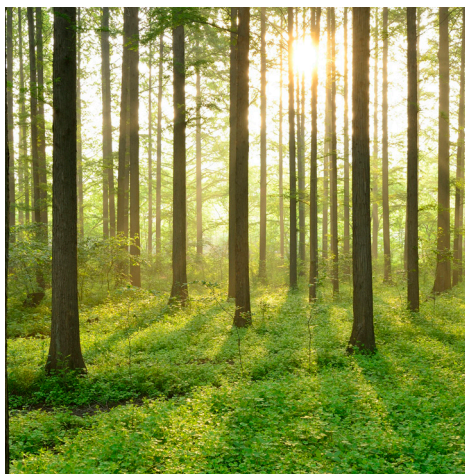


# SNABB FUKTHALTSMÄTNING AV TRÄDBRÄNSLE MED RADARTEKNIK

RAPPORT 2015:168





# Snabb fukthaltsmätning av trädbränsle med radarteknik

**PATRIK OTTOSON, RADARBOLAGET**

**DANIEL ANDERSSON, RADARBOLAGET  
INGER LINDBÄCK OCH JAHN JOHANSSON, GÄVLE ENERGI  
PER ERICSSON OCH UNO BRINNEN, BILLERUDKORSNÄS**

ISBN 978-91-7673-168-0 | © 2015 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se



## Förord

Denna rapport är slutrapportering av projekt A 39114 Snabb fuktighetsbestämning av bibränsle med radarteknik – SNABB (Energimyndighetens projektnummer P 39114) som faller under teknikområde anläggnings- och förbränningsteknik inom SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion.

SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion, är efterföljaren till Värmeforsks Basprogram och startade som ett samarbetsprogram mellan Värmeforsk och Energimyndigheten 2013. All forskningsverksamhet som bedrevs inom Värmeforsk ingår sedan den 1 januari 2015 i Energiforsk. Därför ges denna rapport ut som en Energiforskrapport.

Programmets övergripande mål är att bidra till långsiktig utveckling av effektiva miljövänliga energisystemlösningar. Syftet är att medverka till framtagning av flexibla bränslebaserade anläggningar som kan anpassas till framtida behov och krav. Programmet är indelat i fyra teknikområden: anläggnings- och förbränningsteknik, processtyrning, material- och kemiteknik samt systemteknik.

Stockholm december 2015

Helena Sellerholm

Områdesansvarig

Bränslebaserad el- och värmeproduktion, Energiforsk AB

## Författarnas förord

Rapporten baseras på ett förstudieprojekt kring fukthaltsmätning av trädbränsle med radarteknik. Projektet har kunnat genomföras genom ekonomiskt stöd från Energimyndigheten. Projektet har förvaltats av Energiforsk och en särskild referensgrupp har tillsatts. Radarbolaget har varit projektledare. Gävle Energi och BillerudKorsnäs har ställt en styrgrupp, arbetsgrupp och andra resurser till projektets förfogande. Deras ingående kännedom om regler, lagar, forskning och praktiskt handhavande vid värmekraftverk har starkt bidragit till att projektet har erhållit goda resultat. Radarbolaget och Gävle Energi har genomfört större delen av det praktiska arbetet. Högskolan i Gävle har bidragit med kunskap och utrustning kring frekvensanalyser.

Kostnaderna för projektet har varit ca 1,5 Mkr varav 448 800 har finansierats av Energimyndigheten.

Den organisatoriska sammansättningen har under projekttiden varit:

### *Referensgrupp*

Katja Lindblom/Jakob Thynell, ÅF  
Daniel Nordgren, Pöyry  
Dag Wiklund, Jämtkraft  
Shahriar Badiei, Vattenfall  
Sören Hansson, Grontmij

### *Styrgrupp*

Uno Brinnen, BillerudKorsnäs  
Inger Lindbäck, Gävle Energi  
Per Carlsson, S-Group Holding

### *Projektgrupp*

Patrik Ottoson, Radarbolaget (projektledare)  
Daniel Andersson, Radarbolaget  
Jahn Johansson, Gävle Energi  
Per Ericsson, BillerudKorsnäs

## Sammanfattning

Det finns 580 fjärrvärmenät och 125 större biobränsleeldade anläggningar i Sverige. Biobränslet utgörs företrädesvis av fyra sorters trädbränsle: returträ, GROT (grenar och toppar), bark och cellulosafällis. Fukthalten torde kunna mätas direkt, snabbt och tillförlitligt, och därigenom bestämmas med ett radarsystem inom 60 sekunder. Provtagning torde kunna göras av hela lasten varvid ett representativt medelvärde erhålls. Snabbare och mer tillförlitlig fukthaltsmätning leder till effektivare logistik och bränslehantering, vilket har beräknats ge besparingar på motsvarande 2-4 Mkr per år.

För ofarlig, oförstörande och beröringsfri mätning med hög noggrannhet av fukthalten har en UWB-radar (ultra wideband) använts. Vid frekvensanalys går det att konstatera 0,75 GHz är en lämplig centerfrekvens för mätning på tempererat trädbränsle (>0°C). Även lägre frekvenser kan fungera väl. Huvuddelen av mätningarna inom förstudien har dock gjorts med centerfrekvensen 2 GHz.

Projektet har visat att fukthalten i tempererat trädbränsle (>0°C) kan bestämmas med en noggrannhet på 3 procentenheter. Noggrannheten kan öka ytterligare genom att göra ytterligare kalibreringsmätningar, separat modellering av respektive trädbränsle, modellering med Debyes relaxationsformel, mäta och modellera dämpningen samt mäta och modellera temperaturen och densiteten. Enligt den nya virkesmätningsslagen (SKSFS 2014:11) krävs dock en noggrannhet på 2 procentenheter för att bestämning av fukthalten i trädbränsle med en fukthalt under 65% (torrhalt över 35%).

Radarmätningar (dielektricitetskonstanten och dämpningen) av trädbränsle påverkas av fukthalt, temperatur, densitet och frekvensval. Dielektricitetskonstanten och dämpningen är mycket lägre (4-5 gånger) för fryst material och snöklumpar än för temperat fuktigt trädbränsle (>0°C). Det innebär att temperaturen måste mätas och modelleras för att erhålla rätt fukthalt vid frystemperaturer. Mätupplösningen i fukthaltsmätning minskar som en konsekvens av att dielektricitetskonstanten är lägre för fryst material. Mätning på långa avstånd (bredden av en flisbil) torde öka upplösningen och noggrannheten. I princip ska det dubbla avståndet ge dubbel upplösning och noggrannhet. Mätningar på fryst trädbränsle gjordes på en provlåda om 30 cm, vilket innebär cirka 8 gånger högre potentiell noggrannhet på verklig flisbil (240 cm). Även kompletterande modellering av dämpning och densitet torde kunna öka möjligheten till rätt fukthaltsbestämning. Frekvensen påverkar dämpning och dielektricitetskonstant, därför måste lämplig frekvens väljas för fryst material (troligtvis högre än för tempererat trädbränsle (>0°C)).

Projektet har visat att det är möjligt att mäta på långt avstånd (efterliknar mätning på flisbil) på tempererat fuktigt trädbränsle (>0°C) med centerfrekvensen 0,75 GHz. Signalerna är fina och har ett högt signal-till-brus-förhållande (SNR). I testet kunde fukthalten bestämmas med en avvikelse på 1,6 procentenheter.

Under projekttiden har en ny lag om virkesmätning trätt i kraft. Noggrannhetssiffrorna från projektet vittnar om att mätning med radar torde kunna användas, för att matcha de krav som den nya lagen stipulerar, om noggrannheten ökar med 1 procentenhet. Därför skulle ett framtida radio- och radarbaserat mätsystem kunna användas även som en del i ett debiteringssystem för att säkerställa rätt betalning. Inblandade projektparter föreslår med givna resultat att ett prototypprojekt planeras och genomförs. Det är viktigt att inledningsvis visa hur temperatur och densitet ska kunna

modelleras för att nå högre noggrannhet i bestämningen av fukthalten. Det är också viktigt att få fram en stabilare referensmätningmetod, då nuvarande torkning påverkas stort av den omgivande luftens relativa fukthalt.



## Summary

There are 580 district heating networks and 125 larger biomass power plants in Sweden. Biofuel consists mainly of four types of wood fuel: recycled wood, forest residues (branches and tops), bark and wood chips. The moisture content could be measured directly, quickly and reliably, and thereby determined with a radar system within 60 seconds. Measurement can be carried out for the entire load in order to get a representative average value. Faster and more reliable moisture measurement leads to more efficient logistics and fuel management, which have been calculated to save 2-4 million SEK per year.

For safe, non-destructive and non-contact measurement with high accuracy in the moisture content a UWB radar (ultra wideband) has been used. Frequency analysis gives that 0.75 GHz is a suitable centre frequency of measurement at temperate wood fuel ( $>0^{\circ}\text{C}$ ). Even lower frequencies may work well. Majority of the measurements in the feasibility study have been made with a centre frequency of 2 GHz.

The project has shown that the moisture content of wood fuel temperature ( $>0^{\circ}\text{C}$ ) can be determined with an accuracy of 3 percentage points. The accuracy may be increased further by making additional calibration measurements, separate modelling of each wood fuel, modelling with Debye's relaxation formula, measure and model the attenuation as well as measure and model temperature and density. According to the new timber measuring act (SKSFS 2014: 11), an accuracy of 2 percentage points is required for determination of the moisture content of wood fuel with a moisture content below 65% (dry content over 35%).

Radar measurements (dielectric constant and attenuation) of wood fuel are affected by moisture, temperature, density and frequency selection. The dielectric constant and the attenuation is much lower (4-5 times) for frozen materials and lumps of snow than temperate moist wood fuel ( $>0^{\circ}\text{C}$ ). This means that the temperature must be measured and modelled to obtain the correct moisture content at freezing temperatures. On one hand, measurement resolution in moisture measurement decreases as a consequence of dielectric constant is lower for frozen material. On the other hand, measuring at long distance (the width of a wood chip trucks) will increase the resolution and accuracy. In principle, double distance provides double resolution and accuracy. Measurements on frozen wood fuel were made on a sample box of 30 cm, which means about 8 times higher potential accuracy of real wood chip trucks (240 cm). Even additional modelling of attenuation and density will increase the possibility of correct moisture content determination. The frequency and attenuation affects dielectric constant, therefore, the appropriate frequency must be selected for frozen materials (most likely higher than for temperate wood fuel ( $>0^{\circ}\text{C}$ )).

The project has shown that it is possible to measure long distances (mimics measurement of wood chip trucks) of temperate moist wood fuel ( $>0^{\circ}\text{C}$ ) with a centre frequency of 0.75 GHz. The signals are great and have a high signal-to-noise ratio (SNR). In the test, the moisture content was determined with a deviation of 1.6 percentage points.

During the project period, a new timber measuring act has been valid. Accuracy proven in the project suggests that radar measurement match the requirements, which the new law stipulates, if accuracy increases with 1 percentage point. Therefore, a future radio

and radar-based measurement system can also be used as part of a billing system to ensure correct payment. Involved project partners suggest from results given that a prototype project shall be planned and realized. It is important initially to show how temperature and density to be modelled to achieve higher accuracy in determination of moisture content. It is also important to obtain a more robust reference measurement method, because current drying is largely affected by relative humidity of the environmental air.

An extended English summary of this report is available as Energiforsk report 2015:169, Quick Moisture Measurement of Wood Fuel with Radar Technology, ISBN 978-91-7673-169-7

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Energieffektivisering för fjärrvärmeanläggningar</b>	<b>11</b>
1.1	Mål och syfte	11
<b>2</b>	<b>Material</b>	<b>12</b>
2.1	Trädbränsle	12
2.2	Trä, vatten och fuktighet	13
<b>3</b>	<b>Utrustning</b>	<b>14</b>
3.1	Digital radar	14
3.2	Radarsensor och antenner	14
3.3	Provlådor	15
3.4	Radarscanner	15
<b>4</b>	<b>Metoder</b>	<b>17</b>
4.1	Dielektricitetskonstant och permittivitet	17
4.2	Uppmätning av dielektricitetskonstanten	18
4.3	Vatten och mikrovågor	19
4.4	Is, snö och mikrovågor	21
4.5	Fuktigt trä och dielektriska egenskaper	22
4.6	Relation till geovetenskap	23
4.7	Torkning och referensmätning	23
4.8	Statistiska metoder och stickprov	25
<b>5</b>	<b>Bestämning av fukthalt <math>\pm 0</math> - <math>+15^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>27</b>
5.1	Mätningar	27
5.2	Modell och spridning	28
<b>6</b>	<b>Bestämning av fukthalt <math>-18^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Temperaturmatchning vid olika temperaturer</b>	<b>32</b>
7.1	Mätningar	32
7.2	Frekvensanalys	34
<b>8</b>	<b>Frekvensanalys</b>	<b>38</b>
8.1	Mätning $-18^{\circ}\text{C}$	38
8.2	Mätning $+5^{\circ}\text{C}$	40
<b>9</b>	<b>Signalanalys och långa avstånd</b>	<b>42</b>
9.1	Mätningar	43
<b>10</b>	<b>Statistisk analys</b>	<b>46</b>
<b>11</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>48</b>
11.1	Material och referensmätning	48
11.2	Dämpning, ytterligare en metod	49
11.3	Frekvens	49
11.4	Stickprov och medelvärde	50
11.5	Fruset material och snöklumpar	50

11.6	Noggrannhet	50
11.7	Hur nära målet?	51
<b>12</b>	<b>Diskussion och framtid</b>	<b>52</b>
12.1	Annat vetenskapligt arbete	52
12.2	Temperaturberoende och nollgradigt	52
12.3	Framtida målbild	53
12.4	Effektmål	54
12.5	Förslag på framtida projekt	55
<b>13</b>	<b>Referenser</b>	<b>56</b>

# 1 Energieffektivisering för fjärrvärmeanläggningar

Det svenska fjärrvärmesystemet försörjs med värme från värmeverk eller kraftvärmeverk, det senare producerar även elektricitet. Energiomvandlingen sker genom förbränning eller användning av annan energikälla för uppvärmning av ett värmemedium, vanligtvis vatten. Det finns idag 580 fjärrvärmenät i Sverige. Närvärme är en sorts värmekraftverk, som försörjer ett mindre område eller fastighet med värme. Dessa typer av anläggningar växer snabbt i antal. Det finns 125 större biobränsleeldade anläggningar. Biobränslet utgörs företrädesvis av fyra huvudsorter av trädbränsle: returträ, GROT (grenar och toppar), bark och cellulosaflis.

Fukthalten torde kunna mätas direkt, snabbt och tillförlitligt, och därigenom bestämmas med ett radarsystem inom 60 sekunder. Provtagning torde kunna göras av hela lasten varvid ett representativt medelvärde erhålls. Sammanfattningsvis torde följande effektiviseringar kunna göras:

1. Mäta snabbt och bestämma hög för avlastning av trädbränsle (torrt, medium, vått)
2. Känd fukthalt möjliggör bra blandning i dygnssilo för jämnare fukthalt i tillflödande trädbränsle till pannan, vilket ger bättre förbränningen i värmeverket
3. Mäta noggrant så att rätt debitering kan ske
4. Mäta mer automatiskt så att mindre med personal behövs vid mätstationen och torkningen
5. Undvika blandningar av torrt och fuktigt material vid långtidslagring, vilket kan leda till självantändning
6. Ha bättre koll på lagersaldo för att undvika att man enbart har fuktigt trädbränsle, vilket kan leda till ogynnsamma kompletteringsköp av torrflis. I förbränningen vill man att tillflödande trädbränsle har jämn fukthalt över tiden (se punkt 2), och
7. Ha bättre logistik och effektivare hantering av bränsle på bränsleplan.

## 1.1 MÅL OCH SYFTE

Projektets effektmål var att bidra till ökad verkningsgrad i biobränsleeldade pannor med 2-3 % genom snabb fuktighetsbestämning av biobränslet, vilket möjliggör justering av pannans driftparametrar. Detta mål har dock visat sig vara omöjligt att uppnå eftersom den parameter som kan förbättras med bättre kunskap om bränslets fukthalt är syrehalten i rökgasen. Normalt ligger syrehalten i rökgasen på ca 4 volymprocent torr gas (vol% tg) och om den kunde sänkas till 0,1 vol% tg så skulle detta ge en verkningsgradsförbättring på 1%. Det är inte möjligt att sänka syrehalten så lågt som till 0,1 vol% tg och en mer rimlig effektivisering ligger på 0,2-0,3%.

Projektet syftar till att utveckla metoder för snabb och noggrann bestämning av fukthalten i fasta trädbränslen (träflis och bark). Målen med projektet är att mätmetoden ska:

- vara ofarlig, oförstörande och beröringsfri
- fungera utomhus och kunna mäta genom en lastbil fylld med trädbränsle
- bestämma trädbränslets fukthalt med 2-3 procentenheters noggrannhet, och
- fungera på fryst material.

## 2 Material

### 2.1 TRÄDBRÄNSLE

Inom projektet har fyra olika sorters trädbränsle undersökts. Frekvensen av bränsleval varierar mellan olika delar av Sverige. GROT (grenar och toppar) och bark är de vanligaste trädbränslena, medan returträ och cellulosaflis inte används så frekvent (se tabell 1). Cellulosaflisen (C-flis, flisad rund- eller stamved) är ett trädbränsle som egentligen används i pappersmassaproduktionen, men bränslet används ibland för att påverka marknadspriserna på GROT (istället för att köpa GROT till upphäussat pris köps C-flis från sågverk). Ibland används också cellulosaflis vid mindre värmeverk och som regleringsbränsle ifall det lagrade bränslet är för fuktigt och behöver blandas ut.

Det trädbränsle som har använts i projektet har kommit från depåer hos Gävle Energi (Johannes värmekraftverk) och BillerudKorsnäs i Gävle. Vid provtagning har trädbränslet paketerats av en och samma person för att undvika variationer vid provtagningen (se figur 1a-b). Syftet med detta har varit att inte involvera och analysera densitetens påverkan på resultatet.



**Figur 1.** a) Paketering av trädbränsle på Johannes bränsleplan, Gävle Energi. b) Olika sorters bränsle har paketerats i provlådor för att därefter torkas i provpåsar och aluminiumformar.

Sortiment	Värme, överräknat värde	Ursprung
GROT	10 TWh	Produkt från averkning
Bark	12 TWh	Produkt från sågverk eller massabruk
C-flis	25-30 TWh, varav mindre del används i värmeverk	Produkt från sågverk
Returträ	1,4 TWh	Avfall från återvinningscentraler

**Tabell 1.** Uppskattning av mängden trädbränsle som hanteras i Sverige under ett år.

## 2.2 TRÄ, VATTEN OCH FUKTIGHET

Trä består huvudsakligen av cellulosa-, lignin- och hemicellulosamolekyler. Sammanslagna molekyler bildar elementära fibrer, som i sin tur är grupperade i buntar som kallas mikrofibriller. Dessa mikrofibriller bildar de större strukturella komponenterna i cellväggar och spelar en viktig roll i ett trä-fuktförhållande (Reeb 2009). Vatten i trä existerar i två former: fritt vatten och bundet vatten (Skaar 1988). Fritt och bundet vatten i kontakt med annat material kallas absorberat vatten (Metaxas and Meredith 1983). Fritt vatten finns som flytande vatten och ånga i träcellernas hålrum. Bundet vatten är en del av cellmaterialet och hålls bundet mellan mikrofibrillerna genom kemiska föreningar med andra molekyler eller genom fysisk adsorption (bindning) till ytor. Trä är hygroskopiskt, vilket innebär att torrt trä och vatten attraheras så starkt till varandra att det är omöjligt att förhindra fukt. Fukthalten i trä (i form av bundet vatten) försöker nå en jämnvikt med den relativa fukthalten och temperaturen i den omgivande luften. Det innebär att det krävs 0% relativ fukthalt i luften för att eliminera allt bundet vatten i trä (Wood database 2015).

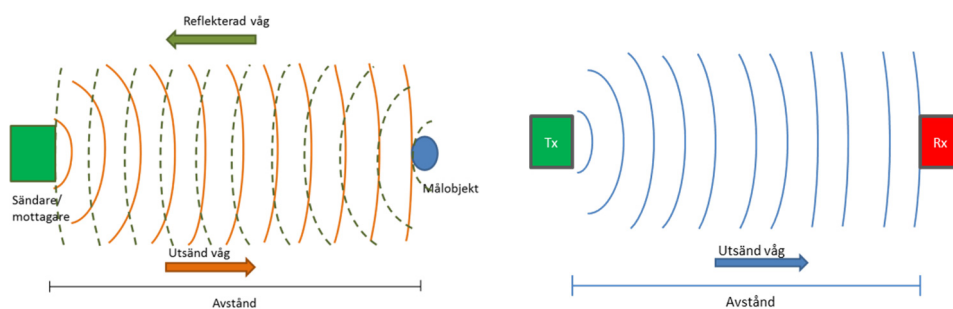
Vattenhalten är en av de viktigaste komponenterna i de flesta biologiska material (Komarov V. et al. 2005), (Brodie et al. 2014), (Duarte da Paz 2008). I allmänhet gäller att ju högre vattenhalt desto större dielektricitetskonstant och förlustfaktor. De fria vattenmolekylerna har dielektriska egenskaper som liknar flytande vatten, medan bundet vatten inte uppvisar dielektriska egenskaper i GHz-området. Dielektriska egenskaper i biomaterial minskar, i allmänhet, snabbt med minskande fukttinnehåll till en kritisk fuktnivå. Under denna fuktighetsnivå är minskningen av förlustfaktor endast kopplat till bundet vatten och biomaterialet i sig själv.

## 3 Utrustning

### 3.1 DIGITAL RADAR

Mätning av fukthalten i trädbränsle görs med en digital radar. Digital radar genererar pulser genom utsändningar av en unik pseudokod (PRBS-kod) som senare korreleras och signalbehandlas i en FPGA (field-programmable gate array). Antennerna sänder med låg effekt och mäter vanligtvis inom 1-10 meter beroende på mätobjektet och omgivningen.

Radarn, som har använts i projektet, består av en sändare och en mottagare. Den mäter time-of-flight, den tid som elektromagnetiska vågor transporteras i icke elektriska media såsom luft och trädbränsle. Dessa vågor kan inte transporteras genom elektriska material såsom metaller. Radarn genererar en radarvåg som antingen mäter avstånden till ett objekt eller mellan sändare och mottagare, se figur 2.



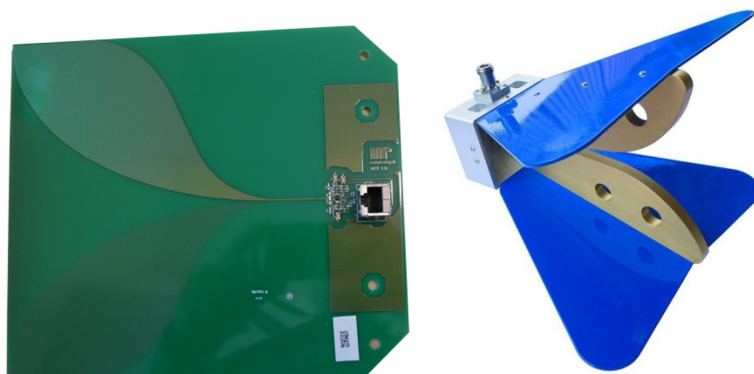
**Figur 2.** a) Sändare skickar ut våg som reflekteras vid målobjekt, mottagare tar emot reflekterad våg. b) Sändare skickar ut våg som tas emot av mottagare.

I mätsammanhang är det viktigt att ta hänsyn till radarupplösningen (det minsta avståndet för identifiering av två olika mål) och den beror på frekvensen och sålunda våglängden. Den utsända signalen och dess ringningar har en bredd på 15-20 cm. Reflektioner från två mål inom detta område kommer att överlagras och uppfattas som ett mål och i värsta fall som ett mål med dålig signalsignatur, vilket kan påverka exempelvis mätnoggrannhet. Detta fenomen kan även uppkomma vid envägskommunikation (figur 2b) om det transmitterade materialet är heterogent eller om det finns möjlighet för radarvågen att ta flera vägar från sändare till mottagare.

### 3.2 RADARSENSOR OCH ANTENNER

Den radarsensor som använts inom projektet består av en sändarantenn och mottagarantenn. Antennerna är så kallade Vivaldi-antennar (se figur 3a), och är särskilt utformade för att sända ut och ta emot bredbandiga signaler. Antennerna är konstruerade för en centerfrekvens på 2 GHz, med ett frekvensspektrum på 1-3 GHz. Radarsystemet har också modifierats för att fungera i 0,75 GHz, med ett frekvensspektrum på 0,375-1,125 GHz. Vid de undersökande mätningarna har samma antenn används genomgående även om den egentligen är särskilt anpassad för 2 GHz. Antennen fungerar för andra frekvensområden, men har naturligtvis vissa tillkortakommanden framför allt vid utsändning på lägre frekvenser. Vid frekvensundersökningar har en så kallad hornantenn används (se figur 3b).





**Figur 3.** a) Sensorn består av två Vivaldi-antennor. b) Hornantenn eller mikrovågshornantenn

Det finns olika former av radio- och radarsystem. Vanligtvis delas system in i de som fungerar i frekvens- eller tidsdomän. I system för frekvensdomänen analyseras frekvenserna. I ett system för tidsdomänen erhålls ett mätvärde för hur länge radio- eller radarsignalen har färdats (time-of-flight). Färdtiden kan användas för att beräkna avståndet till ett objekt om den så kallade dielektricitetskonstanten (kvadratroten för brytningsindex) är känd. På motsvarande sätt kan dielektricitetskonstanten beräknas om tiden och avståndet är kända. Dielektricitetskonstanten för vacuum är 1.

### 3.3 PROVLÅDOR

Tanken var sålunda att mäta dielektricitetskonstanten för trädbränsle och därur beräkna fukthalten. Ett prov med trädbränsle skulle placeras mellan antennerna. Provet beskaffenhet skulle fördröja radiosignalen beroende på dess egenskaper, i detta fall fukthaltens variation.

Trädbränslet har lagts i olika provlådor under mätningarna med radar. Det är viktigt att provlådorna påverkar mätningarna minimalt. Därför är provlådorna gjorda i plast och har räta sidor. Under försöket har fyra olika sorters provlådor använts (se figur 4). Ambitionen var att använda så stora provlådor som möjligt (800 liter) för att simulera en verklig mätning på flisbil, men det var inte praktiskt möjligt att torka så mycket biobränsle. Därför har framför allt mindre lådor om 26, 30 och 88 liter använts. Lådan om 30 liter finns inte avbildad i figur 4, det var en rätvinklig papplåda.

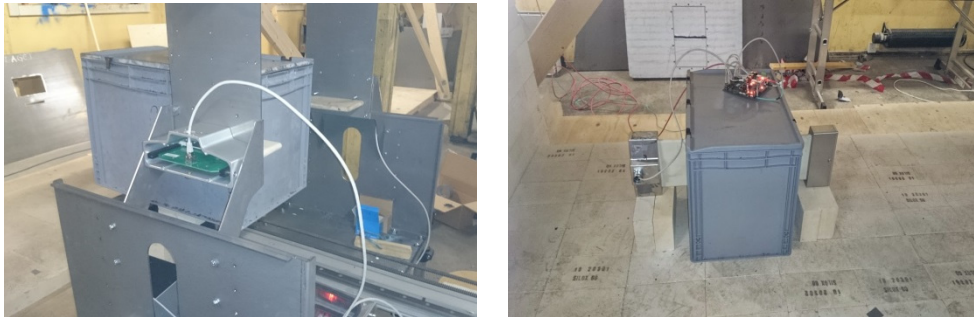


**Figur 4.** Provlådor 40x30x28,5 cm; 60x40x43,5 cm; 80x60x43,5 cm; 120x80x100 cm.

### 3.4 RADARSCANNER

En radarscanner har byggts för att steglöst kunna undersöka trädbränslet i provlådorna längs med sidorna på lådorna. Scannern består av en sändare och en mottagare som placerats på varsin sida om provlådan (se figur 5). Provlådan kan förflyttas med en

linjärenhet. Radio- och radarsignaler har en förmåga att vilja ta närmaste vägen från sändare till mottagare, därför har antennerna skärmats med en huv i metall för att tvinga signalerna genom provlådorna.

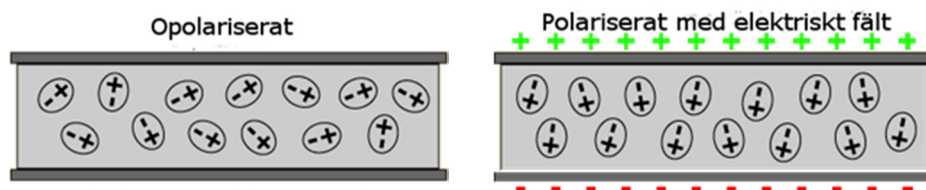


**Figur 5.** a) Radarscanner för mätning på provlåda. b) Första mätningarna med två fixerade antenner.

## 4 Metoder

### 4.1 DIELEKTRICITETSKONSTANT OCH PERMITTIVITET

*Permittivitet* är en storhet som anger ett mediums förmåga att polariseras under inverkan av ett elektriskt fält (se figur 6). Detta motsvarar kapacitansen hos ett dielektriskt medium (en elektrisk isolator som kan polariseras genom att lägga på ett elektriskt fält).



**Figur 6.** Ett dielektriskt medium med laddade partiklar skapar en polarisationseffekt om de utsätts för ett elektriskt fält, exempelvis mikrovågor.

Den relativa permittiviteten hos ett dielektriskt material kallas för *dielektricitetskonstanten* och betecknas  $\epsilon$ . Permittiviteten hos ett dielektriskt material ( $\omega$ ) sätts i relation till motsvarande för vacuum ( $\epsilon_0$ ):

$$\epsilon_r(\omega) = \frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} \quad (1)$$

*Brytningsindex* ( $n$ ) eller refraktionsindex är den materialegenskap som beskriver utbredningen av elektromagnetiska vågor i ett ämne, det vill säga kvoten mellan ljusets hastighet ( $c$ ) och utbredningshastigheten i det aktuella ämnet ( $v$ ). När en våg träffar ett medium med annat brytningsindex kommer en hastighetsförändringen att inträffa. Denna hastighetsförändring förändrar också utbredningsriktningen. Det finns en relation mellan den relativa permittiviteten ( $\epsilon$ ) och brytningsindex. Till detta kommer även storheten *relativ permeabilitet* ( $\mu_r$ ) som är förmågan hos ett material att uppehålla skapandet av ett magnetiskt fält i sig själv:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (2)$$

Icke polära material påverkas inte av *frekvensen*. Men då polarisationen i ett material kan ändras måste hänsyn tas till frekvensen vid bestämning av dielektricitetskonstanten, permittiviteten och permeabiliteten. Polarisationseffekten uppstår då det elektriska fältet vrider molekyler, joner, atomer och elektroner, det vill säga en fysisk massförflyttning. Ju högre frekvens desto svårare är det att åstadkomma denna massförflyttning. Polarisationseffekten dör ut vid mycket höga frekvenser ( $>10^{15}$  Hz) och dielektricitetskonstanten blir 1. Det är inte helt trivialt att bestämma hur dielektricitetskonstanten beror av frekvensen eftersom det då krävs att ett materials relaxationstid kan bestämmas. Det är tiden som det tar för ett elektriskt fält att återgå till sitt slumpmässiga jämviktsläge eller tiden det behövs för att polarisera sig (se figur 6).

*Förlustfaktorn* motsvarar ett dielektriskt materials avledning av elektromagnetisk energi, exempelvis värme. Förutom permittivitet och permeabilitet (*dielektrisk förlust*) måste man ibland ta hänsyn till materialets konduktivitet (ledningsförmåga). Men om man bortser från konduktiviteten så kan dielektricitetskonstanten uttryckas som en real

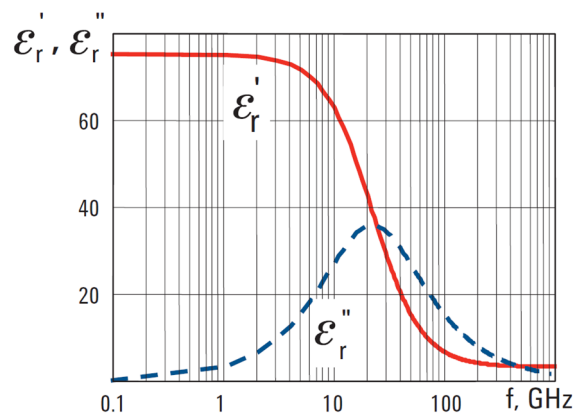
del ( $\epsilon'$ ) subtraherat med en imaginär del ( $\epsilon''$ , även kallad förlustfaktor,  $L_f$ ) där kvoten ( $\delta$ ) anger "förlusten":

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - \epsilon_r'' \quad (3)$$

$$\tan\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (4)$$

Debyes ekvation förklarar sambandet mellan dielektricitetskonstantens reella och imaginära del (se ekvation nedan och figur 7). Ekvationen säger att ett den reella delen nästan är ekvivalent med den uppmätta dielektricitetskonstanten vid låga frekvenser (<1 GHz), medan den uppmätta dielektricitetskonstanten minskar när man närmar sig materialets specifika relaxationsfrekvens (för exempelvis vatten är 22 GHz, se figur 7).

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (5)$$



**Figur 7.** Debyes relaxation för vatten vid 30°C (Chaplin 2015).

Brytningsindex och dielektricitetskonstant har följande fullständiga relation (här även inkluderat den magnetiska permeabiliteten  $\mu$ ):

$$n = \frac{c_0}{c} = \frac{\sqrt{\mu_0\mu_r\epsilon_0\epsilon_r}}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \quad (6)$$

Trädbränsle är i normalfallet inte magnetiskt. Det krävs en stor inblandning magnetiska material, enstaka spikar och andra metallrester påverkar inte mätningarna nämnvärt. Därför torde brytningsindex enligt normalformeln vara  $n^2 = \epsilon$ . Brytningsindex kan alltså direkt räknas ut enligt ekvation 6.

Dämpning i ett material anges ofta i decibel (dB) och kan beräknas ur:

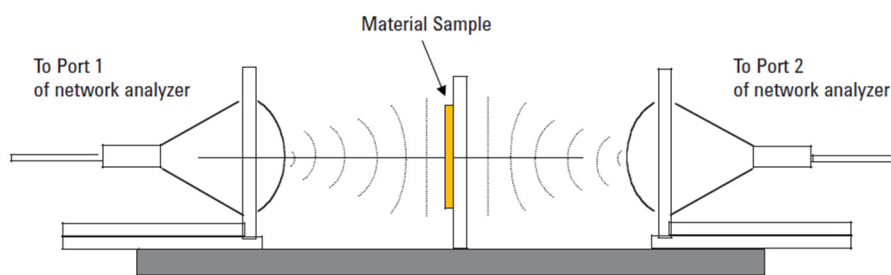
$$\alpha = \frac{\pi \cdot \epsilon_r''}{\lambda \cdot \sqrt{\epsilon_r'}} \quad (7)$$

#### 4.2 UPPMÄTNING AV DIELEKTRICITETSKONSTANTEN

Radarbolagets radarsystem är bredbandigt och kan anpassas till olika centerfrekvenser inom frekvensintervallet 0,5-6 GHz. Frekvensspektrumet är  $\pm 50$  procent runt den så kallade centerfrekvensen, vilket betyder att en centerfrekvens på 2 GHz har en bredbandighet mellan 1 och 3 GHz. Vid bestämning av dielektricitetskonstanten för ett bredbandigt radarsystem utgår man från centerfrekvensen. Det undersökta materialet

kan dock dämpa vissa av frekvenserna i intervallet varför antagandet kring centerfrekvensen ibland ger ett felaktigt resultat. En kompletterande frekvensanalys krävs ofta för att bättre förstå sambanden mellan dielektricitetskonstanten och olika frekvenser.

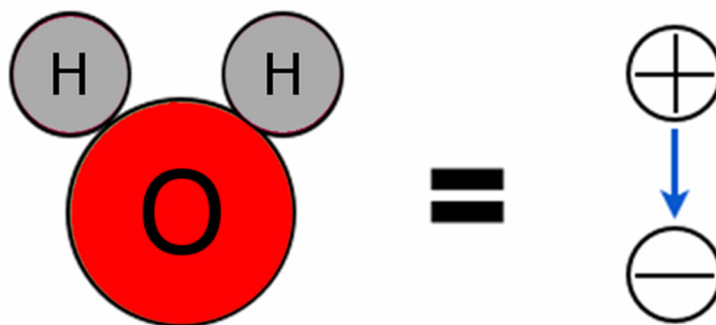
*Frirymdsmetoden* (mäta igenom ett material) är lämplig att användas för uppmätning av dielektricitetskonstanten, se figur 8. Det fungerar bra för ett bredbandigt system, för höga frekvenser och har hög noggrannhet (Agilent 2014), (Venkatesh and Raghavan 2005). Enligt Debyes ekvation kommer materialets verkliga dielektricitetskonstant ( $\epsilon_r$ ) vara högre än vad som kan uppmätas ( $\epsilon_r'$ ) med ett radarsystem på grund av att förlustfaktorn ( $\epsilon_r''$ ) växer kraftigt vid höga frekvenser (>1 GHz).



Figur 8. Frirymdsmetoden för bestämning av dielektricitetskonstanten (Agilent 2014).

#### 4.3 VATTEN OCH MIKROVÅGOR

Vatten påverkar mikrovågor (och tvärtom) på ett viktigt sätt. Vatten består nämligen av dipolmolekyler (se figur 9), vilka orienterar sig så att näraliggande molekyler vänder sina olik-laddade sidor mot varandra. Den elektriska dipolen i vatten försöker kontinuerligt orientera sig när den utsätts för elektromagnetisk strålning och dess oscillerande elektriska fält. Dipolens rörelser är frekvensberoende.



Figur 9. Dipolmolekyl H<sub>2</sub>O, vatten.

Dielektricitetskonstanten varierar med frekvens, temperatur, orientering, tryck, ämnesblandningar och molekylstruktur (Meissner and Wentz 2004), (Chaplin 2015). För sötvatten kan dielektricitetskonstanten beräknas genom en dubbel Debye relaxationsformel. Den generella formen är:

$$\epsilon(\omega) = \frac{\epsilon_s - \epsilon_1}{1 + j\nu/\nu_1} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_\infty}{1 + j\nu/\nu_2} + \epsilon_\infty \quad (9)$$

där

$$\varepsilon_1 = a_0 + a_1T + a_2T^2 \quad (10)$$

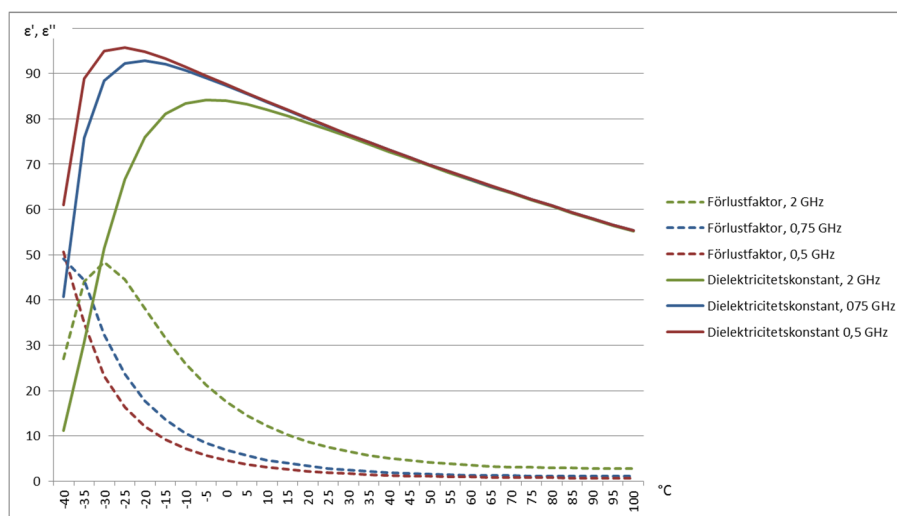
$$v_1 = \frac{45 + T}{a_3 + a_4T + a_5T^2} \quad (11)$$

$$\varepsilon_\infty = a_6 + a_7T \quad (12)$$

$$v_2 = \frac{45 + T}{a_8 + a_9T + a_{10}T^2} \quad (13)$$

$$\varepsilon_s = \frac{3,70886 \cdot 10^4 - 8,2168 \cdot 10^1 T}{4,21854 \cdot 10^2 + T} \quad (14)$$

Dessa formler anger att superkylt vatten (flytande form) genomgår sin fasomvandling vid  $-45^\circ\text{C}$ . Uppenbarligen påverkas dielektricitetskonstanten och förlustfaktorn av temperaturen och frekvensen (se figur 10). Formeln tar inte hänsyn till tryck, vilket är ointressant i vårt fall eftersom mätningarna görs under normalt atmosfärstryck. Det går att ta hänsyn till salter (Meissner and Wentz 2004), ju högre saltinnehåll desto lägre dielektricitetskonstant och högre förlustfaktor. Normalt får inte trädbränsle med hög saltinblandning levereras till kraftvärmeverk då salter skapar slaggprodukter i förbränningspannan. Aska kan förekomma i trädbränsle med upp till 5% inblandning och är en form av salt, som huvudsakligen består av kalciumoxid. Det är okänt vilka dielektriska egenskaper detta salt har i en vattenlösning.



**Figur 10.** Dielektricitetskonstant för flytande vatten ( $\varepsilon'_x$ ) och förlustfaktor ( $\varepsilon''_x$ ).

I figur 10 går det redan nu att dra slutsatser att frekvensen måste väljas så att förlustfaktorn och dämpningen blir så små som möjliga. Dämpningen är relativt hög vid 2 GHz, vilket i sin tur leder till att penetrationsdjupet blir litet. Penetrationsdjupet är bara 1,4 cm i vatten vid  $25^\circ\text{C}$ . Mikrovågsugnar fungerar i 2,45 GHz, naturligtvis med syfte att kraftigt reagera med vatten. Vi vill naturligtvis att vattenmolekylerna ska reagera med mikrovågorna, men lite lagom mycket. Därför är inte 2 GHz det lämpligaste frekvensområdet.

Temperaturens inverkan på dielektricitetskonstanten torde innebära att den också måste modelleras för fuktigt trädbränsle. Trädbränslen levereras oftast i temperaturintervallet från  $-15^\circ\text{C}$  till  $+50^\circ\text{C}$ . Nyflisat bränsle har oftast samma

temperatur som omgivningen. Lagrat bränsle kan ha andra temperaturer än omgivningen på grund av att komposteringsprocessen satts igång eller om materialet legat en längre tid i annan temperatur. Det är dock förbjudet att leverera brinnande eller glödande bränsle, därför är det inte så vanligt att trädbränsle levereras vid temperaturer över +50°C (med hög komposteringsgrad).

Is, bundet vatten och flytande vatten påverkas olika av mikrovågor (Vollmer 2004). Is och bundet vatten påverkas av radiovågor inom kHz- respektive MHz-området medan flytande vatten påverkas inom GHz-området. Det innebär att dielektricitetskonstanten och förlustfaktorn för is och bundet vatten går mot 1 respektive 0 inom GHz-området.

Ur figur 10 går det dock att konstatera att dielektricitetskonstanten minskar relativt linjärt från +0-100°C. Egenskaperna för solitt flytande vatten går inte direkt att översätta till det vatten och den fukthalt som finns i trädbränsle, men det ger en bra indikation hur fritt vatten beter sig i plusgrader. Kurvorna kommer till viss del att vara i proportion till fukthalten, men kommer också påverkas av hur trädbränsle suger upp vatten genom sin cellstruktur och eventuella extraktivämnen.

#### 4.4 IS, SNÖ OCH MIKROVÅGOR

Den molekylära strukturen i is skiljer sig från den hos flytande vatten, vilket påverkar dess dielektriska egenskaper. Vattenmolekyler bildar vätebindningar med syreatomen till angränsande molekyler. Ismolekyler bildar tre vätebindningar, vilket gör dem oförmögna att rotera under påverkan av ett yttre elektriskt fält vid mikrovågsfrekvenser (Kaatze 1997). Relaxationsfrekvensen är i kHz-regionen och för frekvenser inom mikrovågsområdet är dielektricitetskonstanten cirka 3,5 och förlusterna mycket låga (Nyfors and Vainikainen 1994).

Trädbränsle ligger ofta ut på hyggen för att torka. Det är också där materialet fryser. Dessa bränslehögar är ofta ganska luftiga. Därför är det en bra gissning att materialet är väl genomfruset om det flisas vid frysgrader. Om det frusna vattnet är väl fruset torde detta innebära att det beter sig ungefär som torr snö. Förlustfaktor för is (i) kan beräknas (Randall et al. 2010), (Cumming 1952), (Stiles and Ulaby 1981):

$$\varepsilon_i'' = (\varepsilon_{i0} - \varepsilon_{i\infty}) \frac{f_{i0}}{f} \quad (15)$$

där

$f_{i0} = 7,23 \text{ kHz}$ , relaxationsfrekvens för is vid 0°C

$\varepsilon_{i0} = 91,5$ , statisk dielektrisk konstant för is

$\varepsilon_{i\infty} = 3,15$ , högfrekvensgräns

$f$  är frekvensen

Dielektricitetskonstanten och förlustfaktorn för torr snö (ds) kan beräknas för 3-37 GHz-området (Hallikainen 1986):

$$\varepsilon_{ds}' = 1 + 1,9\vartheta_{ds}, \leq 0,5 \text{ g/cm}^{-3} \quad (16a)$$

$$\varepsilon_{ds}' = 0,51 + 2,88\vartheta_{ds}, \geq 0,5 \text{ g/cm}^{-3} \quad (16b)$$

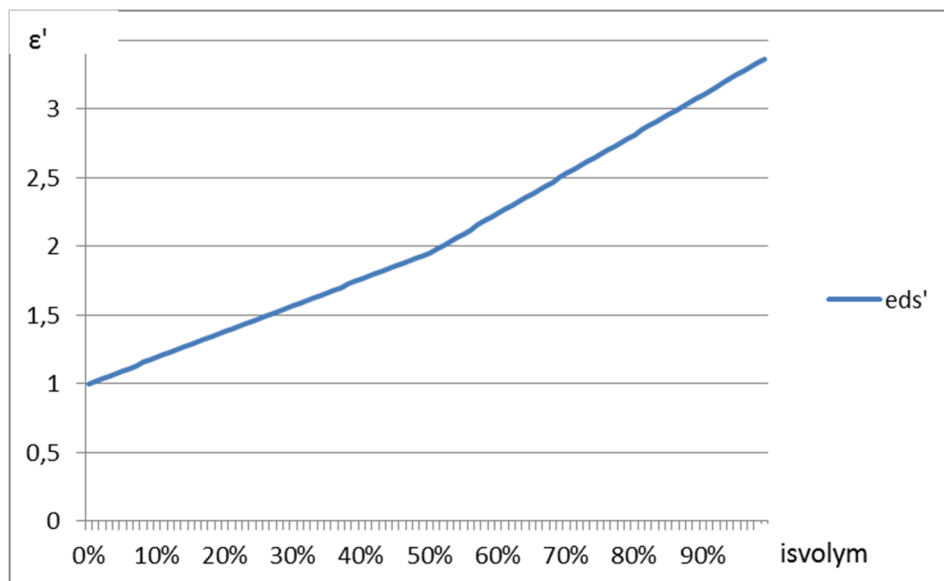
$$\varepsilon_{ds}'' = \frac{0,34v_i\varepsilon_i''}{(1 - 0,417v_i)^2} \quad (17)$$

där

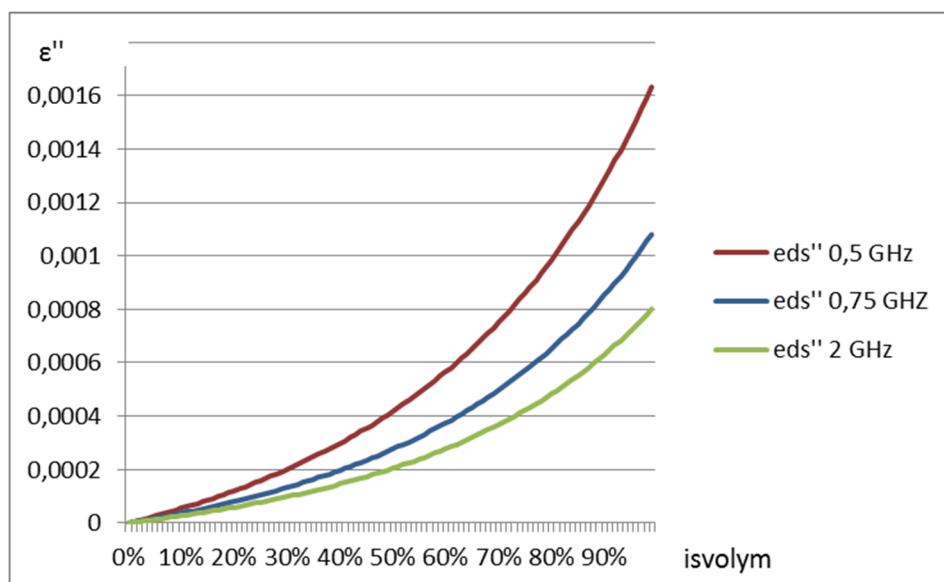
$\rho_{ds}$  är densiteten i  $g/cm^{-3}$

$v_i = \frac{\rho_{ds}}{\rho_i}$  är delmängden isvolym, där  $\rho_i = 0,916 g/cm^{-3}$

Figur 11a-b redovisar dielektricitetskonstanten och förlustfaktorn från givna ekvationer (15-17). Förlustfaktorn för GHz-området i princip noll ( $\approx 10^{-3}$ ).



Figur 11. a) Dielektricitetskonstanten för torr snö ( $\epsilon'_{ds}$ ).



Figur 11. b) Förlustfaktorn ( $\epsilon''_{ds}$ ) för torr snö vid olika densiteter.

#### 4.5 FUKTIGT TRÄ OCH DIELEKTRISKA EGENSKAPER

Vatten förändrar drastiskt de dielektriska egenskaperna hos trä. De resulterande dielektriska egenskaperna hos det fuktiga materialet är dock inte en enkel kombination

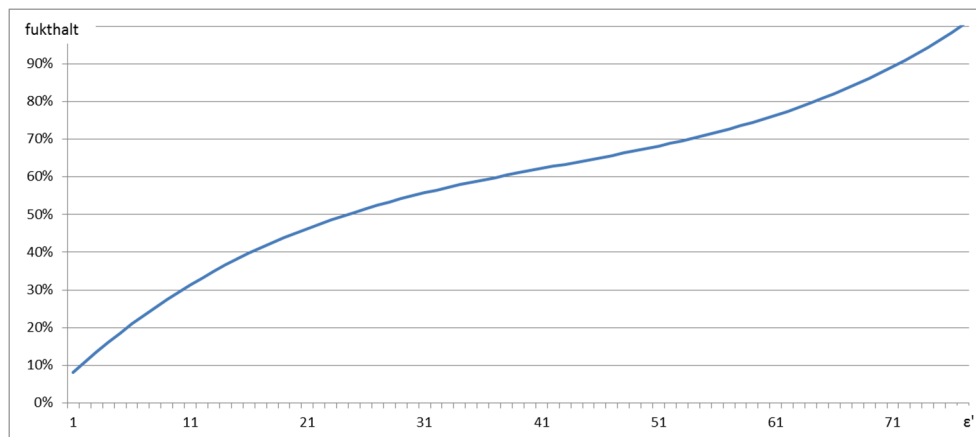


av de dielektriska egenskaperna hos torrsubstansen respektive vatten. Vatten i fasta material har andra termodynamiska egenskaper än fritt vatten. Fukt som upptas i cellernas håligheter och porer är fritt vatten och hålls genom mekaniska krafter. Den maximala andelen kemiskt bundna vatten i en träfiber kallas för fiberns mättnadspunkt. Denna punkt kan i allmänhet antas vara 30% av massan torrmaterial (Berry and Roderick 2005).

#### 4.6 RELATION TILL GEOVETENSKAP

Inom geovetenskapen används markradar, som har stora likheter med den radar som Radarbolaget har använt för arbetet till detta projekt. Markradar är ofta en bredbandig (UWB) radar i likhet med Radarbolagets radar. Topp-funktionen används ofta för bestämningen av fukthalten i marken (Topp et al. 1980). Om dielektricitetskonstanten är uppmätt och bestämd kan fukthalten beräknas enligt ekvation 18 (se figur 12 för resultat):

$$\Lambda = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_a - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_a^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_a^3 \quad (18)$$



Figur 12. Fukthalt i jord och mark som en dielektricitetskonstanten.

#### 4.7 TORKNING OCH REFERENSMÄTNING

Bestämning av fukthalt i trädbränsle görs vanligtvis genom stickprov (statistiskt urval). Delar av den totala populationen (hela lasset eller mätlådan) tas ut.

Referensbestämning av fukthalt görs genom torkning av trädbränsle i torkskåp vid  $+103 \pm 2^\circ$ . Processen består av följande steg:

- Fuktvikt mäts
- Torkning görs under 1-2 dygn
- Torrsvikt mäts
- Kompensation görs för provlådans/provpåsens vikt, och
- Beräkning görs av torr- och fukthalt.

I projektet har både stickprov och torkning av allt innehåll gjorts. Projektet har haft krav på att:

- Mäta och koppla ihop fukthalt med radarmätning

- Analysera fruset material samt snö- och isklumpar
- Mäta över långa avstånd
- Göra frekvensanalyser, och
- Mäta olika sorters trädbränsle.

Följande mätningar har gjorts:

Testmetod	Test	°C	Volym, avstånd	Antal, sort	Anmärkning
Hel låda (1)	Fukthalt	+20°C	30 l, 25 cm	3 bark, 3 GROT, 3 R-trä	Hela innehållet i lådorna har torkats. Radarmätning har gjorts mitt på lådan.
Hel låda (2)	Fukthalt	+20°C	88 l, 40 cm	3 bark, 3 GROT, 2 R-trä, 2 C-flis	Hela innehållet i lådorna har torkats. Radarmätning har gjorts över hela lådan och medelvärde beräknats. Mätvärdet mitt på lådan är överviktat.
Stickprov i hel låda (3)	Fukthalt	+20°C	88 l, 40 cm	8 bark, 8 GROT, 8 R-trä, 8 C-flis	Innehållet från mitten av lådorna har torkats, ca 10 liter. Radarmätning har gjorts över hela lådan och medelvärde beräknats. Mätvärdet mitt på lådan är överviktat.
Hel låda (4)	Fukthalt frysgrader	-18°C	26 l, 30 cm	4 bark, 4 GROT, 2 R-trä	Hela innehållet i lådorna har torkats. Radarmätning har gjorts mitt på lådan.
Hel låda (5)	Fukthalt i olika temperaturer	+23, +6, -3, -18°C	26 l, 30 cm	2 C-flis	Hela innehållet i lådorna har torkats. Radarmätning har gjorts mitt på lådan med 0,75 GHz. Dämpningsmätning har också gjorts.
Hel låda (6)	Frekvensmätning	+5°C	172 l, 60 cm	1 bark	Frekvensanalysmätningar har gjorts mitt på lådan
Hel låda (7)	Frekvensmätning och fukthalt frysgrader med snöklump	-18°C	88 l, 40 cm	1 GROT	Hela innehållet i lådorna har fryst ner. En snö- och isklump har placerats i lådan. Frekvensanalysmätningar gjordes först mitt på lådan med fryst innehåll. Lådan har tinats upp samtidigt som radarmätning genomförts.
Hel låda (8)	Signalanalys	+20°C	800 l, 1; 1,2; 2,2; 2,4 m	3 bark	Mätning med radar för att verifiera att radarsignalerna går igenom och ser bra ut.

Tabell 2. Genomförda mätningar.

#### 4.8 STATISTISKA METODER OCH STICKPROV

Nuvarande provtagning av sönderdelade trädbränslen vid svenska värmeverk görs genom stickprov (statistiskt urval). Enligt Virkesmätningssföreningen (VMF) och Skogsbrukets datacentral (SDC) ska 6 stickprov från en lastbil vara tillräckligt för att möta Skogsstyrelsens noggrannhetskrav med ett konfidensintervall på 95 procent. Det som mäts är avvikelser i stickproven. Det finns sålunda inga uppmätta avvikelser från

hela populationen (hela lasset på en lastbil) gjorda, vilket i princip inte skulle vara möjligt att göra. Enligt SDC/VMF (SDC 2014) erhöles följande noggrannhet (standardavvikelse i stickproven) (tabell 3):

Antal prov	Medel för en skäppa %	Medel för en lastbil %
3	→ 4,5	↓ 5,5
6	↑ 3,4	→ 4,1
10	↑ 2,9	↑ 3,4

↑ Klarar Skogsstyrelsens krav med 99 procents sannolikhet

→ Klarar Skogsstyrelsens krav med 95 procents sannolikhet

↓ Klarar inte Skogsstyrelsens krav

**Tabell 3.** Standardavvikelse i stickproven för skäppa respektive en lastbil (SDC 2014).

Rent statistiskt går det att beräkna hur många stickprov som måste göras för en population för att nå önskad noggrannhet enligt:

$$n = \frac{(\alpha^2 \cdot \sigma^2 \cdot (N/(N-1)))}{(s^2 + (\alpha^2 \cdot \sigma^2 \cdot (N-1)))}, \text{ känd population} \quad (19)$$

$$n = \frac{(\alpha^2 \cdot \sigma^2)}{s^2}, \text{ okänd population} \quad (20)$$

där

$\alpha$  är sigma-nivå

$\sigma$  är standardavvikelsen för hela populationen (önskad)

$s$  är standardavvikelsen för alla stickprov (känd)

$N$  är antalet i en population

$n$  är antalet stickprov som måste göras för att nå önskad noggrannhet.

Vid flismätning motsvarar ett stickprov ca 1 liter trädbränsle, vilket motsvarar den mängd som man idag torkar i ett torkskåp. Det innebär att population i en lastbil med 100 kubikmeter är 100 000. Radarbolaget har genomfört mätning av hela populationen i lådor om 88 liter. Vid önskad noggrannhet på  $\sigma=3$  procentenheter (p.e.), enligt formlerna ovan för olika standardavvikelser och population, är antalet stickprov som borde göras (tabell 4):

Konfidensintervall	Sigma-nivå, $\alpha$	Stdev, $s=1,5$ p.e.	Stdev, $s=3$ p.e.	Stdev, $s=4,5$ p.e.
95%	1,96	1/1	4/4	8/9
95,45%	2	1/1	4/4	8/9
99%	2,58	2/2	6/7	13/15
99,73%	3	2/2	8/9	17/20

**Tabell 4.** Antal stickprov som krävs för att uppnå efterfrågad noggrannhet vid olika sigma-nivåer och för olika populationer (88/100 000). Efterfrågad noggrannhet är  $\sigma=3$  procentenheter.

Det är värt att notera att populationer på 88 respektive 100 000 endast ger marginella skillnader i antalet stickprov, som krävs. Det som påverkar antalet stickprov är framför allt efterfrågad noggrannhet och standardavvikelsen i hela populationen (hela lasset på en lastbil). Höga standardavvikelser uppträder framför allt för populationer med stor spridning och stora variationer. GROT och bark är exempel på trädbränsle med stor spridning och stora variationer, medan returträ och cellulosaflis har mindre variationer. Ändras efterfrågad noggrannhet till  $\sigma=2$  procentenheter (p.e.) måste följande antal stickprov göras (tabell 5):

Konfidensintervall	Sigma-nivå, $\alpha$	Stdev, $s=1,5$ p.e.	Stdev, $s=3$ p.e.	Stdev, $s=4,5$ p.e.
95%	1,96	2/2	8/9	16/19
95,45%	2	2/2	8/9	17/20
99%	2,58	4/4	13/15	25/34
99,73%	3	5/5	17/20	30/45

**Tabell 5.** Antal stickprov som krävs för att uppnå efterfrågad noggrannhet vid olika sigma-nivåer och för olika populationer (88/100 000). Efterfrågad noggrannhet är  $\sigma=2$  procentenheter.

## 5 Bestämning av fukthalt $\pm 0 - +15^{\circ}\text{C}$

### 5.1 MÄTNINGAR

Lådtester enligt 1-3 (tabell 2) genomfördes vid ungefär  $+15^{\circ}\text{C}$ . I vissa fall kan temperaturen för trädbränslet ha varit lägre vid mättillfället då vissa mätningar gjordes direkt efter fyllning av provlådor på Johannes bränsleplan i Gävle. Temperatur understeg dock aldrig  $\pm 0^{\circ}\text{C}$ . I ett par fall hade komposteringsprocessen pågått ett tag och temperaturen var cirka  $+40^{\circ}\text{C}$ . Ingen hänsyn har tagits till temperaturen från mätningarna eller vid modelleringen av data.

Fyra olika trädbränslen har undersökts: GROT, bark, returträ och cellulosaflis. Det har inte genomförts någon separat modellering av dessa. Det går dock att misstänka att en liten skillnad kan finnas mellan de olika bränslena, till exempel hur fritt vatten fyller ut tråceller. Bark består av en annan sorts celler (korkceller) än kärnveden, som består av parenkymceller. Kärnveden består dessutom av extraktivämnen såsom kåda, fetter och fenoler. Det krävs dock en större test (än den som är gjord i projektet) för verifiering om det finns skillnader mellan olika trädbränslen.

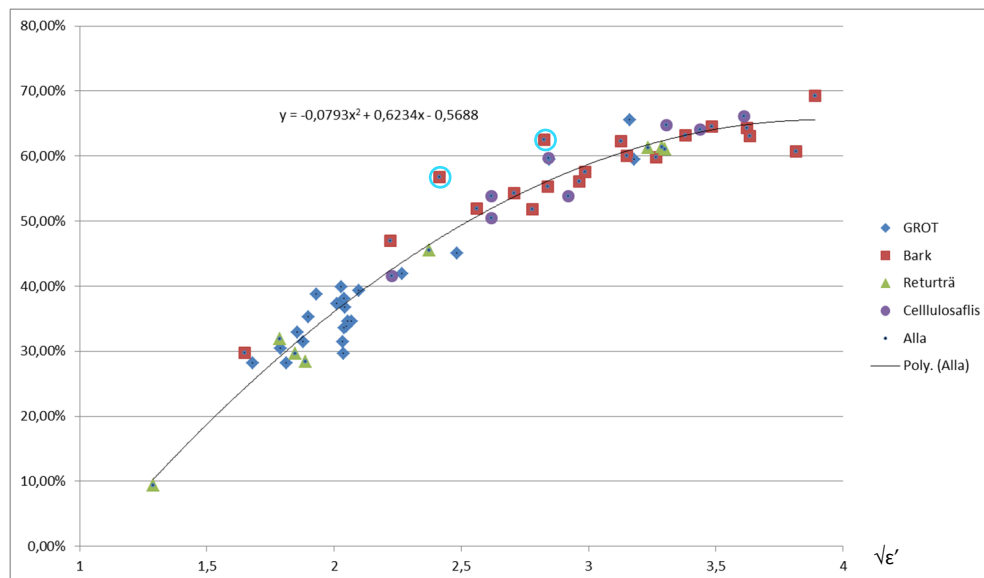
Radarmätningar är gjorda på två olika sorters provlådor: 30 liter/25 cm och 88 liter/40 cm. Till en början gjordes torkning av hela lådor (16 st) för bestämning av fukthalten. Eftersom torkningen av 88 literslådor var mycket tidsödande bestämdes att referensmätningarna skulle genomföras som stickprov. Stickprovet togs från mitten av lådan för att så väl som möjligt representera fukthalten för respektive radarmätning, som också gjordes mitt på lådan. Det var dock svårt att få full representativitet och korrelation av urvalet mellan radarmätning och referensmätning genom torkning. Särskilt komplicerat var detta för inhomogent trädbränsle och för trädbränsle där fukthalten hade stor spridning. Hypotesen var dock att trädbränslet vid mätningar på längre avstånd (2,5 meter) är att betrakta som homogent eftersom materialet kommer att fördela sig stokastiskt över denna sträcka.

Torkning av trädbränsle var väsentligt mer komplicerat än vad som första anades. Målet var att erhålla maximal torrhet genom torkning för att därigenom bestämma fukthalten med hög noggrannhet. Dessutom skulle det torra trädbränslet mätas med radar. Vid de två första torkningarna användes papperspåsar där trädbränslet fick torka, vilket är enligt gängse rutiner. Det visade sig dock att viss fuktighet fanns kvar i proven, varvid bränslet torkades i aluminiumformer från prov tre och framåt (dessa två prov är markerade med turkosfärgad ring i figur 13).

## 5.2 MODELL OCH SPRIDNING

En enkel andragradsekvation har anpassats utifrån genomförda fukthaltbestämningar och dielektricitetskonstantbestämningar (se figur 13). I bestämning av fukthalt vid mätningar med markradar föreslås en tredjegrads ekvation, vilket även Nyström (Nyström 2006) har föreslagit för trädbränsle. Vi ser dock ingen fysikalisk beskrivning varför en tredjegrads ekvation ska användas. Polynom av högre grader kommer alltid att anpassa sig bättre till data, men utanför dataintervallet får man ofta dålig kurvanpassning.

Efter torkning har bränslets dielektricitetskonstant också mätts. Medelvärdet på dielektricitetskonstanten för torrt trädbränsle var 1,35. Endast ett prov var under 28% och det var mycket torrt nyflisat returträ. Proven varierar mellan 28% och 69%. Bark är vanligtvis fuktigare än GROT. Det ska dock inte läggas allt för stor vikt vid fördelningen eftersom provtagaren medvetet försökte få en bra spridning på fukthalten för respektive trädbränsle.



**Figur 13.** Modellering av kvadratroten ur dielektricitetskonstanten (brytningsindex) och fukthalt för olika trädbränslen med ett polynom av andra graden  $y = -0,0793x^2 + 0,6234x - 0,5688$ .

De två inringade punkterna (turkos) torkades inte på ett vederbörligt sätt, därav stora avvikelser. Övriga stora avvikelser kan bero på dåliga referensmätningar (torkning) eller andra avvikelser som beror på temperatur, densitet, slarv i radarmätning eller något annat.

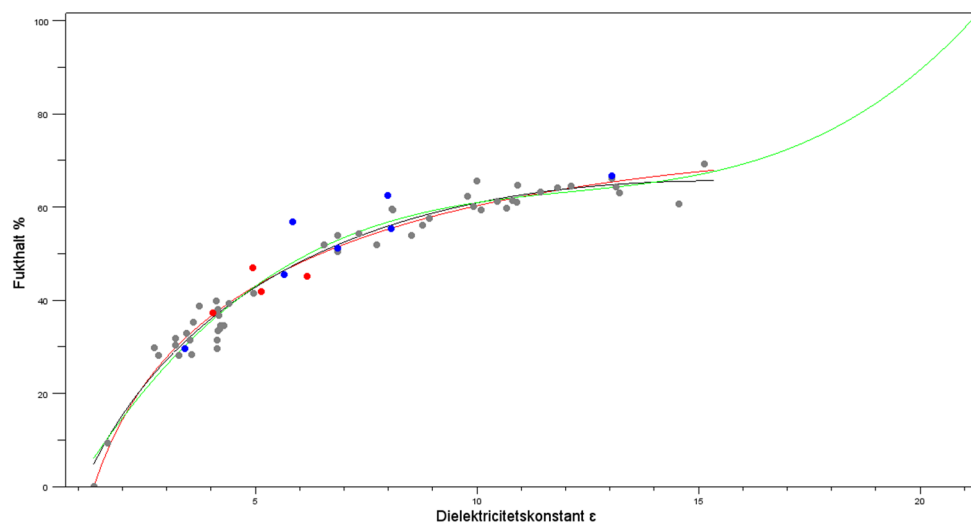
Enligt (Metaxas and Meredith 1983) kan förlustfaktorn modelleras utifrån fukthalten genom

$$\varepsilon''_{eff} = \varepsilon''_0 + \frac{AM^2}{M_\infty - M} \quad (21)$$

där konstanterna  $\varepsilon''_0$ ,  $M_\infty$  och  $A$  sätts för att bäst passa data. I vårt fall mäts inte förlustfaktor utan dielektricitetskonstanten (real-delen), därför kan inte formeln utan vidare användas. Det är möjligt att i ett framtida radarsystem mäta och erhålla förlustfaktorn genom dämpningsmätning.

Vi har också provat att göra en logaritmisk anpassning av dielektricitetskonstanten och fukthalt (se figur 14). Notera att dielektricitetskonstanten anges i x-axeln, vilket inte görs i figur 13 där kvadratroten ur dielektricitetskonstanten (brytningsindex) anges i x-axeln. Skillnaderna mellan en logaritmisk formel och ett andragradspolynom är små. Det är dock lättare att anpassa min- och max-värden med en logaritmisk formel.

Om man jämför figur 12 (Topp-funktionen) med mätvärdena från figur 13 så finns tydliga likheter. En minstakvadratanpassning är gjord från mätvärdena med ett tredjegrads-polynom enligt Topp-funktionens utseende (se figur 14). Eftersom inga mätningar gjordes på trädbränslen med en fukthalt över 70% så går det inte helt att bekräfta överensstämmelserna mellan mätvärdena och en modifierad "Topp-funktion". Troligtvis ska "Topp-funktionen" ha en brant lutning efter sadelpunkten vid 60% upp emot 100% fukthalt. Det är dock ovanligt med fukthalter över 70% för trädbränsle.

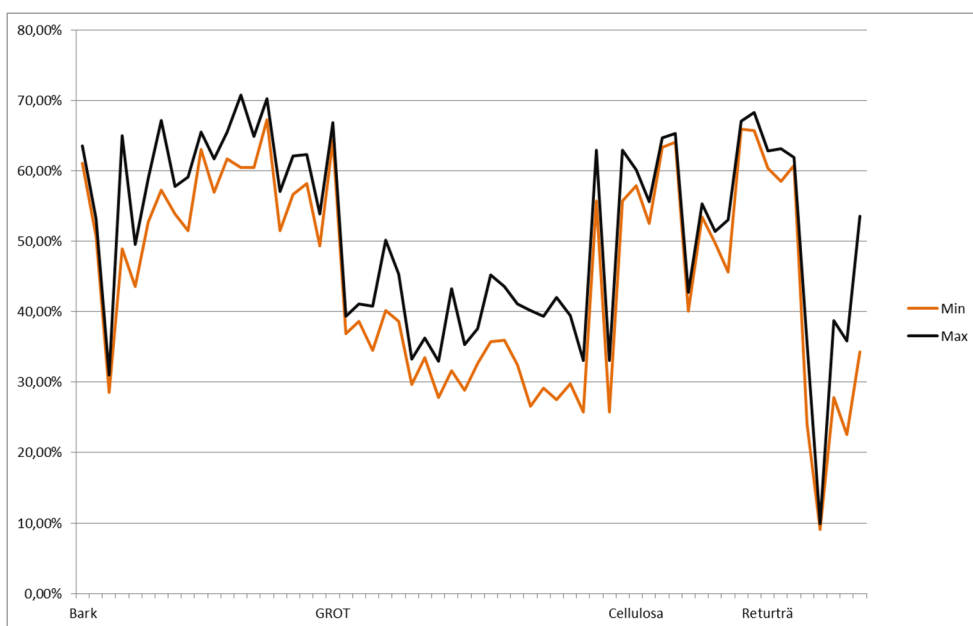


**Figur 14.** Jämförande modellering av dielektricitetskonstanten och fukthalt med  
Röd=logaritmisk ( $y=0,2827*\ln(x-0,35)*(104,0-x)$ ). Svart=andragradsekvation.  
Grön="Topp-funktionen" ( $y=-15,2+17,6*x-1,37x^2+0,038*x^3$ )

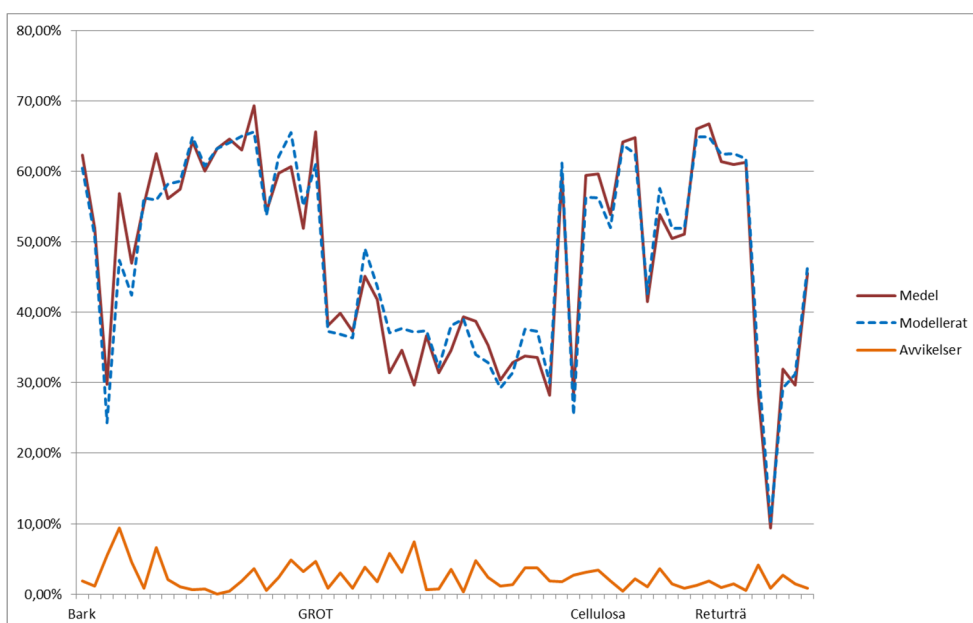
Provlådorna fylldes alltid med material från ett litet område (ur flishögarna) för att åstadkomma hög homogenitet. Trots detta uppvisade vissa prov stor spridning (se figur 15a). Störst spridning var det i bark och GROT. Vid stor spridning var det svårt att nå en hög noggrannhet i bestämning av fukthalt eftersom det inte var säkert att trädbränslet i mitten hade samma medel som i hela lådan. Möjligtvis var stickproven från mitten på lådorna mer representativa för radarmätningarna. I GROT förekommer dessutom olika stora bitar, allt från barr till decimeterstora kvistar. Avvikelserna i modellerad fukthalt med andragradsekvation från medelvärde visas i figur 15b.

Standardavvikelsen uppgår till  $\sigma=3,14$  procentenheter för andragradsekvation, något lägre för logaritmisk formel.

Inringade värden i figur 14 avser torkning av hela lådor (88 liter). Lådor med högst densitet ( $>0,2 \text{ kg/m}^3$ ) torrbränsle visas som en röd punkt (4 st) och de med lägst densitet ( $<0,2 \text{ kg/m}^3$ ) visas som en blå punkt (7 st). Det går inte koppla densiteten till stora avvikelser. De färgade punkterna med störst avvikelser, som ligger ovanför regressionskurvorna, består av bark (jämför med figur 13). Det går att dra slutsatsen att bark beter sig mest avvikande.



**Figur 15a.** Spridning av fukthalt för olika trädbränslen.



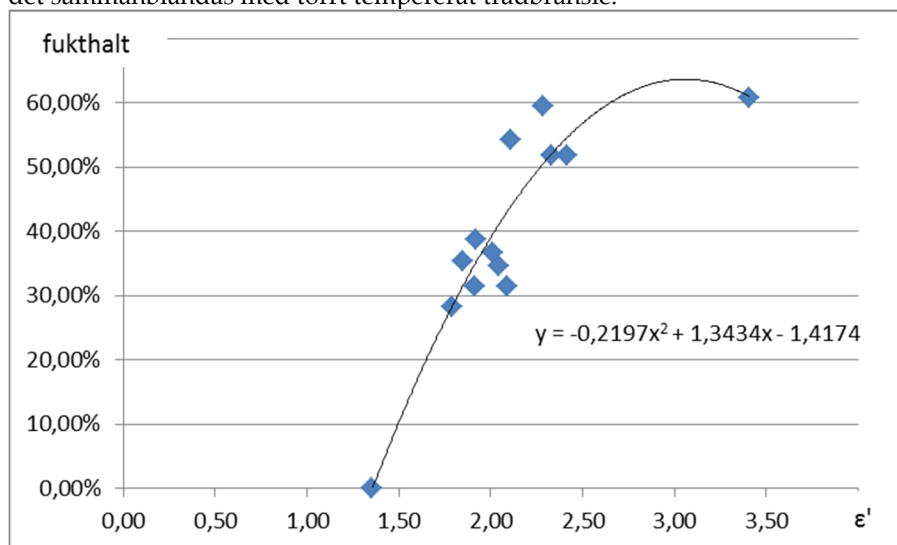
**Figur 15b.** Avvikelser (i procentenheter) från fukthalt för olika trädbränslen.



## 6 Bestämning av fukthalt -18°C

Lådtester enligt 4 (tabell 2) av hela lådor genomfördes med fryst material (-18°C) och med en centerfrekvens om 2 GHz. Tre olika trädbränslen har undersökts: GROT, bark och returträ. Det har inte genomförts någon separat modellering av dessa.

Hypotesen från projektets början var att det inte var några skillnader mellan tempererat och fryst material. Skillnaderna mellan tempererat och fryst trädbränsle var dock stora för centerfrekvensen 2 GHz. Därför beslutade projektet att modellera fryst och tempererat trädbränsle var för sig (se figur 14 och 16). Vid en jämförelse med tempererat trädbränsle (>0°C) från figur 14 går det att konstatera att kurvan är brantare för fryst material. Nackdelen med en brant kurva är att upplösningen och noggrannheten minskar. Till viss del uppvägs detta av att radarsignalen ser bättre ut och är mindre deformerad vid penetration av fryst material. En slutsats (för åtminstone 2 GHz) är att temperaturmätning krävs vid modellering av fryst material, annars kan det sammanblandas med torrt tempererat trädbränsle.



**Figur 16.** Modellering av dielektricitetskonstanten och fukthalt för frysta trädbränslen med ett polynom av andra graden.

För att få djupare insikt i och förstå skillnaderna mellan tempererat och fryst trädbränsle genomfördes en modellering av mikrovågor, is, snö och vatten för olika temperaturer och frekvenser enligt figur 10 och 11. Vid modellering visade det sig att det var stora skillnader mellan 0,75 GHz och 2 GHz vad gäller dielektricitetskonstant och förlustfaktor för flytande vatten. För is och snö ska det dock inte finnas något frekvensberoende inom GHz-området. Det finns stora likheter mellan figur 11 och 16 (även om axlarna är omkastade). Alla mätningar i figur 16 är gjorda med en centerfrekvens på 2 GHz. I och med att fuktigt biologiskt material i stort betar sig som vatten, is och snö beslutade projektet:

- att reducera mätningarna av fryst material (enligt punkt 4 i tabell 2) från fyra material till tre
- att modifiera radarsystemet och möjliggöra mätningar i 0,75 GHz, och
- att genomföra mätningar på trädbränsle vid olika temperaturer (se nedan).

## 7 Temperaturmatchning vid olika temperaturer

Mätningar har gjorts av cellulosaflis med två olika fukthalter. Målet var att undersöka om 0,75 GHz är en lämplig frekvens för noggrann bestämning av såväl tempererat som fryst trädbränsle.

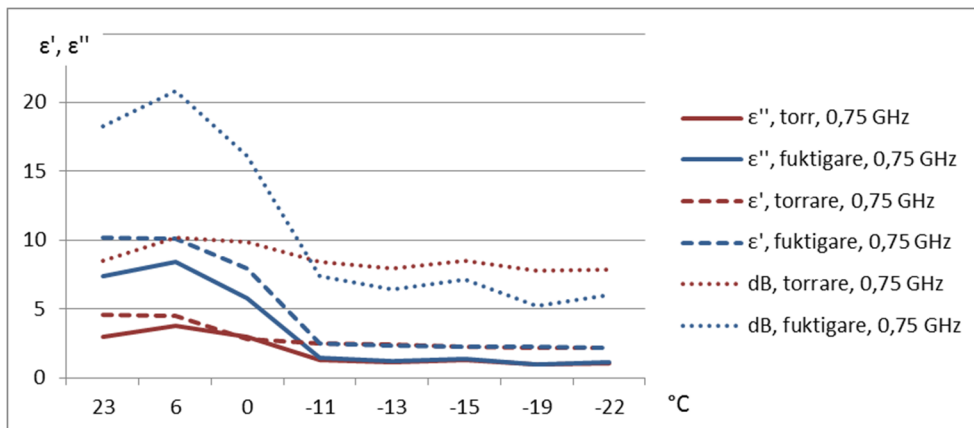
### 7.1 MÄTNINGAR

Cellulosaflis användes eftersom det ansågs mest stabilt och att ingen komposteringsprocess igångsatts, vilket skulle kunna skapa problem vid temperaturregleringen i provlådorna. Två provlådor utrustades med varsin termometer för att verifiera att temperaturen i trädbränslet och i klimatkamrarna (kylskåp, frys och vanligt rum) skulle ha samma värde (se figur 17a). Temperaturerna var från +23°C till -22°C. Lådorna skannades därefter mellan sändare och mottagare enligt figur 17b.



**Figur 17.** a) Provlådor med termometer. b) Steglös skanning av provlådor på linjärenhet.

Mätningarna gjordes av dämpningen (dB) och dielektricitetskonstanten med radarsystemet i figur 17b. Dämpningsmätning var möjlig tack vare att radarsystemet hade modifierats och kompletterats med en AD-omvandlare (analog till digital omvandlare). Resultatet finns redovisade i figur 18. Utifrån mätningarna i figur 16 så korrelerar inte dielektricitetskonstanten mellan fuktigt och torrt trädbränsle med beräkningarna i figur 11. Det "torrare" bränslet har högre dielektricitetskonstant än det "fuktigare". Den troligaste orsaken är att trädbränslets (enbart trä) relativa densitet påverkar dielektricitetskonstanten mer än fruset vatten och snö. Dielektricitetskonstanten mättes också att båda trädbränslena hade torkats ("torrare",  $\epsilon=1,31$  och "fuktigare",  $\epsilon=1,26$ ), vilket även det visar på att det ursprungligen "torrare" bränslet hade högre densitet (enbart trä) än det "fuktigare".



**Figur 18.** Dielektricitetskonstant, dämpning och förlustfaktor för olika temperaturer och fuktigheter.

Om ekvation 21 används kan en anpassning göras utifrån tempererade data ( $>0^{\circ}\text{C}$ ) i figur 18. Vid temperaturer under  $0^{\circ}\text{C}$  är det tveksamt om denna ekvation kan användas. I och med att endast två prover med olika fukthalt har undersökts är underlaget ganska litet, men det ger en indikation hur fukthalten skulle kunna beräknas från dielektricitetskonstanten och förlustfaktorn. I figur 18 redovisas sambanden mellan fukthalten och förlustfaktorn utifrån mätdata. Löser man ut  $M$  (fukthalten) ur ekvation 21 erhålls:

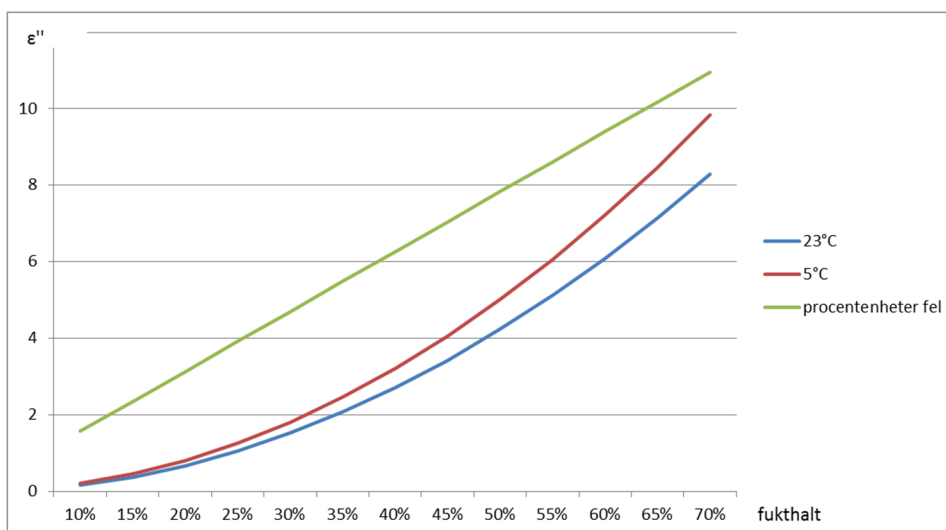
$$M = -\frac{(\epsilon''_{eff} - \epsilon''_0)}{2A} \pm \sqrt{\frac{(\epsilon''_{eff} - \epsilon''_0) \cdot ((\epsilon''_{eff} - \epsilon''_0) + 4M_{\infty}A)}{2A}} \quad (22)$$

där

$M_{\infty}$  kan sättas till 100% i detta exempel

$\epsilon''_0$  kan sättas till 1 i detta exempel

$A_{23}=2265,0512$ ,  $A_5=2635,3048$  (enligt minstakvadratanpassning)



**Figur 19.** Samband mellan fukthalt (y-axel) och förlustfaktor (x-axel) vid två olika temperaturer.

Ur figur 19 går det att konstatera att temperaturen är en viktig parameter om noggrannheten ska vara hög vid bestämningen av fukthalten (vid mätningarna i figur 13 gjordes ingen temperaturmätning). Vid hög fuktighet ökar känsligheten för temperaturen, och felet kan bli 9 procentenheter vid 60% fukthalt. Vid låg fuktighet minskar felet.

Vid minusgrader kan förlustfaktorn inte användas i ekvation 22 för att beräkna fukthalten. Det beror på att förlustfaktorn för is och bundet vatten nästan är noll ( $\approx 10^{-3}$ ) för mikrovågor i GHz-området. Tempererat bundet vatten reagerar på mikrovågor i MHz-området (Paz 2010) eller mer precist: cirka 100 MHz (Komarov 2005). Relaxationstiden för temperat bundet vatten är 0,98-2 ns, medan för fritt vatten är den 0,0071-0,00148 ns. Vatten är kemiskt bundet (bundet vatten) upp till 30% mätningsnivå (Reeb 2009) och anses ha en fryspunkt vid  $-20^{\circ}\text{C}$  (Zelink et al. 2011). Fritt vatten som blivit till is reagerar i kHz-området.

Dielektricitetskonstanten i figur 18 borde enligt figur 11 och 16 ha varit mer differentierad. Det är oklart vad detta beror på. Skillnaden mellan mätningarna i figur 11 och figur 18 är frekvensen (2 GHz och 0,75 GHz). Det kan bero på att frekvensen (0,75 GHz) reagerar på högre andel bundet vatten (enligt figur 10) och trädbränsle, vilket kan ta ut effekten av högre andel fruset fritt vatten (is).

Förlustfaktorerna i figur 18 är olika, vilket indikerar att densiteten torrt trädbränsle har betydelse. Sålunda, en möjlig utväg för att bestämma fukthalten i fruset trä (förutom genom dielektricitetskonstanten) är att analysera förlustfaktorn eller dämpningen. I figur 18 är skillnaden mellan fuktigt och torrt prov för dämpningen ( $\alpha$ ) cirka 21 procent och 8 procent för förlustfaktorn. Vid torkning gick det att konstatera att skillnaden mellan trädbränslenas densitet var 29 procent (det torra bränslet vägde 4 488 g och det fuktiga 3 394 g i torrt tillstånd). Det överensstämmer ganska väl med radarmätningen. Om man har ett känt prov, dess fukthalt ( $M_0$ ) och torrdensitet torde fukthalten ( $M_1$ ) kunna beräknas enligt:

$$\frac{M_0}{M_1} = \frac{\text{råvikt}_0 - (\text{volym} \cdot \text{torrdensitet}_0)}{\text{råvikt}_0} \cdot \frac{\text{råvikt}_1}{\text{råvikt}_1 - (\text{volym} \cdot \text{torrdensitet}_0 \cdot \alpha_1/\alpha_0)} \quad (23)$$

Genom att sätta in värdena för de två olika trädbränslena, där det fuktiga får vara referens erhålls:

$$\frac{0,6544}{M_1} = \frac{9,823 - (26 \cdot 0,1305)}{9,823} \cdot \frac{7,091}{7,091 - (26 \cdot 0,1305 \cdot 8,11/6,43)}$$

där  $M_1=39,6\%$ . Det verkliga uppmätta värdet är 36,3%. Denna matematik bygger endast på två prov och ska endast ses som en idé att dämpningen eventuellt kan användas för att beräkna fukthalten om volym och råvikt är kända.

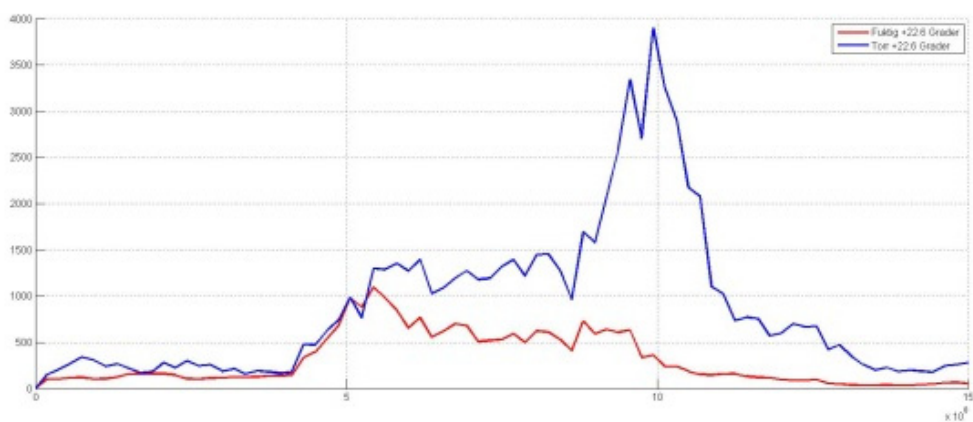
## 7.2 FREKVENSPANALYS

Genom Fast Fourier Transform (FFT) kan frekvensdomänen av radarsignalen undersökas, som ursprungligen erhållits i tidsdomänen. Figur 20 a-h redovisar frekvensspektra (0-1,5 GHz) för radarsignaler som varit underlag för bestämningarna av dielektricitetskonstanterna i figur 18. I figur 20a-c går det att se hur de höga frekvenserna dämpas ordentligt, vilket i sin tur gör att förlustfaktorn blir stor för fuktigt trädbränsle och lägre för torrt. Vid  $-11^{\circ}\text{C}$  och lägre (figur 20d-h) är det mindre

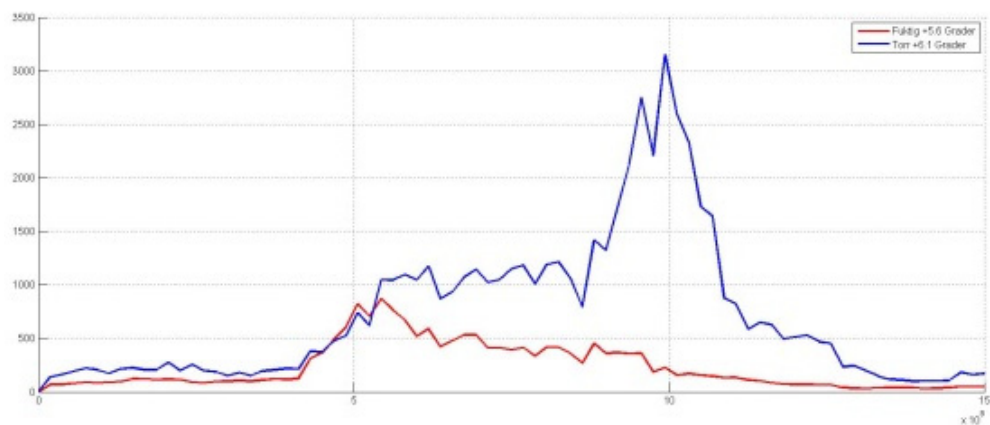
dämpning i fuktiga trädbränslet än i det torra. Dessa figurer visar tydligt att dämpningen i is och snö är nästan noll, och helt i linje med ekvationerna 15 (is) och 17 (snö).

Det gjordes även en mätning vid  $-13^{\circ}\text{C}$  på en låda med frekvensen 2 GHz. Den visar att materialet i lådan påverkas av frekvensen. Enbart det frusna vattnet borde inte ha gjort någon skillnad, men uppenbarligen påverkar trädbränslet mikrovågorna enligt:

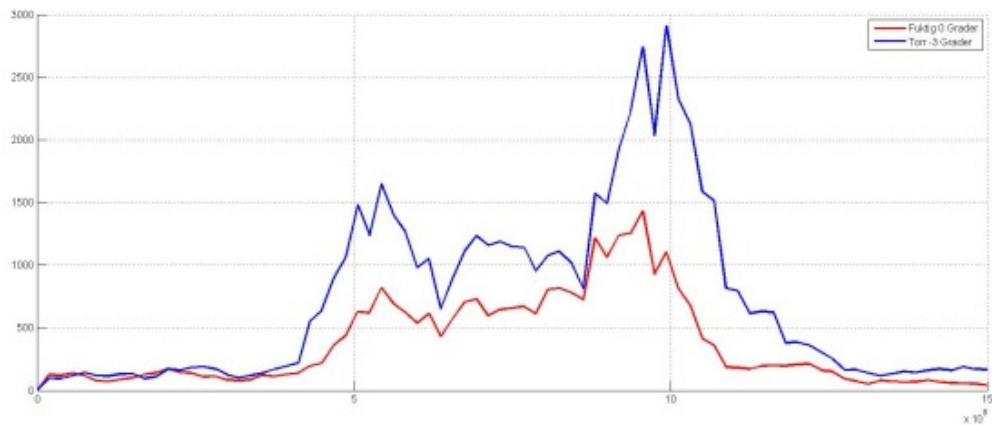
- Dielektricitetskonstant: 2,49 (2 GHz), 2,35 (0,75 GHz)
- Förlustfaktor: 0,79 (2 GHz), 1,25 (0,75 GHz), och
- Dämpning: 10,49 dB (2 GHz), 6,41 dB (0,75 GHz).



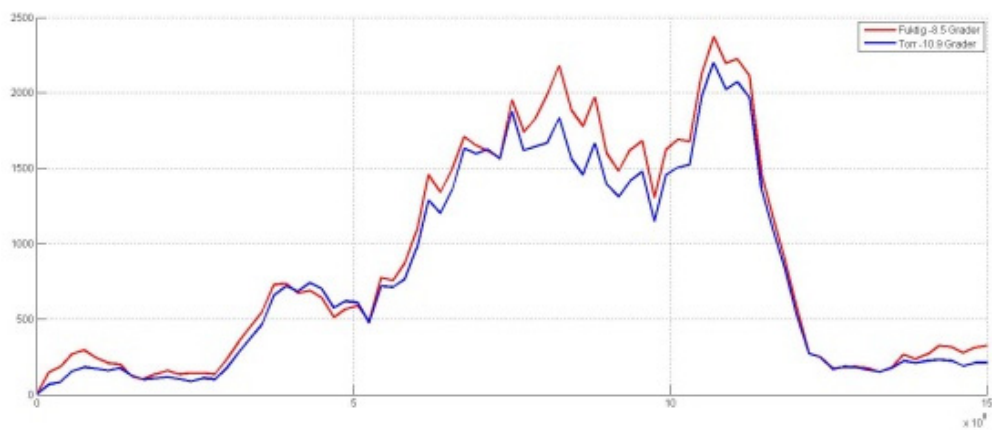
Figur 20. a) Frekvensspektrum för  $+23^{\circ}\text{C}$  för 0-1,5 GHz.



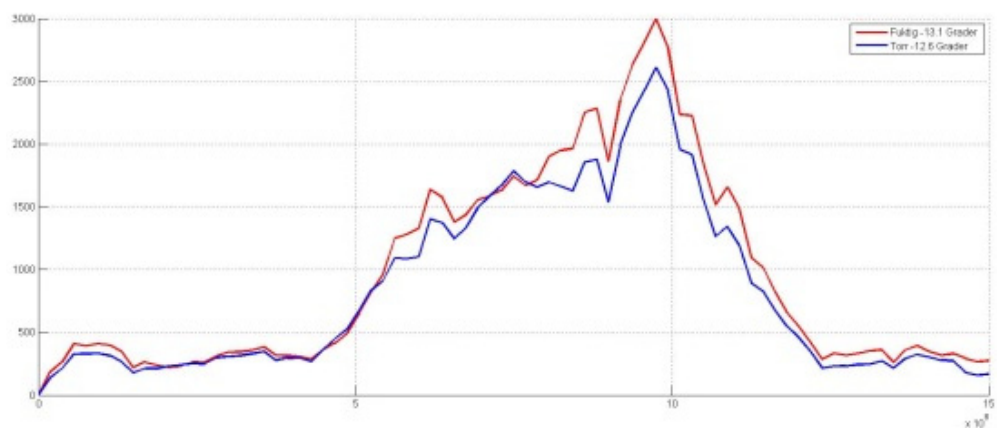
Figur 20. b) Frekvensspektrum för  $+6^{\circ}\text{C}$  för 0-1,5 GHz.



Figur 20. c) Frekvensspektrum för 0°C för 0-1,5 GHz.

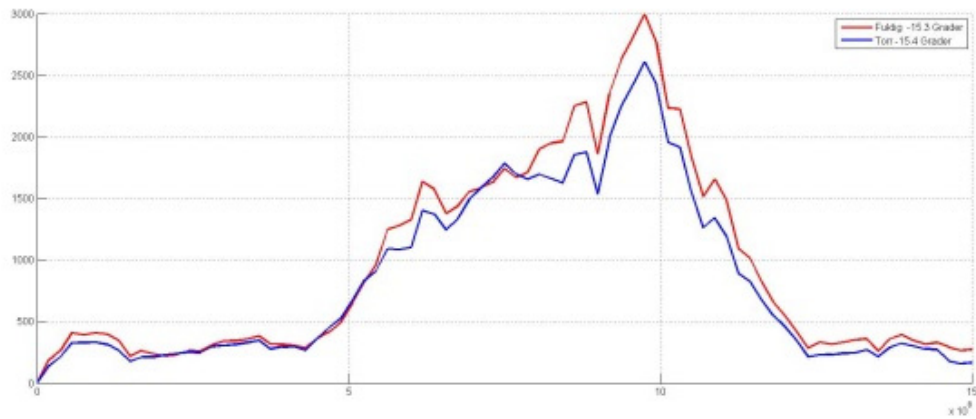


Figur 20. d) Frekvensspektrum för -11°C för 0-1,5 GHz.

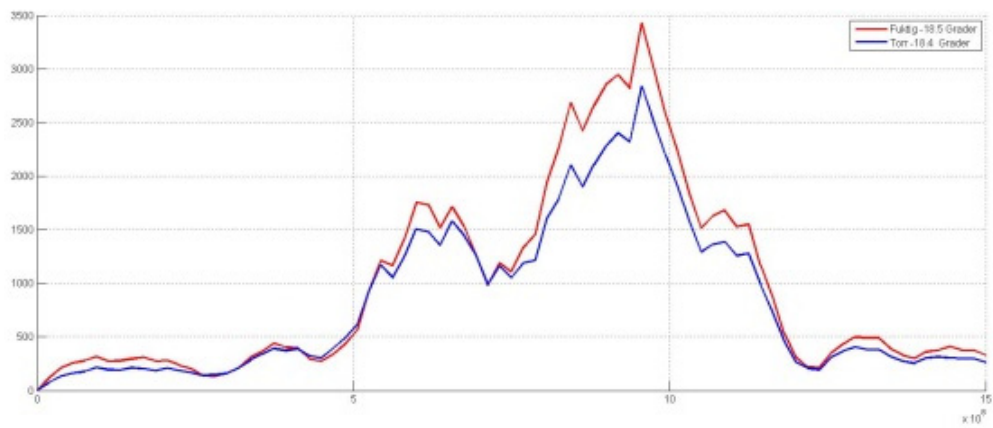


Figur 20. e) Frekvensspektrum för -13°C för 0-1,5 GHz.

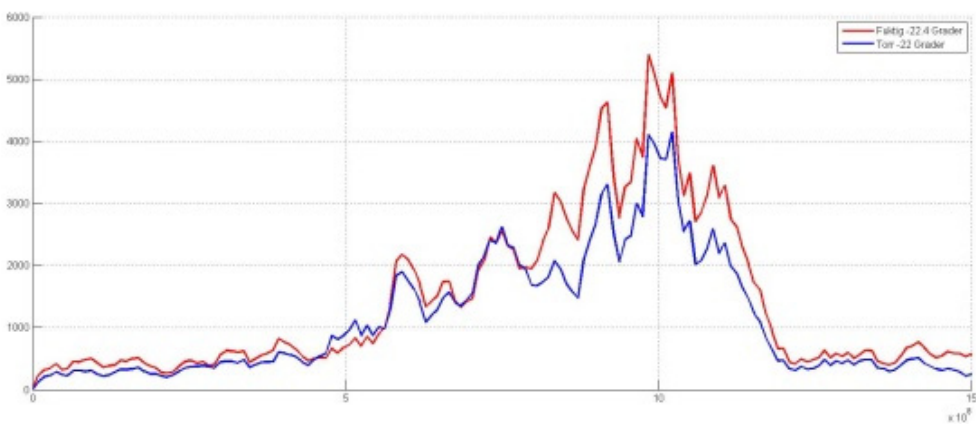




Figur 20. f) Frekvensspektrum för -15°C för 0-1,5 GHz.



Figur 20. g) Frekvensspektrum för -18°C för 0-1,5 GHz.



Figur 20. h) Frekvensspektrum för -22°C för 0-1,5 GHz.

## 8 Frekvensanalys

En nätverksanalysator är ett instrument som kan mäta dämpningen för en radiosändning för olika frekvenser. Instrumentet kan användas för både transmission och reflektion. I detta fall har transmissionsmätning gjorts, det vill säga mätning genom provlådan. För ändamålet har så kallade hornantennor och Radarbolagets Vivaldiantennor använts (se figur 3). Hornantennor är särskilt anpassade för UHF- och mikrovågor. Den består av en vågledare som är format som ett horn. Skillnaderna vid mätningar mellan de två antensorterna var små.

### 8.1 MÄTNING -18°C

Det har rått lite delade meningar om och hur fruset material och snöklumpar påverkar eller påverkas av mikrovågor. Släpper dessa material igenom mikrovågor lättare eller svårare? Enligt figur 11 ska dielektricitetskonstanten och förlustfaktorn vara konstanta vid olika frekvenser. Förlustfaktorn ska dock öka vid högre densitet vatten (ökad fukthalt). Enligt Paz (Paz 2010) ska bundet vatten var flytande ned till -20°C, varför då figur 10 borde gälla för fukthalter upp till 30%.

Inför mätning av fruset material så frystes 88 liter GROT till -18°C. Därefter lades material i en provlåda tillsammans med en snöklump (se figur 21).



**Figur 21.** Provlåda med fruset GROT (-18°C) och snöklump

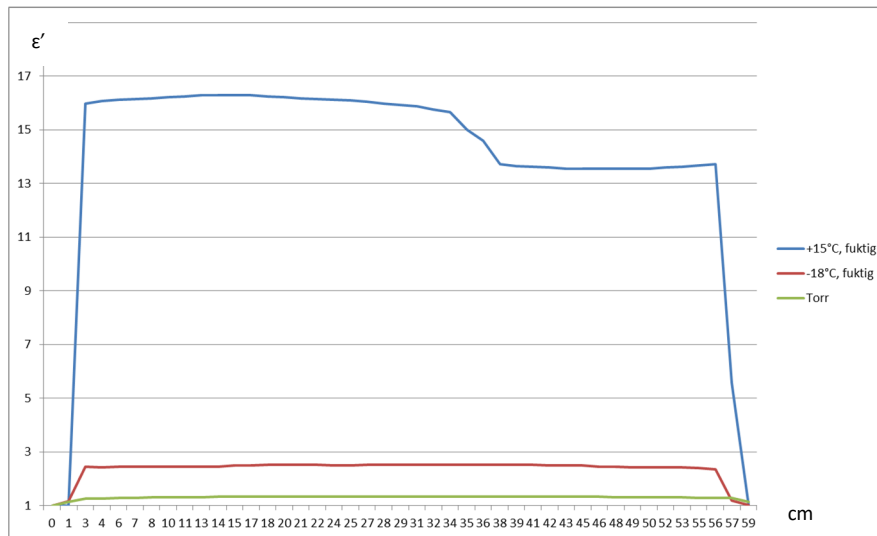
Vid mätningarna var två saker intressanta:

- Hur beter sig fruset material jämfört med tempererat?
- Skulle snöklumpen synas eller påverka mätningarna?

Mätning genomfördes genom skanning av provlådan med fryst och temperat fuktigt trädbränsle samt tempererat torrt trädbränsle (se figur 22). Det går att se att dielektricitetskonstanten varierar stort mellan fryst och tempererat trädbränsle, en faktor 4-5. Enligt figur 11 borde det frusna trädbränslet ge en dielektricitetskonstant strax under 3, vilket också har erhållits.

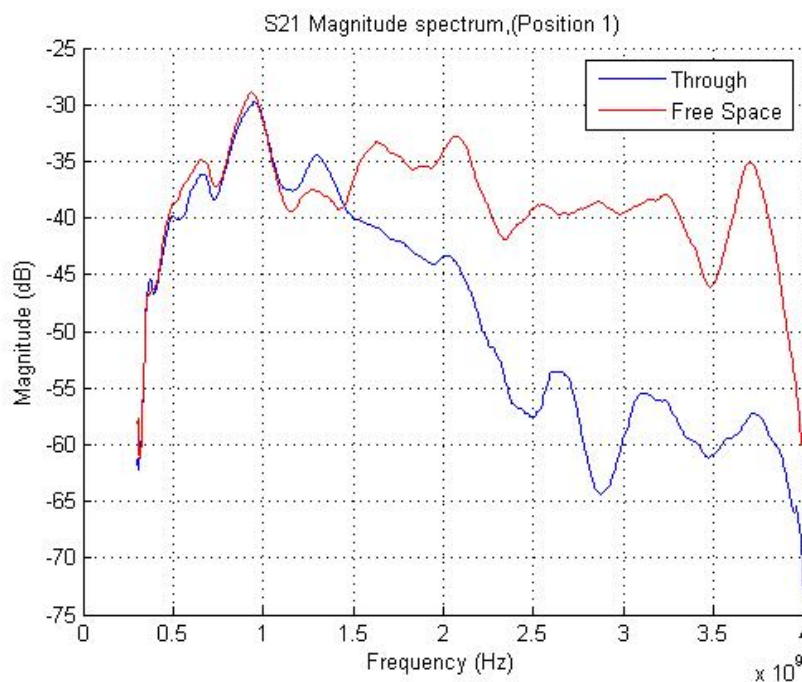


Snöklumpen är inte synlig i figur 22 i fryst tillstånd, vilket var väntat. Däremot går det att urskilja en förhöjd dielektricitetskonstant när mätningen gjordes vid +15°C, vilket beror på att fukthalten har ökat i området. Snöklumpen har helt enkelt smält.



**Figur 22.** Dielektricitetskonstanter för fuktig och torrt trädbränsle vid olika temperaturer med snöklump. X-axeln är i skannad centimeter på provlådan.

Vid sidan om skanning av provlådan så genomfördes även en mätning med nätverksanalysator av provlådan. Mätning med nätverksanalysator genomfördes först i fri luft (free space) och sedan genom provlådan (through). Skillnaden mellan "free space" och "through" ger dämpningen i dB. Mätningen genomfördes mellan 0,25 GHz och 4 GHz (figur 23). Vivaldi-antennerna användes i försöket.



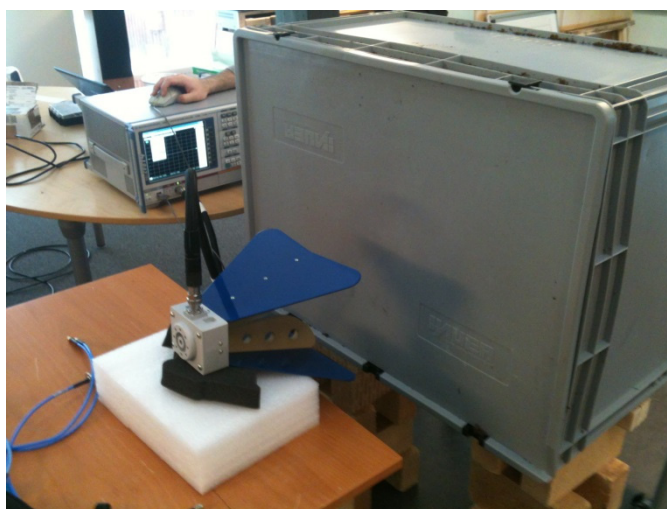
**Figur 23.** Transmissionsmätning med nätverksanalysator av provlåda med Vivaldiantenn vid -18°C.

Enligt figur 23 sker en dämpning vid frekvenser över 1 GHz. Det är värt att notera att mätningen genom materialet vid 0,5-1 GHz ger lägre dämpning än genom fri luft. Detta beror på att provlådan fungerar som en vågledare och tvingar en stor del av energin från sändaren att ta sig till mottagaren. I fri luft försvinner energin, i större mängd, åt alla håll. Därför går det inte helt att jämföra "free space" med "through", det ska naturligtvis ske en större dämpning genom materialet än genom luften. Mätdata ger dock en bra fingervisning om att frekvensområdet 0,5-1 GHz, med en mittfrekvens på 0,75 GHz, torde vara lämpligt för mätning om dämpningen ska vara låg. Det är dock oklart om denna dämpning är ett resultat av fukthalten eller trädbränslet i sig. Enligt figur 11b ska dämpningen orsakad av frusen snö eller is i princip vara noll.

## 8.2 MÄTNING +5°C

Det har funnits en misstanke om att mikrovågor med höga frekvenser har svårare att penetrera fuktigt material än låga frekvenser. Figur 10 påvisar också denna misstanke. Det är samma förhållande som när ungdomar spelar rockmusik: basen hörs väl genom väggar och tak medan diskanten lätt försvinner. Figur 10 indikerar relativt små skillnader i dämpningen mellan olika frekvenser vid +5°C.

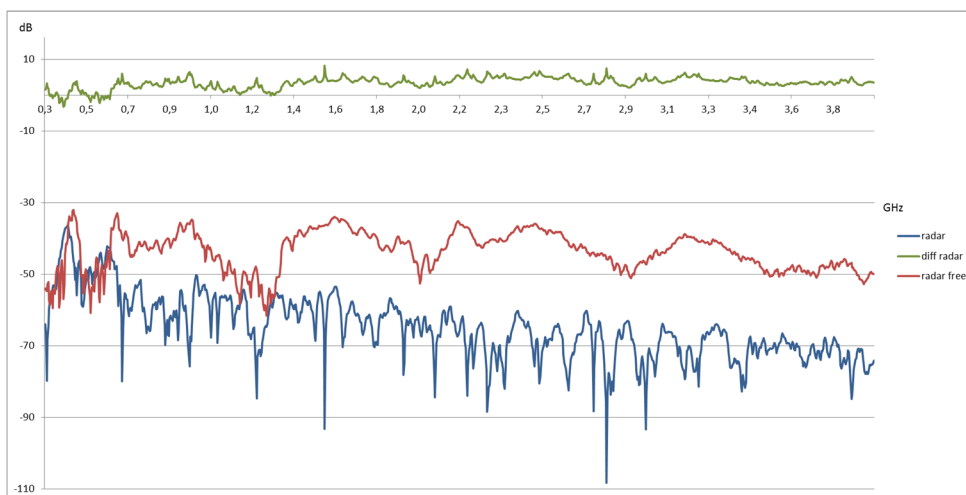
Mätning gjordes på bark, som hade en temperatur på omkring +5°C (precis hämtad från bränsleplan på Johannes). Barken lades i en provlåda om 172 liter. Horn- och Vivaldi-antennerna användes (se figur 24). Endast resultat från Vivaldiantenner presenterades eftersom endast små skillnader uppmättes.



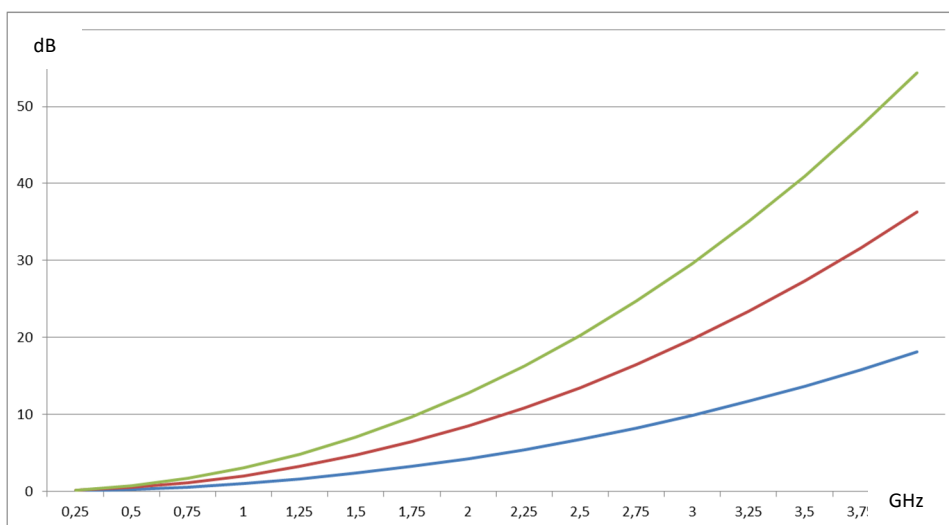
**Figur 24.** Uppställning med nätverksanalysator, provlåda och hornantenn.

Mätningen med nätverksanalysator genomfördes mellan 0,25 GHz och 4 GHz. Mätningen genomfördes först i fri luft (free space) och sedan genom provlådan (through). Skillnaden mellan "free space" och "through" ger dämpningen i dB. Det finns stora variationer i dämpningen, vilket beror på materialets egenskaper. En linjär regressionslinje har ritats ut för att få en uppfattning om den genomsnittliga dämpningen och hur den förändras över frekvensspektrumet (se figur 25). En teoretisk dämpning för +5°C solitt vatten är redovisad i figur 26. Solitt vatten är visserligen ett homogent material med hundra procent fukthalt, vilket trädbränsle aldrig har. Därför kan man inte förvänta sig exakt samma kurva, men kurvornas likhet och förändring ger en samstämmig indikation att högre frekvenser dämpar signalen i fuktigt trädbränsle. Därutöver påverkar lådans funktion som vågledare mätningen.

Dämpningen för solitt vatten är 18 dB/m. Fuktig bark (ca 60% fukthalt) hade en dämpning på ungefär 5-6 dB/0,4 m=12-15 dB/m.



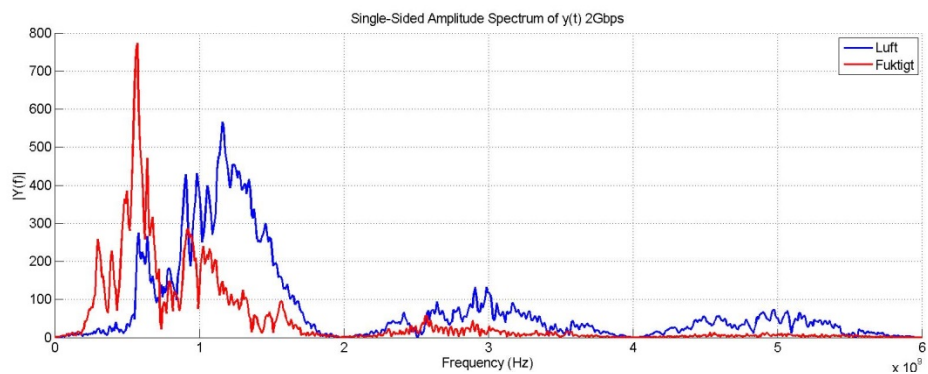
**Figur 25.** Transmissionsmätning med nätverksanalysator av provlåda med Vivaldiantenner vid +5°C.



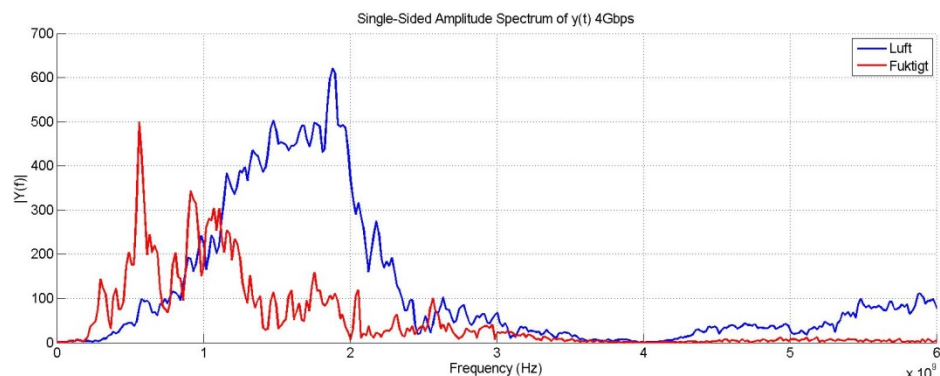
**Figur 26.** Beräknad dämpning (dB, y-axel) för 1 m (blå), 2 m (röd) och 3 m (grön) för solitt vatten för olika frekvenser (GHz, x-axel) vid +5°C.

## 9 Signalanalys och långa avstånd

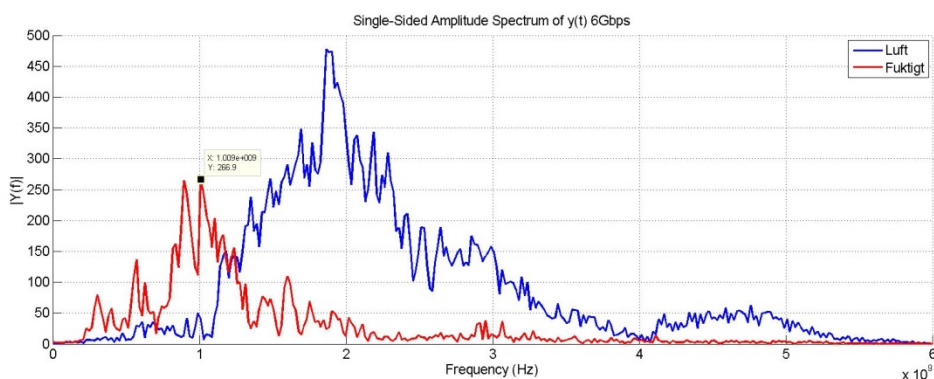
Det är en utmaning att tränga igenom fuktigt trädbränsle över långa avstånd (se figur 26). I dessa sammanhang är >2 meter ett långt avstånd. Det går, ur figur 26, att konstantera att dämpningen ökar med frekvensen. För fuktigt trädbränsle är inte ökningen lika "linjär" som för solitt vatten. Därför är det viktigt att använda en bredbandig radarsignal så att signalen förblir så robust som möjlig vid penetration. Det går dock inte att förhindra att högre frekvenser dämpas även med en bredbandig signal. I figur 27-29 går det att se hur frekvenserna för "free space"-mätningar (blå) successivt förflyttas åt höger medan "through"-mätningar ligger relativt stilla runt 0,5-1 GHz. Sändning på höga (alltför höga) frekvenser får som konsekvens att de högsta frekvenserna filtreras bort, vilket leder till vridna signaler. Sålunda, ju lägre frekvens desto lägre filtrering och robustare signaler. Vanligtvis redovisas y-axeln logaritmiskt i figur 27-29, vilket inte är gjort här. Därför är figurerna en aning missvisande. Det går dock att konstatera (från blå linje) att den befintliga antennen är som bäst anpassade runt 1,5 GHz.



Figur 27. Uppmätt dämpning vid 1 GHz.



Figur 28. Uppmätt dämpning vid 2 GHz.



Figur 29. Uppmätt dämpning vid 3 GHz.

### 9.1 MÄTNINGAR

Tre försök gjordes med stora provlådor och långa avstånd (se figur 30). I sista mätningen hade ett av Radarbolagets radarsystem modifierats för att erhålla bästa möjliga signaler och att möjliggöra mätning av dämpningen. Det är resultaten från den tredje mätningen som redovisas här. Radarsystemet hade följande egenskaper:

- Centerfrekvens: 0,75 GHz
- AD-omvandling och signalbehandling: 30 nivåer och 20 st medel, och
- Antenner och antennhus: antenner för 2 GHz och skärmade enligt figur 30.



Figur 30. Två stycken provlådor om 800 liter och 120x100 cm som användes vid mätning på långa avstånd. Två lådor blir sålunda maximalt 240 cm.

Antennerna är inte anpassade till utsänd centerfrekvens på 0,75 GHz. Trots detta fungerar befintliga antenner ganska bra, men med anpassade antenner borde mätningarna bli ännu bättre. I figur 27 (blå linje) går det att se hur frekvenser under 1 GHz dämpas i "free space". Detta är naturligtvis något som också kommer att påverka "through"-mätningar. Fyra olika avstånd mättes: 1 m, 1,2 m, 2,2 m och 2,4 m. Utmaningarna med mätning på långa avstånd är att få ett högt signal-till-brus-förhållandet (SNR) och låg dämpning. Signalstyrkan i den mottagna signalen är:

$$P_r = P_t K \left( \frac{d}{d_0} \right)^{-\gamma} \quad (24)$$

där

$d$  är avståndet till mottagare

$d_0$  är avståndet till referensmottagare (kortaste lädlängden)

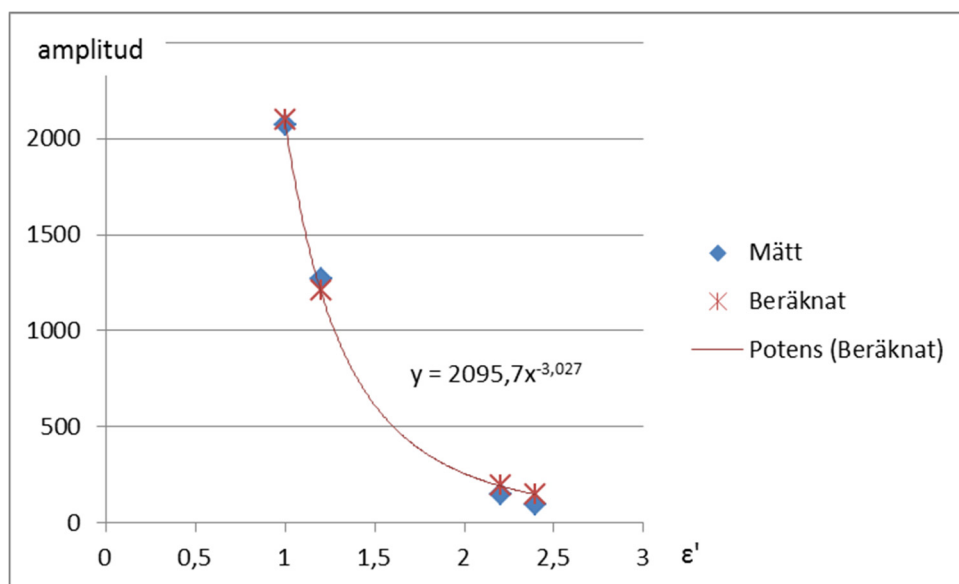
$P_t$  är utsänd effekt i  $d_0$

$P_r$  är mottagen effekt i  $d$

$K$  är en konstant

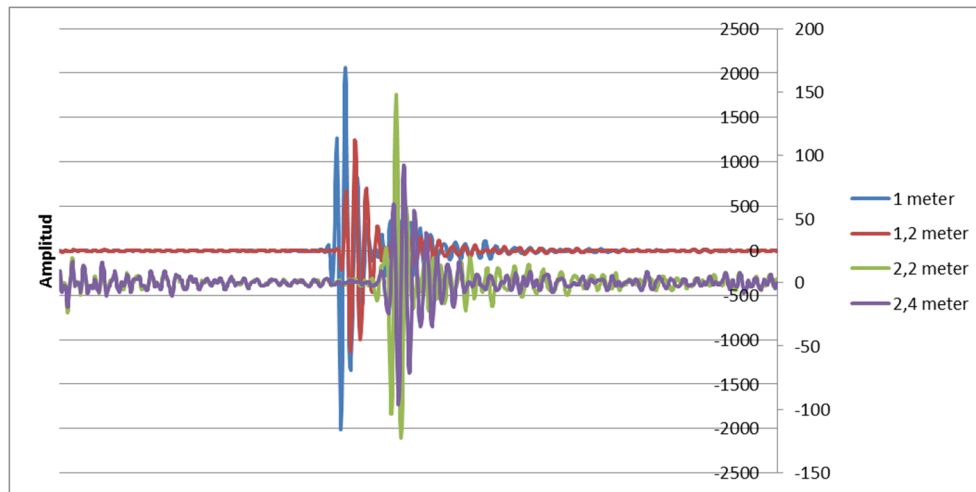
$\gamma$  är förlustexponenten, som ska beräknas.

Vanligtvis är förlustexponenten  $\gamma=2$  i fria luften ("free space"). För trädbränsle med en fukthalt runt 60 procent beräknades den till  $\gamma \approx 3$ . Ekvationen (24) är utjämnad med avseende på  $\gamma$  och  $P_t K$  (se figur 31). Den beräknade kurvan stämmer väl med mätta värden. Standardavvikelsen är 46, vilket får betraktas som lågt eftersom lådorna inte hade exakt samma innehåll. Amplituderna kan också granskas för de fyra signalerna i figur 32. Signal-till-brus-förhållandet (SNR) är förhållandesvis mycket högt och signalerna ser bra ut.



Figur 31. Uppmätta amplituder (blå) och regressionsanpassade amplituder (röd).





**Figur 32.** Signaler för de fyra längderna. Notera att korta (1-1,2 meter) och långa längder (2,2-2,4 meter) är redovisade i olika skalor.

Enligt ekvation från figur 13 och 14 erhålls fukthalten:

- Logaritmiskt:  $0,2827 \cdot \ln(8,254 - 0,35) \cdot (104,0 - 8,254) = 56,0\%$
- Andragradspolynom:  $-0,5688 + 0,6234 \cdot 2,87 - 0,0793 \cdot 2,87^2 = 56,6\%$
- Tredjegradsolynom:  $-15,2 + 17,6 \cdot 8,254 - 1,37 \cdot 8,254^2 + 0,038 \cdot 8,254^3 = 57,5\%$

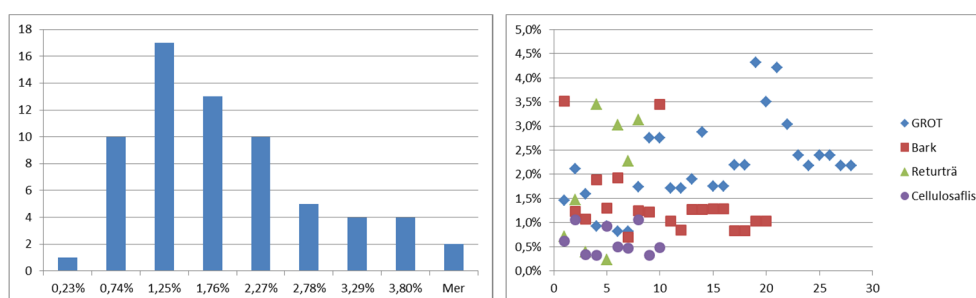
Uppmätt värde från stickprov (endast taget från en av provlådorna) genom torkning är 54,4%. Resultatet får betraktas som mycket bra, särskilt med tanke på (även om dessa saker inte borde ha någon egentlig betydelse förutom frekvensen):

- att olika frekvenser har använts vid bestämning av formlerna och vid långmätningen
- att stickprovet kanske inte var helt representativt för båda provlådorna, och
- att olika radarsystem har använts (annan AD-omvandling).

## 10 Statistisk analys

Korrekta och noggranna referensmätningar och statistiska urval är viktigt för att erhålla jämförande mätningar. Torkning av trädbränsle ger i sig hög noggrannhet vid bestämning av fukthalt, under förutsättning att materialet torkas fullständigt vid  $+103 \pm 2^\circ\text{C}$  och inte återfuktas. Enligt SIS-CEN/TS 15414-1:2008 (E) är inte nuvarande referensmätning en standardiserade mätmetod, vilket också innebär att metoden inte heller följer de lagkrav som kom 2014 (se nedan). Det är i princip omöjligt att välja ut exakt det trädbränsle som ligger framför antennerna från en radarmätning. Trädbränsle torde alltid vara stokastiskt fördelat i en stor behållare (exempelvis provlåda eller lastbil), vilket därigenom torde ge ett bra medelvärde på fukthalten.

Medelstandardavvikelsen för alla stickprov genomförda för 52 provlådor är 1,66 procentenheter (p.e.). Minsta värdet är 0,23 p.e. och högsta är 4,31 p.e. (se fördelning i figur 33a-b). Det går att konstatera att standardavvikelsen är lägst för cellulosafelis medan GROT har de största avvikelserna. Det finns lika många stora avvikelser för fukthalten 40% som 60%, därför går det inte att hänföra avvikelser till någon direkt fukthalt. Avvikelser handlar snarare om materialets beskaffenhet och dess inhomogenitet.



**Figur 33.** a) Histogrammet visar fördelning standardavvikelser för 52 provlådor utslaget på cirka 1500 mätningar. b) Fördelning av standardavvikelser för respektive trädbränsle.

Lagkrav (SFS 2014a-b) och föreskrifter (SKSFS 2014) säger att virkespartiets torrsvikt inte får avvika mer än 9% för partier >50 ton, 13,5% för partier 25-50 ton och 18% för partier <25 ton. Det står inte uttryckligen vilken sigma-nivå som åberopas, men låt oss anta att det är  $3\sigma$ -sigmanivån (99,73% av alla mätningar ska vara inom angiven noggrannhet). Då är  $\sigma=3\%$ ,  $4,5\%$  och  $6\%$  (procent, och inte procentenheter), vilket innebär att felet får vara högst 3% fel för partier >50 ton, oavsett fukthalt. Det leder till att avvikelserna i procent ökar med fukthalten om procentenheter är konstant (se tabell 6). 3 procentenheters avvikelse innebär 11,1% fel för trädbränsle med 30% torrhalt (70% fukthalt). De flesta mätmetoder, exempelvis nuvarande torkning, blir inte noggrannare ju fuktigare trädbränslet blir, därför torde lagen vara svår att uppnå om procent avses och inte procentenheter. Enligt tabell 6 är det svårt att uppnå lagkrav med befintliga metoder (torkning) och även med presenterad radarmetod för trädbränslen om avvikelserna är 3 procentenheter. Vid en avvikelse på 2 procentenheter uppnås dock lagkrav för trädbränslen med fukthalter under 65% (torrhalt över 35%).



Torrhalt	Råvikt i ton	Procent-enheter fel	Torrsvikt i ton	Avvikelse i ton	Avvikelse i procent	Lagrkrav
100%	50	3	50	1,5	3,1%	4,5%
90%	50	3	45	1,5	3,4%	4,5%
80%	50	3	40	1,5	3,9%	4,5%
70%	50	3	35	1,5	4,5%	4,5%
60%	50	3	30	1,5	5,3%	4,5%
50%	50	3	25	1,5	6,4%	4,5%
40%	50	3	20	1,5	8,1%	6%
30%	50	3	15	1,5	11,1%	6%
20%	50	3	10	1,5	17,6%	6%
10%	50	3	5	1,5	42,9%	6%

**Tabell 6.** Procent avvikelse ökar för högre fukthalt/lägre torrhalt trots att avvikelsen i procentenheter på råvikt är konstant. 50 ton är en rimlig vikt för lastbil och släp med 100 kubikmeter trädbränsle.

Om ett statistiskt säkerställt urval ska erhållas från en lastbil med 100 kubikmeter trädbränsle ska, enligt ekvationerna 15 och 16, antalet stickprov göras enligt tabell 7 (en viss passus måste tas för bestämningen av  $s$ , som med all sannolikhet är lägre för en liten provlåda än för en hel lastbil). I dagsläget tas 6 stickprov vid avlastning på Johannes bränsleplan. Enligt (SDC 2014) ska 6 stickprov tas för att ha ett säkerställt statistiskt urval.

Enligt våra beräkningar räcker antalet stickprov som tas idag (om motsvarande  $s$  även gäller för lastbilar). Det finns dock skillnader om man tar hänsyn till medelstandardavvikelsen för alla trädbränslen eller för ett enskilt bränsle. För att uppnå  $3\sigma$ -nivån för medelbränslet (1,66 procentenheter) krävs 3 prov och för GROT (2,17 procentenheter) krävs 5 prov. Men låt oss säga att en leverantör av någon anledning alltid har en ojämn fördelning i sitt trädbränsle, exempelvis  $s=3$  procentenheter. Då krävs 9 stickprov för att ha ett säkerställt statistiskt urval. Standardavvikelsen för cellulosafällis är dock så låg som 0,61 procentenheter (p.e.), vilket kräver 1 stickprov.

Konfidensintervall	Sigma-nivå, $\alpha$	Stdev, $s=0,61$ p.e.	Stdev, $s=1,66$ p.e.	Stdev, $s=2,17$ p.e.	Stdev, $s=3$ p.e.
95%	1,96	1	1	2	4
95,45%	2	1	1	2	4
99%	2,58	1	2	3	7
99,73%	3	1	3	5	9

**Tabell 7.** Antal stickprov som krävs för att uppnå efterfrågad noggrannhet vid olika sigma-nivåer och för en lastbil om 100 kubikmeter. Efterfrågad noggrannhet är  $\sigma=3$  procentenheter.

## 11 Slutsatser

Projektet hade från början en hypotes att göra temperaturberäkning utifrån mätning av den så kallade dielektricitetskonstanten. Idéerna baserade sig på ett tidigare test och mätningar på temperat trädbränsle (>0°C). Projektet hade också som ansats att använda befintligt radarsystem, som till viss del skulle förändras med avseende på frekvens (lägre). Projektmålen var att mätmetoden skulle:

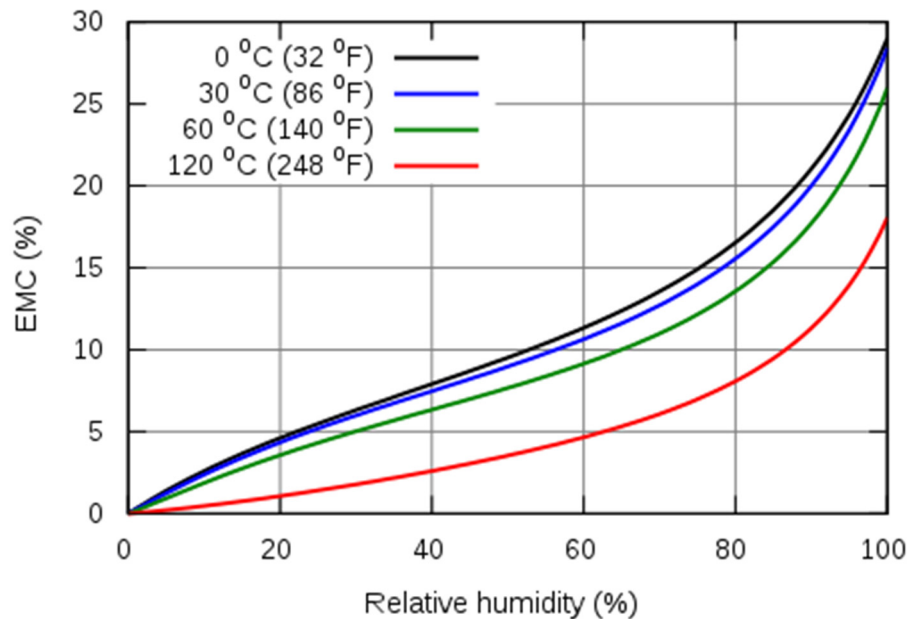
- vara ofarlig, oförstörande och beröringsfri
- fungera utomhus och kunna mäta genom en lastbil fylld med trädbränsle (långa avstånd),
- bestämma trädbränslets fukthalt med 2-3 procentenheters noggrannhet.

Därutöver skulle projektet testa vad som händer om trädbränslet är djupfryst och om det finns is/snöklumpar i materialet.

### 11.1 MATERIAL OCH REFERENSMÄTNING

En förutsättning för projektet var att göra tillförlitliga och noggranna referensmätningar. Provlådorna har fungerat mycket bra. Ansatsen i projektet var att genomföra stora mängder med mätningar vid Johannes värmekraftverk. Ursprungstanken var att genomföra referensmätning och torka allt trädbränsle utan stickprov. Det visade sig dock helt ogörligt att med hög kvalitet torka stora mängder trädbränsle (lådor om 172 och 800 liter). Det tog nästan två kalenderveckor att hämta trädbränsle, mäta det med radar, frakta tillbaka det och sedan torrtorka det i torkskåp. Allt arbete utfördes under högsäsong (höst-vinter-vår). Under vissa dagar anlände ett tjugotal flisbilar, vilkas stickprov prioriterades före projektets. Därför köptes mindre provlådor in och stickprov användes för att skynda på mätningarna. Dessa mätningar var av lika hög kvalitet som referensmätningen på 88 literslådorna. Det genomfördes många referensmätningar (cirka 60 lådor och 1 500 liter trädbränsle undersöktes), men projektet hade nått ännu längre om flera mindre lådor hade undersökts. Det är viktigt att undersöka trädbränsle under högsäsongen eftersom ytlagret på bränslet under sommaren torkar snabbt. Därför kan inte mätningar göras under lågsäsong (sommaren).

Referensmätning genom torkning är en tveksam metod (se SIS-CEN/TS 15414-1:2008 (E)) eftersom det torkade trädbränslet inställer sig till den relativa fukthalt som finns i omgivande luft vid respektive torkningstillfälle. Detta måste tas hänsyn till vid ytterligare mätningar, i exempelvis ett kommande projekt. Den relativa fuktigheten i omgivande luft kan utan vidare variera 50 procentenheter över ett dygn. Den så kallade jämnviktsfuktigheten (EMC) i trä kan beräknas med Hailwood-Horrobin-ekvationen enligt figur 34 (EMC 2015). Ur figuren går det att konstatera att vid höga temperaturer (120°C) så minskar EMC, men under ogynnsamma omständigheter (hög relativ luftfuktighet) kan EMC uppgå till 10-15%, vilket sålunda är den fukthalt som är kvar i trädbränslet.



**Figur 34.** Jämviktsfuktighet i trä i relation till temperatur och relativ luftfuktighet (EMC 2015)

### 11.2 DÄMPNING, YTTERLIGARE EN METOD

Under projektets gång har radarsystemet fått nya egenskaper, som inte var inplanerade vid projektstarten. En AD-omvandlare har implementerats och gett möjlighet att mäta dämpningen. Dämpning är en metod som kan användas jämte uppmätning av dielektricitetskonstanten för undersökning av materialegenskaperna. I projektet har framför allt sambandet mellan dielektricitetskonstanten och fukthalten undersökts. Radarbolaget har dock nu ytterligare en metod till förfogande för bestämning av fukthalten i trädbränsle. Detta torde innebära att fukthalten borde kunna bestämmas noggrannare.

### 11.3 FREKVENNS

Projektet hade redan i planen tagit höjd för frekvensändringar. Radarbolagets radarsystem opererar vanligtvis med en centerfrekvens på 2 GHz, en frekvens som passar bra för stålindustrin där företaget normalt använder sin utrustning. Frekvensanalys gjordes inledningsvis med en nätverksanalysator, men kunde även kompletteras med dämpningsmätning från radarsystemet, när det erhöll denna funktionalitet under projektets gång. Mätningarna visar på att en centerfrekvens på ungefär 0,75 GHz är att föredra vid mätning på fuktigt tempererat trädbränsle (>0°C). Med rätt utformad antenn ska då radarsystemet operera inom frekvensintervallet 0,375 GHz och 1,125 GHz. Det är alltid en balansgång att hitta en lämplig frekvens. Vald frekvens:

- gör det lättare att penetrera fuktigt trädbränsle med en robust signal
- påverkas fortfarande av fuktighet och vatten så att dielektricitetskonstanten och dämpningen kan mätas med hög upplösning, och
- påverkas mer av fruset material vid höga frekvenser.

#### 11.4 STICKPROV OCH MEDELVÄRDE

En stor nackdel med befintliga metoder är att de bygger på stickprov. Det medför att fukthalten för heterogent material bestäms med låg noggrannhet, exempelvis GROT. För att erhålla högre noggrannhet måste fler oberoende stickprov tas. Det är görbart att öka antalet stickprov från 6 till 8 enligt tabell 5. Statistiskt urval och stickprov är dock bara statistik i slutändan, vilket leder till att vissa mätningar faller utanför normalfördelningen. VMF och SDC har valt ett konfidensintervall på 99% som en lämplig nivå. Detta leder till att 1% av alla mätningar faller utanför fastställda lagkrav på  $\sigma=3\%$ . Är detta acceptabelt? Den föreslagna metoden med radarmätningar bygger på ett medelvärde för fukthalt över hela mätavståndet. Det innebär att ju längre mätavstånd som används desto högre torde noggrannheten vara. Görs mätningar dessutom på flera mätpunkter så erhålls ett ännu mer representativt medelvärde för trädbränslet på flisbilen. Detta är dessutom görbart eftersom radarmätningar kan göras mycket snabbt. En mätning kan göras inom 50-100 ms, vilket motsvarar 10-20 mätningar i sekunden.

#### 11.5 FRUSET MATERIAL OCH SNÖKLUMPAR

Snöklumpar kan dyka upp i leveranser, men de torde alltid vara stokastiskt fördelade i flisbilen. Det ligger knappast 1x1x2,4 meter snö eller is mellan mottagare och sändare. Därför torde det inte vara något problem att erhålla en hög noggrannhet i bestämningen av fukthalten vid förekomst av snö och is.

Fruset trädbränsle visade sig dock vara en större utmaning än förväntat. Enligt figur 11 ska det inte finnas något frekvensberoende vid mätning på is och snö. Mätningarna i olika frekvenser (2 och 0,75 GHz) visar dock på skillnader (figur 18), vilket troligtvis beror på träets egen densitet. Det är oklart om låga (0,75 GHz) eller höga (2 GHz) frekvenser är att föredra vid mätning på fruset material.

Dielektricitetskonstanten och dämpningen är mycket lägre (4-5 gånger) för fryst material och snöklumpar än för temperat fuktigt trädbränsle ( $>0^{\circ}\text{C}$ ). Det innebär att temperaturen måste mätas och modelleras för att erhålla rätt fukthalt vid frystemperaturer. Mätupplösningen i fukthaltsmätning minskar dock som en konsekvens av att dielektricitetskonstanten är lägre för fryst material. Enligt figur 11a ska dielektricitetskonstanten variera från 1,5 till 2,5 för torr snö, vilket applicerat på trädbränsle blir ungefär 2,65 till 3,65. Mätning på långa avstånd (bredden av en flisbil) torde öka upplösningen och noggrannheten. I princip ska det dubbla avståndet ge dubbel upplösning och noggrannhet. Mätningar på fryst trädbränsle gjordes på en provlåda om 30 cm, vilket innebär cirka 8 gånger högre potentiell noggrannhet på verklig flisbil (240 cm). Även kompletterande modellering av dämpning och densitet torde kunna öka möjligheten till rätt fukthaltsbestämning.

#### 11.6 NOGGRANNHET

Noggrannheten för modellering av trädbränsle kan göras med  $\sigma=3$  procentenheter. Målet med projektet har därigenom uppnåtts. Denna noggrannhet torde kunna bli ännu högre om:

- Referensmätning görs på bättre sätt (hänsyn måste tas till luftens relativa fukthalt och hur den påverkar fukthalten i trädbränsle)
- Mätningen görs på långa avstånd (ökar noggrannheten)

- Ytterligare kalibreringsmätningar görs
- Separat modellering av respektive trädbränsle görs
- Debyes relaxationsformel kan formuleras och modelleras för fuktigt trädbränsle
- Dämpningen mäts och inkluderas i bestämningen av fukthalten
- Temperaturen kan mätas och modelleras utifrån dielektricitetskonstant och dämpning, och
- Densiteten kan mätas och modelleras utifrån dielektricitetskonstant och dämpning.

Därutöver ska det också noteras att höga askhalter (salter) eventuellt kan påverka mätningarna och noggrannheten. Det är dock tveksamt om det går att göra något åt variationer av askhalter.

#### 11.7 HUR NÄRA MÅLET?

Det övergripande målet var att kunna mäta trädbränslets fukthalt direkt på en lastbil med 2-3 procentenheters noggrannhet, vilket har uppnåtts av projektet. Gällande lagkrav stipulerar dock högre noggrannhet. För att nå dessa lagkrav krävs en noggrannhet som är 1 procentenhet högre, vilket borde vara möjligt enligt ovan angivna åtgärds punkter. Mätningar av dielektricitetskonstanten ger fukthalten även för fruset material (vilket inte dämpningsmätningar gör), men bestämning av fukthalten med den noggrannhet som lagkraven stipulerar är en utmaning. Avancerad datamining och datamodellering är en möjlig utväg för att nå hög noggrannhet för fruset trädbränsle. Långa mätningar (hela lastbilens bredd) fungerar bra och kommer dessutom att öka noggrannheten i mätningarna.

## 12 Diskussion och framtid

### 12.1 ANNAT VETENSKAPLIGT ARBETE

Det finns en del vetenskapligt arbete gjort inom vatten, is, snö, salt och mat. Arbetet är främst gjort för undersökning av vatten från satelliter eller för upphettning av mat i mikrovågsugnar. Det lilla arbete som är gjort med koppling mot trädbränsle och radar/radio har en koppling mot dämpningsmätning och frekvenssvepning. Jenny Nyström (Nyström 2006) är en av få som grundligt undersökt vatten, fukthalt och trädbränsle. Hennes resultat är i stort överensstämmande med Radarbolagets projektresultat även om metoderna inte är helt överensstämmande. Hon använder en nätverksanalysator och reflekterande mätning i en behållare för bestämning av dielektricitetskonstanten. Radarbolaget valde transmissionsmätning på provlådor för att efterlikna tilltänkta direktmätningar på flisbilar. Nyström har visat att det är möjligt att nå en noggrannhet på 2,7 procentenheter och Radarbolaget 3 procentenheter, vilket är relativt jämförbara.

Den stora utmaningen är dock att mätningen måste fungera implementationsmässigt på ett värmeverk, vilket Nyström har aktualiserat. Detta har varit Radarbolagets fokus under hela projektet. Det enda motstridiga mellan Nyströms undersökning och Radarbolagets är Nyströms resultat vid mätningar på material med olika temperatur. Hon nämner att temperaturen och densiteten påverkas av radiovågor, vilket är alldeles riktigt, men trots detta så påverkades hennes mätningar inte av temperaturen. Efter ett telefonsamtal med Jenny visade det sig att hon inte hade fokus på fryst material och hon gjorde inte därför ingående analyser på området. Hon har mätt på fryst material lite slumpmässigt när det levererades, men det är gjort i en liten provkammare (varför materialet kan ha tinat), med lägre frekvenser och med reflekterande mätningar.

Radarbolaget har dock tydligt påvisat att temperaturen påverkar dielektricitetskonstanten och dämpningen. Detta måste definitivt beaktas eftersom en stor mängd trädbränsle levereras i fryst form under vintertid. Radarbolaget har tagit Nyströms arbete vidare och hanterat en del oklarheter men också behandlat implementeringsfrågor och de utmaningar som är kopplade till just detta (långa avstånd, mätning direkt på flisbilar, fryst material och snöklumpar).

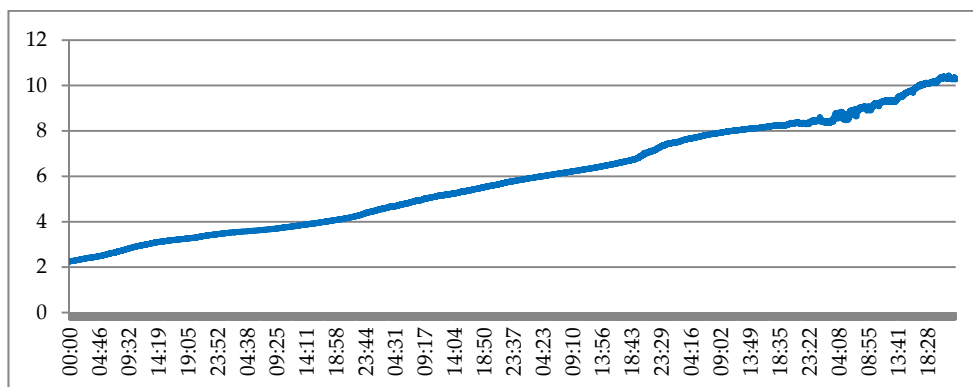
### 12.2 TEMPERATURBEROENDE OCH NOLLGRADIGT

I en fortsättning av Nyströms arbete har Ana Paz (Paz 2010) gjort vidare granskningar kring dielektriska egenskaper i biobränsle. Även här anges att mätningar med mikrovågor på biobränsle är temperaturberoende, vilket visas genom mätningar på jordnötsskal som varierar mellan  $-20^{\circ}\text{C}$  och  $+40^{\circ}\text{C}$ . Fukthalten varierar dock 4-13%, vilket inte är helt representativt för trädbränsle, som varierar 30-70%. Enligt Paz anses fryspunkten i fibrer ligga på  $-20^{\circ}\text{C}$ , vilket förklaras med att bundet vatten kräver lägre temperaturer för att frysa. Enligt experter på träd och fukt så finns vatten i både bunden och fri form (Skaar 1988), så slutsatsen kan möjligtvis gälla för det bundna vattnet men knappast för det fria vattnet. Det är lite gjort inom detta område. Från det arbete som Radarbolaget har gjort går det att konstatera att särskild hänsyn måste tas till fruset material. Effekterna kring bundet vatten, som Paz hänvisar till, har inte kunnat mätas eller bekräftas.

Rent teoretiskt skulle en frekvens på 1-2 kHz vara lämpligt för att mäta genom is och snö, men då skulle mycket stora antenner krävas (flera meter stora), vilket inte är praktiskt genomförbart. Projektet hade inte till uppgift att ta fram sambanden för fryst trädbränsle utan endast undersöka eventuella utmaningar. Är det överhuvudtaget möjligt att bestämma fukthalten i fryst trädbränsle? Detta projekt har visat på möjligheterna att kunna bestämma fukthalten för fryst trädbränsle. Det är utmanande, men de möjligheter som borde studeras vidare är:

- Bestämning av dielektricitetskonstanten för fryst fritt vatten (>30% fukthalt)
- Bestämning av dielektricitetskonstanten för bundet vatten ned till -20°C (<30% fukthalt), och
- Förlustfaktorn och dess koppling till densitet torrt trädbränsle (mätning av vikt och volym krävs).

Nollgradigt trädbränsle har troligtvis en kombination av flytande och fruset fritt, vilket kan orsaka stora utmaningar vid bestämning av fukthalt. Därför måste nollgradigt trädbränsle undersökas särskilt. I figur 35 redovisas radarmätning på trädbränsle som tinas upp från -20°C till +22°C. Den visar tydligt hur delar av bränslet övergår i flytande form med andra delar fortfarande är fruset. Hade fasomvandlingen vid noll grader skett momentant så hade det föranlett ett skarpt hopp i dielektricitetskonstanten, men så är inte fallet.



**Figur 35.** Dielektricitetskonstant för trädbränsle som tinas upp från -20°C till +22°C

### 12.3 FRAMTIDA MÅLBILD

Projektet har haft som mål att ta fram sambandet mellan dielektricitetskonstanten och fukthalten för tempererat trädbränsle. Det har framkommit att temperatur och densitet måste mätas och inkluderas i modeller för att bestämma fukthalten med hög noggrannhet. I dagsläget mäts trädbränslets vikt med fordonsvåg (före och efter avlastning). Det skulle vara enkelt att kräva att flisbilarna rullar av presenningen längst upp på flaket. Det kan göras inifrån förarhytten (se figur 36a). Därefter kan temperaturen mätas beröringsfritt med IR-mätare samtidigt som radarsystemet mäter höjd, bredd, dielektricitetskonstant och dämpning (se figur 36b). Data mining (analys av mycket data) som kan göras är:

- Höjd och bredd ger volym

- Volym och vikt ger densitet samt indikation om fukthalt, vilket förenklar beslutsanalysen om det mot förmodan finns kvarvarande problem med fryst material
- Breddmätning förbättrar bestämning av dielektricitetskonstant och dämpning, och
- Mätning av dielektricitetskonstant och dämpning på olika höjder och i sidled ger bättre medelvärde på fukthalt och bestämning av densitet.

Mätning av dielektricitetskonstant och dämpning på olika höjder och i sidled ger bättre medelvärde på fukthalt och bestämning av densitet.



**Figur 36.** a) Avrullad presenning för Eksjövaggen. b) Målbild för mätning och data mining

#### 12.4 EFFEKTMÅL

Projektet har ju varit en förstudie, vilket innebär att effektmål inte helt och hållet kan mätas då tekniken inte är implementerad på någon anläggning. Det har dock gjorts beräkningar av Gävle Energi och BillerudKorsnäs på vad en anläggning på 145 GWh torde kunna göra för besparingar om direkt, snabb och tillförlitlig mätning görs av fukthalten i ankommande trädbränsle. Den totala besparingen har beräknats till 2-4 Mkr/år. Besparingen görs genom att:

- Mäta snabbt och bestämma i vilken bränslehög trädbränslet ska lastas på (torrt, medium och vått)
- Känd fuktighet skapar bra blandning i dygnssilo för jämnare fukthalt i tillflödande trädbränsle, vilket ger bättre förbränning i värmeverket
- Mäta noggrant så att rätt debitering kan ske
- Mäta mer automatiskt så att mindre med personal behövs vid mätstationen och torkningen
- Undvika självantändning då torrt och fuktigt material blandas vid långtidslagring
- Ha bättre koll på lagersaldo för att undvika att man enbart har fuktigt trädbränsle, vilket kan leda till ogynnsamma kompletteringsköp av torrflis. I förbränningen vill man att tillflödande trädbränsle har jämn fukthalt över tiden (se punkt 2 ovan), och
- Ha bättre logistik och effektivare hantering av bränsle på bränsleplan.



## 12.5 FÖRSLAG PÅ FRAMTIDA PROJEKT

Detta projekt var en förstudie med syfte att identifiera möjligheter, utmaningar och "show stoppers" med koppling till oförstörande mätning av trädbränsle med radar. Projektet har inte funnit några "show stoppers". Den stora utmaningen ligger i att kunna modellera fukthalten för trädbränsle vid olika temperaturer, särskilt vid frysgrader. Detta projekt har löpt parallellt med andra projekt och vidareutvecklingen av Radarbolagets radarsystem. Därför har oförstörande mätning av trädbränsle med radar erbjudits möjligheten att komplettera mätningar av dielektricitetskonstanten med mätning av dämpningen och med ett system med högre dynamik, vilket förbättrar radarsignaler och ger högre noggrannhet.

Inblandade projektparter föreslår med givna resultat att ett prototypprojekt planeras och genomförs. Under projekttiden har en ny lag om virkesmätning trätt i kraft. Om noggrannheten kan förbättras med 1 procentenhet så torde radar kunna användas för att matcha de krav som den nya lagen stipulerar, med viss passus för fruset trädbränsle. Därför skulle ett framtida radio- och radarbaserat mätsystem kunna användas, utöver bättre logistik och förbränning, som en del i ett debiteringssystem för att säkerställa rätt betalning.

Prototypprojektets effektmål skulle kunna bidra till ökad verkningsgrad i trädbränsleeldade pannor med 0,2-0,3 % genom tillförlitlig fuktighetsbestämning av trädbränslet samt bidra till effektivare logistik och bränslehantering. Projektet skulle syfta till att utveckla en prototyp för snabb och noggrann bestämning av fukthalten i fast trädbränsle (träflis och bark). Målen med projektet skulle vara att mätmetoden:

- är ofarlig, oförstörande och beröringsfri
- fungerar utomhus och kunna mäta genom en lastbil fylld med trädbränsle
- bestämmer trädbränslets fukthalt med <2 procentenheters noggrannhet, och
- fungerar på trädbränsle från -10°C till +50°C.

Projekt kan brytas ned i följande projektdelar:

- Säkerställa en referensmetod som ger tillförlitliga referensmätvärden
- Vidareutveckla modell och genomföra kompletterande mätningar inklusive dämpningsmätningar med trädbränsle för fruset material samt olika temperaturer och densiteter
- Konstruera och tillverka en mätanordning som mäter dielektricitetskonstanten, dämpningen, volymen och temperaturen i verklig miljö
- Koppla ihop mätdata (vikt, temperatur, dielektricitetskonstant, dämpning, trädbränslesort, volym m.m.), beräkna och lagra data
- Genomföra verkliga tester på flisbilar, dataanalys och förbättringar, och
- Projektledning, projektarbete, slutrapport och rapportering.

## 13 Referenser

Agilent, 2014. Basics of Measuring Dielectric Properties of Materials. Application Note. Agilent Technologies, USA.

Berry S. and Roderick M. 2005. Plant-water relations and the fibre saturation point. *New Phytologist*, 168(1):25–37.

Brodie G. et al. 2014. Dielectric Properties of Sewage Biosolids: Measurement and Modeling

Chaplin M. 2015. Water and microwaves  
([http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave\\_water.html](http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html))

Cumming, E. 1952. The dielectric properties of ice and snow at 3.2 cm. *Journal of Applied Physics*, vol. 23, 768–773

Duarte da Paz A.M.M., 2008. Water Content Measurement in Woody Biomass using Dielectric Constant at Radio Frequencies

EMC 2015. [https://en.wikipedia.org/wiki/Equilibrium\\_moisture\\_content](https://en.wikipedia.org/wiki/Equilibrium_moisture_content)

Hallikainen M., Ulaby F., Abdelrazik M. 1986. Dielectric measurement and modeling of snow in the 3- to 37-GHz range. *Antennas and propagation, IEEE* vol. 34(11):1329-1340

Kaatze U. 1997. The dielectric properties of water in its different states of interaction. *Journal of Solution Chemistry*, 26(11):1049–1112

Komarov V. et al. 2005. Permittivity and Measurement

Meissner T. and Wentz F. J., 2004. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing* 42 1836-1849.

Metaxas A.C. and Meredith R.J. 1983. *Industrial Microwave Heating*, Peter Peregrinus, London.

Nyfors E. and Vainikainen P., 1994. *Industrial Microwave Sensors*. Artech House

Nyström J., 2006. *Rapid Measurement of the Moisture Content of Biofuel*. Mälardalen University.

Paz A. M. 2010. *The Dielectric Properties of Solid Biofuels*. Mälardalen University.

Randall K.S. et al., 2010. Physical, dielectric, and C band microwave scattering properties of first-year sea ice during advanced melt. *Journal of Geophysical Research*, vol. 115

Reeb J.E. 2009. *Wood and Moisture Relationships*

SDC, 2014. *Mätning av trädbränslen*

Skaar C. 1988. *Wood-Water Relations*

SFS 2014a. *Lag om virkesmätning*. SFS 2014:1005

SFS 2014b. *Förordning om virkesmätning*. SFS 2014:1006

SKSFS 2014. Skogsstyrelsens föreskrifter om virkesmätning. SKSFS 2014:11

Stiles W.H. and Ulaby F.T. 1981. Dielectric Properties of Snow. Remote Sensing Laboratory Tech. Rep 527-1, University of Kansas Center of Research.

Topp G.C, Davis J.L, and Annan A.P. 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. Water Resources Research, Vol. 16. No. 3. pp. 574-582.

Venkatesh M.S. and Raghavan G.S.V., 2005. An overview of dielectric properties measuring techniques. Canadian Biosystems Engineering/Le génie des biosystèmes au Canada 47:7.15-7.30.

Vollmer M., 2004. Physics of the microwave oven.

Wood database, 2015. <http://www.wood-database.com/wood-articles/wood-and-moisture/>

Zelinka S., Lambrecht M., Glass S., Wiedenhoef A., Yelle D., 2011. Examination of water phase transitions in Loblolly pine and cell wall components by differential scanning calorimetry. Thermochemica Acta.

# SNABB FUKTHALTSMÄTNING AV TRÄDBRÄNSLE MED RADARTEKNIK

Det är viktigt att känna till fukthalten på ett trädbränsle både för prissättning och för att det ska bli rätt blandning vid förbränning. De metoder som används i dag bygger på att stickprov tas, vilket är tidsödande och kan ge dålig noggrannhet i bestämningen av fukthalt.

Radio- och radarmätteknik däremot är en beröringsfri, oförstörande och ofarlig mätmetod som kan användas för direkt medelvärdesmätning på lastbilar som kommer in till ett kraftvärmeverk. Mätningen kan göras igenom de lastbilar som har glasfibersidor eller reflekterande mot de lastbilar som har stålbottnen.

Vinsten med direkt mätning är att trädbränslet kan sorteras efter fukthalt, vilket leder till bättre logistik, rätt debitering och mer optimerad förbränning. Dessutom minskar risken för självantändning i högar av trädbränsle.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)