LUND UNIVERSITY

Mätosäkerhetsberäkningar för relativ fuktighet i betong : kompendium

Hedenblad, Göran

1999

Link to publication

Citation for published version (APA):
Hedenblad, G. (1999). *Mätosäkerhetsberäkningar för relativ fuktighet i betong : kompendium*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7146). 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

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
Lunds universitet

Avd Byggnadsmaterial

KOMPENDIUM I

MÄTOSÄKERHETSBERÄKNINGAR FÖR RELATIV FUKTIGHET I BETONG

Göran Hedenblad

TVBM-7146
Lund 1999

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Förord	2
1.	MATEMATISK BEHANDLING AV MÄTFEL	3
1.1	Inledning	3
1.2	Olika feltyper	3
1.2.1	Grova fel	4
1.2.2	Systematiska fel	4
1.2.3	Slumpmässiga fel	4
1.3	Några termer	7
1.4	Grundläggande teori	8
1.5	Känslighetsfaktorer	10
1.6	Olika standardmätosäkerhet	10
1.6.1	Normalfördelning	11
1.6.2	Rektangel– och triangelfördelning	13
1.6.3	Summering av flera oberoende fördelningar	14
1.6.4	Standardmätosäkerhet vid flera mätningar	16
2.	OLIKA FEL	17
2.1	Indelning av fel	17
2.1.1	Felkällor hos givare	17
2.1.2	Felkällor vid kalibrering	18
2.1.3	Felkällor vid handhavande	18
2.1.4	Övriga felkällor	18
2.2	Felkällor hos givare	18
2.3	Felkällor vid kalibrering	25
2.3.1	Kalibrering med tvåtrycksgenerator	25
2.3.2	Kalibrering med mättade saltlösningar	26
2.3.3	Kalibrering mot referensgivare	28
2.4	Felkällor vid handhavande	29
3	EXEMPEL PÅ OSÄKERHETSBERÄKNINGAR	41
3.1	Exempel	41
4	REFERENSER	49
5	BETECKNINGAR	50

FÖRORD

Forskning om fukt i material och byggnader har bedrivits vid Lunds Tekniska Högskola alltsedan skolans start 1964.

De teorier /1, 2, 3/ som ligger till grund för det statistiska innehållet i kompendiet är numera ett allmänt accepterat sätt att beräkna osäkerheten i en mätning. Detta gäller oavsett vilken typ av mätning som görs. Det kan vara relativ fuktighet (RF), längd, massa, hastighet, elektriska egenskaper, strålningsegenskaper mm.

Referenserna ovan är dock av mer generell natur och dessutom inte i första hand inriktade på RF-mätning i betong. De kan vara svåra att "ta till sig", vilket är en av orsakerna till detta kompendium. Förenklingar i teorierna har gjorts, där det bedömts vara nödvändigt för att öka läsförståelsen och för att underlätta användningen.

Innehållet i detta kompendium bygger dels på egna erfarenheter och dels på uppgifter som har hämtats från olika litteraturkällor. Då uppgifter har hämtats från litteraturen har författaren försökt att bedöma relevansen i uppgifterna. Dock kan information om olika mätmetoder, mätutrustningar och felkällor bli inaktuella relativt snabbt, allteftersom ny kunskap kommer fram samt allteftersom mätutrustningarna förändras.

En ambition har varit, att de som redan gör eller kommer att göra osäkerhetsberäkningar för andra uppmätta betongegenskaper, t.ex. tryckhållfasthet, draghållfasthet, skall känna igen sig i behandlingen av mätfel. Det är författarens förhoppning att innehållet i kompendiet är korrekt, men läsaren bör, precis som vid annan information, inte okritiskt anamma innehållet i skriften. Synpunkter på kompendiet kan lämnas på e-mailadressen; Goran.Hedenblad@byggtek.lth.se

Skriften har utarbetats av Göran Hedenblad, vid avdelning Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, i samråd med medlemmar i arbetsgruppen för "RBK – Auktoriserade fuktkontrollanter för betong". Nils Petersons, Swetec, har lämnat värdefulla synpunkter.

Lund i december 1999

Göran Hedenblad

1. MATEMATISK BEHANDLING AV MÄTFEL

1.1 Inledning

Numera har ett gemensamt sätt att definiera osäkerheten i en mätning utarbetats av sju internationella organisationer verksamma inom standardisering. Metoden finns beskriven i "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", förkortat GUM /1/. Detta sätt har accepterats och används numera av "European cooperation for Accreditation of Laboratories" (tidigare EAL, numera EA), som i Sverige representeras av SWEDAC. EAL har låtit utarbeta flera publikationer som belyser och exemplifiera metoden. /2, 3/.

Redovisningen i detta avsnitt bygger på ovan angivna publikationer samt på /4, 5/. Termer och definitioner är nästan helt hämtade från /2/ och /3/. Detta är gjort för att minska eventuell begreppsförvirring, om mätteknikern skulle arbeta inom flera områden, tex. hållfasthet och RF.

Uppgifter om ett mätresultat är fullständigt endast om det förutom mätvärdet även innehåller uppgift om mätosäkerheten för mätvärdet. Mätosäkerheten anger inom vilket område runt mätvärdet som det är rimligt att det "sanna" värdet ligger. Ju större mätosäkerhet, ju mer "inexakt" är mätvärdet.

En mätstorhet (utstorhet) Y beror vanligen på ett antal instorheter X_i (i = 1,2,...., N) enligt funktionssambandet

$$Y = f(X_1, X_2, \ldots X_N) \qquad (1)$$

Y kan tex. vara temperatur, RF, fuktkvot, fukthalt eller kapillärmättnadsgrad.

Funktionen f representerar mätproceduren och utvärderingsmetoden. Den beskriver hur värden på utstorheten Y erhålls från värden av instorheterna X_i.

X_i kan vid RF-mätning vara inverkan av tex. icke linearitet hos instrument, drift hos givare, mättemperatur skild från kalibreringstemperatur, kalibreringsfel mm.

Ekvation (1) säger egentligen bara att mätstorheten (mätvärdet), Y, beror på en mängd yttre faktorer, X_i. Om alla parametrar, X_i, som påverkar mätstorheten, Y, är kända kan den totala inverkan på Y beräknas. Men lika viktigt är, att då parametrarna är kända, kan normalt åtgärder vidtas vid kalibreringen och vid mätningen för att minimera inverkan av varje enskild parameter.

1.2 Olika feltyper

Vid mätning har man att beakta tre principiellt olika feltyper, (den klassiska klassificeringen) nämligen

- grova fel
- systematiska fel
- slumpmässiga fel

1.2.1 Grova fel

Enligt /6/ är grova fel den vanligaste typen av fel vid mätningar. Exempel på grova fel är
- fel mätområde avläst (tex. vid vissa typer av träfuktmätare med flera mätområden).
- fel kalibreringskurva använd vid omvandling av mätutslaget till RF.
- fel salt använt vid kalibrering av RF-givare.
- råkat sätta decimalkommat fel.

Lauber säger i /6/ att de flesta grova fel beror på människan och att arbetsmiljön spelar en väsäntlig roll. De grova felen kan uppdelas i

1) Fel som medför att mätsystemet ej fungerar korrekt (omedvetet fel).
2) Feltolkningar (omedvetet)
3) Underlåtenhetsfel (medvetet)

Dessa typer av fel orsakas oftast av den som utför mätningen, men kan påverkas av "arbetsmiljön". Den som utför en mätning kan alltså orsaka fel men hon/han kan även rätta fel.

1.2.2 Systematiska fel

Med systematiska fel (avvikelser) avses fel som återkommer vid varje mätning. De kan vara konstanta, ändras monotont (tex. drift) eller periodiska. Vid en mätning kan flera olika typer av systematiska fel förekomma samtidigt. Systematiska fel kan orsakas av t ex nätspänningsvariationer, temperatur, fukt eller belastande mätning.

Med belastande mätning avses att mätningen i sig kan påverka det uppmätta. Ett exempel är temperaturmätning på eller i en "kropp" med termoelement eller motståndstermometer. Givarens värmekapacitet måste vara försumbar jämfört med kroppens värmekapacitet för att inte påverka den mätta kroppens temperatur. Vidare kan värmeöverföringen mellan kroppen och givaren ske olika snabbt, dvs. det finns en termisk tröghet. Då kroppen har liten värmeledningsförmåga tar det längre tid för värmeöverföringen mellan kropp och givare jämfört med då kroppen har stor värmeledningsförmåga. I stycket ovan kan temperaturmätning ersättas med RF-mätning, termoelement och motståndstermometer med olika typer av RF-givare, värmekapacitet med fuktkapacitet, samt värmeledningsförmåga med fukttransportförmåga. Lauber /6/ säger "för att spåra belastande mätning, försök förstå mätningens fysik". Detta bör naturligtvis inbegripa såväl själva mätningen som de egenskaper mätsystemet har.

1.2.3 Slumpmässiga fel

Slupmässiga fel (avvikelser) utgörs av den oförutsägbara variationen mellan mätvärden. För att göra en helt korrekt mätning så skall man studera *en* parameter och samtidigt hålla alla andra parametrar konstanta /6/. Att hålla alla andra parametrar exakt konstanta är ej genomförbart i praktiken, olika störkällor inverkar. Det är med andra ord omöjligt att bestämma en parameters sanna värde. Vi kan däremot bestämma ett approximativt värde.

Inverkan av de olika störkällorna på parametrarna antas bero på slumpen. Fel som beror på slumpen kan hanteras med statistiska metoder.
De grova felen kan inte tas omhand av den presenterade metoden (inte heller av andra metoder), utan metoden gäller enbart för systematiska och slumpmässiga fel.

Instorheterna X_i kan uppdelas i två kategorier beroende på det sätt på vilket storhetsvärdet och den tillhörande mätosäkerheten har bestämts:

1. Storheter vars skattning och tillhörande osäkerhet har bestämts direkt i den löpande mätprocessen. Sådana värden kan erhållas t.ex. från en enstaka observation, upprepade observationer eller från bedömning som är baserad på erfarenhet. De kan innefatta bestämning av korrektioner till mätdons avläsning och korrektioner för influensstorheter såsom omgivningstemperatur, lufttryck och fuktighet.

2. Storheter vars skattning och tillhörande osäkerhet har tillförts mätprocessen utifrån, såsom storheter som hör till kalibrerade mätnormaler, certifierade referensmaterial eller referensdata erhållna från handböcker.

För en stokastisk variabel används standardavvikelsen som ett mått på värdenas spridning. Den standardmätosäkerhet, eller om risk för missförstånd inte föreligger, standardosäkerhet, som förknippas med skattningen av utstorheten, dvs. med mätresultatet y, är standardavvikelsen av mätstorheten Y. Den måste bestämmas med hjälp av skattningarna x_i av instorheterna X_i och deras tillhörande standardosäkerheter.

Osäkerheten i ett mätresultat beror, som ovan sagts, vanligtvis på flera olika instorheter (komponenter) som kan indelas i två kategorier, som baseras på vilken metod som används för att uppskatta deras numeriska värde.

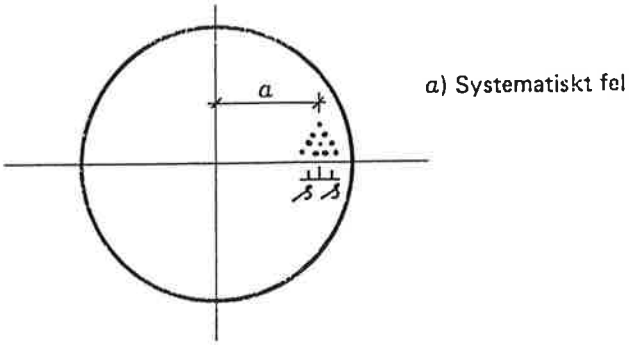
• **Utvärderingsmetod A för standardosäkerhet** är en utvärderingsmetod som baseras på en statistisk analys av en observationsserie.

• **Utvärderingsmetod B för standardosäkerhet** är en utvärderingsmetod som tillämpar andra förfaranden än statistisk analys av en observationsserie. I detta fall grundas utvärderingen av mätosäkerhet på annan rationell kunskap.

Uppskattningar av osäkerheten enligt typ A är nödvändigtvis inte mer pålitliga än välgrundade sådana av typ B, om de är baserade på begränsade data.

Det finns inte alltid ett enkelt samband mellan klassificering i komponent typ A eller typ B och den vanliga klassificeringen i systematiska och slumpmässiga fel.

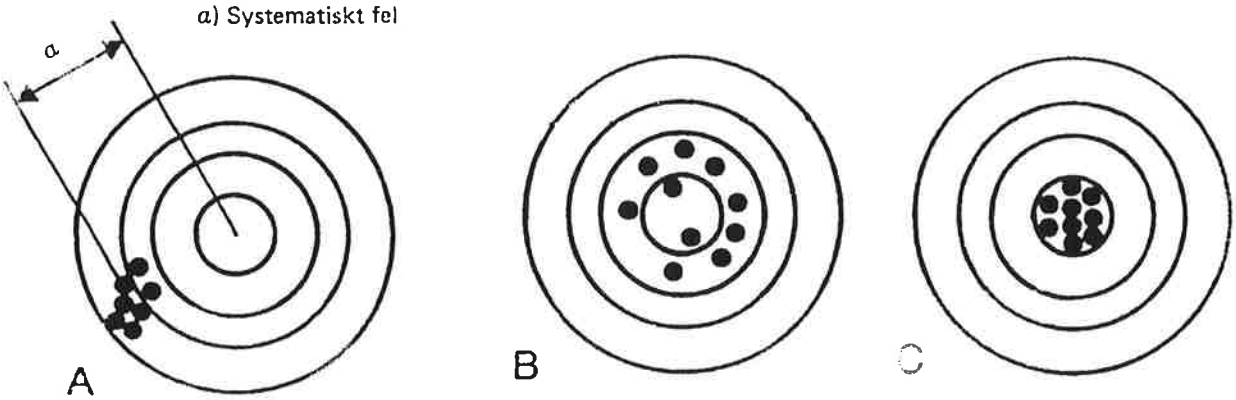
Systematiska och slumpmässiga fel kan beskrivas med hjälp av en träffbild på en måltavla.



Figur 1. Träffbild på måltavla som beskrivning av systematiska och slumpmässiga fel.

En korrektion (eller korrektionsfaktor) bör användas för att kompensera för varje systematiskt fel som påverkar mätresultatet. Osäkerheten hos en korrektion för att kompensera för systematiska fel är inte det systematiska felet mätningen , utan det är ett mått på otillräcklig kännedom om det nödvändiga värdet på korrektionen.

I Figur 2 visas exempel på olika träffbilder på en måltavla, /7/.



Figur 2. Illustration av några olika kombinationer av olika fel. /7/.

Figur 2, delfigur A visar samma träffbild som i Figur 1. Man kan minska eller helt ta bort det systematiska felet (avvikelsen) i delfigur A genom att justera siktet på geväret. Om detta görs ordentligt kan man få träffbilder enligt delfigur B eller C.

Figur 2, delfigur B visar att medelvärdet är i centrum, dvs. det systematiska felet är noll. Spridningen i delfiguren är däremot stor, vilket medför att standardavvikelsen blir stor. Siktet på geväret är rätt inställt men andra saker påverkar resultatet. Det kan vara att skytten är dåligt koncentrerad, darrhänt etc.

Figur 2, delfigur C visar en bra träffbild, dvs. det systematiska felet är noll och spridningen är liten. I detta fall fungerar allting, både gevär, skytt och omgivning.

1.3 Några termer

aritmetiskt medelvärde = summan av ett antal värden dividerat med antalet värden.

korrelation = graden av samvariation mellan två eller flera stokastiska variabler.

standard(mät)osäkerhet = mätosäkerhet uttryckt som standardavvikelse.

täckningsfaktor = en numerisk faktor med vilken standardmätosäkerheten multipliceras för att erhålla den utvidgade mätosäkerheten. Normalt används täckningsfaktorn (k) 2.0.

utvidgad mätosäkerhet (U) = storhet som kring ett mätresultat definierar ett intervall som kan förväntas omsluta en stor andel av fördelningen av värden som rimligen kan tillskrivas mätstorheten. Vid användning av standardmätosäkerheten är det ca 1/3 "sannolikhet" att det sanna värdet ligger utanför mätt värde ± standardmätosäkerheten. För att minska denna "sannolikhet" till ca 0.05 (5%) multipliceras standardmätosäkerheten med täckningsfaktorn 2. U används som mått på osäkerheten i hela mätningen.

utvärderingsmetod A = metod för utvärdering av mätosäkerhet genom statistiskt analys av en mätserie, se även avsnitt 1.2.3.

utvärderingsmetod B = metod för utvärdering av mätosäkerhet genom andra förfaranden än statistisk analys av en mätserie, se även avsnitt 1.2.3.

instorhet (X_i) = storhet som påverkar mätstorheten och som man tar hänsyn till i utvärderingsprocessen av ett mätresultat.

instorhetens skattning (x_i) = skattning av instorhet som används i utvärdering av ett mätresultat.

mätstorhet = särskild storhet som är mål för mätning.

utstorhet (Y) = storhet som representerar mätstorheten vid utvärdering av mätning.

utstorhetens skattning (y) = mätresultat beräknat från instorheternas skattningar med hjälp av modellfunktionen.

Relativ standardosäkerhet = standardosäkerheten för en kvantitet dividerat med skattningen för kvantiteten.

korrektionsterm (δ_j, Δ_j) = värde adderat till okorrigerat mätvärde för att kompensera för det systematiska mätfelet med ombytt tecken.

Korrigerat mätvärde = mätvärde justerat med korrektionsterm för den systematiska effekten av det systematiska mätfelet med ombytt tecken.

Känslighetsfaktor (c_i) = Mått på i vilken grad en variation hos en instorhet påverkar utstorheten.

1.4 Grundläggande teori

Ofta är den utstorhet, som är av intresse, av en kombination av instorheter. Dessa kan ofta beskrivas med matematiska formler. Beroende på formels uppbyggnad används olika sätt för att beräkna osäkerheten i utstorheten.

Om, t ex

$$\mathbf{Y = X_1 + X_2 - X_3} \qquad (2)$$

Dvs. den utstorhet (Y) som vi är intresserade av består av instorheter (X_i, i=1, 2,3,.....N) som summeras (adderas eller subtraheras) kan skattningen av utstorhetens standardmätosäkerhet, då instorheterna (i detta fall X_1, X_2 och X_3) är okorrelerade (det finns ingen samvariation mellan dem), skrivas som

$$\mathbf{u^2(y) = p_1^2u^2(x_1) + p_2^2u^2(x_2) + p_3^2u^2(x_3)} \qquad (3)$$

där p_1, p_2 och p_3 är känslighetsfaktorn för respektive X_1, X_2 och X_3.

Matematiskt exempel 1

Antag att vi har bestämt vikten för tre massor och dessutom uppskattat standardosäkerheten i varje viktsbestämning. Beräkna sammanlagda vikten för de tre massorna och ange mätosäkerheten.

$x_1 = 20$ g, $u(x_1) = 2$ g
$x_2 = 60$ g, $u(x_2) = 3$ g
$x_3 = 90$ g, $u(x_3) = 3$ g

Antag vidare att känslighetsfaktorerna: $p_1^2 = p_2^2 = p_3^2 = 1$.

$y = 20 + 60 + 90 = 170$ g

$u^2(y) = 1^2 \cdot 2^2 + 1^2 \cdot 3^2 + 1^2 \cdot 3^2 = 22 \Rightarrow u(y) = \sqrt{22} = 4.7$ g

Svar: Sammanlagda vikten för de tre massorna är 170 g ± 9.4 g (2·4.7). Den angivna utvidgade mätosäkerheten är produkten av standardmätosäkerhet och täckningsfaktorn k = 2, vilket för en normalfördelning svarar mot en täckningssannolikhet av ungefär 95 %.

Om, t ex.

$$\mathbf{Y = X_1 \cdot X_2 / X_3} \qquad (4)$$

dvs. den utstorhet (Y) som vi är intresserade av består av instorheter (X_i) som multipliceras eller divideras med varandra kan skattningen av utstorhetens relativa standardmätosäkerhet, då instorheterna (i detta fall X_1, X_2 och X_3) är okorrelerade, skrivas som

$$u^2(y)/y^2 = p_1^2u^2(x_1)/x_1^2 + p_2^2u^2(x_2)/x_2^2 + p_3^2u^2(x_3)/x_3^2 \qquad (5)$$

Ekvation (5) kan användas då relativa standardosäkerheterna är relativt små. Exempel ges under avsnitt 3, som även visar hur man kan förfara då ekv. (5) inte är lämplig.

Matematiskt exempel 2

Antag att vi har bestämt vikten för tre massor och dessutom uppskattat standardosäkerheten i varje viktsbestämning. Beräkna utstorheten Y enligt ekvation (4) för de tre massorna samt ange mätosäkerheten.

$x_1 = 20$ g, $u(x_1) = 2$ g $\Rightarrow u(x_1)/x_1 = 2/20 = 0.100$
$x_2 = 60$ g, $u(x_2) = 3$ g $\Rightarrow u(x_2)/x_2 = 3/60 = 0.050$
$x_3 = 90$ g, $u(x_3) = 3$ g $\Rightarrow u(x_3)/x_3 = 3/90 = 0.033$
Antag vidare att känslighetsfaktorerna: $p_1^2 = p_2^2 = p_3^2 = 1$.

$y = 20 \cdot 60/90 = 13.333$ g

$u^2(y)/13.333^2 = 1^2 \cdot 0.100^2 + 1^2 \cdot 0.050^2 + 1^2 \cdot 0.033^2 = 0.0136$

$u^2(y) = 13.333^2 \cdot 0.0136 = 2.4177 \Rightarrow u(y) = \sqrt{2.4177}$

$u(y) = 1.55$ g $\Rightarrow u(y)/y = 1.55/13.333 = 0.1163$.

Jämför detta värde med t ex $u(x_1)/x_1$ och det framgår ganska tydligt att den största relativa standardosäkerheten, $u(x_1)/x_1$, ger den absolut största inverkan på slutresultatet.

Osäkerhetsanalysen av en mätning - ibland kallad osäkerhetsbudgeten av en mätning - bör innefatta en förteckning av alla osäkerhetskällor tillsammans med de associerade standardosäkerheterna och deras utvärderingsmetoder. För upprepade mätningar måste även observationernas antal n anges. För klarhets skull rekommenderas att osäkerhetsanalysen görs i tabellform, ett exempel på detta visar Tabell 1.

TABELL 1. Schema för en metodisk uppställning av storheter, skattningar, standardosäkerheter, känslighetsfaktorer och osäkerhetsbidrag för användning av mätosäkerhet.

Storhet X_i	Skattning X_i	Fördelnings-funktion	Standardmät-osäkerhet $u(x_i)$	Känslighets-faktor c_i	Bidrag till standardmät-osäkerhet $u_i(y)=c_i \cdot u(x_i)$
X_1	x_1		$u(x_1)$	c_1	$u_1(y)$
X_2	x_2		$u(x_2)$	c_2	$u_2(y)$
.....	.....		.....	.....	.....
X_N	X_N		$u(x_N)$	C_N	$u_N(y)$
Y	Y				u(y)

1.5 Känslighetsfaktorer

Känslighetsfaktorn "definieras" i /2/ som "differentiell ändring i utstorhetens skattning på grund av differentiell ändring av en instorhets skattning dividerad med ändringen i denna instorhets skattning". Den beskriver hur mycket utstorhetens skattning, y, påverkas av en ändring med en enhet av den berörda instorhetens skattning x_i (i = 1,2,...., N).

Normalt så kan, för närvarande, känslighetsfaktorn sättas till ett (1), med följande undantag
- mätosäkerhetskälla: mätning av temperatur i luft. c_i = 5 %RF/°C
- mätosäkerhetskälla: mätning av temperatur i betong. c_i = 0.5 %RF/°C.

1.6 Olika standardmätosäkerhet

Ovan har visats att standardmätosäkerheten för en mätning, "normalt" [ekv. (3)] kan beräknas genom följande formel

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + + + s_N^2} \qquad (6)$$

där s_1^2, s_2^2 *etc.* är de enskilda bidragen till den kombinerade mätosäkerheten, för hela mätningen. I Tabell 1 kallas de enskilda bidragen $u_1(y)$, $u_2(y)$ etc.

I /8/ sägs att vid beräkning av standardmätosäkerheten för en mätning kan man normalt bortse från enskilda bidrag som är mindre än 20 % av det största enskilda bidraget.

Matematiskt exempel 3

$s_1 = s_2 = s_3 = 0.2 \quad s_4 = 1.0$

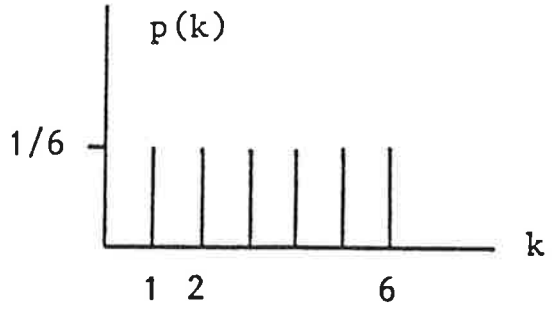
$$s = \sqrt{1.0^2 + 0.2^2 + 0.2^2 + 0.2^2} = \sqrt{1.12} = 1.06$$

De tre enskilda bidragen, som var och en är 20 % av det största värdet, ökade inte den kombinerade mätosäkerheten med mer än 6 % (1.06) jämfört med det enskilt största bidraget (1.0).

Vid beräkning av enskilda bidrag [$u_1(y)$, $u_2(y)$ etc. i Tabell 1] använder man sig normalt av tre olika spridningsfunktioner, beroende på hur väl de enskilda bidragen är kända.

Matematiskt exempel 4

En vanlig tärning har sex sidor, som alla har olika antal prickar, mellan ett och sex. Då tärningen kastas så vet vi att en av sidorna kommer uppåt. Det är lika "chans" att "ettan" kommer upp som någon av de andra sidorna. Varje sida har lika stor sannolikhet att komma upp som någon annan. Sannolikheten för en sida att komma upp är 1/6-del. Detta kan grafiskt illustreras enligt Figur 3.



Figur 3. Sannolikhetsfördelning för att en sida vid ett kast med en tärning. /9/.

X-axeln i Figur 3 anger antal prickar på respektive sida på tärningen. På Y-axeln visas sannolikheten för respektive sida att komma "upp", den är 1/6-del.

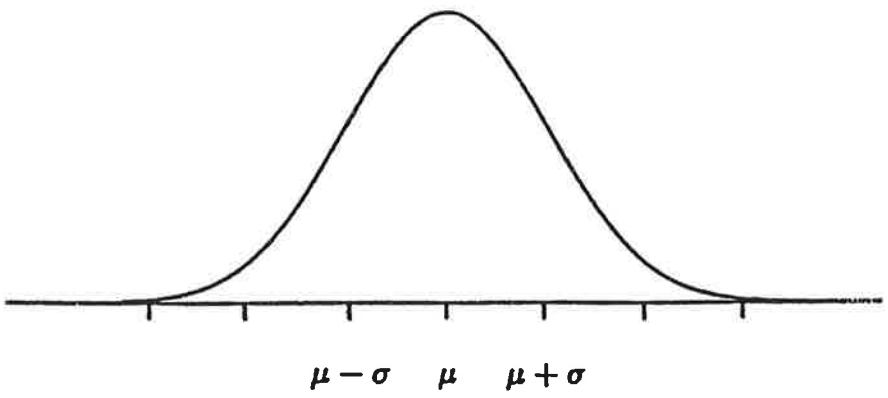
Summan av de sannolikheterna för de olika sidorna är

$$1/6+1/6+1/6+1/6+1/6+1/6=1$$

Då sannolikheten är ett (1) säger detta att alla möjliga fall finns inom området. I vårt fall är med tärningen är området 1 till och med 6.

1.6.1 Normalfördelning

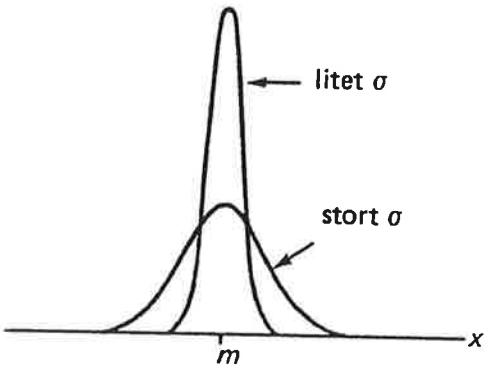
För utvärderingsmetod **A** (metod för utvärdering av mätosäkerhet genom statistisk analys av en mätserie) har man tillräckliga data för att bestämma medelvärde och standardavvikelse för en normalfördelning, se Figur 4.



Figur 4. Normalfördelning. /9/.

Normalfördelningen har ett medelvärde och en standardavvikelse (μ respektive σ i Figur 4). Standardavvikelsen är ett spridningsmått, som talar om hur utbredd normalfördelningen är i X-led. Figur 4 visar hur sannolikheten är fördelad längs X-axeln. Totala ytan mellan normalfördelningskurvan och X-axeln är lika med ett (1). Funktionen är symmetrisk runt medelvärdet, dvs. halva ytan (hälften av 1 = 0.5) ligger till vänster om medelvärdet och andra halvan av ytan ligger till höger om medelvärdet.

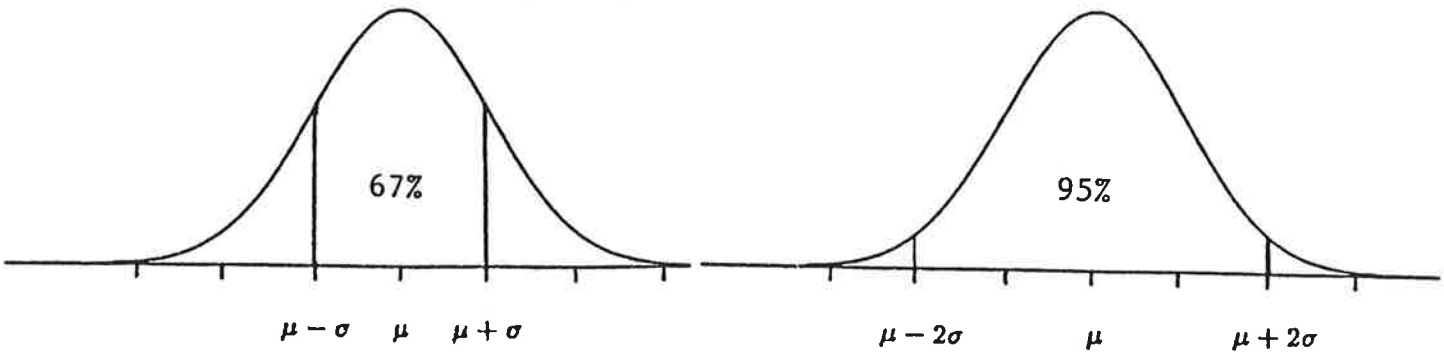
I Figur 5 visas inverkan av en numeriskt liten standardavvikelse och en numeriskt stor standardavvikelse, /10/.



Figur 5. Normalfördelningar vid två olika standardavvikelser. /10/.

Utseendet hos normalfördelningen beror på medelvärdet (m eller μ) och standardavvikelsen (s eller σ). [m, μ respektive s, σ; kära barn har många "namn". I annan litteratur förekommer ibland den ena ibland den andra beteckningen, varför alla är med här.]

Spridningsmåttet en standardavvikelse (1s) för normalfördelningen avser ca 67 % av ytan under normalfördelningskurvan, se Figur 6.



Figur 6. Normalfördelning med markering för en respektive två standardavvikelser. /9/.

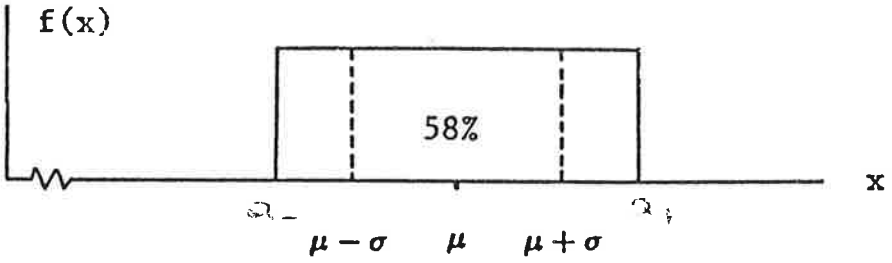
Om man gör hundra mätningar av tex. RF i ett material som har samma fuktinnehåll, så erhålls naturligtvis en spridning i mätvärdena. Ca 67 av de 100 mätningarna skall då ligga inom en standardavvikelse. Ca 95 av de 100 mätningarna skall ligga inom två standardavvikelser.

I många räknare för tekniska ändamål finns en funktion inlagd, med vilken medelvärde och standardavvikelse kan beräknas då de enskilda mätvärdena är kända.

Vad är då tillräckligt antal mätvärden? Det beror på hur väl man vill känna standardavvikelsen, eftersom denna blir mer väldefinierad ju fler mätvärden som ingår. I /10/ sägs att antal mätvärden bör överstiga ca 30.

1.6.2 Rektangel- och triangelfördelning

För utvärderingsmetod **B** (metod för utvärdering av mätosäkerhet genom andra förfaranden än statistisk analys av en mätserie) har man två olika sannolikhetsfördelningar som kan användas, nämligen rektangelfördelningen och triangelfördelningen. Då man använder dessa båda fördelningar har man normalt inte tillräckligt med mätdata för att göra en statistisk bearbetning av dessa. Dock vet man eller kan bedöma de yttre gränsvärdena a_+ respektive a_- inom vilka alla mätvärden ligger. Om alla mätvärden mellan de yttre gränsvärdena är lika troliga används en rektangelfördelning, se Figur 7.



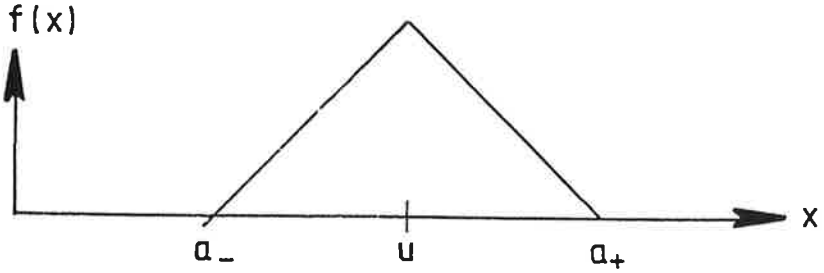
Figur 7. Rektangelfördelning. /9/.

Standardosäkerheten (standardavvikelsen) för en rektangelfördelning skrivs,

$$s = \frac{a}{\sqrt{3}} \text{ där } \quad a = \frac{a_+ - a_-}{2} \tag{7}$$

Genom att man vet eller kan uppskatta de yttre gränsvärdena kan standardavvikelsen direkt beräknas. Detta gäller även triangelfördelningen.

Om det är känt att värdena är mer grupperade runt mitten än mot de yttre gränserna kan en triangelfördelning vara lämpligare, se Figur 8. Men om man inte vet detta, är det "säkrare" att använda rektangelfördelningen.



Figur 8. Triangelfördelning.

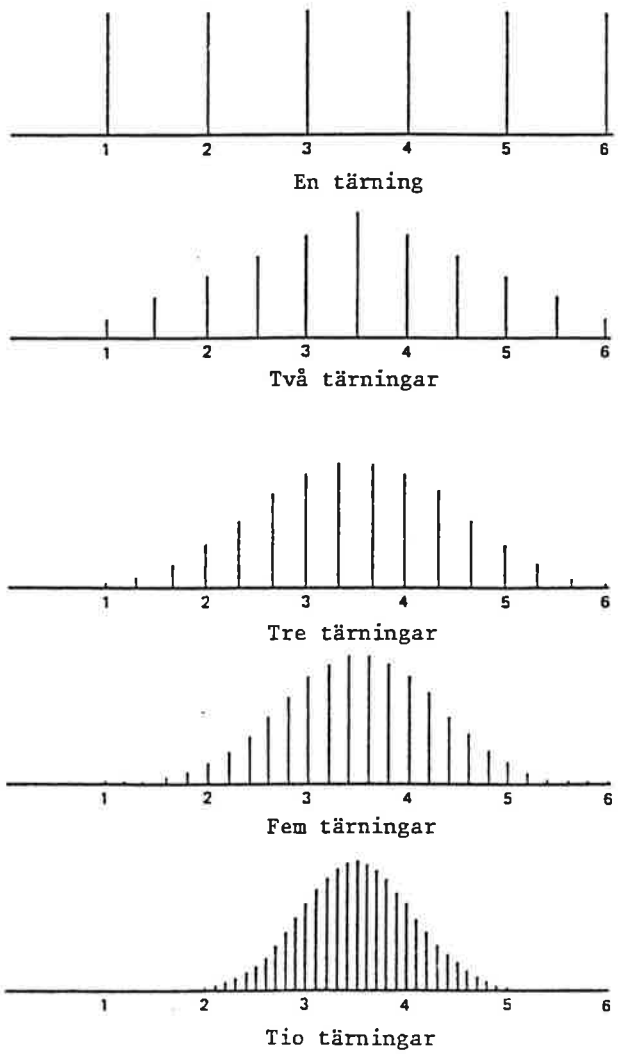
Standardosäkerheten (standardavvikelsen) för en triangelfördelning skrivs,

$$s = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad \text{där } a = \frac{a_+ - a_-}{2} \tag{8}$$

Då ekvation 1:8 jämförs med ekv. 1:7 framgår att standardosäkerheten är ca 30 % mindre för triangelfördelningen jämfört med rektangelfördelningen.

1.6.3 Summering av flera oberoende fördelningar

Då flera oberoende fördelningar summeras tenderar resultatet att bli normalfördelat. Ju fler termer som ingår i summan ju mer lik en normalfördelning blir resultatet. Detta gäller oavsett vilken fördelningstyp de ingående termerna har. Ett exempel visas i Figur 9, som gäller fallet att vi kastar olika antal tärningar. Då tärningen kastas enbart en gång är det lika stor sannolikhet att sidan med en, två, tre, fyra, fem eller sex prickar kommer upp, översta delfiguren. Då två tärningar har kastats fås fördelningen i nästa delfigur, efter division med antal kast (2). Fler tärningar gör att fördelningen blir mer och mer lik en normalfördelning.



Figur 9. Fördelning för medelvärdet vid kast med olika antal tärningar. /9/.

I tabellen nedan visas sannolikheten vid kast med två tärningar att "få upp" mellan 1 och 6 prickar på respektive tärning. För tärning "ett" (T1) är sannolikheten för respektive prick (sida) 1/6, vilket även gäller tärning "två" (T2).

↓T1 T2→	1	2	3	4	5	6
1	1/36	1/36	1/36	1/36	1/36	1/36
2	1/36	1/36	1/36	1/36	1/36	1/36
3	1/36	1/36	1/36	1/36	1/36	1/36
4	1/36	1/36	1/36	1/36	1/36	1/36
5	1/36	1/36	1/36	1/36	1/36	1/36
6	1/36	1/36	1/36	1/36	1/36	1/36

Den lägsta antalet prickar som kan fås för de två tärningarna är två, samt det högsta antalet prickar är 12.

Sannolikheten att få totalt 3 prickar är 1/36(1,2) + 1/36(2,1) = 2/36.
Värdena i (1,2) betyder 1 prick på tärning ett och 2 prickar på tärning två.
Sannolikheten att få totalt 4 prickar är 1/36(1,3) + 1/36(2,2) + 1/36(3,1) = 3/36.
Sannolikheten att få totalt 5 prickar är 1/36(1,4) + 1/36(2,3) + 1/36(3,2) + 1/36(4,1) = 4/36.
Osv.
I tabellen nedan visas sannolikheten för att få olika antal prickar.

Antal prickar	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sannolikhet	1/36	2/36	3/36	4/36	5/36	6/36	5/36	4/36	3/36	2/36	1/36

Om antalet prickar i tabellen ovan divideras med antalet tärningar (2), så erhålls den näst översta figuren i Figur 9.

Matematiskt exempel 5

Detta fall förekommer ofta vid uttagning av RF-prov för mätning av RF i laboratorium. Antag att vi har borrat/bilat oss ned till i medeltal 35 mm djup. Men detta djup är endast ett medelvärde och variationen i djup uppmäts till att vara ±5 mm. Från det borrade/bilade djupet och nedåt tar vi nu RF-prov. Då tillräcklig mängd provbitar har tagits så uppmäts djupet i botten på provtagningshålet. Det uppmäts till 50 mm ±5 mm. Vid båda nivåerna (35 och 50 mm) antas att ±5 mm är måttet a vid rektangelfördelning.

$$Medeldjupet = \frac{35+50}{2} = 42.5\ mm$$

Standardosäkerheten vid en rektangelfördelning är $a/\sqrt{3} = 5/\sqrt{3} = 2.98$mm. Detta gäller för de två nivåerna 35 och 50 mm. För medelvärdet har vi samma situation som i Figur 9 med två kast, som redovisar fördelningen för medelvärdet. Det kan visas att fördelningen för medelvärdet (42.5 mm) blir en triangelfördelning med standardosäkerheten = $5/\sqrt{6} = 2.04$ mm.

1.6.4 Standardmätosäkerhet vid flera mätningar [1)]

Om man gör flera olika mätningar av samma egenskap, tex. RF i en betongplatta, och mätningarna utförs exakt lika samt olika delar av plattan har exakt samma förhållanden, så kan man anta att varje mätning har samma standardosäkerhet.
Standardosäkerheten för en mätning betecknas med s_i.

Medelvärdet (summan av ett antal värden dividerat med antalet värden) för mätningarna beräknas, där n är antalet mätningar i ekv. (9).

$$Mv = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + + \ldots\ldots x_n}{n} \qquad (9)$$

Ju fler mätningar som görs, desto bättre känner man värdet på den mätta egenskapen. Detta resulterar i att standardosäkerheten för mätningarnas medelvärde minskar. Då man känner standardosäkerheten (standardavvikelsen), s_i för en mätning skrivs medelvärdets standardosäkerhet som

$$s_{Mv} = \frac{s_i}{\sqrt{n}} \quad \textit{där n är antalet mätningar} \qquad (10)$$

Matematiskt exempel 6

I Tabell 2 nedan redovisas medelvärdets standardosäkerhet (s_{Mv}) då standardosäkerheten i varje enskild mätning (s_i) = 1.

TABELL 2. Medelvärdets standardosäkerhet (s_{Mv}) beroende på antalet mätningar (n). $S_i = 1$.

N	s_{Mv}		N	S_{Mv}
1	$1/\sqrt{1} = 1.00$		5	$1/\sqrt{5} = 0.45$
2	$1/\sqrt{2} = 0.71$		6	$1/\sqrt{6} = 0.41$
3	$1/\sqrt{3} = 0.58$		7	$1/\sqrt{7} = 0.38$
4	$1/\sqrt{4} = 0.50$		8	$1/\sqrt{8} = 0.35$

I Tabell 2 framgår att flera mätningar minskar medelvärdets standardosäkerhet. Genom att göra tex. fyra mätningar av samma egenskap så minskar osäkerheten till hälften av osäkerheten för enbart en mätning. Vidare visas att störst inverkan på s_{Mv} har de första "extra" mätningarna. Då n är ca fem eller däröver avtar inverkan av en extra mätning.

1) Sättet ovan att reducera standardmätosäkerheten med att göra flera mätningar är ännu inte accepterat av RBK.

Några anledningar till detta är;

- Mätpunkterna kan komma i olika gjutetapper, dvs plattan har inte exakt samma förhållanden.
- Härdnings- eller torkförhållandena kan ha varit olika vid de olika mätpunkterna.
- Ytterligare erfarenhet av RBK-mätningar behövs.

2 OLIKA FEL

2.1 Indelning av fel

Fel kan delas upp i två huvudgrupper, nämligen icke matematiskt hanterbara och matematiskt hanterbara.

1) Icke matematiskt hanterbara:
- Grova fel

2) Matematiskt hanterbara:
- Systematiska fel (avvikelser, komponenter)
- Slumpmässiga fel (avvikelser, komponenter)

grova fel kan inte hanteras med matematiska metoder. Exempel på grova fel är t ex avläsning på fel skala, användning av fel kalibreringskurva eller fel inställning av instrumentet.

I utvärderingsmetoden för mätosäkerhet i publikationen EAL-R2-Sv anges indirekt, att alla fel som är matematiskt hanterbara har två komponenter, systematiskt fel och slumpmässigt fel. I bland är det systematiska felet noll, men även detta redovisas i osäkerhetsanalysen för en mätning.

Systematiska fel är fel som återkommer vid varje mätning. En korrektion bör användas för att kompensera för varje systematiskt fel som påverkar mätresultatet. Det exakta värdet på korrektionen oftast inte är känd, men det går att uppskatta inom vilka gränser det systematiska felet ligger. Detta hanteras matematiskt med ett systematiskt fel kombinerat med ett slumpmässigt fel, där det senare täcker in felgränserna.

Slumpmässiga fel är fel som utgörs av den oförutsägbara variationen mellan mätvärden. Dessa behandlas med statistiska metoder.

Genomgången nedan av olika fel och felkällor, som kan förekomma vid RF-mätning i betong, bygger på de genomgångar som redovisats i /4, 5/. För Humi-Guard har dock uppgifter från tillverkaren använts. Även om siffervärden anges för olika fel, beror storleken hos ett fel på det enskilda instrumentet och på den enskilda mätningen. I nedanstående genomgång av de olika felen används samma litterering som under Flik 12 i "Manualen" (Rutin för beräkning av osäkerhet i RF-mätning).

2.1.1 Felkällor hos givare

a) Spridning, konduktans (gäller Humi-Guard)
b) Icke linearitet hos RF-instrument.
c) Drift hos RF-givare, dvs. mätutslaget för en given RF ändras med tiden.
d) Hysterés hos RF-givare, dvs. olika kalibreringskurvor vid uppfuktning resp. uttorkning av RF-givaren.
e) Fuktkapacitet hos mätproben.
f) Noggrannhet på temperaturangivelse.

2.1.2 Felkällor vid kalibrering

g) Osäkerhet i kalibreringen.
h) Kalibreringstabell, temperatur (gäller Humi-Guard).
i) Kalibreringstabell, RF (gäller Humi-Guard).
j) Referenscell (gäller Humi-Guard).

2.1.3 Felkällor vid handhavande

k) Mättemperatur annan än kalibreringstemperaturen.
l) Mättemperatur annan än +20 °C.
m) Olika temperatur mellan RF-sensor och betong.
n) Borrningens inverkan.
o) Mättid.
p) Temperaturvariationer under mätning.
q) Ojämnt uttaget prov (gäller endast vid uttaget prov)
r) Avvikelse i mätdjup.
s) Avvikelse i plattjocklek.

2.1.4 Övriga felkällor

t) Ångläckage.
u) Temperatureffekter vid provförvaring.
v) Avdunstning vid provuttagning
Eventuellt finns andra, än de ovan redovisade, vilka ännu inte är kända.

I det följande görs en genomgång av de olika felen. Genomgången avspeglar dagens kunskap och allteftersom ny kunskap kommer fram bör innehållet i detta avsnitt revideras och kompletteras.

2.2 Felkällor hos givare

a) Spridning hos avläst värde för RF-givarnas konduktans (gäller Humi-Guard)

RF-givare från en och samma tillverkningsomgång är inbördes lika, dock inte exakt lika. Det finns en viss spridning på grund av tillverkningstoleranser. Spridningen leder till mätosäkerhet dels hos mätgivare och dels hos referensgivare. Följande siffervärden anges av Humi-Guard. Standardosäkerheten för enskild RF-givare är 0.5 % RF, oberoende om det är en referensgivare eller mätgivare. Då mätgivare och referensgivare fungerar endast tillsammans, så beräknas RF-systemets standardosäkerhet enligt följande.

$$u = \sqrt{\frac{u_1^2}{n_1} + \frac{u_2^2}{n_2}} \qquad (11)$$

$u_1 = u_2 = 0.5$ % RF, dvs. standardosäkerheten för enskild RF-givare.
n_1 = antal referensgivare.
n_2 = antal mätgivare.

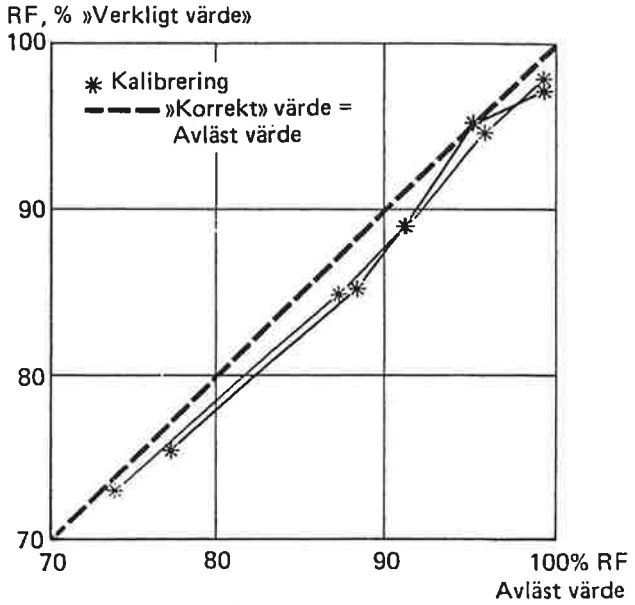
En referensgivare och en mätgivare ger standardosäkerheten 0.71 % RF.
Fyra referensgivare och en mätgivare ger standardosäkerheten 0.56 % RF.
Fyra referensgivare och tre mätgivare[1)] ger standardosäkerheten 0.38 % RF.

1) Mätgivarna förutsätts placerade strax intill varandra så att de kan anses mäta i en och samma punkt i betongen.

b) Icke linearitet hos RF-instrument (gäller Vaisala och Protimeter)

Det är vanligt att RF-sensorer inte är linjära över hela området 0 % till 100 % RF. Felet är mer eller mindre stort i olika instrument. Ett exempel på lineariseringsfel visas i Figur 10 nedan.

Det intressanta RF-området vid mätningar i betong är mellan ca 75 och 100 % RF. Ett sätt att minska lineariseringsfelet och eventuellt ta bort det är att göra kalibreringar på flera olika RF-nivåer inom området och därefter göra en kalibreringskurva, se Figur 10.



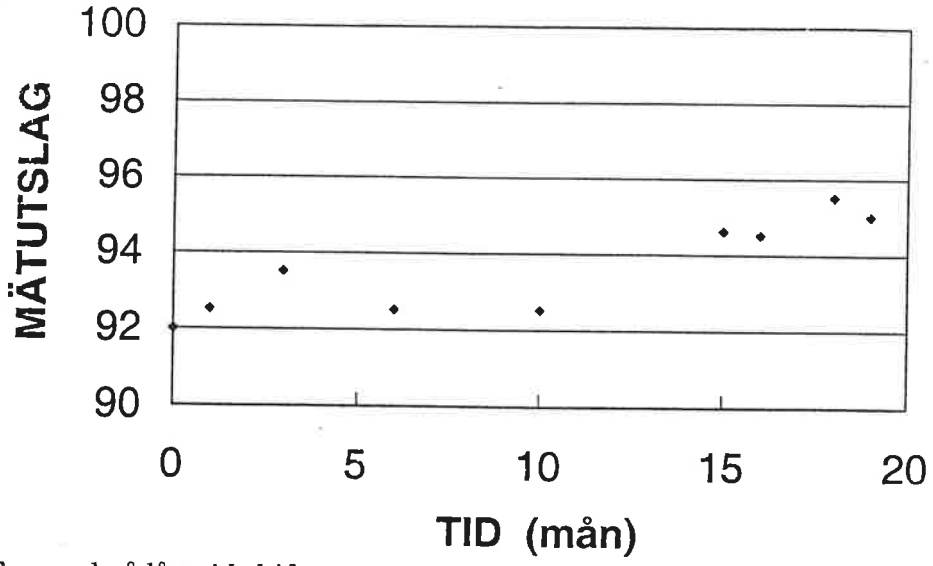
Figur 10. Exempel på olinearitet hos RF-givare. Uppmätt vid 2 olika laboratorier. /4/.

I Figur 10 framgår att vid 90 % RF så skiljer det ca 2 % mellan avläst RF och "korrekt" RF.

c)Drift hos RF-givare

Med drift avses att utslaget hos RF-givaren ändras med tiden (för samma RF). Om en RF-givare inte har någon drift är den långtidsstabil. Drift hos RF-givarna kan variera från en tid till en annan. Driften beror dels på tiden men även på hur ofta givarna används samt i vilken miljö de används. I Figur 11 visas ett exempel på drift. I /12/ sägs att kapacitiva eller resistiva

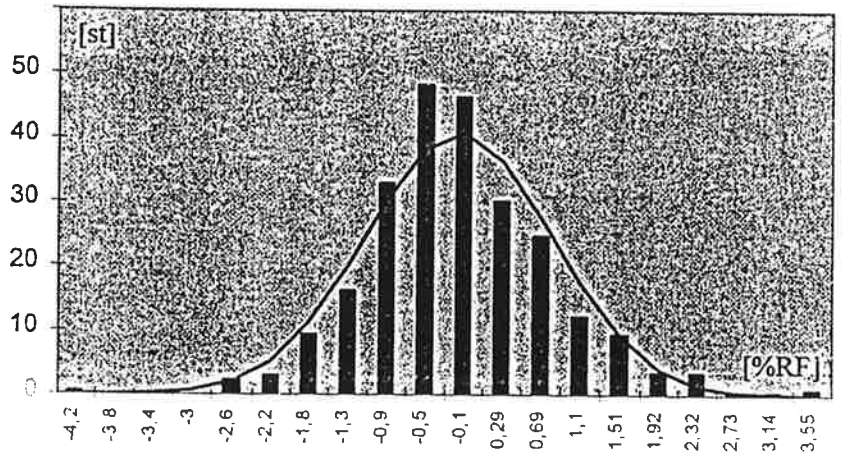
RF-givare kan drabbas av drift medan daggpunktsgivare kan ha goda långtidsegenskaper, se dock nedan



Figur 11. Exempel på långtidsdrift.

I Figur 11 framgår att då man endast ser driften mellan två närliggande kalibreringstillfällen blir resultatet beroende på vilka två tillfällen som väljs.

I /5/ har Anders Sjöberg undersökt driften hos ett antal av Vaisalas RF-prob HMP 36, genom att ta skillnaden i avläst värde mellan två kalibreringar och dividera med tiden mellan avläsningarna. Sjöbergs resultat redovisas nedan i Figur 12. Totalt 496 kalibreringar under 3 års tid är sammanställda i figuren.

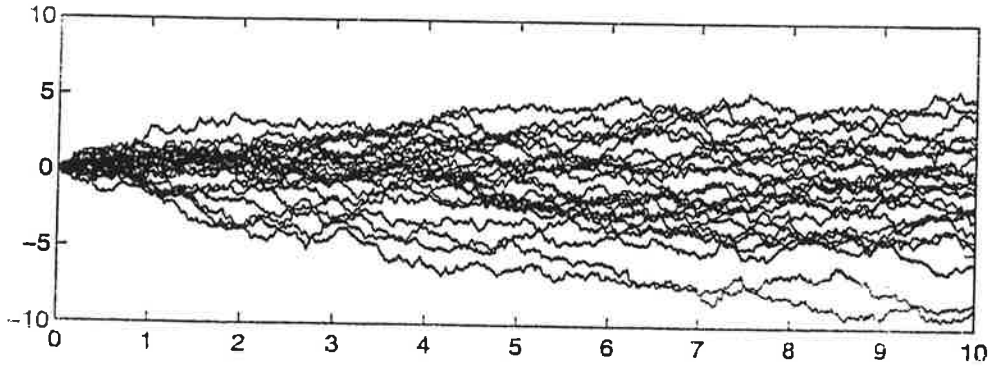


Figur12 . Passning av skillnader i avläst värde mellan två kalibreringsmätningar mot normalfördelningsfunktionen. /5/.

Av redovisningen i Figur 12 kan följande slutsats dras; för de undersökta RF-givarna är det sammanlagda systematiska felet noll (driften) för alla givarna tillsammans, men däremot är slumpfelet stort.

Med en slumpmässig variation enligt Figur 12, med en standardosäkerhet på ca 1 % RF, så blir den utvidgade standardosäkerheten (k=2) ca 2 % RF. Dvs. nästan hela, den enligt HusAMA 98 tillåtna mätosäkerheten är förbrukad.

I /11/ sägs att drift i mätsystem kan vara normalfördelat med medelvärdet noll och med en spridning som beror roten ur tiden ($\sqrt{t}$), se Figur 13.



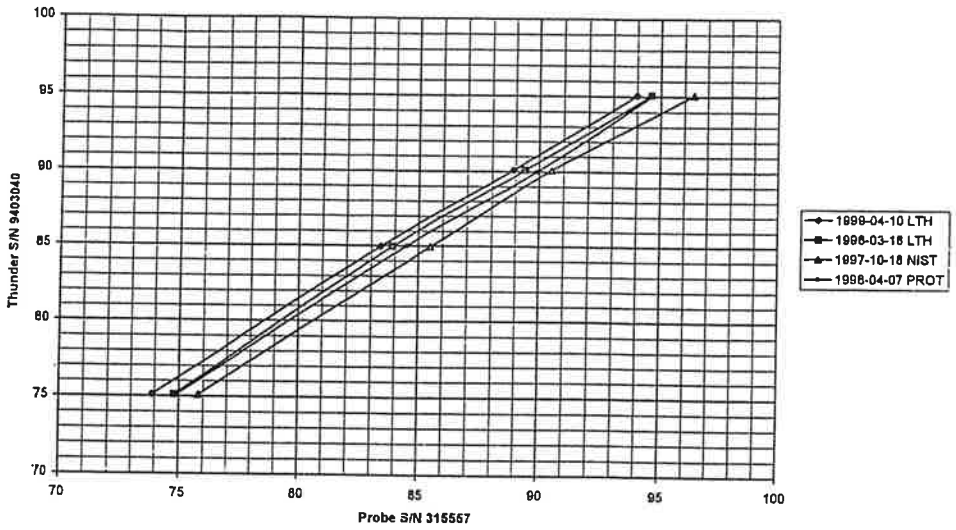
Figur 13. 25 exempel på drift i mätsystem. Simulerade funktionsvärden. /11/.

I Figur 13 framgår att det inte finns någon drift vid tiden noll (0) för något mätsystem. Därefter blir spridningen i driften mellan de olika mätsystemen (t.ex. RF-givare) större med tiden. Några mätsystem har positiv drift medan några har negativ drift och andra har nästan ingen drift alls. Nästan alla mätsystemen behåller var för sig sin riktning (positiv, negativ eller ingen) på driften. Av Figur 13, som enbart är teoretisk, kan följande slutsats dras; varje mätsystem måste behandlas som en individ och driften är unikt för detta mätsystem.

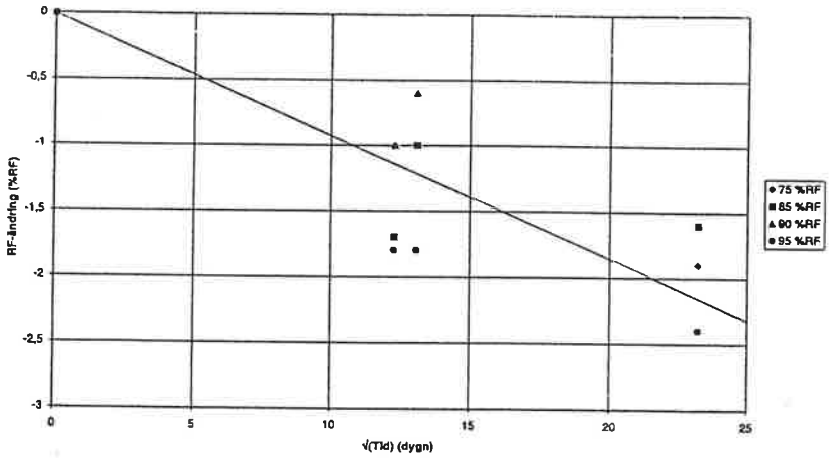
En orsak till att dela upp felen i systematiska fel och slumpmässiga fel är att en korrigering kan utföras för det systematiska felet. Detta medför att det återstående slumpmässiga felet blir mindre än det ursprungliga felet och det systematiska felet är "bortkorrigerat".

Även daggpunktsgivare som Byggnadsmaterial/ LTH använder har ibland drivit. I Figur 14 visas fyra olika kalibreringskurvor för en och samma daggpunktsgivare. Kalibreringarna är utförda vid olika tidpunkter.

Av Figur 14 framgår att givaren har drivit. Givaren är kalibrerad vid 75, 85, 90 och 95 % RF. Antag att driften hos denna givare beror på roten ur tiden ($\sqrt{t}$). På givaren avläst värde, för varje RF-nivå, vid den första kalibreringen används som utgångsvärde. Därefter beräknas skillnaden mellan varje senare kalibreringskurva, för varje RF-nivå, och den första kalibreringen, se Figur 15.



Figur 14. Kalibreringskurvor för en RF-givare. Kalibrering vid olika tider.



Figur 15. Drift hos en RF-givare som funktion av roten ur tiden ($\sqrt{t}$).

Av Figur 15 framgår att driften ökar med tiden och den kan delas upp i en systematisk del och en slumpmässig del. Den systematiska delen är approximativt en funktion av $\sqrt{t}$. Den slumpmässiga delen är approximativt lika stor hela tiden.

För att kontrollera att RF-givarna inte har drivit eller att driften är liten bör RF-givarens utslag kontrolleras ofta och regelbundet med en mättad saltlösning. Denna bör ha en RF som ligger i samma RF-område som man sedan mäter inom, t ex när det gäller betong är KCl-salt med ca 85 % RF ett lämpligt salt.

d) Hysterés hos RF-givarna

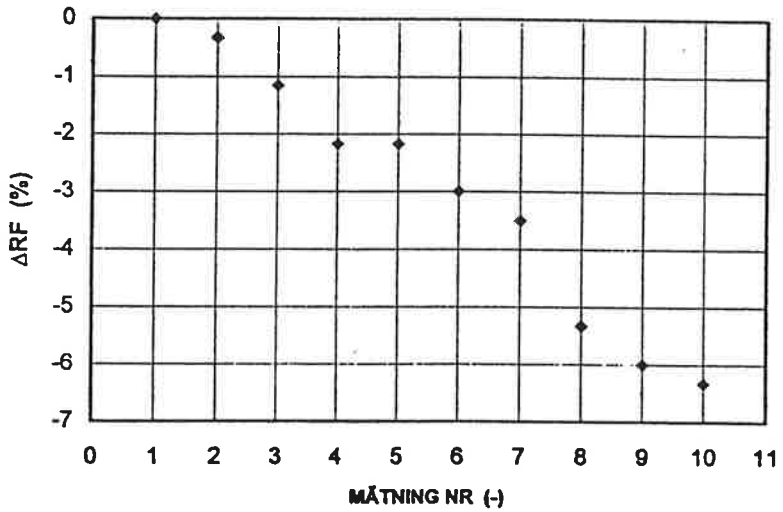
En undersökning som gjordes vid BML/LTH av hysterés hos två kapacitiva RF-givare gav till resultat att maximal skillnad i uppmätt RF var ca 1% då RF-givarna var under uppfuktning resp. under uttorkning. Detta fel är relativt enkelt att undvika om t ex kalibrering och mätning alltid sker från den lägsta relativa fuktigheten successivt upp till det högsta uppmätta RF-värdet. RF-givarna är då hela tiden på jämviktsfuktkurvan för uppfuktning. Det är lätt att undersöka om en RF-givare har hysterés genom att kalibrera först från låga RF successivt mot ökande RF och när den högsta RF-nivån är uppnådd successivt mot lägre RF. Hysterés torde inte förekomma hos daggpunktsgivare.

För Humi-Guard givaren har tillverkaren redovisat en uppmätt hysterés då en givare först har varit i 90 % RF, därefter i ca 98 % RF under två veckor och slutligen ånyo i 90 % RF. Tillverkaren anger standardosäkerheten till 0.2 % RF. För temperaturcykeln 22 °C – 12 °C – 22 °C uppmättes ingen hysterés.

e) Fuktkapacitet hos mätprob

Vid RF-mätning i betong sker ett fuktutbyte mellan betongytorna i borrhålet alternativt på de uttagna proverna i provröret och mätproben. Beroende på dels fuktkapaciteten hos mätproben och dels i betongytorna kan detta ta olika lång tid. Vidare inverkar betongens förmåga att transportera fram fukt till betongytorna, ju lägre transporthastighet desto längre tid tar det för att få jämvikt mellan RF-sensor och betong. Ju större fuktkapacitet en mätprob (sensor, filter och andra delar som kommer i kontakt med aktuell RF i betongen) har, desto längre tid tar det att uppnå fuktjämvikt.

I Figur 16 visas inverkan av RF-probens fuktkapacitet vid upprepade mätningar i betong med lågt vbt.



Figur 16. Exempel på inverkan av RF-probens fuktkapacitet vid upprepade mätningar i betong med lågt vbt. /13/.

I Figur 16 framgår att det systematiska felet blir större för varje mätning. Nilsson påpekar i /14/ att det första mätvärdet uppenbarligen är ca 0.6 % RF för lågt.

Skyddsfiltret är den detalj på RF-proben som normalt har störst fuktkapacitet. Beroende på vilken prob man använder varierar fuktkapaciteten mellan 1-10 mg i intervallet 40-97% RF. Dvs. om RF-proben har varit exponerad för rumsluft så tar den upp 1-10 mg fukt från att den stoppats i mäthålet tills det att filtret har kommit i jämvikt med fukten i betongen.
En mindre undersökning (1 givare av varje fabrikat) gav följande fuktkapaciteter.

Humi-Guard	ca 1 mg/(40-97%)RF
Vaisala HMP44	ca 4 mg/(40-97%)RF
Protimeter	ca 10 mg/(40-97%)RF

Under **e**) vid flik 12 i "Manualen" anges siffervärden som kan användas vid beräkning av fuktkapacitetens inverkan.

Vid mätning i borrhål med kvarsittande givare, så kommer så småningom RF-givaren helt i jämvikt med betongen, varför inverkan av fuktkapaciteten blir försumbar.

Uppgifter beträffande en RF-probs fuktkapacitet, i aktuellt RF-område, bör kunna lämnas av tillverkaren. Eventuell smuts i filter kan påverka fuktkapaciteten, så att den ökar.

f) Noggrannhet på temperaturangivelse

Humi-Guards mätprincip bygger på kvoten mellan två konduktanser och inte primärt på temperaturen. Mätosäkerhet hos temperaturen leder emellertid indirekt till mätosäkerhet hos RF, eftersom det sker en kompensering av RF-givarens temperaturberoende i datorprogrammet. Inom området +15 - +25 °C är denna standardosäkerhet 0.1– 0.2 %RF.

Vaisalas mätprincip bygger på kapacitansändring i en polymerfilm på grund av fuktupptagning i filmen. Vi kan tills vidare bortse från denna felkälla.

Protimeters mätprincip bygger på temperaturmätningar, vilket medför att en osäkerhet i temperaturgivarna direkt påverkar mätosäkerheten i % RF. Eventuellt kan en del av denna osäkerhet försvinna vid kalibrering mot kända RF. Dock kvarstår att om temperaturen registreras med enbart en decimal, och denna decimal används vid beräkning av RF så finns en felkälla.

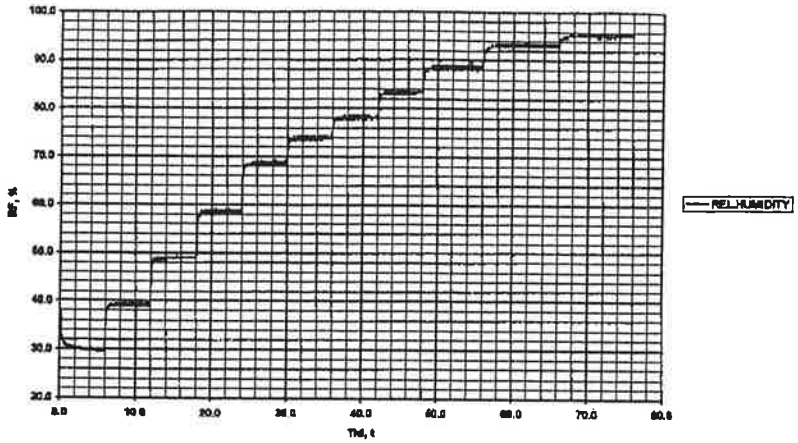
Matematiskt exempel 7

Antag att registreringen sker med en decimal, tex. 21.3 °C. Temperaturen inom intervallet 21.3 ± 0.05 °C registreras som 21.3 °C. I RF-givaren finns två st. temperaturgivare, båda då med ett intervall om ±0.05 °C. Antag att båda intervallen är rektangelfördelade, vilket innebär att det är lika stor sannolikhet för alla temperaturerna inom intervallet. Standardosäkerheten för en rektangelfördelning är $a/\sqrt{3} = 0.05/\sqrt{3} = 0.029$ °C. Standardosäkerheten förde två samverkande temperaturgivarna blir

$$\sqrt{0.029^2 + 0.029^2} = 0.04\,^{\circ}\mathrm{C}$$

Denna standardosäkerhet i temperatur medför att vi får en standardosäkerhet i RF på ca 0.2 % (0.04·5 = 0.2 %. En grads temperaturändring i luft medför att RF ändras med ca 5 %-enheter, känslighetsfaktorn, c_i, = *5*).

Som exempel på ovanstående resonemang visas i Figur 17 uppmätt RF i en daggpunktgivare under kalibrering i en tvåtrycks fuktgenerator.



Figur 17 Av daggpunktsgivare uppmätt RF vid kalibrering i en tvåtrycks fuktgenerator.

I Figur 17 framgår att på varje kalibrerad RF-nivå finns det en viss osäkerhet i mätutslaget, detta varierar något. Skalmätning i Figur 17 ger att standardosäkerheten är ca 0.2 % RF. Jämför även med Figur 19 som visar RF i fuktgeneratorn under kalibreringen.

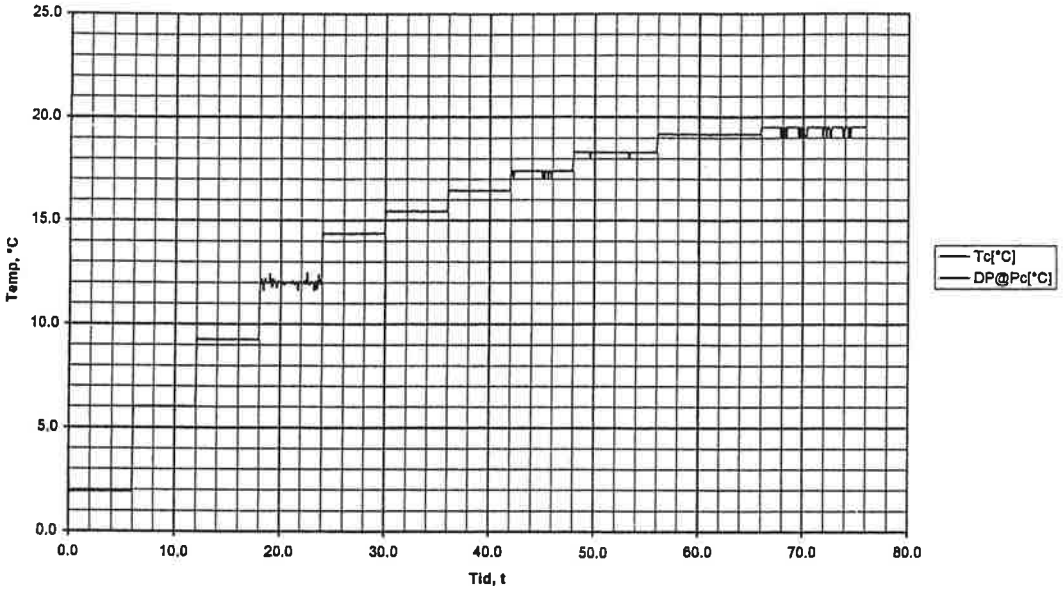
2.3 Felkällor vid kalibrering

g) Osäkerhet i kalibreringen

Kalibrering kan utföras på olika sätt. De två vanligaste är med hjälp av antingen mättade saltlösningar eller med en tvåtrycksgenerator

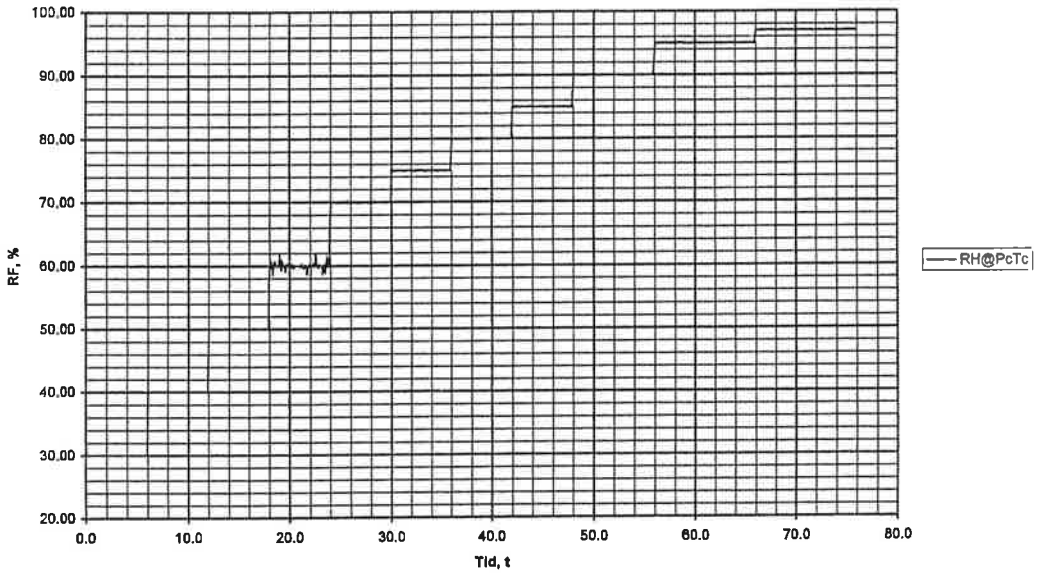
2.3.1 Kalibrering med tvåtrycksgenerator

Vid kalibrering i tvåtrycksgenerator erhålls ett kalibreringsprotokoll. Protokollet anger osäkerheten, i % RF, för alstrad RF på varje RF-nivå. I Figur 18 visas temperatur och daggpunktstemperatur i en Thunder Scientific 2000 tvåtrycks fuktgenerator under kalibrering av en daggpunktsgivare. Figur 19 visar RF i fuktgeneratorn vid samma tillfälle som i Figur 18.



Figur 18 Uppmätta temperaturer, under drift, i en tvåtrycks fuktgenerator.

Temperaturen i tvåtrycksgeneratorn är 20 °C, varför den knappast syns för rutmönstret.



Figur 19. Uppmätt RF i en tvåtrycks fuktgenerator, vid samma tillfälle som i Figur 18.

2.3.2 Kalibrering med mättade saltlösningar

De noggrannhetsangivelser som anges för de mättade saltlösningarna i Tabell 3 skall uppfattas så att det korrekta RF-värdet inte är helt känt men att det under ideala förhållanden ligger mellan det givna RF-värdet och de angivna gränserna. Detta kan betraktas som ett slumpmässigt fel med en triangelfördelning. I ursprungsstudien /15/ som ASTM E 104-85 bygger på sägs att de angivna gränserna avser tre gånger standardavvikelsen. I /15/ är dock är den statistiska behandlingen av data komplicerad, varför sättet ovan med en triangelfördelning rekommenderas där triangelfördelningens yttre gränser sätts till noggrannhetsangivelserna i Tabell 3.

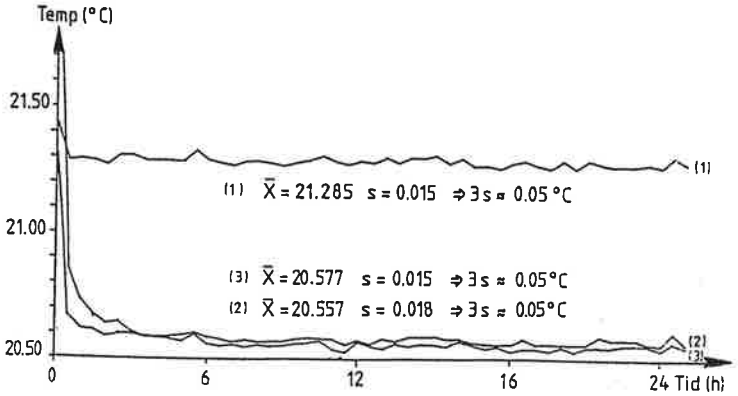
TABELL 3. RF för mättade saltlösningar (enligt ASTM E 104-85).

Salt	RF (%)			
	T = + 10 °C	T = + 15 °C	T = + 20 °C	T = + 25 °C
Litiumklorid LiCl	11.3 ± 0.4	11.3 ± 0.4	11.3 ± 0.3	11.3 ± 0.3
Magnesiumklorid $MgCl_2$	33.5 ± 0.2	33.3 ± 0.2	33.1 ± 0.2	32.8 ± 0.2
Magnesiumnitrat $Mg(NO_3)_2$	57.4 ± 0.3	55.9 ± 0.3	54.4 ± 0.2	52.9 ± 0.2
Natriumklorid NaCl	75.7 ± 0.2	75.6 ± 0.2	75.5 ± 0.1	75.3 ± 0.1
Kaliumklorid KCl	86.8 ± 0.4	85.9 ± 0.3	85.1 ± 0.3	84.3 ± 0.3
Bariumklorid $BaCl_2$	93 ± 2	92 ± 2	91 ± 2	90 ± 2
Kaliumnitrat KNO_3	96.0 ± 1.4	95.4 ± 1.0	94.6 ± 0.7	93.6 ± 0.6
Kaliumsulfat K_2SO_4	98.2 ± 0.8	97.9 ± 0.6	97.6 ± 0.5	97.3 ± 0.5

Det finns ytterligare salter än de ovan nämnda som kan användas för att alstra ett en viss RF. De ovan angivna salterna skall vara de bästa när hänsyn har tagits till bl.a. noggrannhet och kemisk stabilitet hos saltet.

Enligt ASTM-standarden E 104-85 orsakar en temperaturinstabilitet på ±0.1 °C under kalibreringen att den RF som alstras av saltlösningen kan bli fel upp till ±0.5 % RF. I ASTM-standarden anges inte om felet ±0.5 % RF avser en, två eller tre standardavvikelser, men troligtvis avses en standardavvikelse (1s), se nedan.

Byggnadsmaterial/ LTH, har kalibrerat med en temperaturinstabilitet på ±0.05 °C (3s), se Figur 20, och därvid fått att det slumpmässiga felet i RF blir ca ±0.2 % RF (1s).



Figur 20. Uppmätta temperaturvariationer vid kalibrering.

Enligt kommittén som arbetade fram ASTM-standarden var det vanligt att laboratorier hade en temperaturstabilitet som inte var bättre än ±0.5 °C, se /17/. Med denna temperaturinstabilitet blir noggrannheten i RF över den mättade saltlösningen inte bättre än ±2.5 % RF.

Enligt uppgift från Vaisala bör litiumklorid (LiCl) inte hanteras under +18°C.

Av ovan framgår att det är ytterst viktigt vid kalibrering av RF-givare med mättade saltlösningar att detta sker vid så konstant temperatur som det överhuvudtaget är möjligt att åstadkomma.

2.3.3 Kalibrering mot referensgivare

Vid kalibrering mot en referensgivare sätts båda RF-givarna i en fuktalstrare, (fuktgenerator) tex. saltlösningar. Då RF-värdena har stabiliserats för båda givarna avläses dessa. Referensgivaren har tidigare kalibrerats mot någon utrustning som har bättre noggrannhet. Till referensgivaren hör ett kalibreringsbevis som dels anger referensgivarens mätutslag (alternativt korrektionsterm) för ett eller flera RF och dels en angivelse av mätosäkerheten för de kalibrerade RF-nivåerna. Kalibreringsbeviset avser endast förhållanden vid kalibreringen på "referenslaboratoriet", varför det är lämpligt att göra en egen kalibrering både direkt före och direkt efter referensgivaren kalibrerats på referenslaboratoriet. Genom detta förfarande får man reda på om referensgivarens mätutslag har ändrats under transport etc.

Eventuell temperaturinstabilitet hos fuktgeneratorn kan påverka RF. Dessutom kan en temperatur skillnad finnas mellan aktuell RF-givare och referensgivaren.

h) Kalibreringstabell, temperatur (gäller Humi-Guard)

Standardosäkerheten *i* datorprogrammet som används vid omvandling av konduktansvärde till RF och temperatur är på grund av temperaturförändring ±0 % RF. (Uppgift från tillverkaren).

i) Kalibreringstabell, RF (gäller Humi-Guard)

Standardosäkerheten i datorprogrammet som används vid omvandling av konduktansvärde till RF och temperatur är på grund av RF-förändring ±0.4 % RF. (Uppgift från tillverkaren).

j) Referenscell (gäller Humi-Guard)

Referenscellen som skall hålla 90 % RF har standardosäkerheten ±0.6 % RF. (Uppgift från tillverkaren).