

Fuktmätning i betong

Temperatureffekter samt korrigeringsförfarande vid
RF-mätning

Hans Fredin
Håkan Skoog

Fuktmätning i betong

Temperatureffekter samt korrigeringsförfarande vid
RF-mätning

Moisture measurements in concrete

Temperature effects and corrections on relative
humidity measurements

Hans Fredin
Håkan Skoog

ISRN: LUTVDG/TVBM--05/5057--SE (1-98)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds tekniska högskola
Byggnadsmaterial
Box 118

221 00 LUND

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se

Förord

Detta examensarbete utfördes under hösten 2004 på Lunds Tekniska Högskola. Studien initierades efter samtal mellan Munters Torkteknik AB och Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.

Vi vill rikta ett stort tack till vår huvudhandledare Kenneth Sandin samt vår bihandledare Anders Sjöberg.

Stefan Backe var en bra hjälp för oss i labbet och ett extra stort tack till honom.

Tack även till Martin Engman på Munters Torkteknik för synpunkter och förslag kopplade till fuktmättningsbranschen.

Lund, januari 2005

Hans Fredin och Håkan Skoog

Sammanfattning

Fuktmätningar i betong i samband med fuktskador i byggnader är idag relativt osäkra. Det finns många faktorer som påverkar resultatet på olika sätt. En av de största faktorerna är temperaturen. För att kompensera för temperaturfaktorn vid mätningar i fält används idag en omräkningskurva som togs fram 1987 av professor Lars-Olof Nilsson. Senare studier och fältmätningar visar att den omräkningskurvan inte möter de krav som branschen ställer idag. Det som behövs är en omräkningstabell/kurva som sträcker sig över ett större temperaturspann och som är anpassat efter vilken betongkvalité som mätningen utförs på.

Försöken i studien har utförts på 40 år gammal, välhärdad betong som konditionerats till olika fukthalter, (ca 50-100 % RF). Betongcylindrarna är förslutna med aluminiumtejp och är helt täta. De har behandlats så att en jämn fuktfördelning har uppstått i kropparna.

Fuktgivare av typen Vaisala HMP44 har monterats i utborrade hål i betongproverna och RF och temperatur loggas under försöken. Proverna placeras i ett klimatskåp där temperaturen ändades enligt cykeln $20\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 60\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Då RF är känt vid $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ och fukthalten är oförändrad i provkroppen är det möjligt att ta fram ett korrigeringsförfarande för att räkna om det uppmätta mätvärdet vid en hög temperaturer till det ekvivalenta värdet vid $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Betongproverna, som hade en ånghalt mellan ca 50 % RF och 100 % RF, reagerade olika kraftigt på temperaturvariationerna. En klart större förändring av $\text{RF}(\%)/\text{T}(\text{ }^{\circ}\text{C})$ vid låga RF (ca 50-85 % RF) än vid höga kunde observeras. Omräkningskurvor har tagits fram för olika temperaturintervall samt en sammanställningstabell över medelvärdet av de olika intervallen.

Resultaten skilde sig även markant beroende på vilken typ av fuktgivare som användes. Begränsade försök genomfördes med Protimeter Hygrostick. Vid mätningar i borrhål var skillnaden, redan vid $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, stor mellan de två givartyperna (5-10 % RF). Vid försök med mätning på uttaget prov visades det att både Vaisala och Protimeter ger ett korrekt RF-värde vid $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, vilket överensstämmer med Vaisalas mätvärde i borrhål. Baserat på dessa försök kan det inte rekommenderas att använda Protimeter Hygrostick för borrhålmätningar utan att orsaken till de felaktiga mätvärdena utretts.

Det rekommenderas att utförligare undersökningar genomförs på dels fler betongkvaliteter och dels en utredning av skillnaderna mellan olika givartyper. Omräkningstabellerna för Vaisala som redovisas i detta arbete bör bekräftas med fältmätningar innan de sätts i bruk.

Summary

There is a relatively large uncertainty within the field of moisture measurements in concrete. Today a number of factors influence the results in several ways, with the temperature being one of the greatest. In order to compensate for the temperature effect with regards to the measurement of the relative humidity, a method for recalculating the RH at a higher temperature to its equivalent at 20 °C is being used. Professor Lars-Olof Nilsson developed this method, in form of a curve illustrating how the relative humidity at 20°C changes per increased degree.

Later studies show that the curve fails to take a significant factor into consideration, i.e. the quality of the concrete being measured. What is needed today is a recalculating curve/table that reaches over a larger temperature-span and is specific to the type of concrete the measurements are performed on.

This study is performed on 40 year old fully matured concrete that has been conditioned to a number of moisture levels, (approx. 50-100% RH). The concrete cylinders are sealed, with aluminum foil and aluminum tape, to prevent moisture leakage. The samples have been treated so that even moisture levels, RH, are obtained throughout the whole sample.

Two types of moisture indicators, Vaisala HMP44L and Protimeter Hygrostick were mounted into predrilled holes in the concrete samples. The samples were then placed in a climate controlled box where the temperature was programmed in the span of 20°C→60°C→20°C. During the entire test the RH and temperature were logged. Since the RH at 20°C is known and the moisture content of the samples is unchanged it is possible to produce a method for recalculating the RH value at an increased temperature to the equivalent at 20 °C.

The change in RH due to the temperature ($\Delta RH/\Delta T$) varied considerably as a result of the present moisture level. Samples in the lower region, (approx. 50-85% RH), displayed a greater $\Delta RH/\Delta T$ than samples with moisture levels exceeding 85 % RH. Curves for recalculation the RH at different temperature intervals are presented and also a mean value table of the different curves.

The results varied quite much between the two types of moisture indicators. Curves and tables are presented for both the Vaisala HMP44L and the Protimeter Hygrostick. Though only limited testing was performed with Protimeter Hygrostick the result clearly shows that the indicator delivers too low RH, (5-10% RH), when measured in a drilled hole compared with Vaisala. The differences are noted already at 20 °C. Further investigations are recommended with the Protimeter Hygrostick moisture indicator.

FÖRORD	
SAMMANFATTNING	
SUMMARY	
1 INLEDNING	5
1.1 BAKGRUND.....	5
1.2 SYFTE	7
1.3 AVGRÄNSNINGAR.....	8
2 BAKOMLIGGANDE TEORI	9
2.1 RELATIV FUKTIGHET OCH MÄTMETODER.....	9
2.1.1 RF i luft	9
2.1.2 RF i betong.....	10
2.2 TIDIGARE UNDERSÖKNINGAR.....	11
2.2.1 Lars-Olof Nilsson: 1987.....	11
2.2.2 Anders Sjöberg: 2002.....	11
3 METOD	14
3.1 STEGRINGSINTERVALL AV RF OCH TEMP	14
3.2 UTRUSTNING	16
3.2.1 Fuktgivare	16
3.2.2 Dataloggers.....	18
3.2.3 Övrig utrustning.....	20
3.3 KONDITIONERING AV PROVKROPPARNA	21
3.3.1 Förberedelser inför konditionering.....	21
3.3.2 Material/Betongkvalité.....	22
3.3.3 Bestämning av betongkvalitet	23
3.3.4 Konditionering till RF-nivå.....	26
3.4 HUVUDFÖRSÖK.....	30
4 RESULTAT	32
4.1 FÖRKLARING TILL REDOVISADE DIAGRAM	32
4.2 HUVUDFÖRSÖK 1: VAISALA	33
4.3 HUVUDFÖRSÖK 2: VAISALA	36
4.4 SAMMANSTÄLLNING HF1 OCH HF2	39
4.5 HUVUDFÖRSÖK 3: PROTIMETER	42
4.6 TEST AV FUKTGIVARE I FUKTGENERATOR	45
4.7 EFTERKALIBRERING AV FUKTGIVARE	50
4.8 JÄMFÖRELSER.....	50
5 DISKUSSION	56
5.1 REFLEKTION KRING RESULTATEN	56
5.2 IDENTIFIERING AV OSÄKERHETSFAKTORER	57
5.3 REKOMMENDATIONER INFÖR FRAMTIDA STUDIER.....	58
5.4 REKOMMENDATIONER FÖR ANVÄNDNING AV OMRÄKNINGSTABELL	58

Innehållsförteckning

6 APPENDIX.....	61
6.1 HUVUDFÖRSÖK 1: VAISALA.....	61
6.1.1 Diagram.....	61
6.1.2 Omräkningsdiagram: $\Delta RF/\Delta T$	65
6.2 HUVUDFÖRSÖK 2: VAISALA.....	72
6.2.1 Diagram.....	72
6.2.2 Omräkningsdiagram: $\Delta RF/\Delta T$	75
6.3 HUVUDFÖRSÖK 3: PROTIMETER.....	82
6.3.1 Diagram.....	82
6.3.2 Omräkningsdiagram: $\Delta RF/\Delta T$	83
6.4 KALIBRERINGSKURVOR.....	90
6.5 TABELLER.....	96
6.6 OMRÄKNINGSDIAGRAM: VAISALA HMP44.....	98
7 REFERENSER.....	99

1 Inledning

I följande avsnitt förklaras det behov som ligger till grund för undersökningen och anledningen till varför det aktuella området valts. Avgränsningar och syfte redovisas med kopplingar dels till branschutvecklingen och forskningen.

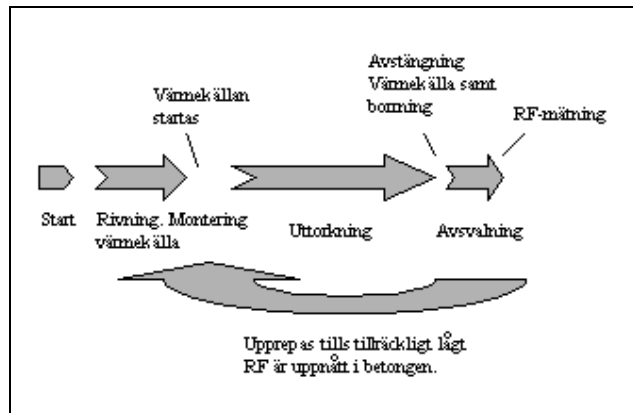
1.1 Bakgrund

Idén till examensarbetet grundar sig på utvecklingen inom fuktmätning i byggbranschen. Med nya metoder för att torka ut fuktskador kommer ett ökat behov av utvecklade mätmetoder. Behov finns att kunna mäta RF på plats vid en fuktskada under tiden man torkar. Allt högre temperaturer alstras vid torkning som följd av att nya metoder så som infravärme och mikrovågstorkning används. Att mäta fuktighet på uttagna betongprover i laboratorium är en relativt säker mätmetod. Dock är metoden tids- och resurskrävande, varför en säker metod att utföra fältmätningar av RF i betongkonstruktioner är önskvärd.

Ett av de problem som finns idag med fuktmätningar i betong är temperaturfaktorn. De fuktgivare som finns på marknaden idag sägs mäta RF vid 20°C med stor noggrannhet och är kalibrerade vid den temperaturen. Om temperaturen som mätningen utförs vid skiljer sig från 20°C levererar fuktgivaren ett RF som skiljer sig markant från motsvarande mätvärde uppmätt vid 20°C. Det beror på att RF ändras med temperaturen även om fukttinnehållet är det samma. Det innebär alltså inte att konstruktionen blir fuktigare då temperaturen höjs, (se kap 2: bakomliggande teori). Anledningen till att RF vid 20°C är intressant är därför att alla kritiska RF för bl.a. golvmaterial är satta vid 20°C. Den som genomför mätningen måste kunna garantera att konstruktionen har en viss RF vid 20°C för att slutkunden ska kunna lägga t.ex. golv utan risk för fuktskador. För att få tillförlitliga mätvärden krävs en stabil miljö vilket inte alltid är fallet vid fältmätningar. Temperaturen i konstruktionen kan nå upp till 60-80°C vid torkning med infravärme och mikrovågstorkning.

Idag är metoden för fältmätningar av RF relativt tidskrävande och består grovt av 3 steg, se figur 1.1:

- Steg 1 är att värmekällan stängs av för att temperaturen i konstruktionen ska gå mot 20 °C. Avsvalningen är långsam i betongkonstruktioner och kan ta flera dagar.
- Steg 2 är att ett mäthål borrar, dammsugs och sedan pluggas (RBK 2001). Hålet får stå ett eller flera dygn för att värmen från borrhålet ska jämnas ut sig samt att luften i hålet ska komma i fuktjämvikt med kringliggande betong.
- Steg 3 är att montera en givare i borrhålet och läsa av aktuellt RF och temp. Om RF är under kritisk nivå är målet nått, om inte så måste värmekällan sättas på igen. Temperaturen för att få optimal torkning i konstruktionen uppnås efter något dygn.

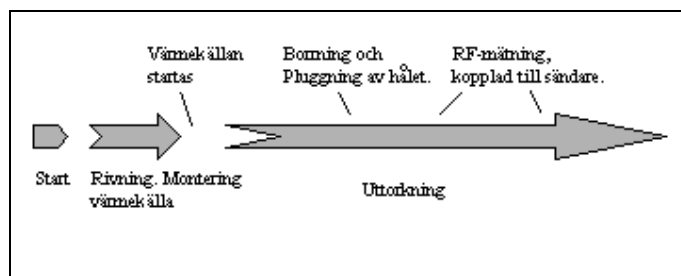


Figur 1.1: Arbetsätt idag vid uttorkning av fuktskada i betong.

En metod för att mäta RF vid högre temperaturer än $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sparar mycket tid i torkprocessen med ekonomiska vinster som följd. Efter samtal mellan Munters Torkteknik och Institutionen för Byggnadsmaterial föddes idén om hur problemet skulle kunna lösas. Om ett samband kan visas mellan de RF-värden som givarna ger vid höga temperaturer och RF vid $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ skulle man kunna göra relevanta RF-mätningar under tiden som värmekällan är igång.

På längre sikt finns en önskan att kunna montera fuktgivare vid skadan redan innan värmekällan sätts på, se figur 1.2. Givaren ska vara kopplad till en sändare som skickar aktuellt RF och temperatur till t.ex. kontoret med ett givet tidsintervall. På så sätt kan man effektivisera mätförloppet betydligt genom att:

- Mäta under tiden värmekällan är igång
- Läsa av aktuellt värde på avstånd
- Räkna om RF_{Temp} till RF vid $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ med omräkningstabellen i denna rapport
- Uppskatta hur lång tid det är kvar på uttorkningen



Figur 1.2: Önskat arbetsätt vid uttorkning av fuktskada i betong.

Tidigare forskning visar på ett visst samband mellan RF och temperatur och även en viss skillnad beroende på betongkvalité. Den undersökningen är dock inte utförd på sådant sätt att resultaten kan användas inom temperaturintervallet $20\text{-}60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Undersökningen som vi genomför innebär att noggrannheten kan komma att öka markant vid mätningar mellan 20 °C och 60 °C.

Studien avser inte RF-mätning vid nygjuten betong eftersom det där redan finns klara riktlinjer via Rådet för Byggkompetens, (RBK 2001). Fuktmätning efter vattenskada är däremot inte reglerat på samma sätt och många frågetecken finns beträffande vilken metod som är mest effektiv och tillförlitlig. Det är upp till varje mätningfirma att ta fram normer och metoder för att mäta fukthalten på bästa sätt. Eftersom man vet relativt lite om mättekniker vid de höga temperaturer som ofta uppstår vid torkning av fuktskada blir osäkerheten stor vid den typen av fältmätningar.

Sammanfattningsvis finns det en önskan att undersöka om det finns ett samband mellan RF vid en viss temperatur och RF vid 20 °C. Målet är en omvandlingstabell av RF vid viss temp till RF vid 20 °C som är praktiskt användbar i fält.

1.2 Syfte

Syftet med undersökningen är att ta fram en omräkningstabell för RF vid en viss temperatur till RF vid 20 °C. Behovet av en sådan omräkningstabell finns hos företag som sysslar med uttorkning av byggfukt och efter fuktskador i byggnader. Behov finns även inom forskningen av byggnadsmaterial och byggnadsfysik. Idag finns två omräkningsdiagram som används av branschen, (Nilsson 1987, Sjöberg 2002), se kap 2: bakomliggande teori. Dessa är begränsade dels i temperaturspannet, 15 °C -30°C, och i antalet betongkvalitéer. Vi redovisar en omräkningstabell, inom temperaturspannet 20 °C- 60 °C för en betongkvalité, (vct 0,55). Tack vare undersökningarna kommer det vara möjligt att göra mer tillförlitliga fuktmätningar vid temperaturer mellan 20 och 60 °C.

Det finns även ett behov inom forskningen att fördjupa och bredda kunskapen inom området.

Eftersom det inte tidigare genomförts studier på det temperaturintervall som studien avser, specificeras inte testerna in i detalj. Målsättningen är att göra en förstudie som kan ligga till grund för riktlinjer till branschen samt ett underlag för fortsatt forskning inom området. En större studie, exempelvis en doktorsavhandling, skulle vara lämplig för att utreda området mer noggrant, framför allt med hänsyn till olika betongkvalitéer.

1.3 Avgränsningar

I försöken används endast en typ av betong. Betongen kommer från en befintlig byggnad på Tekniska Högskolan, Kemicentrum. Den är ca 40 år gammal och sannolikt av kvalitén vct 0,55, se kap 3.3.2. Tidigare studier inom området har visat att betongkvaliteten påverkar hur RF förändras vid ändrad temperatur. Enligt överenskommelse med handledaren begränsas studien till en betongkvalité med hänsyn tagen till projekttiden på 20 veckor.

Fuktgivare av typen Vaisala HMP44 används eftersom de fanns att tillgå på institutionen och de har använts i tidigare forskning med goda resultat. Under arbetets gång har önskemål kommit från mätföretagets sida att ett likvärdigt test genomförs med givare av typen Protimeter Hygrostick.

Största anledningen till att Protimeter inte användes från första början i testerna är att de inte fanns att tillgå i tillräckliga antal vare sig på Institutionen eller hos företaget. En andra faktor som talar för Vaisala är att Institutionen för Byggnadsmaterial främst använder sig av Vaisala och därmed har mycket kunskap och erfarenhet om den.

Vid huvudförsöket med Protimeter kunde mätningar endast utföras på fyra provkroppar då det endast fanns 4 dataloggers, som var kompatibla med Protimetergivare, att tillgå. De fyra provkropparna valdes ut efter överenskommelse med handledarna. En spridning av provkropparnas fuktnivå var även här önskvärd och prover valdes enligt följande, en nära 100 % RF, en nära 50 % RF samt två prover nära 85 % RF, då detta är en vanlig riktlinje vid läggning av täta golvmaterial.

Alla resultat förutsätter att en jämn fuktfördelning uppnåtts i provkropparna.

2 Bakomliggande teori

I följande avsnitt behandlas olika tekniska områden och teorier som är grundläggande i undersökningen samt berör fukt och fuktmätning. De olika materialtekniska faktorer som påverkar hur fukt beter sig i luft respektive i material, förklaras. De metoder som finns att mäta fukt i luft respektive material, går igenom. Resultat från tidigare undersökningar redovisas slutligen samt de omräkningsdiagram som idag används i branschen.

2.1 Relativ fuktighet och mätmetoder

2.1.1 RF i luft

Relativ fuktighet är kvoten mellan luftens fukttinnehåll och den maximala fuktkapaciteten (v_s) vid en viss temperatur.

$$RF = \frac{v}{v_s(T)} ; \text{där } v_s(T) \text{ är mätnadsånghalten, (ekv. 2.1, (Fukthandbok))}$$

Mätnadsånghalten är temperaturberoende och ökar med stigande temperatur. Detta får till följd att, vid ett konstant fukttinnehåll i luften och en ökande temperatur, kommer den relativa fuktigheten att minska.

Den relativa fuktigheten är ett mått på hur stor del av lagringskapaciteten som utnyttjas d.v.s. ånghalt/mätnadsånghalt (%). När RF når 100% börjar vattenången kondensera på omslutande ytor i form av små vattendroppar. Mätnadsånghalten finns tabellerat i (Fukthandbok).

Exempel 2.1: beräkning av RF i luft.



Volym: 1 m^3
 Vikt H_2O : 10 g
 Temp: $20 \text{ }^\circ\text{C}$
 Ånghalt= 10 g/m^3
 Mätnadsånghalt: $17,28 \text{ g/m}^3$ (tabellvärde, Fukthandbok)

$$RF = \frac{\text{Ånghalt}}{\text{Mätnadsånghalt}} = \frac{10}{17,28} = 0,58 \quad \text{dvs } 58 \% \text{ RF}$$



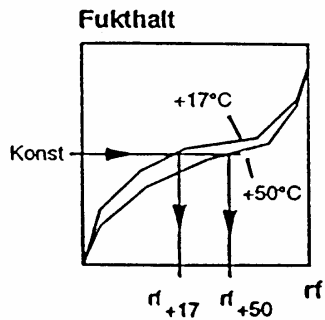
Volym: 1 m^3
 Vikt H_2O : 10 g
 Temp: $40 \text{ }^\circ\text{C}$
 Ånghalt= 10 g/m^3
 Mätnadsånghalt: $51,07 \text{ g/m}^3$ (tabellvärde, Fukthandbok)

$$RF = \frac{\text{Ånghalt}}{\text{Mättnadsånghalt}} = \frac{10}{51,07} = 0,20 \quad \text{dvs } 20 \% RF$$

Exempel 2:1 visar på hur RF sjunker då temperaturen höjts och vatteninnehållet är oförändrat i en luftvolym.

2.1.2 RF i betong

Vid RF-mätningar i porösa material använder man sig av ungefär samma metod som för luft. Vid mätning i betong, har det dock visat att RF beter sig omvänt d.v.s. den relativa fuktigheten ökar vid ökad temperatur och konstant fukthalt. Fukt i materialet finns både i form av fritt vatten i porer och som ånga i porsystemet. Luft som är i kontakt med porsystemet strävar efter att ställa sig i jämvikt med materialet. Jämvikt uppnås när porvattenundertrycken är lika. Eftersom temperaturen påverkar ytspänningen hos vattnet i porerna och ytspänningen påverkar porvattenundertrycket, förändras RF i materialet vid ändrad temperatur. Skillnaden mellan RF i luft och i material, är att vid ökad temperatur sjunker RF i luft, men ökar i material, jmf. exempel 2:1 och figur 2.1.



Figur 2.1: RF i material vid 17 °C resp. 50 °C med konstant fukthalt, (Fagerund 2002)

Det finns två allmänna metoder att mäta RF i betong, uttaget prov och fältmätning. Vid den första tas ett prov ut från materialet och läggs i en lufttät behållare, t.ex. ett provrör. Luften i provröret kommer i fuktjämvikt med materialet och RF kan mätas efter ca 3 dygn.

Vid den andra metoden borrar man ett hål i betongkonstruktionen som man ska mäta i. I hålet monteras en fuktgivare och hålet tätas med en gummikork. Den omslutande luften i hålet ställer sig i jämvikt med betongen och givaren levererar ett värde på RF.

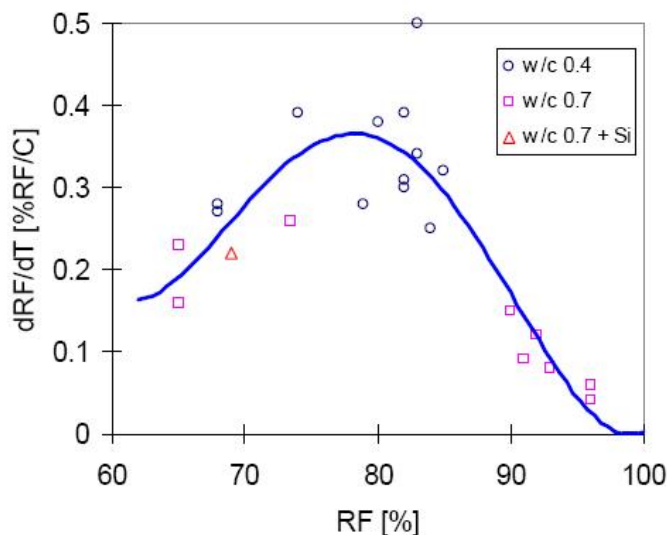
Eftersom RF är temperaturberoende, påverkar det noggrannheten hos båda mätmetoderna. Vid fältmätningar kan man inte kontrollera och styra temperaturvariationer på samma sätt som mätningar i laboratorium tillåter.

2.2 Tidigare undersökningar

2.2.1 Lars-Olof Nilsson: 1987

Temperature effects in relative humidity measurements on concrete – some preliminary studies

Professor Lars-Olof Nilsson genomförde en undersökning i syfte att se hur mätning av RF i betong påverkas av temperaturvariationer. Försöken genomfördes på Avdelningen för Byggnadsmaterial på Chalmers Tekniska Högskola 1987. Mätningar utfördes på tre typer av betong, vct 0.4, 0.7 och 0.7 med tillsats av silika. Temperaturintervallet som undersöktes var mellan 5 °C och 30 °C. Betongproverna placerades i provrör, givare monterades och provrören förslöts. Provrören placerades i en klimatkammare där temperaturen kunde kontrolleras. RF och temperatur loggades under tiden temperaturen stegrades och slutligt värde togs efter att RF stabiliserat sig. Resultaten redovisades som ett omräkningsdiagram, se figur 2.2.



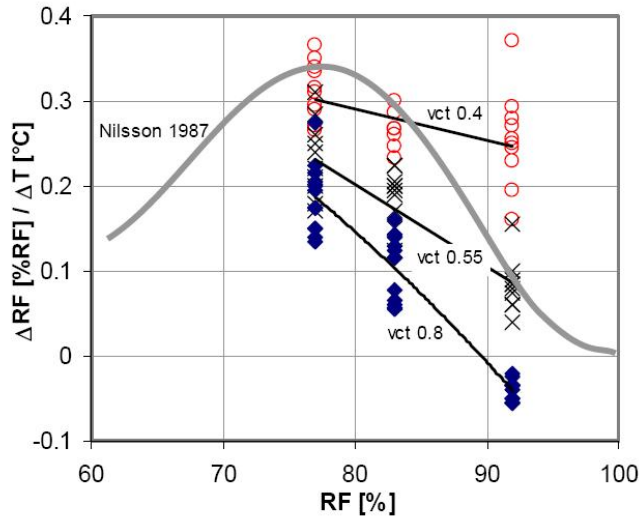
Figur 2.2: Omräkningsdiagram $\Delta RF/\Delta T$ (Nilsson 1987)

2.2.2 Anders Sjöberg: 2002

Fuktmätning i betonggolv med golvvärme, etapp I: Förstudie

Anders Sjöberg genomförde 2002 en undersökning i syfte att se hur golvvärme påverkar uttorkningen av betong i nyproducerade betongplattor. Försöken genomfördes på Avdelningen för Byggnadsmaterial på Chalmers Tekniska Högskola 2002. I samband med det, undersöktes vilka mätmetoder som borde användas vid fuktmätning innan golvläggning. Temperaturspannet som undersöktes var 15 °C –

30°C eftersom det är det området som vattenburen golvvärme oftast är verksamt i. Försöken genomfördes på tre betongkvalitéer, vct 0.4, 0.55 och 0.8. Resultaten redovisades som ett omräkningsdiagram liknande figur 2.2, se figur 2.3.



Figur 2.3: Omräkningsdiagram $\Delta RF/\Delta T$ (Sjöberg 2002)

En av skillnaderna mellan (Nilsson 1987) och (Sjöberg 2002) var att den senare kom fram till att betongkvaliteten spelade en stor roll i temperaturvariationerna hos RF. Nilsson tar fram en gemensam kurva oberoende av betongkvalité medan Sjöbergs resultat visar att omräkningskurvorna bör vara specifika för varje vct. Sjöbergs resultat visar att korrigeringskurvan bör vara utformad linjärt och inte som en kurva så som Nilsson antytt tidigare.

Vid båda undersökningarna används fuktgivare av fabrikatet Vaisala. Sjöberg använder samma typ som i vår undersökning d.v.s. Vaisala HMP44L medan Nilsson använde en äldre givartyp.

3 Metod

I följande kapitel behandlas de metoder som används för att uppnå aktuella fuktnivåer samt mätresultat som används i försöken. Eftersom fuktrörelser i betong är relativt långsamma, krävdes det att det utreddes hur snabbt temperaturen kunde stegras i provkropparna för att jämvikt skulle uppnås mellan varje temperaturintervall. De olika preliminära försök som genomfördes redovisas här. Den tekniska utrustningen som användes redovisas med tillhörande tekniska specifikationer i kap 3.2. Konditioneringen till olika fuktnivåer redovisas i kap 3.3. Hur huvudförsöken med temperaturstegringar mellan 20 och 60 °C genomfördes förklaras i kap 3.4.

3.1 Stegringsintervall av RF och Temp

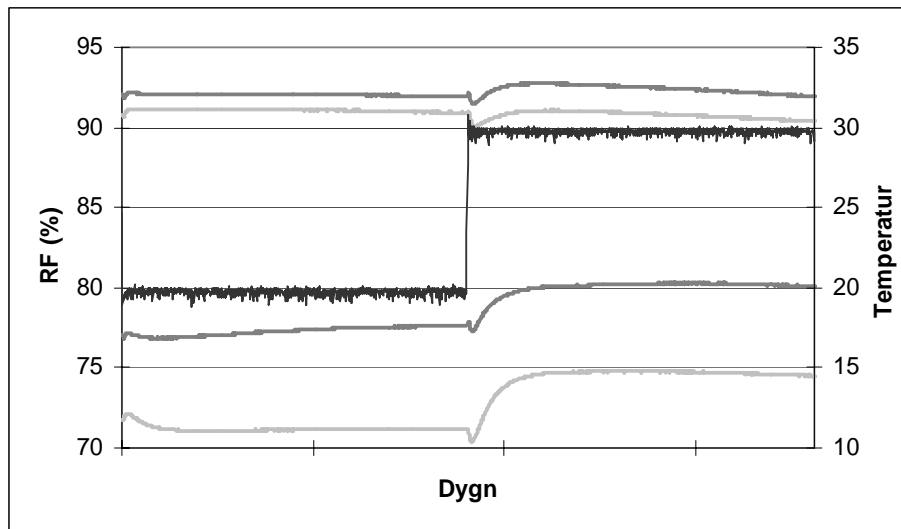
Tidigare försök har visat att det kan ta ganska lång tid för en provkopps relativa fuktighet att stabilisera sig vid en temperaturförändring. När temperaturen hos en tillsluten kropp ökar, ökar RF relativt momentant för att sedan mycket sakta sjunka mot en konstant nivå, se fig. 3.1. Procentuellt sett är sänkningen inte stor och det varierar mycket beroende på vilken fuktnivå provkroppen har från start och av vilken kvalitet (vct) den är. Att proverna med RF runt 95 % sjunker vid ökad temperatur diskuteras i kap 5.

För att utreda i hur stora steg temperaturen kan ökas genomfördes två försök, vika redovisas nedan. Provkropparna konditionerades enligt kapitel 3.3 och tätades med en givare monterad.

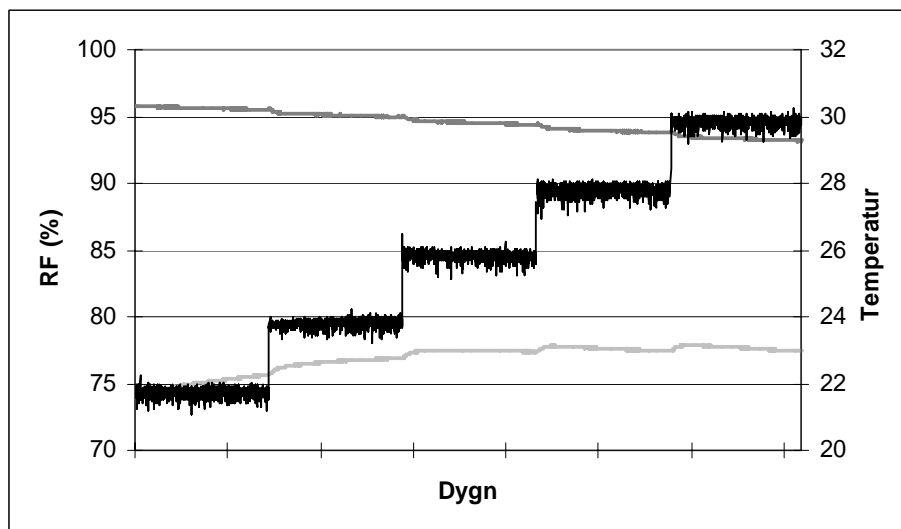
- Första försöket innebar att temperaturen höjdes momentant, från 20 °C till 30°C. Proverna stod sedan i ugnen med konstant temp (30°C) i 10 dygn. Resultaten visas i figur 3.1 för 4 prover.
- Andra försöket innebar att temperaturen stegrades från 20°C till 30°C med 2°C/dygn. Resultatet visas i figur 3.2 för 2 prover.

Konditionering

I försöken användes fyra provkroppar, A, B, C och D. Dessa konditionerades enligt följande. Preliminärt mättes RF 90-95 % i provkropparna, A & B. Med risk att det levererade värdet på RF överstiger 100 % vid en temperaturökning valdes att torka två av provkropparna, C & D, till ca 70 % RF. Proverna tätades med aluminiumfolie och aluminiumtejp. För att likna de höga RF-nivåerna vid en ”verklig” fuktskada genomfördes försöken med provkroppar både vid RF 70 % och RF 95 %.



Figur 3.1: Momentan stegring $10^{\circ}\text{C}/5\text{min}$, $20^{\circ}\text{C}-30^{\circ}\text{C}$.



Figur 3.2: Stegning med $2^{\circ}\text{C}/\text{dygn}$, $20^{\circ}\text{C}-30^{\circ}\text{C}$.

Utrustning

Försöken genomfördes med fuktgivare av typen Vaisala HMP44 och dataloggern Picologger. Alla givarna kalibrerades i samband med försöket. Provkroppar med två fuktnivåer ca 70 % och 95 % användes vid båda försöken.

Resultaten redovisas i figur 3.1 resp. 3.2.

Resultat

Vid den momentana stegringen av 10 °C/steg stabiliserades RF relativt snabbt. Efter ca 12-15 h var RF på en acceptabel nivå. Försöket med en stegring på 2 °C/steg stabiliserades RF betydligt snabbare, ca 5-6 h. Det vore dock inte praktiskt genomförbart att utföra det stora försöket med 2 °C intervall eftersom det skulle ta flera månader. Valet blev ett mellanting som var både tidseffektivt och tillräckligt noggrant. Det valda intervallet blev 5°C/steg med 12 h intervalltid, se tabell 3.1.

Tabell 3.1: Vald metod för temperaturstegring.

temp (°C)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Tid (h)	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Stegring (°C)	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	
Stegringstid	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min

3.2 Utrustning

Följande avsnitt behandlas den tekniska utrustning samt materiel som använts vid samtliga försök.

3.2.1 Fuktgivare

Vaisala HMP44L

I fuktgivaren sitter en kapacitiv fuksensor av typen HUMICAP[®] 180 och en temperatursensor av typen Pt1000, se figur 3.3. Fuksensorn består av en tunn polymerfilm som upptar och avger fukt när den relativa fuktigheten i omgivande luft förändras. När fukttinnehållet i polymerfilmen ändras, kommer den elektriska kapacitansen att förändras och det är denna förändring som mäts och konverteras till ett RF-mätvärde. Varje fuktgivare måste kalibreras för att korrekt mätvärde ska levereras. Kalibreringen utfördes i en fuktgenerator på Lunds Tekniska Högskola. Fuktgeneratoren skapar ett konstant klimat vid 20°C, RF och temperatur, och fuktgivaren mäter detta kända klimat. Från mätningen erhålls ett kalibreringsdiagram över avläst och korrekt RF, se figur 3.4. Tabell 3.2 visar den tekniska datan för Vaisala HMP44L.

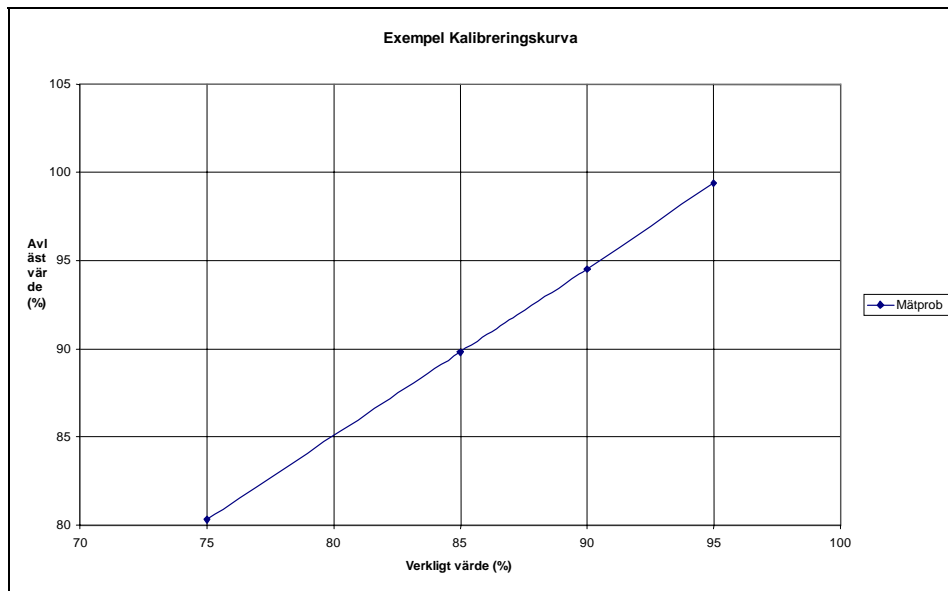


Figur 3.3: Vaisala HMP44L.

Tabell 3.2: Teknisk data Vaisala HMP44L enligt tillverkaren

Teknisk data	
Mätområde	0-100 % RF
Noggrannhet	
0-90 % RF	± 2 % RF
90-100 % RF	± 3 % RF
Arbetstemperatur	-40 – 60 °C
Mättemperatur	-20 – 60 °C
Kabellängd	2,7 m

Kapitel 3 – Metod



Figur 3.4: Exempel på kalibreringskurva.

Protimeter Hygrostick

Endast den tekniska informationen som finns på Protimeters hemsida kan redovisas i rapporten. För ytterligare information hänvisas till "GE Protimeter plc" i England.

Tabell 3.3: Teknisk data Protimeter Hygrostick enligt tillverkaren



Figur 3.5: Protimeter Hygrostick.

Teknisk data	
Mätområde	20-100 % RF
Noggrannhet	
30-40 % RF	± 2,5 % RF
41-98 % RF	± 1,75 % RF
Mättemperatur	-18 – 50 °C
Noggrannhet temp	± 0,3 °C

3.2.2 Dataloggers

Mitec Satellite50-TH/E

Mitecs sladdlösa datalogger användes tillsammans med Vaisala HMP44. Den programmeras och styrs via ett PC-program vilket innebär att enskilda avläsningar

under mätning inte kan genomföras. I det inbyggda minnet kan upp till 16 000 mätvärden lagras fördelat på två kanaler (RF och Temperatur).



Figur 3.6: Mitec datalogger

Mätstation LTH: Picolog ADC 16

Mätstationen är konstruerad av Forskningsingenjör Stefan Backe. Den har 10 kanaler och är kompatibel med Vaisalas fuktgivare. Stationen är kopplad till en dator där informationen loggas med önskat tidsintervall. Ett termoelement med noggrannhet $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ är kopplat till stationen. Mätstationen förändrar inte utsignalen (mV) från givaren på något sätt utan levererar endast signalen till datorn.



Figur 3.7: Mätstation lth: Picolog ADC 16

Protimeter Humilog BLD4100

Humilog BLD4100 är en datalogger för fukt- och temperaturmätningar som används tillsammans med Protimeters fuktgivare. Loggern ska enligt tillverkaren fungera väl med upp till 10m kabellängd. Loggern programmeras och styrs via ett PC-program tillverkat av Protimeter. Vid mätningarna har en förlängningssladd på ca 0,5m

Kapitel 3 – Metod

använts, (Hygrostick Extension Lead BLD 5802). I likhet med Mitec Satalite går det ej heller här att göra momentana avläsningar under försökens gång.

För att kontrollera Humiloggerens noggrannhet är den kalibrerad mot tillverkarens ”dummies”. De fyra enheterna som används kalibrerades med godkänt resultat.



Figur 3.8: Uppställning Humilog

Tabell 3.4: Teknisk data Humilog

Teknisk data	
Datakapacitet	507 mätpunkter
Kanaler	2 (RF och Temp)
Strömförsörjning	4 st. AA Batteri

3.2.3 Övrig utrustning

För att kunna stegra temperaturen under försöken har ett klimatskåp av typen Arctest använts. Skåpet är programmerbart och arbetar i temperaturintervallet -40°C till $+70^{\circ}\text{C}$.

En fuktgenerator av märket Thunder har använts dels för kalibrering av fuktgivarna samt för kontroll av givarnas beteende vid höga temperaturer med konstant RF. Fuktgeneratorn går att programmera antingen med konstant temperatur och förändrat RF eller vice versa.

För enskilda mätningar har handenheter använts, Vaisala HMI41 och Protimeter Hygromaster.

3.3 Konditionering av provkropparna

3.3.1 Förberedelser inför konditionering

Från ombyggnaden av Kemicentrum LTH erhöles utborrade betongcylindrar. Den genomsnittliga dimensionen är 200mm, Ø 100mm. Betongen är ca 40 år gammal rivningsbetong eftersom det var önskvärt att dels få betongprover där byggfukten lämnat betongen och dels få betong som bäst återspeglar verkligheten vid en fuktskada. För att kunna genomföra försöken, var det nödvändigt att borra ett hål för mätproben i cylindrarna. I första försöket gjordes det med ett 16 mm borrhörl monterat i en slagborrmaskin. På grund av cylindrarnas storlek i relation till borrhöret, sprack proverna. Efter två försök att ta hål med slagborren, avbröts detta. Bilderna 3.9, 3.11-3.13 visar förfarandet vid håltagningen i borrhörlarna samt ett tvärsnitt av en borrhörl.



Figur 3.9: Sprucken betongcylinder

Vi valde att borra med en kärnborr av märket Hilti DD-160E med en borrhörl diameter på 15mm, se figur 3.10. Detta borrhörlsystem är vattenkyllt genom den ihålliga borrhörlkronan, vilket medförde att vatten tillfördes betongen vid håltagning. Det är en försumbar vattenmängd som tillföres men, eftersom det sker i hålet där mätproben ska placeras skulle det initialt kunna råda ett högre fukttillstånd vid en eventuell mätning. Provkropparna fuktmätas i ett senare skede så fukttillskottet är av ringa betydelse och innebär ej ett problem.



Figur 3.10: Kärnborr



Figur 3.11: Håltagning i betongcylinder



Figur 3.12: Håltagning i betongcylinder



Figur 3.13: Tvärsnitt efter borrning

3.3.2 Material/Betongkvalité

Densitet

Densiteten på betongproverna beräknades med hjälp av två cylindriska provkroppar. Kropparna hade samma armeringsfördelning som de övriga proverna, men en bättre

geometrisk utformning. De var utborrade från samma plats och hade därför teoretiskt samma vatteninnehåll som de övriga cylindrarna.

Ur dessa beräknades en medeldensitet fram på $2\,436\text{ kg/m}^3$, se appendix 6.4. Efter att densiteten beräknats, bestämdes volymen på betongproverna med hjälp av vikt och densitet. Metoden för att bestämma volymen, valdes framför att geometriskt mäta proverna då de hade varierande dimensioner i tvärsnittet. Volymen av proverna var viktig att känna till för att konditioneringen skulle bli så noggrann som möjligt.

3.3.3 Bestämning av betongkvalitet

Betongen som använts vid försöken framställdes inte till detta arbete. Eftersom det är gammal rivningsbetong fick det till följd att betongens vct, (vattencementtal), inte var känt. Det är viktigt att ha kännedom om betongens vct eftersom det tidigare har visats att den relativa fuktigheten beter sig olika vid en temperaturförändring beroende på vilket vct betongen har.

Bestämning av vct med KMG

Kapillär mätnadsgrad (KMG) är en metod för att bestämma vilket fukttinnehåll ett betongprov har. KMG definieras som :

$$\text{KMG} = \frac{\text{vikt provbit} - \text{provbitens torra vikt}}{\text{vikt efter kap.mätn.} - \text{provbitens torra vikt}} = \frac{M_0 - M_T}{M_C - M_T}$$

(ekv. 3.1 Hedenblad 1985)

Lars-Olof Nilsson har gjort en sammanställning över sambandet mellan KMG-vct-fukttinnehåll, se figur 3.16 (Nilsson 1980). Grundtanken är att det skall vara möjligt att, så noga som möjligt, uppskatta ett fukttinnehåll i ett betongprov genom kännedom om dess vct och KMG. Eftersom vct inte är känt på betongen som används under studierna i detta arbete, används figuren i omvänd ordning. Med ett känt fukttinnehåll och en beräknad KMG fastställs vilket vct betongen har.

Förfarandet vid bestämning av KMG gick till på följande sätt.

- Vägning av provbitar och mätning av RF
- Kapillärmättnad och vägning av provbitar
- Uttorkning $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ och vägning

Uttagning av provbitar

Från en betongcylinder högs provskivor ut. Av dessa togs en större provbit till kapillärmättnad och resten av skivan krossades i mindre delar och stoppades i ett provrör. Detta gjordes på tre olika nivåer i betongcylindern.

Starttillstånd

Tre provrör fylldes till ca 2/3 med provmaterial och sattes i ett klimatrums med konstant 20°C och RF 55 %. Efter ett dygn placerades en givare i provröret och RF mättes, se figur 3.15. De större provbitarna vägdes direkt efter att de tagits från betongcylindern.

Tabell 3.5: Startvikt vid KMG-försök

Provbit	Vikt (g)
1	70.663
2	35.976
3	42.078

Tabell 3.6: Starttillstånd vid KMG-försök

Provrör	RF (%)
1	61.8
2	61.1
3	65.0

Kapillärmättnad från fri vattenyta

Efter att provbitarna vägdes, kapillärmättnades de, se figur 3.14. Provbitarna lades på ett plastgaller som stoppades i ett vattenbad, där vattnet endast nådde upp till ovankanten av gallret och därigenom blev kontaktytan mellan provbitarna och vattnet så liten som möjligt. Proverna vägdes kontinuerligt tills dess att ingen viktökning skedde. Vid vägningen är det viktigt att fritt vatten från ytan avlägsnas och detta gjordes med en normerad urkramad wettexduk och inte med papper som teoretiskt skulle kunna suga ut vatten ur proverna.

Tabell 3.7: Vikt efter mättnad

Provbit	Vikt (g)	Upptaget vatten (g)
1	73,99	3,327
2	37,154	1,178
3	43,523	1,445



Figur 3.14: Kapillärsugning på plastgaller



Figur 3.15: Provrör med monterad givare

Uttorkning

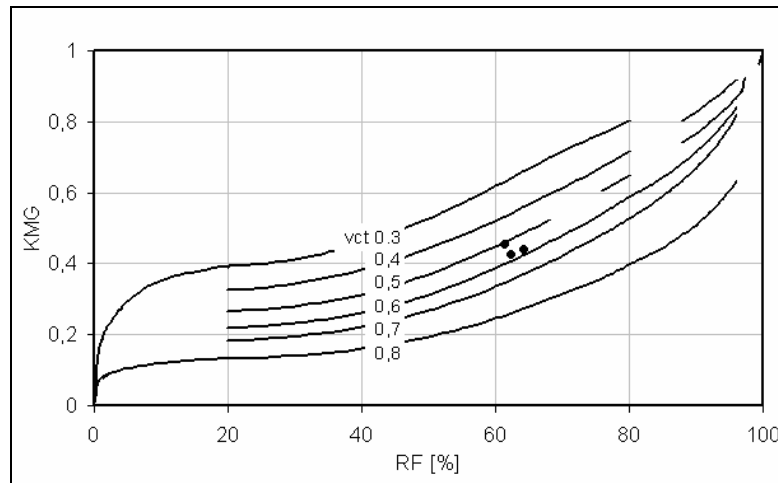
Efter att vikten inte längre ökade under kapillärsugningen så torkades proverna i en ugn vid 105 °C. Kontinuerliga vägningar gjordes och uttorkningen avslutades när vikten ej längre minskade, se tabell 3.8, 3.9. Efter detta var nu de tre parametrarna kända för att kunna räkna ut KMG enligt ekv. 3.1

Tabell 3.8: Vikt efter uttorkning

Provbit	Vikt (g)
1	68,011
2	34,999
3	40,794

Tabell 3.9: Beräknad KMG

Provbit	KMG
1	0,44
2	0,45
3	0,47



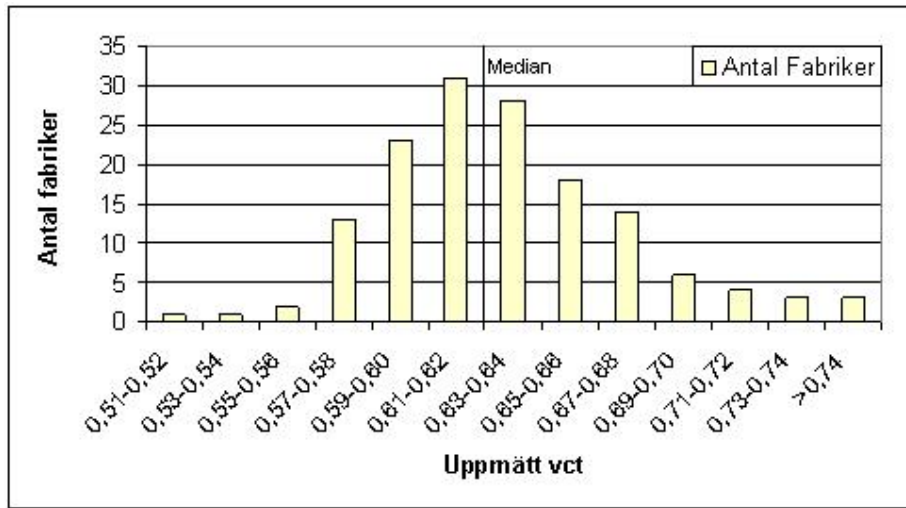
Figur 3.16: Samband mellan RF och KMG, baserade på värden ur (Nilsson 1980)

Med en framräknad KMG och med ett känt fuktillstånd vid start kan diagrammet i figur 3.16 användas för att ge en bra uppskattning om betongkvaliteten. De tre mätvärdena hamnar vid ett vct-intervall på ungefär 0.55. Vid konditioneringen betraktades betongen som vct 0.625 och det blev i efterhand uppenbart att detta antagande inte stämmer. Dock påverkar detta antagande endast konditioneringen och inte fortsatta mätningar.

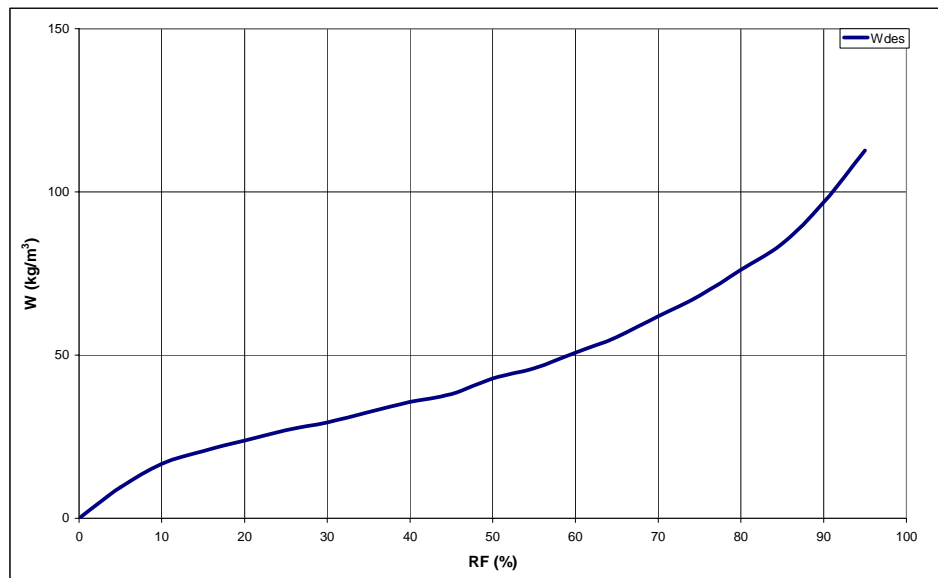
3.3.4 Konditionering till RF-nivå

För att kunna konditionera proverna till önskade RF-nivåer behövdes vissa antaganden göras. Eftersom den betong som undersökts göts för ca 40 år sedan finns inte många uppgifter om betongkvalité m.m. att tillhandahålla. Efter samtal med handledare och professor Lars-Olof Nilsson på avdelningen samt inblandad konstruktör, valdes att betrakta betongen som K30 kvalitet med vct 0,6-0,7. I en av CBI (Hård 1980) utgiven rapport kunde spridningen i vct för en K30 betong utläsas. Medianvärdet för spridningen ligger på vct 0,625, se figur 3.17, 3.18.

Kapitel 3 – Metod

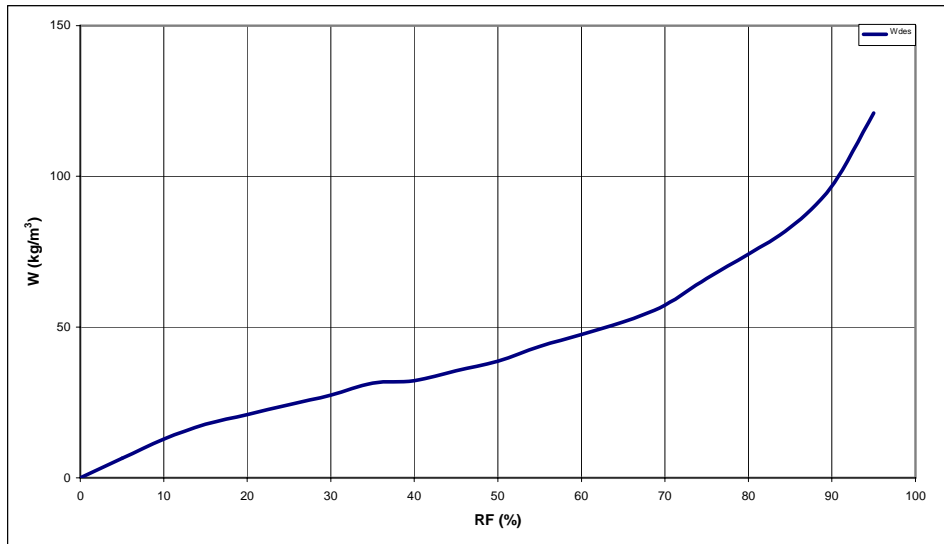


Figur 3.17: Vct-variation i betong K30, (Hård 1980).



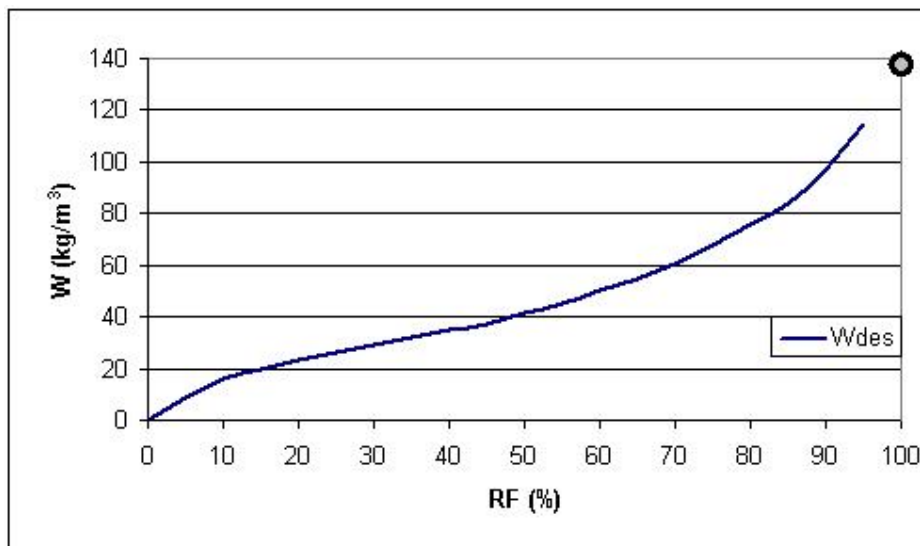
Figur 3.18: Desorptionskurva för btg. K30 med vct 0.6, (Hedenblad 1996)

Kapitel 3 – Metod



Figur 3.19: Desorptionskurva för btg K30 med vct 0.7, (Hedenblad 1996).

Desorptionskurvan i figur 3.19 går bara upp till 95 % RF och för att erhålla en mätnadsfukthalt blev det nödvändigt att göra ett kvalificerat antagande. Ur diagrammen interpolerades en desorptionskurva, se figur 3.20, för vct 0,625 fram. Ur denna extrapolerades en mätnadsfukthalt på 137 kg/m³ fram. Med detta värde kunde sedan beräkningarna inledas.



Figur 3.20: Interpolerad desorptionskurva för vct 0,625.

Betongcylindrarna placerades i ett vattenbad för att de skulle bli fuktmättade. Efter att proverna nått mättnad, beräknades den mängd vatten som skulle torkas bort för att

Kapitel 3 – Metod

erhålla önskad RF, se appendix 6.4. Proverna torkades i ett klimatskåp på 60 °C. Anledningen till att cylindrarna inte torkades i 105 °C var risken för mikrosprickor som sedan skulle kunna påverka fukttransporten vid huvudförsöken.

Då provkroppen nått sin slutvikt togs den ur klimatskåpet och ställdes för avsvälning. Cylindern försågs med plugg för givare och provkroppen förslöts. Ett fodringsrör i plast som räckte ca 50mm ner i hålet monterades för att underlätta monteringen av givarna. Provkropparna förslöts genom att de lindades in i aluminiumfolie i 3-4 lager och sedan ett yttre lager av aluminiumtejp. Proverna placerades därefter återigen i klimatskåpet dels för att jämna ut fuktfördelningen och dels för att fastställa att proverna var ordentligt tillslutna.



Figur 3.21: Prover 1-8 i vattenbad



Figur 3.22: Prov förslutet med aluminiumfolie och aluminiumtejp



Figur 3.23: Sektionsritning av prov med tätning.

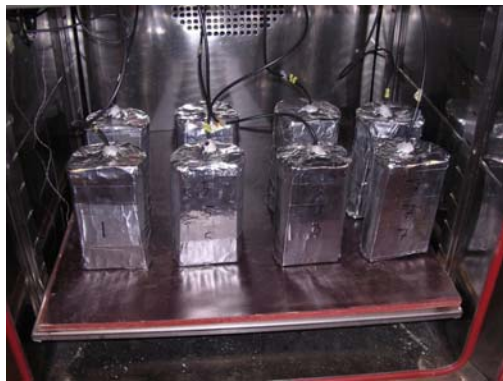
3.4 Huvudförsök

Huvudförsöken syftar till att mäta hur den relativa fuktigheten förändras i betong då temperaturen ändras.

Efter att proverna konditionerats till olika fuktnivåer, tätades de och givare monterades. Proverna placerades i ett klimatskåp där temperaturen kunde kontrolleras med stor noggrannhet. Temperaturen programmerades i en cykel, (se kap 3.1), $20\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 60\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Under tiden loggades temperaturen och RF via mätstation LTH med 5 min intervall. Datafilen som loggern skapade ligger till grund för de diagram och omräkningstabeller som redovisas i kap. 4.

Hela temperaturcykeln, $20\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 60\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, tog ca 10 dygn och övervakades dagligen.

Mellan huvudförsök 2 och 3 byttes Vaisalagivarna ut mot Protimetergivare. Vissa förändringar var tvungna att genomföras, bl.a. kunde inte mätstation LTH användas då den inte var kompatibel med Protimetergivarna. Vid huvudförsök 3 användes Protimeter Humilog för att logga RF och temperatur. Kapaciteten i Humilog var begränsad till 507 mätpar, (RF, temp), och eftersom det var önskvärt att ha lika täta mätpunkter var loggarna tvungna att tömmas vartannat dygn. Loggarna registrerade mätpar var sjätte minut, ($507 \cdot 6\text{ min} = 2,1\text{ dygn}$). Proverna placerades i klimatskåpet med givare och kabel enligt figur 3.24.



Figur 3.24: Placering av prover med givare i klimatskåp.

Huvudförsök 1 och 2 utfördes på 8 provkroppar medan huvudförsök 3 endast utfördes på 4 provkroppar. Det berodde på brist av loggers som var kompatibla med Protimetergivarna, se kap. 1.3.

4 Resultat

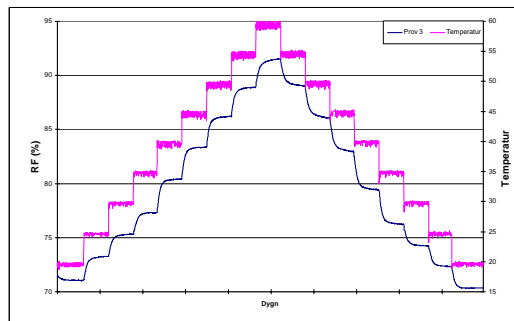
I studien genomfördes tre mätserier i temperaturspannet 20-60 °C. Två av serierna genomfördes med Vaisala HMP44 monterad i åtta betongcylindrar och den sista serien med Protimeter Hygrostick monterad i fyra betongcylindrar.

Eftersom likvärdiga diagram tagits fram för de tre serierna presenteras deras innebörd i avsnittet nedan, medan kommentarer till diagrammen sker under respektive kapitel.

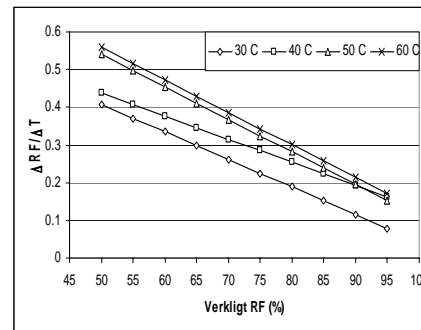
4.1 Förklaring till redovisade diagram

Resultat från temperaturstegringarna

Diagrammen i figur 4.1 och 4.2 illustrerar hur den relativa fuktigheten varierar vid temperaturförändringar. Temperaturen ändras i 5-graders intervall och ligger konstant i tolv timmar. Vid en ökning av temperaturen sker även en ökning av den relativa fuktigheten och omvänt vid en sänkning av temperaturen, se figur 4.1. I diagrammet för hela temperaturserien kan man se att RF-förändringen inte är lika stor för varje temperaturnivå. Ändringen är beroende av vilken RF-nivå man utgår från. Prover med lägre RF vid 20 °C visar en större ökning än prover med initieellt högre RF när temperaturen ökar. För att förtydliga detta redovisas mätresultaten även som funktion av $\Delta RF/\Delta T$ (% RF/°C) vid RF_{20°C}, dvs. verkligt RF (se figur 4.2).



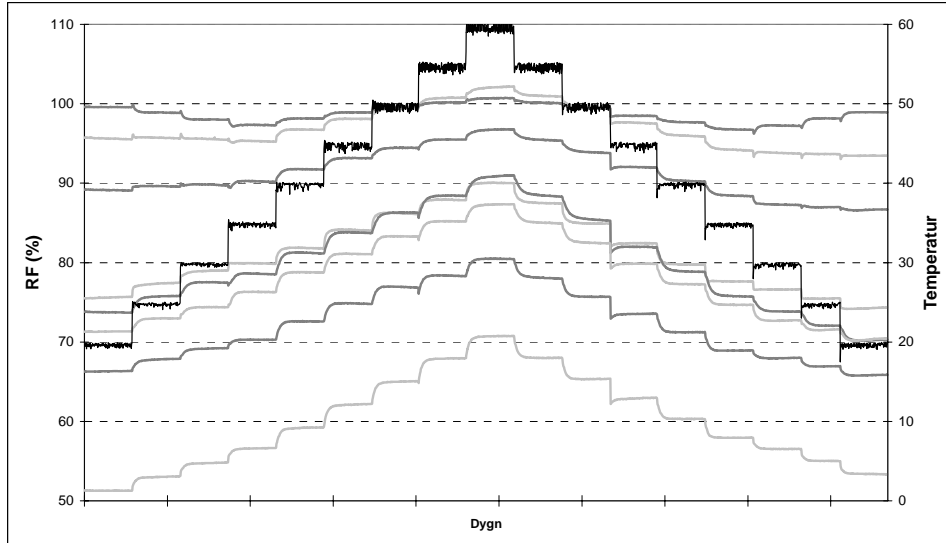
Figur 4.1: RF variation



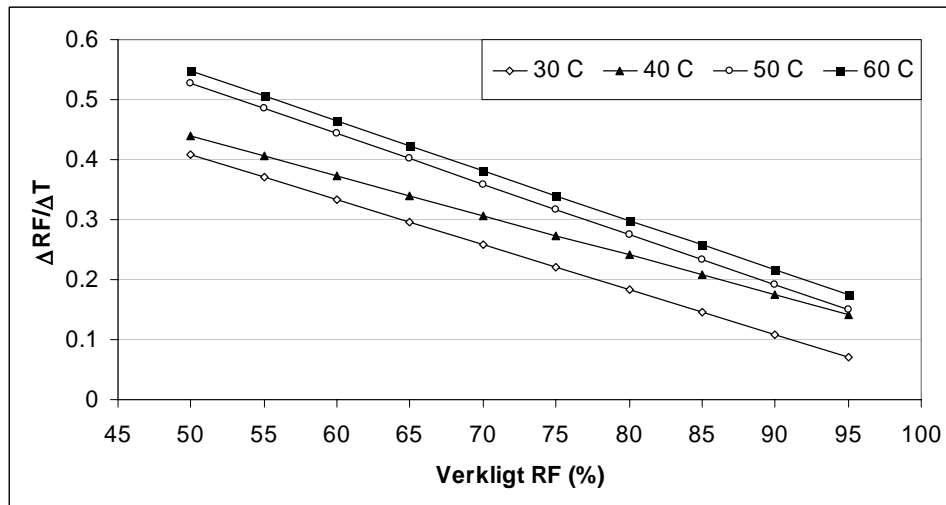
Figur 4.2: $\Delta RF/\Delta T$ för olika intervall

Förändringen redovisas dels i större intervall med start på 20 °C och ökning i 10-graders intervall och dels i mindre 5-graders intervall mellan 20-60 °C. Ur dessa diagram kan man tydligare urskilja beteendet av RF-ändringen vid temperaturförändringar. För att mätvärdena ska vara praktiskt användbara vid en omräkning har resultaten förts in i en omräkningstabell. Ur denna kan man med en känd avläsningstemperatur och ett avläst RF räkna om värdet till motsvarigheten vid 20 °C vilket är den temperatur alla normer utgår från.

4.2 Huvudförsök 1: Vaisala

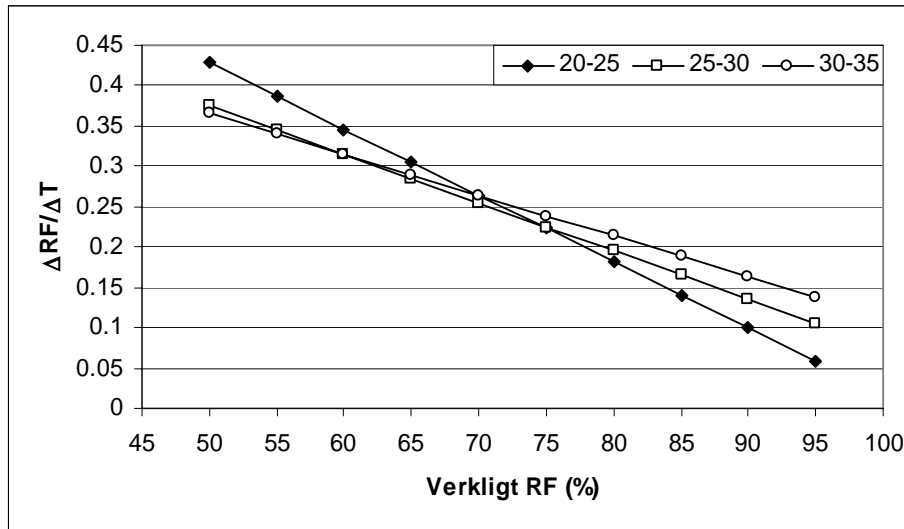


Figur 4.3: Sammanställning av Försöksserie I

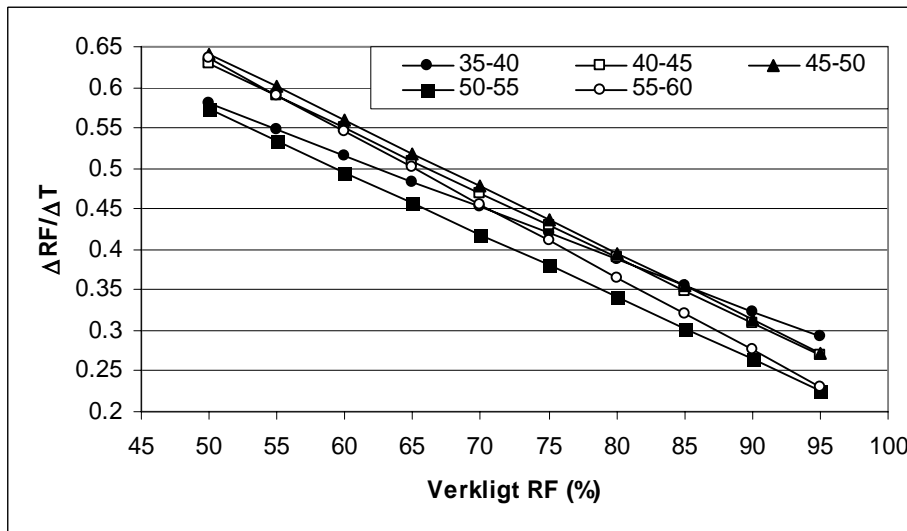


Figur 4.4: Försöksserie I: $\Delta RF/\Delta T$ för stora temperaturintervall

Kapitel 4 – Resultat



Figur 4.5: Försöksserie I: $\Delta RF/\Delta T$



Figur 4.6: Försöksserie I: $\Delta RF/\Delta T$

Kapitel 4 – Resultat

Tabell 4.1: Försöksserie I Omräkningstabell

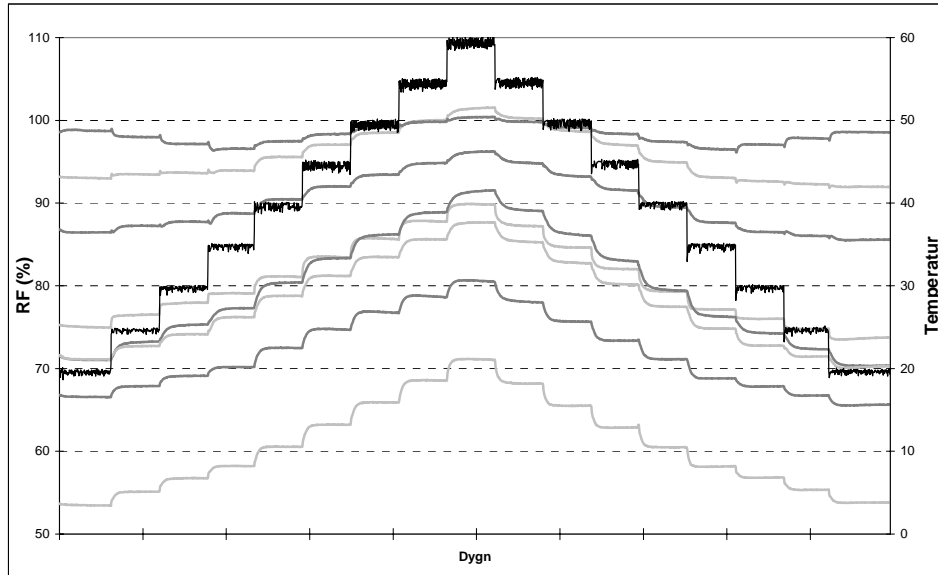
Temperatur	RF%									
20_k °C	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
25°C	52.2	57.0	61.8	66.6	71.3	76.1	80.9	85.7	90.5	95.3
30°C	53.9	58.6	63.2	67.9	72.6	77.3	81.9	86.6	91.3	95.9
35°C	55.9	60.4	64.9	69.4	73.9	78.4	82.9	87.4	91.9	96.4
40°C	58.5	62.9	67.4	71.8	76.3	80.7	85.1	89.6	94.0	98.5
45°C	61.7	65.9	70.1	74.4	78.6	82.9	87.1	91.3	95.6	99.8
50°C	64.5	68.6	72.7	76.9	81.0	85.2	89.3	93.4	97.6	101.7
55°C	67.3	71.3	75.2	79.2	83.1	87.1	91.0	95.0	98.9	102.9
60°C	70.1	73.9	77.7	81.5	85.3	89.1	92.9	96.7	100.5	104.3

Exempel 4.1: Användning av omräkningstabellen.

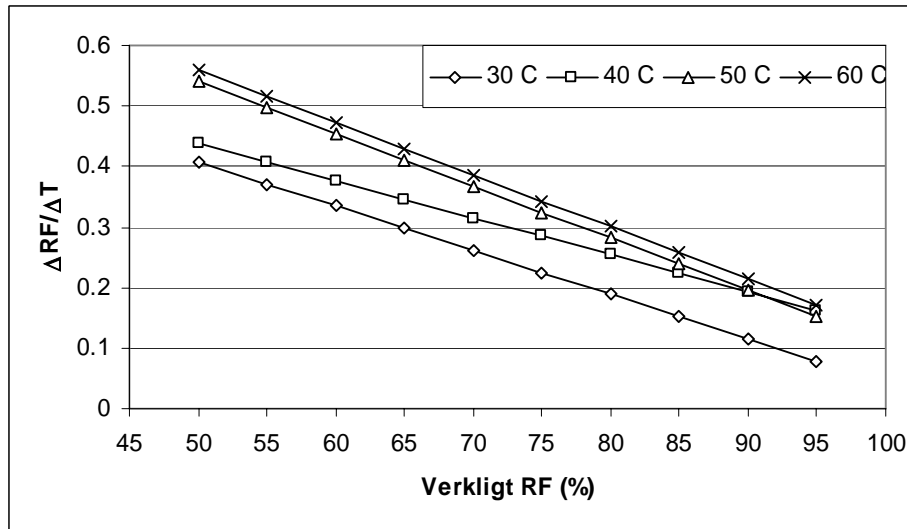
”Antag att mätning av RF sker vid 50 °C och givaren levererar ett värde på 81 % RF.

Gå in i tabellen vid 50 °C och hitta det värde som bäst stämmer överens med det som givaren levererar, (interpolering kan behövas). Följ det värdet rakt upp i tabellen till motsvarande värde vid 20 °C. I detta fallet blir motsvarande värde vid 20 °C = 70 % RF.”

4.3 Huvudförsök 2: Vaisala

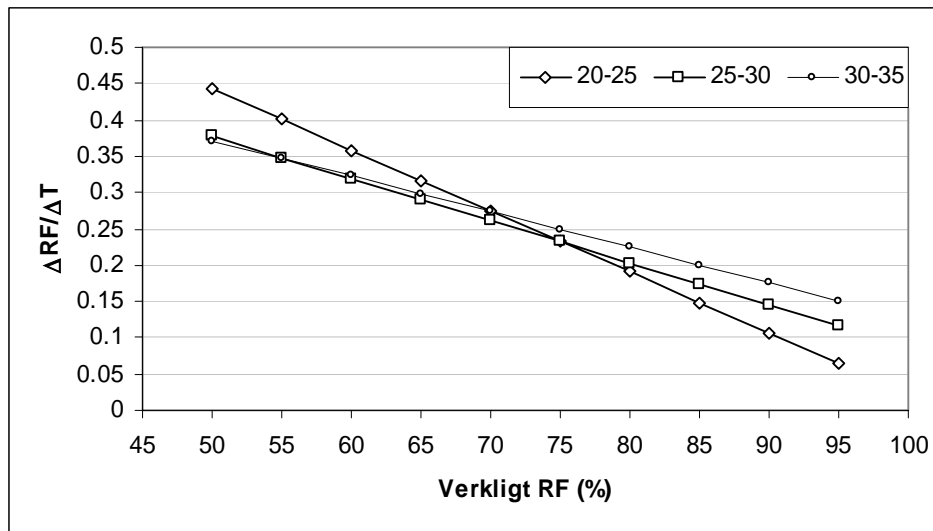


Figur 4.7: Sammanställning av Försöksserie II

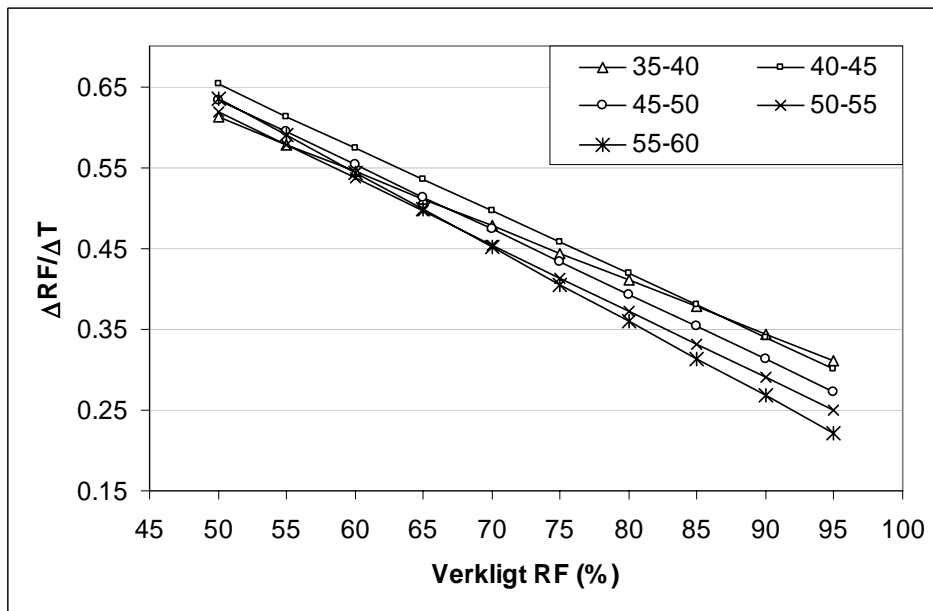


Figur 4.8: Försöksserie II: $\Delta RF/\Delta T$ för stora temperaturintervall

Kapitel 4 – Resultat



Figur 4.9: Försöksserie II: $\Delta RF/\Delta T$



Figur 4.10: Försöksserie II: $\Delta RF/\Delta T$

Kapitel 4 – Resultat

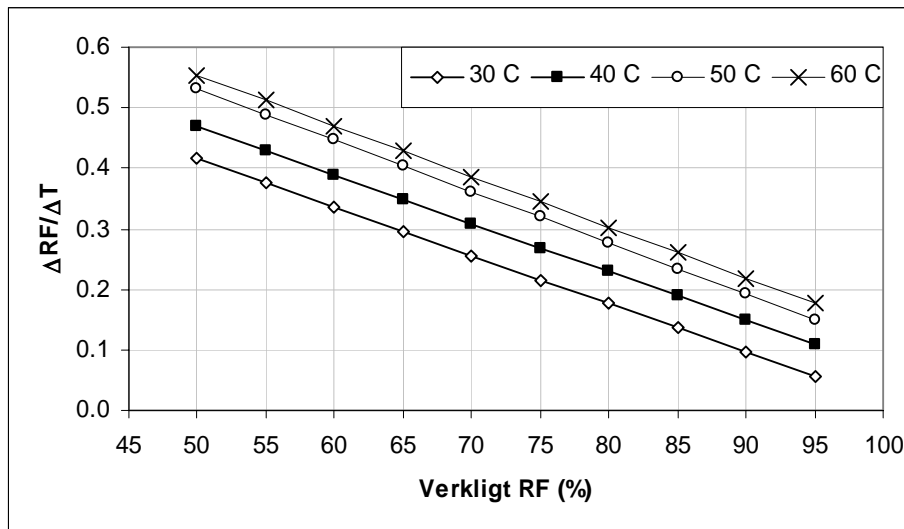
Tabell 4.2: Försöksserie II Omräkningstabell

Temperatur	RF%									
20_k °C	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
25°C	52.1	56.9	61.8	66.6	71.4	76.2	81.0	85.8	90.7	95.5
30°C	54.1	58.7	63.4	68.0	72.6	77.3	81.9	86.5	91.2	95.8
35°C	55.9	60.4	64.9	69.5	74.0	78.5	83.0	87.6	92.1	96.6
40°C	58.8	63.2	67.6	72.0	76.4	80.8	85.1	89.5	93.9	98.3
45°C	61.9	66.2	70.4	74.6	78.8	83.0	87.2	91.5	95.7	99.9
50°C	66.2	69.9	73.6	77.3	81.0	84.7	88.5	92.2	95.9	99.6
55°C	69.1	72.7	76.2	79.8	83.3	86.9	90.4	93.9	97.5	101.0
60°C	72.4	75.7	79.0	82.3	85.6	88.9	92.2	95.5	98.8	102.1

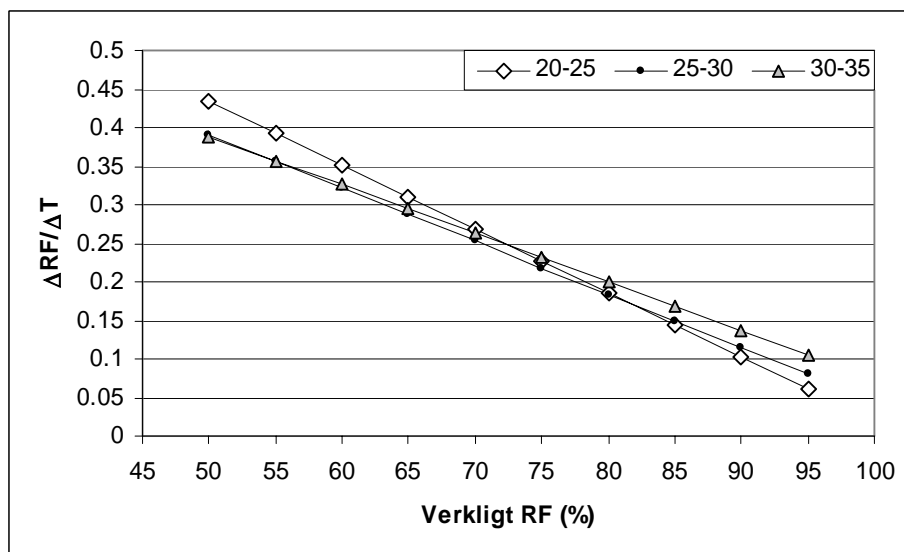
Se exempel 4.1 för användandet av omräkningstabellen.

4.4 Sammanställning HF1 och HF2

Nedanstående diagram visar en sammanställning av $\Delta RF/\Delta T$ baserad på de två serierna med Vaisala HMP44. Skillnaderna i mätresultat mellan de båda serierna är mycket små, med en högsta differens på $\approx 3,2\%$ RF, vilket tyder på att försöken är stabila och repeterbara.

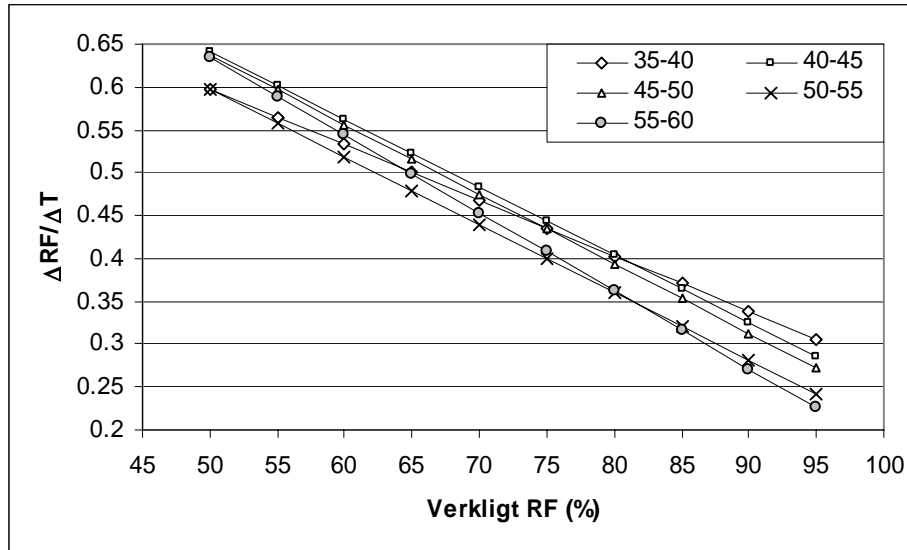


Figur 4.11: Sammanställt $\Delta RF/\Delta T$ baserat på mätresultat från 2 serier



Figur 4.12: Försöksserie medelvärde : $\Delta RF/\Delta T$ för stora temperaturintervall

Kapitel 4 – Resultat



Figur 4.13: Försöksserie medelvärde: $\Delta RF/\Delta T$

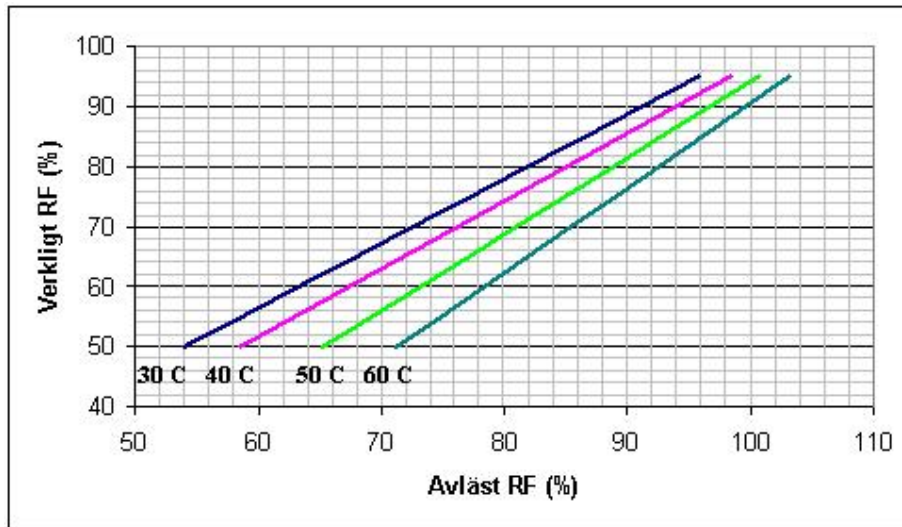
Tabell 4.3: Omräkningstabell medelvärde

Temperatur	RF%									
20_k °C	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
25°C	52,1	57,0	61,8	66,6	71,4	76,2	81,0	85,8	90,6	95,4
30°C	54,0	58,7	63,3	68,0	72,6	77,3	81,9	86,6	91,2	95,9
35°C	55,9	60,4	64,9	69,4	73,9	78,5	83,0	87,5	92,0	96,5
40°C	58,6	63,0	67,5	71,9	76,3	80,7	85,1	89,6	94,0	98,4
45°C	61,8	66,0	70,3	74,5	78,7	82,9	87,2	91,4	95,6	99,9
50°C	65,3	69,3	73,2	77,1	81,0	85,0	88,9	92,8	96,7	100,6
55°C	68,2	72,0	75,7	79,5	83,2	87,0	90,7	94,5	98,2	102,0
60°C	71,3	74,8	78,4	81,9	85,5	89,0	92,6	96,1	99,7	103,2

Se exempel 4.1 för användandet av omräkningstabellen.

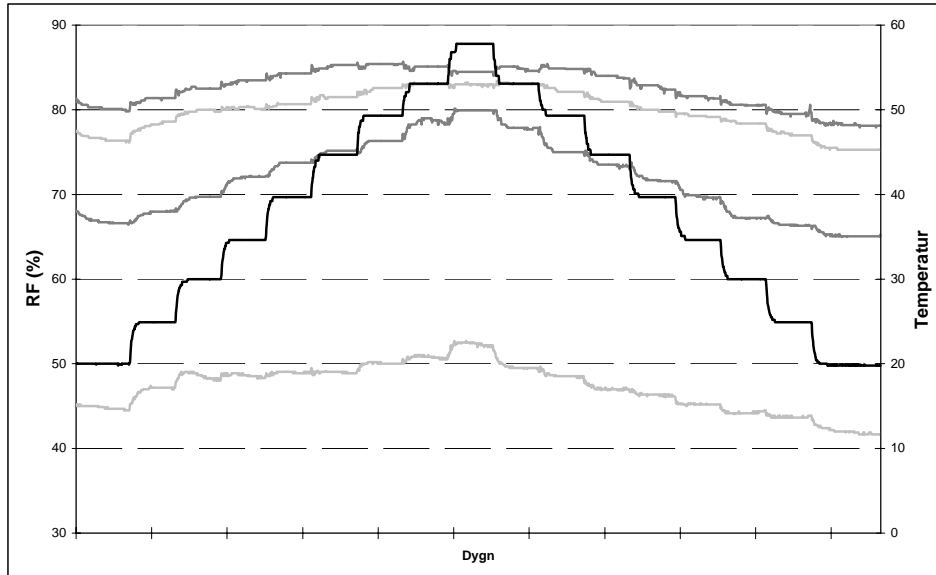
Figur 4.14 är baserat på omräkningstabellen och är mer praktiskt användbart, dock endast med Vaisala HMP44. För ett avläst RF-värde i temperaturintervallet 30-60 °C kan verkligt RF vid 20 °C utläsas. Grundförutsättningen för samtliga tabeller och diagram är att givaren är kalibrerad vid just 20 °C.

Kapitel 4 – Resultat

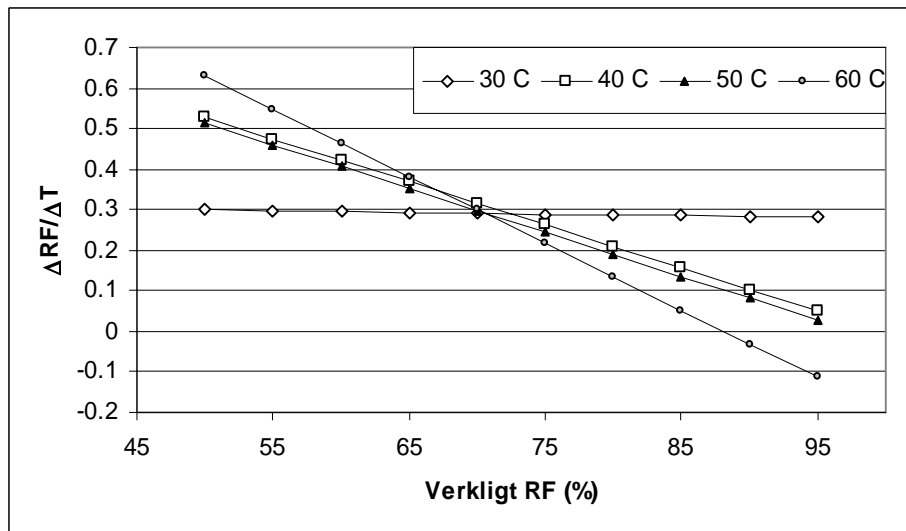


Figur 4.14: Omräkningsdiagram, avläst RF→Verkligt RF

4.5 Huvudförsök 3: Protimeter

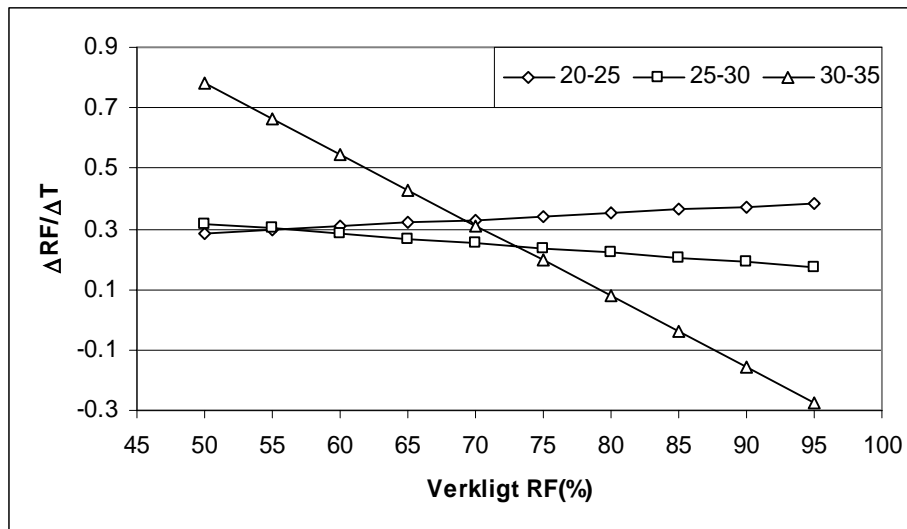


Figur 4.15: Sammanställning av Försöksserie III

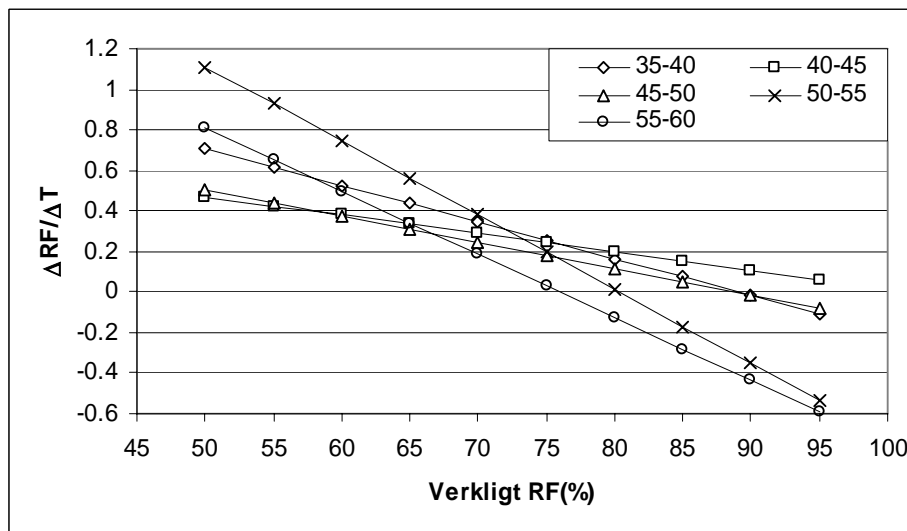


Figur 4.16: Försöksserie III: $\Delta RF/\Delta T$ för stora temperaturintervall

Kapitel 4 – Resultat



Figur 4.17: Försöksserie III: $\Delta RF/\Delta T$



Figur 4.18: Försöksserie III: $\Delta RF/\Delta T$

Kapitel 4 – Resultat

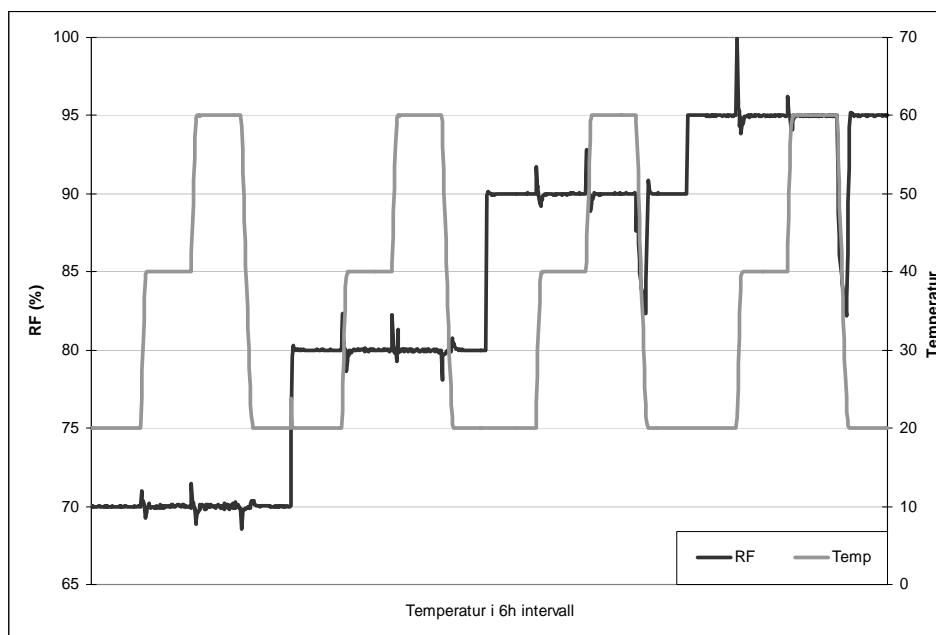
Tabell 4.4: Försöksserie III Omräkningstabell

Temperatur	RF%									
20 _k °C	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
25°C	51,4	56,5	61,5	66,6	71,7	76,7	81,8	86,8	91,9	96,9
30°C	53,0	58,0	63,0	67,9	72,9	77,9	82,9	87,8	92,8	97,8
35°C	56,9	61,3	65,7	70,1	74,5	78,9	83,3	87,6	92,0	96,4
40°C	60,4	64,4	68,3	72,3	76,2	80,1	84,1	88,0	91,9	95,9
45°C	62,8	66,5	70,2	73,9	77,6	81,3	85,0	88,8	92,5	96,2
50°C	65,3	68,7	72,1	75,5	78,9	82,2	85,6	89,0	92,4	95,8
55°C	70,9	73,4	75,8	78,3	80,8	83,2	85,7	88,2	90,6	93,1
60°C	74,9	76,6	78,3	80,0	81,7	83,4	85,1	86,7	88,4	90,1

Se exempel 4.1 för användandet av omräkningstabellen.

4.6 Test av Fuktgivare i fuktgenerator

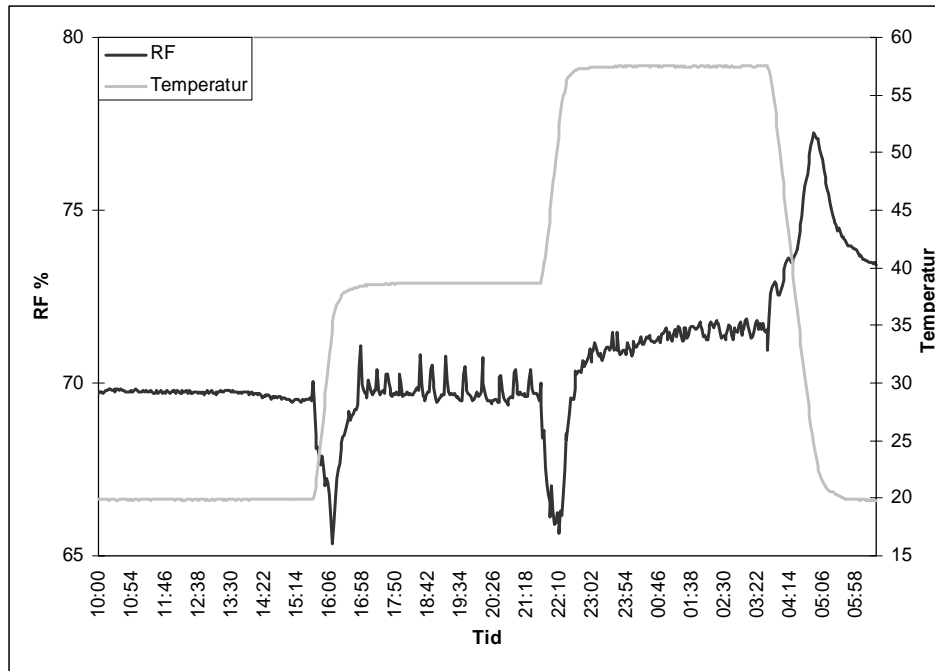
För att utreda hur givarens mätegenskaper reagerar på förhöjda temperaturer utan inverkan av provmaterial, (betong), placerades två Vaisala HMP44 i en fuktgenerator. I fuktgeneratoren kan ett konstant RF-klimat skapas och temperaturen kan därefter förändras. Konstanta RF-nivåer (70, 80, 90, 95 %) skapades och temperaturen förändrades enligt 20 °C →40 °C →60 °C och hölls konstant under en period på sex timmar vid varje temperaturnivå. I figur 4.19 redovisas data från fuktgeneratoren egna temperatur- och RF-sensorer.



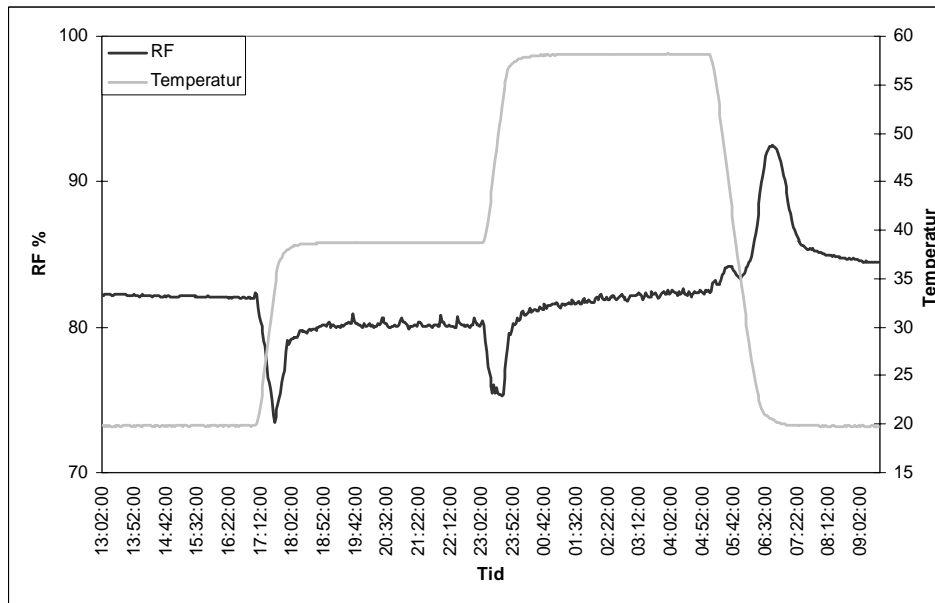
Figur 4.19: Fuktgeneratorns stegringscykler.

Försöken i fuktgeneratoren visade att Vasalagivarnas utslag förändras vid en temperaturförändring men inte alls i samma omfattning som vid försöken med givarna monterade i betongen. Mätresultaten visar också att Vaisalagivaren ger ett sådant utslag som kan förväntas vid mätningar i luft. Vid temperaturhöjningen sjunker RF momentant och stabiliserar sig på en RF-nivå som ligger något lägre än före den initiala temperaturändringen. Detta gäller dock ej för fallet med RF = 70 %. Resultaten från mätningarna med Vaisala HMP44L i fuktgeneratoren redovisas i figur 4.20-4.23.

Kapitel 4 – Resultat

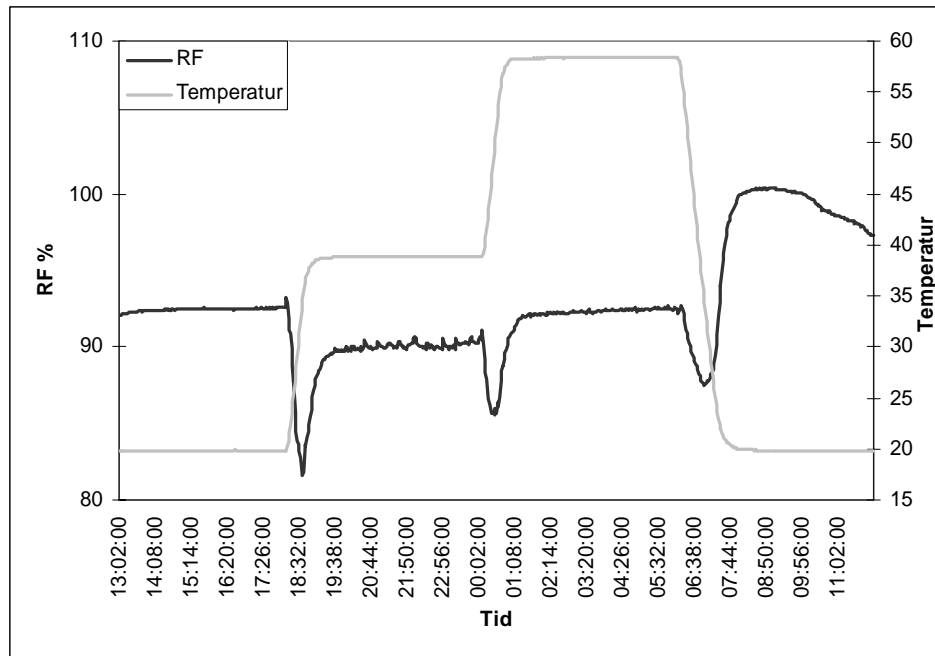


Figur 4.20: RF-variation vid temperaturförändring, konstant 70 % RF

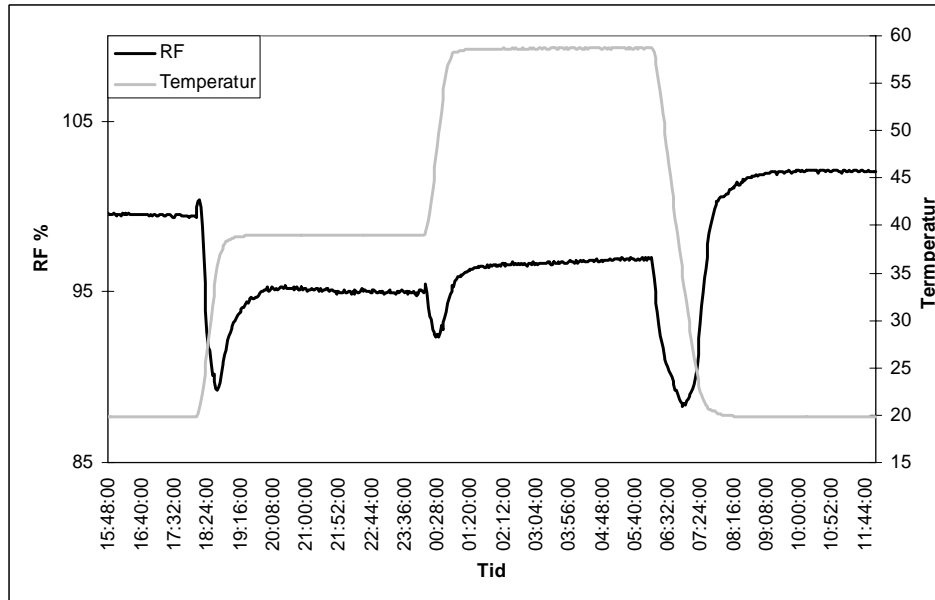


Figur 4.21: RF-variation vid temperaturförändring, konstant 80 % RF

Kapitel 4 – Resultat



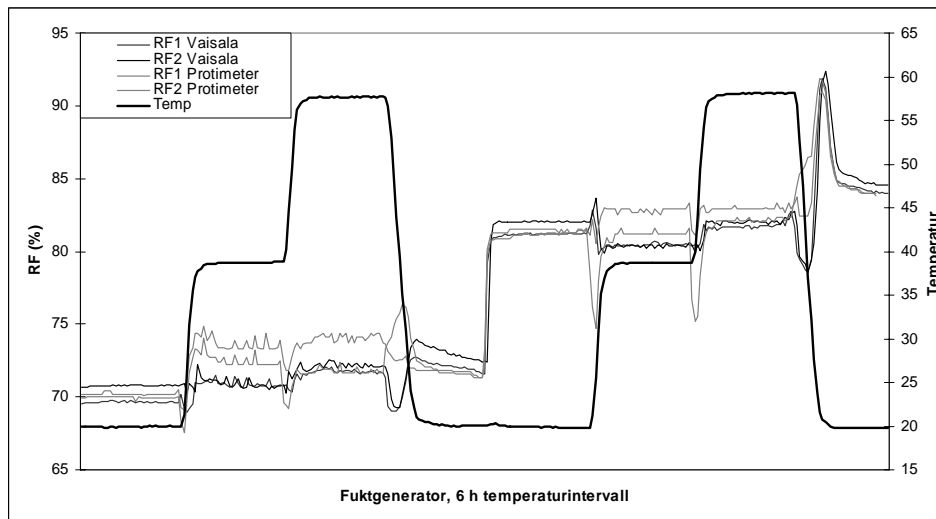
Figur 4.22: RF-variation vid temperaturförändring, konstant 90 % RF



Figur 4.23: RF-variation vid temperaturförändring, konstant 95 % RF

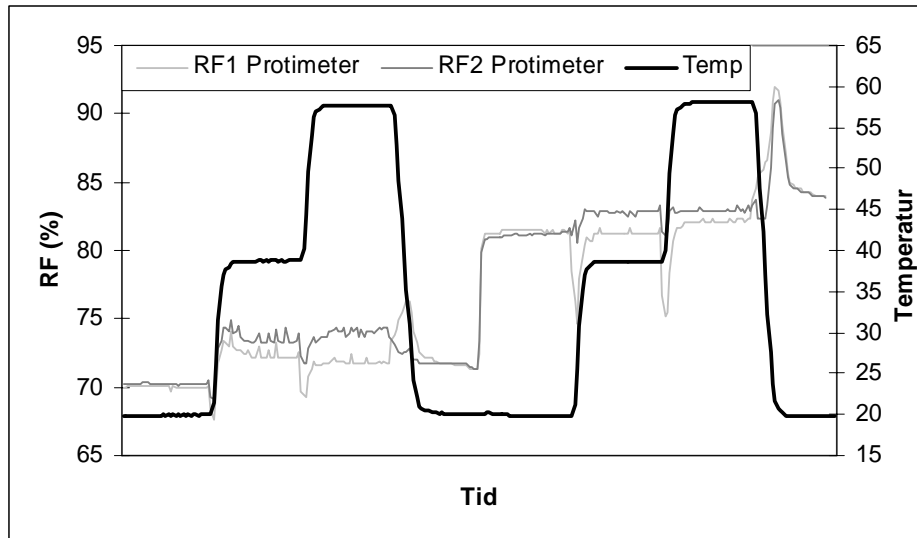
Jämförelse av olika givare

Efter de två första testserierna, gjordes ett försök med en annan typ av fuktgivare. Mätresultaten från denna serie skiljer sig stort från de två första. För att hitta anledningen till avvikelsen genomfördes ytterligare ett test i fuktgeneratorn med båda givartyperna. Testet genomfördes enligt tidigare förutsättningar men dock bara på två konstanta RF-nivåer, 70 % och 80 %.



Figur 4.24: Sammanställning av fuktgeneratorförsök för två givartyper

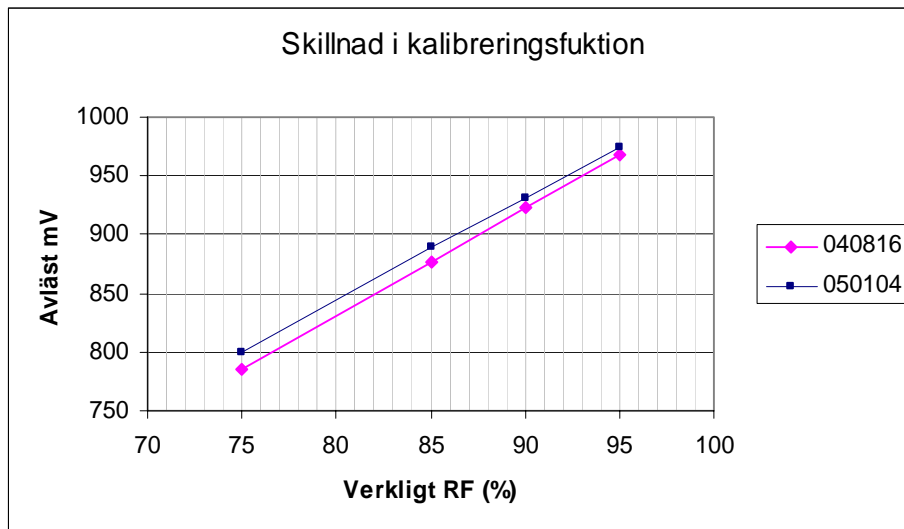
Försöket visar att det finns en minimal skillnad i hur givarna beter sig vid temperaturhöjningar, både i stabilitet och i mätvärde. Resultaten visar klart att det inte kan vara endast temperaturen som orsakar den stora skillnaden vid den tredje testserien. Båda givartyperna klarar av att leverera någorlunda korrekta mätvärde vid högre temperaturer. Således uppkom ingen förklaring till skillnaderna vid mätningarna i betongproverna.



Figur 4.25: RF-variation vid temperaturförändring

4.7 Efterkalibrering av fuktgivare

Mätresultaten i rapporten är omräknade med kalibreringsfunktioner som gjordes innan försöken inleddes. Då det tidigare inte var dokumenterat hur så här stora temperaturförändringar påverkar givarens mätegenskaper, genomfördes en efterkalibrering på samtliga givare som använts under försöken. Detta gjordes då samtliga försök var avslutade. Kalibreringen genomfördes i fuktgenerators på LTH. Givarna kalibrerades vid 20 °C och RF 75, 85, 90 och 95 %.



Figur 4.26: Exempel på skillnad i kalibreringsfunktion före och efter temperaturtester

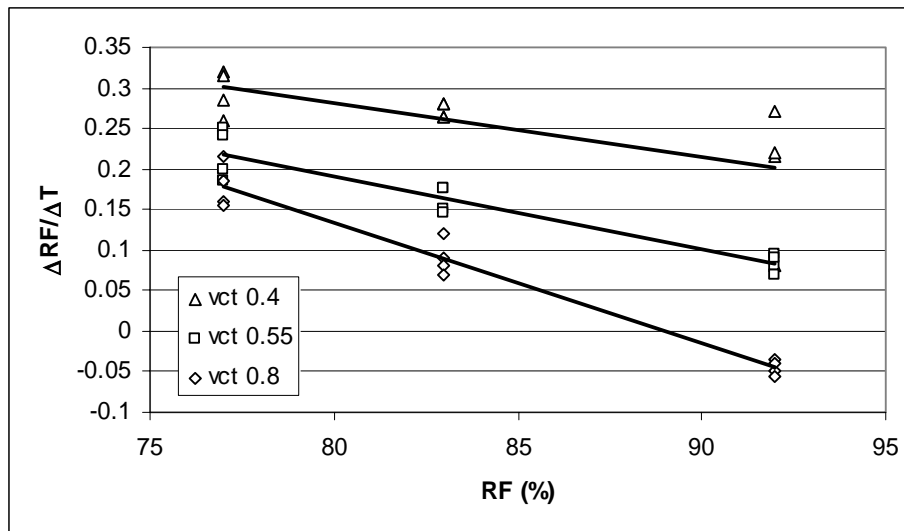
Överlag visar efterkalibreringen att givarna inte förändrats märkbart av försöken, se figur 4.26. Den största avvikelser ligger på drygt 2 % RF och vissa givare fick samma kalibreringsfunktion som innan försöken. Det kan alltså fastställas att givarnas mätresultat inte påverkas av en sådan behandling som de har fått utstå under temperaturtesten och därför behövs ingen korrigering av uppmätta värden göras i efterhand. Dock kvarstår frågeställningen varför olika givartyper levererar skilda mätvärde i betongproverna.

Samtliga kalibreringskurvor finns redovisade i appendix 6.4.

4.8 Jämförelser

För att kontrollera bestämningen av betongkvaliteten (vct) jämförs resultaten med tidigare undersökningar. Anders Sjöberg, (*Sjöberg 2002*), har gjort en undersökning av temperaturberoendet hos RF. I studien undersöktes betong med vct 0.4, 0.55 och 0.8 och utsattes för temperaturförändringar mellan 15-30 °C. Figur 4.26 är en

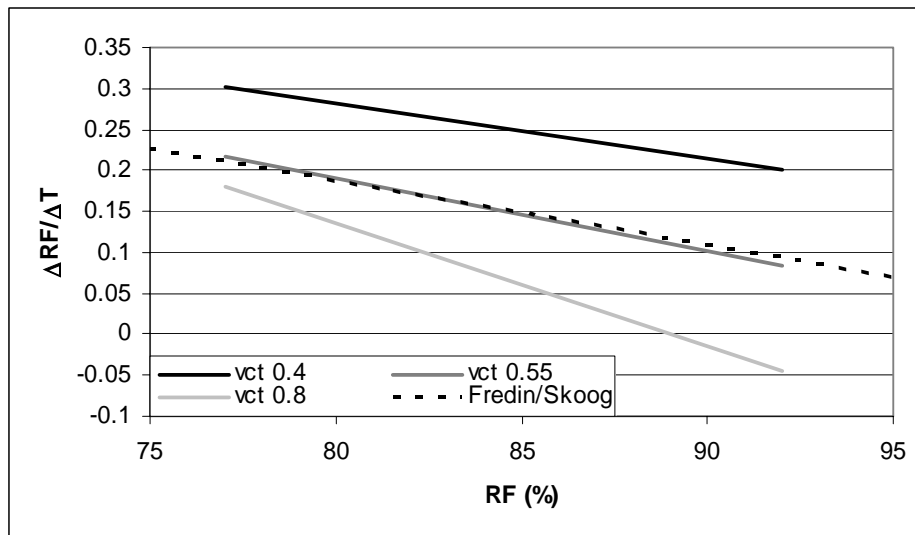
sammanställning av mätresultaten från försök med ökande och sjunkande temperatur i 5-graders steg. I studien fann man att det finns en klar skillnad mellan olika vct och förändringen av RF vid en temperaturändring.



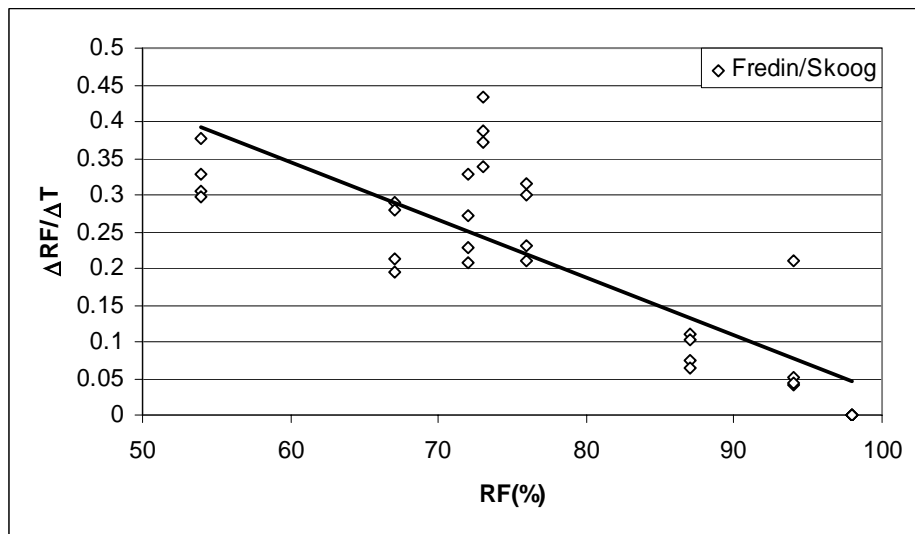
Figur 4.27: $\Delta RF/\Delta T$ baserad på mätningar med både ökande och sjunkande temperatur i intervallet 20-30 °C, (baserad på värde ur Sjöberg 2002)).

I aktuell studie har endast en betongkvalité använts. Fuktgivare och temperatursteg har varit de samma som vid Sjöberg (2002). Dock är mätningar gjorda inom ett större RF-intervall och temperaturspann i detta arbete. I figur 4.28 redovisas RF-förändringen för tre vct samt med mätresultat från aktuell studie i temperaturintervallet 20-30 °C med 5-graders steg. En jämförelse av $\Delta RF/\Delta T$ visar att RF-förändringen från denna studie i stort sett tangerar den linje för vct 0.55 inom intervallet 77-92% RF, (Sjöberg 2002).

Detta innebär, med stor säkerhet, att beräkningarna från KMG-försöket, se kap 3.3.3. är korrekta och att mätresultaten från denna studie är gjorda på en betong med vct \approx 0.55. Omräkningstabellerna som framtagits i denna rapport måste således korrigeras för andra vct.



Figur 4.28: $\Delta RF/\Delta T$ för tre vct i temperaturintervallet 20-30 °C (Sjöberg 2002), samt med mätresultat från denna studie.



Figur 4.29: $\Delta RF/\Delta T$ baserad på mätningar med både ökande och sjunkande temperatur inom temperaturintervallet 20-30 °C.

Bekräftelse av resultat

Efter de tre temperaturserierna, blev det uppenbart att någon av de två fuktgivarna levererade fel värde. Värdena som levererades under temperaturserie 1, med Protimeter, låg väsentligt lägre än Vaisala för samtliga prover. För att utreda vilka

Kapitel 4 – Resultat

mätvärde som var korrekta, genomfördes en mätning på uttaget prov i provrör. Från två betongcylindrar som stått förseglade togs provbitar ut. Försöket genomfördes på så sätt att en givare av varje fabrikat mätte på prover från samma betongcylinder. Den relativa fuktigheten loggades under 3 dygn och jämfördes med resultat från tidigare mätningar i betongproverna, se tabell 4.5. Innan detta försök hade givarna nykalibrerats.

Tabell 4.5: Resultat av mätning på uttaget prov, RF (%)

Prov	RF, Vaisala	RF, Protimeter	RF, Vaisala	RF, Protimeter	Skillnad
	Provrör	Provrör	Temp. Serie II	Temp. Serie I	RF (%)
7	53,9	-	53,4	-	0,5
8	84,7	-	85,6	-	-0,9
7	-	54,9	-	41,7	13,2
8	-	83,0	-	75,3	7,7



Försöket visade att givarna levererade ungefär samma resultat i provrören. Vid en jämförelse av dessa värden med resultaten från Vaisala temperaturserie 2 kan det konstateras att mätvärdena från de två första temperaturserierna är korrekta, medan mätvärdena från serie 3 med Protimeter är felaktiga. Det är en anmärkningsvärd skillnad mellan mätvärdena från borrhålmätningarna och mätning på uttaget prov

Figur 4.30: Mätning av RF i uttaget prov

Ytterligare givartester

För att se om det var en tillfällighet att givartyperna levererade olika RF i samma provkropp vid huvudförsöken genomfördes ett försök. Vid 20°C växlades givare mellan de olika fabrikaten i alla provkropparna. I tabell 4.6 redovisas resultaten från försöket. Försöket genomfördes för att isolera eventuella problemkällor och faktorer som kunde tänka sig att påverka resultaten, bl.a. avlägsnades aluminiumfolien och aluminiumtejpen. Mätningarna som genomfördes 21/12 är innan och efter aluminiumtejp och folie avlägsnats.

Syftet var att undersöka om det var någon enskild faktor som störde ut elektroniken i givarna. Eftersom båda givartyperna visar korrekta värden vid försök i ett givet klimat

Kapitel 4 – Resultat

i fuktgeneratoren, men inte monterat i provkropparna genomfördes ytterliggare ett försök. I ett klimatrum med konstant RF(60%) och temperatur placerades givare i olika situationer.

- **Hål:** tegel, betong, stål.
- **Omgivning:** aluminiumfolie, aluminiumtejp

Givarna visar då ingen momentan förändring vid försöken med isolerade felkällor. Givarna kopplades till respektive handenhet dvs. endast ett direkt värde på RF avlästes. Skulle det ha varit elektroniken som stördes borde det resultera i ett momentant utslag på handenheten.

Ingen av de enskilda faktorerna alstrade något större utslag på handenheten. Slutsatsen är att ingen av faktorerna är ensam orsak till den stora skillnaden vid huvudförsöken. Möjligheten finns att det kan röra sig om en synergieffekt mellan de individuella felkällorna.

Ett försök att föra in givare i klimatskåpet medförde inte heller någon markant förändring på utsignalen. Dock var det svårare att kontrollera klimatet i klimatskåpet med tanke på rumstemperatur och fuktighet. Oavsett det, var det ingen av de redovisade felkällorna som genererade en förändring på mer än ca 1,5 % RF. Alltså dras slutsatsen att anledningen till den stora skillnaden är någon annan än vad som testats.

Tabell 4.6: Jämförelse mellan Vaisala och Protimeter i borrhål

Givare	Tid	Prov 1	Prov 2	Prov 3	Prov 4	Prov 5	Prov 6	Prov 7	Prov 8
Vai.	13/9	65.6	73.8	70.3	91.9	70.3	98.6	53.8	85.6
Prm.	8/12		65.1		78.1			41.7	75.3
Vai.	16/12	66.7	71.7	70.5	88.5	71.0	97.6	50.5	81.2
Prm.	20/12		66.2		75.7			46.7	71.4
Vai.	21/12			70.5		71.1			
Prm.	21/12		66.2		75.7				
Öppet									
Vai.	21/12			70.9		69.7			
Prm.	21/12		64.2		75.2				
Differens			2 % RF	-0.4 % RF	0.5 % RF	0.4 % RF			

5 Diskussion

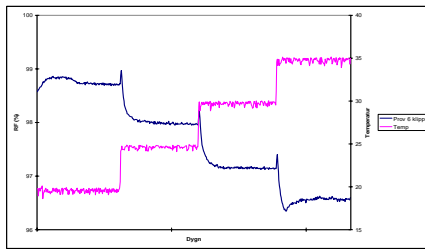
5.1 Reflektion kring resultaten

Syftet med detta arbete var att undersöka möjligheten att kunna mäta relativ fuktighet i betong vid en högre temperatur än den som givaren är kalibrerad för. Studien visar att det är fullt möjligt att framställa en omräkningstabell, dock är den specifik för varje vct och givarfabrikat. Vi redovisar omräkningstabeller för betongkvaliteten vct 0,55. För att uppnå en bred praktisk användbarhet bör det göras försök på de vanligaste betongkvalitéerna (vct 0.35-0.6).

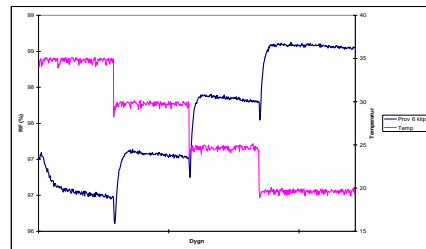
Grafernas utseende

I enlighet med kapitel 2.1 ökar den uppmätta relativa fuktigheten vid en ökning av temperaturen. Start och slutvärdet i en specifik provkropp borde vara samma vid 20°C. Nu visar det sig att dessa mätvärden inte är identiska efter temperaturcykeln (20°C → 60°C → 20°C). Resultaten är inte konsekventa utan vissa slutvärden ligger högre och vissa lägre än startvärdet, (6 av 8 ligger lägre). De möjliga orsakerna kan eventuellt vara faktorer som hysterés, dvs. olika RF beroende på om kroppen fuktas upp eller torkas ut, och läckage i provkropparna.

I en av provkropparna med start-RF över 98%, uppvisas ett omvänt beteende i temperaturintervallet 20-35 °C. Vid en höjning av temperaturen sjunker den relativa fuktigheten (figur 5.1) och omvänt vid en sänkning av temperaturen (figur 5.2).



Figur 5.1: Avvikelse vid temp. ökning



Figur 5.2: Avvikelse vid temp. sänkning

Orsaken till denna variation är oklart men kan ha att göra med att givarna har svårt att mäta vid fuktnivåer i närheten av RF 100%.

Vetenskaplig signifikans

Ur en mätteknisk synvinkel är resultaten mycket intressanta. De illustrerar vikten av att använda rätt utrustning vid rätt tillfälle. Mätvärdena skiljer sig markant mellan de olika givartyperna, vilket visar att man bör undersöka mätnoggrannheten hos de givare som idag används av branschen. Mätvärdena från Vaisala har kunnat bekräftas med mätningar på uttaget prov.

5.2 Identifiering av osäkerhetsfaktorer

Vid laboratorieförsök av den här karaktären är det svårt att hitta alla osäkerheter som påverkar resultaten. Vissa felkällor är kända vid start och andra uppkommer under arbetets gång. De felkällor som identifierats under detta arbete presenteras och kommenteras nedan.

Betongkvalité

Vid konditioneringen gjordes ett antagande om betongkvalité som i efterhand skulle visa sig vara något avvikande, vct 0.625. Antagandet fick endast till följd att fuktnivåerna efter konditionering inte blev exakt de som önskades. Det har dock ingen betydelse för mätresultaten eftersom vi fick en relativt jämn spridning av fuktnivåerna i provkropparna. Ytterligare undersökningar genomfördes senare i projektet för att noggrant fastställa betongkvalitén, (vct 0,55).

Kalibrering

Det mätvärde som levereras av en fuktgivare måste omräknas med hjälp av en kalibreringsfunktion för att erhålla ett korrekt värde. Tidigare har det inte dokumenterats hur en så här pass hård belastning påverkar givarens tekniska egenskaper. För att säkerställa att mätvärdena som omräknats gjorts med rätt kalibreringsfunktion, genomfördes en efterkalibrering av givarna. Det kunde då fastställas att givarna inte drivit i kalibreringen och att de bevisligen klarar av en påfrestning av detta slag.

Läckage i provkropparna

Förutsättningen, för att en omräkning av RF vid höga temperaturer skulle vara möjlig att undersöka, var att fukthalten i provkropparna hålls konstant. För att förhindra läckage och uttorkning vid höga temperaturer tätades provkropparna noggrant i flera lager aluminiumfolie och aluminiumtejp.

Provkropparna vägdes före och efter testserierna för att kontrollera ett eventuellt läckage. Den största förlusten uppgick till ca. 1,5g, vilket i sammanhanget är försumbart. Eftersom avdunstningen troligen har skett från kroppens periferi och ej från centrum där mätningen utförts, har läckaget inte påverkat resultatet.

Noggrannhet på utrustning

I kapitel 3.2 redovisas vilka felmarginaler som gäller för fuktgivarna. Fel uppstår med stor sannolikhet konsekvent och är därför ingen engångsföreteelse. Dock har temperaturen överstigits med 10 °C för vad tillverkaren av Protimeter Hygrostick kan

garantera tillförlitliga resultat för (50°C). Noggrannheten på klimatskåpet och fuktgeneratoren har ej undersökts men enligt Avdelningen för Byggnadsmaterial har de hög noggrannhet.

Förenklade funktioner

När $\Delta RF/\Delta T$ framtagits har det gjorts i form av en linjär funktion. För vissa av temperaturintervallen är spridningen stor och linjen blir på sina ställen en grov uppskattning. För tydlighetens skull är detta ändå det bästa sättet att redovisa förändringen och för att göra det konsekvent hanterbart för omräkningsfunktionerna.

Felaktiga mätvärden

För två av provkropparna överstigs 100 % RF då temperaturen är 50 °C och över. Det är ett orimligt resultat då RF endast kan ligga i intervallet 0-100 %. Provkropparna hade dock redan vid 20 °C en hög fukthalt (95-97 %) och vid dessa nivåer är noggrannheten hos givaren mindre än för under 90 %. Tillverkaren anger en noggrannhet på ± 3 % RF vid 20 °C och det kan förklara osäkerheten vid högre temperaturer. För att öka noggrannheten på omräkningsfunktionerna är dessa värden bortplockade.

5.3 Rekommendationer inför framtida studier.

Detta arbete är tänkt som en förstudie. I framtida studier rekommenderas försök på betong med varierande vct inom temperaturintervallet 20 – 60 °C. För att bekräfta resultaten av detta arbete bör det även göras fältstudier.

En teknisk studie av Protimeter Hygrostick för mätning i borrhål bör genomföras för att komma fram till varför så stora skillnader i mätresultat uppstår.

5.4 Rekommendationer för användning av omräkningstabell.

Tidigare undersökningar (Sjöberg 2002) har visat att $\Delta RF/\Delta T$ är specifik för varje betongkvalité. Alltså kan omräkningsfunktionen endast med stor säkerhet användas för betong med vct 0,55. Överslagsmässigt kan tabellerna användas för mätning i betong med närliggande vct men osäkerheten vid högre temperaturer är stor vid sådana mätningar.

Omräkningstabellerna för Protimeter är endast gjorda för att illustrera hur givaren upplever förändringen av RF. Eftersom värdet vid kalibreringstemperaturen är felaktigt, kommer således detta fel att följa med genom hela serien. Undersökningarna har visat att förändringen är specifik för varje temperaturintervall och därför är det

Kapitel 5 – Diskussion

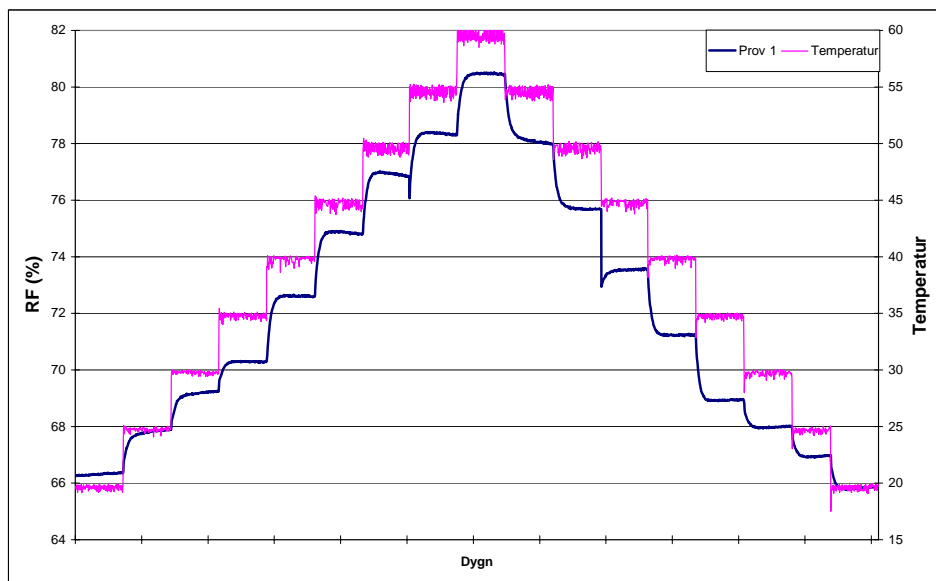
inte möjligt att med någon säkerhet räkna om resultaten från Protimetergivaren till verkligt RF.

6 Appendix

Under appendix redovisas samtliga diagram som ligger till grund för de sammanställda diagrammen i rapporten. Diagram för varje temperaturintervall och försöksserie finns redovisade.

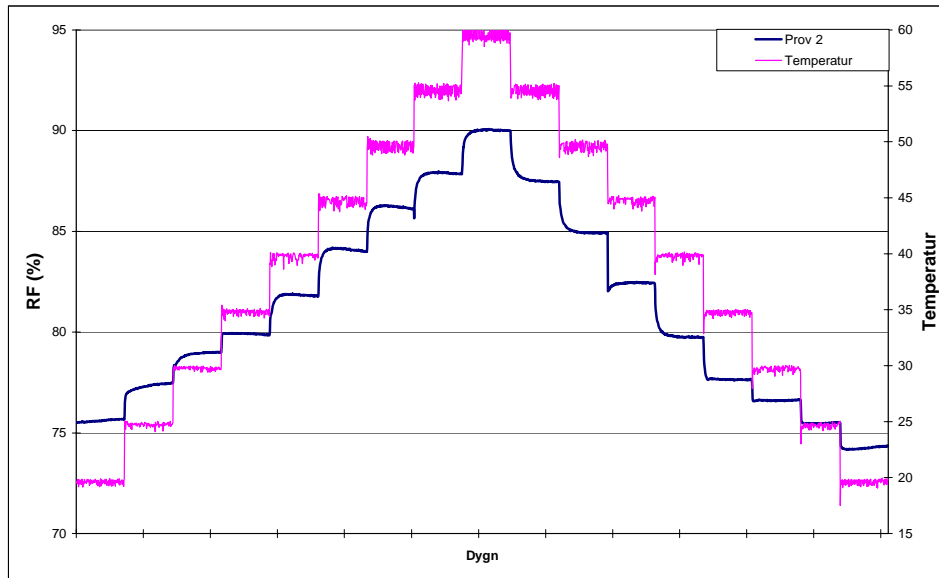
6.1 Huvudförsök 1: Vaisala

6.1.1 Diagram

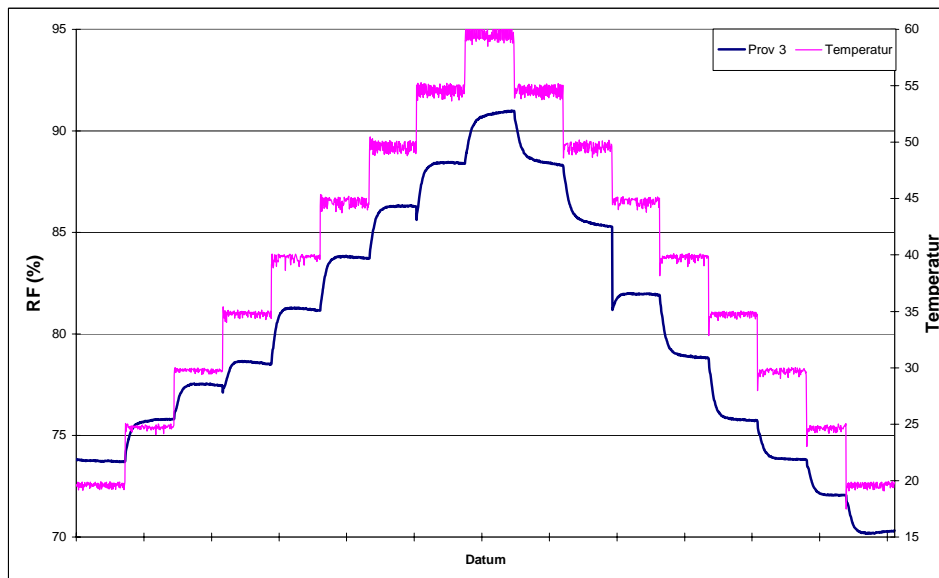


Figur 6.1: Prov 1 Försöksserie I

Kapitel 6 – Appendix

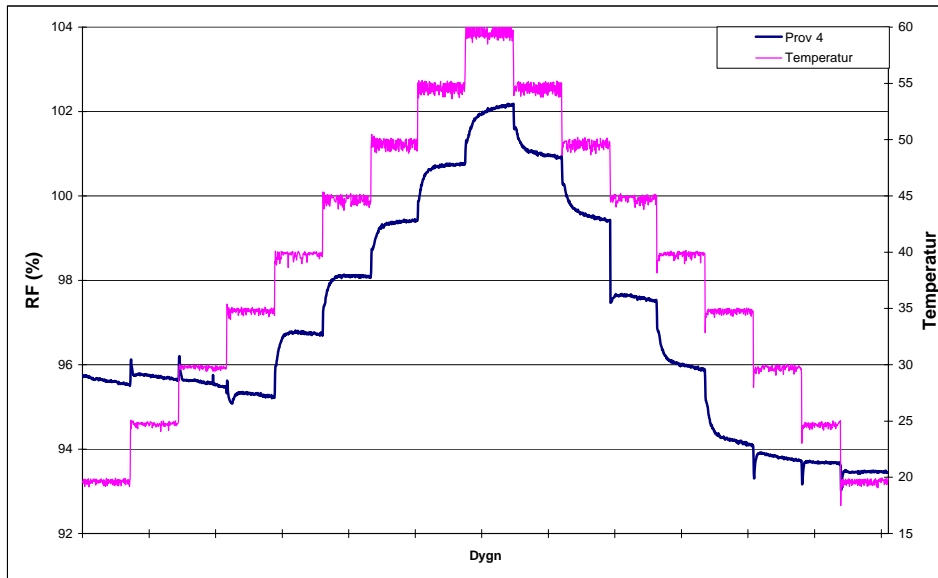


Figur 6.2: Prov 2 Försöksserie I

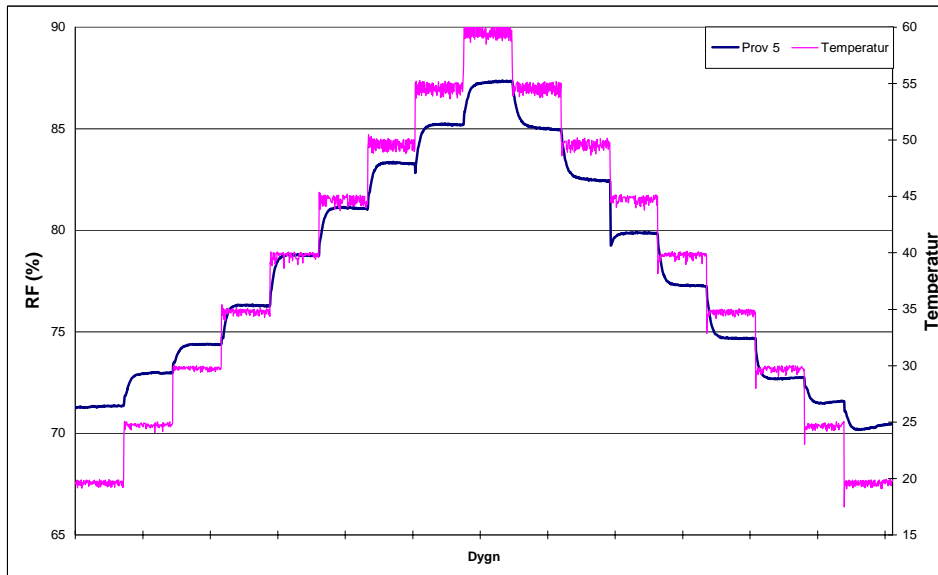


Figur 6.3: Prov 3 Försöksserie I

Kapitel 6 – Appendix

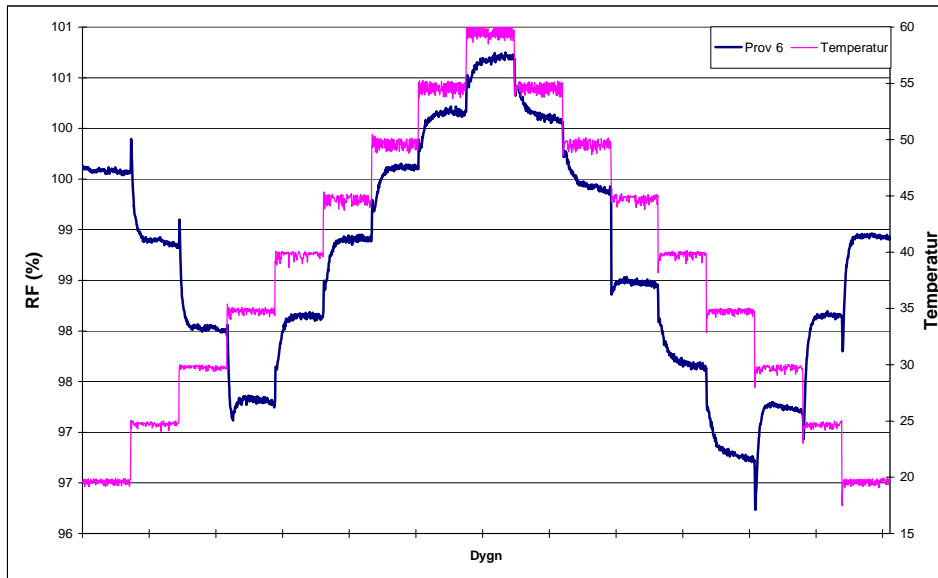


Figur 6.4: Prov 4 Försöksserie I

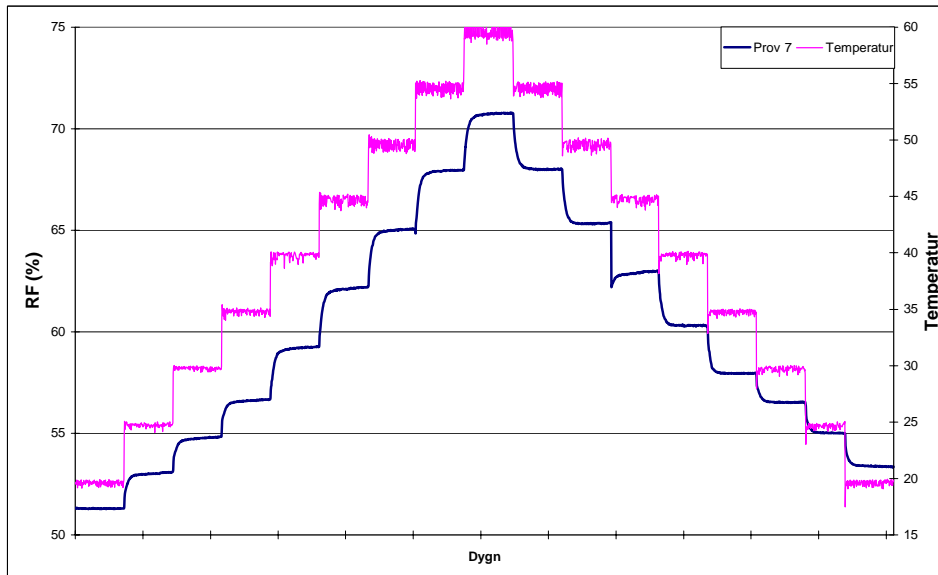


Figur 6.5: Prov 5 Försöksserie I

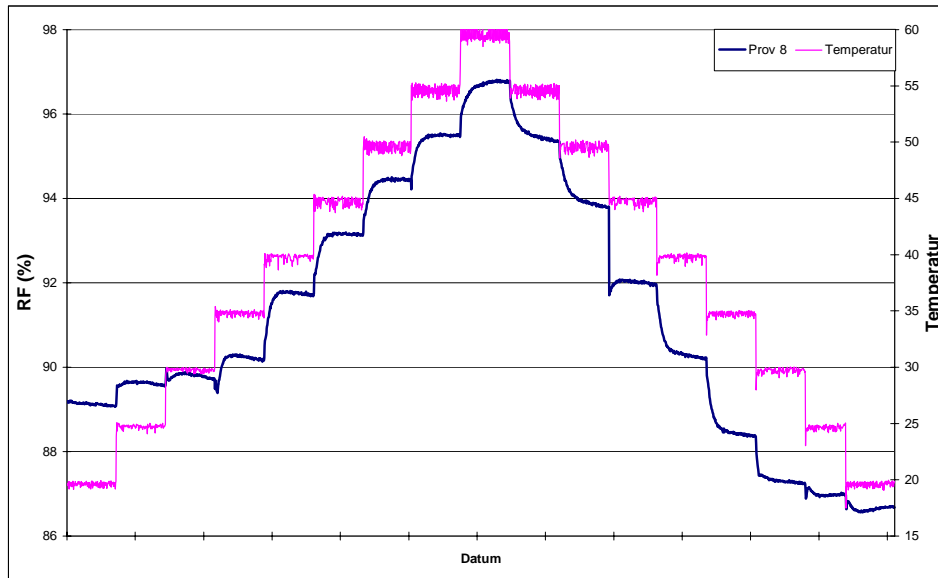
Kapitel 6 – Appendix



Figur 6.6: Prov 6 Försöksserie I



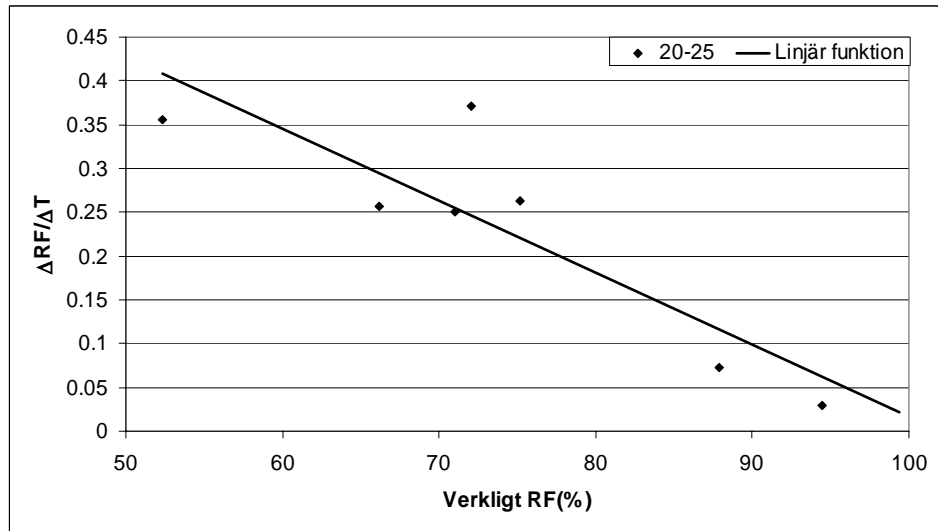
Figur 6.7: Prov 7 Försöksserie I



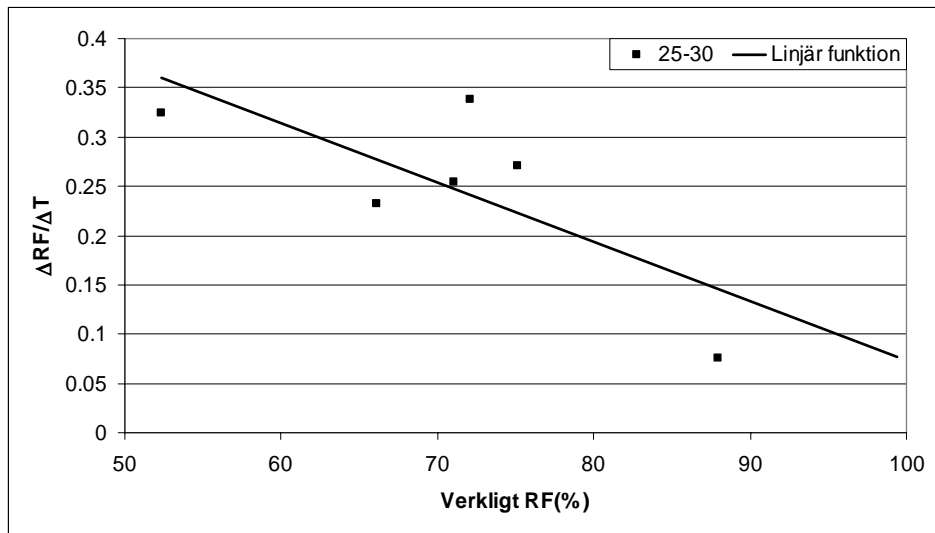
Figur 6.8: Prov 8 Försöksserie I

6.1.2 Omräkningsdiagram: $\Delta RF/\Delta T$

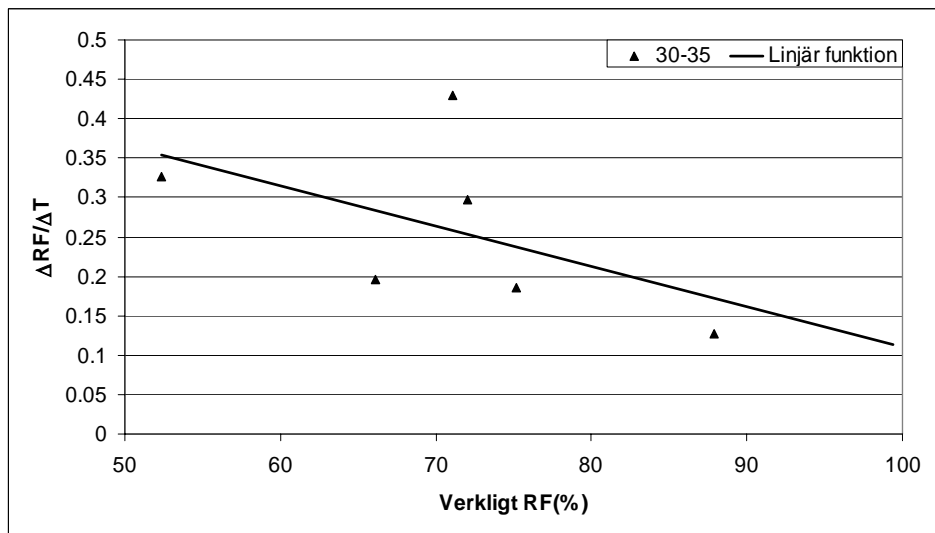
Under detta avsnitt redovisas förändringen av $RF/^\circ C$ för 5-graders intervall, samt med mätpunkterna redovisade.



Figur 6.9: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-25 $^\circ C$

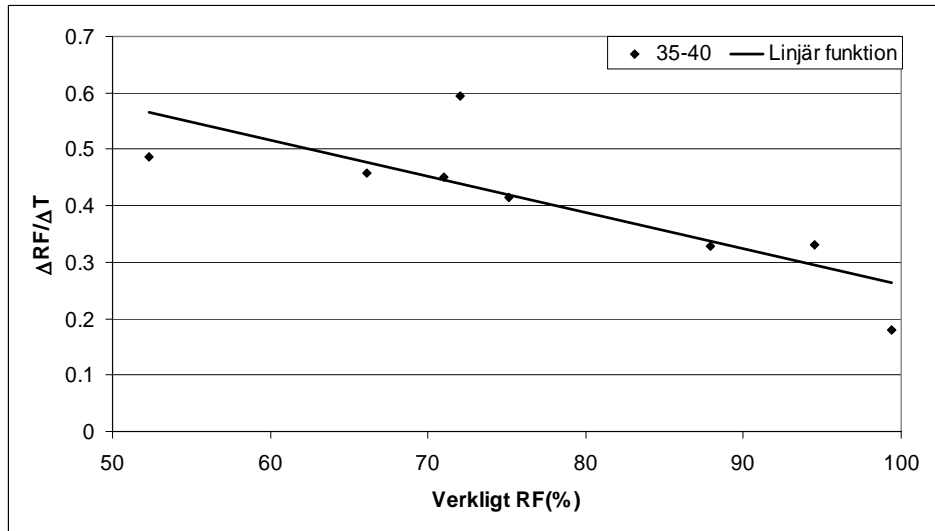


Figur 6.10: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 25-30 °C

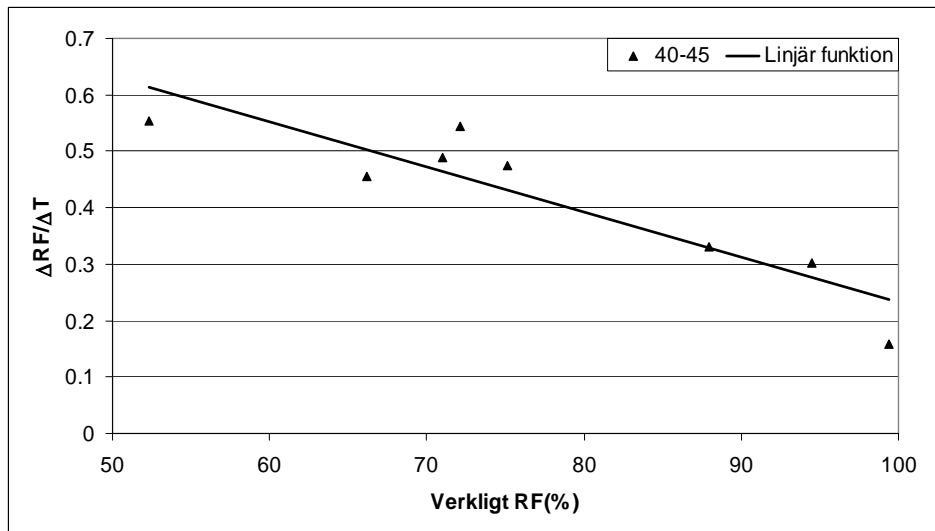


Figur 6.11: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 30-35 °C

Kapitel 6 – Appendix

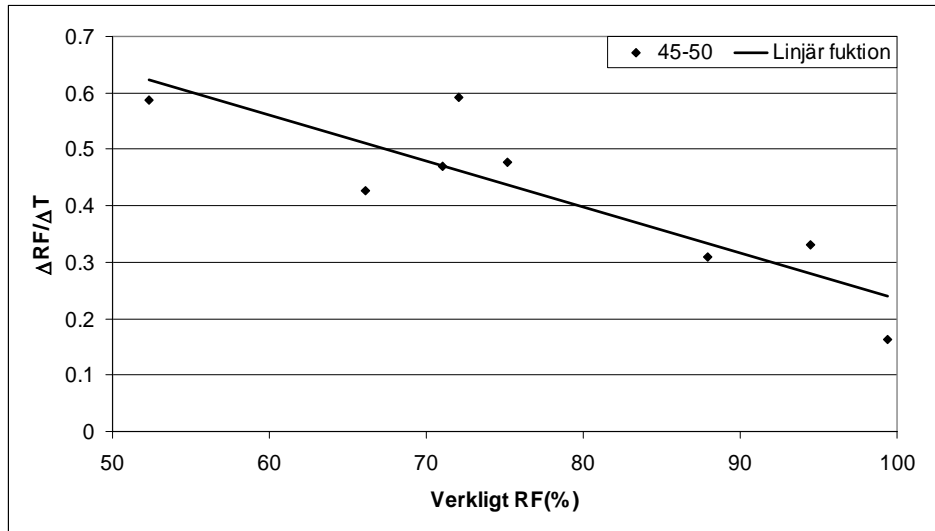


Figur 6.12: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 35-40 °C

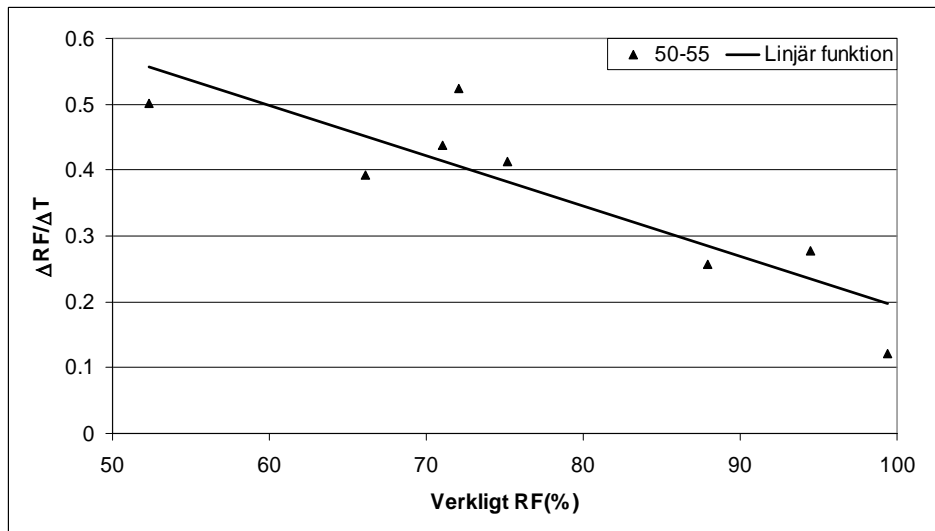


Figur 6.13: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 40-45 °C

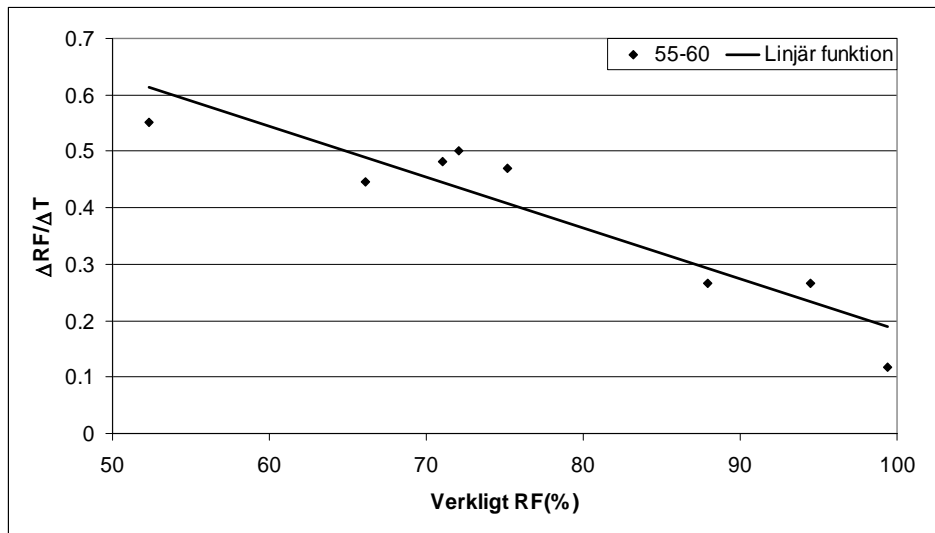
Kapitel 6 – Appendix



Figur 6.14: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 45-50 °C

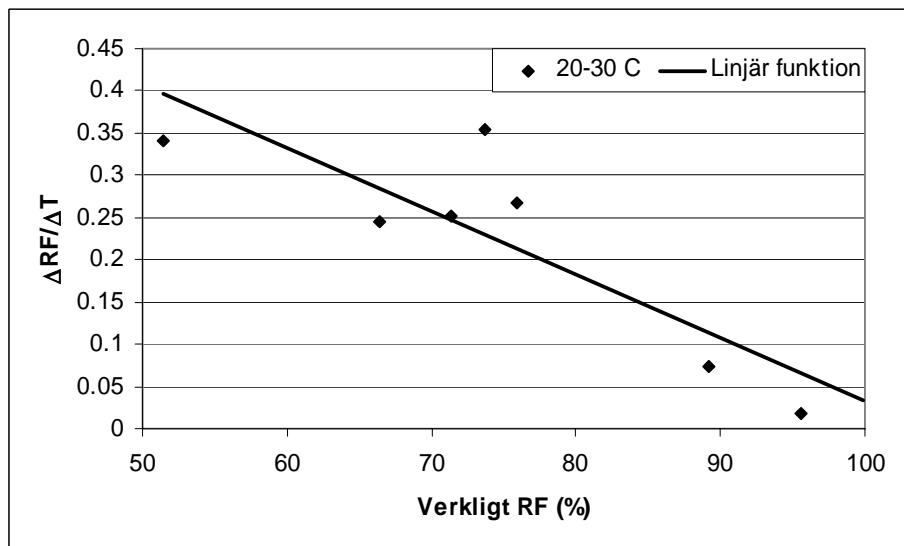


Figur 6.15: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 50-55 °C

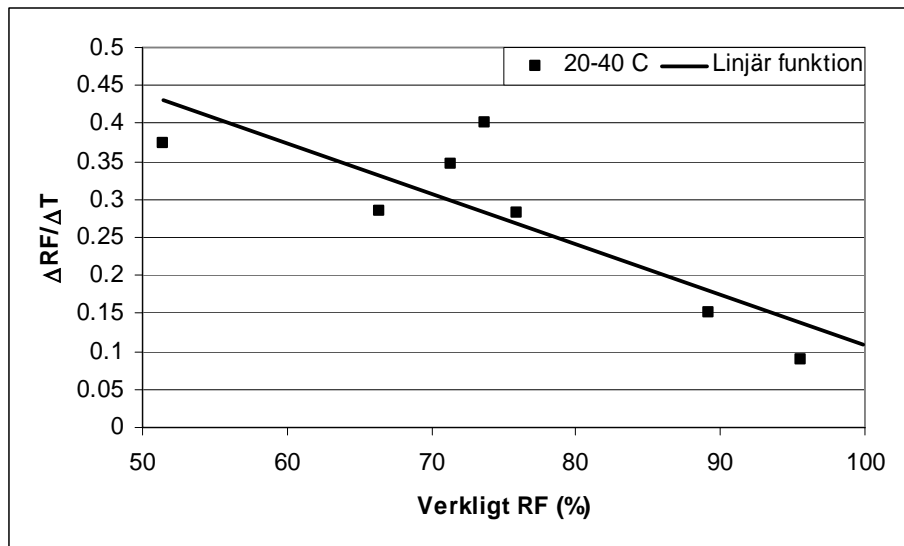


Figur 6.16: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 55-60 °C

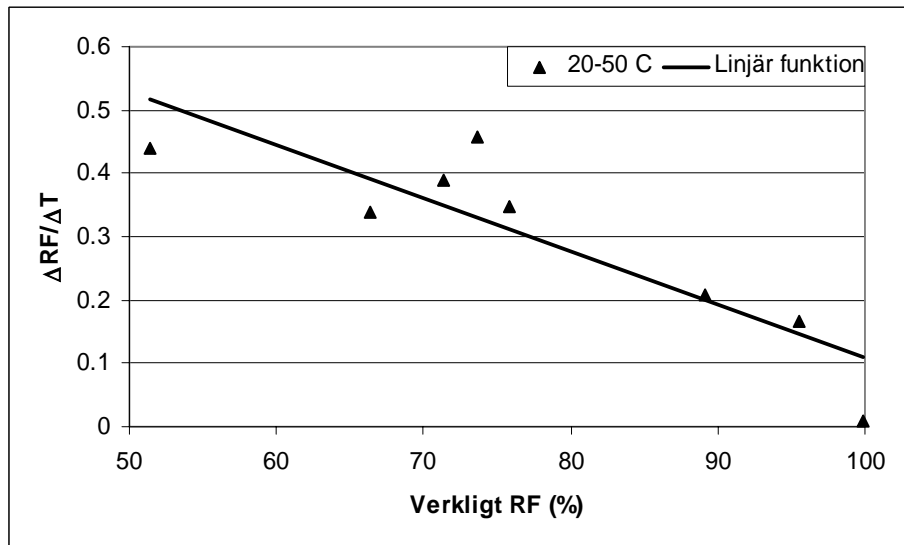
Under detta avsnitt redovisas förändringen av RF för större intervall, samt med mätpunkterna redovisade.



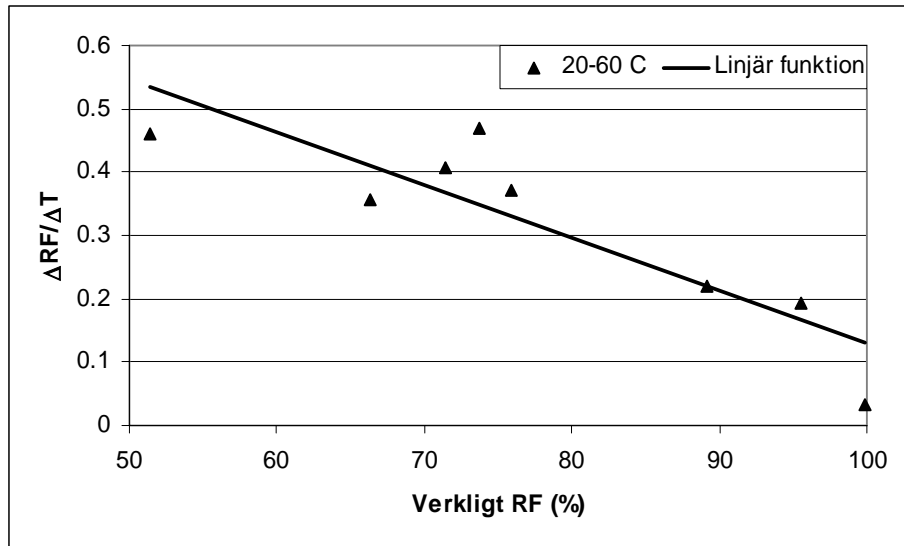
Figur 6.17: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-30 °C



Figur 6.18: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-40 °C



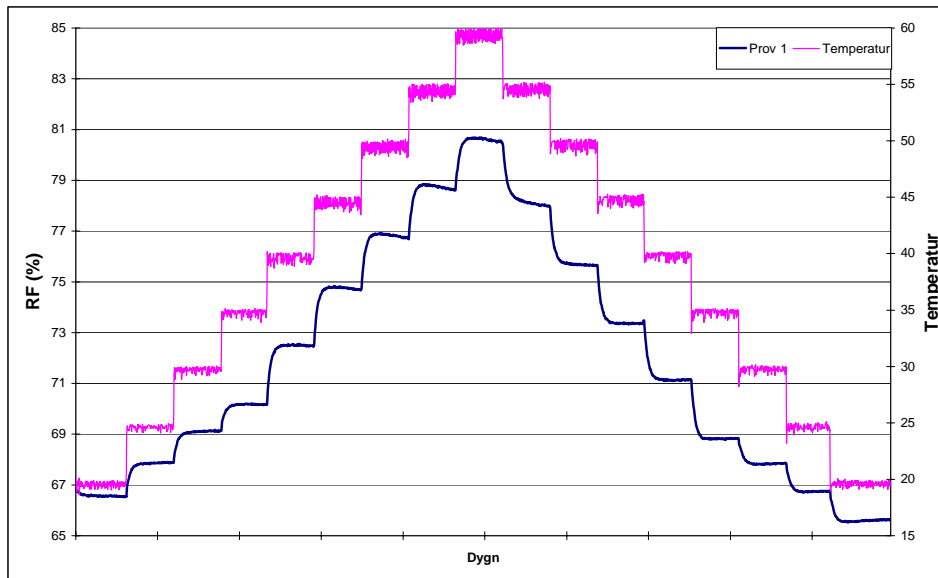
Figur 6.19: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-50 °C



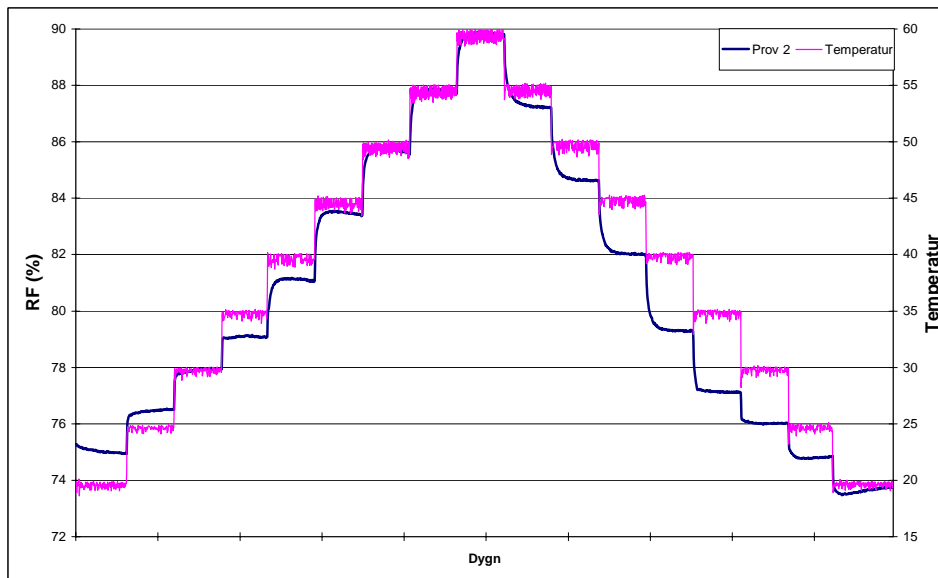
Figur 6.20: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-60⁰C

6.2 Huvudförsök 2: Vaisala

6.2.1 Diagram

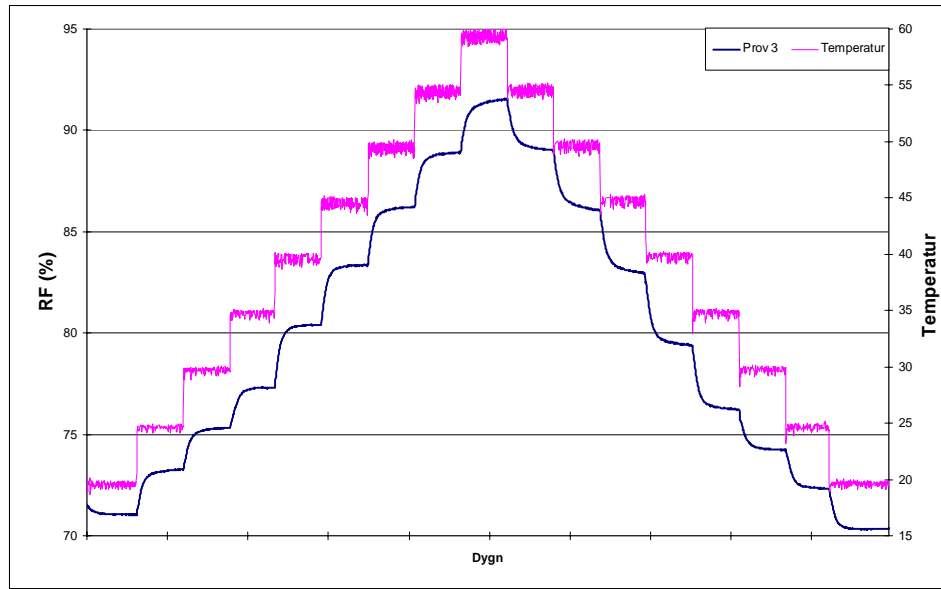


Figur 6.21: Prov 1 Försöksserie II

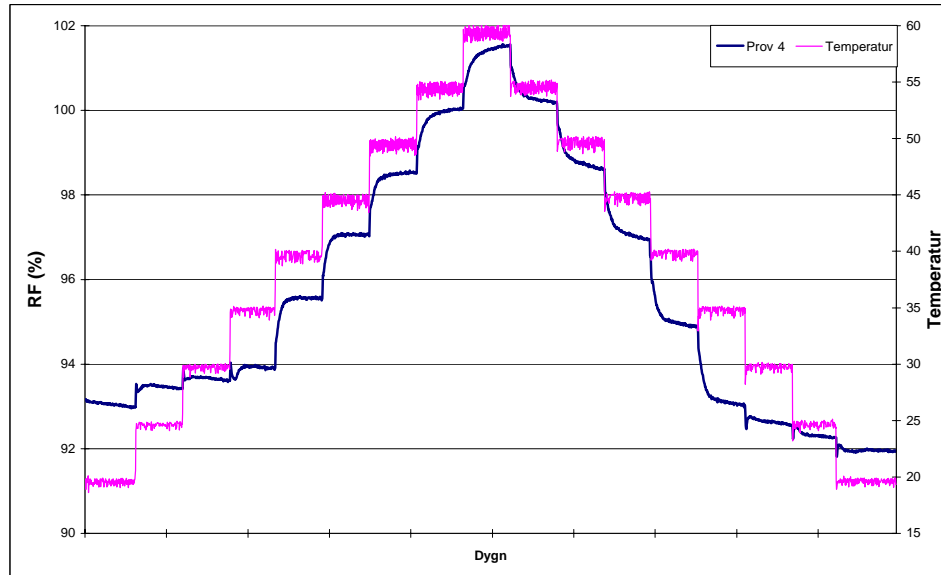


Figur 6.22: Prov 2 Försöksserie II

Kapitel 6 – Appendix

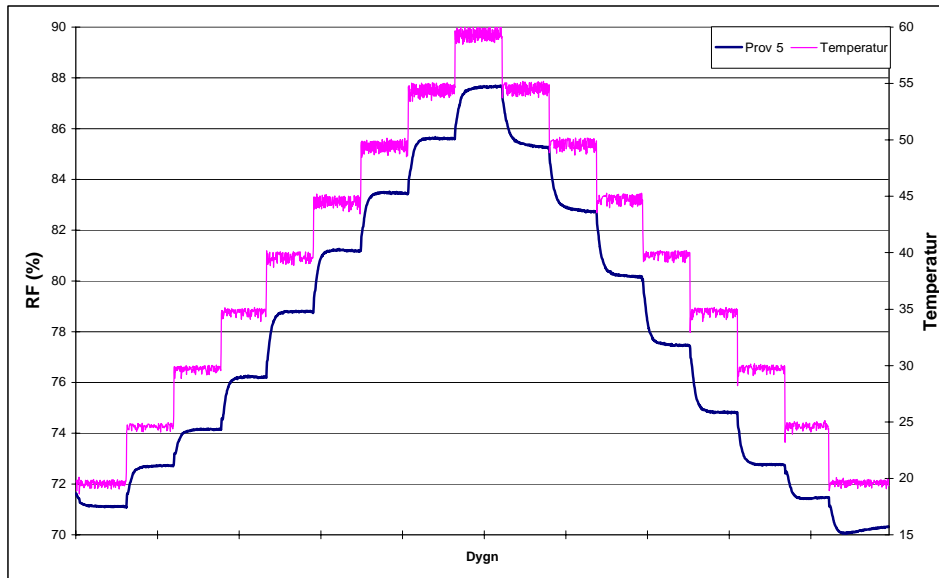


Figur 6.23: Prov 3 Försöksserie II

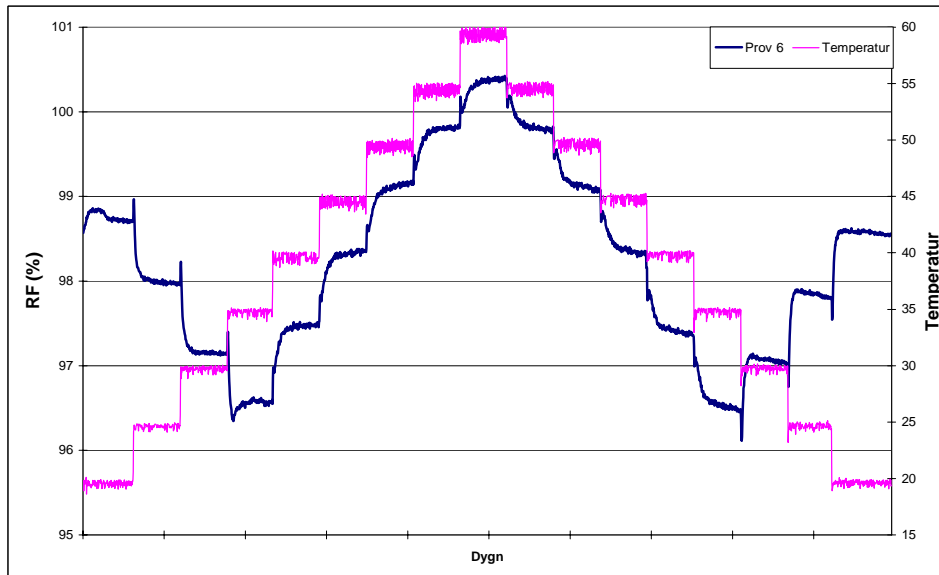


Figur 6.24: Prov 4 Försöksserie II

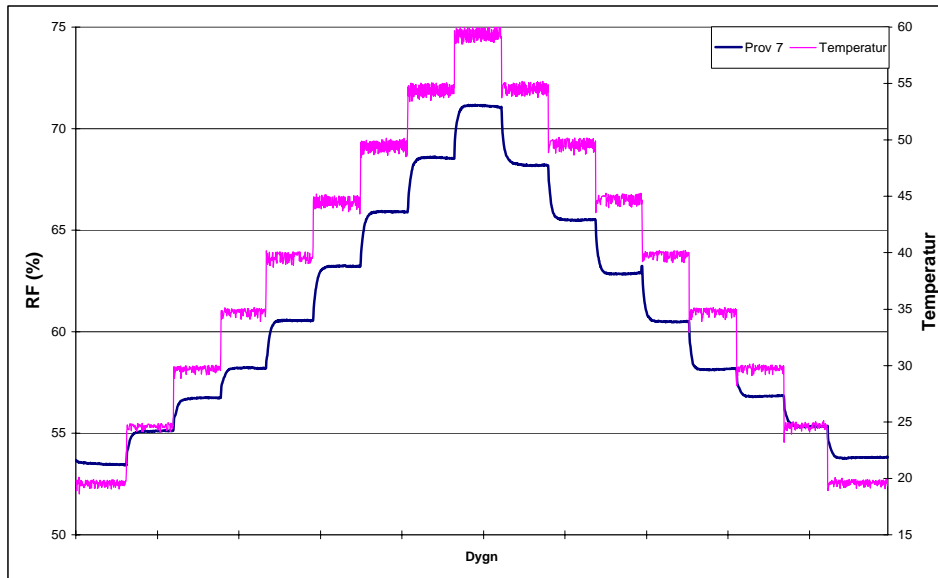
Kapitel 6 – Appendix



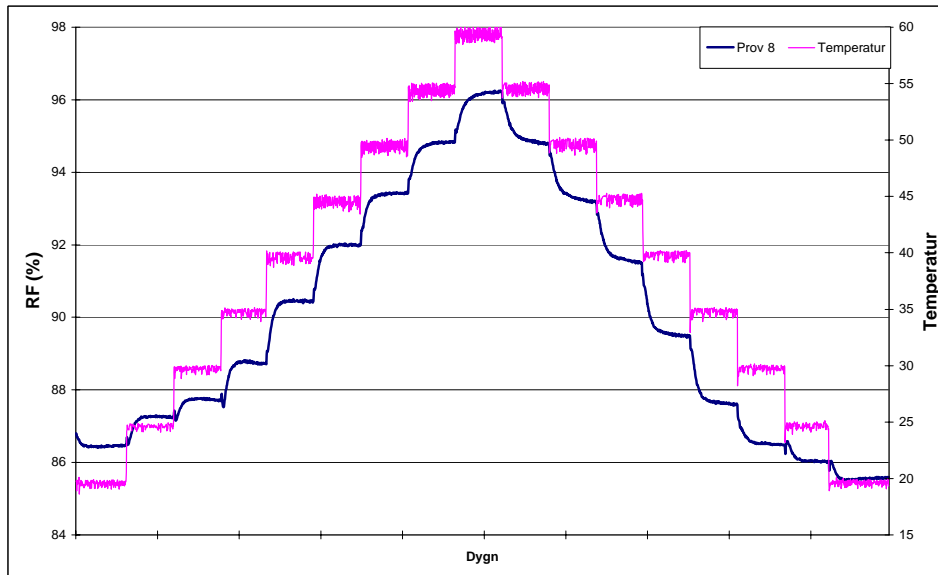
Figur 6.25: Prov 5 Försöksserie II



Figur 6.26: Prov 6 Försöksserie II



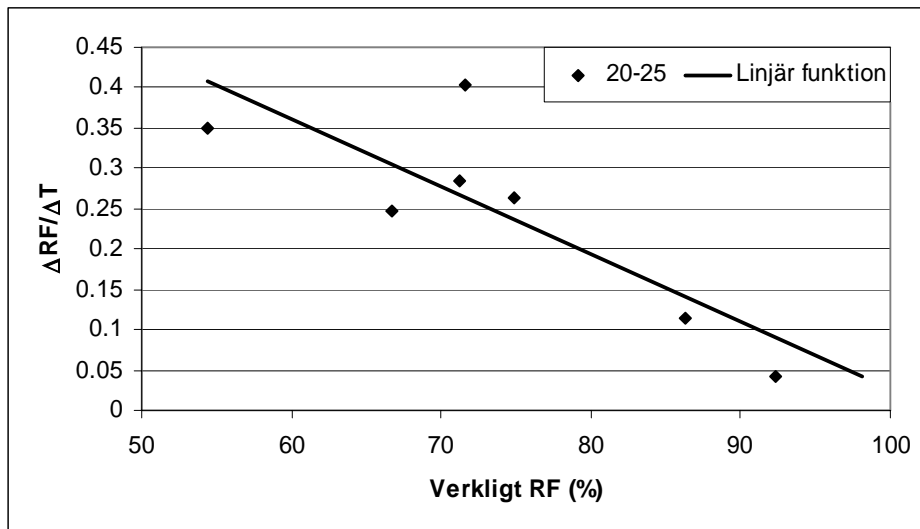
Figur 6.27: Prov 7 Försöksserie II



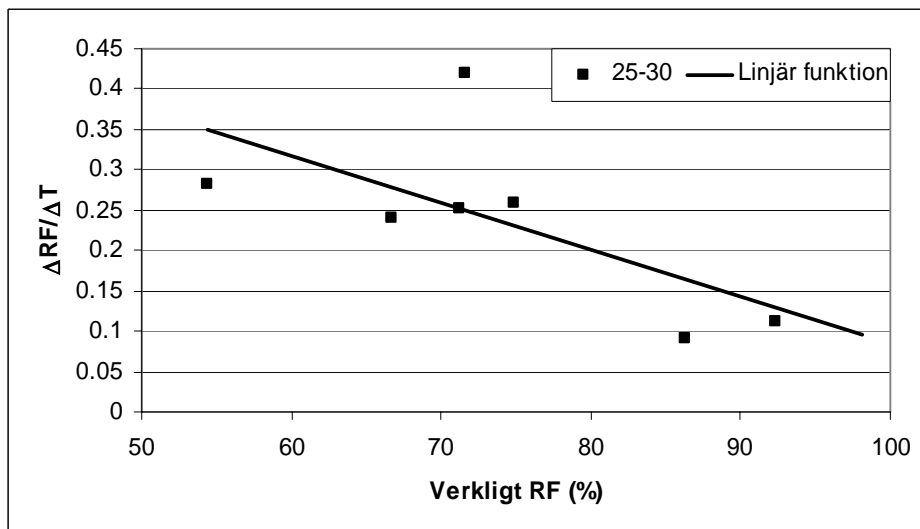
Figur 6.28: Prov 8 Försöksserie II

6.2.2 Omräkningsdiagram: $\Delta RF/\Delta T$

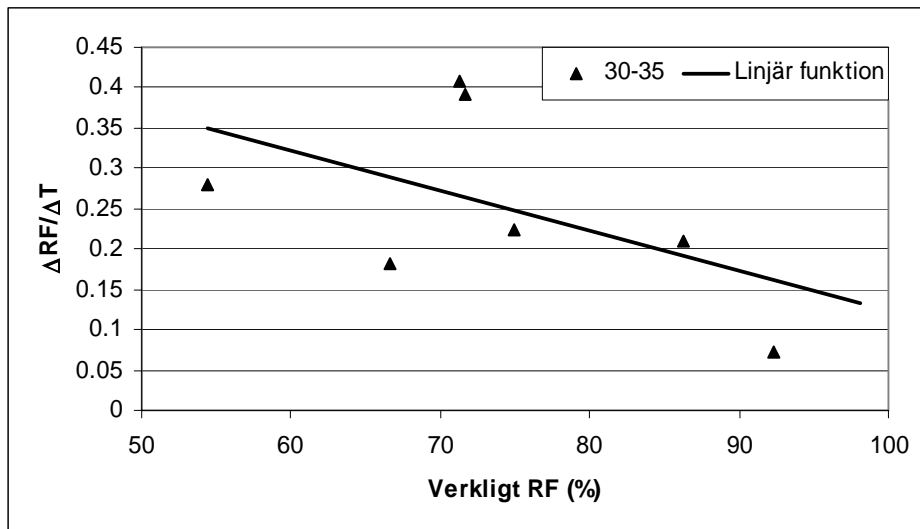
Under detta avsnitt redovisas förändringen av $RF/^\circ C$ för 5-graders intervall, samt med mätpunkterna redovisade.



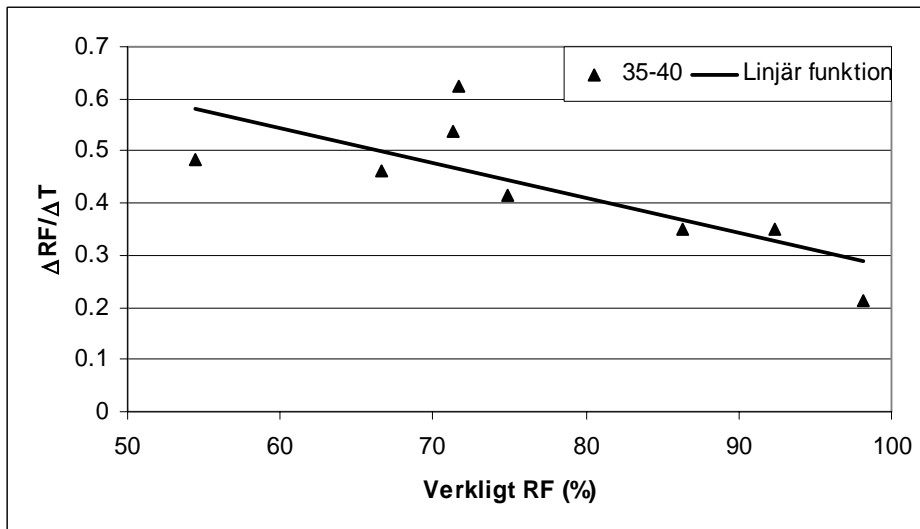
Figur 6.29: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-25 °C



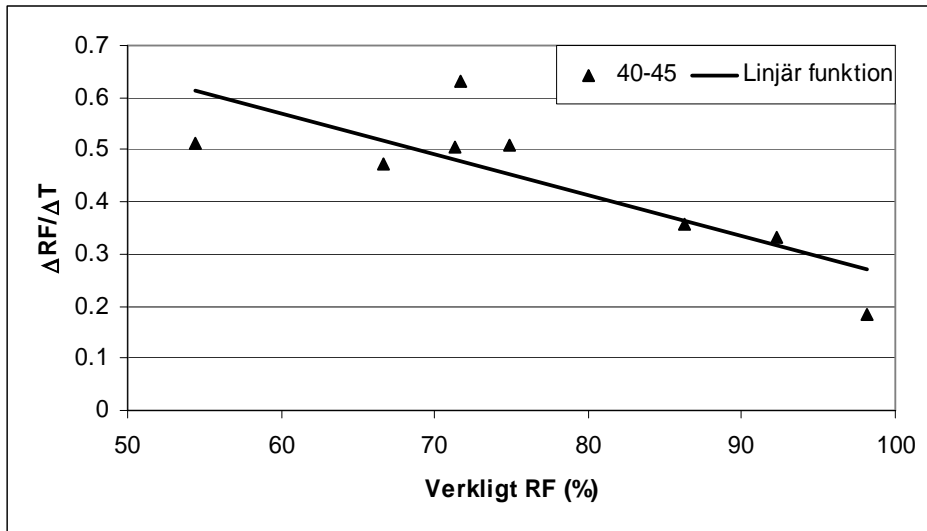
Figur 6.30: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 25-30 °C



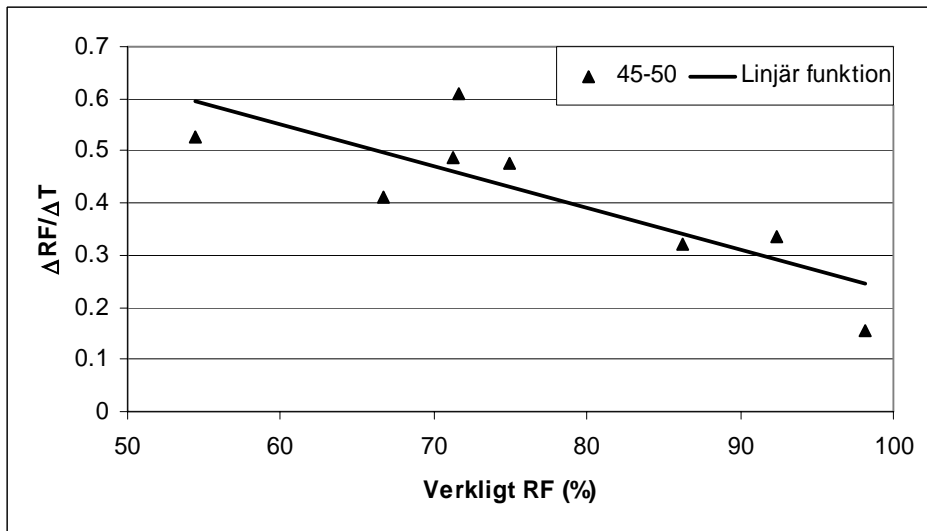
Figur 6.31: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 30-35 °C



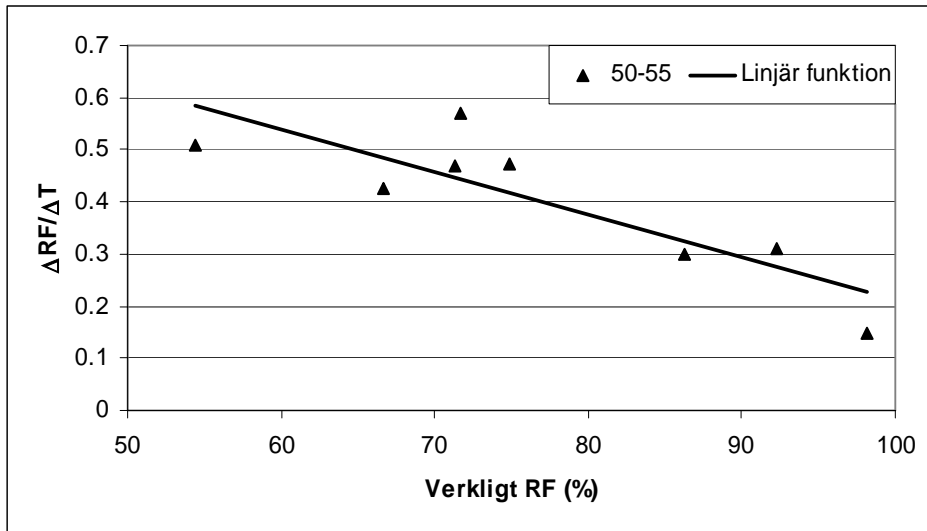
Figur 6.32: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 35-40 °C



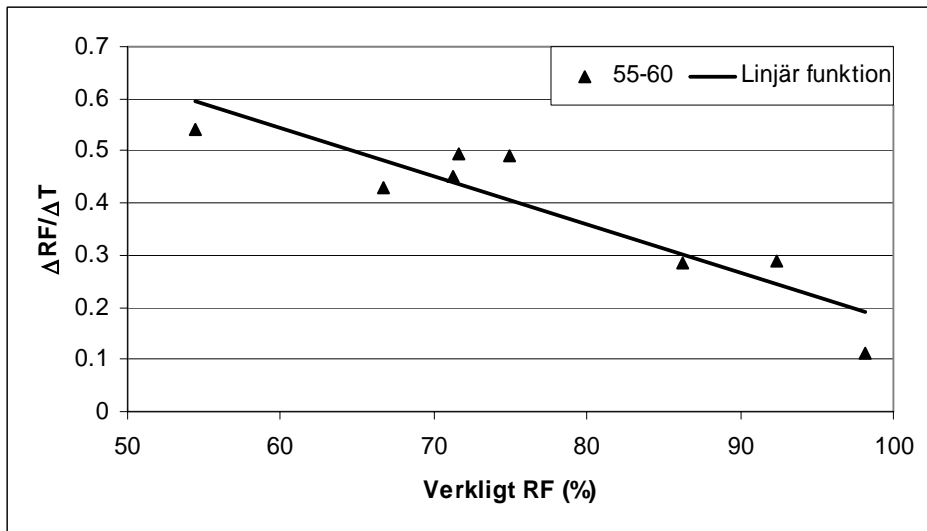
Figur 6.33: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 40-45 °C



Figur 6.34: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 45-50 °C

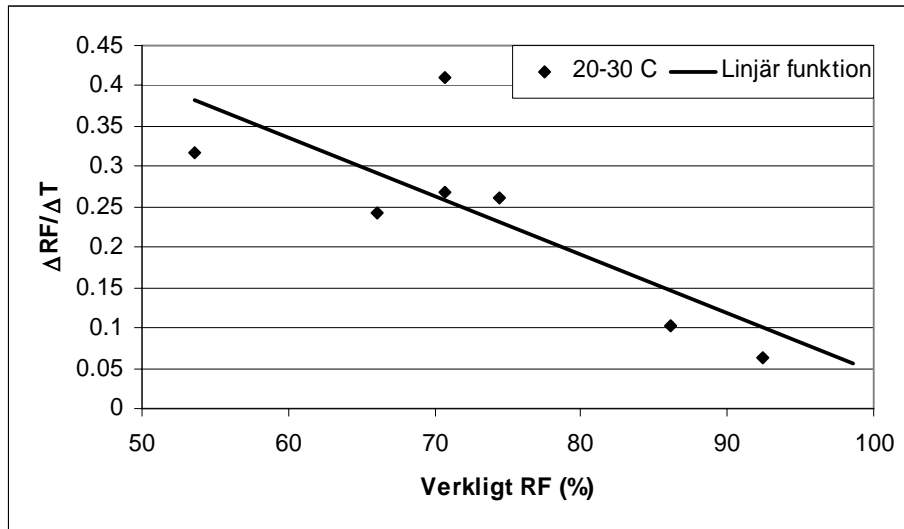


Figur 6.35: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 50-55 °C

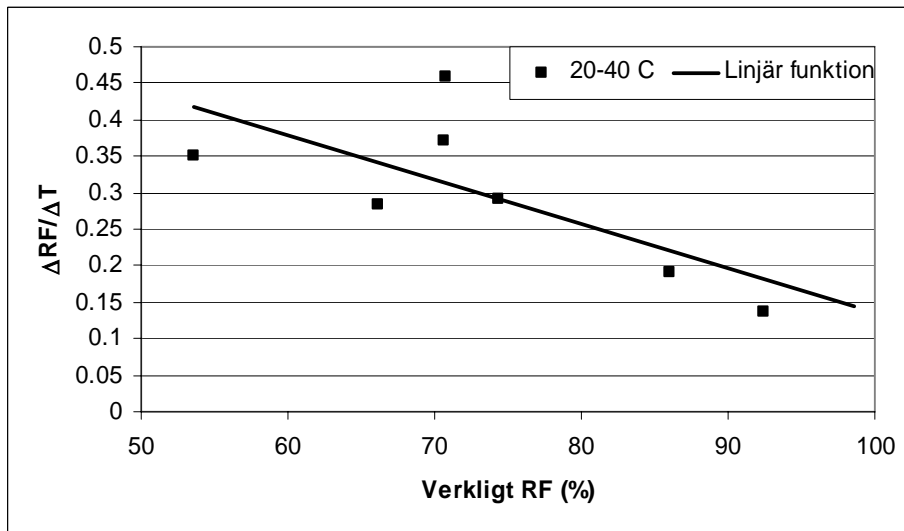


Figur 6.36: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 55-60 °C

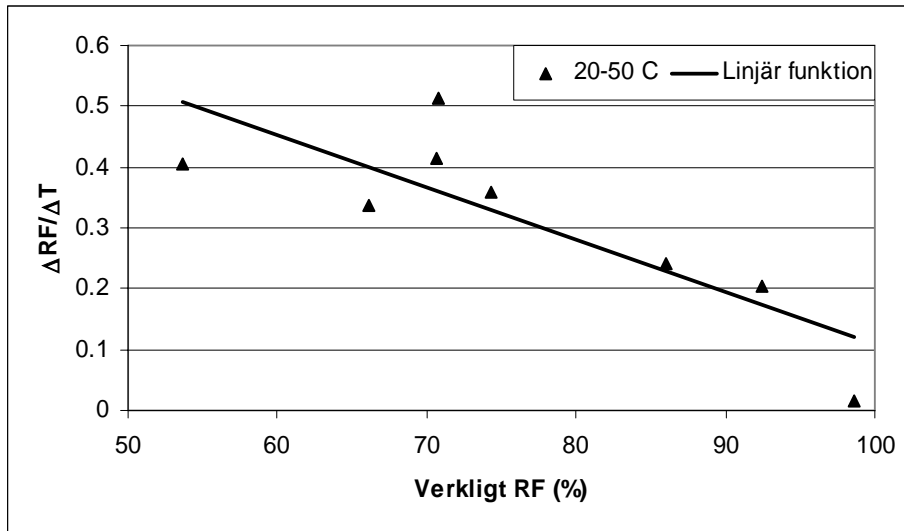
Under detta avsnitt redovisas förändringen av RF för större intervall, samt med mätpunkterna redovisade.



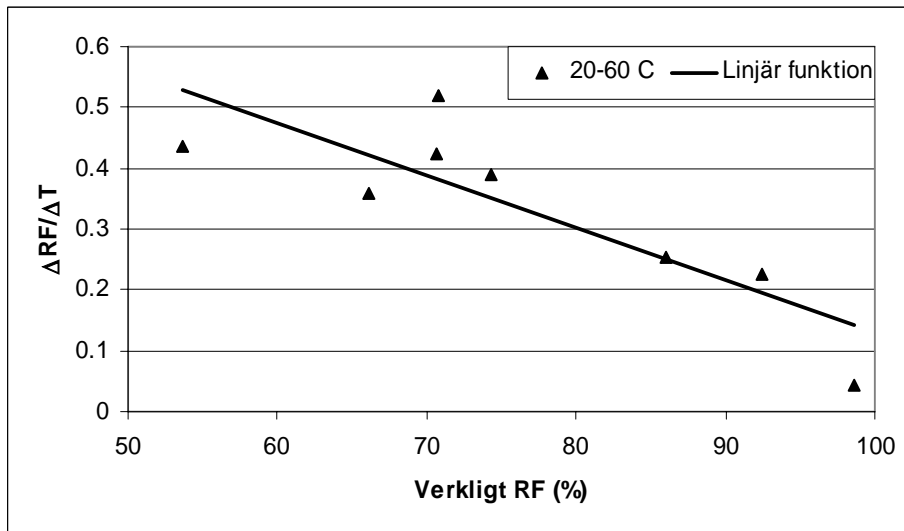
Figur 6.37: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-30 °C



Figur 6.38: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-40 °C



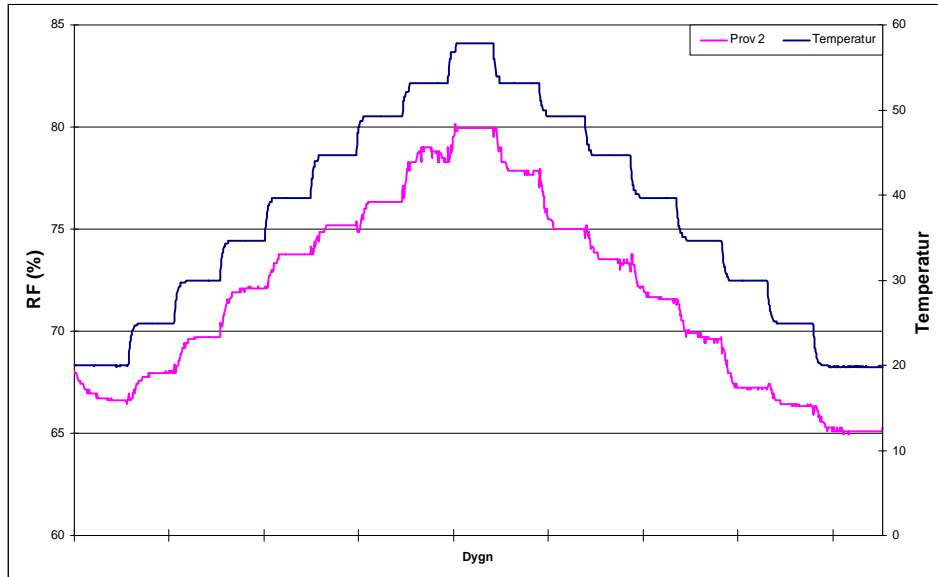
Figur 6.39: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-50 °C



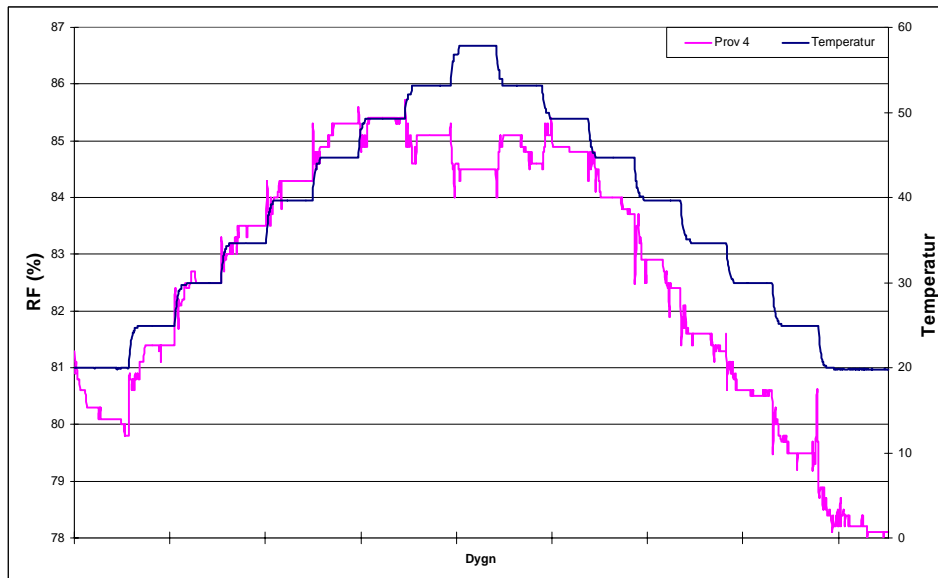
Figur 6.40: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-60 °C

6.3 Huvudförsök 3: Protimeter

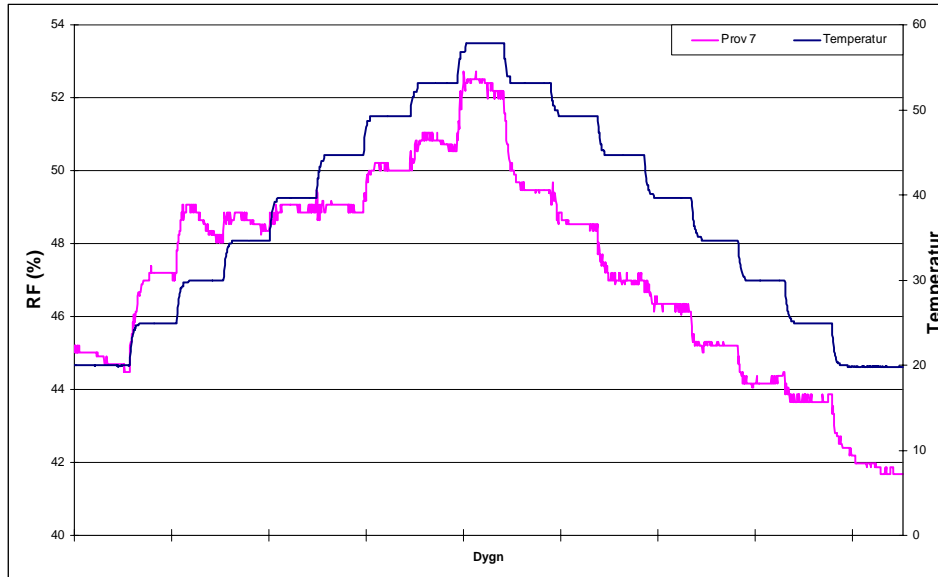
6.3.1 Diagram



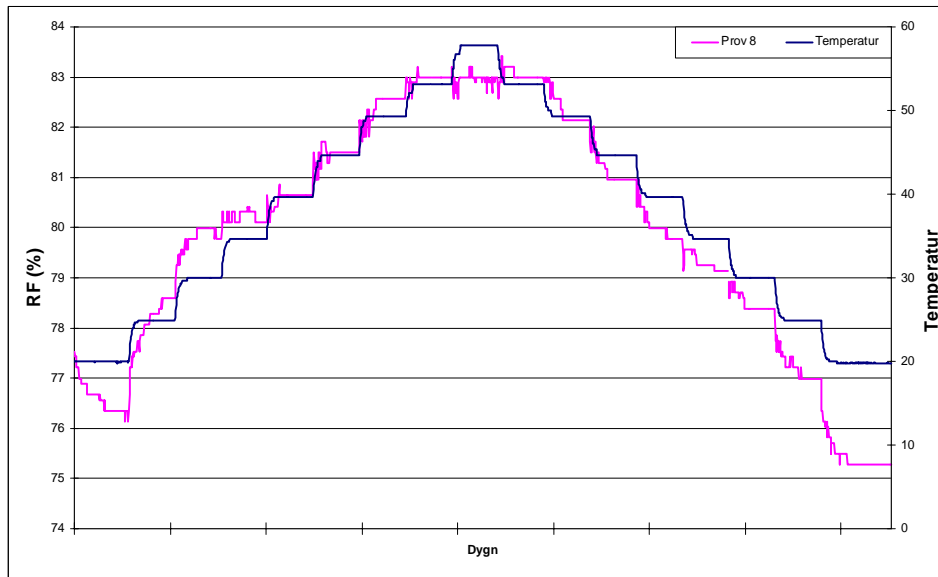
Figur 6.41: Prov 2 Försöksserie III



Figur 6.42: Prov 4 Försöksserie III



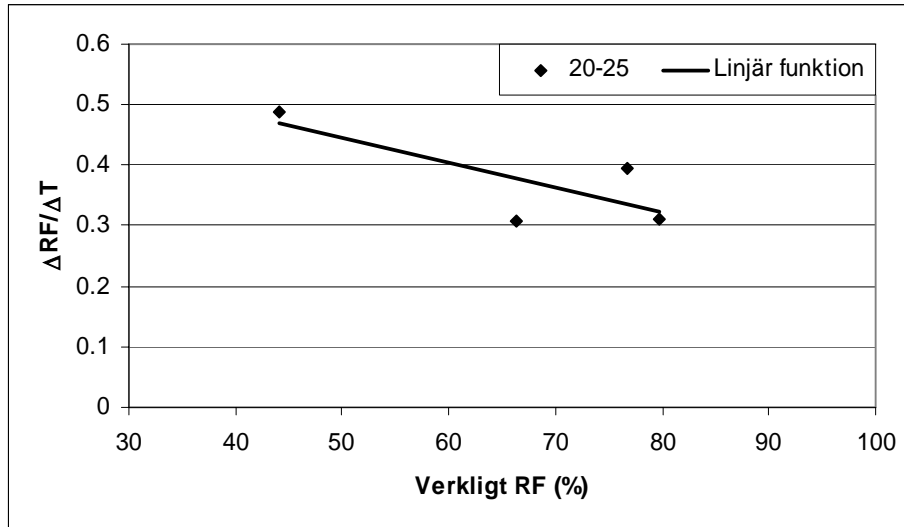
Figur 6.43: Prov 7 Försöksserie III



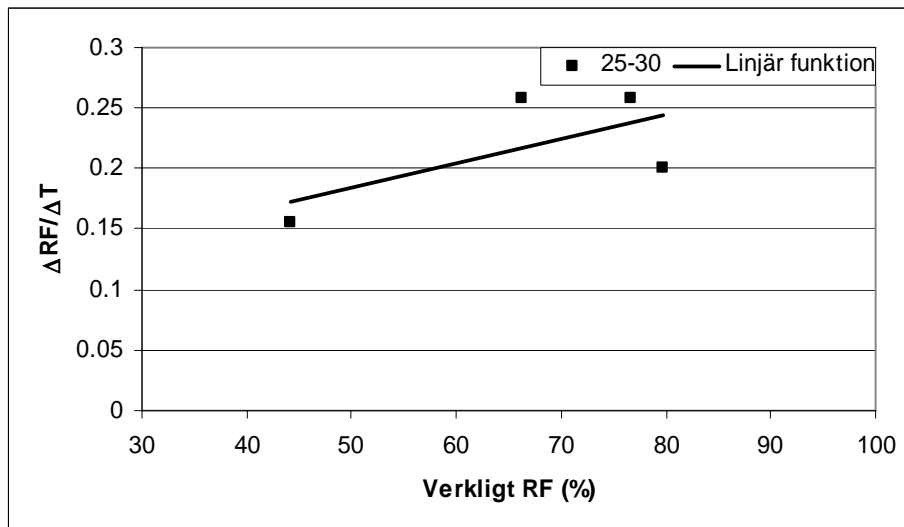
Figur 6.44: Prov 8 Försöksserie III

6.3.2 Omräkningsdiagram: $\Delta RF/\Delta T$

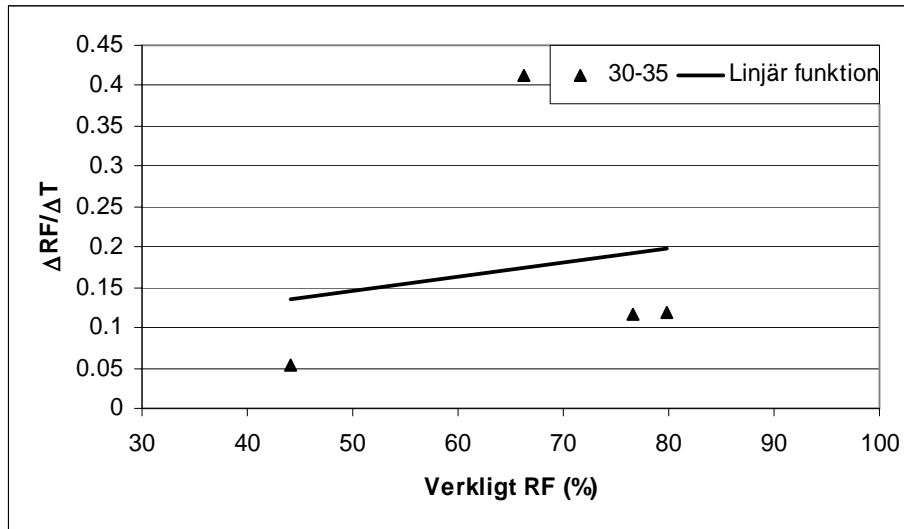
Under detta avsnitt redovisas förändringen av $RF/^\circ C$ för 5-graders intervall, samt med mätpunkterna redovisade.



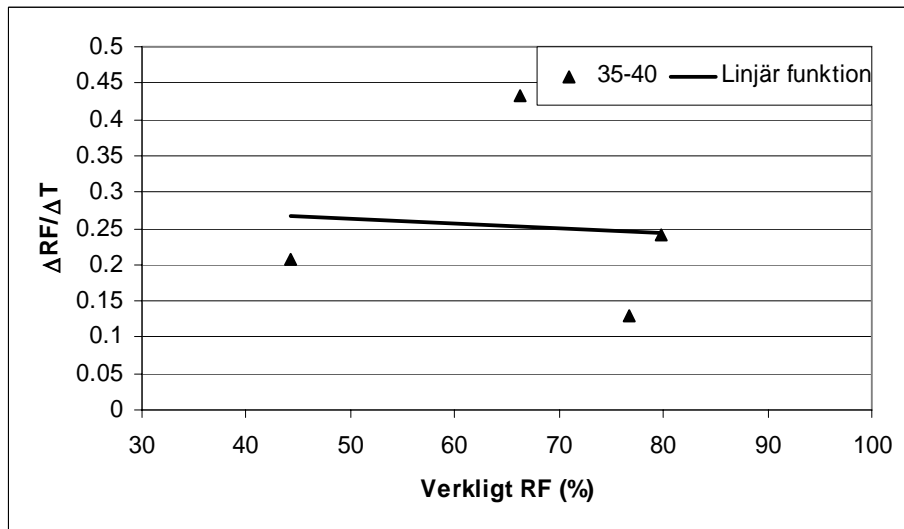
Figur 6.45: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-25 °C



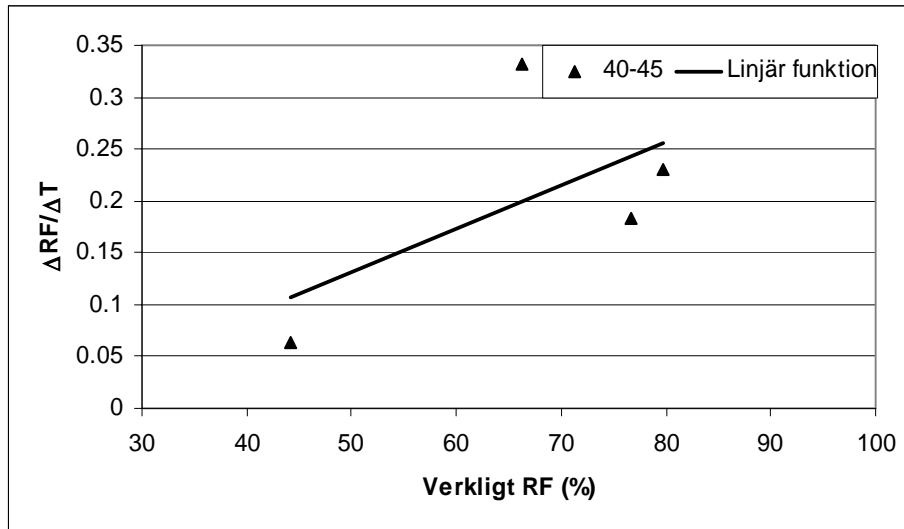
Figur 6.46: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 25-30 °C



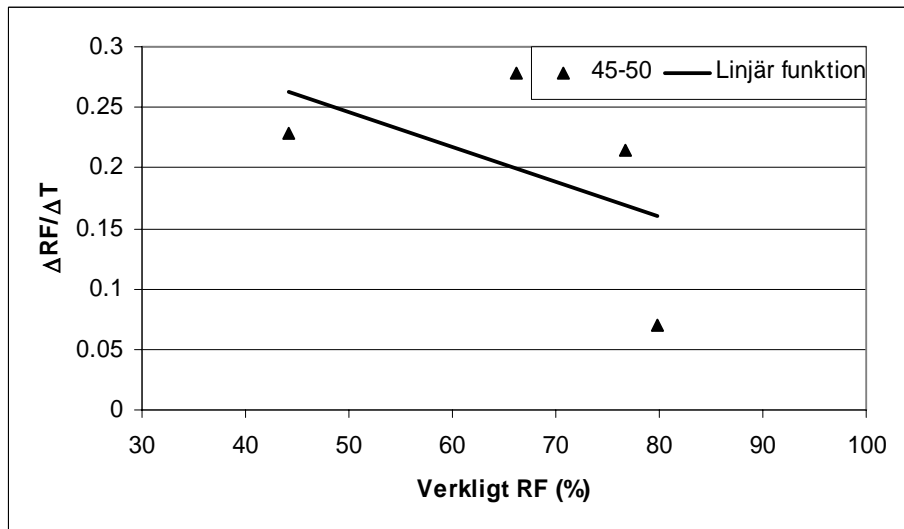
Figur 6.47: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 30-35 °C



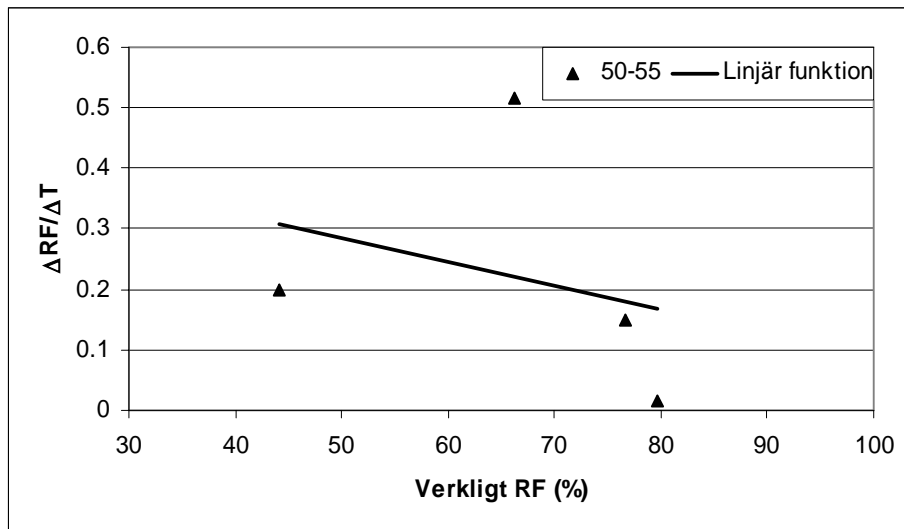
Figur 6.48: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 35-40 °C



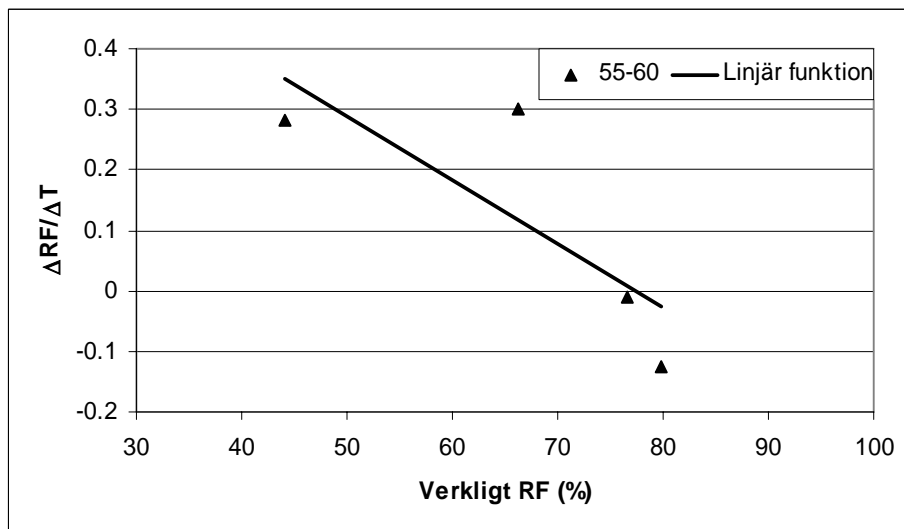
Figur 6.49: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 40-45 °C



Figur 6.50: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 45-50 °C

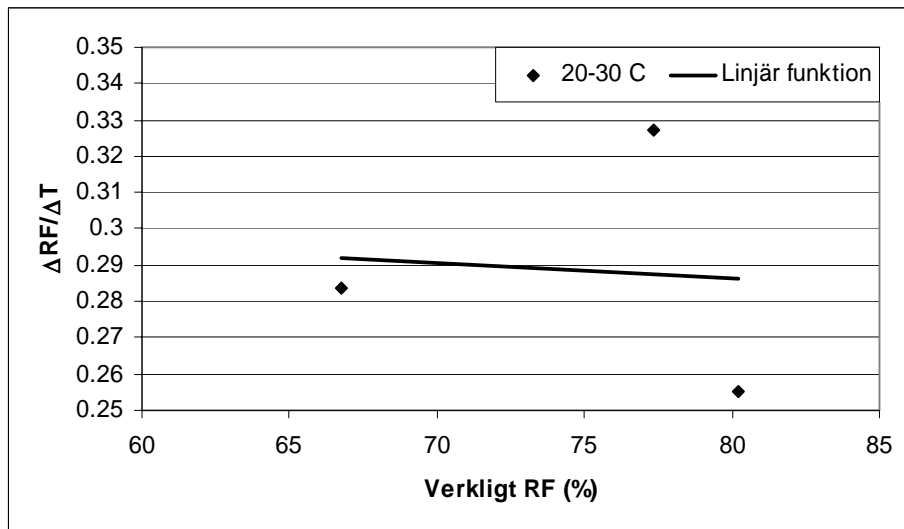


Figur 6.51: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 50-55 °C

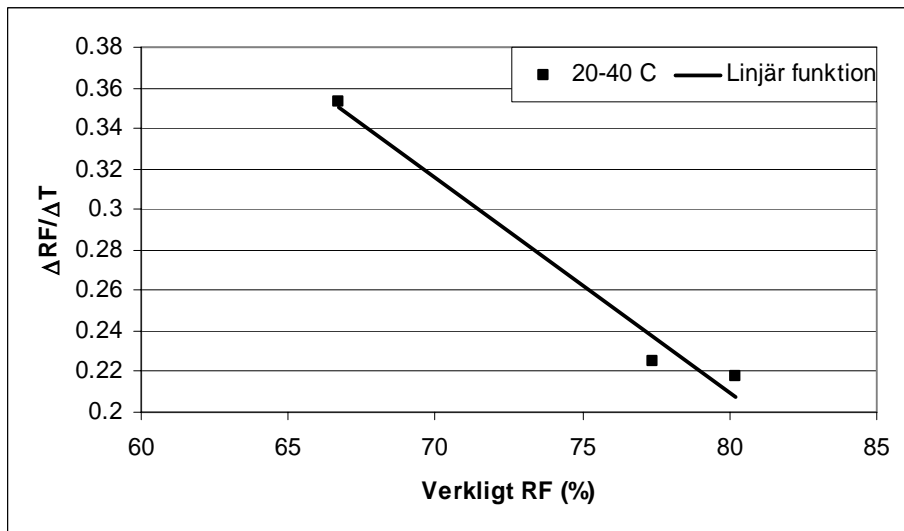


Figur 6.52: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 55-60 °C

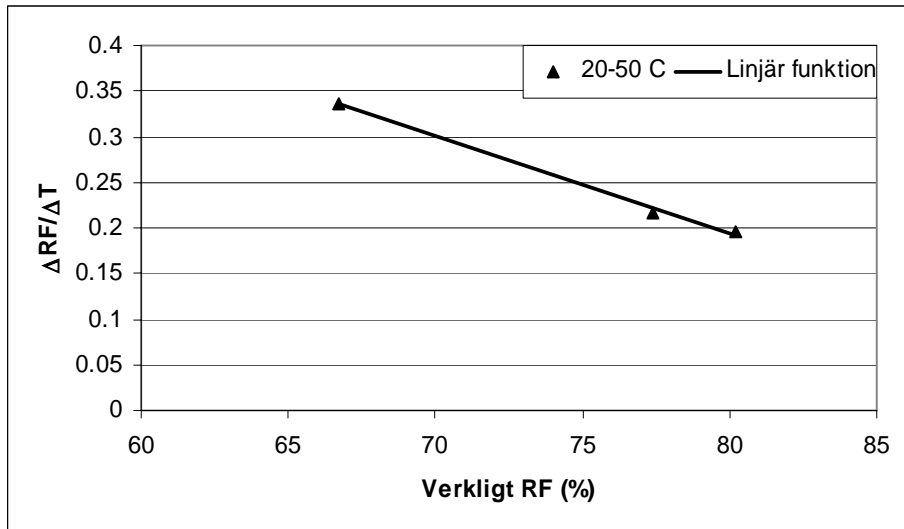
Under detta avsnitt redovisas förändringen av RF för större intervall, samt med mätpunkterna redovisade.



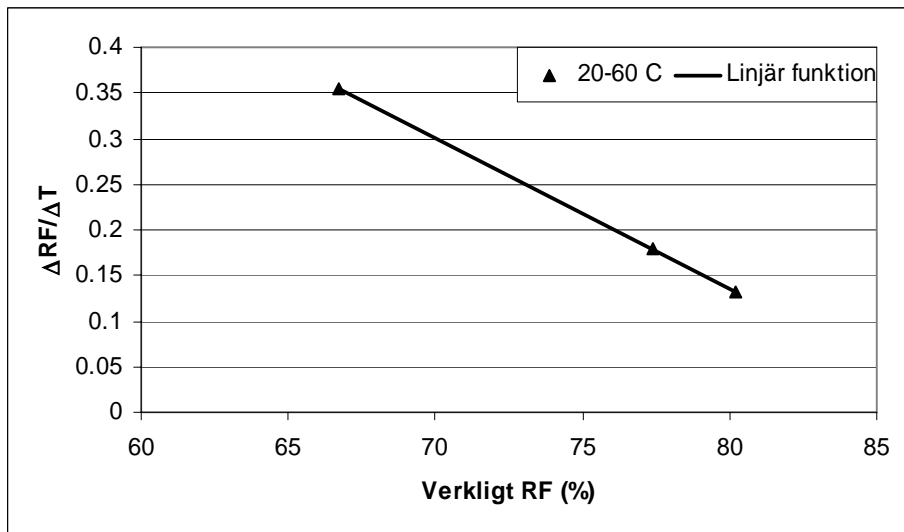
Figur 6.53: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-30 °C



Figur 6.54: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-40 °C



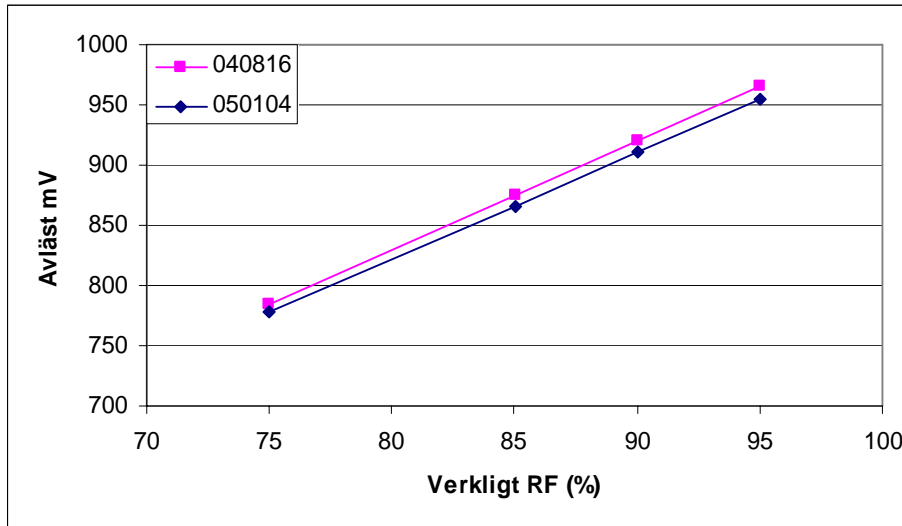
Figur 6.55: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-50 °C



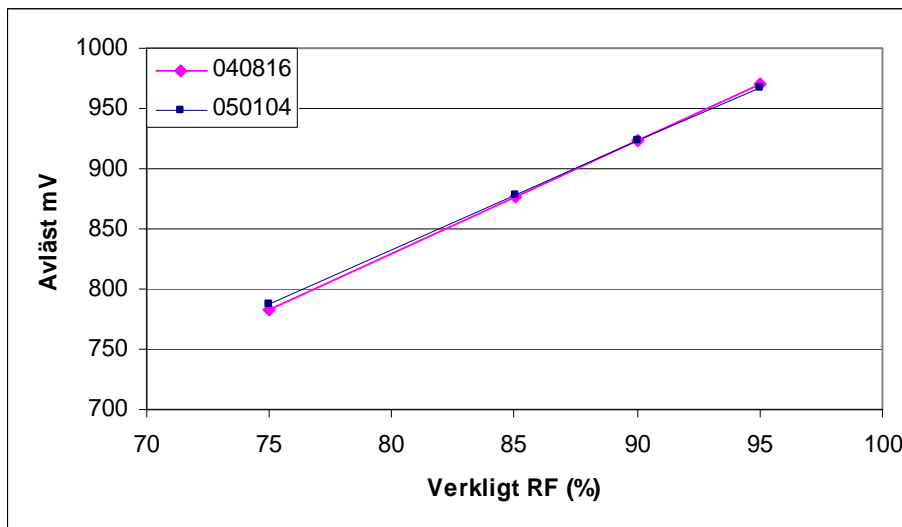
Figur 6.56: $\Delta RF/\Delta T$ redovisat i temperaturintervallet 20-60 °C

6.4 Kalibreringskurvor

Under detta avsnitt återfinns de kalibreringskurvor som använts under försöken. Både den som gjordes före och efter temperaturserierna.

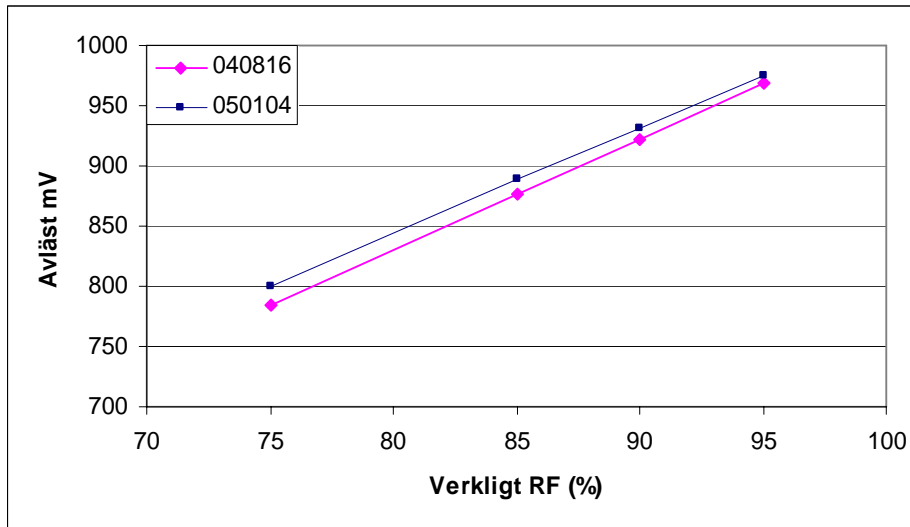


Figur 6.57: Kalibreringsfunktioner före och efter försöksserier, Vaisalagivare 35

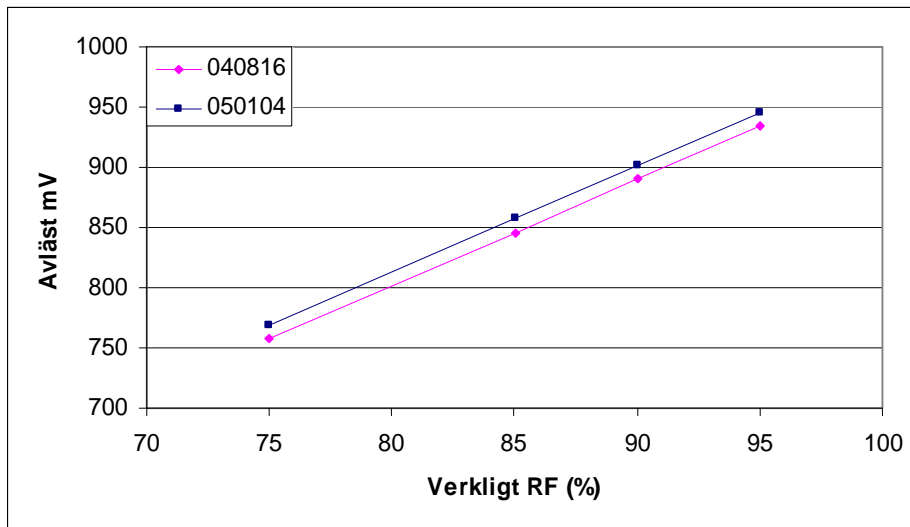


Figur 6.58: Kalibreringsfunktioner före och efter försöksserier, Vaisalagivare 36

Kapitel 6 – Appendix

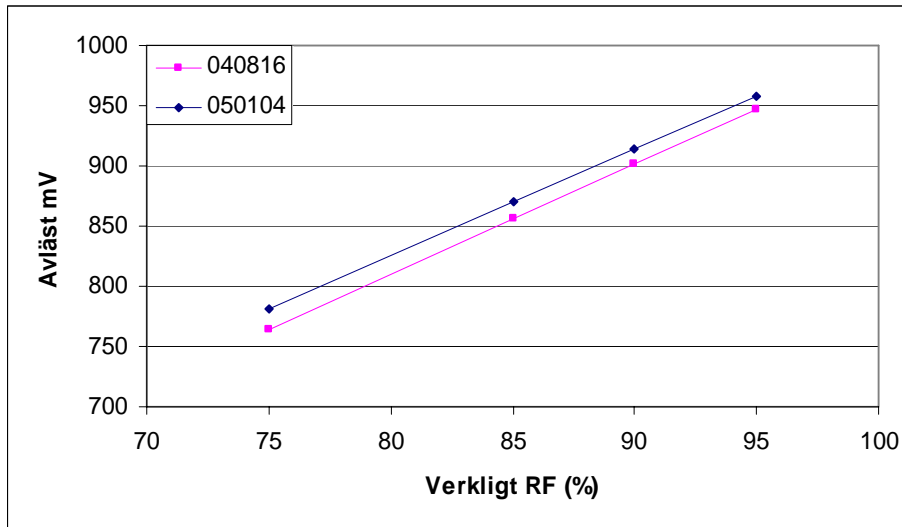


Figur 6.59: Kalibreringsfunktioner före och efter försöksserier, Vaisalagivare 34

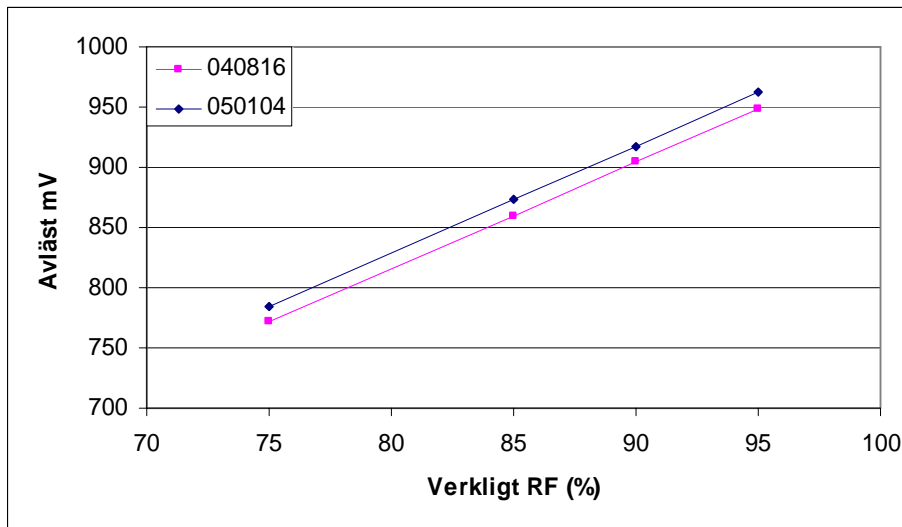


Figur 6.60: Kalibreringsfunktioner före och efter försöksserier, Vaisalagivare 29

Kapitel 6 – Appendix

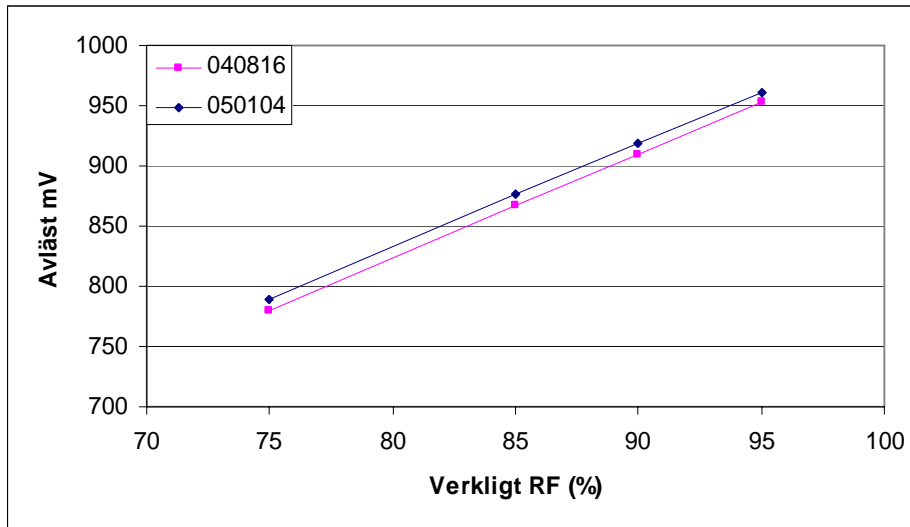


Figur 6.61: Kalibreringsfunktioner före och efter försöksserier, Vaisalagivare 40

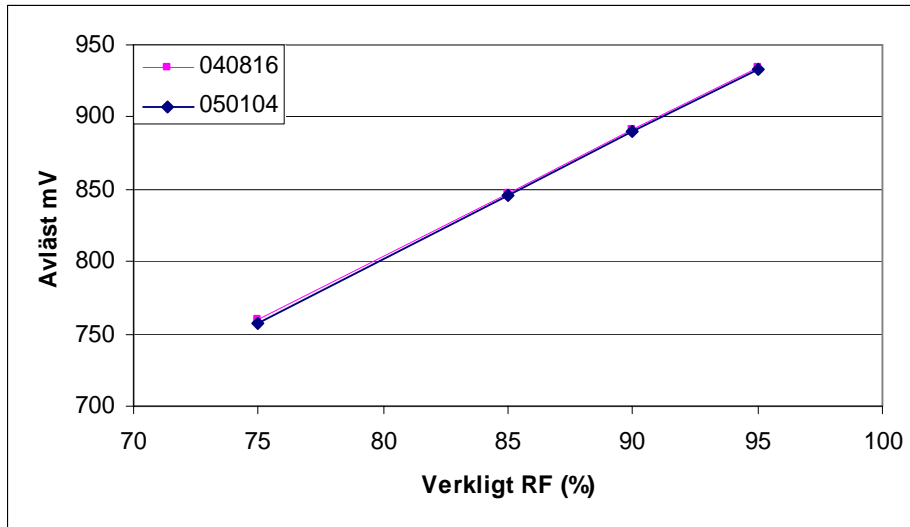


Figur 6.62: Kalibreringsfunktioner före och efter försöksserier, Vaisalagivare 28

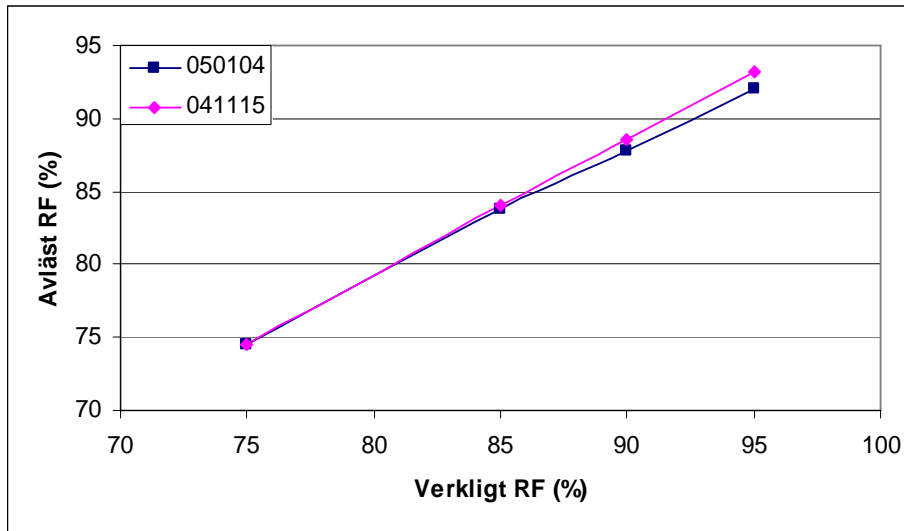
Kapitel 6 – Appendix



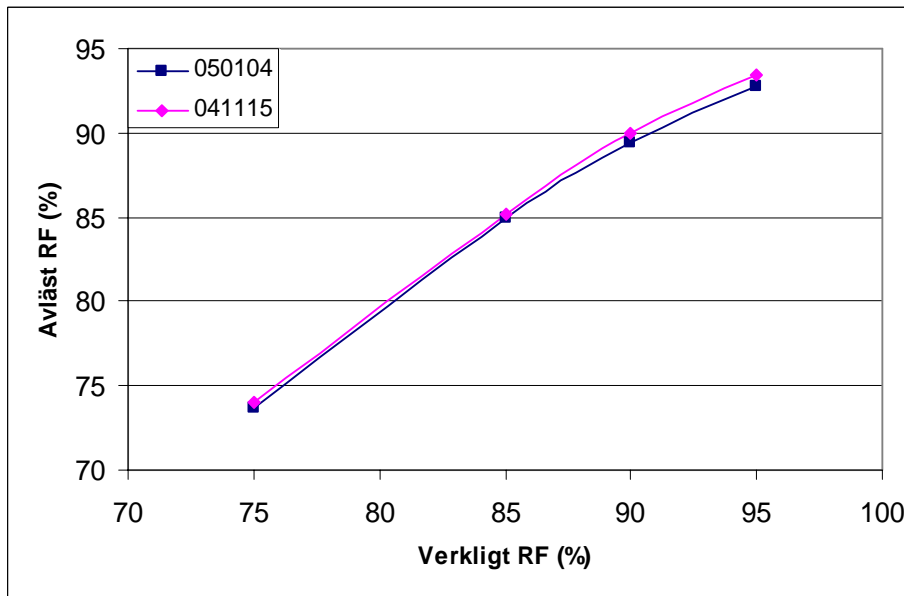
Figur 6.63: Kalibreringsfunktioner före och efter försöksserier, Vaisalagivare 32



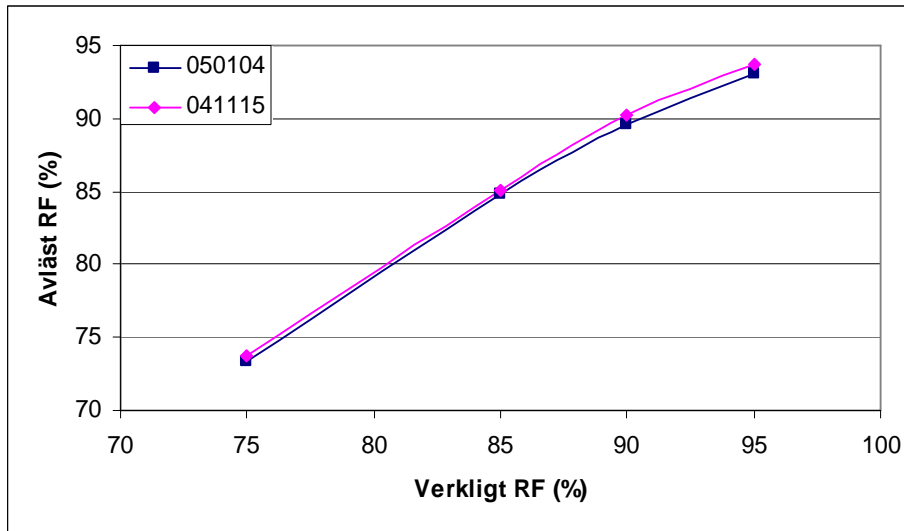
Figur 6.64: Kalibreringsfunktioner före och efter försöksserier, Vaisalagivare 26



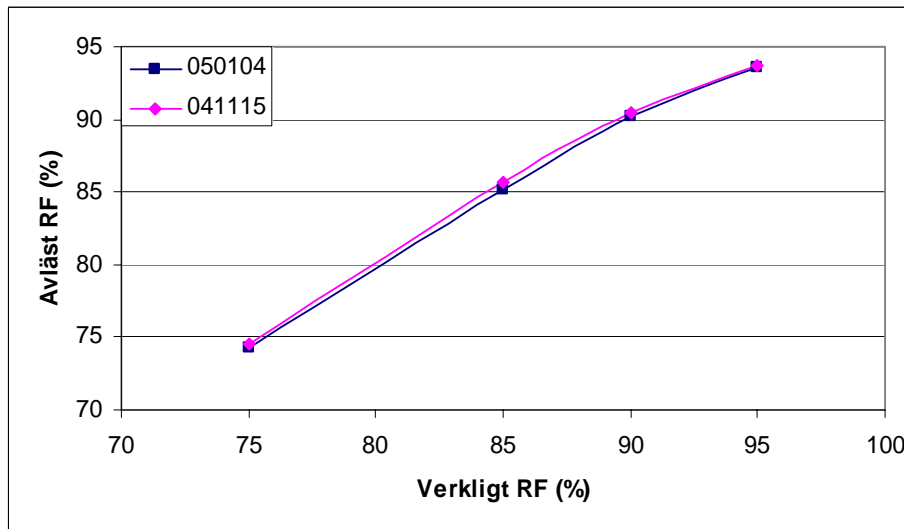
Figur 6.65: Kalibreringsfunktioner före och efter försöksserier, Protimetergivare A1



Figur 6.66: Kalibreringsfunktioner före och efter försöksserier, Protimetergivare B1



Figur 6.67: Kalibreringsfunktioner före och efter försöksserier, Protimetergivare B2



Figur 6.68: Kalibreringsfunktioner före och efter försöksserier, Protimetergivare B3

6.5 Tabeller

Tabell 6.1: Data cylinder 1

Cylinder 1		
höjd	0.2550	m
diameter	0.1456	m
vikt	10.1740	kg
area	0.0166	m ³
volym	0.0042	m ³
densitet	2396.2875	kg/m ³

Tabell 6.2: Data cylinder 2

Cylinder 2		
höjd	0.2520	m
diameter	0.1450	m
vikt	10.3030	kg
area	0.0165	m ³
volym	0.0042	m ³
densitet	2475.9238	kg/m ³

Tabell 6.3: Data prov 1-8

Prov	Innan borning	Efter borning	Efter torkning
	(kg)	(kg)	(kg)
1	3.917	3.877	3.862
2	3.940	3.894	3.882
3	3.944	3.899	3.891
4	4.098	4.058	4.048
5	3.999	3.953	3.943
6	4.625	4.587	4.571
7	3.608	3.562	3.554
8	4.201	4.158	4.147

Tabell 6.4: Volym prov 1-8

Prov	Volym cylinder (m ³)
1	0.001585
2	0.001594
3	0.001597
4	0.001662
5	0.001619
6	0.001876
7	0.001459
8	0.001702

Tabell 6.5: Data prov 1-8

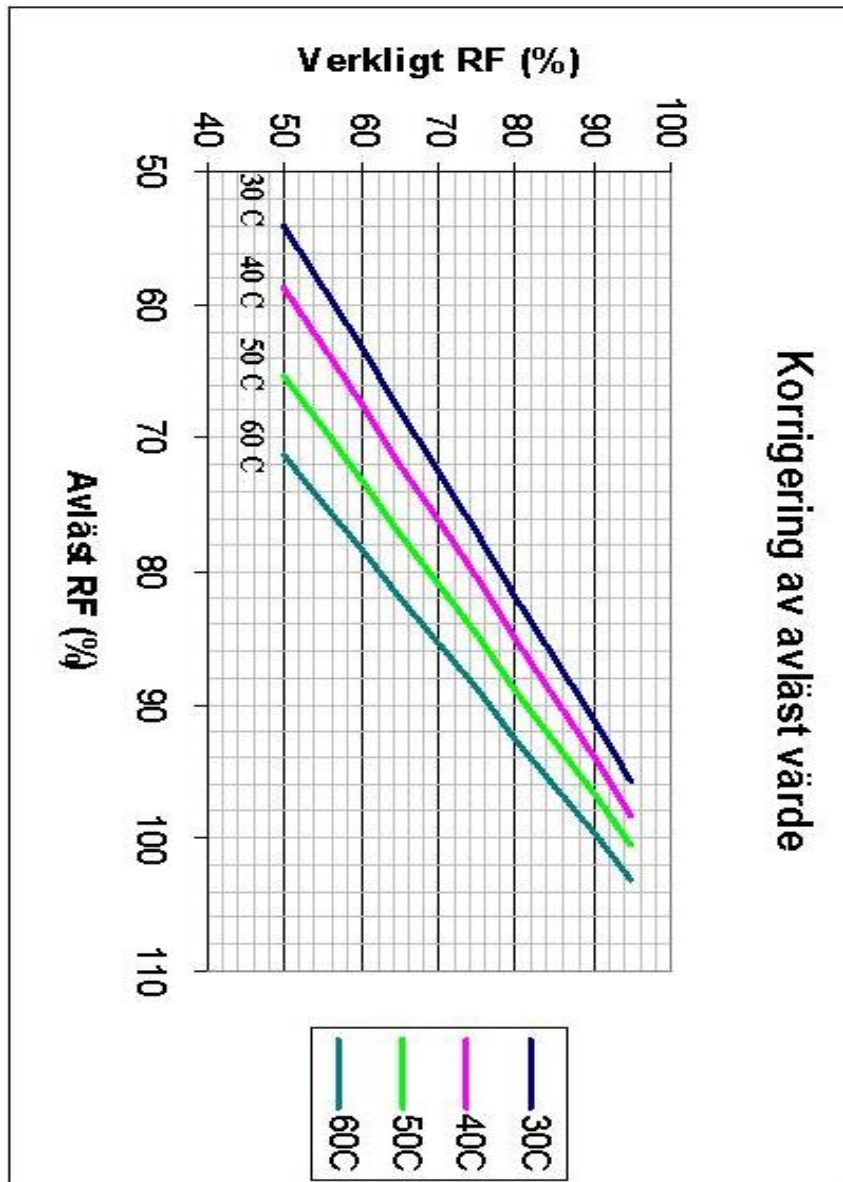
Prov	Borr djup (m)	Volym (kbn)	Massa (kg)
1	0.112	0.0000198	0.0482
2	0.116	0.0000205	0.0499
3	0.113	0.0000200	0.0486
4	0.106	0.0000187	0.0456
5	0.113	0.0000200	0.0486
6	0.105	0.0000186	0.0452
7	0.111	0.0000196	0.0478
8	0.104	0.0000184	0.0448

Tabell 6.6: Konditionering av prov 1-8

Provkropp	Vikt mättad (kg)	RF vid slut (%)	W _{des} kg/m ³	W _{des} , 100 % kg/m ³	Slutvikt (kg)
1	3,943	70	60,74	137	3,8221
2	3,947	80	75,69	137	3,8493
3	3,957	80	75,69	137	3,8591
4	4,112	90	96,81	137	4,0452
5	4,004	80	75,69	137	3,9048
6	4,668	90	96,81	137	4,5926
7	3,617	70	60,74	137	3,5057
8	4,210	90	96,81	137	4,1416

6.6 Omräkningsdiagram: Vaisala HMP44

Diagrammet används för att korrigera ett avläst värde vid en temperatur mellan 30-60°C till det ekvivalenta värdet vid 20 °C.



Figur 6.69: Omräkningstabell Vaisala HMP44

7 Referenser

Fagerlund G. 2002

Kompendium i Byggnadsmaterial FK

Avdelningen för Byggnadsmateriallära, LTH. Lund.

Hedenblad G, 1996

Materialdata för fukttransportberäkningar.

Bygghögskolebyråen. Stockholm. ISBN 91-540-5766-3

Hedenblad G, Nilsson L.-O. 1985

Kapillär mättnadsgrad – ett verktyg för noggrann bestämning av fukttinhåll i betong.

Avdelningen för Byggnadsmateriallära, LTH. Lund. Rapport TVBM-3022

Hård R., Klevbo G., Ysberg G. 1980

Erfarenheter från besiktning av godkända betongfabriker.

CBI Ra 8:80 Stockholm

Nilsson L.-O. 1987

Temperature effects in relative humidity measurements on concrete - Some preliminary studies.

Contribution to Nordic Symposium on Building Physics, Lund, August 1987.

Nilsson L.-O. 1980

Hygroscopic moisture in concrete - drying, measurements & related material properties.

Avdelningen för Byggnadsmateriallära, LTH. Lund. Rapport TVBM-1003.

Sjöberg A, Nilsson L-O, Rapp T. 2002

Fuktmätning i betonggolv med golvvärme. Etapp I: Förstudie

Institutionen för Byggnadsmaterial, CTH. Göteborg. Publikation P-02:1

RBK 1999

Manual Fuktmätning i betong

Sveriges Byggindustrier