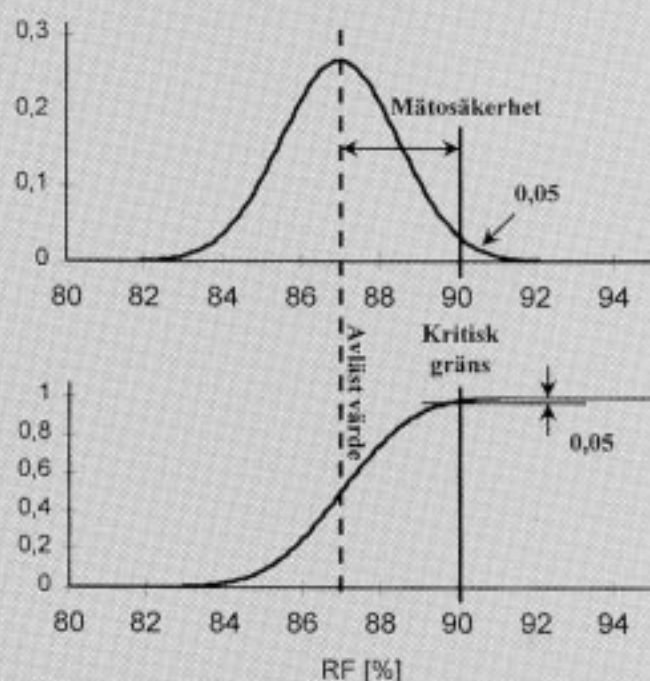




CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

INSTITUTIONEN FÖR BYGGNADSMATERIAL

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, DEPARTMENT OF BUILDING MATERIALS, GÖTEBORG SWEDEN



P-98:1

**MÄTOSÄKERHET VID FUKTMÄTNING I
BETONG MED KAPACITIVA FUKTGIVARE**
- en bedömning av faktorer som påverkar
osäkerheten samt hur de kan minskas

Anders Sjöberg

Chalmers tekniska högskola
Institutionen för byggnadsmaterial

Publikation P-98:1
Arb nr 594

**MÄTOSÄKERHET VID FUKTMÄTNING I BETONG MED
KAPACITIVA FUKTGIVARE**
- en bedömning av faktorer som påverkar osäkerheten
samt hur de kan minskas

av

Anders Sjöberg

Göteborg i September 1998

Nyckelord

Betong
Fuktgivare
Fuktmätning
Fukt i betong
Kalibrering
Mätfel
Mätosäkerhet
Relativ fuktighet
RH
RF
RF-mäning

Publikation P-98:1
ISSN 1104-893X
Institutionen för Byggnadsmaterial
Chalmers Tekniska Högskola
S-412 96 GÖTEBORG
Tel: 031-7721000, telefax 7722296, telex 2369 Chalbib S

Nyckelord	1
Sammanfattning	3
Inledning	4
Användningsområde	4
Mätutrustning	5
Handhavande	6
Definitioner	7
Fördelningsfunktioner	14
Bedömningsgrunder	18
Mätosäkerhet och avvikelse.....	19
a) Icke-linearitet hos RF-instrument	24
b) Drift hos RF-prob.....	25
c) Hysterés hos RF-prob	27
d) Temperaturavvikelse under kalibrering	28
e) Slumpmässiga faktorer hos saltlösningar	29
f) Temperaturvariationer under kalibrering	30
g) Övriga faktorer vid kalibrering	32
h) Total mätosäkerhet för kalibrering i tvåtrycks fuktgenerator.....	33
i) Fuktmätning vid annan temperatur än vid kalibrering	34
j) Fuktmätning vid annan temperatur än i bruksskedet	35
k) Förvaring av RF-prob i torr miljö	37
l) Fuktkapacitet hos RF-prob vid mätning på uttagna prover	38
m) Fuktkapacitet hos RF-prob vid mätning i borrhål.....	40
n) Temperaturskillnad mellan sensor och betong	41
o) Nyligen borrade mäthål	42
p) Avvikande alkalitet	44
q) Temperaturvariation under mätning.....	45
r) Ojämnt uttagna prover	46
s) Kondens i provrör vid transport av uttagna prover	48
t) Avvikelser i mäthållets djup	49
u) Felaktig plattjocklek.....	50
Vanligt värde på total osäkerhet i RF-mätningar	51
Några möjliga förbättringar	56
Konklusion.....	59

Sammanfattning

Rapporten är avsedd att vara en hjälp att möta de höga krav som ställs på RF-mätning i Hus AMA 98. Rapporten går igenom 21 faktorer som bidrar till den totala osäkerheten vid mätning av relativ fuktighet i byggnadsdelar.

Hus AMA 98 anger att fuktmätningens totala osäkerhet inte får överstiga $\pm 2\%RF$ vid mätning på uttaget prov och $\pm 3\%RF$ vid mätning i borrhål. Det skall även redovisas hur detta bestämts. I rapportens inledande delar förklaras hur man ska uppskatta den totala osäkerhet i mätningen utifrån ett antal faktorer som har sin uppkomst i mätinstrument, kalibrering, handhavande under mätning samt utvärdering av mätvärden.

De 21 förekommande faktorerna behandlas var för sig i rapporten och ett vanligt värde tas fram för varje faktor. Osäkerheten för en enskild faktor varierar mellan $0\%RF$ och ca $2\%RF$. Störst är inverkan av temperaturvariationer under kalibrering och inverkan av fuktkapaciteten hos RF-prob vid mätning i borrhål.

Genom att summera de slumpmässiga faktorerna och ta hänsyn till de systematiska faktorerna på ett förenklat sätt kan den totala mätosäkerheten eller egentligen ”kombinerad standardiserad mätosäkerhet” bestämmas vid olika kalibrerings- och mätförfarande. Till exempel är totala mätosäkerheten ungefär $6,5\%RF$ när man mäter i borrhål och har kalibrerat mot ”saltlösningar”. Genom att mäta RF på uttagna betongbitar i provrör och kalibrera i en så kallad ”tvåtrycksapparat” minskas totala osäkerheten till $4,2\%RF$. Dessa osäkerheter gäller för ett 95% konfidensintervall (sannolikhetsintervall).

Eftersom det inte är rimligt att ha en säkerhetsmarginal på storleksordningen 4-6%RF för att kompensera mätosäkerheten diskuteras i rapporten hur man kan enkelt minska mätosäkerheten. Till exempel minskar man temperaturvariationer under kalibrering mot ”saltlösningar” genom att placera behållaren (provröret) i ett temperaturtrögt material såsom till exempel ett betongblock.

Rapporten behandlar också översiktligt hur upprepade mätningar kan minska den totala mätosäkerheten. Den tar också upp hur ett mätvärde skall presenteras. Exempel på ett korrekt angivet mätvärde är $90,0 \pm 6,5 \%RF$, $TF = 2$.

Inledning

Rapporten kan vara en hjälp att möta de höga krav som ställs i Hus AMA 98 på mätning av relativ fuktighet i byggnadsdelar.

Enligt Hus AMA 98 krävs att man kan visa att fuktmätningens totala osäkerhet inte överstiger $\pm 2\%RF$ vid mätning på uttaget prov och $\pm 3\%RF$ vid mätning i borrhål. Osäkerheten skall innehålla både osäkerheter från kalibrering, mätinstrument och handhavande, kombinerat till ett värde.

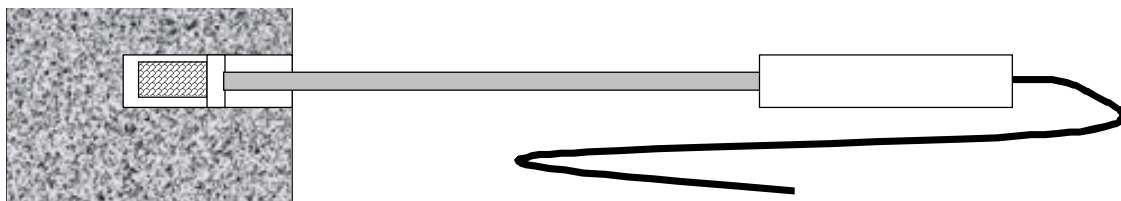
RF-mätningar för andra syften än vid nyproduktion behöver inte alltid ha så höga krav som de som ställs i Hus AMA 98. Det är upp till beställaren av mätningen att ställa kraven. Det viktiga är att rätt krav ställs och att den som utför mätningen redovisar hur han har gjort och hur kraven uppfylls så beställaren inte tror att mätvärdet är pålitligare än vad det egentligen är.

Till grund för studien ligger en rapport av Göran Hedenblad; "Fuktsäkerhet i byggnader. Uttorkning av byggfukt i betong – Torktider och fuktmätning" samt "Mätvärdesbehandling och rapportering av mätresultat" av Jan Lindskog. Diskussioner om innehåll och angreppssätt har förts med Professor Lars-Olof Nilsson på Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola, Göteborg. Europastandard EAL (1997) för beaktning och formulering av osäkerheter används i rapporten.

För att bestämma storleken på de faktorer som ingår i mätosäkerheten har kalibreringsvärden mätta vid Institutionen för byggnadsmaterial (CTH) samt egna mätningar utvärderats.

Användningsområde

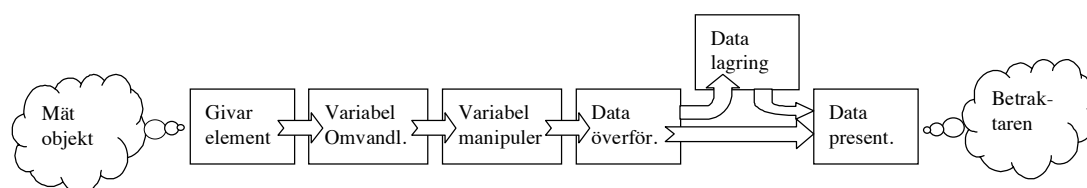
Mätmetoden som behandlas i rapporten används för att mäta fukt- och temperaturtillstånd i porösa material. Mätningen syftar till att bestämma tillståndet hos luften i materialets porer med hjälp av en RF-prob, figur 1. Utrustningen kan även användas till att mäta RF och temperatur i exempelvis rumsluft eller uteluft.



Figur 1. Principiellt utseende på en prob för mätning av relativ fuktighet (RF) och temperatur

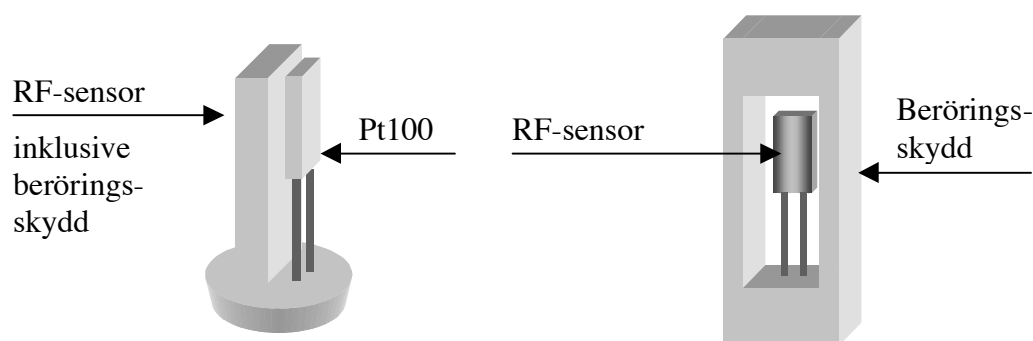
Mätutrustning

Mätutrustning för iakttagelse av en fysikalisk storhet innehåller generellt sett samma ”steg” oberoende av vad det är som skall mätas. De ingående stegen visas i figur 2 och exemplifieras nedan utgående från mätutrustningen som används för RF-mätningar vid Institutionen för byggnadsmaterial på Chalmers.



Figur 2. Principbild av ingående steg i ett mätinstrument.

Givarelementet är en aktiv givare och utgörs av en prob (HMP36) som tillverkas av Vaisala OY i Finland. Proben innehåller en Pt100 sensor för temperaturmätning samt en kapacitiv fuktsensor för RF-mätningar, figur 3. Fuktsensorn utgörs av en tunn polymerskiva som är elektriskt spänningsatt. Vid förändring i luftens fuktighet förändras polymerens elektriska egenskaper.



Figur 3. Principbild av mätsensorerna i toppen av mätproben. Pt 100 sensor och RF-sensor inklusive berörings-skydd.

Dataöverföring mellan sensor och variabelomvandlare sker via kabel som är fast monterad i RF-proben.

Variabelomvandling, variabelmanipulation och data-presentation sker med hjälp av handinstrument HMI 31.

Det går dock inte att lagra mätdata med RF-prob HMP 36 och handinstrument HMI 31.

I de fall relativ fuktighet och temperatur har loggats över en längre tidsperiod för att till exempel fastställa faktorer av temperaturvariationer har RF-prob HMP44 från Vaisala OY använts samt datasamlingslogger Mitec AT40.

Handhavande

Mätutrustning för RF-mätningar är precisionsinstrument som skall handhas av utbildade mättekniker. Varje RF-prob är en "indivud" med sina egenheter och personlig kalibreringskurva. Om man exempelvis utsätter en prob för ett extremt torrt eller fuktigt klimat kommer den troligtvis behöva någon vecka i normalt klimat för att visa riktiga värden igen.

Mätning av fuktighet i porösa material är, som vid alla typer av mätningar, ett hantverk som måste utföras på ett korrekt sätt. Hedenblad (1995) beskriver hur mätningar skall gå till. Om man låter en annan person göra om en mätning med samma utrustning är det inte säkert att mätvärdet blir det samma. Skillnaden beror på att två personer inte gör på exakt samma sätt. Mätningar har visat att det kan variera flera %-enheter beroende på att två mättekniker utför mätningen lite olika, utan att någon av dem för den skull gör fel. Det är på grund av att flera små faktorer i utförandet adderas till varandra som denna skillnad kan uppstå.

Instrumenten skall vara pålitliga och väl kalibrerade för att en så liten osäkerhet i mätningarna som möjligt. Mätperiodens längd måste också anpassas så att mätsensorn kommer i jämvikt med materialet. Hus AMA anger att mätningen får ske tidigast 3 dagar efter provtagning/borring. Samt att mätvärdet får läsas av tidigast efter 12 timmar i normal husbyggnadsbetong och tidigast efter 48 timmar i byggfuktfri betong.

Beroende på hur man hanterar sin utrustning och utför kalibrering och mätning kommer mätvärde att vara behäftat med en viss osäkerhet. Två mättekniker som har samma typ av utrustning kan bedöma osäkerheten på sina mätvärden på olika sätt. Det kan till exempel bero på att de har olika långt intervall mellan kalibreringar och utför dem på olika sätt. En mätning blir aldrig noggrannare än den kalibrering som gjorts på instrumentet. Andra orsaker till skillnader i osäkerhet kan vara hur stora provbitar de lägger i provröret eller vilken precision de har på borrhålets djup.

Definitioner

Det finns flera olika sätt att definiera osäkerhet i en mätning. Med mätosäkerhet menas i denna rapport den ”oskärpa” ett mätvärde har. Denna oskärpa kan endast uppskattas till storlek men inte elimineras genom någon korrektion. Osäkerheten kan alltid bestämmas med viss grad av sannolikhet. Däremot är mätvärdets fel, det vill säga avvikelsen från det ”sanna” värdet alltid okänt och omöjligt att beräkna. Följande redovisning bygger på Lindskog (1994).

Bestämning av mätosäkerhet

Bestämning av mätosäkerheten kan göras på två principiellt olika sätt:

Typ A bestämning av mätosäkerheter avser framtagning av mätosäkerhet genom statistisk utvärdering av de egna mätvärdenas variation.

Typ B bestämning av mätosäkerheter omfattar alla andra sätt att bestämma mätosäkerheten. Till exempel:

- Mätosäkerheter för mätvärde vilka härstammar från andra mätningar, så kallade ”importerade” mätvärden. Det kan vara värden tagna ur handböcker, kalibreringsprotokoll eller andra publikationer.
- Egna uppskattningar av mätosäkerheter.

Det är viktigt att inse att denna klassificering gäller sättet att bestämma mätosäkerheter. Mätosäkerheterna som sådana har inte olika karaktär.

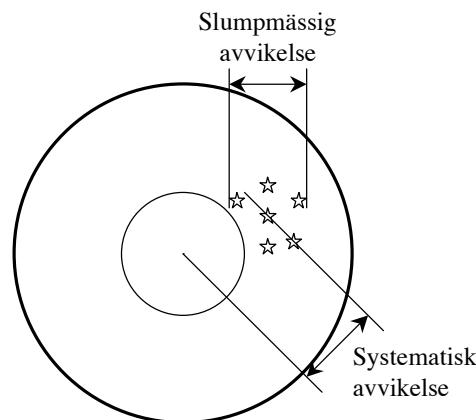
Systematiska och slumpmässiga avvikelser

Lindskog (1994) skiljer på fel och avvikelser. Med fel menar han deviationen från ett ”sant” värde. Det sanna värdet är ett idealt begrepp och naturligtvis okänt för oss. (Annars hade man inte behövt genomföra mätningen!) Om man på något sätt kan skaffa sig en uppfattning om felets storlek bör man naturligtvis korrigera för detta. Felet består oftast av flera olika ”delfel” som samverkar eller motverkar varandra. I fortsättningen kommer dessa delfel att kallas för ”avvikelser”. Det enklaste sättet att uppskatta felets storlek är att först avgöra vilka faktorer som ger dessa avvikelser. Sedan uppskattas storleken på dem och slutligen summeras de till ett värde som gäller för hela felet. När man korrigerar för felet genom att använda summan av avvikelserna vet man i allmänhet inte deras exakta värde. Korrektionen blir då i allmänhet behäftad med en osäkerhet man också måste beakta.

Systematiska och slumpmässiga avvikelser (faktorer) kan beskrivas med hjälp av träffbilden på en måltavla, figur 4.

Slumpmässig avvikelse (spridning, precision) motsvarar spridningen i träffbilden. Denna typ av avvikelse uppstår om man till exempel försöker bestämma kokpunkten hos vatten (på samma plats) en gång om dagen utan att veta att man måste ta hänsyn till faktorer som exempelvis lufttryckets variation.

Systematisk avvikelse (accuracy, bias) är skillnaden mellan måltavlans mittpunkt och mitten av träffbilden. Denna typ av avvikelser uppstår om man till exempel använder en tumstock som är 100,5 cm lång istället för 1 meter. I detta fall har man en systematisk avvikelse som gör att mätetalet blir mindre än om man använt en korrekt tumstock.



Figur 4. Systematisk och slumpmässig avvikelse illustrerade som träffbild på en måltavla

De slumpmässiga avvikelserna kan man uppskatta storleken på och därmed avgöra osäkerheten i mätningen.

De systematiska avvikelserna bör man uppskatta både storlek och tecken på och korrigera för. Korrektionen har en osäkerhet i sig som man måste addera till den slumpmässiga avvikelserna om man väljer att korrigera för den.

I denna rapport kommer dock avvikelser som uppstår på grund av systematiska faktorerna att behandlas på ett förenklat sätt vilket beskrivs i kapitlet "systematiska avvikelser".

Repeterbarhet och reproducerbarhet

Repeterbarhet är ett mått på mätetalens variation då en ny mätning utförs med samma "insignal", det vill säga ingenting har förändrats. Mätningarna sker därmed inom en kort tidsperiod med samma mätmetod, mätinstrument och mättekniker.

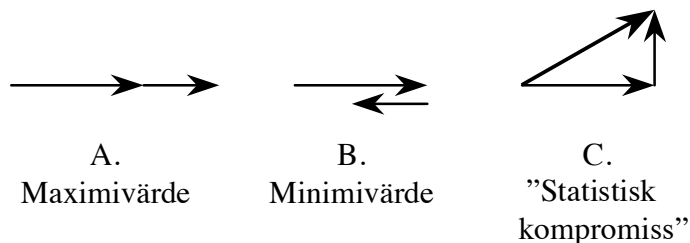
Reproducerbarheten är däremot ett mått på mätetalens variation då en ny mätning görs med ändrade förutsättningar. Det kan vara frågan om att ett annat mätinstrument används eller att en annan mättekniker utför mätningen.

Standardiserad mätosäkerhet (S)

Standardiserad mätosäkerhet representerar den avvikelsen som inte överskrider i 68,27 % av fallen vid dubbelsidigt konfidensintervall. Vid standardiserad mätosäkerhet (en standardavvikelse) är täckningsfaktorn lika med ett, se figur 6.

Kombinerad standardiserad mätosäkerhet (S_{tot})

Ett mätetal är behäftat med många olika mätosäkerheter som samverkar. Om man antar att mätosäkerheterna är normalfördelade är sannolikheten att alla faktorerna samverkar fullt ut ganska liten. Sannolikheten att alla faktorerna ska ta ut varandra, alltså helt motverka varandra är också väldigt liten. En lämplig "statistisk kompromiss" är enligt Lindskog (1994) att summera faktorerna enligt C i figur 5.



Figur 5. Figuren illustrerar tre möjligheter att kombinera mätosäkerheter. A och B ger för höga eller för låga värden medan C verkar innebära en lämplig kompromiss.

Den kombinerad standardiserad mätosäkerhet ("statistiska kompromissen") kan beskrivas som:

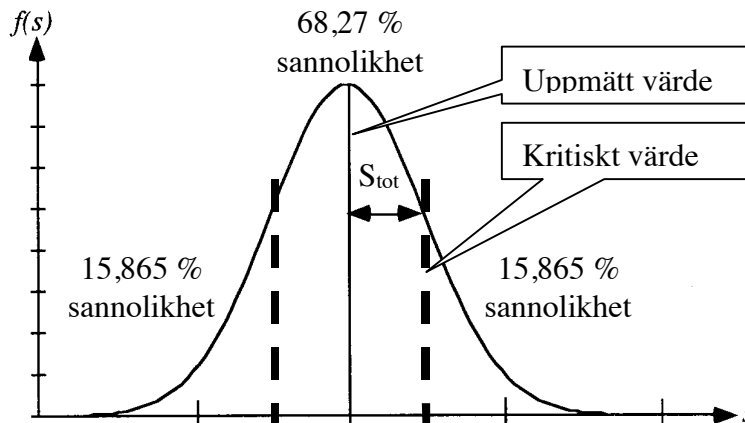
$$S_{\text{tot}} = \sqrt{S_a^2 + S_b^2 + S_c^2 + \dots + S_s^2 + S_t^2 + S_u^2}$$

där:

S_{tot} = kombinerad standardiserad mätosäkerhet
 $S_a \dots S_u$ = är standardiserad mätosäkerhet från källorna a till u enligt nästa kapitel

Utvidgad mätosäkerhet (U)

Vid användning av kombinerad standardiserad mätosäkerhet är det 68,27 % sannolikhet att det sanna värdet ligger innanför mätetalet $\pm$ kombinerad standardiserad mätosäkerhet (S_{tot}), se figur 6.



Figur 6. Sannolikhetsfördelning vid enkelt respektive dubbelsidigt konfidensintervall vid standardiserad mätosäkerhet.

När det gäller RF-mätningar enligt Hus AMA 98 anges kraven i form av ett högsta tillåtet värde. Det är ett enkelsidigt krav och mätvärdet får därmed vara hur lågt som helst. Antag att man mäter och får värdet som ligger i centrum av fördelningen i figur 6 och att marginalen till det kritiska värdet är precis lika stor som den kombinerade standardiserade mätosäkerheten. I det fallet är det cirka 15,9% sannolikhet att felet i mätningen är så stort att fuktnivån ligger över det kritiska värdet. Följaktligen är det drygt 84% (68,27 + 15,865) sannolikhet att fuktigheten är lägre än det kritiska värdet. Ett annat sätt att uttolka detta är att säga att konfidensintervallet är 84%.

Den utvidgade mätosäkerheten skrivs med index som anger tillhörande konfidensintervall. Exempelvis betecknas utvidgad mätosäkerhet med 84% konfidensintervall med U_{84} . Väljer man ett enkelsidigt 95% konfidensintervall vid RF-mätning är det endast 5 % sannolikhet att det sanna värdet ligger ovanför mätetalet + utvidgad mätosäkerhet (U_{95}).

Observera att alla slumpmässiga faktorer som antas vara normalfördelade alltid har dubbelsidigt konfidensintervall.

Den utvidgade mätosäkerhet (U) för olika konfidensintervall beräknas enligt:

$$U = TF \cdot S_{\text{tot}}$$

där:

U = utvidgad mätosäkerhet

TF = täckningsfaktor enligt tabell 1

S_{tot} = kombinerad standardiserad mätosäkerhet

Till exempel är den utvidgade mätosäkerheten för ett enkelsidigt konfidensintervall som med 95% säkerhet omfattar det ”sanna” värdet lika med:

$$U_{95} = 1,645 \cdot S_{\text{tot}}$$

Tabell 1. Täckningsfaktor och motsvarande konfidensintervall.

Täckningsfaktor (TF)	Konfidensnivå (%)	
	Dubbelsidigt	Enkelsidigt
0,676	50	75
1	68,27	84,14
1,645	90	95
1,960	95	97,5
2	95,45	97,73
2,576	99	99,5
3	99,73	99,87

Ofta är det nödvändigt att korrigera osäkerheterna då olika täckningsfaktorer anges. Exempelvis kan instrumentprestanda anges med täckningsfaktor 2. Det är dock vanligt att uppgiften om täckningsfaktorns storlek inte tagits med i produktbladet. I de fall då det inte går att få fram täckningsgraden för en mätosäkerhet får man använda sunt förnuft och göra en uppskattning.

Kalibreringsprotokoll brukar ange värden baserade på dubbelsidigt konfidensintervall och täckningsfaktor 3. Det innebär att med 99,73% sannolikheten är instrumentet så ”bra” som det står i protokollet.

Normalfördelning kan inte alltid användas. Exempelvis är de mätinstrument som passerat en kontroll troligtvis inte normalfördelade. De instrument som låg utanför de angivna gränserna har plockats bort, det kan beskrivas som att man ”klippt bort svansarna” på den ursprungliga normalfördelningen. Lindskog (1994) föreslår att man i dessa fall använder en rektangelformad sannolikhetsfördelning (figur 8).

Systematiska avvikelser ($S^{\#}$)

Avvikelsen på grund av systematiska faktorer korrigeras med korrektionsfaktorer som bestäms på lämpligt sätt. Korrektionsfaktorernas osäkerhet skall också bestäms och standardiseras. Dessa osäkerheter summeras med övriga slumpmässiga faktorer och tillsammans utgör de den totala mätosäkerheten.

Korrektionen kan statistiskt sett behandlas på flera sätt. Beroende på hur "säkert" värdet måste vara och vilken kunskap man har om de systematiska faktorerna är det lämpligt att göra på olika sätt.

De systematiska faktorerna markeras i rapporten med index #, till exempel ($S_m^{\#}$).

1. Det mest pessimistiska (säkra) sättet att behandla systematiska faktorer är att alltid lägga till deras absolutbelopp till det avlästa värdet och den utvidgade mätosäkerheten. Uppskattningen av det "sanna" RF-värdet med ett 95% konfidensintervall skulle då bli:

$$RF_S = RF_A \pm U_{95} + |S_a^{\#}| + |S_b^{\#}| + |S_d^{\#}| + \dots$$

där:

RF_S = Bästa bedömningen av RF

RF_A = Avläst RF-värde

U_{95} = Utvidgad mätosäkerhet med 95% konfidensintervall

$|S_a^{\#}|$ = Absoluta beloppet på avvikelsen i uppmätt RF som orsakas av den systematiska faktorn $S_a^{\#}$

Fördelen med detta sätt är att ingen kan frågasätta om de systematiska avvikelserna har "rätt tecken". Man har med andra ord ett starkt argument för att ligga på säkra sidan om det sanna värdet om det är ett ensidigt krav man ska uppfylla.

Det här metoden används av statistiker då de har en tung bevisbörda, till exempel då utvärderingen skall användas vid en rättsprocess.

2. Ett mer naturligt sätt att behandla systematiska faktorer är att lägga till dem (med tecken) till det avlästa värdet och den utvidgade mätosäkerheten. Uppskattningen av det "sanna" RF-värdet med 95% konfidensintervall skulle då bli:

$$RF_S = RF_A \pm U_{95} + S_a^{\#} + S_b^{\#} + S_d^{\#} + \dots$$

Detta är det statistiskt sett korrekta sättet att behandla avvikelser på grund av systematiska faktorer.

3. Ett förenklat sätt att behandla de systematiska faktorer är att bestämma ett vanligt värde med täckningsfaktor ett ($TF = 1$). De vanliga (standardiserade) värdena för varje systematisk avvikelse summeras med de slumpmässiga faktorerna och bildar den kombinerade standardiserade mätosäkerheten (S_{tot}).

Totala korrektionen för en mätning där man vill ha ett 95% konfidensintervall skulle då bli:

$$RF_S = RF_A \pm TF_{95} \cdot \sqrt{(S_a)^2 + (S_b)^2 + (S_d)^2 + \dots + (S_o)^2 + (S_p)^2}$$

där:

TF_{95} = Täckningsfaktor för 95% konfidensintervall

Fördelen med den här metoden ligger i dess enkelhet och att den är bättre än att inte göra någonting alls. I brist på tillräcklig kunskap om många av de systematiska faktorerna har den här metoden valts att användas i rapporten. Den är enkel och lätt att använda men ger inte någon korrektion i egentlig mening.

Nackdelen är att man inte korrigerar för systematiska faktorer utan inför istället en större osäkerhet. Genom att räkna ut en "standardiserad" avvikelse och behandla den som en osäkerhet gör man statistiskt sett ett grundläggande fel. Enligt definition antar de systematiska faktorerna alltid ett "maximalt" värde, systematisk avvikelse, vid varje tillfälle. Vill man vara korrekt skall man istället beräkna den systematiska avvikelserna (samt dess osäkerhet) och korrigera för den enligt punkt 1 eller 2 ovan.

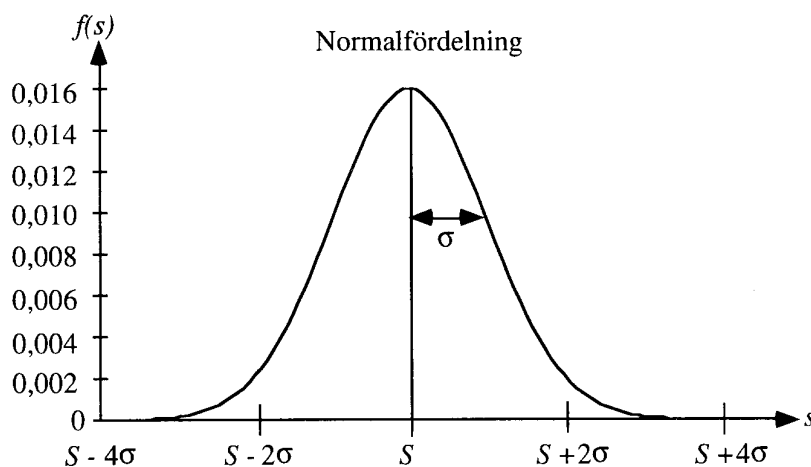
Fördelningsfunktioner

Som tidigare beskrivits gäller att olika mätvärden erhålls om en mätning upprepas många gånger. Beroende på mätsituationen kan dessa värden ligga väl samlade eller variera mycket. Om man bortser från systematiska faktorer är det rimligt att anta att mätningar med hög repeterbarhet är noggrannare än mätningar med låg repeterbarhet.

Mätvärdena kan sägas vara fördelade enligt ett speciellt mönster, fördelningsfunktion (sannolikhetsfunktion), som beskriver mätvärdenas spridning. För att beskriva en sådan sannolikhetsfunktion behöver man veta medelvärdet (S) och variansen (σ^2) eller standardavvikelsen (σ).

Normalfördelning

En vanlig fördelningsfunktion som är giltig när ett stort antal oberoende små faktorer påverkar värdet är normalfördelningen (Gausskurvan), figur 7. I praktiken vet man naturligtvis inte hur väl detta stämmer men eftersom det ändå bara handlar om uppskattning av ett approximativt värde på mätosäkerheten så är normalfördelningen ofta en tillräckligt god approximation.



Figur 7. Figuren illustrerar en normalfördelning med medelvärdet " S " och standardavvikelsen " σ ".

Vid normalfördelade sannolikheter är det störst chans att återfinna mätvärdet i närheten av medelvärdet (det sanna värdet). "Svansarna" är likformiga vilket innebär att det är lika sannolikt att återfinna mätvärdet över som under det sanna värdet. Sannolikhetsfunktion har formen:

$$f(s) = \exp \left[\frac{-(s - S)^2}{2\sigma^2} \right]$$

För att få en normerad sannolikhetsfunktion där ”ytan” är lika med alla tänkbara utfall det vill säga 1 (100%):

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(s) ds = 1$$

Måste man multiplicera med en normeringsfaktor:

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\frac{(s - S)^2}{2\sigma^2}\right]$$

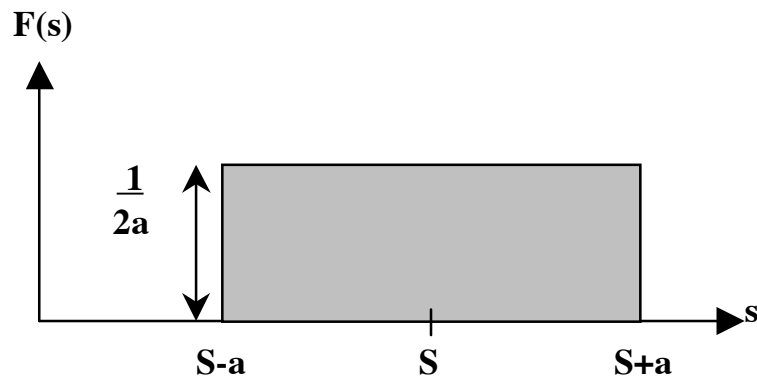
Normalfördelningen används ofta därför att den har trevliga matematiska egenskaper skriver Lindskog (1997). Lindskog (1997) visar att parametern S är det ”sanna” värdet och att funktionen är symmetrisk kring S samt att σ är standardavvikelsen. Sannolikheten för att ett värde, exempelvis RF_{krav} , ligger i intervallet $S-s \leq RF_{krav} \leq S+s$ kan beräknas. Denna sannolikhet är redan tidigare i rapporten introducerad som konfidensnivå.

Sannolikheten att ett värde ligger inom en standardavvikelse från S är 68,27%. Detta är också konfidensnivån som svarar mot den standardiserade mätosäkerheten om mätvärdena är normalfördelade.

Rektangulär fördelning

När det inte anges någon täckningsfaktor kan det ibland vara lämpligt att man antar att en "rektangelfördelning" gäller, se figur 8. Sannolikhetsfunktion har då formen av en rektangel, konstant inom ett intervall och noll utanför intervallet.

Man kan naturligtvis göra andra antaganden när det inte anges några täckningsfaktorer eller fördelningsfunktioner, till exempel normalfördelning. I de här fallen gäller det att man använder sunt förnuft och gör rimliga antaganden.



Figur 8. "Rektangelfördelning" är en sannolikhetsfunktion som är konstant inom ett intervall och noll utanför intervallet.

Standardavvikelsen för denna funktion kan enligt Lindskog (1997) uttryckas:

$$\sigma^2 = \int_{-a}^a (s - S)^2 \frac{1}{2a} ds$$

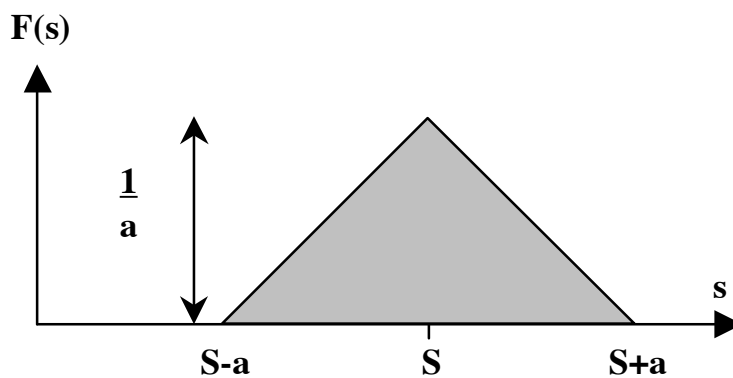
om man väljer $S=0$ får man:

$$\sigma^2 = \int_{-a}^a (s)^2 \frac{1}{2a} ds = \frac{1}{2a} \left[\frac{1}{3} s^3 \right]_{-a}^{+a} = \frac{a^2}{3}$$

vilket ger $\sigma = \frac{a}{\sqrt{3}}$

Triangelfördelning

Om det är känt att värdena är mer grupperade runt mitten än mot de yttre gränserna kan en triangulär fördelning vara lämpligare, se figur 9.



Figur 9. Triangelfördelning är en sannolikhetsfunktion där värdena är mer grupperade runt mitten än mot de yttre gränserna.

Standardavvikelsen för denna funktion kan enligt Hedenblad (1997) uttryckas:

$$\sigma = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

Bedömningsgrunder

Det är svårt att säkert veta storleken på de faktorer som bidrar till osäkerheten men det är alltid bättre att göra en rimlig bedömning än att inte göra någonting alls. Många gånger kan man genom att använda sunt förnuft komma långt vid bedömningen av mätosäkerhetens storlek.

De mätosäkerheter som tas upp i denna rapport är i vissa fall framtagna på svagt underlag men med rimliga antaganden. Det är inte säkert att de osäkerheter som här tas upp gäller för alla typer av RF-prober men i brist på bättre kunskap kan de användas för att bedöma mätosäkerheten vid mätningar av relativ fuktighet med andra typer av instrument än kapacitiva RF-prober.

När det gäller att kombinera mätosäkerheterna till ett värde har en förenklad metod använts i denna rapport. I rapporten har ett vanligt värde tagits fram för både de systematiska och de slumpmässiga faktorerna vilka sedan har summerats som om de alla vore slumpmässiga faktorer.

Det korrekta sättet att behandla de systematiska faktorerna är att göra det separat. Första korrigeras mätvärdet för de systematiska faktorerna. Därefter läggs den slumpmässiga osäkerhet som finns i korrektionen samman med övriga slumpmässiga faktorer så som beskrivs i slutet av rapporten. De systematiska faktorerna markeras i rapporten med index #, till exempel ($S_m^{\#}$).

Andra typer av givare

Om denna rapport används till att bedöma osäkerheten hos andra typer av givare än kapacitiva RF-prober måste man räkna med deras speciella osäkerheter och avvikelser. Till exempel måste man betänka att en daggpunktsgivare som bäst kan bestämmas temperaturen för daggpunkten med $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ osäkerheten. Detta ger en slumpmässig faktor med maximala storleken $\pm 0,01\%\text{RF}$ som skall adderas till den kombinerade standardiserade mätosäkerheten.

Mätosäkerhet och avvikelse

Det är svårt att göra en heltäckande uppräknings av faktorer som har inverkan på mätosäkerheten vid RF-mätningar. Hedenblad (1995) ger exempel på en del systematiska och slumpmässiga faktorer som kan inverka på mätosäkerheten vid RF-mätning.

Osäkerhet i kalibreringen av mätinstrumentet ingår som en del av osäkerheten hos alla mätvärden som görs med instrumentet. Kalibreringen skall därför utföras med så stor noggrannhet som möjligt.

Vid enklare kalibrering av RF-instrument är det vanligt att använda mättade saltlösningar. Relativ fuktighet i luften strax ovanför dessa saltlösningar ställer in sig på en viss relativ fuktighet beroende på vilket salt som används. I rapporten benämns fukttillståndet i luften ovanför saltlösningen när stabilt tillstånd råder för jämvikts-RF. Denna metod att kalibrera är behäftad med ett antal faktorer som påverkar osäkerheten i kalibreringen.

Genom att gruppera de faktorer som beskrivs i Hedenblad (1995) samt lägga till ungefär ett lika stort antal faktorer som bidrar till mätosäkerhet vid mätning av relativ fuktighet i byggnadsdelar kan följande uppdelning göras mellan fyra olika huvudkällor.

- Mätinstrumentet, det vill säga faktorer som uppkommer på grund av egenskaper hos materialen som instrumenten är gjorda av eller elektronikens uppbyggnad.
- Kalibrering av mätinstrumentet som görs för att minska dess mätosäkerhet samt korrigera avvikelser.
- Handhavande av utrustning vid och mellan RF-mätningar.
- Utvärdering av mätdata.

Faktorer från dessa fyra källor är längre fram i rapporten uppdelade i slumpmässiga faktorer som bidrar till mätosäkerheten samt systematiska faktorer som ger en avvikelse.

Mätinstrument

Osäkerhet i mätvärdena på grund av instrumentet kan man kompensera för genom att göra en kalibrering. Intervallet mellan kalibreringarna skall anpassas efter mätinstrumentets stabilitet och prestanda.

Enligt Vaisala OY är probens totala osäkerhet $\pm 2\% \text{RF}$ i intervallet 0-90%RF samt $\pm 3\% \text{RF}$ i intervallet 90-100%RF. Osäkerheten vid temperaturmätningar är $\pm 0,3^\circ \text{C}$. Inga uppgifter på täckningsfaktorer uppges, menar man då $TF=2$?

För att uppfylla de krav på osäkerheten som anges i Hus AMA 98 kan inte instrumenttillverkarens angivna värden användas. Hela den tillåtna osäkerheten skulle åtgå för att kompensera för osäkerheten hos RF-proben. Istället identifieras de olika faktorerna som ger upphov till systematiska och slumpmässiga faktorer. Därefter uppskattas storleken på avvikelsen som faktorerna ger upphov till.

Följande källor till osäkerheter i RF-mätningar kan dock särskiljas:

Systematiska faktorer

- a) Icke-linearitet hos RF-instrument.
- b) Drift hos RF-prob, det vill säga mätvärdet för en prob ändras med tiden.

Slumpmässiga faktorer

- c) Hysterés hos RF-prob, det vill säga olika kalibreringskurvor vid uppfuktning respektive uttorkning av RF-proben.

Kalibrering

Kalibreringen är till för att skaffa en uppfattning om storleken på osäkerheten i mätinstrumentet. Den korrektion som fås fram genom att uppskatta faktorerna är i allmänhet behäftad med en mätosäkerhet som måste beaktas.

Exempel på faktorer som ger osäkerhet i kalibreringen är:

Systematiska faktorer

- d) Temperaturavvikelse under kalibrering.

Slumpmässiga faktorer

- e) Slumpmässiga faktorer hos saltlösningar.
- f) Temperaturvariationer under kalibrering.
- g) Övriga faktorer vid kalibrering.
- h) Total mätosäkerhet för kalibrering i tvåtrycks fuktgenerator.

Handhavande

Faktorer som uppstår på grund av handhavande kan man inte kalibrera bort utan kan endast undvikas genom ett korrekt handhavande eller i vissa fall korrigering av mätvärdena i efterhand.

Om RF-mätningen utförs på ett korrekt elimineras många systematiska faktorer. Hur man gör detta beskrivs i Hedenblad (1995) Det har dock visat sig svårt att helt undvika de temperaturfaktorer som är källor till mätosäkerheter.

Sammanställningen av faktorer som uppstår vid handhavande förutsätter att man utför mätningen på korrekt sätt och inte får några ytterligare faktorer på grund av felaktigt handhavande. Vet man med sig att man mäter slarvigt eller har ytterligare faktorer som inverkar skall man beakta dessa också.

Systematiska faktorer

- i) Fuktmätningen görs vid annan temperatur än vid kalibrering.
- j) Fuktmätningen görs vid annan temperatur än i bruksskedet.
- k) Förvaring av RF-prob i torr miljö.
- l) Fuktkapacitet hos RF-prob vid mätning på uttagna provbitar.
- m) Fuktkapacitet hos RF-prob vid mätning i borrhål.
- n) Temperaturskillnad mellan sensor och betong.
- o) Nyligen borrade mäthål.
- p) Avvikande alkalitet.

Slumpmässiga faktorer

- q) Temperaturvariation under mätning.
- r) Ojämnt uttagna prover.
- s) Kondens i provrör vid transport av uttagna prover.
- t) Avvikelser i mäthållets djup.

Utvärdering

Det finns faktorer som kan påverka resultatet vid utvärdering vilka inte berörs av mätningen eller mätinstrumentets prestanda. Inverkan av de här faktorerna kan tas hänsyn till genom att man gör en riktig och noggrann utvärdering av mätdata. I många fall kan till och med en korrigering av dessa faktorerers inverkan göras i efterhand.

Systematiska faktorer

-

Slumpmässiga faktorer

u) Felaktig plattjocklek.

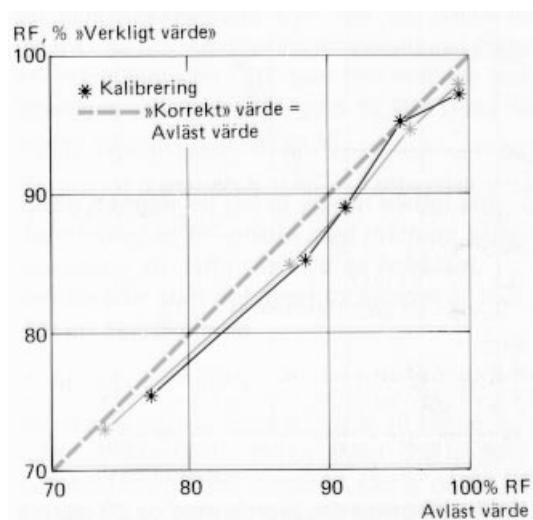
a) Icke-linearitet hos RF-instrument

Vanligtvis är det inte ett linjärt samband mellan avläst RF och verkligt RF hos RF-prober över hela intervallet 0 till 100 %. Detta ger upphov till en faktor som påverkar mätosäkerheten. Faktorns storlek varierar för olika typer av instrument.

Ett sätt att minska det här lineariseringsfelet är att kalibrera instrumentet för det intervallet mätningarna sker i. För betong är det intressanta området ungefär 75 till 100 % RF.

Mätvärdena korrigeras sedan med kalibreringskurvan som tagits fram för det enskilda mätinstrumentet.

Hedenblad (1995) publicerar en figur som visar exempel på olinearitet hos RF-prob, figur 10. I figuren framgår exempelvis att vid 90%RF skiljer det cirka 2%RF mellan avläst RF och "verkligt" RF.



Figur 10. Exempel på olinearitet hos RF-prob. Uppmätta vid två olika laboratorier enligt Hedenblad (1995).

Vanligt värde på $S_a^\#$

Hedenblad (1995) redovisar RF-prob med 2%RF avvikelse vid 90%RF. Antag att den avvikelsen är normalfördelad med 90% konfidensintervall. Standardiserade mätosäkerheten ($S_a^\#$) blir då:

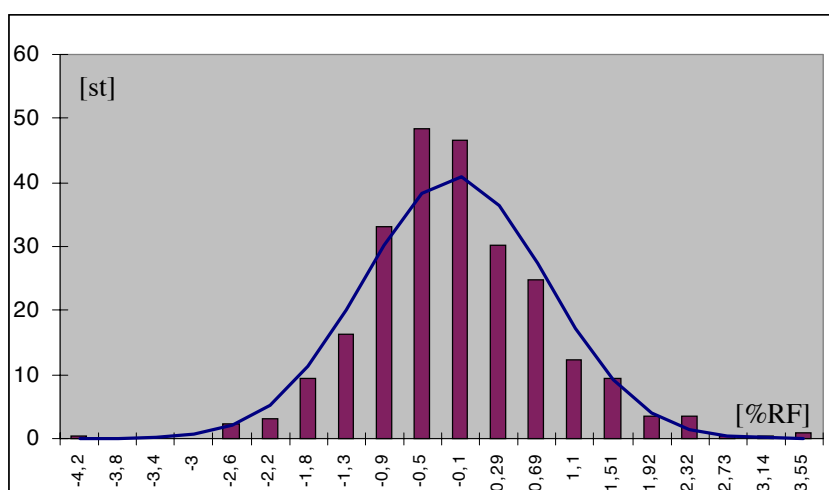
$$S_a^\# = \frac{2}{1,645} = 1,22\% \text{ RF}$$

b) Drift hos RF-prob

Med drift avses att utslaget hos en RF-prob ändras med tiden (för samma RF).

För att undersöka om det finns någon systematisk drift hos RF-prob HMP 36 från Vaisala har 496 kalibreringsmätningar sammanställts. Mätningarna är utförda under 3 års tid på Institutionen för byggnadsmaterial på Chalmers. Skillnaden i avläst värde mellan två kalibreringar antogs enbart bero på driften hos RF-proben. Skillnaden i avläst värde dividerades med antal dagar mellan kalibreringarna för att få ett standardiserat värde [%RF/dygn].

Utvärderingen visade att driften (per dygn) blev mindre om det var lång tid mellan kalibreringarna än om de utfördes nära varandra. Anledningen till det var att skillnaden mellan två kalibreringsvärden var normalfördelade, se figur 11, och inte beroende av tiden mellan kalibreringarna. Om den standardiserade driften inte har en känd fördelningsfunktion kan man inte anta att den beror av en systematisk faktor.



Figur 11. Passning av skillnader i avläst värde mellan två kalibreringsmätningar mot normalfördelningsfunktion. Medel = 0,02, Standardavvikelse = 0,98%RF.

Slutsatsen från försöket är att skillnader i avläst värde vid kalibrering är en slumpmässig faktor med standardavvikelse på cirka 1%RF. Avvikelsen uppstår troligen på grund av de slumpmässiga faktorerna "e" till "g" som beskrivs senare i rapporten.

Hedenblad (1995) beskriver däremot att daggpunktsgivarna som avdelningen för byggnadsmaterial på Lunds tekniska högskola använder kan driva. Han föreslår att RF-proberna kontrolleras ofta och regelbundet med en saltlösning. Denna bör ha ett RF som ligger i samma RF-område som man mäter inom, till exempel när det gäller betong är KCl med 85%RF ett lämpligt salt.

Vanligt värde på $S_b^{\#}$

Utvärderingen ovan visar att övriga mätosäkerheter är så stora att faktorn av drift hos prob inte kan utvärderas. Det går inte ens att med säkerhet säga om det förekommer drift eller ej hos dessa prober. Standardiserade mätosäkerheten ($S_b^{\#}$) kan antas vara lika med noll:

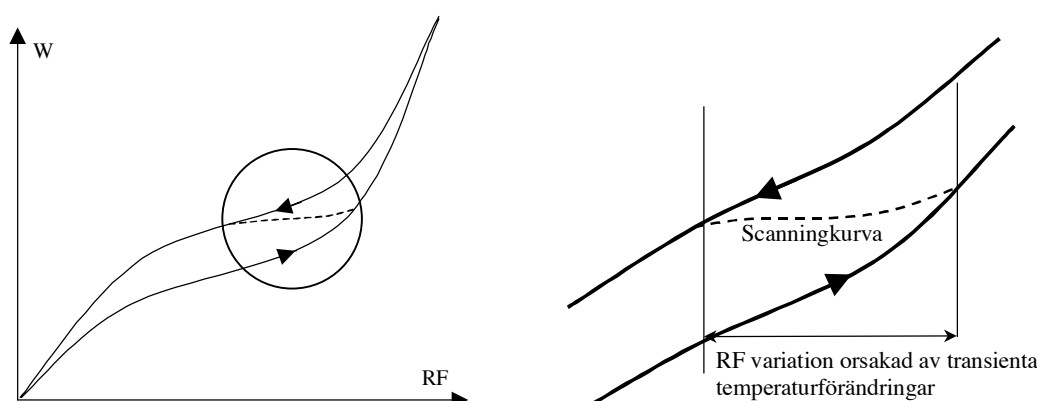
$$S_b^{\#} = 0$$

c) Hysterés hos RF-prob

Med hysterés hos en RF-prob menas att den följer olika kalibreringskurvor vid uppfuktning respektive uttorkning.

Hedenblad (1995) anger att en undersökning som gjordes vid avdelningen för byggnadsmaterial på Lunds tekniska högskola av hysterés hos två kapacitiva prober gav till resultat att den största skillnaden i uppmätt RF var 1% då RF-proberna var under uppfuktning respektive under uttorkning.

Om temperaturen har små transienta (snabba) variationer är avvikelserna på grund av hysterés mindre än om temperaturen är konstant. Vid små transienta temperaturändringar varierar RF hela tiden på grund av att luftens fukthållighet är konstant medan mätnadsånghalten varierar. Fukttillståndet befinner sig utmed scanningkurvorna (övergångskurvor) och avläst RF hamnar mellan sorptionsisotermen för uppfuktning och uttorkning, se figur 12.



Figur 12. Temperaturvariationernas inverkan på jämvikts-RF på grund av hysterés.

Genom att alltid mäta med prob som är något lite torrare än mätobjektet slipper man ifrån den här faktorn.

Vanligt värde på S_c

Största skillnad är uppmätt till 1%RF. Om man antar att sannolikhetsfunktionen är normalfördelad med ett 90 procentigt konfidensintervall blir täckningsfaktorn 1,645. Standardiserade mätosäkerheten (S_c) blir då:

$$S_c = \frac{1}{1,645} = 0,61\% \text{ RF}$$

d) Temperaturavvikelse under kalibrering

Saltlösningarnas jämvikts-RF är temperaturberoende. Avviker temperaturen i saltlösningen från den förväntade temperaturen uppstår en avvikelse. De flesta salter har ett litet temperaturberoende av jämvikts-RF. Faktorn är dock försumbar vid små temperaturavvikelser, se tabell 2.

Tabell 2. Avvikelser i jämvikts-RF ovanför mättad saltlösning på grund avvikelser i temperatur.

Salt	RF (20°C)	%RF / °C	±0,1°C	±0,5°C	±1,0°C
Litiumklorid LiCl	11,3	0,00	0,00	0,00	0,00
Kaliumacetat KC ₂ H ₃ O ₂	23,1	-0,09	-0,01	-0,05	-0,09
Magnesiumklorid MgCl ₂	33,1	-0,06	-0,01	-0,03	-0,06
Kaliumkarbonat K ₂ CO ₃	43,2	0,00	0,00	0,00	0,00
Magnesiumnitrat Mg(NO ₃) ₂	54,4	-0,30	-0,03	-0,15	-0,30
Natriumklorid NaCl	75,5	-0,03	0,00	-0,02	-0,03
Kaliumklorid KCl	85,1	-0,16	-0,02	-0,08	-0,16
Bariumklorid BaCl ₂	91	-0,17	-0,02	-0,09	-0,17
Kaliumnitrat KNO ₃	94,6	-0,18	-0,02	-0,09	-0,18
Kaliumsulfat K ₂ SO ₄	97,6	-0,06	-0,01	-0,03	-0,06

Vanligt värde på $S_d^{\#}$

Det är vanligt att man vill kalibrera sin RF-prob mot en saltlösning som har ett högt jämvikts-RF. Enligt tabell 3 är det lämpligt att använda kaliumklorid (KCl) för att få ett värde som ligger på vanligt uppmätt RF i betong.

Kalibreringen för 85,1%RF med kaliumklorid (KCl) utförs i ett temperaturstabil rum. Avläsningen av temperaturen är behäftad med ett systematiskt avvikelse. På grund av interna värmekällor som exempelvis lampor och mättekniker är det inte samma temperatur i saltlösningen och där rums-termometern är placerad. Eftersom man inte vet storleken på skillnaden så uppskattar man att maximivärdet är 1,0°C.

Man antar att temperaturskillnaden är normalfördelad om det ses till en lång tid och att sannolikheten för maximala temperaturskillnaden (1,0°C) skall överskridas är mindre än 1%. Konfidensintervallet är då 99% och täckningsfaktorn 2,576. den standardiserade osäkerheten ($S_d^{\#}$) blir:

$$S_d^{\#} = \frac{-0,16}{2,576} = -0,06$$

e) Slumpmässiga faktorer hos saltlösningar

Under ideala förhållanden anger ASTM E104 (85) en osäkerhet eller noggrannhet (accuracy) som är beroende av vilket salt som används och lösningens temperatur, tabell 3.

Tabell 3 redovisar osäkerhet i jämvikts-RF vid mättade saltlösningar enligt ASTM E 104 (1985) samt standardiserad mätosäkerhet om lådfördelning antas gälla.

Tabell 3. Osäkerhet i jämvikts-RF vid mättade saltlösningar enligt ASTM E 104 (1985).

Salt	RF (20°C)	Osäkerhet	Std. mät-osäkerhet
Litiumklorid LiCl	11,3	± 0,3	0,17
Kaliumacetat KC ₂ H ₃ O ₂	23,1	± 0,3	0,17
Magnesiumklorid MgCl ₂	33,1	± 0,2	0,12
Kaliumkarbonat K ₂ CO ₃	43,2	± 0,3	0,17
Magnesiumnitrat Mg(NO ₃) ₂	54,4	± 0,2	0,12
Natriumklorid NaCl	75,5	± 0,1	0,06
Kaliumklorid KCl	85,1	± 0,3	0,17
Bariumklorid BaCl ₂	91	± 2	1,2
Kaliumnitrat KNO ₃	94,6	± 0,7	0,40
Kaliumsulfat K ₂ SO ₄	97,6	± 0,5	0,29

Lådfördelningen väljs i detta fall eftersom de faktorer som påverkar osäkerheten inte kan antas vara normalfördelade. Exempelvis är saltet kontrollerat så det uppfyller ett visst krav på renhet. Förorenade partier har fått en lägre klassificering och renare partier en högre.

ASTM E104 (85) anger också en spridningen (precision) för värdena i tabellen. Den osäkerheten är att härleda till variationer i saltlösningens omgivningstemperatur. Dessa överslagsmässiga värden är utelämnade och istället behandlas detta fenomen närmare i nästa kapitel.

Vanligt värde på S_e

Det är vanligt att man vill kalibrera sin RF-prob mot en saltlösning som har en hög jämvikts-RF. Enligt tabell 2 är det lämpligt att använda kaliumklorid (KCl) för att få en liten osäkerhet. Standardiserade mätosäkerheten (S_e) blir då:

$$S_e = 0,17\% \text{ RF}$$

f) Temperaturvariationer under kalibrering

Transienta (snabba) temperaturvariationer i den luft som står i jämvikt med saltlösningen ger avvikelser från förväntat RF-värde. Vid dessa transienta temperaturförlopp hinner inte jämvikten mellan saltlösningen och luften ställa in sig. Dessa transienta temperaturförlopp kan orsakas att till exempel att en dörr öppnas, ljusets tänds eller att en person kommer in i rummet, alltså händelser som vanligtvis inträffar i samband med avläsning av RF-instrument.

Fenomenet förklaras med att luften har kvar samma ånghalt under en hastig temperatursvängning medan temperaturen och därmed mätnadsånghalten förändras. Stiger temperaturen i luften ökar mätnadsånghalten och RF sjunker, sjunker temperaturen minskar mätnadsånghalten och RF ökar.

Exempel

Antag att kalibrering för 97,6%RF med kaliumsulfat (K_2SO_4) utförs i ett temperaturstabil rum med temperaturen $20 \pm 1,0^\circ C$. man antar också att jämvikt över saltlösningen inställer sig när temperaturen är exakt $20^\circ C$.

Ånghalten i luften är: $17,3 \cdot 0,976 = 16,9$ gram vatten/ m^3 luft.

Om temperaturen i luften höjs hastigt hinner inte jämvikten ställa in sig direkt. Genast efter en grads ($1^\circ C$) temperaturhöjning gäller:

RF i luften är: $16,9/18,4 = 91,7\%$. RF sänkningen bli 5,97%-enheter då temperaturen varierar en grad ($1^\circ C$) enligt exemplet.

Maximala teoretisk osäkerheter för vanliga variationer samt de största uppmätta variationerna är redovisade i tabell 4.

Storleken på osäkerhet som orsakas av en viss temperaturvariation beror av temperatur och RF-nivån som kalibreringen görs i. En bättre sätt att bestämma osäkerheten än att använda maximala värden är att läsa av de aktuella värdena i tabell 5, 6 eller 7.

Tabell 4. Maximal teoretisk osäkerhet i RF på grund av transienta temperaturförlopp samt största uppmätta variationen i betong.

Variation	Osäkerhet	Uppmätt variation
$\pm 0,1^\circ C$	$\pm 0,6\% RF$	$\pm 0,5\% RF$
$\pm 0,5^\circ C$	$\pm 3,0\% RF$	$\pm 1,0\% RF$
$\pm 1,0^\circ C$	$\pm 6,0\% RF$	-

Tabell 5. Osäkerheten i RF vid olika temperatur och fuktnivåer på grund av transienta temperatur-förlopp med maxvärde 0,1°C.

Temp	10%RF	30%RF	50%RF	75%RF	85%RF	95%RF	98%RF
0°C	0,07	0,20	0,34	0,51	0,58	0,65	0,67
10°C	0,06	0,19	0,32	0,48	0,54	0,60	0,62
15°C	0,06	0,18	0,31	0,46	0,52	0,58	0,60
20°C	0,06	0,18	0,30	0,44	0,50	0,56	0,58
25°C	0,06	0,17	0,29	0,43	0,49	0,54	0,56
30°C	0,06	0,17	0,28	0,41	0,47	0,52	0,54
40°C	0,05	0,16	0,26	0,39	0,44	0,49	0,51
50°C	0,05	0,15	0,24	0,36	0,41	0,46	0,48

Tabell 6. Osäkerheten i RF vid olika temperatur och fuktnivåer på grund av transienta temperatur-förlopp med maxvärde 0,5°C.

Temp	10%RF	30%RF	50%RF	75%RF	85%RF	95%RF	98%RF
0°C	0,35	0,69	1,73	2,50	2,94	3,28	3,39
10°C	0,32	0,64	1,61	2,41	2,73	3,05	3,15
15°C	0,31	0,62	1,55	2,32	2,63	2,94	3,04
20°C	0,30	0,60	1,50	2,25	2,54	2,84	2,93
25°C	0,29	0,58	1,44	2,17	2,46	2,75	2,83
30°C	0,28	0,56	1,40	2,10	2,38	2,66	2,74
40°C	0,26	0,52	1,31	1,96	2,23	2,49	2,57
50°C	0,25	0,49	1,23	1,84	2,09	2,33	2,41

Tabell 7. Osäkerheten i RF vid olika temperatur och fuktnivåer på grund av transienta temperatur-förlopp med maxvärde 1,0°C.

Temp	10%RF	30%RF	50%RF	75%RF	85%RF	95%RF	98%RF
0°C	0,70	2,11	3,52	5,28	5,99	6,69	6,90
10°C	0,65	1,96	3,27	4,90	5,56	6,21	6,41
15°C	0,63	1,89	3,15	4,73	5,36	5,99	6,18
20°C	0,61	1,83	3,04	4,57	5,17	5,78	5,97
25°C	0,59	1,76	2,94	4,41	5,00	5,58	5,76
30°C	0,57	1,70	2,84	4,26	4,83	5,40	5,57
40°C	0,53	1,59	2,66	3,98	4,52	5,05	5,21
50°C	0,50	1,49	2,49	3,74	4,23	4,73	4,88

Vanligt värde på S_f

Kalibreringen för 85,1%RF med kaliumklorid (KCl) utförs i ett temperaturstabil rum med temperaturen $20 \pm 1,0^\circ\text{C}$. Antag att temperaturen är normalfördelad och sannolikheten för maximala temperaturvariationen skall överskridas är mindre än 1%. Konfidensintervallet är då 99% och täckningsfaktorn 2,576. Den standardiserade osäkerheten (S_f) blir:

$$S_f = \frac{5,17}{2,576} = 2,01\% \text{ RF}$$

g) Övriga faktorer vid kalibrering

Om inte stor noggrannhet och renlighet beaktas vid arbetet med saltlösningar är det troligt att nya faktorer uppstår som påverkar osäkerheten. Nedan finns några av dessa faktorer som visat sig eller antas kunna påverka osäkerheten i kalibreringen uppräknade.

Listan skall inte ses som komplett utan enbart ett antal exempel på övriga faktorer som kan påverka osäkerheten vid kalibrering.

- Saltlösning som blivit avkyld har visat sig ge ett felaktigt jämvikts-RF.
- Behållare som skapar övertryck ger ett felaktigt jämvikts-RF. Exempel på detta är provrör med nedtryckt kork.
- Saltlösning som varit exponerad för luft kan ha reagerat med koldioxid (CO_2) och karbonatiserat. Karbonatisering leder till att jämvikts-RF förändras. Använd därför alltid färska saltlösningar.
- Orena salter och föroreningar i vattnet ger felaktigt jämvikts-RF. Endast salter av högsta kvalitet (purum) bör användas till kalibrering. Samma gäller vattnet, endast rent avjoniserat vatten bör användas till kalibrering.
- Gamla saltlösningar kan få en tillväxt hos saltkristallerna. Bindningsenergin är lägre i stora perfekta kristaller. Detta gör att föroreningar som var lagrade i de ursprungliga kristallerna frigörs och anrikas i vätskefasen och bidrar till att jämvikts-RF förändras.

Vanligt värde på S_g

Om färska saltlösningar som preparerats enligt ASTM (1985) används kan osäkerheten (S_g) försummas.

$$S_g = 0\% \text{ RF}$$

h) Total mätosäkerhet för kalibrering i tvåtrycks fuktgenerator

Ett sätt att minska osäkerheten i kalibreringen är att utföra den med hjälp av en tvåtrycks fuktgenerator av den typen som bland annat finns hos avdelningen för byggnadsmaterial på Lunds tekniska högskola. Osäkerheten i en sådan kalibrering är mindre än vid kalibrering mot jämvikts-RF ovanför mättade saltlösningar eftersom den bygger på andra fysiska samband som är ”lättare” att styra.

Tvåtrycks fuktgeneratoren fungerar i princip genom att minska trycket hos en fuktmättad luftvolym vid en viss temperatur. Eftersom ingen fukt bortförs vid tryckändringen minskar vattenångans partialtryck i proportion med den totala tryckminskningen (effekter av allmänna gaslagen och Daltons lag). RF kan definieras som kvoten mellan vattenångans aktuella partialtryck och dess mättnadsångtryck. Mättnadsångtrycket beror enbart av temperaturen. Genom att minska totala trycket vid konstant temperatur sänks vattenångans partialtryck medan mättnadsångtrycket är konstant. RF kan alltså varieras i en sådan ”fuktgenerator” genom att trycket hos fuktig luft varieras.

Osäkerheterna i den här kalibreringsmetoden kommer i huvudsak från bestämning av temperatur och totaltryck samt förmågan att hålla dessa storheter konstanta på önskad nivå. Tillverkaren av en vanligt förekommande tvåtrycks fuktgenerator anger totala mätosäkerheten i genererad fuktighet enligt tabell 8.

Tabell 8. Mätosäkerhet enligt tillverkaren för en normal tvåtrycks fuktgenerator.

	%RF	%RF	%RF	%RF	%RF	%RF
Genererad fuktighet	10,00	25,00	30,00	50,00	75,00	95,00
Mätosäkerhet (TF=2)	±0,17	±0,20	±0,22	±0,25	±0,30	±0,36
Std mätosäkerhet	±0,09	±0,10	±0,11	±0,13	±0,15	±0,18

Vanligt värde på S_h

Enligt tabell 8 är mätosäkerheten 0,18%RF eller mindre om man nöjer sig med området under 95%RF. Antag att man vill ha ett högt värde med i kalibreringen. Man väljer därför att kalibrera i 95%RF och får den standardiserade osäkerheten (S_h) till:

$$S_h = 0,18 \% RF$$

i) Fuktmätning vid annan temperatur än vid kalibrering

Temperaturnivån vid mätning och kalibrering påverkar nästan alla typer av RF-instrument. Hedenblad (1995) refererar till Lafaire (1988) och skriver att vid instrument som inte har inbyggd temperaturkompensation kan mätfelet bli stort (15-20%RF) om mättemperaturen skiljer sig mycket från kalibreringstemperaturen. Detta är troligen faktorer som beror av egenskaper hos materialet i RF-sensorn.

Med temperaturkorrigering inbyggd i instrumentet blir felet mycket mindre, men kanske inte alltid försumbart i våra sammanhang. Lafaire (1998) redovisar mätningar gjorda vid NIST i USA som visar att felet för de provade kapacitiva RF-proberna kan vara i storleksordningen någon %RF vid +40°C då de hade kalibrerats vid +20°C.

Det är rimligt att anta att RF-mätning vid temperaturer som skiljer sig mindre än 5°C från kalibreringstemperaturen ger en försumbar osäkerhet. Om instrumentet inte har temperaturkorrektur är man tvungen att kalibrera det vid de temperaturer man vill mäta vid, i annat fall räcker det med att kalibrera instrumentet vid var tionde grad inom temperaturintervallet man mäter.

Vanligt värde på $S_i^{\#}$

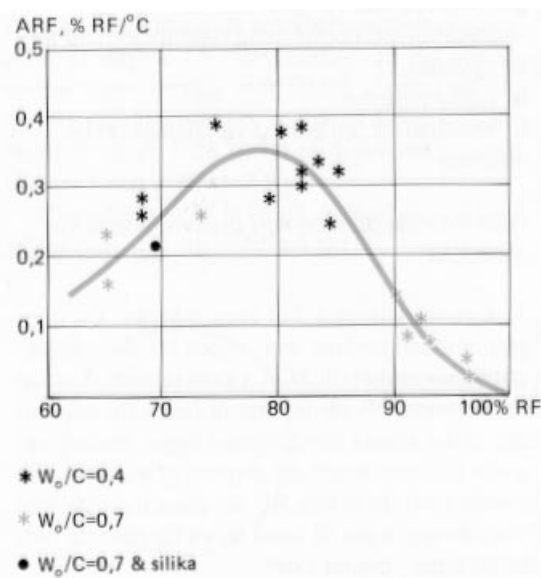
Om mättemperaturen skiljer sig mindre än 5°C från temperaturen vid kalibrering kan osäkerheten ($S_i^{\#}$) försummas.

$$S_i^{\#} = 0\% \text{ RF}$$

j) Fuktmätning vid annan temperatur än i bruksskedet

Fuktmätningen görs ibland vid annan temperatur än temperaturen vid bruksskedet. Denna temperaturskillnad är en systematisk faktor som påverkar mätosäkerheten.

Nilsson (1987) har redovisat hur temperaturnivån i betongen påverkar RF i betong med konstant fukthalt, figur 13.



Figur 13. Mätt ändring i RF vid en grads ändring av temperaturen från +20°C, som funktion av RF vid +20°C. Konstant fukthalt i betongen. Nilsson (1987).

Observera att om temperaturen ökar så ökar också RF. Det innebär att om fuktmätningen görs på en byggarbetsplats med markant lägre temperatur än den vid ”bruksskedet” kan ett mätvärde som är flera %RF för lågt uppstå.

Exempel:

Om RF i betong är 90%RF vid +5°C så blir RF vid +20°C ($90 + 0,15 \cdot 15$) cirka 92%RF. 0,15 är avläst i figur 12 vid 90%RF och 15 är temperaturskillnaden.

Om ett RF-prov tas ut ur en betongkonstruktion och placeras i till exempel ett provrör som tas till laboratorium för RF-bestämning fås normalt den RF som betongen får i vanlig inomhustemperatur skriver Hedenblad (1995).

I tabell 9 finns en sammanställning av avvikelse i RF då mätning görs vid annan temperatur än temperaturen vid bruksstadiet för olika RF-nivåer

Tabell 9. Avvikelse i RF då mätning görs vid annan temperatur än temperaturen vid bruksstadiet för olika RF-nivåer. Värdena baseras på figur 12.

ΔTemp	60%RF	70%RF	80%RF	90%RF	97%RF
1°C	0,1	0,3	0,4	0,2	0,0
2°C	0,2	0,5	0,7	0,3	0,0
3°C	0,4	0,8	1,1	0,5	0,1
5°C	0,6	1,3	1,8	0,8	0,1
10°C	1,2	2,5	3,5	1,5	0,2
15°C	1,8	3,8	5,3	2,3	0,3
20°C	2,4	5,0	7,0	3,0	0,4
25°C	3,0	6,3	8,8	3,8	0,5

Om man väljer att korrigera för den här faktorn kommer korrektionen ha en osäkerhet som måste beaktas. Osäkerheten kan man uppskatta som spridningen kring ”medellinjen” i figur 12, det vill säga ungefär $\pm 0,1\% \text{RF}/^\circ\text{C}$.

Om man inte korrigerar för den här faktorn får man göra någon annan typ av uppskattning av faktorns storlek, till exempel ett vanligt värde enligt nedan.

Vanligt värde på $S_j^\#$

Det är rimligt att anta att en nygjuten bottenplatta inte nått sin slutliga temperatur under byggtiden. Om temperaturen är 3°C lägre än den slutliga temperaturen och man mäter 80%RF är avvikelsen enligt tabell 8 lika med 1,1%RF.

Gör nu bedömningen att det här är en vanlig mätsituation och endast 5% av mätsituationerna inte täcks av denna osäkerhet, man har då ett 95% konfidensintervall och en täckningsfaktor på 1.960. Den standardiserade osäkerheten ($S_j^\#$) blir:

$$S_j^\# = \frac{1,1}{1,960} = 0,56\% \text{ RF}$$

k) Förvaring av RF-prob i torr miljö

Om RF-prob förvaras i torrare miljö än den som mätningen sker i ökar tiden till jämvikt. Detta beror på att RF-sensorn har torkat och behöver tid att fuktas upp på nytt.

Om RF-sensorn tillåts torka ut till mycket lägre fuktnivå än den nivån mätningen sker vid skall detta beaktas så tiden innan avläsning blir tillräckligt lång för att jämvikt skall ställa in sig. I mättekniska sammanhang benämns detta som en stor tidskonstant.

Det har visat sig vid mätningar att någon dags förvaring i 30%RF (inomhus på vintern) medför att det tar ungefär en vecka innan RF-sensorn kommer i jämvikt vid ett högre RF.

Vanligt värde på $S_k^{\#}$

Om RF-sensorn förvaras i ungefär samma RF som mätningarna sker och den får komma till jämvikt med materialet vid mätning kan osäkerheten ($S_k^{\#}$) försummas.

$$S_k^{\#} = 0\% \text{ RF}$$

I) Fuktkapacitet hos RF-prob vid mätning på uttagna prover

En viss mängd av fukten i provbitarna går åt för att fukta upp RF-proben. Observera att den här systematiska faktorn ger ett för lågt mätvärde och man skall därför korrigera för den. Faktorn blir mindre ju större provbit som används.

Skyddsfiltret är den detalj på RF-proben som har störst fuktkapacitet. Beroende på utförande kan fuktkapaciteten bedömas vara 4-10 mg för intervallet 40-97%RF. Det vill säga att filtret tar upp 4-10 mg fukt från det stoppas i mätstålet om det varit exponerat för rumsluft till det att filtret kommer i jämvikt med den fuktiga betong. Enligt Nilsson (1979) hade ett sintrat bronsfilter en fuktkapacitet på 4,3 mg/(40%RF;97%RF) och en RF-sensor <0,5 mg/(40%RF;97%RF).

Luftens fuktkapacitet för intervallet 0-100%RF är lika med mätnadsånghalten för den aktuella temperaturen. Vid 20°C är mätnadsånghalten 17,8 gram/m³. I ett provrör som innehåller cirka 50·10⁻⁶ m³ luft blir fuktkapaciteten per %RF:

$$17,8 \cdot 10^3 \times 50 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{100 - 0} = < 0,01$$

$$\left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \times \text{m}^3 \cdot \frac{1}{\% \text{RF}} \right] = \left[\frac{\text{mg}}{\% \text{RF}} \right]$$

Betongens fuktkapacitet varierar i hög grad med fuktnivå, betongkvalitet och tillsatsmedel. Utvärderade data från diagram i Hedenblad(1996) är sammanställda i tabell 10.

Tabell 10. Fuktkapacitet kg/(m³·%RF) hos olika betongkvaliteter och fuktnivåer, utvärderade data från diagram i Hedenblad (1996).

Fuktnivå (%RF)	Betongkvalitet (vct)		
	Vct = 0,4	Vct = 0,5-0,6	Vct = 0,7
< 80	1,1	1,2	1,3
80 - 90	2,0	2,0	2,4
90 - 98	3,7	4,0	5,0

För enkelhetens skull antas att det finns två olika RF-prober som tar upp 4 respektive 10 mg fukt innan de kommer i jämvikt med en betongbit som ligger i ett provrör. Den systematiska avvikelser hos mätvärdet blir enligt tabell 11 för proben med låg fuktkapaciteten (4 gram) och enligt tabell 12 för proben med hög fuktkapacitet.

Tabell 11. Systematisk avvikelse (%RF) orsakat av att fukt från betongbit (20 gram) i provrör går åt för att fukta upp RF-prob med fuktkapacitet på 4 mg.

Fuktnivå (%RF)	Betongkvalitet (vct)		
	Vct = 0,4	Vct = 0,5-0,6	Vct = 0,7
< 80	0,44	0,40	0,37
80 - 90	0,24	0,24	0,20
90 - 98	0,13	0,12	0,10

Tabell 12. Systematisk avvikelse (%RF) orsakat av att fukt från betongbit (20 gram) i provrör går åt för att fukta upp RF-prob med fuktkapacitet på 10 mg.

Fuktnivå (%RF)	Betongkvalitet (vct)		
	Vct = 0,4	Vct = 0,5-0,6	Vct = 0,7
< 80	1,09	1,00	0,92
80 - 90	0,60	0,60	0,50
90 - 98	0,32	0,30	0,24

Om betongbiten är mindre än 20 gram blir den systematiska avvikelsen större. Till exempel blir avvikelsen för 7 gram prov (vct 0,7; RF 80-90%; 10 mg fuktkapacitet hos RF-proben) ungefär lika med 1,5 %RF ($3 \times 0,5\% \text{RF}$) eftersom provet bara väger en tredjedel av 20 gram.

Vanligt värde på $S_1^{\#}$

Antag att minst 20 gram betong alltid läggs i provröret och att RF-proben har en fuktkapacitet som är mindre än 10 gram. Husbyggnadsbetong har vct cirka 0,7 och fuktigheten är vanligtvis i intervallet 80 - 90 %RF. Den systematiska avvikelsen ($S_1^{\#}$) blir då:

$$S_1^{\#} = 0,50 \% \text{ RF}$$

m) Fuktkapacitet hos RF-prob vid mätning i borrhål

En viss mängd av fukten i betongen går åt för att fukta upp proben, analogt med föregående avvikelse. Observera att den här systematiska faktorn också ger ett för lågt mätvärde och att man därför skall korrigera för den.

Faktorn blir mindre för en RF-prob med liten fuktkapacitet och för en diffusionsöppen betong, se tabell 13. Avvikelsen avtar med tiden om RF-proben får sitta kvar eftersom fukt transporteras till hålet från betongen. Som tumregel kan man säga att avvikelsen halveras var 5:e dag.

En RF-prob med väldigt liten fuktkapacitet påverkar inte RF i betongen så mycket. Genom att använda ett beröringsskydd med minimal fuktkapacitet, till exempel RF-prob HMP44 från Vaisala med bortplockat "pappersfiltret" kan man komma ner till ungefär 1 mg fuktkapacitet.

Tabell 13. Systematisk avvikelse (%RF) orsakat av att fukt från borrhål i betongen med fuktnivå på 90%RF går åt för att fukta upp instucken RF-prob.

Fuktkapacitet (mg)	Betongkvalitet (vct)		
	Vct = 0,4	Vct = 0,5	Vct = 0,7
1	0,7	0,6	0,5
4	2,5	2,3	2,0
10	5,3	4,7	4,2

Vanligt värde på $S_m^{\#}$

Antag att en normal RF-prob med 4 mg fuktkapacitet används för att mäta i en husbyggnadsbetong (vct ungefär 0,7) när fuktnivån är ungefär 90%RF. Den systematiska avvikelsen blir då att mätvärdet är 2 %RF för lågt första dagen. Får proben sitta i fem dagar så är mätvärdet fortfarande 1 %RF för lågt. Läses mätvärdet av efter 12 timmar som är den kortaste tillåtna tiden enligt Hus AMA 98 blir den systematiska avvikelsen ($S_m^{\#}$):

$$S_m^{\#} = 2,0\% \text{ RF}$$

n) Temperaturskillnad mellan sensor och betong

Om det är temperaturskillnad mellan RF-sensor och betongen vid mätning får man ett systematiskt fel. Om RF-sensorn har högre temperatur än betongen så blir mätvärdet lägre än det verkliga RF-värdet hos betongen. Har RF sensorn en lägre temperatur blir mätvärdet högre.

Fenomenet inträffar eftersom luften i beröring med sensorn har samma ånghalt som luften i betongens porer. Är temperaturen olika på de båda ställena blir också mätnadsånghalten olika och därmed även RF.

Exempel

Mätning i borrhål hos en betong som är 20°C och 90%RF. RF-proben är uppvärmd på grund av att den sticker upp ur hålet och blir uppvärmd av solstrålning. RF-sensorn har i detta fall en temperatur av 21°C.

Ånghalten i luften är: ($c_m \cdot RF = c$) $17,3 \cdot 0,90 = 15,57$ gram vatten/m³ luft. RF närmast sensorn är ($c/c_m = RF$) $15,57/18,4 = 0,85$. Alltså registrerar RF-sensorn 85%RF.

$$\begin{aligned} c_m &= \text{mätnadsånghalt (g}_{\text{vatten}}/\text{m}^3) \\ c &= \text{aktuell ånghalt (g}_{\text{vatten}}/\text{m}^3) \end{aligned}$$

Avvikelsens storlek per grads variation är beroende av vilken temperatur betongen har, tabell 14. Fenomenet bygger på samma princip som faktor S_f ”temperaturvariationer under kalibrering”. För att få exaktare siffror på avvikelsen kan tabellerna 4 – 7 användas även för detta fenomen.

Tabell 14. Maximal teoretisk osäkerheten i RF på grund av temperaturskillnader mellan sensor och betong.

Variation	0°C	20°C
±0,1 °C	±0,67 %RF	±0,58 %RF
±0,5 °C	±3,39 %RF	±2,93 %RF
±1,0 °C	±6,90 %RF	±5,97 %RF

Vanligt värde på $S_n^{\#}$

Om man antar att temperaturskillnaden mellan sensor och betong inte överstiger 0,5°C i 95% av mätningarna och vanlig mättemperatur är 20°C. Täckningsfaktorn för 95% är 1,960 och den standardiserade osäkerheten ($S_n^{\#}$) blir:

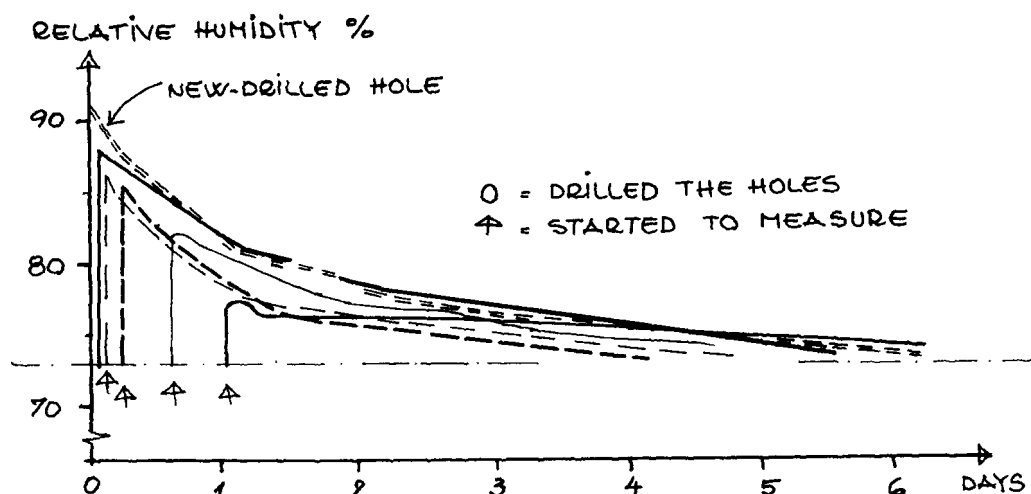
$$S_n^{\#} = \frac{2,93}{1,960} = 1,49\% \text{ RF}$$

o) Nyligen borrade mäthål

Den systematiska faktorn av nyligen borrade mäthål ger alltid en höjning av mätvärdet. I de fall frågeställningen är om betongen är torrare än ett kritiskt RF-värde blir bedömningen alltid på säkra sidan om man inte tar hänsyn till denna faktor.

Avvikelsen är antagligen en faktor av den temperaturhöjning som uppstår i betongen vid borrningen. När temperaturen höjs ökar också mätnadsånghalten och därmed ånghalten i betongen. Skillnaden i ånghalt mellan den uppvärmda betongen och dess omgivning gör att fukten flyttar på sig. När betongen svalnar sänks också ånghalten och fukten börjar vandra tillbaka. Enligt Pastrav (1990) samt Gårlin och Hjort (1995) kan det ta upp till en vecka innan betongen återfått sin ursprungliga fuktnivå.

Enligt Pastrav (1990) varar temperaturhöjningen mindre än 3 timmar och är som störst ungefär 2-3°C. Fuktnivån kan avvika ända upp till 20%RF enligt mätningar som presenteras i Pastrav (1990), se figur 14.



Figur 14. Variationen hos RF i nyligen borrade hål, Pastrav (1990).

Den här systematiska faktorn kan behandlas på två principiellt olika sätt.

Avvakta att jämvikt inställer sig

Ett sätt att undvika den systematiska faktorn av nyligen borrade hål är att vänta med mätningen till faktorn har avtagit. Det betyder i praktiken att man borrar och fodrar mät hålet ungefär en vecka i förväg. Hålet måste naturligtvis vara väl förslutet så att betongen inte torkar under tiden

Pastrav (1990) visar, se figur 14, att maximala avvikelser blir mindre ju längre man väntar med att sätta in proben. En möjlig förklaring är att RF-proben tar upp fukt från betongen om den sätts in i ett nyligen borrarat hål och att det tar längre tid för den fukten att återgå. Enligt den teorin borde man få det bästa värdet om man "dammsuger" hålet en gång till när temperaturen sjunkit efter borrarningen. När man sugit bort den "uppfuktade" luften kan proben stickas in i hålet.

Korrigerar och beakta korrektionens osäkerhet

Av intresse att få så lågt mätvärde som möjligt kan man korrigerar för inverkan av nyligen borrarade hål. Om man gör en korrigerar för den faktorn kommer korrektionen vara behäftad med en osäkerhet.

Enligt figur 14 kan man uppskatta korrektionen som centrumlinjen i "bandet" av kurvor. Observera att dessa korrektioner endast gäller när RF i betongen är cirka 75%. Är betongens RF till exempel 90% finns det inte möjlighet till en initial höjning på drygt 15%RF som framgår i figuren.

Om man använder sig av en korrektion kommer den att vara behäftad med en osäkerhet. En rimlig uppskattning av storleken på osäkerheten är maximala avståndet från centrumlinjen i "bandet" av kurvor och den yttersta kurvan på något ställe. Mätosäkerheten i korrektionen blir då cirka $\pm 3\%RF$. Det är rimligt att anta att den är lådfördelad och täcker därmed upp alla möjliga variationer för detta fenomen. Den standardiserade mätosäkerheten (S_o) för en sådan korrektion blir då $\pm 3\%RF/\sqrt{3} = 1,73\%RF$.

Vanligt värde på $S_o^{\#}$

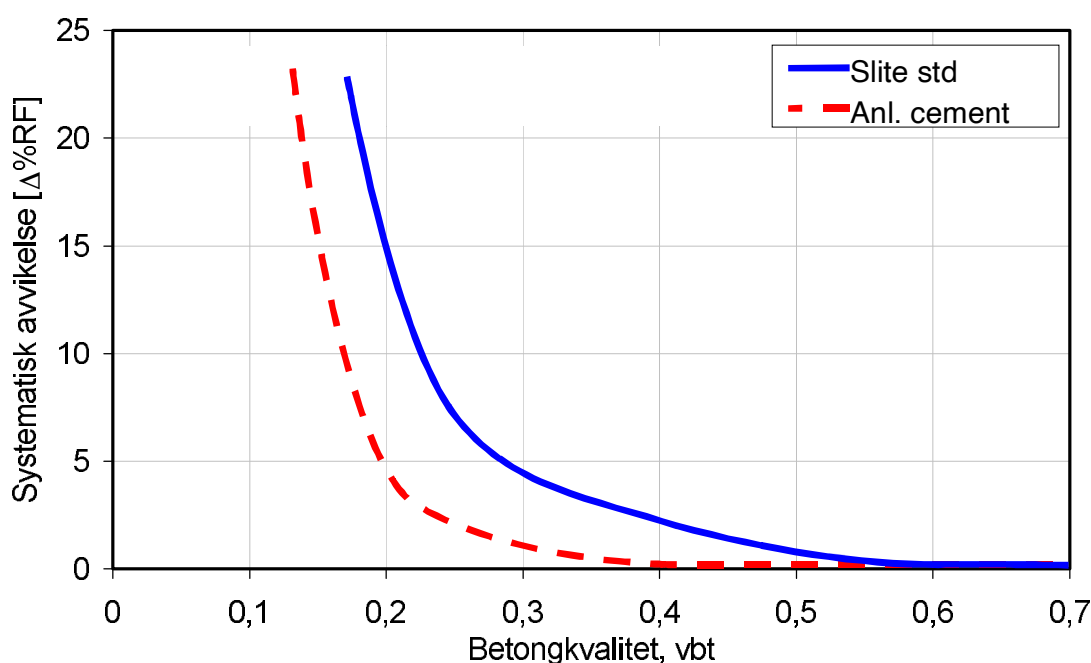
Man låter bli att korrigerar eftersom avvikelser blir "på säkra sidan" om värdet skall jämföras ett kritiskt värde. Är meningen att fastställa en fuktprofil är absolutnivån inte riktigt lika viktig eftersom alla mätpunkter har samma avvikelse. Den systematiska avvikelser ($S_o^{\#}$) blir:

$$S_o^{\#} = 0\% RF$$

p) Avvikande alkalitet

RF påverkas av alkaliinnehållet i betongen. Om mängden fukt i kg/m^3 är densamma för två betongtyper, som fränsett alkaliinnehållet är lika, så är uppmätt RF högre för betongen med lägst alkaliinnehåll enligt Hedenblad och Janz (1994).

Denna faktor är avgörande då en betongplattan har varierande alkalitet beroende på var man mäter. När man ska mäta ytfuktigheten i betongen måste man ta hänsyn till om betongytan har karbonatiserat och därmed fått ett lägre alkaliinnehåll. En annan orsak till pH-skillnad i betong är cementmängden. Ett sätt att beakta detta är att studera vattenbindemedel talet (vbt) i betongen. Ett lågt vbt medför att mätvärdet blir för lågt, figur 15 visar ungefärligt samband.



Figur 15. Avvikelse hos mätvärdet orsakat av varierande betongkvalitet. Figuren baseras på värden ur Hedenblad och Janz (1994).

Vanligt värde på $S_p^\#$

Vid mätning på karaktäristiskt djup i nyproducerad "husbetong" ($\text{vbt} = 0,7$) kan avvikelsen försummas och den standardiserade osäkerheten $S_p^\#$ blir:

$$S_p^\# = 0\% \text{ RF}$$

q) Temperaturvariation under mätning

Betong är ett värme- och fukttrogt material, temperaturen och fukttinnehållet ändras ganska långsamt. Det är inte sannolikt att det skulle kunna uppstå stora transienta temperaturvariationer i betong. Egna fältmätningar som är gjorda vid Institutionen för byggnadsmaterial på Chalmers visar att avvikelserna kan bli upp till 1%RF, tabell 15.

Tabell 15. Maximal teoretisk osäkerhet i RF på grund av transienta temperaturförlopp samt största uppmätta variationen i betong.

Variation	Osäkerhet	Uppmätt variation
±0,1 °C	±0,6 %RF	±0,5 %RF
±0,5 °C	±3,0 %RF	±1,0 %RF
±1,0 °C	±6,0 %RF	-

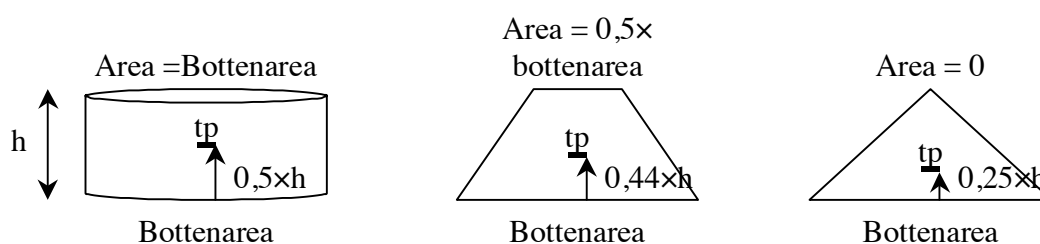
Vanligt värde på S_q

Största skillnad är uppmätt till 1%RF. Om man antar att sannolikhetsfunktionen är normalfördelad med 90% konfidensnivå blir täckningsfaktorn 1,645. Standardiserade mätosäkerheten (S_q) blir då:

$$S_q = \frac{1\% \text{ RF}}{1,645} = 0,61$$

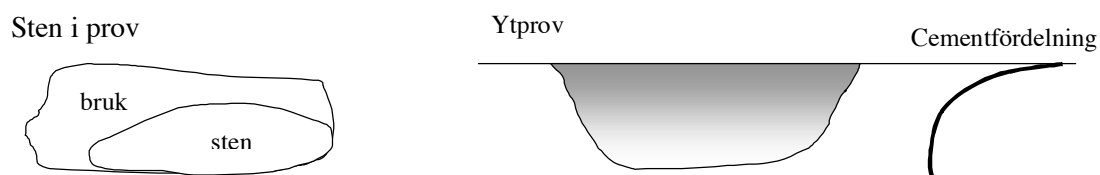
r) Ojämnt uttagna prover

Vid uttagning av betongbitar skall man tillse att de representerar det djup som man vill mäta på. Provbitarnas tyngdpunkt förskjuts om de har oregelbunden form. Det innebär att tyngdpunkten inte hamnar där man beräknat och därmed mäter man inte RF i den punkten heller, se figur 16. RF kan variera mycket i ett uttorkat ytskikt men även normal husbyggnadsbetong som fått torka enkelsidig uppvisar markanta RF-gradienter på karaktäristiskt djup. I en sådan platta som är 100 mm tjock är RF-gradienten på karaktäristiskt djup cirka 2-3%RF/cm.



Figur 16. Systematisk avvikelse hos "tyngdpunkten" i cirkulära provbitar på grund av formen.

Sammansättning av betongbitens styr också om den är representativ för mätdjupet. Eftersom fukten sitter i cementpastans porer eftersträvar man att få en homogen betongbit med lika mycket pasta från alla nivåer. Pastainnehållet i betongbiten kan bli ojämnt fördelat om man till exempel får med en sten eller att man tar ett prov från betongytan där cementhalten är högre, figur 17. Cementhalten eller andelen cementpasta är större i ytan ner till halva maximala stenstorleken ($0,5 \cdot d_{\max}$).



Figur 17 Systematisk avvikelse på grund av provbitens sammansättning.

Vanligt värde på S_r

Antag att man tar ut ett prov som ska representera karaktäristiskt djup i en 100 mm tjock platta av husbyggnadsbetong. Provet är ungefär en cm ”högt” och tas ut så att dess mitt hamnar på karaktäristiskt djup.

Det är rimligt att anta att fuktfördelningen i biten kan vara ojämnt fördelad om man både beaktar bitens form och sammansättning. Antag att cementpastan i biten ofta får formen enligt mittenillustrationen i figur 16 men med den stora arean uppåt.

Mätvärdet kommer att bli för lågt eftersom tyngdpunkten hos cementpastan ligger ovanför karaktäristiskt djup. På mät djupet bedöms RF-gradienten vara omkring 3%RF/cm. Den slumpmässiga avvikelsen kommer då att bli 0,18%RF ((0,5-0,44)×3%RF).

Vidare är det rimligt att anta att läget hos tyngdpunkten i cementpasta är normalfördelad om man tar ut ett stort antal prov och att konfidensintervallet för bedömningen ovan är cirka 68%. Täckningsfaktorn blir då lika med 1 och standardiserade mätosäkerheten (S_r) blir:

$$S_r = \frac{0,18}{1} = 0,18\% \text{ RF}$$

s) Kondens i provrör vid transport av uttagna prover

Det är vanligt att lägga betongbitarna i provrör på provtagningsplatsen och försluta dem med gummikork. Provrören transporteras sedan till ett laboratorium för att där utföra RF-mätningen. Under transporten får det inte kondensera vatten på provrörets insida eftersom det torkar ur betongbiten. När vattnet sedan återgår till betongen kommer uppfuktningen ske efter en annan jämviktsfuktkurva, uppfuktnings- istället för uttorkningsisotermen som den följde innan under förutsättning att den höll på att torka.

Risk för kondens på provrörets insida förekommer då mycket fuktiga prover utsätts för en liten temperatursänkning eller prover med normal fuktighet utsätts för en relativt stor och snabb temperatursänkning. Stora temperatursänkningar kan uppkomma då provet transporteras i en bil vintertid enligt Andersen och Sjöberg (1998) eller i bagageutrymmet på ett flygplan. Det gör egentligen inget om temperatursänkningen är stor, om den är långsam. Snabba temperatursänkningar ger temperaturskillnad mellan provet och provröret vilket medför risk för kondens.

Exempel

Om ett betongbit som är tagen från ett golv med cirka 85%RF får komma i jämvikt med luften i ett provrör får också luften 85%RF. Ånghalten blir då $15,6 \text{ gram/m}^3$ ($17,3 \cdot 0,85$) i provröret och daggpunkten ungefär 13°C vilket innebär att om provrörets temperatur hastigt sänks under den temperaturen finns risk för kondens på provrörets insida.

Vanligt värde på S_s

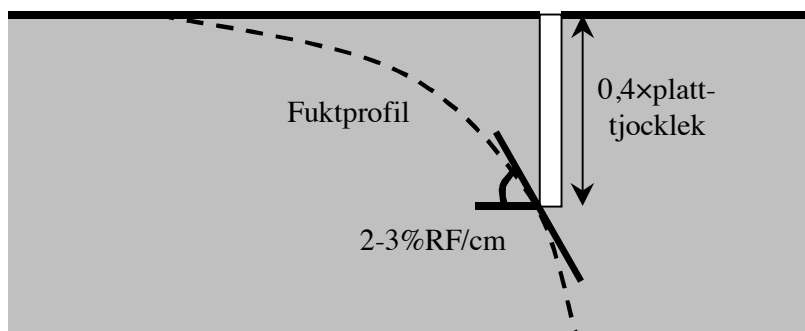
Om man tänker på hur man förvarar provrören med betongbitar under transport behöver man inte utsätta dem för temperaturer som ger kondensrisk. Osäkerheten (S_s) kan då försummas.

$$S_s = 0\% \text{ RF}$$

t) Avvikelser i mätgålets djup

Borrhålen blir inte alltid precis så djupa som de ska vara. Denna avvikelse är till exempel viktig när man mäter RF på karaktäristiskt djup vid uttorkning av betongplattor och jämför detta med ett kritiskt gränsvärde. Om hålet borrar för djupt kommer mätvärdet att ligga på säkra sidan medan om det däremot borrar för grunt kommer ett lägre värde än det på karaktäristiskt djup att mätas.

RF kan variera mycket i till exempel ett uttorkat ytskikt men även normal husbyggnadsbetong som fått torka enkelsidig uppvisar markanta RF-gradienter på karaktäristiskt djup. I en sådan platta som är 100 mm tjock är RF-gradienten på karaktäristiskt djup 2-3%RF/cm, se figur 18.



Figur 18. RF-gradientens lutningen vid karaktäristiskt djup för en normalbetong med cirka 85%RF.

Foderröret skall nå ända ner till karaktäristiskt djup och inte slutar några mm för högt. Mätvärdet blir i annat fall lägre än om det gick ända ner till karaktäristiskt djup. Distansspinnen på bormaskinen är ett hjälpmedel för att avgöra när borrhålet är tillräckligt djupt.

Vanligt värde på S_t

Antag att det är väldigt liten sannolikhet att foderrörets underkant hamnar mer än 1 cm fel och att det innebär $\pm 3\%RF$. Låt säga att konfidensintervallet är 99%, då blir täckningsfaktorn 2,576. Om avvikelser i borrhålets djup bedöms vara normalfördelad blir den standardiserade mätosäkerheten (S_t) lika med:

$$S_t = \frac{3}{2,576} = 1,16\% RF$$

u) Felaktig plattjocklek

Det förekommer att uppgiften om plattans tjocklek inte stämmer med den aktuella tjockleken. Felaktigheten kan bero på att uppgiftslämnaren har blandat ihop olika siffror eller kommer ihåg fel. Det kan också bero på att plattan av någon anledning inte fick det mått vid gjutning som stod angivet på ritningen. I vilket fall som helst blir utvärderingen av maximal fuktighet efter utjämning av kvarvarande byggfukt felaktig om måttet på plattans tjocklek inte är riktigt. Efter applicering av en tät ytskikt kommer hela plattan att få den nivå på fuktighet som rådde på karakteristiskt djup innan omfördelningen.

Om plattan är tjockare än de uppgifter som ligger till grund för beräkningen av karakteristiskt djup kommer mätvärdet att bli för litet. Det beror på att mätningen inte skedde på "riktigt" karakteristiskt djup utan på ett mindre djup där betongen hunnit torka mer.

RF-gradienter på karakteristiskt djup i normal husbyggnadsbetong kan vara i storleksordningen 2-3%RF/cm vid 85%RF

Genom att alltid mäta plattan eller bjälklagets tjocklek vid provtagningsplatsen med UL (Ultraljud) eller med ett genomgående hål råder det aldrig några tveksamheter om plattans tjocklek på den aktuella platsen. I så fall kan osäkerhet på grund av den här faktorn försummas.

Vanligt värde på S_u

Antag att en 200 mm tjockt bjälklag med kvarsittande form är 10% för tjockt grund av osäkerhet i formsättning och formens deformationer under gjutningen. Det innebär att karakteristiskt djup antas till 80 mm istället för 88 mm eftersom enkelsidig uttorkning förekommit.

Avvikelsen i RF blir då 2,4%RF (0,8 cm $\times$ 3%RF/cm).

Uppskatta att antagandet ovan har 95% konfidensintervall och därmed en täckningsfaktor på 1.960. Den standardiserade osäkerheten (S_u) blir:

$$S_u = \frac{2,4}{1,960} = 1,22\% \text{ RF}$$

Vanligt värde på total osäkerhet i RF-mätningar

För att beräkna den totala osäkerhet i RF-mätningar kombineras de 21 standardiserade mätosäkerheterna $S_a \dots S_u$.

Den kombinerad standardiserad mätosäkerhet ("statistiska kompromissen") kan enligt Lindskog (1997) uttryckas:

$$S_{\text{tot}} = \sqrt{S_a^2 + S_b^2 + S_c^2 + \dots + S_s^2 + S_t^2 + S_u^2}$$

där:

S_{tot} = kombinerad standardiserad mätosäkerhet

$S_a \dots S_u$ = standardiserad mätosäkerhet för faktor a...u

Den kombinerad standardiserad mätosäkerhet har en standardiserad täckningsfaktor på ett och dess konfidensintervall är lika med 68,27.

Alla 21 faktorerna kommer inte inverka vid alla mätningar. Några kommer alltid att kunna uteslutas och ibland kan det antagligen tillkomma andra faktorer än de som finns upptagna i rapporten.

Beroende på hur man utför kalibreringen och hur man mäter kommer mätosäkerheten att få olika värde. Detta beror på att olika faktorer inverkar i olika mätsituationer. Mätteknikern skall bestämma de faktorer som inverkar vid varje mätsituation samt bedöma deras storlek för att fastställa den aktuella mätosäkerheten.

Vanligt värde på S_{tot}

För att exemplifiera resonemanget på förra sidan kan man tänka sig att två mätningar utförts med samma utrustning. I det första fallet är instrumentet kalibrerat med hjälp av jämvikts-RF ovanför saltlösning och mätningen utförd i borrhål. I det andra fallet är metoden för kalibreringen ändrad så den utförs i en tvåtrycksapparat och mätningen görs istället på uttagna betongbitar.

Mätning i borrhål, kalibrerat mot "saltlösningar"

De faktorer som inverkar vid den här mätningen är hämtade från rapporten. Genom att kombinera de vanliga värdena för de faktorer som bedöms inverka får man den kombinerade standardiserade mätosäkerheten. Faktorer som bedöms inverka:

$S_a^{\#}$	Icke-linearitet hos RF-instrument	1,22%RF
$S_b^{\#}$	Drift hos RF-prob	0%RF
S_c	Hysterés hos RF-prob	0,61%RF
$S_d^{\#}$	Temperaturavvikelse under kalibrering	-0,06%RF
S_e	Slumpmässiga faktorer hos saltlösningar	0,17%RF
S_f	Temperaturvariationer under kalibrering	2,01%RF
S_g	Övriga faktorer vid kalibrering	0%RF
$S_i^{\#}$	Fuktmätningen vid annan temperatur än vid kalibrering	0%RF
$S_j^{\#}$	Fuktmätningen vid annan temperatur än i bruksskedet	0,56%RF
$S_k^{\#}$	Förvaring av RF-prob i torr miljö	0%RF
$S_m^{\#}$	Fuktkapacitet hos RF-prob vid mätning i borrhål	2,0%RF
$S_n^{\#}$	Temperaturskillnad mellan sensor och betong	1,49%RF
$S_o^{\#}$	Nyligen borrhålad mätvärde	0%RF
$S_p^{\#}$	Avvikande alkalitet	0%RF
S_q	Temperaturvariationer under mätning	0,61%RF
S_t	Avvikelser i mätvärdes djup	1,16%RF
S_u	Felaktig plattjocklek	1,22%RF
Kombinerad standardiserad mätosäkerhet		$\pm 3,96\%RF$

Mätning i provrör, kalibrerat med "tvåtrycksapparat"

De faktorer som inverkar vid den här mätningen är hämtade från rapporten. Genom att kombinera de vanliga värdena för de faktorer som bedöms inverka får man den kombinerade standardiserade mätosäkerheten. Faktorer som bedöms inverka:

$S_a^{\#}$	Icke-linearitet hos RF-instrument	1,22%RF
$S_b^{\#}$	Drift hos RF-prob	0%RF
S_c	Hysterés hos RF-prob	0,61%RF
S_h	Total mätosäkerhet för kalibrering i tvåtrycks fuktgenerator	0,18%RF
$S_i^{\#}$	Fuktmätningen vid annan temperatur än vid kalibrering	0%RF
$S_j^{\#}$	Fuktmätningen vid annan temperatur än i bruksskedet	0,56%RF
$S_k^{\#}$	Förvaring av RF-prob i torr miljö	0%RF
$S_l^{\#}$	Fuktkapacitet hos RF-prob vid mätning på uttagna prover	0,50%RF
$S_n^{\#}$	Temperaturskillnad mellan sensor och betong	1,49%RF
$S_p^{\#}$	Avvikande alkalitet	0%RF
S_q	Temperaturvariationer under mätning	0,61%RF
S_r	Ojämnt uttagna prover	0,18%RF
S_s	Kondens i provrör vid transport av uttagna prover	0%RF
S_u	Felaktig plattjocklek	1,22%RF
Kombinerad standardiserad mätosäkerhet		± 2,56%RF

Genom att välja en annorlunda metod för kalibrering och handhavande vid mätning är det möjligt att minska osäkerheten i en mätning till 2/3 av ursprungligt värde enligt exemplet ovan. Mätosäkerheten minskar från 3,96 till 2,56%RF genom att en bättre kalibrering görs och en säkrare metod väljs för mätningen.

Utvidgad mätosäkerhet

Hedenblad (1995) föreslår att man ska använda täckningsfaktor två för att få ett större konfidensintervall. Enligt tabell 16 som är hämtad från definitioner av utvidgad mätosäkerhet i början av rapporten blir konfidensintervallet lika med 95,45% då täckningsfaktor två används och man har ett dubbelsidigt konfidensintervall.

Har man bara ett enkelsidigt konfidensintervall som är fallet då man vill visa att aktuellt RF ligger under en kritiskt nivå blir konfidensintervallet 97,73% då man använder täckningsfaktor lika med 2. I ett sådant fall är det antagligen tillräckligt att använda den standardiserade mätosäkerheten som har 84,14% konfidensintervall eller möjligtvis gå upp till 95% med hjälp av täckningsfaktor 1,645.

Det är mindre än 5% sannolikhet att det sanna värdet ligger utanför mätetalet + eller - utvidgad mätosäkerhet i det fallet.

Tabell 16. Täckningsfaktor och motsvarande konfidensintervall.

Täckningsfaktor	Konfidensnivå %	
	Dubbelsidigt	Enkelsidigt
0,676	50	75
1	68,27	84,14
1,645	90	95
1,960	95	97,5
2	95,45	97,73
2,576	99	99,5
3	99,73	99,87

Vanligt värde med 95% sannolikhet

Om en mätosäkerhet med 95% konfidensnivå önskas för ett enkelsidigt konfidensintervall gäller:

$$U_{95} = TF \cdot S_{\text{tot}}$$

där:

U_{95} = utvidgad mätosäkerhet med 95% konfidensnivå
TF = täckningsfaktor, 1,645 enligt tabell 16

Mätning i borrhål, kalibrerat mot "saltlösningar"

$$U_{95} = 1,645 \cdot 3,96 \% \text{ RF} = 6,51 \% \text{ RF}$$

Mätning i provrör, kalibrerat med "tvåtrycksapparat"

$$U_{95} = 1,645 \cdot 2,56 \% \text{ RF} = 4,21 \% \text{ RF}$$

Enligt första exemplet ovan med mätning i borrhål är vanligt värde på kombinerad standardiserad mätosäkerhet (S_{tot}) $\pm 3,96\% \text{ RF}$. Vill man ha säkerheten med ett 95% konfidensintervall får man en utvidgad mätosäkerhet på $\pm 6,51\% \text{ RF}$.

Enligt EAL (1997) skall man alltid ange ett värde som mätvärde $\pm$ osäkerheten som tillhör mätvärdet. Osäkerheten får anges med högst två värdesiffror. Exempelvis ska U_{95} ovan anges som 6,5 istället för 6,51. Om avrundningen sänker osäkerheten med mer än 5% skall den avrundas uppåt istället. I exemplet ovan sänks osäkerheten med (0,01/6,51) 0,15%. Mätvärdet skall normalt avrundas så att minsta värdesiffran motsvarar minsta värdesiffran i osäkerheten. Täckningsfaktorn skall anges om den är skild från 1.

Exempel på hur det ska se ut är $90,0 \pm 6,5 \% \text{ RF}$, $TF = 2$.

Exemplet ovan innebär att mätinstrumentet visade $90,0 \% \text{ RF}$. Osäkerheten i mätningen har bestämt med ett 95% sannolikhetsintervall ($TF = 2$). Värdet på osäkerheten är $\pm 6,5 \% \text{ RF}$. Det skall tolkas som att det är 95% sannolikhet att det sanna värdet ligger mellan 83,5 och 96,5 $\% \text{ RF}$.

Om en mätning med denna osäkerhet skall visa att mattläggning kan ske ($\text{RF} < 85\%$) får instrumentet inte visa mer än 78,5 $\% \text{ RF}$. Resultatet $78,5 \pm 6,5 \% \text{ RF}$, $TF = 2$ visar att fuktnivån inte är högre än (78,5+6,5) 85 $\% \text{ RF}$.

Några möjliga förbättringar

Det är inte rimligt att ha en säkerhetsmarginal på storleksordningen 4-6%RF för mätosäkerheten. Men vad kan man då göra åt det?

Det är relativt enkelt att minska den totala osäkerheten i RF-mätningar med några enkla förändringar. Störst effekt har förändringen som görs på den största avvikelsen. Vill man däremot komma ner till väldigt låga osäkerheter skall man tänka genom alla steg och försöka förbättra sig överallt.

Genom att göra noggrannare kalibreringar kan man minska osäkerheten, det är inte nödvändigt att skicka iväg proben för kalibrering i en "tvåtrycksapparat" varje gång men det är bra att göra det ibland. Utnyttja de tillfällena till att kontrollera säkerheten i den egna kalibreringen genom att själv kalibrera proben direkt före och efter den skickas iväg.

Ett annat sätt är att förbättra rutinerna vid mätningen, till exempel genom att minska temperaturskillnaden mellan betong och sensor. Ett annat exempel är att försäkra sig om att jämviktstiden är tillräckligt lång vid mätning i borrhål, speciellt viktigt är detta att tänka på i byggfuktfri betong.

Upprepade mätningar (n st) minskar också den totala mätosäkerheten. De slumpmässiga faktorerna från handhavande reduceras då enligt:

$$S_{r(\text{red})} = S_r \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}$$

där:

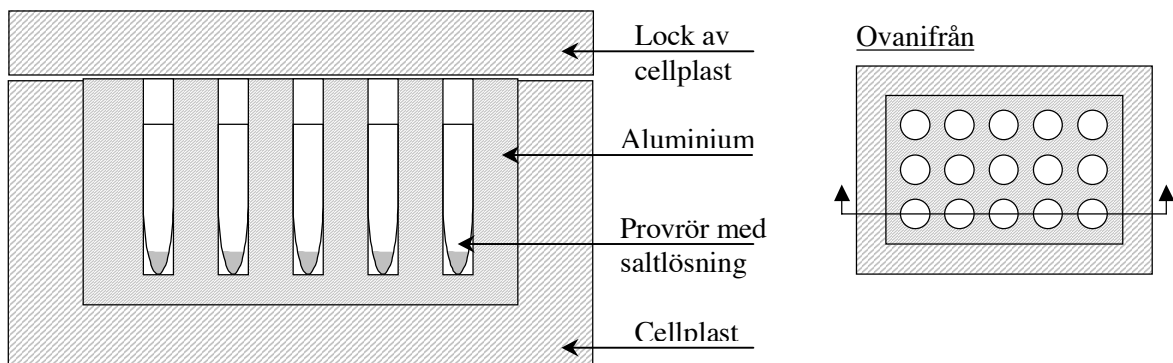
$S_{r(\text{red})}$ = Reducerad mätosäkerhet av faktor S_r

n = Antal mätningar

Observera att endast slumpmässiga faktorer som uppstår på grund av handhavande reduceras på det här sättet, inte den totala mätosäkerheten. De slumpmässiga faktorerna som uppstår vid kalibrering kan man reducera på motsvarande sätt genom att göra flera kalibreringar efter varandra. De systematiska faktorerna kvarstår fortfarande och om man inte tillreder en ny saltlösning varje gång så reduceras inte heller faktor S_e "slumpmässiga avvikelser hos saltlösningar".

Störst sänkning av den kombinerade standardiserade mätosäkerheten får man i det första exemplet om man minskar S_f (2,01%RF) ”temperaturvariationer under kalibrering”. Genom att omge ”provrören” med ett temperaturtrögt material som inte följer rummets transienta temperaturvariationer minskas denna osäkerhet.

På institutionen för byggnadsmaterial på Chalmers placeras provrör med mättad saltlösning i ett isolerat aluminiumblock enligt figur 19. Temperaturvariationerna under kalibreringen har på så sätt kunnat minskas från $\pm 1,0^\circ\text{C}$ till mindre än $\pm 0,1^\circ\text{C}$.



Figur 19. Principskiss av isolerat aluminiumblock för temperaturstabila kalibreringar.

Minskningen av variation i temperatur under kalibrering resulterar i en minskning av faktorn S_f från 2,01%RF till 0,19%RF. Genom att minska det största bidraget till kombinerad standardiserad mätosäkerhet minskar den från 3,96%RF till 3,42%RF. Med 95% konfidensnivå blir mätosäkerheten nu 5,63%RF istället för 6,51%RF.

S_f ”temperaturvariationer under kalibrering” minskas genom att placera behållaren (provröret) med saltlösning i ett värmetrögt material. Enklast är att skaffa ett lagom stort betongblock och borrar hål för provrör i det. Förvara blocket med provrör i ett så temperaturstabilt rum som möjligt.

Mätosäkerheten fortfarande mer än dubbelt så stor som Vaisala OY anger. Skillnaden är att man kan redogöra för vilka faktorer som inverkar på osäkerheten och hur stora de är.

För att minska mätosäkerheten ännu mer bör ansträngningar i tur och ordning inriktas på faktorerna $S_m^{\#}$ (2,0%RF)

”fuktkapacitet hos RF-prob vid mätning i borrhål”, $S_n^{\#}$ (1,49%RF) ”temperaturskillnad mellan sensor och betong” och $S_a^{\#}$ (1,22%RF) ”icke-linearitet hos RF-instrument”.

$S_a^{\#}$ ”icke-linearitet hos RF-instrument” kan minskas genom att uppskatta icke-lineariteten utifrån en kalibreringskurva som är gjord för det enskilda instrumentet och korrigera för den. Genom att göra denna uppskattning varje gång instrumentet kalibreras och jämföra dem får man en uppfattning om korrektionens osäkerhet.

$S_m^{\#}$ ”fuktkapacitet hos RF-prob vid mätning i borrhål” kan minskas genom att en RF-prob med låg fuktkapacitet används. Ett enkelt sätt att minska fuktkapaciteten på proben är att ersätta eventuella sintrade filter med ett enkelt beröringsskydd av plast eller metall.

$S_n^{\#}$ ”temperaturskillnad mellan sensor och betong” kan till exempel minskas genom att en isolerad låda ställs omkring RF-proben.

Nästa faktorer att reducera är S_u (1,22%RF) ”felaktig platttjocklek” och S_t (1,16%RF) ”avvikelser i borrhålets djup”.

S_u ”felaktig platttjocklek” kan minskas genom att mäta plattans tjocklek på det aktuella mätstället med ultraljud. Kvar blir osäkerheten i ultraljudsmätningen.

S_t ”avvikelser i mätstålets djup”. Kan minskas genom att vara noggrann med att borra till rätt djup i betongplattan. Använd gärna distansspinnen på bormaskinen istället för att ”köra på känn”.

Så kan man hålla på och succesivt reducera den för tillfället största faktorn för att komma ner till den nivå på mätosäkerhet man eftersträvar.

Ett annat sätt att minska osäkerheten är att utvärdera den på ett mer precist sätt. Det naturligaste sättet är att göra en separat korrektion för de systematiska faktorerna och sedan bestämma osäkerheten för de slumpmässiga. Osäkerheten i korrektionen skall i detta fall summeras till kombinerad standardiserad mätosäkerhet. Nackdelen med detta sätt är att det kräver större kunskap om de systematiska faktorerna än vad vi har i nuläget. Det kräver också mer av de som utför mätningen. Dels i form av kunskap om de faktorer som påverkar osäkerheten men också i form av ökad arbetsinsats eftersom det då behövs förbättrad dokumentation av rådande förhållanden och fler beräkningar för att ta fram korrektionens storlek i varje mätsituation

Konklusion

Denna rapport är ett första försök att bringa ordning bland de faktorer som bidrar till osäkerhet vid fuktmätning.

Rapporten har visat på följande saker:

- Det finns en mängd faktorer som bidrar med osäkerheter.
- Faktorerna ger en stor sammanlagd mätosäkerhet (mätfel) om man inte har de viktigaste under kontroll.
- I rapporten finns 21 faktorer analyserade och kvantifierade.
- Det går att kraftigt minska osäkerheterna på olika sätt.

Referenser

- Andersen, A., Sjöberg, A. 1998. Fukt och temperaturbelastning på betongprover vid transport i personbil. Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola. P-98:5. 15 sidor
- ASTM 1985 Standard E104-85. Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions. American Society for Testing and Materials, USA. 3 sidor .
- EAL 1997. Expression of the Uncertainty of measurement in Calibration. European cooperation for Accreditation of Laboratories. Publication Reference EAL-R2. 27 sidor.
- Gårlin, C., Hjort, M. 1995. Att mäta RF i betong –In situ mätningar. Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola. E-95:3. 57 sidor.
- Hedenblad, G., Janz, M. 1994. Inverkan av alkali på uppmätt RH i betong. Avdelningen för byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola. Rapport TVBM-3057. 26 sidor.
- Hedenblad, G. 1995. Fuktsäkerhet i byggnader. Uttorkning av byggfukt i betong – Torktider och fuktmätning. Byggforskningsrådet T12:1995. 54 sidor.
- Hedenblad, G. 1996. Fuktsäkerhet i byggnader. Materialdata för fukttransportberäkningar. T19:1996. 55 sidor.
- Lindskog, J. 1997. Mätvärdesbehandling och rapportering av mätresultat. Sandtorp Consult. 93 sidor.
- Nilsson, L-O. 1979. FUKTMÄTNING Del 2 av Byggfukt i Betongplatta på Mark, Torknings och Mätmetoder. Avdelningen för byggnadsmateriallära, LTH. Papport TVMB-3008. 75 sidor.
- Nilsson, L-O. 1987. Temperature effects in relative humidity measurements on concrete – some preliminary studies. Proceedings of Nordic Symposium on Building Physics, Lund. BFR-Rapport D13:1988. 7 sidor.
- Pastrav, M. 1990. Moisture and temperature measurements in concrete. Risk for misleading results when measuring in drilled holes. Proceedings of the 2nd Nordic Symposium of Building Physics in Nordic Countries, NTH, Trondheim. 6 sidor.