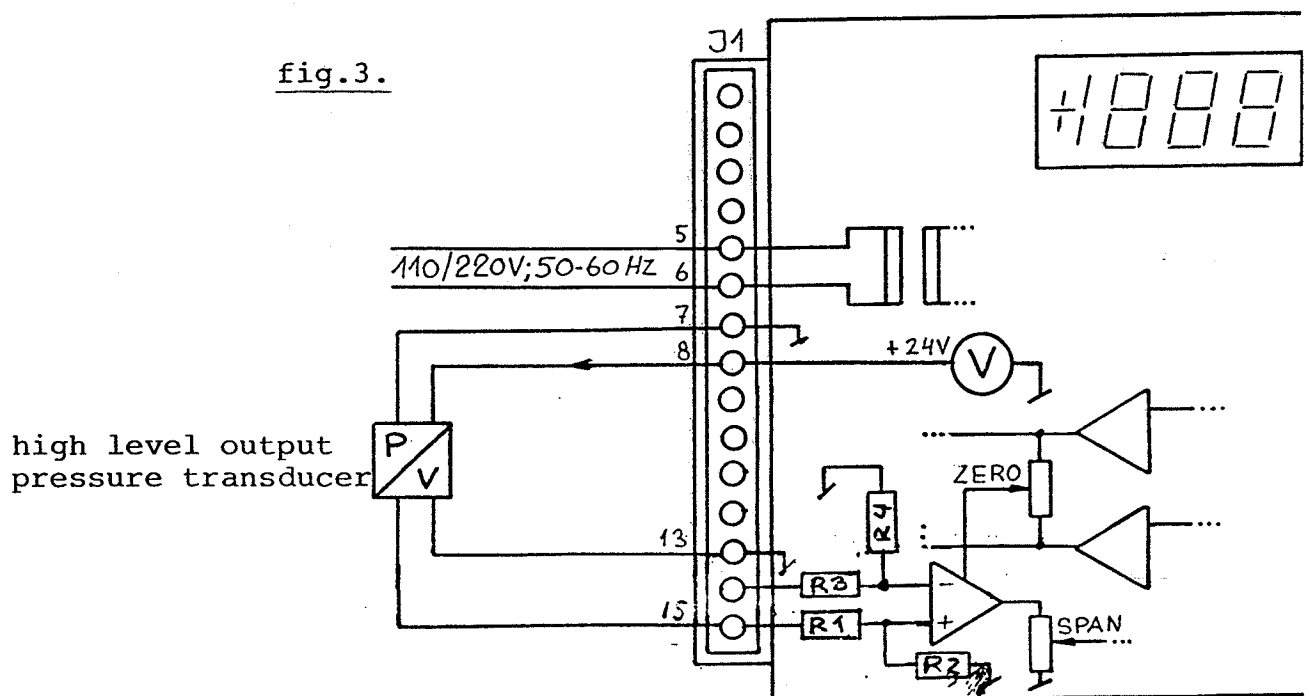
fig.1.



Applications.

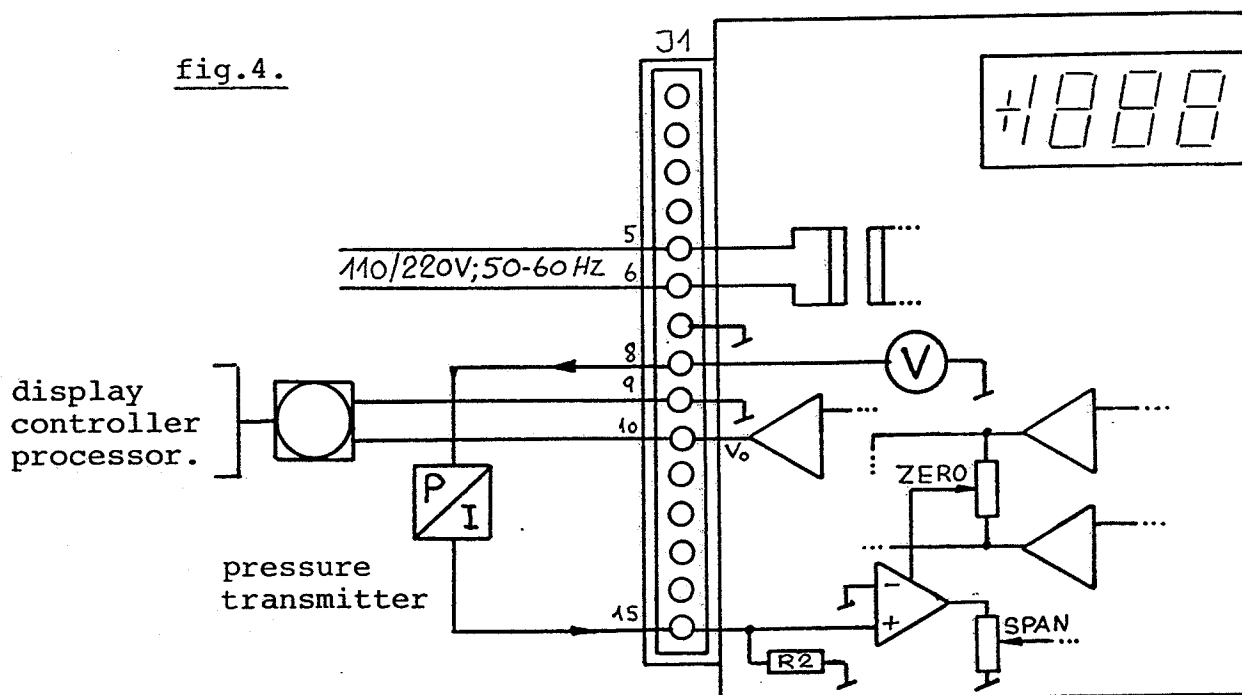


- b) Connect the voltage input to terminal 14 (or 15) - fig. 3. Input impedance and voltage scaling are set with R3 and R4. The 24V output between terminal 8 and 7 is here used to supply a transducer with high level output (ex: 5VDC).



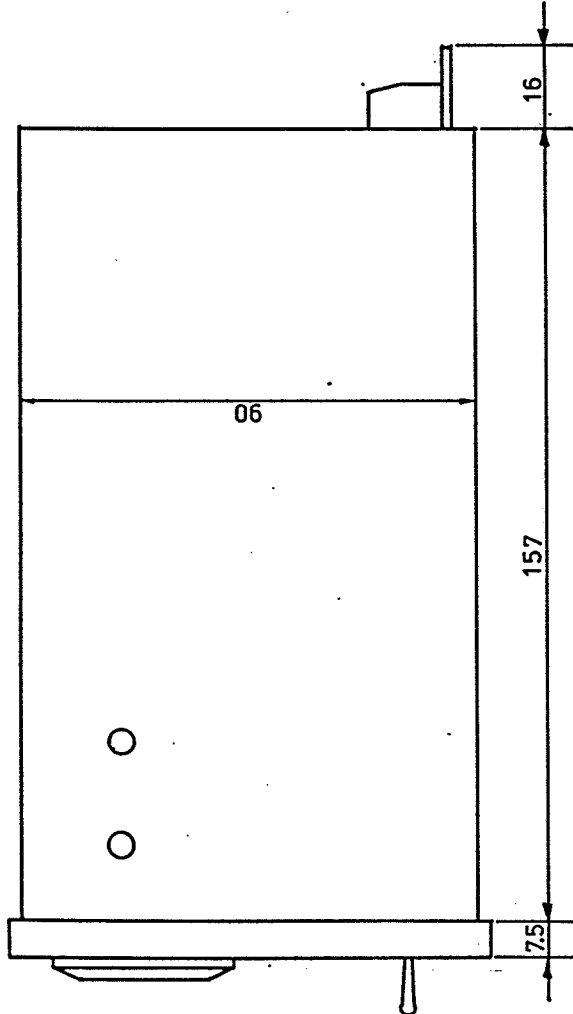
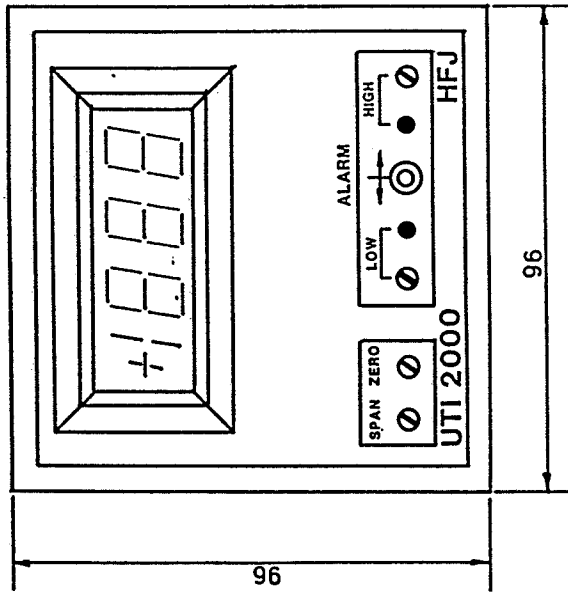
Applications.

- c) A current input is connected to terminal 15. Conversion to a voltage signal is performed with R2 as fig. 4 shows. Transmitters with any current output can be connected and supplied from the +24V supply between terminal 7 and 8.

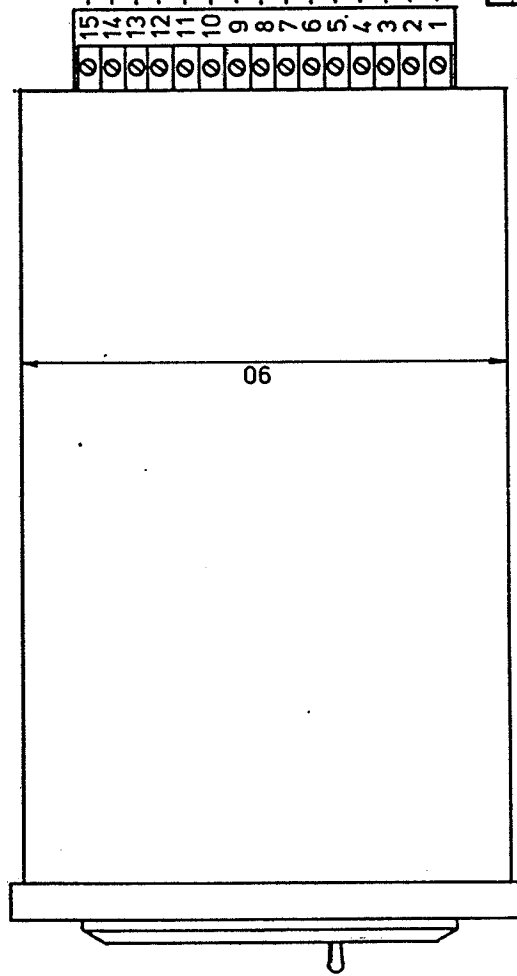


When the transducer or input signal is connected, the ZERO-point and full scale output (SPAN) can be adjusted (see operation).

Provided with alarm function, fig. 2, the HIGH and LOW alarm setpoints are displayed, when the front-plate switch is activated to the right or left and set with the HI and LO trimpots (see operation).



- ☐ INPUT
- ☐ GND.
- ☐ TRANSDUCER SUPPLY
- ☐ SIGNAL OUT
- ☐ 24 V SUPPLY
- ☐ 110/220V POWER INPUT
- ☐ LOW RELAY ALARM OUT
- ☐ HIGH RELAY ALARM OUT



																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					</
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

BILAG C. KALIBRERING AF FLYTNINGS- MÅLERE PÅ LBM

DEFORMATIONSMÅLING MED LVDT I KLIMASKAB
Kalibreringsdata

Dato : 11. april 1990
 Operatør : Carsten Bredahl Nielsen
 LVDT Nr : 360
 Kalibrering Nr : 2
 Følsomhed (mm/V) : 0.19082
 Korrelation : 0.99718
 Temperatur (C) : 22.0
 Spredning (C) : 0.1
 Fugt (%) : 44.5
 Spredning (%) : 3.4

Måledata

Spænding V	Position mm	Temperatur C	Fugt %
2.210	0.90	21.9	49.0
1.710	0.80	21.8	46.4
1.193	0.70	22.0	43.1
0.666	0.60	22.0	41.8
0.124	0.50	22.0	41.2
-0.419	0.40	22.1	40.3
-0.915	0.30	21.9	40.3
-1.437	0.20	21.8	40.3
-1.962	0.10	22.0	40.0
-2.468	0.00	22.0	40.0
-2.467	0.00	22.0	41.5
-1.968	0.10	22.1	46.7
-1.428	0.20	22.1	49.4
-0.918	0.30	22.1	46.1
-0.407	0.40	22.1	46.1
0.124	0.40	22.1	48.8
0.662	0.60	22.1	46.4
1.194	0.70	22.1	49.1
1.703	0.80	22.1	47.0
2.210	0.90	22.1	47.0

Building materials laboratory. The technical university of Denmark.

DEFORMATIONSMÅLING MED LVDT I KLIMASKAB
Kalibreringsdata

Dato : 11. april 1990
Operatør : Carsten Bredahl Nielsen
LVDT Nr : 361
Kalibrering Nr : 2
Følsomhed (mm/V) : 0.19070
Korrelation : 0.99998
Temperatur (C) : 22.3
Spredning (C) : 0.1
Fugt (%) : 47.5
Spredning (%) : 1.7

Måledata

Spænding V	Position mm	Temperatur C	Fugt %
2.257	0.90	22.1	49.7
1.753	0.80	22.2	45.8
1.232	0.70	22.2	44.2
0.690	0.60	22.1	49.2
0.164	0.50	22.1	45.8
-0.356	0.40	22.2	47.9
-0.875	0.30	22.2	48.2
-1.397	0.20	22.1	45.8
-1.941	0.10	22.1	49.5
-2.448	0.00	22.2	46.8
-2.454	0.00	22.4	48.5
-1.940	0.10	22.2	47.6
-1.395	0.20	22.1	47.9
-0.878	0.30	22.4	47.7
-0.354	0.40	22.4	48.5
0.153	0.50	22.1	43.5
0.690	0.60	22.4	49.1
1.227	0.70	22.4	46.7
1.744	0.80	22.4	48.8
2.253	0.90	22.4	48.8

DEFORMATIONSMÅLING MED LVDT I KLIMASKAB
Kalibreringsdata

Dato : 9. marts 1990
 Operatør : Carsten Bredahl Nielsen
 LVDT Nr : 509
 Kalibrering Nr : 2
 Følsomhed (mm/V) : 0.21489
 Korrelation : 0.99986
 Temperatur (C) : 22.1
 Spredning (C) : 0.0
 Fugt (%) : 47.9
 Spredning (%) : 1.1

Måledata

Spænding V	Position mm	Temperatur C	Fugt %
2.408	1.00	22.1	48.8
1.972	0.90	22.1	47.9
1.476	0.80	22.1	47.0
0.983	0.70	22.1	46.7
0.511	0.60	22.1	47.9
0.106	0.50	22.1	49.5
-0.345	0.40	22.1	48.0
-0.837	0.30	22.1	46.8
-1.335	0.20	22.1	47.0
-1.816	0.10	22.1	49.7
-2.224	0.00	22.1	48.8
-2.213	0.00	22.2	47.3
-1.794	0.10	22.2	46.6
-1.333	0.20	22.1	46.7
-0.840	0.30	22.1	50.0
-0.346	0.40	22.1	48.5
0.111	0.50	22.1	47.0
0.528	0.60	22.1	46.7
0.985	0.70	22.1	49.6
1.476	0.80	22.1	48.5
1.979	0.90	22.1	47.3
2.401	1.00	22.1	47.3

DEFORMATIONSMÅLING MED LVDT I KLIMASKAB
Kalibreringsdata

Dato : 9. marts 1990
 Operatør : Carsten Bredahl Nielsen
 LVDT Nr : 560
 Kalibrering Nr : 2
 Følsomhed (mm/V) : 0.20340
 Korrelation : 0.99971
 Temperatur (C) : 22.2
 Spredning (C) : 0.0
 Fugt (%) : 48.0
 Spredning (%) : 2.0

Måledata

Spænding V	Position mm	Temperatur C	Fugt %
2.365	0.90	22.2	52.5
1.927	0.80	22.1	48.8
1.481	0.70	22.1	45.2
0.987	0.60	22.2	48.8
0.441	0.50	22.1	46.7
-0.086	0.40	22.1	46.1
-0.562	0.30	22.2	50.7
-1.012	0.20	22.1	45.8
-1.495	0.10	22.1	47.3
-2.039	0.00	22.1	50.5
-2.042	0.00	22.1	45.2
-1.496	0.10	22.1	48.8
-1.009	0.20	22.1	49.7
-0.561	0.30	22.2	46.1
-0.091	0.40	22.1	47.7
0.425	0.50	22.1	50.7
0.975	0.60	22.1	45.6
1.472	0.70	22.1	49.0
1.913	0.80	22.2	47.3
2.350	0.90	22.2	47.3

DEFORMATIONSMÅLING MED LVDT I KLIMASKAB
Kalibreringsdata

Dato : 9. marts 1990
Operatør : Carsten Bredahl Nielsen
LVDT Nr : 568
Kalibrering Nr : 2
Følsomhed (mm/V) : 0.19841
Korrelation : 1.00000
Temperatur (C) : 22.1
Spredning (C) : 0.0
Fugt (%) : 46.5
Spredning (%) : 2.3

Måledata	Position	Temperatur	Fugt
Spænding			
V	mm	C	%
2.035	0.80	22.1	48.5
1.531	0.70	22.1	47.0
1.024	0.60	22.1	45.2
0.521	0.50	22.1	44.5
0.022	0.40	22.1	44.0
-0.481	0.30	22.1	43.7
-0.988	0.20	22.2	43.4
-1.497	0.10	22.1	43.3
-1.998	0.00	22.1	43.4
-1.997	0.00	22.1	47.6
-1.501	0.10	22.1	49.5
-0.989	0.20	22.1	46.1
-0.488	0.30	22.1	49.5
0.016	0.40	22.1	49.2
0.520	0.50	22.1	45.8
1.025	0.60	22.1	49.5
1.531	0.70	22.1	48.2
2.029	0.80	22.1	48.2

Building materials laboratory. The technical university of Denmark.

DEFORMATIONSMÅLING MED LVDT I KLIMASKAB
Kalibreringsdata

Dato : 9. marts 1990
Operatør : Carsten Bredahl Nielsen
LVDT Nr : 573
Kalibrering Nr : 2
Følsomhed (mm/V) : 0.19750
Korrelation : 0.99977
Temperatur (C) : 22.1
Spredning (C) : 0.0
Fugt (%) : 48.2
Spredning (%) : 2.4

Måledata

Spænding V	Position mm	Temperatur C	Fugt %
1.995	0.80	22.2	55.3
1.490	0.70	22.1	47.9
0.933	0.60	22.1	44.7
0.424	0.50	22.1	51.5
-0.039	0.40	22.1	49.0
-0.508	0.30	22.1	47.0
-1.016	0.20	22.2	46.1
-1.600	0.10	22.2	50.0
-2.073	0.00	22.1	47.4
-2.080	0.00	22.2	47.0
-1.578	0.10	22.1	50.0
-1.028	0.20	22.1	48.8
-0.515	0.30	22.1	46.7
-0.038	0.40	22.1	45.5
0.426	0.50	22.1	49.7
0.926	0.60	22.1	48.0
1.493	0.70	22.1	46.4
1.994	0.80	22.1	46.4

DEFORMATIONSMÅLING MED LVDT I KLIMASKAB
 Kalibreringsdata

Dato : 9. marts 1990
 Operatør : Carsten Bredahl Nielsen
 LVDT Nr : 580
 Kalibrering Nr : 2
 Følsomhed (mm/V) : 0.20312
 Korrelation : 0.99997
 Temperatur (C) : 22.0
 Spredning (C) : 0.1
 Fugt (%) : 46.2
 Spredning (%) : 1.5

Måledata

Spænding V	Position mm	Temperatur C	Fugt %
2.415	0.90	22.1	44.1
1.951	0.80	21.9	44.6
1.464	0.70	21.9	44.6
0.961	0.60	22.0	44.8
0.457	0.50	21.9	45.0
-0.040	0.40	22.0	44.9
-0.523	0.30	21.9	45.2
-1.003	0.20	22.0	45.2
-1.505	0.10	22.0	45.2
-2.011	0.00	22.0	45.2
-2.012	0.00	21.9	45.5
-1.502	0.10	22.0	46.1
-1.003	0.20	21.9	47.5
-0.524	0.30	22.0	48.9
-0.039	0.40	22.0	47.9
0.453	0.50	22.0	47.0
0.959	0.60	21.9	47.0
1.457	0.70	21.9	48.5
1.943	0.80	22.1	47.9
2.410	0.90	22.1	47.9

Building materials laboratory. The technical university of Denmark.

DEFORMATIONSMÅLING MED LVDT I KLIMASKAB
Kalibreringsdata

Dato : 9. marts 1990
 Operatør : Carsten Bredahl Nielsen
 LVDT Nr : 585
 Kalibrering Nr : 2
 Følsomhed (mm/V) : 0.19870
 Korrelation : 0.99998
 Temperatur (C) : 22.4
 Spredning (C) : 0.1
 Fugt (%) : 48.0
 Spredning (%) : 1.9

Måledata

Spænding V	Position mm	Temperatur C	Fugt %
2.185	0.90	22.4	52.8
1.680	0.80	22.1	47.0
1.165	0.70	22.4	45.0
0.662	0.60	22.2	48.5
0.174	0.50	22.4	47.4
-0.330	0.40	22.4	47.0
-0.837	0.30	22.4	50.1
-1.353	0.20	22.4	46.7
-1.858	0.10	22.4	46.2
-2.337	0.00	22.4	50.1
-2.336	0.00	22.4	45.8
-1.855	0.10	22.4	47.9
-1.360	0.20	22.4	49.5
-0.842	0.30	22.5	46.4
-0.329	0.40	22.4	47.7
0.170	0.50	22.4	50.1
0.665	0.60	22.4	46.0
1.164	0.70	22.5	46.8
1.678	0.80	22.4	49.7
2.181	0.90	22.4	49.7

**BILAG D. CERTIFIKAT PÅ BOROSILIKATGLAS
VARMEUDVIDELSE**

National Bureau of Standards

Certificate

Standard Reference Material 731

Borosilicate Glass – Thermal Expansion

T. A. Hahn

Thermal Expansion as a Function of Temperature

T	Expansion $\Delta L/L_{293}$	Expansivity α	T	Expansion $\Delta L/L_{293}$	Expansivity α
80 K	-819×10^{-6}		293 K	0×10^{-6}	$4.78 \times 10^{-6}/K$
90	-797		300	34	4.82
100	-771	$2.64 \times 10^{-6}/K$	320	131	4.91
110	-744	2.86	340	230	4.99
120	-714	3.07	360	330	5.06
130	-683	3.25	380	432	5.11
140	-649	3.43	400	535	5.15
150	-614	3.58	420	638	5.19
160	-578	3.72	440	742	5.21
170	-540	3.85	460	847	5.23
180	-501	3.97	480	952	5.25
190	-460	4.08	500	1057	5.26
200	-419	4.17	520	1162	5.26
210	-377	4.26	540	1267	5.27
220	-334	4.34	560	1372	5.27
230	-290	4.41	580	1478	5.27
240	-246	4.48	600	1583	5.27
250	-201	4.54	620	1689	5.28
260	-155	4.60	640	1794	5.29
270	-109	4.66	660	1900	
280	-62	4.71	680	2007	

This SRM is available as a square rod with 6.4 mm (1/4 in) sides; L1 is 51 mm (2 inches) long, L2 is 102 mm (4 inches) long, and L3 is 152 mm (6 inches) long. This borosilicate glass is from the same lot as SRM 717, Borosilicate Glass Viscosity Standard, with a nominal composition of 70% SiO₂, 17% B₂O₃, 8% K₂O, 3% Al₂O₃, 1% Na₂O, and 1% Li₂O. The index of refraction after fine annealing is $n_D = 1.4874$. These rods were annealed at 789 K, cooled to 743 K at a rate of 2 degrees per hour, and then cooled to 523 K at a rate of 5 degrees per hour.

The above values of expansion and expansivity were calculated from equations based on a least squares analysis of the expansivity data from six specimens taken from various positions of the stock. A description of the experimental method, fitting procedure, and estimate of uncertainties is given in this certificate.

The overall coordination and evaluation of data leading to certification of this Standard Reference Material was performed by T. A. Hahn.

The technical and support aspects involved in the preparation, certification, and issuance of this Standard Reference Material were coordinated through the Office of Standard Reference Materials by R. E. Michaelis.

Washington, D.C. 20234
July 31, 1972

J. Paul Cali, Chief
Office of Standard Reference Materials

(over)

PROCEDURE

The apparatus used for the expansion measurements was a Fizeau interferometer with a 1-cm specimen length. Above room temperature, the measurements were made with the interferometer in a controlled atmosphere furnace using a Pt vs Pt-10% Rh thermocouple. Below room temperature, a cryostat operating with liquid nitrogen was used with a platinum resistance thermometer. The green spectral line of a mercury light source was used to produce the interference fringes. Fringe motion was measured with a filar-micrometer eyepiece. Each test specimen was made by fastening three 1-cm rods of the SRM to a Kovar ring to form a three point contact for the interferometer plates. With the uncertainties in temperature and fringe measurements, the expansivity was determined with an uncertainty of $\pm 0.03 \times 10^{-6}/\text{K}$.

Values of expansivity were calculated between equilibrium temperatures and corrections¹ were made so that α represents $\frac{1}{L_{293}} \frac{dL}{dT}$.

Tests on the six specimens indicated no appreciable differences. All of the data were pooled and the following third-order spline polynomials were obtained by the method of least squares using an Omnitab routine:

$$100 \leq T \leq 293$$

$$\alpha \times 10^6 = -0.8194 + 4.7611 \times 10^{-2} T - 1.4753 \times 10^{-4} T^2 + 1.7153 \times 10^{-7} T^3$$

$$293 \leq T \leq 640$$

$$\alpha \times 10^6 = 0.8651 + 2.3569 \times 10^{-2} T - 4.2277 \times 10^{-5} T^2 + 2.5408 \times 10^{-8} T^3$$

The standard deviation of this fit is 0.06 with 88 data points. These equations and their integrals were used to calculate the values listed in the table. A comparison of the experimental expansion data with values predicted from the equations gives a standard deviation of 8×10^{-6} . All of the data for both the expansion and expansivity were within two standard deviations of the values predicted by the equations.

¹Hahn, T.A., Thermal Expansion of Copper from 20 to 800 K — Standard Reference Material 736, J. Appl. Phys. **41**, 5096 (1970).

BILAG E. MANUAL TIL SKANFRYS STYREPROGRAM

STYREPROGRAM TIL SKANFRYS

Version 2.50 MUX
28/9-1989

Programmet måler temperatur og fugtighed i et SKANFRYS køle og fugtighedsskab. Desuden styrer programmet skabets termostat og fugtighedsstyring. Samtidigt kan der måles på op til otte målepunkter i skabet. Det er også muligt at angive en bestemt temperatur- eller fugtighedsændring som funktion af tiden. Efter strømafbrydelse startes programmet automatisk op og genskaber den sidste indstilling af skabet.

Der er mulighed for at lave et manuskript som kan ændre indstillingen af skabet, inklusive antallet af målepunkter og intervallet mellem målingerne på et forudsat tidspunkt.

Programmet præsenterer ind og uddata i forskellige vinduer, der kan lukkes eller åbnes efter behov. Når vinduerne er lukkede, er de præsenterede ved en lille etiket i bunden af skærmen. Til hvert vindue er der knyttet en funktionstast, som aktiverer vinduet. Når et vindue er åbnet, kan man alt efter vinduets type, flytte det rundt på skærmen, ændre dets størrelse og flytte det udsnit som vinduet viser. For yderligere information se afsnittet om vindueskommandoer.

Når programmet starter op er der åbnet et statusvindue og et uddatavindue, og tidsenheden er i minutter.

F1:Hjælp:

Hjælpevinduet giver de vigtigste oplysninger om programmets brug. For at se resten af hjælpen trykkes Alt-V og pil op eller ned. Slut hjælpen af med RETUR og F10. F10 lukker som bekendt vinduet.

F2:Status:

Statusvinduet viser den aktuelle indstilling af temperatur, fugtighed, det interval der skal måles med, hvilke målepunkter der er aktive, navnet på den fil der skal modtage uddata og navnet på en evt. manuskriptfil. Desuden vises temperatur- og fugtighedsændringen som funktion af tiden. Hvis man har forsøgt at indstille temperaturen eller fugtigheden til en ulovlig værdi, vil der også være en blinkende fejlmeddelelse i vinduet. Den ulovlige værdi vil stadig være vist, men programmet stiller auto-matisk temperaturen til 20 og fugtigheden til 60, når der opstår fejl. En eventuel temperatur- eller fugtighedsændring bliver i så fald nulstillet. Aktive målepunkter er vist med målepunktets nummer, inaktive er vist med en firkant.

Shift-F2:Indtast ny status:

Nye værdier kan indtastes i dette vindue. Hvis der ikke indtastes nogen værdi i et felt, beholder feltet den gamle værdi. Når der indtastes en tidsenhed ændres tallene i alle berørte felter. Lovlige værdier for temperatur er -272 til 199 grader, og lovlige værdier for fugtighed er 0 til 100 procent. Målepunkterne tændes og slukkes ved at skrive nummeret for det aktuelle målepunkt. 9 slukker eller tænder alle otte målepunkter. Ved indtastning af manuskriptnavn startes manuskriptet helt forfra. Ønsker man at starte det kørende manuskript forfra skrives "-" i stedet for navnet. Der åbnes automatisk et vindue hvor manuskriptet vises, så længe det kører. Hvis det ønskede manuskript ikke findes på disken, slettes feltet. Indtastnings vinduet ændres automatisk til statusvinduet efter brug.

F3:Uddata:

Programmet bruger uddatavinduet til at udskrive måleresultater i. Resultaterne udskrives med tidspunktet for målingen i første kolonne, temperaturen i anden og fugtigheden i tredje kolonne. Hvis der er nogle aktive målepunkter, udskrives målingerne for disse i de følgende kolonner. Er fx: målepunkt 1, 2 og 6 aktive udskrives måleresultatet for punkt 1 i fjerde kolonne, for punkt 2 i femte og punkt 6 i sjette kolonne.

F4:Manuskript:

Hvis der er valgt et manuskript, vises manuskriptets ordlyd i dette vindue. Vinduets markør står ud for den linie der næste gang skal udføres. Hvis der ikke er valgt noget manuskript eller hvis der er angivet et ulovligt manuskriptnavn vil vinduet være tomt.

F5:Andet:

Under andet er der 4 underpunkter:

- 1) Editering af textfil og oversættelse til manuskriptfil.
- 2) Oversættelse af uddatafil til textfil.
- 3) Kalibrering af målepunkter.
- 4) Nulstil ur.

ad 1) Manuskriptfiler skal være af en særlig type, der kan genereres ved hjælp af underpunkt 1). Der indtastes et filnavn når programmet beder om det. Hvis der findes en filnavn.TXT, hentes den ind i vinduet, ellers oprettes en ny fil med navnet filnavn.TXT. Den fil, der hentes ind skal være en textfil, der kan være lavet på næsten ethvert tekstbehandlingsprogram eller texteditor, bare den er gemt som en ASCII-fil. Der er nu mulighed for at rette i filen, eller skrive en ny fil. Når dette arbejde er slut trykkes der F10, og filen dels gemmes som textfil, og dels oversættes til en manuskriptfil, der kan bruges af programmet. I Editeringsfasen har F-tasterne følgende betydning:

F5: Henter en textfil fra disk.

F6: Gemmer den nuværende textfil på disk og henter en ny.

F8: Sletter indholdet af editoren.

F10: Oversætter textfilen til en manuskriptfil og afslutter hvis oversættelsen forløb fejlfrit.

Shift-F10: Afslutter uden at oversætte eller gemme.

Desuden gælder:

Ctrl-PgUp: Sletter en linie.

Ctrl-PgDn: Indsætter en linie.

Syntaxen i den textfil, der skal oversættes er som følger:

Der kan indsættes tomme linier hvor som helst.

Kommentarlinier kan indsættes hvor som helst. En kommentarlinie startes med et semikolon før første tegn der ikke er et mellemrum eller et tabulatortegn.

Kommandolinier indeholder først et tidspunkt efterfulgt af et kolon så et kommandonavn (kun det første bogstav undersøges) efterfulgt af et lighedstegn, og en reel værdi. Tidspunktet kan udelades, og erstattes af oversætteren i så fald med nul. Programmet bliver ved med at udføre kommandolinier indtil tidspunktet i linien er større end den aktuelle tid i maskinen. Tidspunkter og tidsenheder kan indtastes med en enhedsbetegnelse:

s:	sekunder
m:	minutter
t, h:	timer
d:	dage
u, w:	uger

Kommandoliniers syntax er:

$$[\text{tidspunkt}] K [\text{kommando}] = \text{værdi} [\text{tidsenhed}]$$

$$[\text{tidspunkt}] Q [\text{uit}] = 0$$

Der kan indsættes mellemrum og tabulatortegn hvorsomhelst i en kommandolinie. Der skelnes ikke mellem store og små bogstaver. Der kan gives kommandoer med følgende førstebogstaver:

- S: Sæt tidspunkt - stiller maskinens ur til værdi. Det er smart at indlede en manuskriptfil med denne kommando.
- D, I: Sæt deltatid eller interval mellem målingerne til værdi.
- T: Sæt Temperatur til værdi. Hvis værdien efterfølges af en "/" og en tidsenhed, er det temperaturstigningen pr tidsenhed der sættes til værdi/tidsenhed.
- F, H: Sæt Fugtigheden til værdi. Hvis værdien efterfølges af en "/" og en tidsenhed, er det fugtighedsændringen pr tidsenhed der sættes til værdi/tidsenhed.
- M: Sæt målepunkt. Der kan angives op til fire målepunkter pr manuskriptlinie. Er tallet negativt fjernes målepunkterne. 9 henholdsvis sletter og sætter alle målepunkterne.
- Q: Afslut manuskriptfil.

Exempel på textfil til manuskript:

; Dette er en lille kommentar
; Her kan man fx. angive forsøgets art.

0: Sæt tid = 0
Temperatur = 21.3
Temperaturstigning = 4/1t
Fugtighed = 85.5
Fugtighedsændring = 0/1m

1t: Temp = 15.9
Temperaturændring = 0/1t
Humidity = 80.7
Målepunkter = 9
Målepunkter = 3457

2t: Interval = 20m

4t: Målepunkter = 9

QUIT = 0

; Slut på fil

ad 2) Oversætter en uddatafil til en textfil, der kan bruges i andre programmer fx: WordPerfect og Manuscript. Man indtaster uddatafilens navn når programmet spørger efter det. Filen bliver oversat til en textfil med samme navn men med postfixet ".TXT".

ad 3) For at kunne kalibrere målepunkterne, er det nødvendigt at kunne tænde for målespændingen til et specificeret punkt. Når man indtaster en værdi mellem et og otte tændes for målespændingen til det pågældende punkt. Når der trykkes RETUR slukkes der igen. Dette kan gentages for andre punkter, indtil der tages 0 eller F10.

ad 4) Nulstiller uret, det svarer helt til manuskriptkommandoen: "Sæt ur = 0"

F7:

Skifter mellem sand tid og måletid.

F8:

Når programmet skal forlades i længere tid trykkes F8. Det giver sort skærm, hvilket sørger for at billedet ikke brænder sig fast i skærmen. For at få billedet tilbage trykkes på en vilkårlig tast. Der gøres opmærksom på at tastens funktion bliver udført, så tryk ikke Shift-F10!

F10:

Luk det aktuelle vindue, svarer til Alt-C.

Shift-F10:

Til sidst men ikke mindst: programmet afsluttes ved at trykke Shift-F10. Hvis dette ikke virker, er man højst sandsynligt ved at bruge en vinduesfunktion, tryk da RETUR og derefter F10.

VinduesKommandoer:

For hver mulighed sidder der en lille figur på vinduet. Hvis et vindue ikke har den figur, der svarer til en funktion, kan funktionen heller ikke bruges på vinduet. De forskellige funktioner er som følger:

Luk vinduet. Firkant med rombe i øverste venstre hjørne, aktiveres med Alt-C eller F10.

Flyt vinduet. Den øverste bjælke i vinduet er i fuld højde, aktiveres med Alt-M, herefter flyttes med piletasterne, og der afsluttes med RETUR.

Ændr vinduets størrelse. Højrepil og Nedadpil i nederste højre hjørne, aktiveres med Alt-Z, herefter flyttes med piletasterne, og der afsluttes med RETUR.

Flyt udsnittet vertikalt. Opadpil i øverste højre hjørne, aktiveres med Alt-V, herefter flyttes med op og ned piletasterne, og der afsluttes med RETUR.

Flyt udsnittet horisontalt. Ventrepil i nederste venstre hjørne, aktiveres med Alt-H, herefter flyttes med venstre og højre piletasterne.

Når flytning af udsnittet er tilladt, er der en målestok i kanten af vinduet, der viser hvor udsnittet befinder sig i forhold til hele vinduet.

Hvis man ønsker det giver Alt-S skygger fra vinduerne. Det giver et til tider mere overskueligt billede. Skyggerne slås fra igen med Alt-S.