



LUND UNIVERSITY

Byggfukt i betongplatta på mark : torknings- och mätmetoder. Del 2, Fuktmätning

Nilsson, Lars-Olof

1979

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Nilsson, L.-O. (1979). *Byggfukt i betongplatta på mark : torknings- och mätmetoder. Del 2, Fuktmätning.* (Rapport TVBM; Vol. 3008). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

AVDELNINGEN FÖR BYGGNADSMATERIALLÄRA
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

FUKTMÄTNING

DEL 2 AV

BYGGFUKT I BETONGPLATTA PÅ MARK
TÖRKNINGS- OCH MÄTMETODER

LARS-OLOF NILSSON

CODEN: LUTVDG/(TVBM-3008)/1-75/(1979)

FUKTMÄTNING

del 2 av

Byggfukt i betongplatta på mark
Torknings- och mätmetoder

Lars-Olof Nilsson

3:e upplagan, oktober 1983

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 750595-1,
Statens Råd för Byggnadsforskning till avdelningen för
Byggnadsmateriallära, LTH, Lund samt AB Skånska Cement-
gjuteriet, Stockholm.

ISSN-0349-4985

I N N E H Å L L S F Ö R T E C K N I N G	S I D
BETECKNINGAR	4
SAMMANFATTNING	5
SUMMARY	6
1. INLEDNING	7
2. DEFINITIONER, GRUNDLAGGANDE SAMBAND	8
2.1 Fukt i luft; relativ fuktighet	8
2.2 Fukt i material; fuktkvot	10
2.3 Samband mellan fuktkvot och relativ fuktighet	13
3. MÄTMETODER FÖR FUKT I MATERIAL ; LITTERATURINVENTERING	18
3.1 Absolutbestämningsmetoder	18
3.2 Kemiska metoder	19
3.3 Elektriska metoder	20
3.4 Hygrometriska metoder	24
3.5 Termiska metoder	29
3.6 Kärnfysikaliska metoder	29
4. PROBLEMSTÄLLNING VID BETONGGOLV	30
4.1 Mätdjup	30
4.2 Markfukt	34
5. FUKTKVOTS- KONTRA RF-MÄTNING	35
5.1 Principiellt	35
5.2 Noggrannhet och precision	36
5.3 Slutsats	44
6. UTVECKLING AV UTRUSTNING FÖR RF-MÄTNING	46
6.1 Önskemål och krav	46
6.2 Val av RF-sensor	46
6.3 Utformning av RF-givare	48
6.4 Utveckling, modifiering	50

forts I N N E H Å L L S F Ö R T E C K N I N G	S I D
7. NOGGRANNHET HOS MÄTUTRUSTNING	52
7.1 Kalibrering	52
7.2 Stabilitet	56
7.3 Temperaturinverkan	57
8. NOGGRANNHET HOS MÄTMETODER	58
8.1 Principiellt	58
8.2 Mättid	61
8.3 Temperaturinverkan	66
9. FÖRSLAG TILL MÄTMETODER FÖR PRAKTISKT BRUK	69
9.1 Mätning på uttaget prov	69
9.2 Mätning i borrhål	71
9.3 Speciella mätningar	73
10. REFERENSER	74

B E T E C K N I N G A R

p, p_m	Vattenångtryck, mättnadsångtryck	(N/m^2)
c, c_m	Vattenånghalt, mättnadsånghalt	(kg/m^3)
m	Massa	(kg)
V	Volym	(m^3)
R	Allmänna gaskonstanten	$(\text{J}/\text{kmol}\cdot\text{K})$
T	Absolut temperatur	(K)
M	Molvikt	(kg/kmol)
RF, ϕ	Relativ fuktighet	$(-)$
γ	Densitet	(kg/m^3)
u	Fuktkvot, % av torr vikt	$(\text{vikt}\%)$
$u_{\text{våt}}$	Fuktkvot, % av våt vikt	$(\text{vikt}\%)$
w	Fukthalt	$(\text{kg}/\text{m}^3) (\text{volym}\%)$

SAMMANFATTNING

Befintliga metoder för mätning av fukt i golv har länge kritiserats framför allt för att de mäter fukttinnehåll i stället för fukttillstånd, men också för mycket dålig noggrannhet.

I rapporten visas att fuktkvotsmätningar bör ersättas med mätning av den relativa fuktigheten (RF) i materialets porer:

- o RF hos underlaget behövs för att jämföras med tillåten RF för ytskiktet
- o Fuktkvot är svår att översätta till RF på ett tillförlitligt sätt
- o Noggrannhet och precision hos en RF-mätning är som regel avsevärt bättre än hos en fuktkvotsmätning, alldeles speciellt om den senare görs med karbidmetoden.

Befintliga mätmetoder beskrivs översiktligt. Utvecklingen av en ny mätutrustning sammanfattas och noggrannheten hos denna och lämpliga mätmetoder analyseras.

Förslag till nya mätmetoder för praktiskt bruk redovisas avslutningsvis. Härvid ingår metoder som föreslagits till och införts i Råd och anvisningar, RA 78, till Hus AMA.

SUMMARY

Available methods for moisture measurements in floor structures have been criticized for a long time mainly for measuring the moisture content instead of the moisture condition, but also for its lack of accuracy.

In this report it is shown that the measurement of moisture content should be replaced by measurement of the relative humidity (RH) in the pores of the material:

- o RH in the concrete is needed to be compared to the critical RH of the floor finish
- o Moisture content is difficult to translate to RH in an accurate way
- o The accuracy and precision of a RH measurement are normally much better than that of a measurement of the moisture content, especially if this is made with the calcium-carbide-method.

Available methods used earlier are shortly described. The development of a new equipment for measuring RH is summarized and the accuracy of this and proper methods of measurement is analysed.

New methods of measurement for use in practice are finally suggested.

1 INLEDNING

Det av Statens råd för byggnadsforskning finansierade projektet "Byggfukt i betongplatta på mark. Torknings- och mätmetoder" avrapporteras i tre delar. Den första delen behandlar uttorkning av byggfukt samt vilken utrustning som är lämplig att använda. Denna andra delen beskriver utvecklingen av praktiskt användbara mätmetoder för fukt i betonggolv. Den tredje delen beskriver en del resultat av fuktmätningar i fält och metoder att göra sådana mätningar. Resultatet av ett antal inventeringar av skador vid golv på mark sammanfattas också i den tredje delen.

Mätning av uppkommet fukttillstånd under och efter uttorkningen sker idag med en mängd olika metoder, varav ingen är riktigt tillfredsställande. Hus AMA rekommenderar den s k karbidmätaren, vilken emellertid har visat sig tveksam och ge missvisande resultat. Metoden har länge kritiserats. Andra metoder mäter endast i ytan och ger ingen uppfattning om fukttinnehållet i hela plattan.

Denna del av projektet har inriktats på att utveckla dels en utrustning som är praktiskt hanterbar och öm och dels metoder att utföra mätningar på ett riktigt sätt.

2 DEFINITIONER, GRUNDLÄGGANDE SAMBAND

Vid mätning av fukttinnehållet i ett material är det av yttersta vikt att beakta på vilket sätt vattnet är bundet. Bindningskrafterna påverkar det bundna vattnets egenskaper, t ex kokpunkt och fryspunkt, och det bundna vattnet påverkar materialets egenskaper på olika sätt i hög grad beroende på bindningstypen.

Vid värdering av en fuktmätningssystems princip, tillförlitlighet och handhavande är det därför av stor vikt att känna till något om det bundna vattnets fysik.

Nedan göres en kort beskrivning av vattnet i luft och porösa material med nödvändiga förutsättningar för att senare presenterade mätmetoder skall förstås.

2.1 Fukt i luft; relativ fuktighet

Luft är en blandning av olika gaser, bl a kväve, syre och vattenånga. Gasblandningens totala tryck (barometertrycket) är summan av de olika gasernas deltryck, partialtryck.

För var och en av gaserna gäller allmänna gaslagen som kan skrivas

$$p = \frac{m}{V} \cdot \frac{RT}{M} = c \cdot \frac{RT}{M} \quad (2.1)$$

där p är partialtrycket (N/m^2), m är gasens massa (kg), V gasens volym (m^3), R allmänna gaskonstanten ($8314 \text{ J/k mol} \cdot \text{K}$), T absoluta temperaturen (K) och M är gasens molekylvikt (kg/kmol). "Gashalten" c (kg/m^3) kallas ånghalten då det gäller vattenånga.

Luftens innehåll av vattenånga påverkar i hög grad fukttinnehållet i de flesta byggnadsmaterial. Mängden vattenånga uttryckes vanligen med antingen ångtrycket, dvs vattenångans partialtryck, eller ånghalten. Sambandet mellan dessa beskrives av ekv. (2.1) som för vattenånga blir

$$p = c \cdot 461.4 \cdot T \quad (2.2)$$

Vid en given temperatur kan luft inte innehålla mer än en viss mängd vattenånga. Denna maximala mängd kallas mättnadsvärdet.

Det maximala vattenångtrycket benämnes mättnadsångtrycket, p_m , och maximala ånghalten mättnadsånghalten, c_m .

Mättnadsångtrycket och mättnadsånghalten varierar med luftens temperatur enligt figur 2.1. Luftens förmåga att innehålla vattenånga ökar starkt med temperaturen. Vid låga temperaturer är luftens innehåll av vattenånga mycket liten.

Då luft av en viss temperatur successivt avkyles, inträffar så småningom att luftens vattenånghalt är lika stor som mättnadsånghalten vid någon lägre temperatur, varvid dagg börjar utfällas eller kondens börjar uppstå. Denna temperatur benämnes daggpunkten och är alltså också ett mått på ånghalten i luften.

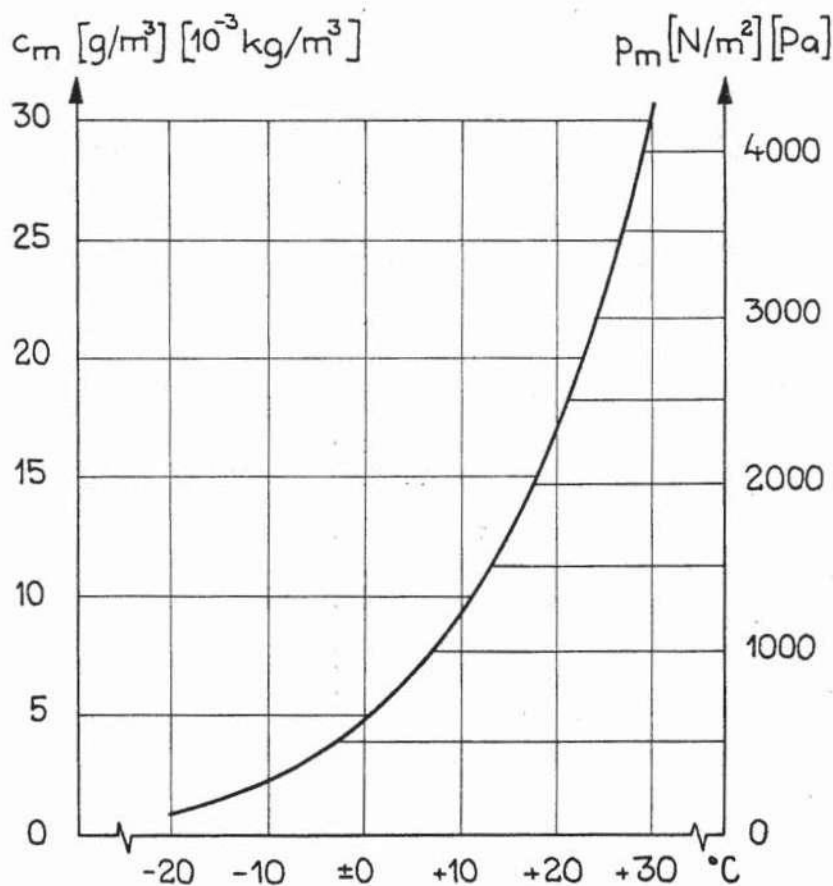


Fig. 2.1 Mättnadsånghalten och mättnadsångtrycket som funktion av temperaturen.

Kvoten mellan ånghalten vid en viss temperatur och mättnadsånghalten vid samma temperatur kallas luftens relativa fuktighet, RF eller ϕ , som ibland också benämnes relativ ånghalt, och ges av

$$\phi = \frac{c}{c_m} = \frac{p}{p_m} \quad (2.3)$$

Den relativa fuktigheten i luften inne i ett materials porsystem benämnes ofta porfuktighet och definieras på samma sätt som ϕ .

Av ovanstående framgår att då luft är mättad med vattenånga, är den relativa fuktigheten lika med 1 eller vanligare 100%. Ett inomhusklimat med t ex +20 °C och 50% RF innebär att luften innehåller bara hälften så mycket vattenånga, som det är möjligt vid +20 °C.

2.2 Fukt i material; fuktkvot

I ett poröst material är vatten bundet på olika energinivåer, dvs olika hårt. Kemiskt bundet vatten har reagerat kemiskt med materialet och bildat hydroxider eller kristallvatten. Fysikaliskt bundet vatten kan vara fixerat på olika sätt, vanligen som adsorberat eller kapillärkondenserat vatten i materialets porsystem.

Adsorberat vatten är bundet till porväggarna. Tjockleken av detta vattenskikt ökar med ökande relativ fuktighet i materialets porer. Eftersom adsorberat vatten bindes till porväggarna, bestäms mängden adsorberat vatten i ett material också av porväggarnas sammanlagda yta, den s k "specifika ytan".

Kapillärkondenserat vatten binds genom att krökta vattenytor, menisker, uppkommer i porsystemet p g a ytspänningen. Över sådana menisker är vattenångans mättnadstryck lägre än över en plan vätskeyta. Detta innebär att ångtrycket i luften över menisken uppgår till mättnadsångtrycket där vid en relativ luftfuktighet som är lägre än 1, dvs 100%.

I allmänhet antar man att meniskens krökningsradie är lika stor som porradien minskat med det adsorberade skiktets tjocklek. Man kan därmed beräkna vilka porer i ett material som är vattenfyllda vid en viss relativ fuktighet. I figur 2.2 åskådliggörs detta vid uttorkning.

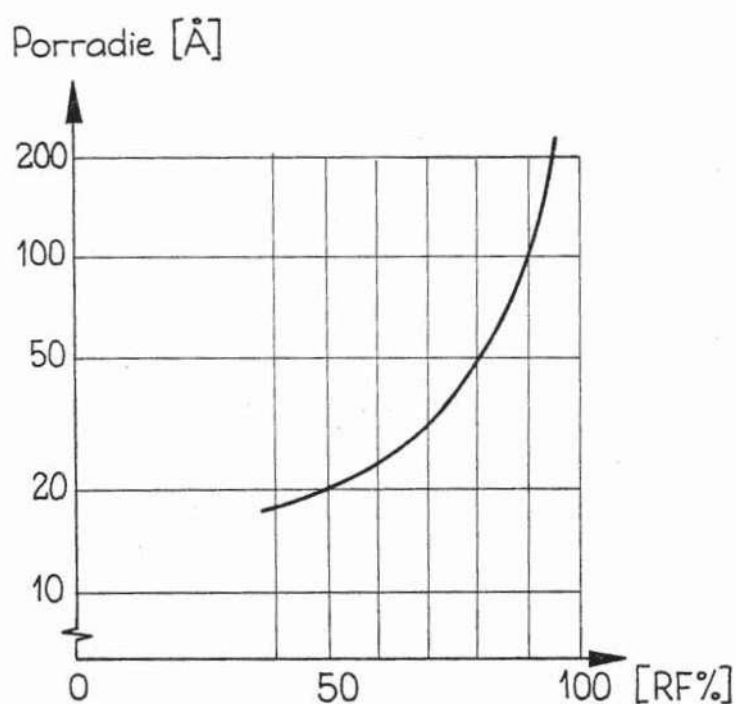


Fig. 2.2 Storleken av vattenfyllda porer som funktion av relativa fuktigheten vid uttorkning. Beräkning för modell med cirkulär-cylindriska porer.

Av figuren framgår att vid relativa fuktigheter under 90%, är det bara i de små porer som har en radie mindre än 200 Å som det finns vatten.

Den totala mängd fukt som är fysikaliskt bundet i ett material, bestäms alltså av hur porsystemet ser ut, hur stor porositeten är och hurdan porstorleksfördelningen är samt relativa fuktigheten i omgivande luft.

Den totala mängden fysikaliskt bundet vatten kan anges på olika sätt. Vanligast är härvid att ange materialets fuktkvot u i viktsprocent av torrvikten:

$$u = \frac{m_w}{m_M} = \frac{\text{vattnets vikt (kg)} * 100}{\text{materialets torrsvikt (kg)}} \quad (\text{vikt-\%}) \quad (2.4)$$

där vattnets vikt oftast bestäms genom någon form av torkning t ex i ugn.

Ibland användes istället fukthalten w (kg/m^3), som definieras av:

$$w = \frac{m_w}{V_M} = \frac{\text{vattnets vikt (kg)}}{\text{materialets volym (m}^3\text{)}} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2.5)$$

Fukthalten anges ibland i volymprocent, vilket fås av:

$$w = \frac{V_w}{V_M} = \frac{\text{vattnets volym (m}^3\text{)} * 100}{\text{materialets volym (m}^3\text{)}} \quad (\text{vol-\%}) \quad (2.6)$$

Ett mindre vanligt sätt att ange fukttinnehåll, är fuktkvot i viktsprocent av den våta vikten:

$$u_{\text{våt}} = \frac{m_w}{m_M + m_w} = \frac{\text{vattnets vikt (kg)} * 100}{\text{vikt av fuktigt material (kg)}} \quad (\text{vikt-\%}) \quad (2.7)$$

Detta sätt användes t ex vid mätning med karbidmetoden och resultatet får alltså inte förväxlas med fuktkvot enl (2.4).

Att ange fukttinnehållet i ett material som "% fukt" är, enligt ovanstående, helt förkastligt. Det måste preciseras vad som avses, t ex "vikt-%", då helst med tillägget "av torr vikt" om missförstånd kan uppstå.

Sambandet mellan dessa olika sätt att ange fukttinnehållet kan sammanfattas med följande uttryck:

$$u = \frac{u_{\text{våt}}}{1 - u_{\text{våt}}} \quad \text{eller} \quad u_{\text{våt}} = \frac{u}{1 + u} \quad (2.8)$$

$$u = \frac{w}{\gamma} \quad ; \gamma = \text{densitet (kg/m}^3\text{)} \quad (2.9)$$

$$w \text{ i (kg/m}^3\text{)}$$

$$w \text{ (kg/m}^3\text{)} = 10 * w(\text{volym-\%}) \quad (2.10)$$

Exempel. Om 1 m^3 av ett material med torrdensiteten 2000 kg/m^3 innehåller 200 l (kg) vatten är

1) Fuktkvoten $u = \frac{200 \text{ kg}}{2000 \text{ kg}} = 10.0 \text{ vikt-\%}$ (av torr vikt)

2) Fuktkvoten $u_{\text{våt}} = \frac{200 \text{ kg}}{2200 \text{ kg}} = 9.1 \text{ vikt-\%}$ (av våt vikt)

3) Fukthalten $w = \frac{200 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} = 200 \text{ kg/m}^3$

4) Fukthalten $w = \frac{0.2 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^3} = 20 \text{ volym-\%}$

2.3 Samband mellan fuktkvot och relativ fuktighet

Som ovan påpekats finns det ett samband mellan fukttinnehållet i ett material och fuktigheten i omgivande luft, och luft inne i materialet, då de är i jämvikt. Detta samband kallas jämviktskurva eller sorptionsisoterm och åskådliggöres principiellt i figur 2.3.

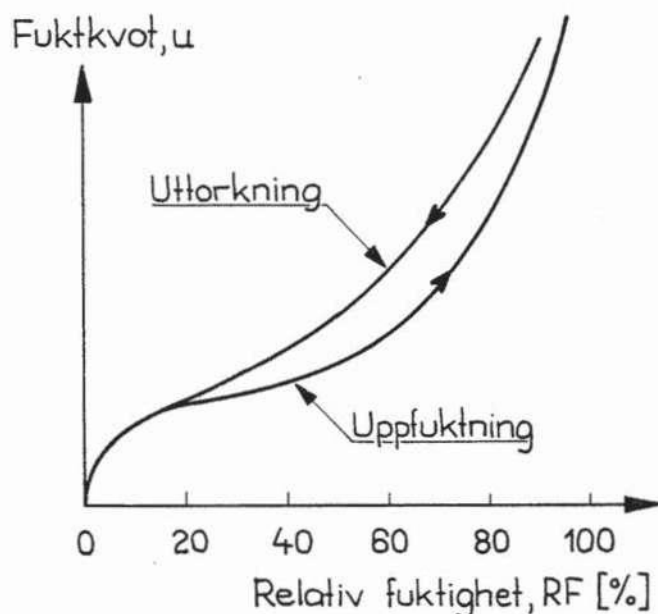


Fig. 2.3 Principiellt utseende hos jämviktsfuktkurva vid uttorkning resp uppfuktning.

Sambandet är inte helt entydigt utan beror av på vilket sätt fukttinnehållet har uppnåtts. Ett blött material som torkat har en högre jämviktsfuktkvot vid jämvikt med en viss relativ fuktighet än om samma material från början varit torrt och uppfuktats till samma relativa fuktighet. Denna skillnad kallas hysteresis.

Jämviktsfuktkurvan är olika för olika material. I fig 2.4 ges exempel för några vanliga byggnadsmaterial.

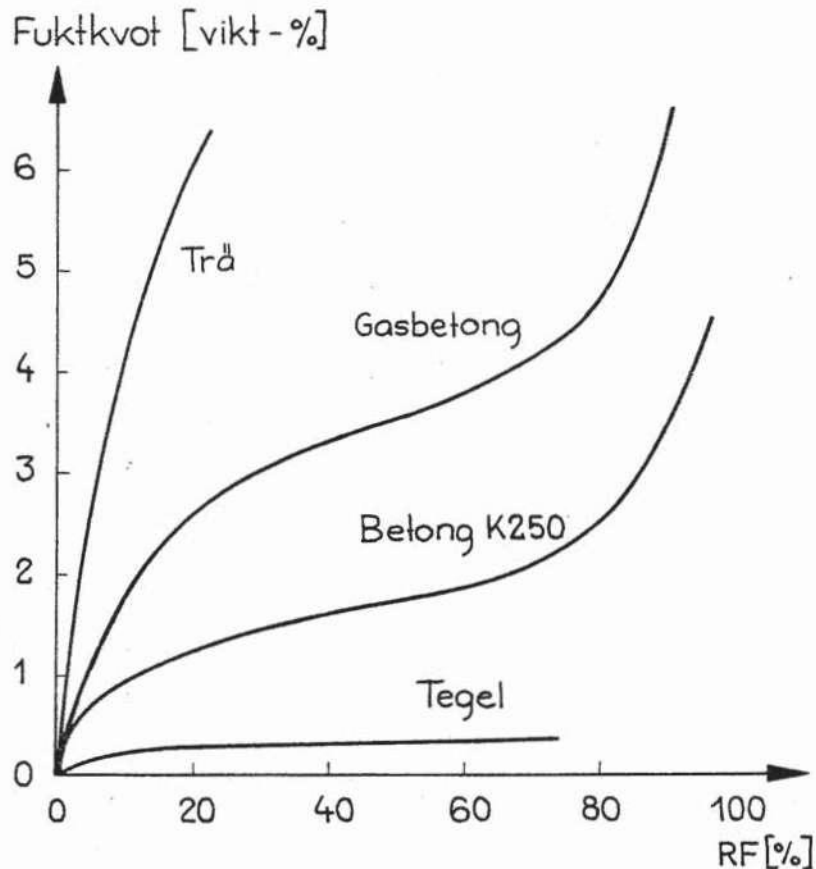


Fig. 2.4 Exempel på ungefärliga jämviktsfuktkurvan för några vanliga byggnadsmaterial vid uppfuktning, Ahlgren (1972).

Exempel. Fuktkvoten 3 % i de olika materialen i fig 2.4 betyder

- 100 % RF i tegel
- ~90 % RF i betong K250
- ~30 % RF i gasbetong
- ~10 % RF i trä

dvs helt olika fuktighet vid samma fuktkvot.

Vid relativa fuktigheten 50 % är fuktkvoten

- <0.5 % i tegel
- ~ 2 % i betong
- ~ 3.5 % i gasbetong
- ~10 % i trä

dvs fuktkvoten är helt olika då materialen är lika fuktiga.

Av figur 2.4 och exemplet ovan framgår att fuktkvoten är ett dåligt mått på hur fuktigt ett material är, medan relativa fuktigheten ger en mycket klar uppfattning om detta. Detta innebär att vid en jämförelse av fukttillståndet i olika material, t ex vid kombination av material, ger fuktkvoten enbart ingen som helst uppfattning om vilket material som är fuktigast eller hur fuktiga de kommer att bli vid jämvikt, dvs sedan det ena materialet "fuktat ned" det andra så att de är lika fuktiga. För denna bedömning erfordras istället uppgift om de olika materialens relativa fuktigheter, antingen genom direkta mätningar eller genom kunskap om jämviktsfuktkurvorna för exakt de materialkvaliteter det gäller samt den tidigare fukthistorien för de olika materialen, jfr fig 2.3.

En sådan viktig praktisk problemställning är fuktmätning i betonggolvet före applicering av fuktkänsligt ytskikt eller övergolv. Genom mätning av fukttillståndet i underlaget vill man kunna bedöma vilken fuktbelastning detta medför på ytskiktet. Eftersom det är två olika material måste bedömningen göras genom en jämförelse av RF i underlaget och tillåten RF i ytskiktet.

Exempel. Om en golvbeläggning av trä, t ex spånskiva, läggs på en betongplatta med fuktkvoten 4 vikt-%, RF=95 %, fukthalten ca 90 kg/m^3 eller 9 volym-%, och en tät plastmatta appliceras på spånskivan, kommer det så småningom att bli jämvikt mellan spånskiva och betong, varvid betongens fukttillstånd har givit en fuktbelastning på spånskivan.

Om man försummar den lilla minskningen av fukttinnehållet i betongen då en del fukt överföres till spånskivan, fås vid jämvikt:

	<u>Betong</u>	<u>Spånskiva</u>
Fuktkvot	4 vikt-%	ca 25 vikt-%
Fukthalt	90 kg/m^3	ca 160 kg/m^3
Fukthalt	9 volym-%	ca 16 volym-%
RF	95 %	95 %

Det framgår klart att endast den relativa fuktigheten i betongen ger någon som helst uppfattning om fuktbelastningen på spånskivan.

Fuktkvot [vikt-%]

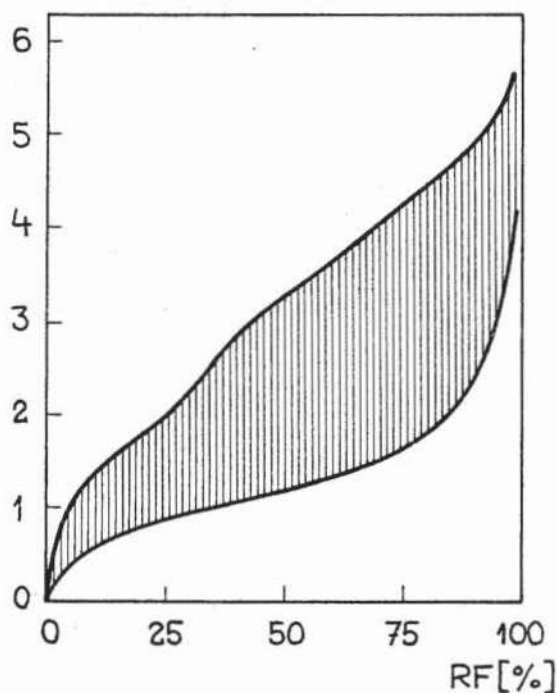


Fig. 2.5 Variationsområde för jämviktsfuktkurvor för betong av olika kvaliteter. Efter Ahlgren (1972).

För ett material som betong, där sammansättningen kan variera inom vida gränser, är också jämviktsfuktkurvan olika för olika materialkvaliteter av samma material. Exemplet i fig 2.5 gäller om betongkvaliteten är okänd och så även den tidigare fukthistorien.

Enligt fig 2.5 kan en fuktkvot av 3 % i betong betyda en fuktighet varierande mellan 40 % RF och 95 % RF, beroende på vilken betongkvalitet det är och om det är efter uppfuktning eller uttorkning.

På samma sätt kan t ex fuktkvoter från 1.5 % till 4 % betyda samma relativa fuktighet

3 MÄTMETODER FÖR FUKT I MATERIAL ; LITTERATURINVENTERING

I litteraturen finns en mängd mer eller mindre sofistikerade metoder att mäta fukt i byggnadsmaterial beskrivna. Dessa metoder kan karakteriseras på olika sätt. De kan vara direkta eller indirekta, dvs kräva någon form av kalibrering. Det finns förstörande och icke-förstörande, av vilka de senare kan möjliggöra in situ mätningar. Vissa fuktmätningssmetoder bestämmer mängden vatten i ett material, medan andra primärt mäter tillståndet hos fukten i materialet.

Nedan göres en genomgång av olika fuktmätningssmetoder, indelade efter mätprinciper. Härvid beskrivs de vanligen använda metoderna ingående och andra metoder har medtagits för fullständighetens skull och beskrivs därför mycket kortfattat. Framställningen baserar sig i huvudsak på Adamson et al (1970) och Nilsson & Sandin (1976), men ett femtiotal andra referenser har studerats.

3.1 Absolutbestämningssmetoder

Dessa metoder är förstörande. Mätningen utföres genom att efter vägning torcka provet på något sätt och därefter ånyo väga det. Härur kan fuktkvoten enkelt beräknas enligt ekv (2.4).

Själva provtagningen kan vara svår att utföra, dels då det gäller provtagning på avsedd plats i materialet, dels då det gäller att få ett för materialet representativt prov. Innehåller det uttagna provet t ex en sten för mycket eller för litet för att vara representativt, kan ett stort fel begås. För att undvika detta krävs relativt stora prov.

Torkningen av provet kan utföras på en mängd sätt. Avsikten är att försöka torcka bort det fysikaliska bundna vattnet.

Sätten att skapa ett torrt klimat (RF) kring provet är två: En sänkning av partialtrycket eller en höjning av temperaturen. Det senare medför att ett lågt RF fås p g a höjning av mättnadsångtrycket, men gör också att uttorkningen går snabbare. Torkning med torkmedel sker i exsickator; kan göras snabbare genom att ha vakuum i exsickatorn.

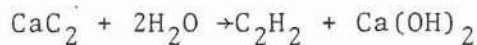
Uppvärmning i ugn till $+105^{\circ}\text{C}$ är det enklaste och vanligaste torkförfarandet, främst på grund av den korta torktiden. Den förhöjda temperaturen kan emellertid i vissa fall påverka materialet, t ex cement hydratiserar snabbare, gips bryts ned. Man väljer då antingen torkning med torkmedel eller torkning vid lägre temperatur, ofta $+50^{\circ}\text{C}$.

Varierar temperaturen under uttorkningen t ex $\pm 2^{\circ}\text{C}$ förändras RF $\sim \pm 0.07\%$ RF, vilket medför att fuktinnehållet påverkas något. En viss inverkan fås också om RF i rumsluften varierar.

3.2 Kemiska metoder

Kemiska förfaranden vid fuktinnehållsbestämning grundar sig på att det fuktiga provet blandas med speciella kemikalier, som reagerar endast med vattnet i materialet. Ur reaktionsprodukten eller kemikalieförbrukningen kan provets fuktinnehåll bestämmas.

Den metod som oftast används är kalciumpkarbid-metoden. Metoden lämpar sig bäst för kornformiga, icke porösa material t ex ballast. Många andra material måste krossas till mjöl, varvid en del fukt kan avdunsta. En viss mängd fuktigt material vägs upp ($m+u \cdot m$). Mängden avgörs genom ungefärlig uppskattning av fuktinnehållet. Provet läggs i en gastät flaska tillsammans med några stålkulor och en glasampull innehållande kalciumpkarbid. Flaskan tillsluts och omskakas. Stålkulorna krossar glasampullen och kalciumpkarbid kan reagera med vattnet i provet, varvid acetylen gas bildas.



Gasen ger upphov till ett övertryck i flaskan, vilket kan avläsas. Detta gastryck är direkt proportionellt mot mängden vatten i flaskan ($u \cdot m$). Med hjälp av en tabell kan "fukthalten i %" avläsas. Därvid är

$$\text{"fukthalten i \%"} = \frac{u \cdot m}{m + u \cdot m} \times 100 = \frac{u}{1 + u} \times 100$$

vilket skiljer sig från den vanliga fuktkvoten u med en faktor $1/(1+u)$ vilket har stor betydelse för stora värden på u . "Fukthalten i %" är i själva verket $u_{\text{våt}}$ enligt ekv (2.7).

Svårigheterna vid provtagningen är desamma som gäller för absolutbestämningsmetoder. Utöver dessa finns ytterligare felkällor som ovan nämnts.

3.3 Elektriska metoder

De elektriska metoderna för fuktmätning kan indelas i resistiva och kapacitiva. Av dessa metoder finns det otaliga variationer. Här behandlas enbart de mest grundläggande.

3.3.1 Resistiva metoder

3.3.1.1 Princip

Mätning av fukt med resistansmetoder grundar sig på att resistansen i ett material är beroende av fukttinnehållet. Ett ökat fukttinnehåll ger en bättre ledningsförmåga och därmed en mindre resistans. Resistansen mäts mellan två elektroder och med en kalibreringskurva för aktuellt material kan resistansen översättas till fuktkvot. Resistansen är förutom av fukttinnehåll även beroende av temperatur, saltinnehåll, material och elektrodarrangemang.

Resistansens beroende av temperaturen är lätt att korrigera för. Denna korrektion är beroende av material, salthalt och elektrodplacering.

Resistansens beroende av saltinnehåll är svårt att korrigera för, eftersom saltinnehåll oftast är okänt. I praktiska mätningar kan man ibland bortse från saltinnehåll och betrakta detta som en materialegenskap. Detta förutsätter dock att saltkoncentrationen är konstant i materialet. Risken för saltanrikning eller urlakning måste alltid beaktas.

Materialet påverkar resistansen bl a genom att porvattnet binds på olika sätt och får olika saltkoncentration.

Helt missvisande resultat kan erhållas med resistansmetod om området mellan elektroderna har ojämn fuktfördelning. Är det exempelvis torrt intill en elektrod medan materialet i övrigt är fuktigt blir utslaget efter den torra delen.

3.3.1.2 Ingjutningsgivare

Vid avdelningen för Byggnadsmateriallära, LTH, har en resistiv givare för ingjutning utvecklats.

Fuktgivaren består av en rak och en spiralformad kopparelektrod, skilda från varandra genom ett autoklaverat cementbruk enligt fig 3.1. Fuktgivarna är således cylinderformade med längden 25 mm och diametern 10 mm.

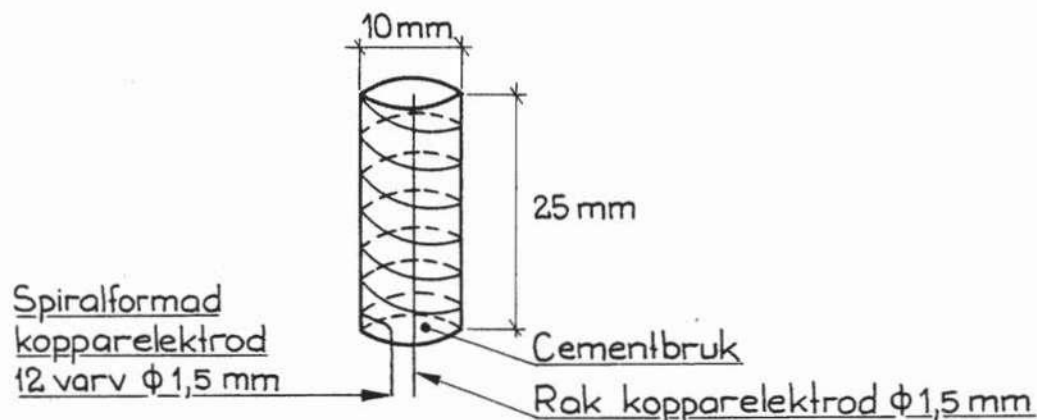


Fig. 3.1 Resistiv givare för ingjutning.

Denna typ av givare har använts i fältmätningarna, vilka beskrives i rapportdel 3, Nilsson et al (1979).

Resistansen är beroende av fukttinnehållet i givaren. Detta fuktinnehåll beror i sin tur på fukttillståndet runt givaren. Givaren mäter alltså i princip omgivningens fukttillstånd (RFeller suction). Om givaren gjuts in i ett material kan en kalibreringskurva göras mellan fuktkvot och resistans för det aktuella materialet.

Genom att variera sammansättningen hos cementbruket mellan elektroderna kan givaren göras känslig i olika fuktintervall. Fuktgivaren är relativt "trög" och går inte att använda vid studium av snabba förlopp. I praktiken har fuktgivaren använts vid studium av långsamma fuktvariationer i golv och väggar. I dessa fall är man ofta inte intresserad av det absoluta fukttinnehållet utan enbart av förändringar i fukttillstånd. Vid praktiska mätningar borrar ett hål i väggen eller golvet. Fuktgivaren gjuts sedan in i hålet med ett lämpligt bruk.

Noggrannheten hos fuktgivaren bestäms av hur omfattande kalibreringen görs. En noggrann kalibrering kan ge en felmarginal på $\pm 10\%$ av avläst värde (för fuktkvot i betong). För mätning av RF kan bättre noggrannhet erhållas.

3.3.1.3 Övriga resistansmetoder

För fältmätningar finns i handeln en del olika resistansmätare med varierande noggrannhet. För mätning i trä och liknande material slås två elektroder in i materialet till visst djup och med visst avstånd mellan. Resistansen mäts mellan elektroderna och fuktkvoten ges direkt på en skala.

Problem med inslagna elektroder är främst kontaktmotstånd mellan elektrod och material.

För mätning av fuktkvot i betong finns en mätare (Protimeter Concretemaster) baserad på likström. Vid mätning borrar två hål 25-35 mm djupa i betonggolvet med 15 cm mellanrum. Hålen fylls med en vätska för att få elektrisk kontakt. Resistansen mäts mellan elektroderna som placeras i vätskan. Skalan är graderad i fuktkvot.

Problem med ovanstående metoder är främst att elektroderna är ganska ytliga och en ojämn fuktfördelning ger helt felaktiga värden. Samma utslag kan tänkas för de båda fallen i fig 3.2.

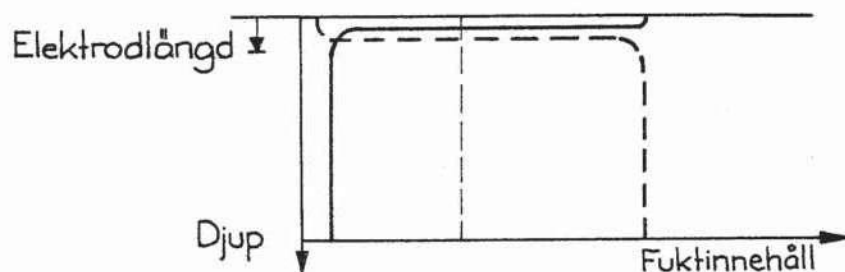


Fig. 3.2 Möjliga fuktfördelningar som ger samma resultat vid mätning med inslagna elektroder.

Att säga någonting om fukttillståndet i ett betonggolvs är alltså nästan omöjligt med denna metod. Ett annat problem är att armeringsjärnen kan påverka resultatet.

3.3.2 Kapacitiva metoder

Fuktmätning med kapacitiva metoder bygger på den stora skillnaden mellan dielektricitetskonstanten för vatten (≈ 80) och för fasta material (≈ 5). Med materialet som dielektrikum kan kapacitansen hos olika kondensatorutformningar mätas och sedan översättas till en fuktkvot.

Gemensamt för de kapacitiva metoderna är att de kräver en komplicerad och därmed dyr utrustning, varför de inte har något större praktiskt intresse för betonggolvs.

I marknaden finns emellertid billiga apparater för indikering av fuktighet i ytan. En sådan är "Aucon" som ger ett fält enligt figur 3.3. (Jfr resistansmetod med inslagna elektroder.)

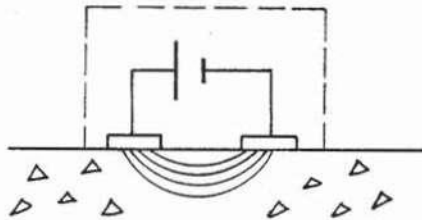


Fig. 3.3 Mätprincip för enkel fuktindikator baserad på kapacitansförändring.

Det måste betonas att dessa endast indikerar fukttinnehållet och då bara i ytan. Apparaterna kan emellertid vara värdefulla vid val av provtagningsplatser om en skada har inträffat.

3.4 Hygrometriska metoder

Innesluts ett fuktigt material i en behållare, inställer sig så småningom jämvikt mellan fukten i materialet och vattenångan i luften i behållaren. Genom att mäta den instängda luftens relativa fuktighet eller daggpunkt, erhåller man ett mått på materialets fukttillstånd, när detta befinner sig i det hygroskopiska området, dvs $RF \leq 98 \%$. Med kännedom om materialets fukthistoria och jämviktsfuktkurva kan därefter, om så önskas, fuktkvoten bestämmas.

3.4.1 Mätutrustning

En mängd apparatur existerar för mätning av relativ fuktighet och daggpunkt. Denna apparatur baserar sig på många tänkbara sätt att utnyttja en egenskapsförändring hos material vid en ändring av fukthalten. Av denna anledning måste ofta själva känselkroppen innehålla material med små dimensioner för att jämvikt med omgivande luft snabbt skall erhållas.

3.4.1.1 Psykrometriska metoder

En psykrometrisk mätning består av två temperaturmätningar, lufttemperaturen och den "våta" temperaturen, dvs den lägre temperatur, som uppkommer vid avdunstningen av vatten i icke fuktmättad luft p g a att värme krävs för ångbildningen. Den vanligaste konstruktionen av en psykrometer är två termometrar, där den ena är torr och den andra är fuktig t ex genom att den lindas med fuktig bomull. Luften får sedan strömma förbi båda termometrarna med hög hastighet ($v > 2\text{m/s}$). Luftfuktigheten kan sedan avläsas i tabeller eller diagram med hjälp av de båda temperaturerna. Psykrometern kan göras elektrisk och därmed medge kontinuerlig registrering genom att temperaturmätningen göres med termistorer eller termoelement, se t ex Monteith & Owen (1958).

3.4.1.2 Metoder som mäter daggpunkten

Daggpunkthygrometrar kan fungera på olika sätt. En metod är att utnyttja en spegel vars temperatur kan ändras. Med hjälp av

en ljusstråle och en fotocell undersöks om spegeln är belagd med imma, om inte, sänks spegelns temperatur tills detta inträffar. Denna temperatur är daggpunkten.

3.4.1.3 Metoder som utnyttjar fuktbetingade rörelser

Den enkla hårhygrometern utnyttjar längdändringen hos ett hårstrå vid en ändring i omgivande lufts relativa fuktighet. Denna längdändring överföres till ett visarutslag som motsvarar luftens RF. En s k termohygrograf innehåller en hårhygrometer.

En hårhygrometer blir ofta en relativt stor apparat som knappast kan utnyttjas för mätning av RF inuti ett material. Monfore-givaren, som utnyttjar längdändringen hos polyestertrådar är däremot mycket lämplig för sådana mätningar. Polyestertråden är förbunden med en tunn metalltråd, genom vilken en ström ledes. Längdändringen i polyestertråden ger en längdändring i metalltråden, vilket medför en resistansändring, som genom kalibrering fås att motsvara, ändring i RF. Noggrannheten kan uppgå till $\pm 2\%$ RF. Se Monfore (1963).

På grund av att materialen ovan står under spänning och därför kan längdändras vid oförändrat klimat (s k relaxation), måste en kalibrering utföras ofta.

3.4.1.4 Metoder som mäter elektriska förändringar i hygroskopisk film eller salt

Fukthaltsändringar i ett material ändrar de elektriska egenskaperna. Detta utnyttjas för att mäta RF genom att resistans- eller kapacitansändringar i tunna filmer eller salter av hygroskopiska material registreras. Genom kalibrering i kända klimat omvandlas mätvärdet till relativ fuktighet. Noggrannheten kan bli så bra som $\pm 0.5 - 1\%$ RF.

Vissa av dessa hygrosensorer är temperaturkänsliga och kräver en samtidig temperaturmätning. Ibland finns därför en inbyggd temperaturmätning i hygrosensorn.

3.4.2 Metoder att mäta hygrometriskt

Ovan beskriven mätutrustning mäter alltså i luft. Vissa givare har små dimensioner, främst så kallade insticksgivare och lämpar sig därför för mätning i små luftvolymmer, t ex inuti ett material. Nedan kommenteras de vanligaste sätten att använda hygrosensorer.

3.4.2.1 Mätning i "kupa"

Ett sätt att bestämma fuktillståndet i ett material, t ex betonggolv, är att placera en kupa på materialets yta, se exempel i figur 3.4 och 3.5.

Kupan innehåller någon form av mätinstrument för RF, t ex termohygrograf eller insticksgivare. Kupan skall vara så liten som möjligt och ytan runt kupan skall tätas noggrant. Observera att det värde som erhålls är relativa fuktigheten i ytan och ingenting annat. Står kupan kvar tillräckligt länge för att fukten skall omfördelas i konstruktionen, kan man emellertid erhålla ett värde som motsvarar totalt fukttinnehåll. Detta kräver dock mättider för betongplattor på några veckor.

Hänsyn måste tagas till temperaturförhållandena under mättiden. Temperaturvariationer och speciellt temperaturskillnader mellan mätinstrument och materialyta har stor inverkan på mätresultatet. Speciellt om kupan är stor måste temperaturen på materialytan mätas.

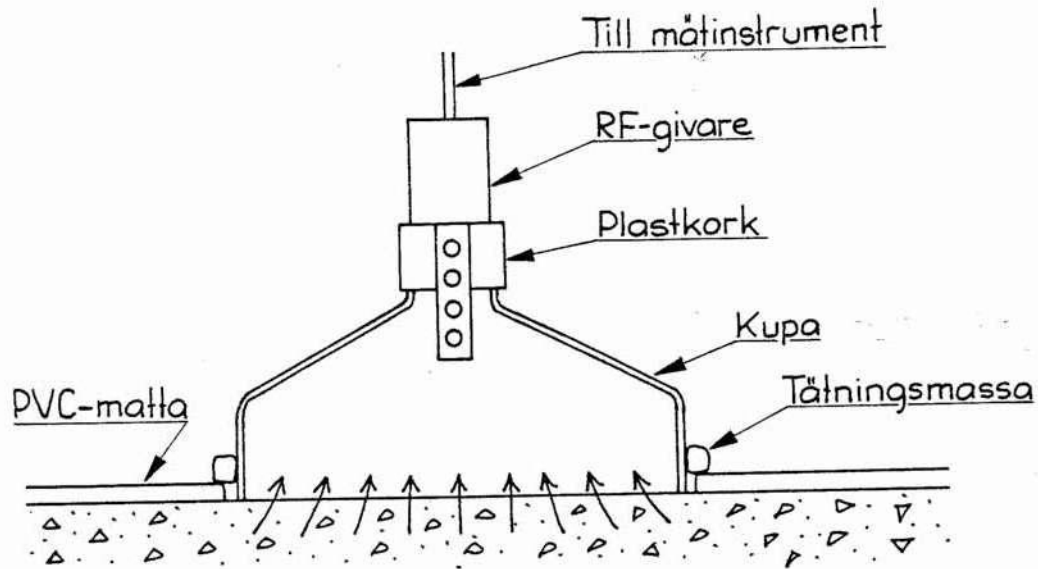


Fig 3.4 Liten "kupa" innehållande insticksgivare.

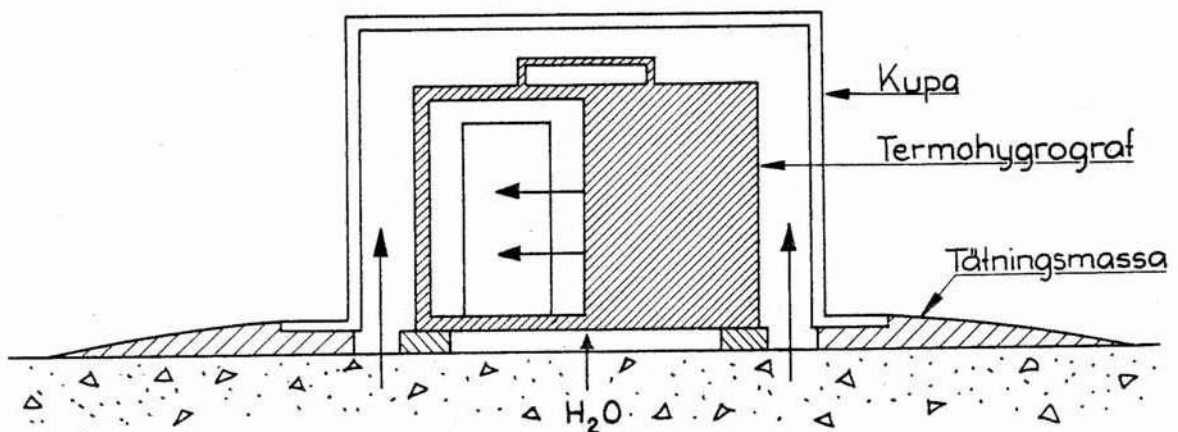


Fig 3.5 Stor kupa innehållande termohygrograf som registrerar temperatur och relativ fuktighet.

3.4.2.2 Mätning i hål

Vid mätning av fuktfördelningen i laboratorieförsök med en-dimensionell fukttransport, mäts RF i materialet på ett ut-märkt sätt i hål placerade vinkelrätt mot fukttransport-riktningen. Hålen måste vara så små som möjligt, speciellt där fuktgradienterna är stora. Detta medför att givare med ett litet tvärmått i minst en riktning är önskvärda. Jämvikt i hålet kan fås i gynnsamma fall efter 3 - 4 timmar. Metoden har använts av tex Nilsson (1977).

Försök att mäta i uppborrade hål har visat sig vara mycket tidsödande, se Pihlajavaara (1974). Orsaken har inte klarlagts.

3.4.2.3 Mätning på uttaget prov

Vid uttagning av ett prov ur ett material ger en mätning av RF i t ex ett provrör innehållande provet ett utmärkt resultat även om provbiten inte är representativ, vilket ofta är fallet i kompositmaterial som betong. Förfarandet åskådliggörs i fi-gur 3.6.

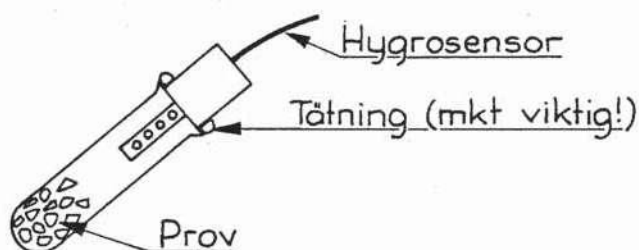


Fig 3.6 Mätning av RF på uttaget prov.

Mätvärdet avläses först då jämvikt inställt sig i provröret, vilket kan ta upp till ett dygn.

Metoden har laboratoriemässigt använts av avdelningarna för Byggnadsmateriallära och Byggnadskonstruktionslära vid LTH under en följd av år, se t ex Adamsson & Gaffner (1977).

3.5 Termiska metoder

Den termiska ledningsförmågan hos ett material ökar med ökande fukttinnehåll. Genom att bestämma värmeledningsförmågan kan alltså fukttinnehållet bestämmas. Någon utrustning för detta finns inte i marknaden.

3.6 Kärnfysikaliska metoder

Vid dessa metoder användes främst gamma- eller neutronstrålning. Metoderna är snabba men kräver en omfattande kalibrering och är dyra.

Gamma-strålningen växelverkar med materialets elektroner, varvid strålningen absorberas eller sprids i materialet. Strålningskällan placeras på ena sidan av materialet. På den andra sidan registreras strålningens intensitetsminskning. Intensitetsminskningen är beroende av materialets densitet som i sin tur är beroende av fukttinnehållet.

Neutroner växelverkar i huvudsak med väteatomer och ger en direkt mätning av vatteninnehållet per volymenhet. Här registreras alltså även kemiskt bundet vatten.

Två olika sondtyper finns i marknaden som använder neutronstrålning, en ytsond med avkänningsdjup 15 - 35 cm och en hålsond med en avkänningszon med diametern 15 cm.

Gammastrålningsmätningar under laboratorieförhållanden, men också i fält, har sedan länge gjorts vid Danmarks Tekniska Högskola, se Nielsen (1972).

4 PROBLEMSTÄLLNING VID BETONGGOLV

Mätning av fukt i betonggolv är främst aktuellt vid läggning av fuktkänsliga ytskikt. Man vill då kunna bedöma om betongen är tillräckligt torr för att läggning skall kunna ske utan risk för skador eller om ytterligare uttorkning krävs. I detta fall erfordras därför en mätning av hela plattans fuktinnehåll eller fuktinnehållet i någon representativpunkt, som ger en uppfattning om vilken fuktbelastning som kan förväntas på golvbeläggningen.

4.1 Mätdjup

Då mätningen skall utföras är fukten ojämnt fördelad i plattan, se exemplet i fig 4.1.

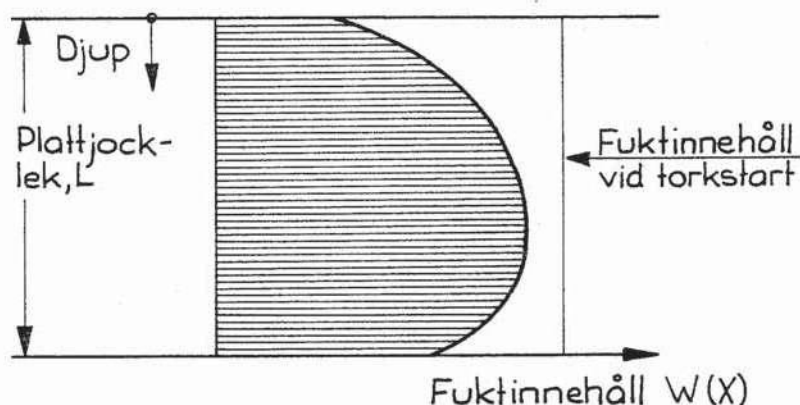


Fig 4.1 Principiell fuktfördelning i betongplatta på mark.

Ytan hos plattan är oftast mycket torr, men i plattans mitt är det fuktigt. En platta på mark med underliggande värmeisolering får också en viss torkning nedåt, så att plattans underkant blir torrare än plattmitt, som i exemplet i fig 4.1.

Om en tät golvbeläggning appliceras, förhindras uttorkningen uppåt och en omfördelning sker så småningom av den kvarvarande fukten enligt figur 4.2.

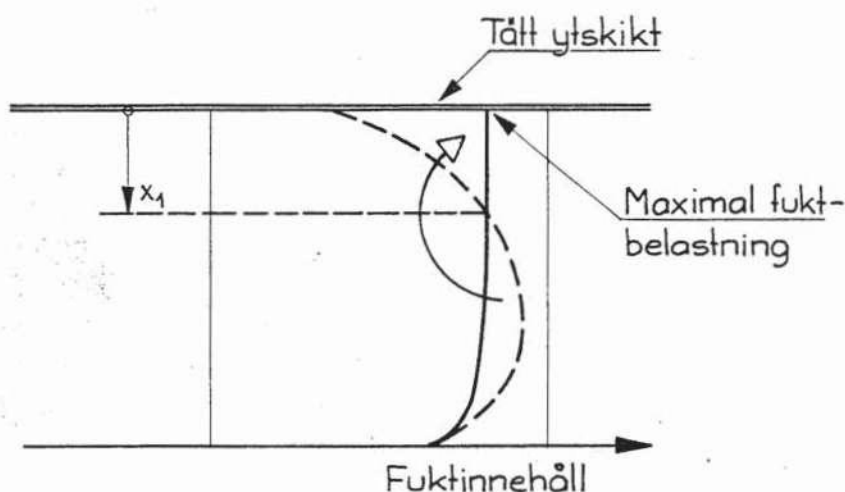


Fig 4.2 Principiell fuktfördelning efter fullständig omfördelning av kvarvarande fukt.

Omfördelningen sker succesivt och är avslutad först efter storleksordningen en till två månader, då maximal fuktbelastning på ytskiktet uppnåtts. Som regel fortgår en viss uttorkning nedåt under tiden beroende på temperaturförhållanden och värmeisoleringens täthet. Här kan en "kup-mätning" enligt avsnitt 3.4.2.1 eller en mätning i ytskiktet direkt ge besked om vilken fuktbelastning som kan förväntas. Den stora nackdelen är emellertid den långa väntetiden på att omfördelningen skall äga rum.

Vid fuktmätningstillfället har man en fuktfördelning enligt figur 4.1 men vill ur denna bedöma fuktfördelningen, eller åtminstone maximal fuktbelastning, efter omfördelning, dvs enligt fig 4.2.

Detta kan naturligtvis göras genom att mäta upp hela fuktfördelningen enligt fig 4.1, dvs mäta fukttinnehållet $w(x)$ på olika djup x , och ur detta beräkna det totala fukttinnehållet eller det genomsnittliga \bar{w} :

$$\bar{w} = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} w(x) dx \quad (4.1)$$

Om den fuktmängd som torkar bort nedåt försummas, vilket är på säkra sidan och ett litet fel, kan den maximala fuktbelastningen på ytskiktet uppskattas till att motsvara den genomsnittliga fukthalten.

Man har härmed bl a bortsett från att det finns en viss hysteresis, jfr fig 2.3, mellan jämviktsfuktkurvan vid uttorkning och den vid uppfuktning. En "exakt" beräkning är ytterligt besvärlig, men är inte heller nödvändig i ett praktiskt fall då en ungefärlig uppskattning är fullt tillräcklig.

Detta sätt att bedöma maximal fuktbelastning fordrar flera mätningar på olika djup genom hela plattan. Ett enklare sätt är då att istället mäta fuktinnehållet i en representativ punkt sådan att fuktinnehållet i denna motsvarar den maximala fuktbelastningen efter omfördelning.

En sådan punkt, i exemplet i fig 4.2 markerad på djupet x_1 , är det djup där fuktinnehållet före och efter omfördelningen är lika stort, dvs ingen uttorkning eller uppfuktning skett. Fuktinnehållet i denna punkt är större eller lika stort som den maximala fuktbelastningen på ytskiktet.

Det djup, x_1 , som detta gäller för beror av flera faktorer som torktid, platttjocklek, täthet hos ytskiktet, täthet hos eventuell underliggande värmeisolering eller ångspärr, mm.

För några vanliga konstruktionstyper har detta djup beräknats med en modell enligt Nilsson (1977) och under förutsättning att ytskiktet som skall appliceras är helt tätt. Resultatet redovisas i tabell 4.1.

Tabell 4.1 Djup där fukthalten före och efter omfördelning är lika. Plattjocklek 10 cm. Inneklimat +20 °C 40% RF.

Torktid (dygn)	Djup x_1 , där $w(x_1) = \bar{w}$ (cm). L = 10 cm		
	Material under plattan		
	PE-folie	Cellplast	Mineralull
4	2.7	2.6	2.3
7	3.0	3.0	2.7
15	3.6	3.3	3.2
30	4.2*	3.8*	3.3*
60	3.3	3.3	3.0
	* = maximalt djup		

Om därför fuktmätningen utföres på ett djup som är minst det som anges i tabell 4.1, fås ett resultat som är på säkra sidan.

Anges lämpligt mätdjup i procent av plattans tjocklek och detta avrundas, fås för de vanliga konstruktionstyperna ett resultat enligt tabell 4.2. Halva plattan i ett mellanbjälklag förutsättes härvid fungera som en platta på mark där uttorkningen nedåt hindras av en ångspärr.

Tabell 4.2 Lämpliga mätdjup i olika konstruktioner

Konstruktion	Minsta mätdjup (%) av platttjocklek
Mellanbjälklag	20
Platta på mark, underliggande PE-folie	40
cellplast	40
mineralull	35

4.2 Markfukt

Det som ovan sagts omfattar mätning av byggfukt. Sker tillförsel av markfukt i onormalt hög grad, bör detta ge utslag i form av ett för högt värde vid mätning på ovan föreslagna mätdjup. Härvid kan man emellertid inte skilja på tillskott av markfukt och otillräckligt uttorkad byggfukt enbart genom en mätning.

Misstänkes markfukt ge fukttillskott till konstruktionen, måste ytterligare mätningar utföras för att detta skall kunna konstateras. Detta innebär emellertid en mer eller mindre fullständig skadeutredning för vilken erfordras en god kännedom om konstruktionens funktion samt tillgång till speciell mätutrustning.

En viss uppfattning om tillförsel av markfukt kan dock erhållas genom att göra en kompletterande mätning i betongplattans underkant. Om markfukt tillföres gäller för fukttillståndet i plattans underkant att

- o fukttillståndet är högre än på minsta mätdjup enligt ovan
- o fukttillståndet är i närheten av 100% RF

Detta kan emellertid vara uppfyllt för vissa konstruktioner även utan att markfukt tillföres. Exempel på detta är om underlaget är tätt, t ex polyetenfolie eller cellplast samt om plattans tjocklek är stor i förhållande till den torktid som använts. För bedömningen erfordras därför kännedom om konstruktionens utformning samt också om den uttorkning som ägt rum före mätfallet.

5 FUKTKVOTS- KONTRA RF-MÄTNING

I ByggAMA 65 och HusAMA 72 anvisas karbidmetoden för fuktmätning i undergolv av betong (och sandfyllning!) Redan i slutet av 60-talet riktades hård kritik mot metoden. 1970 föreslogs en RF-metod (kup-metoden) av LTH, se Adamsson et al (1970), att ersätta karbidmetoden. Motiveringen var, förutom att mätdjupet ofta var för litet vilket inte nämdes i byggAMA 65, att fuktkvoten eller "fukthalten i %" inte ger tillräcklig upplysning utan för detta erfordras den relativa fuktigheten, RF.

De principiella skillnaderna mellan en fuktkvotsmätning, med olika metoder, och en RF-mätning redovisas nedan tillsammans med en studie av noggrannheten hos de olika sätten att mäta.

5.1 Principiellt

Av avsnitt 2.3 framgår det att två viktiga punkter vid en jämförelse av fuktkvots- och RF-mätning är:

- o Ett ytskikt påverkas av lika stor RF som underlaget har. Fuktkvoten enbart säger inget om fuktbelastningen.
- o Fuktkvot måste översättas till RF vid jämviktsfukt-kurvan för exakt den aktuella betongsammansättningen.

Innebörden av detta är att inte ens en exakt bestämd fuktkvot är tillräcklig som bedömningsunderlag vid en fuktkvotmätning. Den måste översättas till relativ fuktighet och denna översättning är svår att utföra med någon större noggrannhet framför allt beroende på att betongens sammansättning ofta är dåligt känd och kan variera kraftigt.

Sker mätningen med karbidmetoden bör hänsyn också tagas till att:

- o "Fukthalt i %" mätt med karbidmätare är lägre än fuktkvot i vikt-%.

Avvikelsen vid en korrekt mätning är ca -0.3 vikt-% vid en fuktkvot av 5 vikt-%, jfr avsnitt 2.2.

5.2 Noggrannhet och precision

En fuktkvotsmätning kan vara behäftad med stora fel av olika orsaker. Fel provtagningsdjup ger naturligtvis ett felaktigt resultat. Uttagning av ett prov ur ett så heterogent material som betong medför stora risker att provet inte är representativt för den betong det är taget ur. Provet kan lätt innehålla för lite eller för mycket sten och ger därvid för hög respektive för låg fuktkvot.

Vid mätning med karbidmetoden tillkommer ytterligare felkällor. Krossningen av provet till mjöl medför risk för uttorkning av provet innan det hunnit vägas upp, placerats i stålflaskan och denna tillslutits. Väntetiden, dvs den tid under vilken man låter kalciumkarbiden reagera med fukten, inverkar på hur mycket som hinner reagera och därmed på mängden acetylengas och i slutänden fuktmätningens resultat.

För att kvantifiera noggrannheten och precisionen hos olika metoder och i viss mån avgöra vilka faktorer som är avgörande, har en serie laboratorieförsök genomförts. Dessa redovisas nedan.

5.2.1 Laboratorieundersökning

Betongcylindrar med en diameter av 10 cm göts i plastpåsar för att förhindra uttorkning. För att få en relativ fuktighet under 98% valdes ett lågt vattencementtal ~ 0.3 , dvs en hög cementhalt, så att den inre torkningen blev stor. Tre provserier A, B och C om vardera femton provkroppar göts. Stenmax var 12 mm för serie A och C och 25 mm för serie B. Provkropparna förseglades och härdades fyra månader i ett klimatrum med $+20^{\circ}\text{C}$ och 95% RF.

Ur varje provkropp i serie A och B uttogs prov av olika storlek för mätning av relativ fuktighet och fuktkvot på olika sätt. RF bestämdes på små prov i provrör med insticksgivare enligt kapitel 6. Fuktkvoten bestämdes på stora respektive små prov genom vägning före och efter torkning i ugn vid 105°C samt med karbidmetoden på krossade prover med vikten 20 g. Resultaten redovisas i tabell 5.1 och fig 5.1.

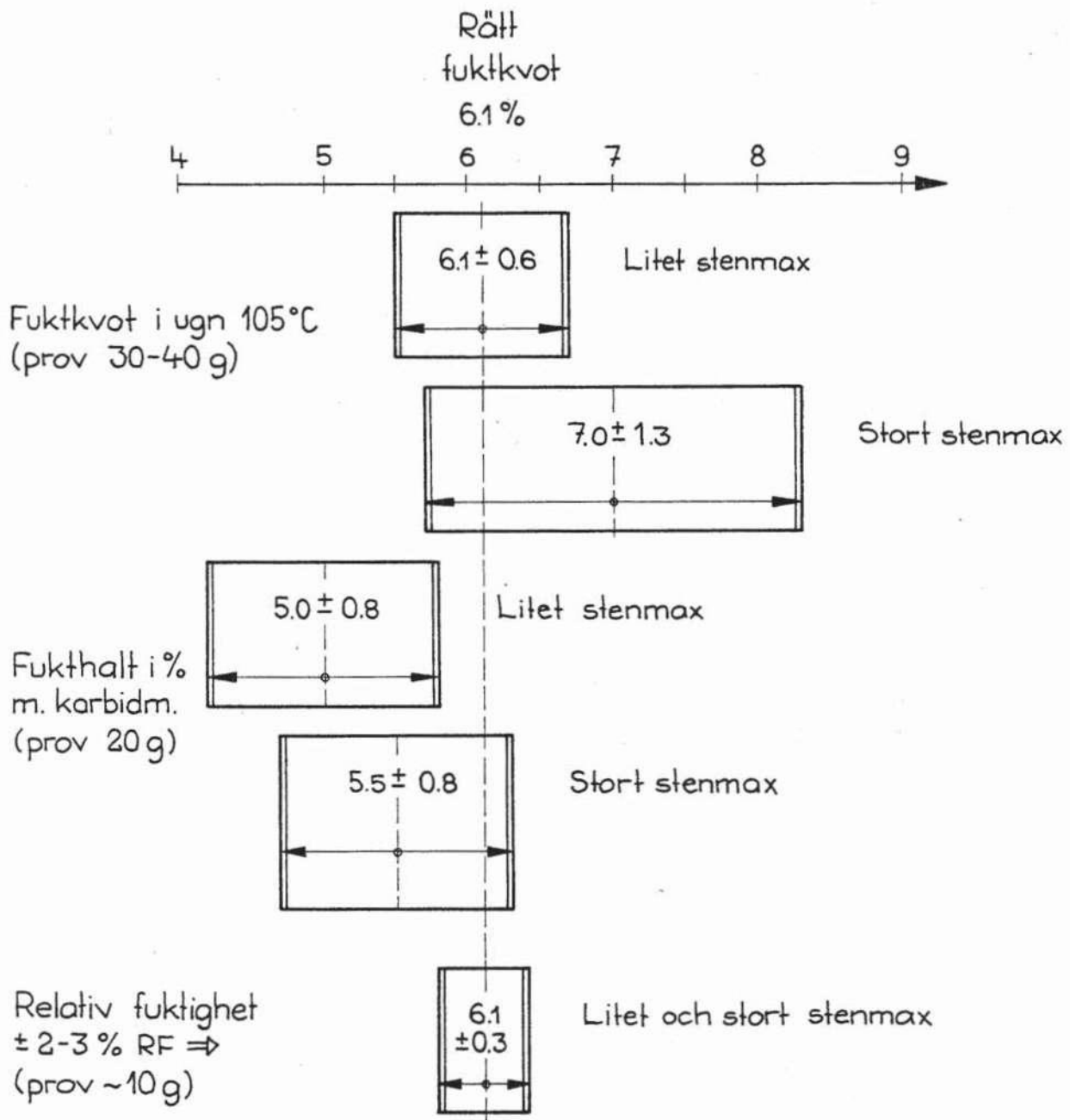


Fig. 5.1 Mätresultat med olika mätmetoder.
Inverkan av stenstorlek

Tabell 5.1 Relativ fuktighet (RF) och fuktkvot mätt med olika metoder på membranhärdade provkroppar. (\bar{x} = medelvärde, s = standardavvikelse; $n = 15$ prover.)

Mätmetod		Torkning i 105 °C (vikt-%)		CaC ₂ (fukthalt i%)	RF i rör (%)
Prövvikt (g)		100-250	30-40	20	<10
Serie A	\bar{x}	6.12	6.13	5.0	87.4
(stenmax 12 mm)	$\pm 2s$	± 0.48	± 0.60	± 0.8	± 2.8
Serie B	\bar{x}	6.21	7.01	5.5	90.3
(stenmax 25 mm)	$\pm 2s$	± 1.30	± 1.34	± 0.8	± 2.1

Tabell 5.2 Relativ fuktighet och fuktkvot mätt med olika metoder på provkroppar med olika uttorkningsgrad.

Provkropp nr	Fuktkvot (%) i ugn 105 °C				"Fukthalt i %"		RF (%)	
	Stora prov		små prov		CaC ₂ , 20 g		x	$\bar{x} \pm 2s$
	x	$\bar{x} \pm 2s$	x	$\bar{x} \pm 2s$	x	$\bar{x} \pm 2s$	x	$\bar{x} \pm 2s$
1	6.51		6.17		4.7		90.5	
6	6.66	6.67	6.62	6.28	4.9	4.8	90	90.2
10	6.83	± 0.32	6.06	± 0.59	4.9	± 0.6	90	± 0.6
4	5.60	5.55	4.77	4.78	4.9	4.7	89	88.0
7	5.44		5.24		4.7		88	
11	5.67	± 0.24	4.32	± 0.92	4.4	± 1.2	87	± 2.0
12	5.08	5.06	4.50	4.63	4.7	4.6	86	86.2
14	5.06		4.67		4.7		86.5	
15	5.04	± 0.04	4.73	± 0.24	4.4	± 0.4	86	± 0.6
5	3.49		2.85		3.3		77	
9	3.38	3.46	3.20	2.92	3.3	3.3	76	75.6
8	3.73	± 0.43	3.55	± 1.27	3.8	± 0.8	75	± 2.2
2	3.22		2.07		2.8		74.5	
3	2.92	2.89	3.02	3.18	2.8	2.7	69	70.0
13	2.86	± 0.08	3.34	± 0.45	2.6	± 0.3	71	± 2.8

Provkropparna i serie C torkades i ugn vid 105 °C under varierande tider för att få olika mängd kvarvarande fukt. Efter torkningen förseglades provkropparna så att kvarvarande fukt omfördelades. Efter ca en månad uttogs prover av olika storlek ur provkropparnas centrala delar där hysteresiseffekten är liten.

På de uttagna proverna bestämdes RF och fuktkvoten på olika sätt enligt ovan. Resultaten redovisas i tabell 5.2 och åskådliggörs i figur 5.2 och 5.3.

Av resultaten framgår bl a att det erfordras stora prover för att bestämma fuktkvoten i betong på ett riktigt sätt. Noggrannheten bestäms huvudsakligen av provets storlek och maximal stenstorlek avgör precisionen. Större stenmax kräver större prov för att detta skall vara representativt för den aktuella sammansättningen.

Med så stora prov som 100-250 g är precisionen inte bättre än $\pm 0.5-1.3$ vikt-% uttryckt som två gånger standardavvikelsen, vilket ungefärligen utgör 95 % konfidensintervall. Det högre värdet gäller för större stenmax. På små prover av betong med stort stenmax fås, förutom en dålig precision, ett medelvärde som kraftigt avviker från det riktiga, dvs en dålig noggrannhet, p g a ett systematiskt fel.

Enligt figur 5.2 verkar mätning på små prover ha en tendens att ge för låga fuktkvoter. Avvikelsen i genomsnitt är nära 10 %. Detta innebär att provets stenhalt är något högre än betongens.

Sker mätningen med karbidmetoden blir också fuktkvoterna för låga i genomsnitt även sedan man tagit hänsyn till att "fukthalt i % motsvarar fuktkvot i procent av våtvikt och alltså är lägre än den vanliga fuktkvoten i vikt-%, jfr ekv (2.8). Vid fuktkvoter över 4-5 % blir skillnaden mycket stor. Enligt tab 5.2 och figur 5.3 har "fukthalten i %" över 5 % inte kunnat uppmätas, trots att de verkliga fuktkvoterna ibland varit större än 6.5 %. Vid en jämförelse av Gustavsson (1973) erhöles liknande resultat med oftast för låga fukthalter mätta med karbidmätaren.

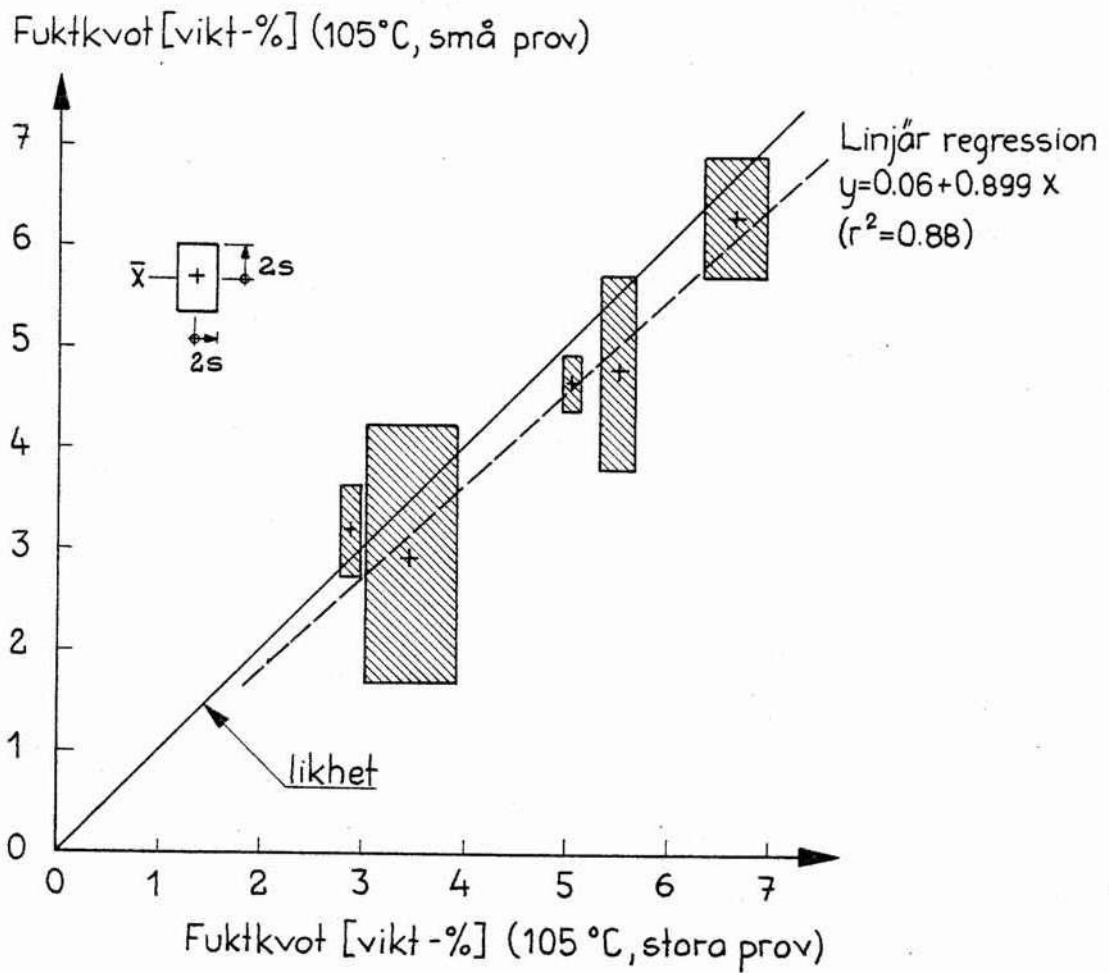


Fig. 5.2 Jämförelse av fuktkvoter mätta genom torkning i ugn vid 105°C på små resp. stora prover.

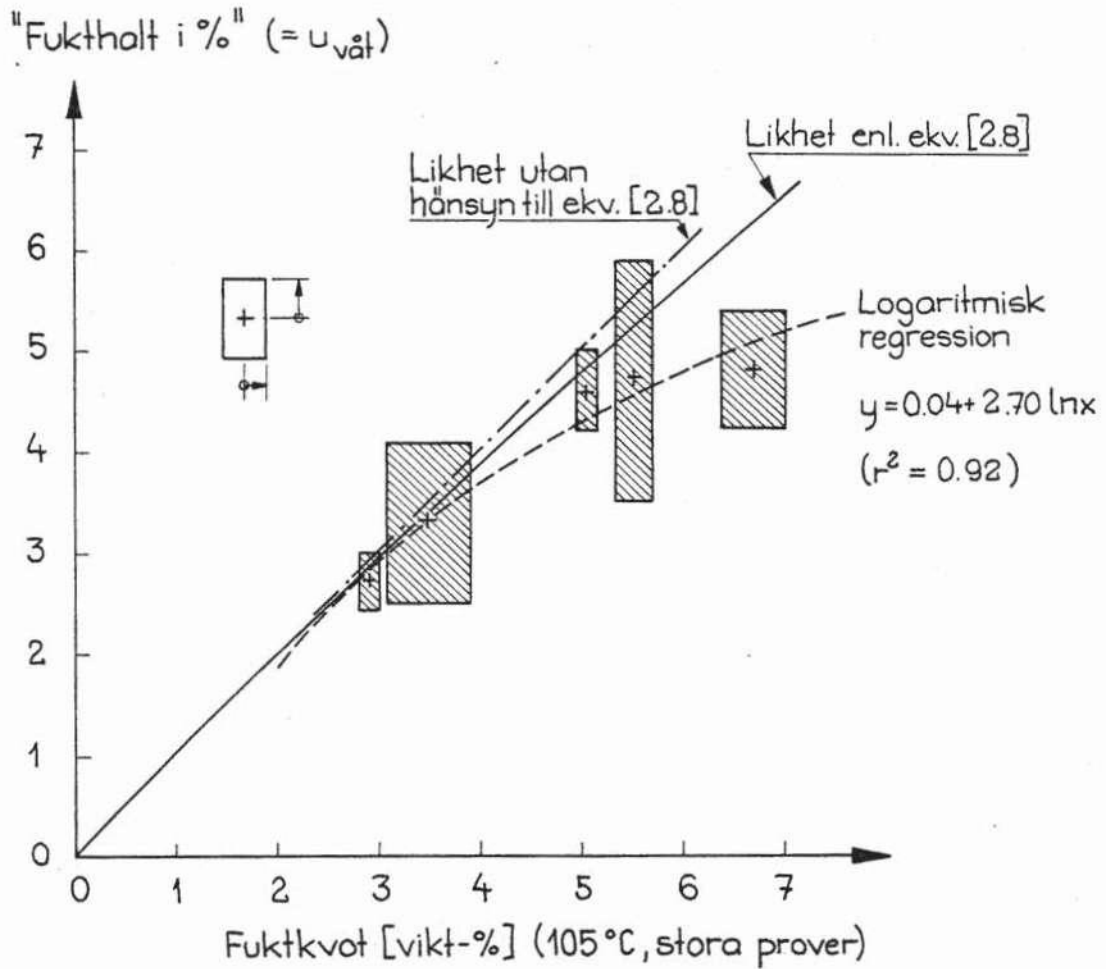


Fig. 5.3 Jämförelse av fuktmätning med karbidmätare på 20 g:s prover och torkning i ugn vid 105°C av stora prover.

Fuktkvot [vikt-%], stora prov

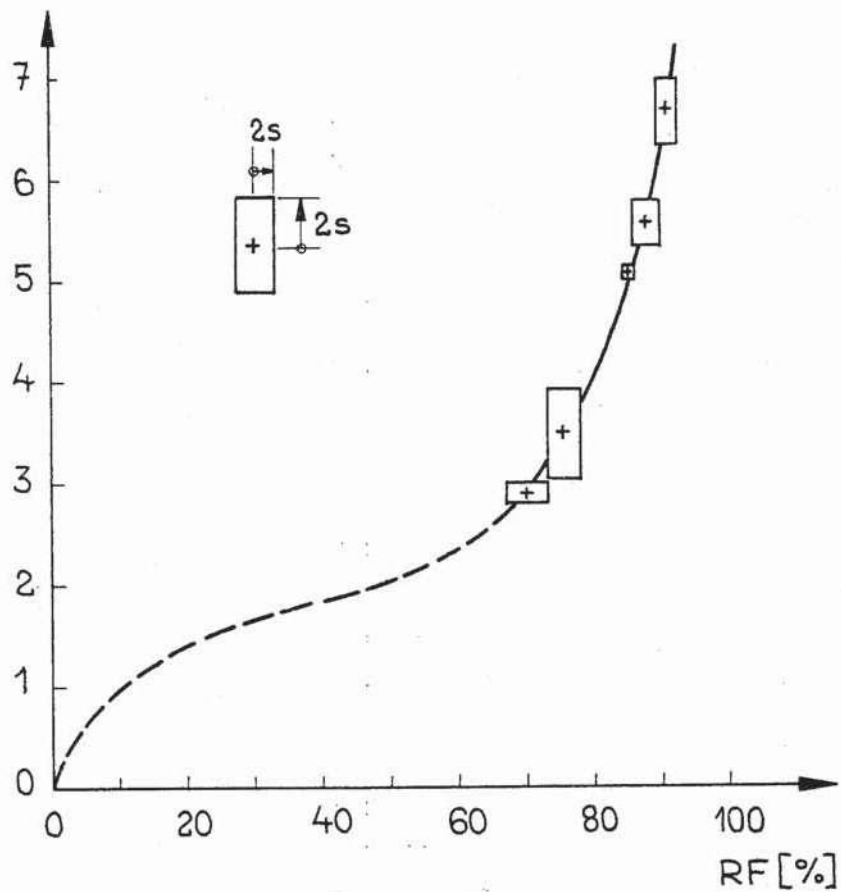


Fig. 5.4 Desorptionsisoterm, för den iförsöken använda betongkvaliteten, ur fuktmätningresultatet enligt tabell 5.2.

Orsakerna till att karbidmetoden som regel ger för låga värden kan vara många, förutom att "fukthalt i %" är lägre än fuktkvot i vikt-% av torrvikten och att små prov oftast är dåligt representativa för betongen som helhet, speciellt vid stort stenmax.

En annan tänkbar orsak kan vara att karbidmätaren är otät, vilket visar sig genom en tydlig acetylenlukt och att trycket sjunker. Är stålflaskan dåligt rengjord sedan föregående mätning, hinner den kvarvarande kalciumkarbinden reagera med en del av fukten i provet innan locket satts på, med för lågt värde som följd. Båda dessa bör ha större inverkan vid högre fukttinnehåll. Trycket är då som störst och bör ge större läckage. Högre fukttinnehåll innebär också att eventuell kvarvarande karbid lättare kan komma i kontakt med en del fukt i provet än om fukttinnehållet är lägre och då hårdare bundet i materialet.

En felkälla som är uppenbar är att provet torkar under den tid som förflyter mellan det att det har "krossats till mjöl" och det har vägts upp och placerats i stålflaskan. Krossningen medför en stor torkyta och speciellt vid höga fukthalter blir torkningen stor.

Mätning av relativ fuktighet (RF) gav en precision av som sämst $\pm 2-3\%$ RF. För att jämföra detta med fuktkvotsmätningarna görs en översättning till fuktkvoter med hjälp av jämviktsfuktkurvan enligt figur 5.5.

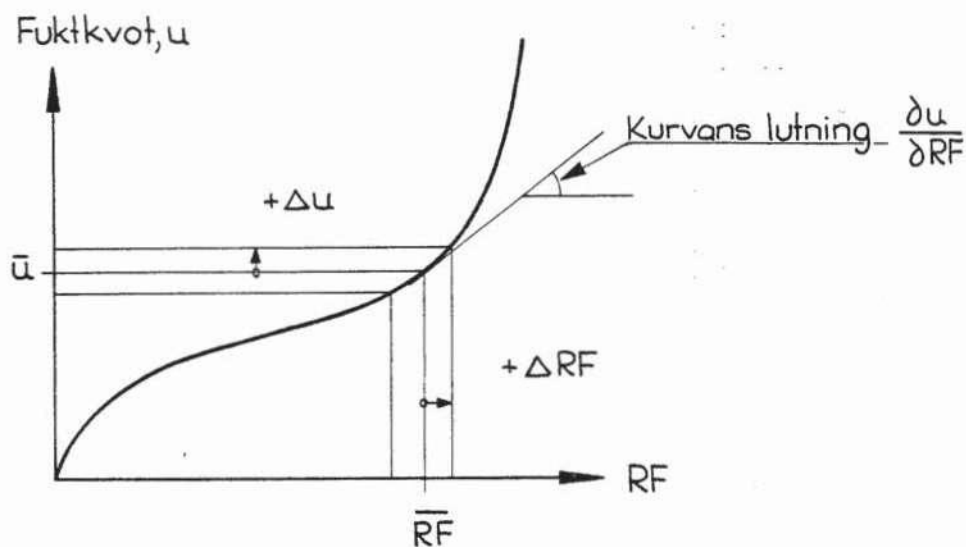


Fig. 5.5 Översättning av precisionen i RF-mätning till fuktkvoter.

Precisionen $\pm \Delta RF$ blir uttryckt i fuktkvot

$$\pm \Delta u = \pm \Delta RF \cdot \frac{\partial u}{\partial RF} \quad (5.1)$$

där $\partial u / \partial RF$ är lutningen hos jämviktsfuktkurvan.

Denna är för den här använda betongen, jfr figur 5.4, ca 0.2 vikt-%/% RF för RF omkring 90 %. För mera "normal" betong är lutningen mindre, omkring 0.1 vikt-%/% RF.

En precision på $\pm 2-3$ % RF motsvarar enligt det ovanstående $\pm 0.2-0.6$ vikt-% fuktkvot, beroende på betongkvalitet och fukt-tillstånd. För normala betongkvaliteter motsvarar $\pm 2-3$ % RF omkring ± 0.3 vikt-% för 60 % <RF<90 %, vilket har markerats i jämförelsen i figur 5.1.

Precisionen hos en RF-mätning är enligt dessa resultat minst lika bra som hos en bra fuktkvotsbestämning på stora prov och med torkning i ugn.

Till de principiella punkter som tagits upp i föregående avsnitt kan därför läggas ytterligare en, avseende precisionen och noggrannheten hos en RF-mätning jämfört med olika fuktkvotsmätningar:

- o Noggrannheten och precisionen hos en RF-mätning är som regel bättre än hos olika fuktkvotsmätningar, i en del fall avsevärt mycket bättre.

Bakgrunden till den stora noggrannheten är att det inte finns något krav på representivitet hos det uttagna provet vid en RF-mätning eftersom det inte gäller en mätning av hur mycket fukt det finns utan av tillståndet hos fukten. Tillståndet hos fukten i en liten volym cementbruk är den samma oberoende av närvaro eller frånvaro av stenar, vilket inte alls gäller för fuktkvoten.

5.3 Slutsats

Av det ovanstående framgår att

- o RF hos underlaget behövs för att jämföra med tillåten RF för ytskiktet.
- o Fuktkvot är svår att översätta till RF.

Dessa båda punkter talar för att mäta RF direkt utan att gå omvägen över fuktkvot. Göres en RF-mätning tillkommer dessutom att

- o Precisionen hos en RF-mätning är oftast större än hos fuktkvotsmätningar, speciellt vid stora stenstorlekar.
- o Noggrannheten hos en RF-mätning är som regel bättre än hos fuktkvotsmätningar, speciellt vid små prov och stora stenstorlekar. Jämfört med karbidmätaren är skillnaden speciellt stor.

Slutsaten av detta bör rimligen bli: mät RF!

6. UTVECKLING AV UTRUSTNING FÖR RF-MÄTNING

Metoder att mäta relativ fuktighet inuti material har använts sedan länge, bl a vid LTH. Metoderna har använts både vid laboratorieförsök och vid fältmätningar i samband med skadeutredningar med mycket gott resultat.

De använda utrustningarna och de metoder som använts är emellertid sådana att de får betecknas som "laboratoriemetoder", knappast lämpade för praktiskt bruk. Detta projekt omfattar det utvecklingsarbete som krävs för att göra mätutrustningen användbar i praktiken även av dem som saknar djupare kunskaper om fuktfrågor. De olika skedena i detta utvecklingsarbete redovisas nedan, med motiveringen till varför mätutrustningen utformats som den har.

6.1 Önskemål och krav

I en enkät till golventreprenörer, se Nilsson et al (1977), ställdes bl a frågan om vilka krav på en ny mätmetod som man anser viktigast. Om man undantar ett lågt pris ansågs följande krav viktiga, i ordningsföljd med det viktigaste först:

- o rätt information om fukttillstånd
- o enkelt handhavande
- o möjlig för olika material
- o noggrann
- o stryktålig

Mer än hälften kunde acceptera ett pris på mellan 1.000:- och 5.000:- kr (1977).

Det är i princip de ovan nämnda önskemålen som försökts tillgodoses vid utformningen av mätutrustningen. Dessutom har möjligheter att mäta på olika sätt med samma mätutrustning ansetts önskvärt vilket i praktiken innebär insticksgivare med små dimensioner.

6.2 Val av RF-sensor

Före inköp av erforderlig utrustning har marknaden inventerats. Skriftlig information begärdes från ett trettiotal firmor i Sverige och Norge med luftfuktighetsmätning på sitt program. Ur denna information erhöles fyra intressanta RF-givare som uppfyllde krav på små dimensioner.

Kontakt togs med firmorna för närmare upplysningar om intressant apparatur. Det visade sig att endast två insticksgivare uppfyllde rimliga krav. En föll bort på grund av för högt pris (~4.000:- för enbart givare) och en för för stort temperaturberoende och dålig noggrannhet ($\pm 5\%$ RF). De som kvarstod var av fabrikat "Hygrody-namics" respektive "Vaisala", se fig 6.1.

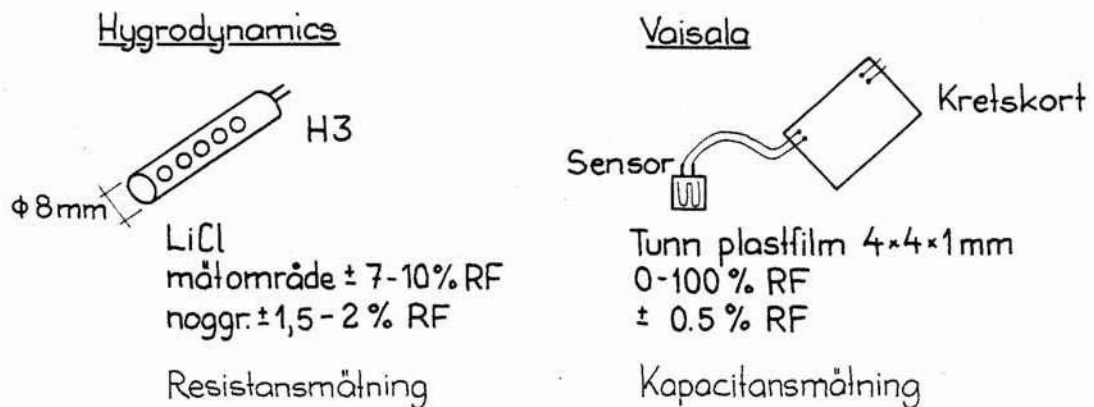


Fig. 6.1 RF-sensorer som uppfyllde uppställda krav enligt fabrikanternas uppgifter.

Båda dessa fabrikat har tidigare använts av avdelningen för Byggnadsmateriallära, dock som komplett mätprob då det gäller Vaisala.

Efter laborietester och värdering av respektive givares egenskaper valdes Vaisalas sensor med kretskort med följande motivering:

- o Stort mätområde 0-100 % RF.
- o Mycket små dimensioner; stora inbyggnadsmöjligheter.
- o Tidigare erfarenheter visar på bra långtidsstabilitet.
- o Liten fuktkapacitet hos sensor.
- o Rimligt pris, ~500:- kr (1977).

6.3 Utformning av RF-givare

Målsättningen var ett bygga in den valda RF-sensorn i en insticks-givare som kan användas på olika sätt, i ingjutna rör, i förseg-lad behållare med prov samt i borrhål.

Med PVC-rör, typ el-rör, prövades flera olika utformningar av in-gjutningsgods i laboratorieförsök, både ingjutningar och mät-ningar. Den slutliga utformningen, redovisad i rapportdel 3, inne-bär mätning i ett PVC-rör med en innerdiameter av 19 mm.

Att detta valdes berodde dels på att både provrör och borrhål i unge-fär samma dimension kunde anförskaffas och dels på att för liten dimension kunde innebära svårigheter att få givaren tillräckligt robust. Användande av för små provrör innebär också att uttaget prov måste sönderdelas i mindre bitar, vilket är tidsödande.

RF-mätning med insticksgivare innebär att givare innesluts till-sammans med det fuktiga materialet i en förseglad luftvolym. Olika tätningsmöjligheter prövades. För att få så liten luftvolym som möjligt skall tätningen ske inuti PVC-rör, provrör respektive borrhål, så nära ytan av det fuktiga materialet som möjligt. Allt detta kunde erhållas med en expanderbar gummiring nära änden på mätproben, se figur 6.2 med den första prototypen.

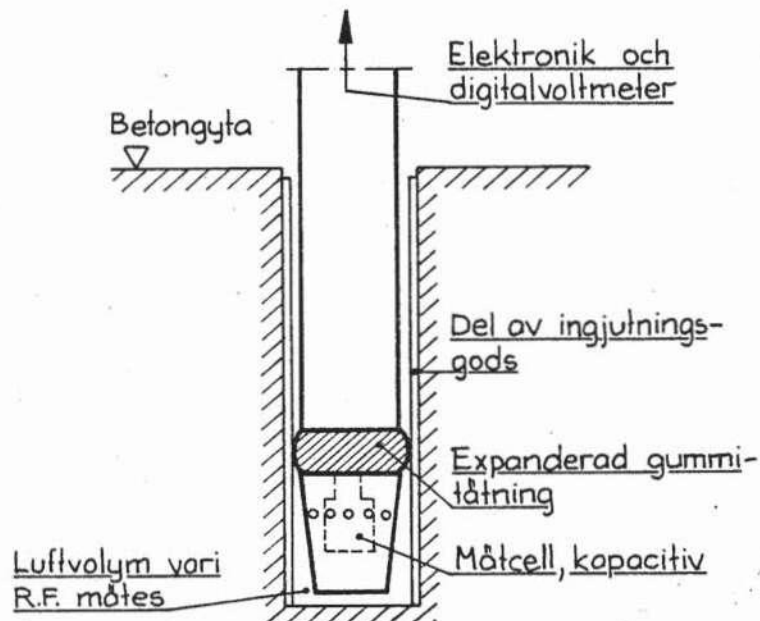


Fig. 6.2 Utformning av RF-givarens nedre del med expanderbar gummitätning. Exempel vid mätning i ingjutet plaströr.

Expansionen åstadkommes genom att vrida på muttern i probens övre del, strax under lådan innehållande kretskortet med elektroniken, jfr figur 6.3.

Till mätproben hör ett digitalt avläsningsinstrument som ger ett mätvärde uttryckt i mV. En kalibreringskurva, se nedan, översätter detta till RF. Instrumentet levererar också en stabil drivspänning till sensorn.

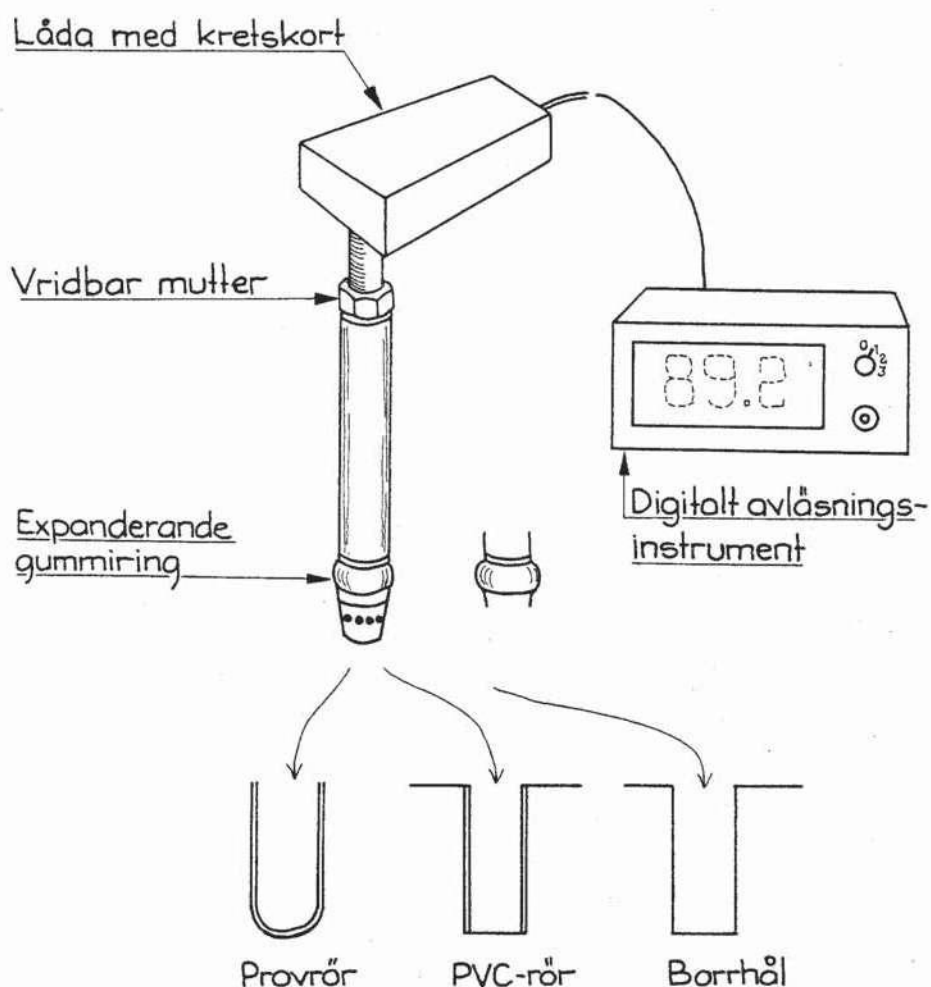


Fig. 6.3 Utformnings av mätprob för mätning i provrör, ingjutna PVC-rör och borrhål.

6.4 Utveckling, modifiering

Mätprober och instrument med utformning enligt figur 6.3 tillverkades i tolv resp fyra exemplar för användning vid de fältmätningar som redovisas i rapportdel 3. Den hårda påfrestning som apparaturen här utsattes för, gav upphov till viktiga förbättringar av främst stryktålighet.

Det visade sig att RF-sensorn var otillräckligt skyddad mot damm, gruskorn och alkaliskt vatten. För att erhålla ett bättre skydd, utformades höljet runt sensorn av ett sintrat bronsfilter. Den största partikel, som kan passera genom detta, har diametern 60 μm . Med detta filter kan givaren t o m doppas i vatten utan att detta kan nå in till sensorn.

Mätprobens slutliga utformning visas i figur 6.4 tillsammans med det digitala avläsningsinstrumentet. Senare har mätprob och instrument kompletterats med en temperaturmätningmöjlighet i form av en motståndstermometer.

Inom projektet har också prövats en prototyp av en RF-prob med mycket mindre dimensioner, $\phi \sim 10$ mm, samt en "kupa". Båda dessa innehåller samma sensor som de övriga givarna.

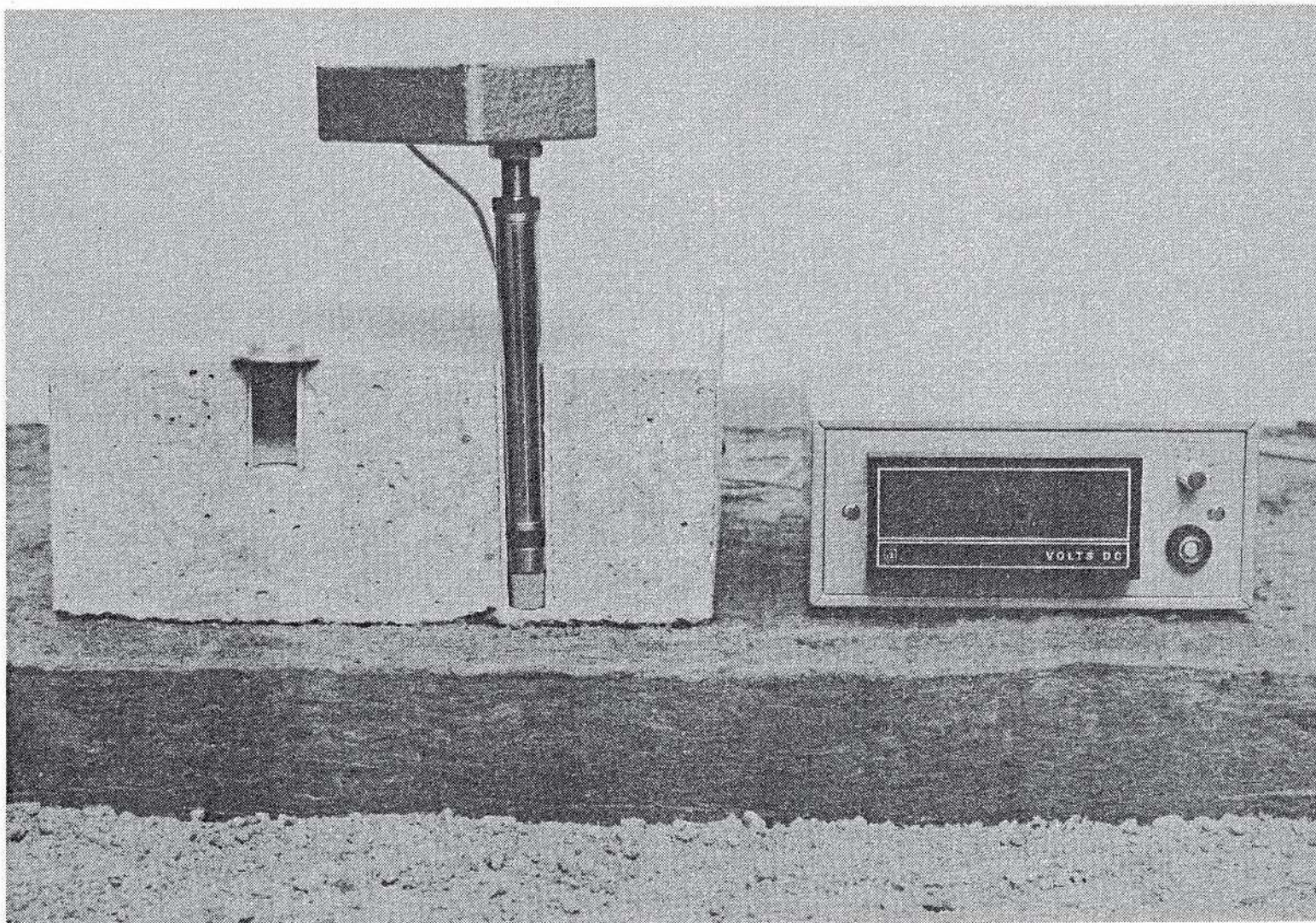


Fig. 6.4 Slutlig utformning av mätpröb. Monterad i ingjutet PVC-rör.

7 NOGGRANHET HOS MATUTRUSTNING

Den tillverkade mätutrustningen har regelbundet kalibrerats under mer än tre år. En genomgång av detta material göres nedan för bedömning av utrustningens noggrannhet. I nästa kapitel analyseras mätmetodernas noggrannhet.

7.1 Kalibrering

Den återkommande kalibreringen har ägt rum i en precisionsfukt-kammare (PFK), beskriven av Ahlgren (1972). RF-givarna har placerats med sin spets inne i kammaren och önskat klimat har ställts in. Normalt har 40, 60, 80, 90, 95 och 98 % RF använts. Givarna har normalt fått anpassa sig till respektive klimat under ett dygn innan kalibreringsvärdet har avlästs. Exempel på kalibreringsresultat för en serie givare ges i tabell 7.1.

Tabell 7.1. Exempel på kalibreringsresultat för givarserie B, oktober 1976. Temperatur +20°C.

Inställt klimat RF (%)	Avläst värde (mV)		
	B1	B2	B3
40.2	42.4	41.6	43.7
60.2	60.1	58.5	60.9
80.1	78.8	75.9	79.5
90.1	90.2	86.5	91.1
93.3	93.6	89.5	94.6
96.4	98.7	93.9	99.9
98.3	101.8	97.1	103.0

Med hjälp av regressionsanalys uppritas kalibreringskurvor för varje enskild givare. Under 80 % RF användes linjär regression och däröver logaritmisk. Ekvationen för kalibreringskurvan blir därmed

$$RF = a + b \ln (mV), \quad 80 \% \leq RF \leq 98 \% \quad (7.1)$$

$$RF = c + d \cdot (mV), \quad 40 \% \leq RF \leq 80 \% \quad (7.2)$$

I tabell 7.2 ges exempel på resultat av regressionsanalysen på kalibreringen enligt tabell 7.1. Motsvarande kalibreringskurva åskådliggörs i sin helhet i figur 7.1 och i förstoring av området $RF > 80 \%$ i figur 7.2.

Tabell 7.2. Exempel på resultat av regressionsanalys på kalibrering av givarserie B, oktober 1976. (r^2 =korrelationskoefficienten).

Konstant enligt ekv (7.1) & (7.2)	Givare		
	B1	B2	B3
a	-233.90	-257.48	-243.34
b	71.925	77.903	73.790
r^2	0.9958	0.9958	0.9932
c	-6.75	-7.87	-7.77
d	1.105	1.156	1.099
r^2	0.9997	0.9998	0.9992

Korrelationen är mycket god ($r^2 > 0.99$). Maximal avvikelse mellan kalibreringskurva enligt regressionsanalysen och enskilt mätvärde är ± 0.5 % RF för RF ≤ 96 % och ca ± 1 % RF för RF = 98 %.

Maximala felet hos inställd RF anges av Ahlgren (1972) till ± 0.2 % RF. Kalibrerade givare har jämförts med några andra kalibreringsmöjligheter, nämligen psykrometer, mättad BaCl-lösning, glycerollösning samt fabriksnya Hygrodynamic-givare med medföljande kalibreringsdiagram.

Jämförelserna har varit svåra att göra och överensstämmelsen är dålig i en del fall. Eftersom någon "standard-RF" inte finns är det svårt att visa vilken metod som ger "rätt" värde. Det förefaller emellertid vara så att precisionsfuktkammaren, psykrometern och glycerollösningen ger samma resultat. En mättad BaCl-lösning skall ge 90.7 % RF enligt litteraturen men med givare kalibrerade i PFK fås ca 89 % RF. Kalibreringskurvan till den fabriksnya Hygrodynamic-givaren förefaller visa ca 5 % RF för lågt värde.

Reproducerbarheten hos den erhållna relativa fuktigheten i PFK är relativt god. Under 1978 och 1979 har ett trettiotal kalibreringar genomförts av olika personer och med olika krav på noggrannhet. Den i PFK inbyggda RF-givaren, också den av fabrikat Vaisala,

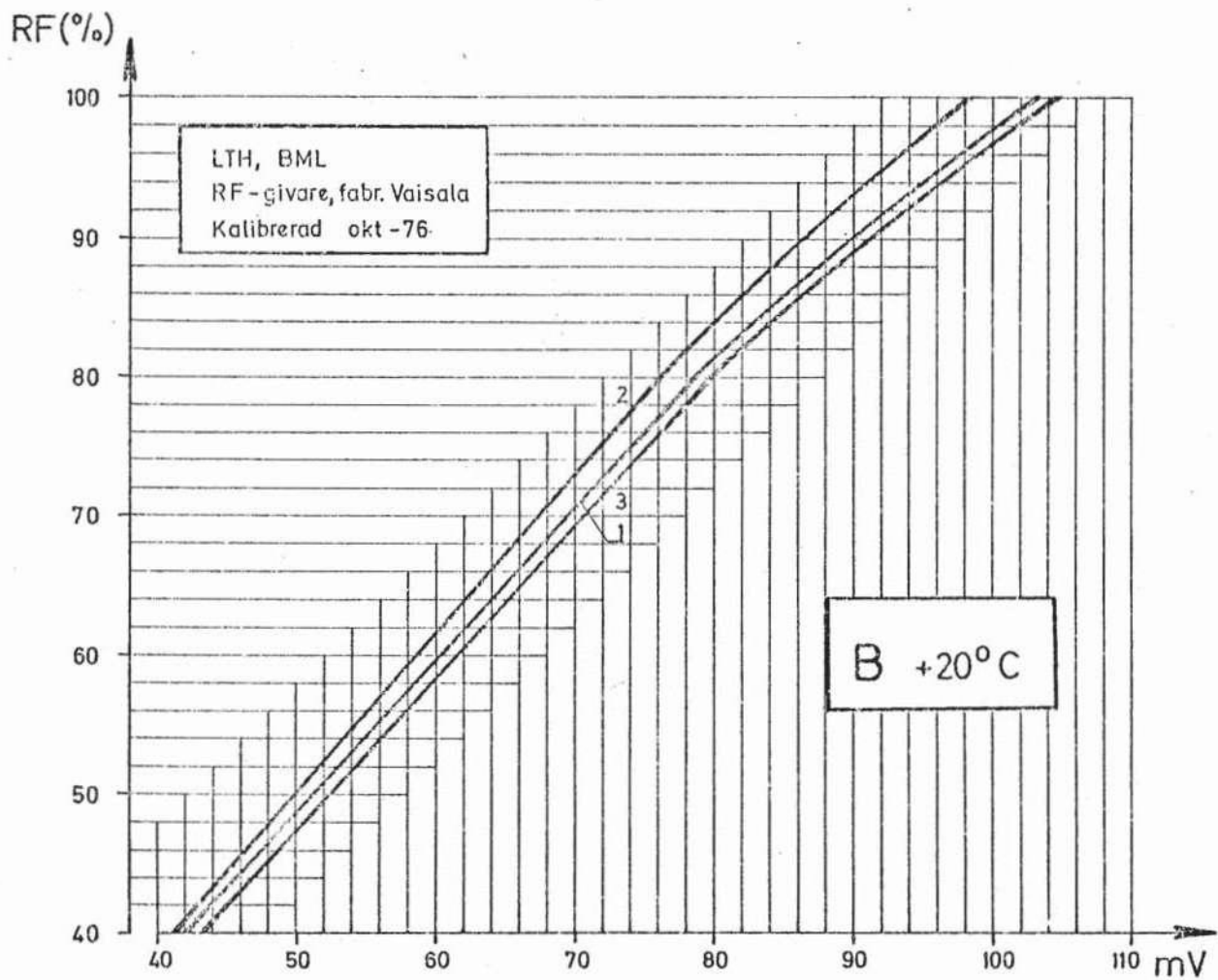


Fig. 7.1 Exempel på kalibreringskurvor. Enligt tabell 7.2.

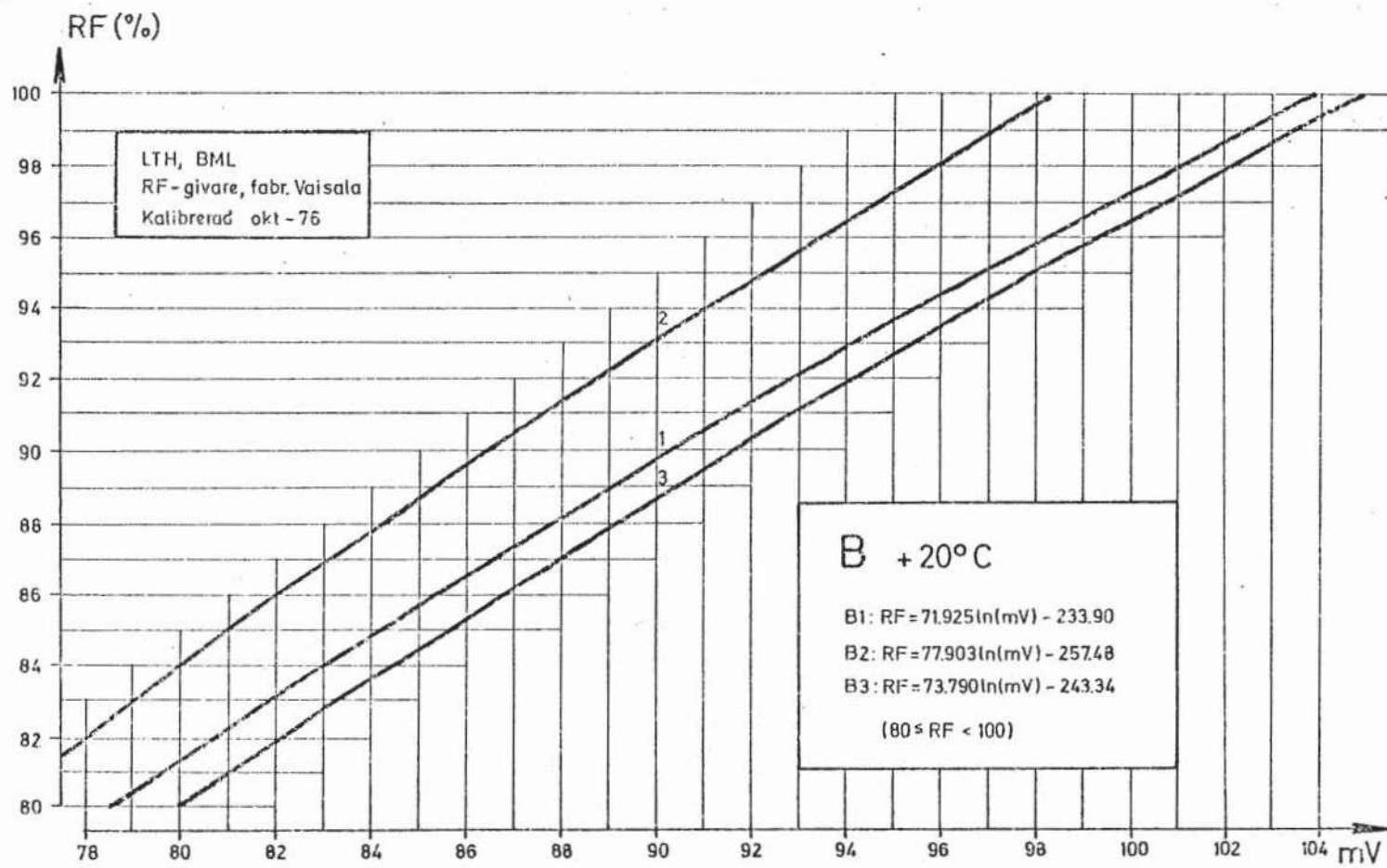


Fig. 7.2 Förstoring av kalibreringskurvorna i fig 7.1 inom området RF > 80%.

avläses vid varje inställt klimat. För de trettiotal avläsningarna har erhållits en standardavvikelse på 1.25 mV(\approx % RF) vid 90 % RF. Härvid har en kalibrering undantagits som uppenbarligen visat sig behäftad med grova fel.

Betydligt enklare kalibreringsutrustningar, än den som använts här, finns i marknaden. Dessa utnyttjar mättade saltlösningar för att skapa ett kalibreringsklimat. För praktiskt bruk måste kalibrering ske vid höga RF, 75-97 %, och salttyp måste väljas därefter.

7.2 Stabilitet

Det stora antal kalibreringar som utförts på samma givare, gör det möjligt att få en uppfattning om långtidsstabiliteten hos RF-givarna. Flitig användning och synnerligen omild behandling under fältmätningar har motiverat täta kalibreringar för att veta när en eventuell förändring skett. I tabell 7.3 ges exempel för givare B1 på kalibreringsresultatet under en period av nästan två år med samma RF-sensor i givaren.

Tabell 7.3 Kalibreringar under en tidsperiod av två år.
Exempel för givare B1.

Datum	Avläst värde (mV)					
	40 % RF	60 % RF	80 % RF	90 % RF	95 % RF	98 % RF
Nov -77	35.4	51.4	70.1	79.7	86.4	89.8
Jan -78	36.8	-	-	-	-	-
Febr	36.9	52.9	72.0	83.3	88.6	94.3
Apr	-	50.2	67.4	79.4	84.7	87.5
Apr	36.1	-	-	79.6	-	-
Juni ^{x)}	-	(48.3)	(65.5)	(76.1)	(80.3)	(84.2)
Juni	35.4	51.3	68.1	-	-	-
Juli	-	50.3	67.5	77.0	82.3	86.0
Aug	35.0	50.6	67.2	76.6	82.0	86.0
Aug -79	35.9	50.2	66.3	76.1	81.5	85.5

x) Den ovan nämnda kalibreringen med grova fel

Stabiliteten är relativt god under långa tidsperioder, medan i något fall kalibreringen har ändrat sig kraftigt på några månader. I exemplet i tabell 7.3 är ändringen från april 1978 till augusti 1979, dvs ett och ett halvt år, maximalt ca -3 mV, vilket motsvarar +2-3 % RF. Långtidsstabiliteten har visat sig vara starkt beroende av vem som använder utrustningen. Skötsel och hantering förefaller avgörande.

7.3 Temperaturinverkan

Normalt har kalibreringen utförts vid +20°C. För att utröna temperaturinverkan på RF-givarna, har kalibreringar vid 90 och 96 % RF även gjorts vid +10°C och +24°C för nio olika givare.

Maximal temperaturinverkan erhöles härvid vid 96 % RF med relativt stor spridning mellan olika givare. Genomsnittlig temperaturinverkan var 0.15 mV/°C, dvs avläst mV-värde skall korrigeras med

$$\Delta mV = -0.15(\theta - 20) \quad (7.3)$$

där θ är mättemperaturen, innan översättning till RF sker via kalibreringskurvan som gäller vid +20°C. Vid temperaturer över +20°C skall avläst värde minskas med 0.15 mV per °C temperaturskillnad.

8 NOGGRANNHET HOS MÄTMETODER

Även om representativiteten hos ett uttaget prov eller den del av materialet man mäter, inte har någon betydelse för giltigheten hos det mätresultat som erhålles, är det några andra faktorer som kan påverka noggrannheten hos mätningen. De viktigaste av dessa faktorer beskrives nedan.

8.1 Principiellt

Mätning av relativ fuktighet inuti ett material innebär principiellt att materialprovet eller en del av materialet avger fukt till en innesluten luftvolym. En del av denna vattenånga absorberas i RF-givaren. Mätningen måste utföras på ett sådant sätt att den vattenmängd som tas från provet inte blir för stor. Detta uppnås genom att ha en liten luftvolym och en givare med tillräcklig låg fuktkapacitet. Denna inverkan uppskattas nedan, för den i figur 8.1 visade principiella mätmetoden med mätning på uttaget prov. Beskrivning gäller även för mätning i ingjutet PVC-rör och borrhål, då provvolymen motsvaras av den volym av materialet, som lämnar fukt ifrån sig till luften i PVC-röret eller borrhålet.

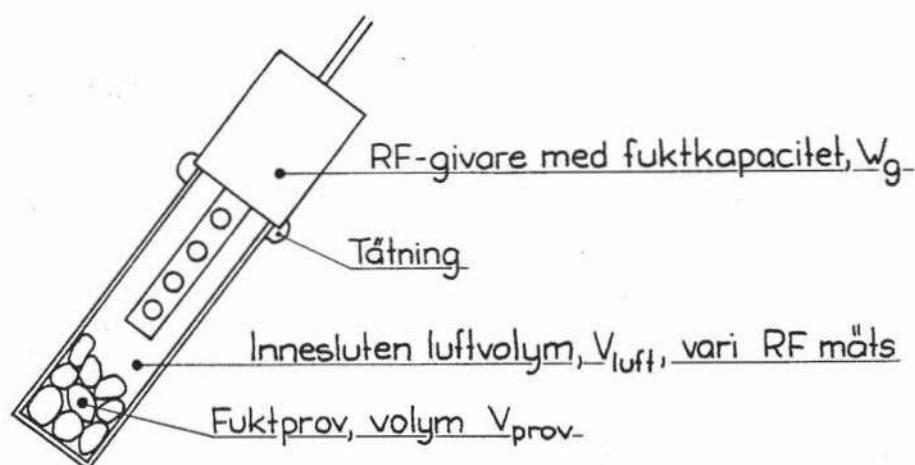


Fig 8.1 Principiell metod vid mätning av RF.

Den mängd fukt, som avgått ur ett prov med volymen V_p , densiteten γ och verklig RF= ϕ_{prov} då en relativ fuktighet RF= ϕ uppmätts, är

$$(\phi_{\text{prov}} - \phi) \cdot \frac{\partial u}{\partial \phi} \cdot \gamma \cdot V_{\text{prov}}$$

där $\partial u / \partial \phi$ är materialets fuktkapacitet, dvs lutningen hos jämviktsfuktkurvan.

Den mängd fukt, som åtgår för att uppfukta RF-givaren och höja RF i inneslutna luftvolymen V_{luft} från RF= ϕ_0 (vinneklimat) till RF= ϕ (uppmätt), är

$$(\phi - \phi_0) c_m V_{\text{luft}} + W_g(\phi, \phi_0) \quad (8.2)$$

där c_m är mätnadsånghalten vid aktuell temperatur och W_g är RF-givarens fuktkapacitet, dvs hur mycket fukt som absorberas i RF-givaren då RF höjs från ϕ_0 till ϕ .

Vid jämvikt är uttrycken (8.1) och (8.2) lika och storleken av det fel som uppstår kan beräknas ur denna likhet. Enklarest göres detta genom att betrakta luftens och givarens inverkan var för sig.

Inverkan av luftens fuktkapacitet fås om W_g sättes = 0. Mätfelet, som beror på att fukt tas från provet för att uppfukta luften, blir

$$\Delta \text{RF} = \phi_{\text{prov}} - \phi = \frac{\phi_{\text{prov}} - \phi_0}{1 + \alpha \frac{V_{\text{prov}}}{V_{\text{luft}}}} \quad (8.3)$$

med $\alpha = \frac{\gamma}{c_m} \cdot \frac{\partial u}{\partial \phi}$

En normal betong med $\gamma \approx 2200 \text{ kg/m}^3$ har $\partial u / \partial \phi \approx 0.1$ för $60 \% < \text{RF} < 90 \%$. Vid $+20^\circ\text{C}$ är $c_m = 17 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, vilket betyder att α är större än 10^4 . Med en luftvolym som är 100 gånger så stor som provets volym, fås ett fel i RF som är mindre än 0.5 % RF.

Vid mätning med den ovan redovisade RF-givaren är luftvolymen inte mycket större än provets och felet, på grund av att luften tar upp en del fukt, är helt försumbart.

Inverkan av givarens fuktkapacitet fås på samma sätt. Felet blir

$$\Delta \text{RF} = \phi_{\text{prov}} - \phi = \frac{W_g(\phi, \phi_0)}{\frac{\partial u}{\partial \phi} \cdot \gamma \cdot V_{\text{prov}}} \quad (8.4)$$

Den använda givarens fuktkapacitet måste vara känd för att felet skall kunna uppskattas. Den maximala fuktkapaciteten för RF-sensor, bronsfilter och som jämförelse sensorn enligt fig 6.1, har bestämts genom att mäta viktändringen då dessa konditionerats i 97 % RF (mättad K_2SO_4 -lösning) efter att ha varit i jämvikt med rumsluften. Resultatet redovisas i tabell 8.1.

Tabell 8.1 Fuktkapaciteten hos RF-givare mellan rumsklimat ($\phi \sim 40$ % RF) och $\phi \approx 97$ % RF (över mättad K_2SO_4 -lösning). Ett dygns konditionering. Vägning på analysvåg med noggrannheten ± 0.0005 g.

Givare/detalj	Fuktkapacitet W_g (97 % RF, 40 % RF) (g)
Vaisala RF-sensor	< 0,0005
Sintrat bronsfilter	0.0043
Hygrodynamics H3 RF-sensor	0.0151

Fuktkapaciteten hos tunnfilmgivaren är inte mätbar med tillgänglig analysvåg. Hos den framtagna RF-givaren är det därför bronsfiltret som har betydelse då det gäller fuktkapacitet. Dess fuktkapacitet är ungefär 4 mg vid mycket höga relativa fuktigheter men minskar naturligtvis kraftigt vid mätning vid relativa fuktigheter under 90 % RF.

Med förutsättningar enligt exemplet ovan och ett prov på 10 g, kan mätfelet p g a fuktkapacitet hos RF-givaren uppskattas till

$$\Delta RF < \frac{0.004 \cdot 10^{-3}}{0.1 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 0.004 = 0.4 \% \text{ RF}$$

Med en annan RF-givare kan detta fel lätt bli 1-2 % RF.

8.2 Mättid

De olika metoderna att mäta RF bygger på att jämvikt mellan fukt i prov eller material, fukt i luftvolymen och fukt i givaren skall inväntas innan slutvärdet erhålles. Detta tar naturligtvis en viss tid som är olika för olika metoder och varierar kraftigt med utförandet av mätningen. Sker den slutliga avläsningen för tidigt, fås ett fel som kan bli stort vid en slarvig mätning eller vid vissa typer av mätningar. Detta belyses nedan.

8.2.1 Mätning på uttaget prov

Vid RF-mätning i ett provrör på ett uttaget prov fås jämvikt inom ett dygn. Ett tillräckligt bra resultat kan emellertid erhållas på betydligt kortare tid.

Huvuddelen av de mätningar som utförts och utförs vid avdelningen för Byggnadsmateriallära vid LTH tillgår på följande sätt. Provet placeras i det provrör mätningen sedan skall ske i. Provröret förseglas med gummikork och placeras i klimatrum med stabil temperatur. Efter någon eller några dagar då mätningen skall ske, borttages gummikorken och RF-givaren placeras i röret och tätning sker så snabbt som möjligt. Beroende på hur snabbt detta görs, kan erforderlig mättid förkortas avsevärt. Hur mycket beror naturligtvis på vilken noggrannhet man eftersträvar.

Vid de mätningar som utförts vid avdelningen har mätresultatet alltid avlästs först dagen efter det att givaren placerats i provröret tillsammans med provet. Redan efter mycket kort tid fås emellertid ett värde som inte avviker alltför mycket från det slutliga. I figur 8.2 visas några exempel på tidsförloppet vid det ovan beskrivna mätförfarandet. I figur 8.3 återges dessa exempel som avvikelse från riktigt slutvärde.

Med det beskrivna mätförfarandet kan ett resultat erhållas, som bara är 1-4 % RF för lågt redan efter en halv timme, i vissa fall ännu kortare tid. Vid andra mätförfaranden blir erforderlig mättid som regel längre, t ex om mätningen sker direkt efter provtagning utan mellanliggande förvaring av provet i slutna behållare.

Det som ovan sagts om mättid gäller för betong. För andra material gäller andra mättider, som regel kortare,

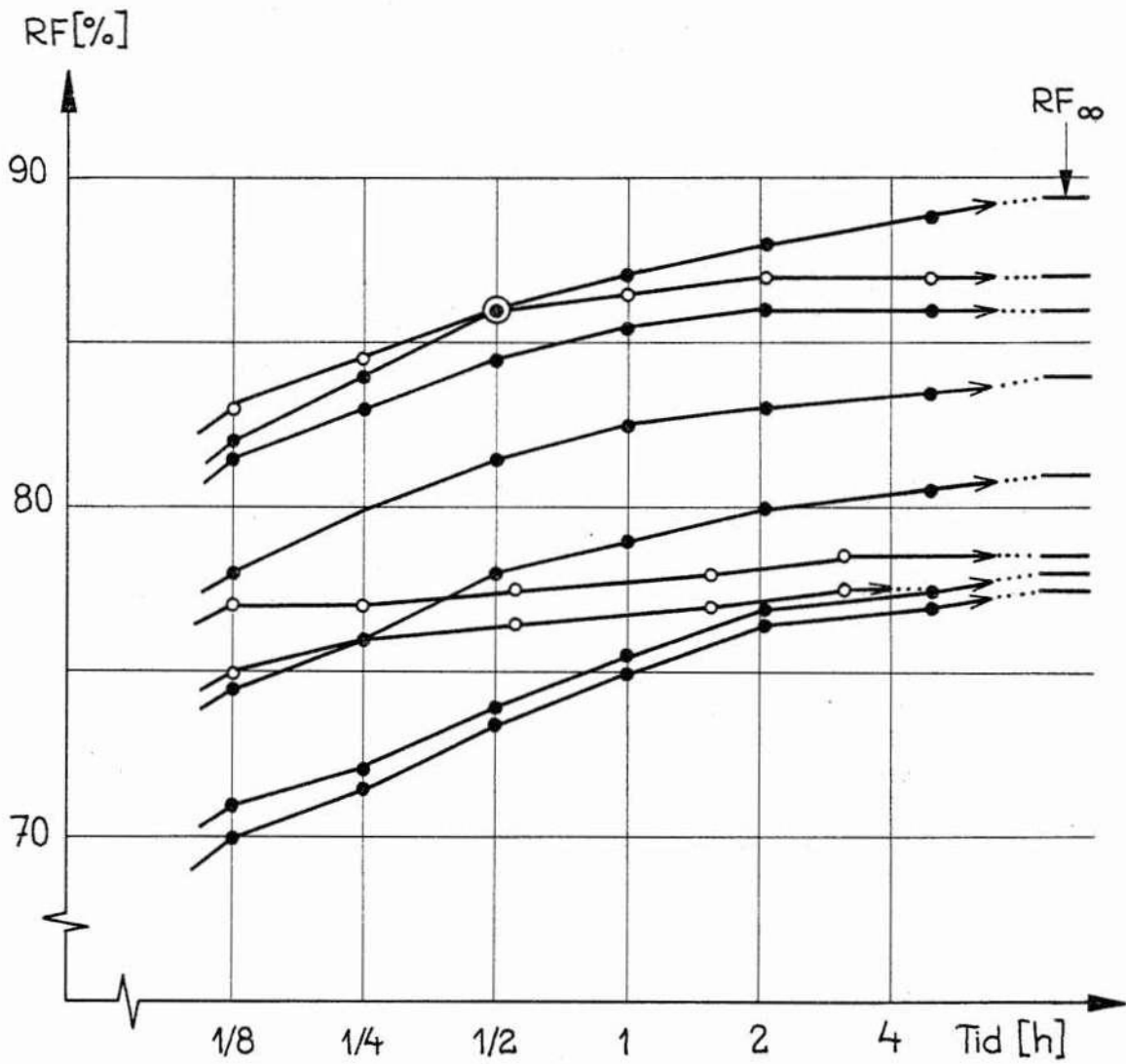


Fig 8.2 Exempel på tidsförloppet vid mätning på prov i provrör. Sex olika RF-givare och nio olika prover.

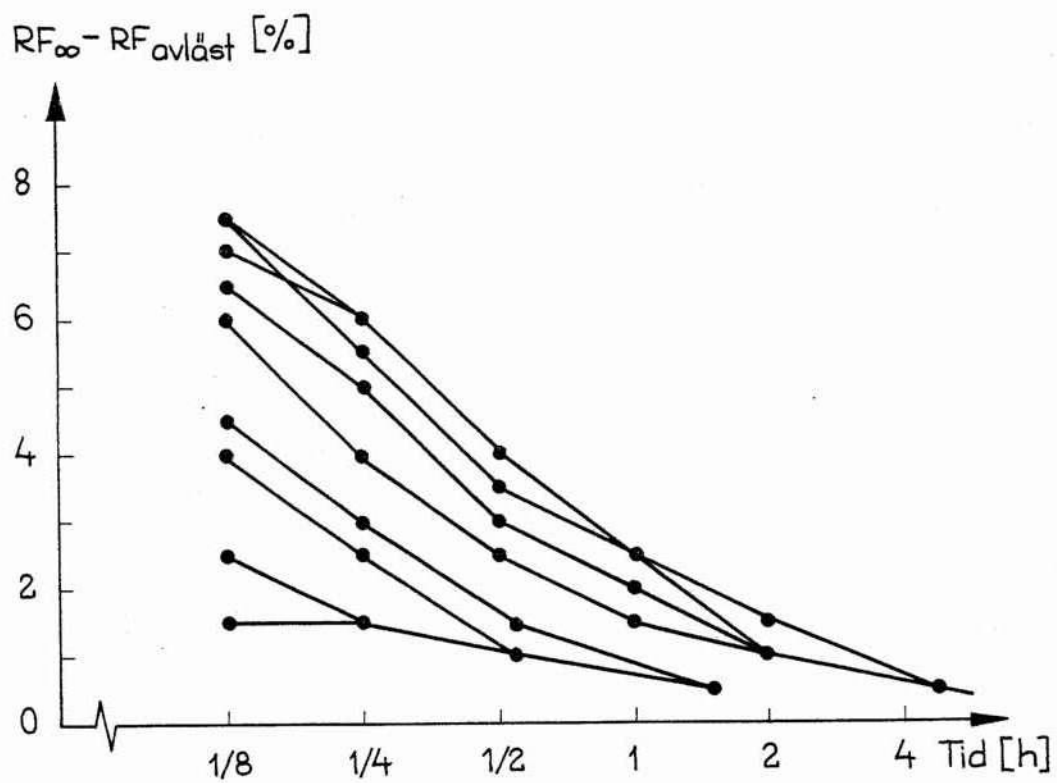


Fig 8.3 Exempel på avvikelse mellan slutvärde och avläst värde efter olika tid. Sex olika RF-givare och nio olika prover.

8.2.2 Mätning i ingjutningsgods

Vid mätning i ingjutet PVC-rör, jfr figur 6.2, är erforderlig mättid längre än vid mätning på uttagna prov. Den huvudsakliga orsaken till detta är att materialytan som lämnar fukt ifrån sig är mindre och även om den inneslutna luftvolymen också är något mindre, krävs något längre tid för att uppnå jämvikt.

Vid fältmätningarna, redovisade i rapportdel 3, har mättiden som regel varit fyra timmar. Detta har givit ett för lågt värde, upp till 5 % RF för lågt, ibland mer, men de stora felen har erhållits i de fall mätningen har skett i PVC-rör som mynnar i värmeisoleringsmaterial eller i makadam- eller gruslager. Vid mätning i betong har felet blivit maximalt 3 % RF vid mättiden fyra timmar. Med ett bättre mätförfarande bör detta fel kunna bli avsevärt mindre.

8.2.3 Mätning i borrhål

Vid mätning i provrör eller ingjutet plaströr riskeras ett för lågt värde om mätningen avslutas för tidigt. Relativa fuktigheten stiger hela tiden tills fuktjämvikt nåtts. Vid mätning i ett nyborrat borrhål blir förloppet ett helt annat. Det principiella tidsförloppet åskådliggörs i figur 8.4.

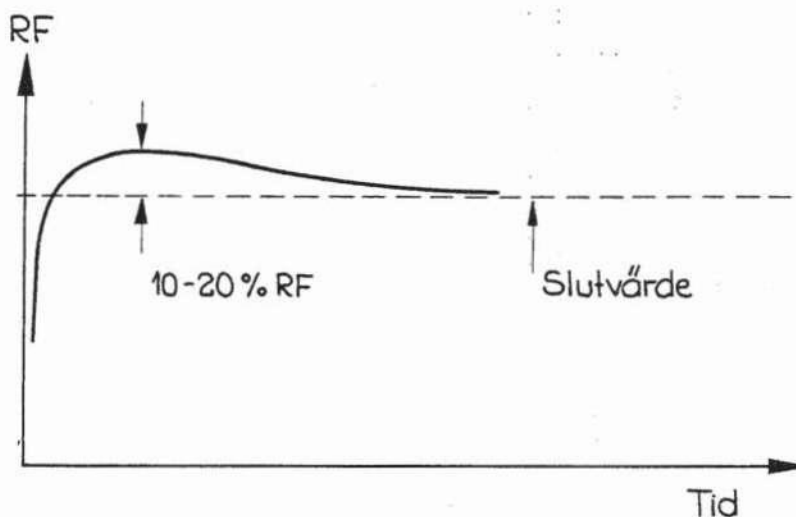


Fig 8.4 Principiellt tidsförlopp vid mätning i borrhål.

Direkt efter det att givaren placerats i hålet fås ett för högt värde. Maximala värdet fås efter en halv till en timme och kan vara upp till 20% RF för högt. Så småningom sjunker värdet mot ett jämviktsläge, vilket uppnås efter något dygn. Detta förlopp har också redovisats av Pihlajavaara (1974) som då förklarade effekten med karbonatisering av de nyskapade ytorna inuti hålet och en höjning av fukttillståndet i luften genom det vatten som avges från betongen vid karbonatiseringen. Pihlajavaara har senare förkastat denna teori.

Ett stort antal mätningar av typ "förförsök" har genomförts för att försöka klarlägga orsaken och eliminera effekten. Någon systematisk undersökning har inte gjorts och därmed har inte heller någon kvantifiering varit möjlig.

Det har dock visat sig att borrhjålet spelar en avgörande roll. Genom att omsorgsfullt suga bort detta med en dammsugare har effekten kunnat minskas radikalt och i en del fall eliminerats helt. Ibland har toppvärdet efter ca en halvtimme bara varit 0.5-1 % RF för högt och några gånger har två "toppvärden" erhållits, jfr fig 8.5.

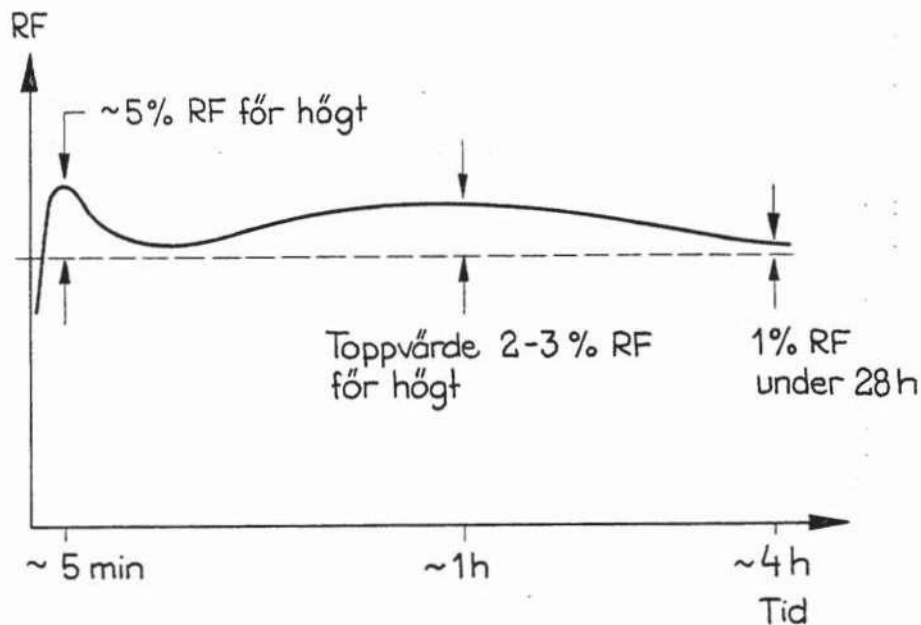


Fig 8.5 Exempel på tidsförlopp vid mätning i borrhål som omsorgsfullt dammsugits rent från borrhjöl.

I en del fältmätningar där metoden prövats, har "toppvärdet" uteblivit helt och förloppet har mer liknat det som fås vid mätning i ingjutna plaströr.

Bortsugningen av bormjölet kan ha effekt på flera sätt. Själva sugningen innebär tillförsel av stora mängder luft med en avkylning av det varma borrhålet som följd. Temperaturjämvikt uppnås därmed troligen snabbare. Bormjölet kan också fungera som en fuktabsorbent för den fukt som avges från betongen då denna uppvärms vid borrningen. Mjölet har stor yta och kan snabbt absorbera fukt och sedan avge det till RF-givaren. Ett eventuellt fuktöverskott kräver lång tid för att återgå till betongen, då vid en lägre temperatur och därmed lägre transporthastighet.

Till dessa möjliga förklaringar skall läggas två saker. Betongen har en högre relativ fuktighet vid en högre temperatur även om ingen fukt förflyttas, jfr avsnitt 8.3 nedan. Dessutom är det normalt så att RF-givaren har mycket lägre temperatur än borrhålet då den placeras där. En viss kondensrisk på givaren föreligger därför tills dess temperatur har anpassat sig till omgivande betongs.

8.3 Temperaturinverkan

Temperaturförhållandena vid RF-mätningar inverkar på olika sätt. Temperaturvariationer kan innebära att mätvärdet kommer att fluktuera omkring jämviktstillståndet med risk för att en enstaka avläsning kan medföra ett mindre fel. Detta blir normalt relativt litet om inte temperaturvariationerna är extremt stora.

Temperaturskillnader som har stor betydelse kan vara av två slag. Temperaturskillnad mellan material och sensor innebär att uppmätt RF kan vara behäftad med stora fel. Detta kan förekomma vid t ex mätning i uppvärmda golv eller om givarna avkylts t ex under transport till mätplatsen. Sådana temperaturskillnader måste antingen elimineras eller tas hänsyn till med en korrigeringsfaktor. Tillräcklig tid för anpassning till temperaturjämvikt eller användning av värmeisolering ovanpå givaren kan i en del fall vara tillfyllest. Är så inte fallet erfordras en kompletterande mätning

av temperaturen i den del av materialet som står i "fuktkontakt" med givaren. Genom mätning av RF och temperatur vid sensorn samt temperatur i materialet, kan dess RF beräknas under antagande om lika ångtryck, p:

$$RF_{mtrl} = \frac{p}{p_m(T_{mtrl})} = RF_{givare} \cdot \frac{p_m(T_{givare})}{p_m(T_{mtrl})} \quad (8.5)$$

Vid höga fuktigheter är inverkan av sådana temperaturskillnader mycket stor. En temperaturdifferens på 1°C kan betyda ett fel på 5 % RF.

Temperaturskillnad mellan mättillfälle och provtagningstillfälle kan vara nödvändig att beakta. Om mätningen på ett uttaget prov äger rum vid rumstemperatur men konstruktionen varur provet tagits har en annan temperatur, är RF i konstruktionen inte exakt densamma som uppmätts på provet. Förhållandet är detsamma om mätning sker i en ouppvärmad byggnad och denna sedan värms.

Inverkan av denna typ av temperaturskillnad har studerats genom laboriemätningar på prov ur serie C enligt avsnitt 5.2.1. RF har uppmätts på betongprov med provrörsmetoden vid olika temperaturer utan att prov, provrör och givare har skiljts åt förrän försöket avslutats. Mätningarna gjordes med rör och givare placerade i samma precisionsfuktkammare som använts vid kalibrering och som har en mycket god temperaturstabilitet. Resultatet av mätning på tre fuktprov med olika fukttinnehåll redovisas i tabell 8.2 och figur 8.6. För temperaturberoende hos givare har korrigerats.

Tabell 8.2 Relativ fuktighet vid olika temperaturer och konstant fukttinnehåll. Prov ur serie C enligt avsnitt 5.2.1.

Temperatur (°C)	Relativ fuktighet (%)		
	Prov 1	Prov 2	Prov 3
19.3	76.1	83.6	88.6
14.5	75.8	84.0	89.2
10.8	74.2	82.8	88.0
5.2	71.4	80.8	85.3
11.2	73.0	82.4	87.8
19.1	75.3	85.2	91.1
25.3	77.8	87.8	93.9
19.3	76.4	86.0	92.8

Inverkan av denna typ av temperaturskillnad är av storleksordningen 0.3-0.5 % RF/°C för den i försöken använda betongkvaliteten. För mera normal betong bör effekten vara mindre.

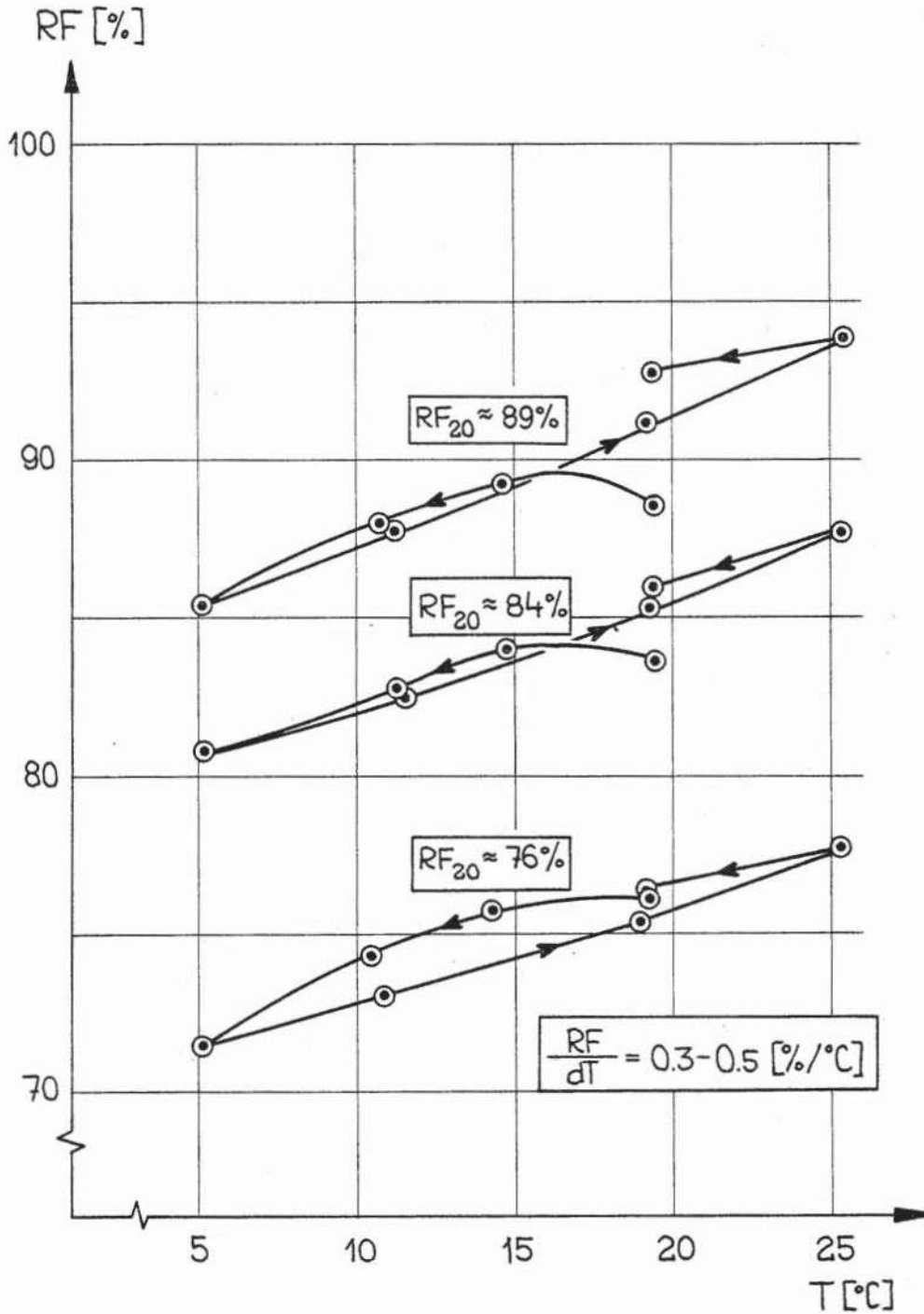


Fig 8.6 Förändring i uppmätt relativ fuktighet vid temperaturskillnad mellan provtagning och mätning. (Sorptionsisotermens temperaturberoende).

9 FÖRSLAG TILL MÄTMETODER FÖR PRAKTISK BRUK

Arbetet inom projektet har utmynnat i ett antal förslag till nya mätmetoder för fukt i betonggolv samt att den framtagna utrustningen finns tillgänglig på marknaden.

Ett förslag om nya mätmetoder har lämnats i samband med omarbetandet av Råd och anvisningar (RA) till Hus AMA. Detta förslag har införts i RA 78 samtidigt som den gamla mätmetoden i Hus AMA 72 kvarstår. Tanken är att erfarenheter under ett antal år av samtidig användning skall utgöra underlag för en eventuell ändring av nästa upplaga av Hus AMA.

Nedan redovisas ett antal förslag till metoder att mäta relativ fuktighet varav de två första "provrörsmetoden" och "borrhålsmetoden", är de som ingår i RA 78. För- och nackdelar med de olika metoderna diskuteras.

9.1 Mätning på uttaget prov ("provrörsmetoden")

Det enklaste, snabbaste och mest tillförlitliga sättet att mäta RF är att mäta på ett uttaget prov. Metoden får ses som det huvudsakliga alternativet då det gäller en ny mätmetod och är införd som sådan i RA 78 till Hus AMA.

9.1.1 Provtagning

Provbitar uthugges ur golvet från ett djup som är större än minsta mätdjup enligt tabellen nedan.

Golvkonstruktion	Minsta mätdjup (i % av plattjocklek)
Mellanbjälklag	20
Platta på mark, underliggande värmeisolering eller ångspärr	40

Provbitarna, som skall vara flisor och inte "mjöl", placeras i ett provrör eller dylikt som förseglas med gummikork. Provröret fylls till minst hälften med provbitar. Förfarandet visas principiellt i figur 9.1.

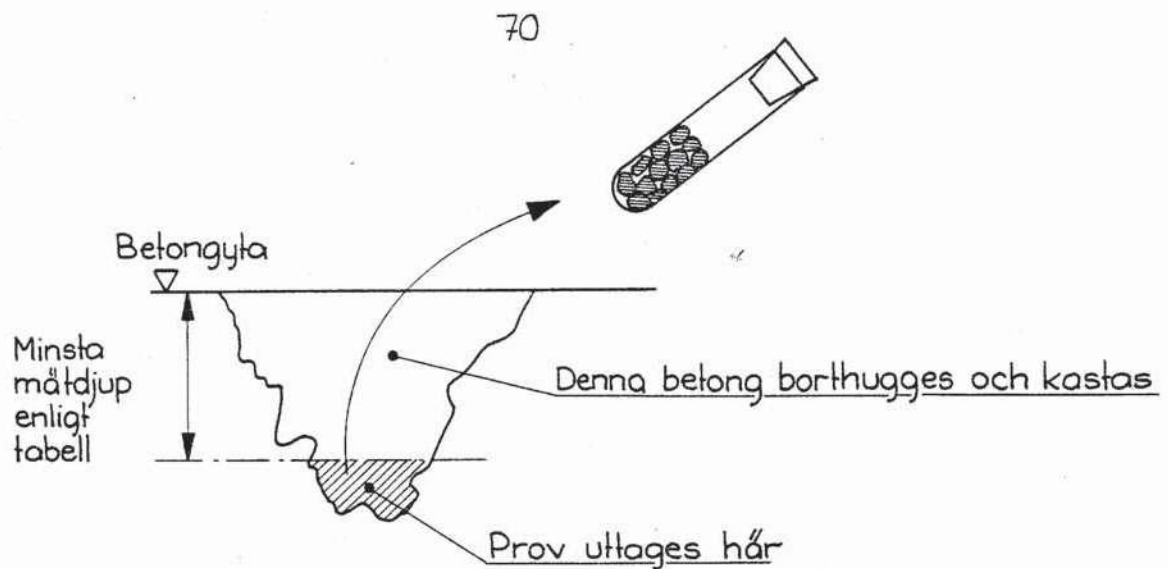


Fig 9.1 Principiellt provtagningsförfarande.

Provtagning på ett djup under lämpligt mätdjup, ger ett något för högt fuktillstånd men innebär en viss säkerhetsmarginal vid en slarvig provtagning.

9.1.2 Mätning

Mätningen utföres genom att en RF-mätare inneslutes i provröret tillsammans med provbitarna med noggrann försegling. Mätvärdet avläses följande dag eller då jämvikt uppnåtts. Med lämpligt förfarande kan erforderlig mättid nedbringas till ca en halv timme om ett 1-4 % RF för lågt mätresultat kan accepteras, jfr 8.2.1. Mätningen skall ske i en lokal med små temperaturvariationer.

Mätförfarandet åskådliggörs principiellt i figur 9.2.

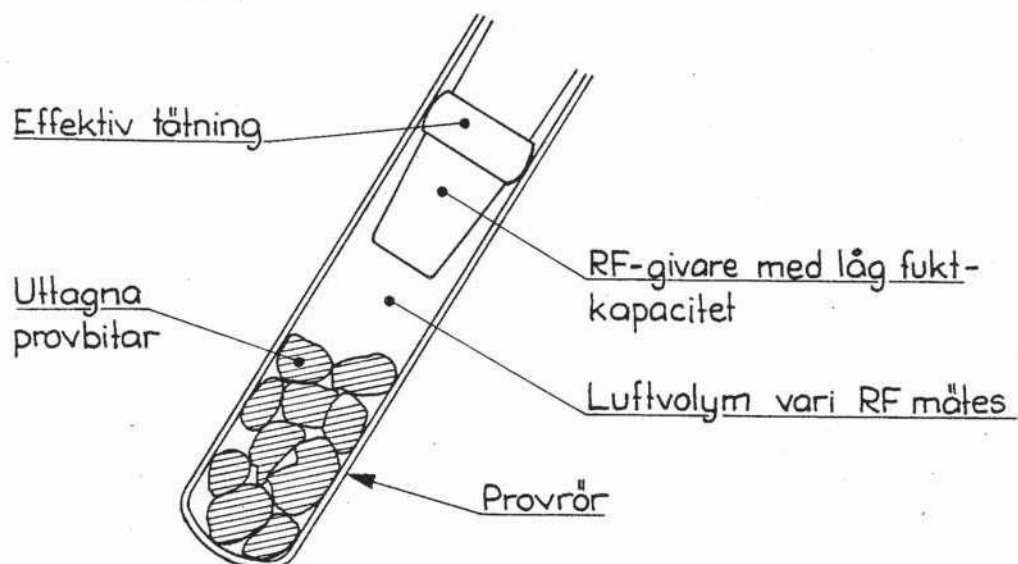


Fig 9.2 Principiellt mätförfarande.

Mätmetoden ställer vissa krav på mätutrustningen, jfr 8.1.
I övrigt avgörs noggrannheten huvudsakligen av kalibreringen.

9.1.3 Fördelar

- o Mätning på tillräckligt djup ger fuktbelastningen direkt, eventuellt med viss säkerhetsfaktor.
- o Provet hinner inte torka då "krossning till mjöl" ej erfordras.
- o Inget krav på att provet skall vara representativt för golvbetongen.
- o Mätning behöver inte göras på platsen och inte heller omedelbart.

9.1.4 Nackdelar

- o Provtagningen är nästan lika besvärlig som för karbidmetoden. Risk för slarv med mätdjup.
- o Erforderlig mättid ganska lång; som regel minst en halv timme. För lågt värde fås annars.
- o Utrustningen är relativt dyr och fordrar en viss omsorg och regelbunden kalibrering.

9.2 Mätning i borrhål

Mätning av RF i borrhål fordrar längre mättid för att ge ett noggrant resultat. Den svåra provtagningen elimineras dock, men speciell borrhålsutrustning erfordras.

Ett hål borrar i betongen till ett sådant djup att mätningen kan ske på minsta mätdjup enligt tabellen i avsnitt 9.1.1, jfr figur 9.3. Borrhålet suges omsorgsfullt rent från borrhålsmjöl. En RF-givare med tätningsmöjlighet nära änden placeras i borrhålet och tätning sker.

Hålet skall borrar så djupt att tätningen kan utföras på ett djup som motsvarar minsta mätdjup enligt ovan. Det verkliga mätdjupet blir därvid något större. Mätvärdet avläses följande dag eller tidigare om sämre noggrannhet kan accepteras, jfr 8.2.3.

Fördelarna med borrhålsmätning är att den svåra provtagningen elimineras och att mätvärdet som regel är för högt vilket gör att om mätningen avbrytes för tidigt fås ett resultat på "säkra sidan".

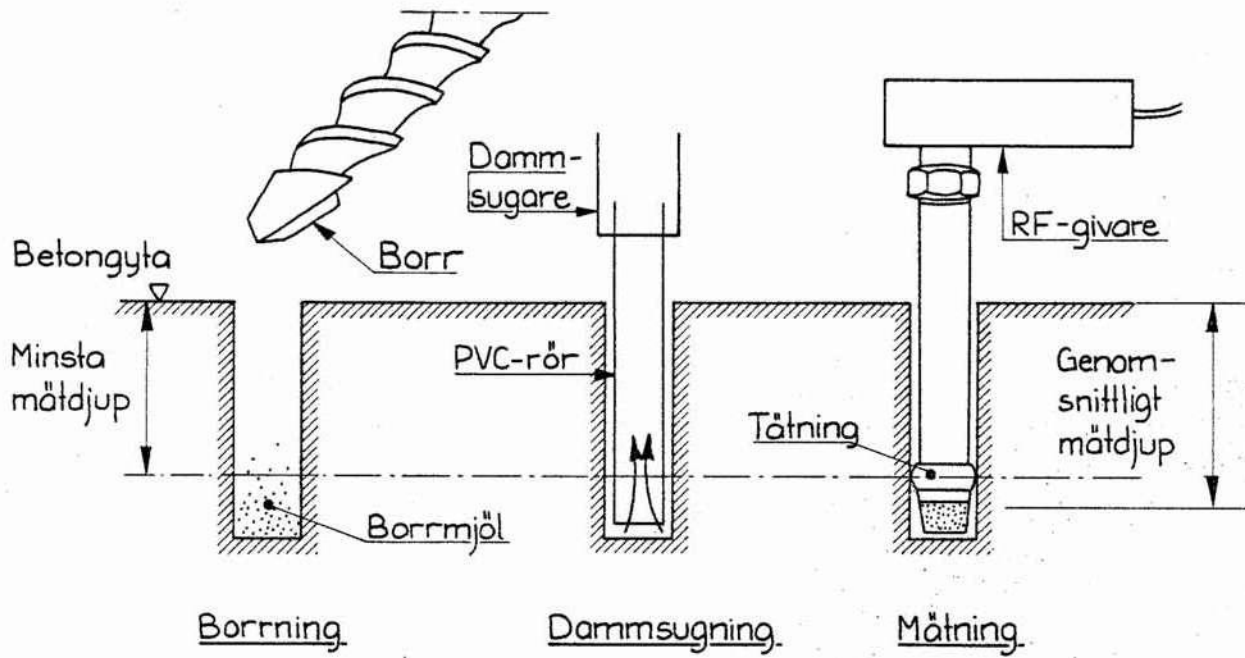


Fig 9.3 Principiellt förfarande vid mätning i borrhål.

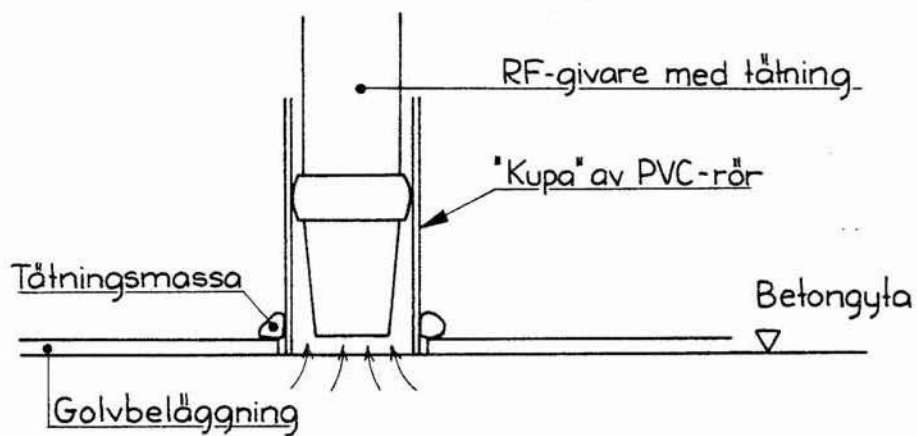


Fig 9.4 Enkel utformning av "kupmätning".

Nackdelarna är dels den långa tiden som krävs för att få fukt- och temperaturjämvikt och dels att slagbormaskin och dammsugare erfordras.

9.3 Speciella mätningar

Relativa fuktigheten kan mätas på ett par bra sätt som är lämpliga i vissa situationer.

"Kupmätning", enligt 3.4.2.1, har sin bästa tillämpning vid mätning i samband med skadefall med täta golvbeläggningar. Fukten i golvet har då redan omfördelats och mätning av fukttillståndet i betongen kan göras på ett "icke-förstörande" sätt genom att skära bort en liten bit av golvbeläggningen, skrapa bort eventuell fuktspärr och placera en "kupa" på betongytan samt täta omsorgsfullt mellan kupa och golvbeläggning. Exempel på enkel "kupa" visas i figur 9.4.

Kupmätning kan också göras på ett golv som torkat men ytan måste då förseglas med t ex en polyetenfolie för att kvarvarande fukt skall omfördelas. För detta krävs som regel 2-4 veckor. Själva användningstiden för "kupa" och mätutrustning behöver emellertid bara vara ett dygn eller mindre.

Mätning i ingjutningsgods, dvs ingjutna plaströr, har använts vid fältmätningarna, vilka beskrives i rapportdel 3. Detta sätt att mäta är fördelaktigt om upprepade mätningar i samma punkter skall göras. Ingjutningsarbetet är svårt, men vid varje mätfälle fås en betydande förenkling jämfört med borrhålsmätning eller provtagning. Förfarandet åskådliggörs delvis i fig 6.2 och utförligt i rapportdel 3.

10 REFERENSER

- Adamson, B, Ahlgren, L, Bergström, S-G & Nevander, L-E, 1970:
Byggnadstekniska fuktproblem. (Statens råd för byggnadsforskning),
Stockholm. Programskrift 12.
- Adamson, B & Gaffner, D, 1977:
Experimentell fuktforskning. (LTH, inst f byggnadskonstruktionslära),
Lund. Rapport BKL 1977:2.
- Ahlgren, L, 1972;
Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial. (LTH, inst f byggnadsteknik),
Lund. Rapport 36.
- Bhargava, J & Lundberg, K, 1972:
Determination of moisture content of concrete by microwave-resonance
method. Matériaux et constructions, Vol 5, no 27, pp 165-168.
- Gustavsson, B, 1973;
Uttorkning av betongplatta på mark. (BPA-Sv Riksbyggen) Byggték-
nisk information.
- Monfore, G E, 1963;
A small probe-type gage for measuring relative humidity.
Journal of the PCA Research and Development Lab, May 1963, pp 41-47.
- Monteith, J L & Owen, P C, 1958;
A thermocouple method for measuring relative humidity in the range
95-100 %. Journal of Science Instrument, Vol 35, Dec 1958,
pp 443-446.
- Nielsen, A F, 1972;
Gamma-Ray-Attenuation used for measuring the moisture content and
homogeneity of porous concrete. Building Science, Vol 7, pp 257-263.
- Nilsson, L-O & Sandin, K, 1976;
Mätning av fukt. (LTH, avd byggnadsmateriallära), Lund. Intern rapport.
- Nilsson, L-O, 1977;
Fuktproblem vid betonggolv. (LTH, avd byggnadsmateriallära), Lund.
Rapport TVBM-3002.

Nilsson, L-O, Essbjörn, S & Enequist, R, 1977;
Enkäter om fuktskador och fuktmätning vid betonggolv i småhus.
Golv till Tak 4-5/77 pp 20-26.

Nilsson, L-O, Englund, H, Ericson, U & Rising, C, 1979;
Byggfukt i betongplatta på mark, del 3:Skadeinventering & fält-
mätningar. (LTH, avd byggnadsmateriallära), Lund. Rapport TVBM-3009.

Pihlajavaara, S E. 1974;
Effect of carbonation on the measurement of humidity in concrete.
(CIB/RILEM symp 1974), Rotterdam. Paper 5.1.7.

Rocha, M, Nascimento, V & De Castro, E, 1958;
Determination of moisture content in porous materials by means of
the relative humidity inside a cavity. (Lab Nac fr Engenh Civ),
Lissabon. Techn pap No 116.

