

Effektivare fukthaltsmätning av trädbränsle med radar teknik

More efficient measurement of moisture content in wood fuel using radar technology



Summary

There are 580 district heating networks and 125 major biofuel plants in Sweden, and approximately 50 pulp and paper mills. The raw material, wood fuel, is of four types: recycled wood, logging residues (branches and tops), bark, and stemwood. It is important to determine moisture content quickly and reliably in the delivery process to ensure correct payment, improved logistics, better monitoring and control of wood chip purchases, as well as faster and easier measurement for the driver.

The composite dielectric model (CDM) is a physical model for calculating the quantities of bound water, free water, wood, and air in wood chips. The model has been developed from hundreds of measurements on bark in test boxes, and it shows an accuracy of $\sigma=2.1$ percentage points. During normal loading of wood chips, temperature and density do not have major impact on the model. Modelling of different assortments should improve accuracy, but a general model for recycled wood, logging residues, bark, and stemwood would also work well, but with lower accuracy.

Loaded wood chips in test boxes and trucks are normally birefringent and anisotropic (i.e. they have different characteristics in vertical and horizontal directions) with different dielectric properties along the two principal axes. The vertical radio signal is larger and cleaner, and is preferred when measuring on trucks with wood chips. Measurements made in horizontal and vertical polarization can be converted.

The biggest source of error in reference measurements on test boxes and trucks is the current sampling process. To improve reliability, sampling must be done in large numbers (25-30 pcs on truck), and must be random and well distributed. In control measurement of wood chips on three trucks with bark, moisture content was determined with an accuracy of $\sigma=0.3$ percentage points. Accuracy was 5-10 times higher than expected.

Process measurements on trucks show that sensors must be placed lower and closer to the truck. This would generate a higher and more reliable radio signal, which is particularly important if the wood chip on the truck is hump loaded and has high moisture content. It is also important to have a more equal sampling rate and to be able to measure for longer (30-60 seconds).

Test measurements on a wheel loader bucket and conveyor belt demonstrated good potential for reliable and rapid moisture measurement in these process stages. However, antenna technology must be developed. The moisture calculation model must be adjusted to the lower density of wood fuel on conveyor belts.

The project shows potential for using the method for moisture measurement to build a reference facility for online measurement on trucks. The big challenge is to create a mechanical device that scans or measures the truck in a reliable manner. There are known to be challenges when measuring on frozen wood chips. In a continuation of the project, equipment for online measurement on trucks and conveyors will be built to enable improved logistical management of wood fuel. In addition, a method for measuring and detecting frozen wood chips must be developed.

Sammanfattning

Det finns 580 fjärrvärmenät och 125 större biobränsleeldade anläggningar i Sverige. Därutöver finns 50 massabruk och pappersbruk i Sverige. Råvaran och trädbränslet utgörs företrädesvis av fyra sorters trä: returträ, GROT (grenar och toppar), bark och stamvedsflis. Det är viktigt att bestämma fukthalten direkt, snabbt och tillförlitligt i tillförselprocessen för rätt betalning, förbättrad logistik, bättre uppföljning och styrning av träflisinköp samt snabbare och enklare mätning för chaufför.

Sammansatt dielektrisk modell (CDM) är en fysikalisk modell för beräkning av andelarna bundet vatten, fritt vatten, trä och luft i träflis. Modellen har utvecklats från ett hundratal mätningar på provlådor med bark och den uppvisar en noggrannhet på $\sigma=2,1$ procentenheter. Vid normal lastning av träflis har inte temperatur och densitet någon större påverkan på modellen. Modeller av olika sortiment torde ge en högre noggrannhet, men en generell modell för returträ, GROT, bark och stamvedsflis torde också fungera bra, men med lägre noggrannhet.

Normallastad träflis i provlådor och lastbilar är dubbelbrytande och anisotropiskt (olika egenskaper i vertikal respektive horisontell riktning) med olika dielektriska egenskaper längs de två huvudaxlarna. Den vertikala radiosignalen är större och renare, och är att föredra vid mätning på träflis i lastbilar. Överräkning kan göras mellan mätningar gjorda i horisontell och vertikal polarisation.

Den största felkällan vid referensmätningar på provlådor och lastbilar är dagens stickprovsprocess. För ökad tillförlitlighet måste dessa prov göras i stort antal (25–30 st på lastbil) samt vara slumpmässiga och väl fördelade. Vid kontrollmätning av träflis på tre lastbilar med bark så kunde fukthalten bestämmas med en noggrannhet på $\sigma=0,3$ procentenheter. Denna noggrannhet var 5–10 gånger högre än förväntat.

De genomförda processmätningarna på lastbilar påvisar att sensorerna måste placeras lägre och närmare lastbilen. Därigenom skulle en högre och mer tillförlitlig radiosignal erhållas, vilket är särskilt viktigt om träflisen på lastbilen är puckellastad och har hög fukthalt. Det är också viktigt att ha jämnare samplingshastighet och kunna mäta längre (30–60 sekunder).

Testmätningarna på skopa och transportband påvisade goda möjligheter att göra tillförlitlig och snabb fukthaltsmätning i dessa processdelar. Antenntekniken för skopa kommer dock att behöva utvecklas. Modellen för fukthaltsberäkning kommer troligtvis att behöva anpassas till trädbränslets lägre densitet på transportband.

Projektet visar på goda möjligheter att ta utvecklad metod för fukthaltsmätning till att bygga en referensanläggning för online-mätning på lastbilar. Den stora utmaningen är att skapa en mekanisk anordning som skannar eller mäter lastbilen på ett tillförlitligt sätt. Det är också känt att det finns utmaningar med mätning på frusen träflis. I ett nästkommande projekt ska utrustning för online-mätning på lastbilar och transportband byggas som möjliggör förbättrad logistikhantering av trädbränsle. Därutöver måste en metod för mätning och detektion av frusen träflis utvecklas.

Innehåll

Summary.....	2
Sammanfattning.....	3
Bilaga: Effektivare fukthaltsmätning av trädbränsle med radarteknik	5



Effektivare fukthaltsmätning av trädbränsle med radarteknik

PATRIK OTTOSON, RADARBOLAGET
DANIEL ANDERSSON, RADARBOLAGET
LARS FRIDH, SKOGFORSK (PROJEKTLEDARE)

Förord

Denna rapport baseras på projektet 41965-1 "Mätning av skogsbränsle för produktionsstyrning, prognos och vederlag", delprojekt Radarteknik. Projektet är finansierat med medel från Energimyndigheten, med diarienummer 2015-009324. Delprojektet syftar till att Radarbolaget genomför mätning i processen på flisbilar, vidareutvecklar modellen för radiolänkmätningar och fukthalt i trädbränsle samt undersöker möjligheten för mätning i skopa, på transportband och i huggmaskin. Radarbolaget har tidigare genomfört projekt med namnet SNABB I och SNABB II. Denna rapport ska ses som en fortsättning på tidigare arbeten och är ett metodutvecklingsprojekt.

Projektgrupp

Patrik Ottoson, Radarbolaget
Daniel Andersson, Radarbolaget
Mattias Keva, Radarbolaget
Inger Lindbäck, Gävle Energi
Jahn Johansson, Gävle Energi
Uno Brinnen, BillerudKorsnäs
Per Ericsson, BillerudKorsnäs
Fredrik Hansson, VMF Qbera
Sven Jägbrant, SDC
Mia Iwarsson Wide, Skogforsk
Lars Fridh, Skogforsk (projektledare)

Innehåll

1	Effektivare mätning av trädbränsle i tillförselprocessen med radartechnik	10
1.1	Mål och syfte	10
2	Material och utrustning	11
2.1	Trädbränsle och referensmätning	11
2.2	UWB-baserad radiomätning	11
2.3	Standarder och gränsvärden	13
3	Metoder	16
3.1	Dielektriska egenskaper och fukthalt	16
3.2	Polynomanpassning av fukthalt och dielectricitetskonstant	17
3.3	Temperatur, densitet och fiberriktning	18
3.4	Vatten, IS och mikrovågor	19
4	Mätningens beroenden och noggrannhet	20
4.1	Fel vid stickprov och mätningar	20
4.2	Påverkan av Densitet	21
4.3	Temperatur, sorter och fiberriktning	22
5	Modell för fukthaltsbestämning	24
5.1	Mätning och data	24
5.2	Modellering av fukthalt från dielectricitetskonstant	24
6	Anisotropi och dubbelbrytande egenskaper	26
6.1	Anisotropi i ett lass med träflis	26
6.2	Dubbelbrytande egenskaper	26
6.3	Mätningar på provlåda	27
6.4	Analys av dielektrisk anisotropi	29
7	Tillämpad mätning på lastbil	32
7.1	Från ax till limpa	32
7.2	Lastbilmätning	32
7.3	Analys av lastbilmätning	34
8	Processmätning på lastbilar	35
8.1	Installation av sensor och dataintegration	35
8.2	VIOL-data	36
8.3	Radiomätningar	36
8.4	Radarmätningar och resultat	38
8.5	Möjliga Processförbättringar	40
9	Processmätning i skopa	41
9.1	Hjullastare och Skopor	41
9.2	Mätning i skopa	41
10	Processmätning i sönderdelning	44
10.1	Transportband	44

10.2	Utkastare	46
11	Diskussion och framtid	50
11.1	Modell och metod	50
11.2	Noggrannhet och felkällor	50
11.3	Processmätning på lastbil	51
11.4	Processmätning på transportband	51
11.5	Processmätning i skopa	51
11.6	Framtida målbild och referensinstallation	52
12	Referenser	55

1 Effektivare mätning av trädbränsle i tillförselprocessen med radarteknik

Det finns 580 fjärrvärmenät och 125 större biobränsleeldade anläggningar i Sverige. Därutöver finns 50 massabruk och pappersbruk i Sverige. Råvaran och trädbränslet utgörs företrädesvis av fyra sorters trä: returträ, GROT (grenar och toppar), bark och cellulosaflis (stamvedsflis). Det är viktigt att bestämma fukthalten direkt, snabbt och tillförlitligt i tillförselprocessen. Processdelarna där fukthalten skulle kunna bestämmas är flisning, transport, terminal och förbränning (värmekraftverk).

Det är viktigt att kunna bestämma och följa trädbränslets fukthalt genom hela tillförselprocessen för att rätt debitering ska ske enligt virkesmätninglagen (SKSFS 2014:11), att förbättra förbränningen i biobränsleeldade anläggningar samt att i alla led förbättra logistik, planering och hantering av trädbränsle. Enbart vid ett värmeverk av Gävle Energis storlek vid Johannes bränsledepå (145 GWh) kan effektivare logistik och bränslehantering leda till besparingar på motsvarande 2–4 Mkr per år och anläggning.

Radartekniken baseras på bredbandig UWB-teknik och är ofarlig, oförstörande och beröringsfri. Tekniken och mätsensorerna kan användas utomhus och i svåra miljöer. Det beror på att mätsensorerna kan skyddas i väderbeständiga inkapslingar som även kan motstå viss fysisk nötning. Inom förstudieprojektet SNABB II uppvisades en noggrannhet och en standardavvikelse på $\sigma=1,8$ procentenheter. Förstudien identifierade ett antal punkter där noggrannheten kan förbättras genom att:

- mäta och modellera densitet och temperatur,
- ta fram bättre modeller (fysikalisk modell) för beräkning av fukthalt,
- använda både dielektricitetskonstant och amplitud i beräkningarna,
- mäta på längre avstånd (lastbilar), vilket torde ge högre noggrannhet, och
- ta hänsyn till att referensmätningarna genom torkning kan ge fel på grund av statistiska urval och variationer i den relativa luftfuktigheten.

1.1 MÅL OCH SYFTE

Projektets effektmål ska på sikt bidra till:

- rätt debitering enligt virkesmätninglagen (SKSFS 2014:11),
- förbättrad förbränningen i biobränsleeldade anläggningar, och
- effektivare logistik, planering och hantering trädbränsle.

Projektet syftar till att utveckla en metod för snabb och noggrann bestämning av fukthalten i fast trädbränsle. Projektet ska göra fyra implementeringar (mätning på flisbil, skopa, transportband och huggmaskin) för att verifiera användbarheten i olika delar av tillförselprocessen av trädbränsle. Målen med projektet är att mätmetoden ska:

- vara ofarlig, oförstörande och beröringsfri,
- fungera utomhus och verkliga miljöer,
- kunna mäta på igenom 2,6 meter trädbränsle (bredden på en flisbil),
- bestämma trädbränslets fukthalt med $\sigma \leq 2$ procentenheters noggrannhet, och
- fungera på trädbränslet från -10°C till $+50^{\circ}\text{C}$.

2 Material och utrustning

2.1 TRÄDBRÄNSLE OCH REFERENSMÄTNING

Inom projektet har fyra olika sorters trädbränsle undersökts: GROT (grenar och toppar), bark, returträ och stamvedsflis. Trädbränslet har undersökts i rätvinkliga lådor i plast, så kallade eurobackar, se figur 1. I lådmätningarna har fokus legat på mätning av bark eftersom den flissorten har haft stor spridning i fukthalt och struktur. Vid mätning i processen har alla fyra sorters bränsle mätts och undersökts.

Referensmätning och torkning gjordes enligt gängse metoder genom vägning av råvikt, W_w , torkning av trädbränsle i torkskåp vid $+103 \pm 2^\circ$ och vägning av torrsvikt, W_d . Fukthalten är kvoten mellan "differensen för råvikt och torrsvikt" och "råvikt". Inom forskningslitteraturen används emellanåt begreppet torrsviktsbaserad fukthalt (fuktkvot) medan bränslebranschen i Sverige använder begreppet råviktsbaserad fukthalt:

$$\text{Torrsviktsbaserad fukthalt: } M_d = \frac{W_w - W_d}{W_d} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\text{Råviktsbaserad fukthalt: } M_w = \frac{W_w - W_d}{W_w} \cdot 100 \quad (2)$$

Om inget annat anges i denna rapport avses med fukthalt råviktsbaserad fukthalt.

2.2 UWB-BASERAD RADIOMÄTNING

Projektet har använt en UWB-baserad (ultra-wideband) radioutrustning för bestämning av dielektriska egenskaperna i trädbränsle. Följande egenskaper undersökts: relativ dielektrisk primitivitet (ϵ'), amplitud (α) och brytningsindex (refraktionsindex, n). Den relativa dielektriska primitiviteten kallas emellanåt även dielektricitetskonstant, vilket är begreppet som används i denna rapport. Absolut dielektrisk primitivitet har också en imaginärdelen som heter dielektrisk förlust (ϵ''). Brytningsindex motsvarar kvadratroten ur dielektricitetskonstanten för icke magnetiska material:

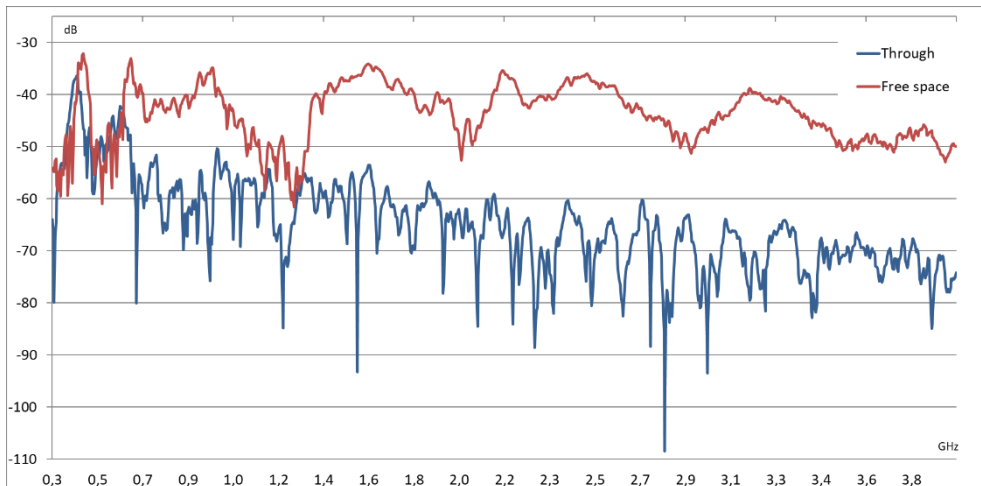
$$\tilde{n} = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{\epsilon' + j\epsilon''}. \quad (3)$$

Brytningsindex är kanske en mer begriplig enhet för gemene man eftersom enheten är i direkt relation till hur mycket radiosignalen fördröjs i olika media. I vacuum har den elektromagnetiska strålningen brytningsindex, $n=1$. Om hastigheten för den elektromagnetiska strålningen är hälften av ljusets hastighet, t.ex. vid passage genom olika material, så är brytningsindex, $n=2$. Tidigare projekt har visat att 0,75 GHz är en lämplig mittfrekvens vid mätning med radioutrustning. Detta har bestämts genom transmissionsmätning med nätverksanalysator och hornantenn, se figur 1. Transmissionsmätning betyder att man mäter igenom materialet, med sändare och mottagare på varsin sida om materialet.



Figur 1. Transmissionsmätning med nätverksanalysator och hornantenn på provlåda.

Frekvensspektrumet är cirka ± 50 procent runt mittfrekvensen, vilket betyder att mätningar med mittfrekvensen 0,75 GHz har en breddighet mellan 0,375 och 1,125 GHz. I och med att mätningarna ska göras på längre avstånd (2–3 m) genom flisbilar är det viktigt att rätt frekvens väljs. Fuktigt träbränsle absorberar kraftigt elektromagnetiska strålning. I frekvensdiagrammet i figur 2 går det att se att frekvenser ovanför 0,7 GHz dämpas och absorberas kraftigt (kurvorna divergerar).



Figur 2. Frekvensdiagram vid transmissionsmätning med nätverksanalysator.

Vid dielektrisk mätning av solitt trä används ofta kapacitansbryggor för bestämning av dielektricitetskonstant (ϵ') och den så kallade förlustfaktorn (ϵ''). Kvoten mellan dessa två enheter uttrycks som dielektrisk förlust:

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

Förlustfaktorn och tangens delta ($\tan \delta$) är vid mätning av fukthalt i trädbränsle mycket små i relation till dielektricitetskonstanten. I denna rapport har fukthaltens förhållande till dielektricitetskonstant företrädesvis behandlats. Förlustfaktorn kan beräknas enligt:

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \tilde{n}^2 = (n + j\kappa)^2 = n^2 - \kappa^2 + j2n\kappa \quad (5)$$

vilket innebär att $\varepsilon' = n^2 - \kappa^2$ och $\varepsilon'' = 2n\kappa$. Vanligtvis är $\kappa \ll n$ varvid κ negligeras. Det är dock möjligt att ta hänsyn till κ kan beräknas enligt:

$$e^{\frac{-\omega\kappa d}{c_0}} = \frac{A}{A_0} \quad (6)$$

där A_0 är amplituden för frirymdsmätning (free space) och A är mätning genom material (through material). Denna ekvation kan också uttryckas som:

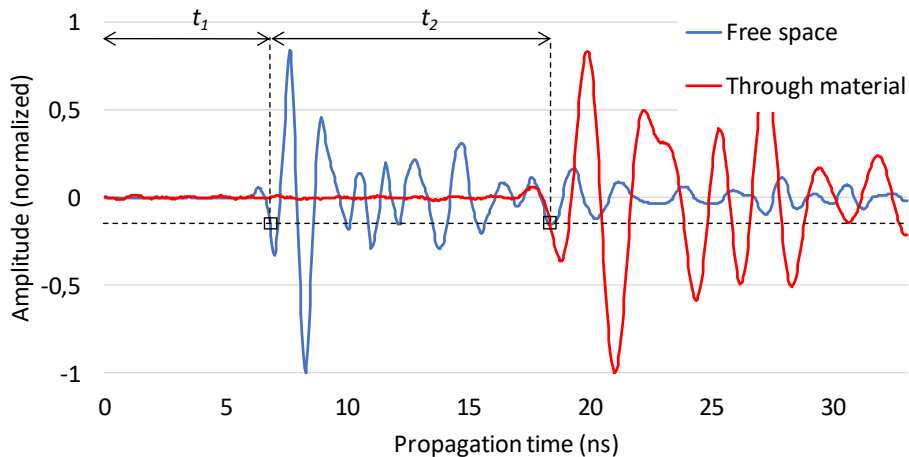
$$\frac{-\omega\kappa d}{c_0} = \ln \frac{A}{A_0} \quad (7)$$

vilket ger att $\kappa = -\frac{c_0}{d\omega} \ln \frac{A}{A_0}$.

En UWB-baserad radioutrustning arbetar i den så kallade tidsdomänen, vilket gör att man kan undersöka tiden som en utsänd våg har varit ute. Utrustningen är försedd med två Vivaldi-antennor som är placerade inuti ett metallantennhus. UWB-signalen genereras av utrustningen genom att korrelera utskickad M-sekvens (en binär kod, PRBS=pseudo random binary sequence) med mottagen sekvens. I ett tidsdomänssystem och vid mätning i icke-magnetiskt material kan dielektricitetskonstanten, ε' , beräknas från mätningen av brytningsindex, n , i fri rymd (luft), d_1 , och genom material, d_2 , (se figur 3) som

$$n = \sqrt{\varepsilon'} = (d_1 + d_2) / d_1 \quad (8)$$

om $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$.



Figur 3. Beräkning av dielektricitetskonstanten utifrån mätningar i fri rymd och genom material.

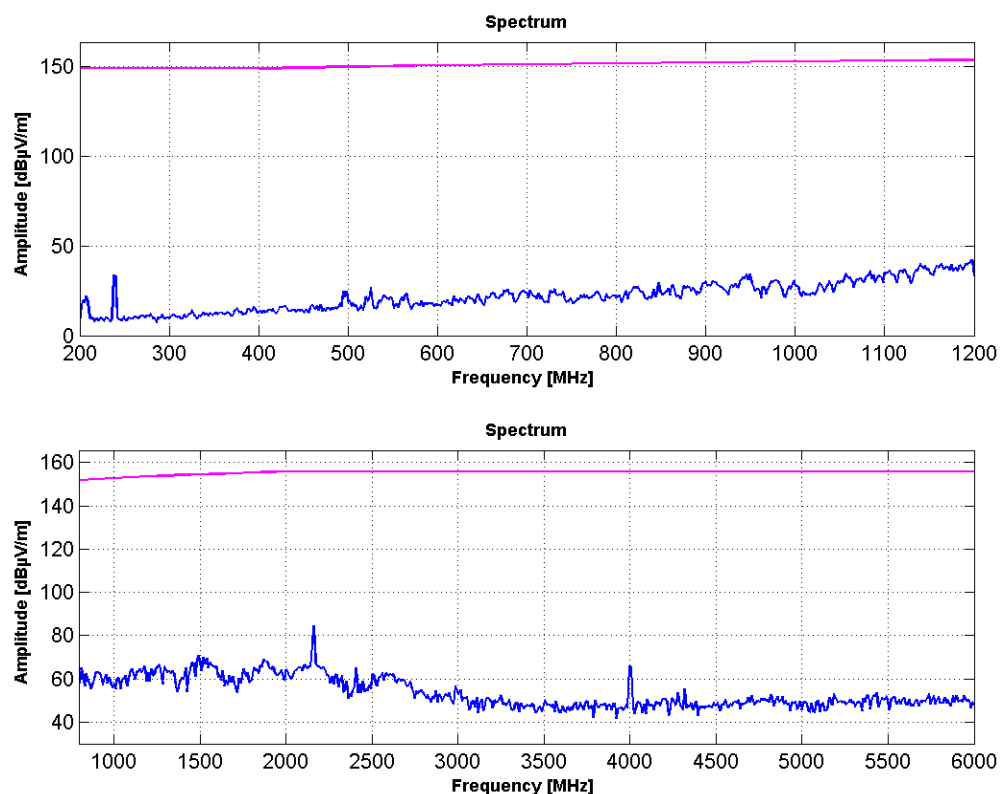
2.3 STANDARDER OCH GRÄNSVÄRDEN

Radartechniken baseras på bredbandig UWB-teknik och är ofarlig. Enligt Strålskyddsmyndigheten ska referensvärdet (gränsvärde för hälsofarlig strålning från elektromagnetiska fält) för mikrovågor inom frekvensområdet 790–2 690 MHz ligga på 4 000–10 000 mW/m² (se tabell 1), vilket motsvarar 151,78–155,76 dBuV/m. Enligt uppmätning vid bärvågsfrekvensen 2 000 MHz med spektrumanalysator ligger

Radarbolagets radarsystem på 30–70 dBuV/m för angivet frekvensområde, se figur 4. Det är mer än 80 dBuV/m (100 miljoner gånger) lägre än gällande referensvärden.

Tabell 1. Referensvärden för radiovågor enligt Strålskyddsmyndigheten

Frekvens MHz	Referensvärde mW/m ²	Exempel på användningsområde
10 - 400	2 000	Radio och kommunikationsradio
400 - 790	2 000 - 4 000	TV
790 - 2 690	4 000 - 10 000	Mobiltelefoni
2 400/5 000	10 000	Trådlösa datornätverk



Figur 4. Uppmätt frekvensspektrum vid bärvågsfrekvensen 2 000 MHz (2 GHz) för Radarbolagets UWB-radarsystem. Mobiltelefonnätet har en topp vid 2 161 MHz och har inte med radarsystemet att göra. Rosa linje är referensvärde enligt Strålskyddsmyndigheten

Det sker ett omfattande standardiseringsarbete inom EU gällande regler för elektromagnetisk strålning. Arbetet leds av ETSI (European Telecommunications Standards Institute). I Sverige är det PTS (Post och telestyrelsen) som handhar det nationella införandet. Enligt standarden ETSI EN 302 065-4 kan radioutrustning användas för materialundersökning, se tabell 2.

Tabell 2. Gränsvärde för standarden ETSI EN 302 065-4

**Table 2: Limits for Maximum mean e.i.r.p. spectral density
for fixed material sensing devices [i.12]**

Frequency range [GHz]	Max e.i.r.p. (-90° to -20° and 30° to 90° elevation with respect to the horizontal plane) [dBm/MHz]	Max e.i.r.p. (-20° to 30° elevation with respect to the horizontal plane) [dBm/MHz]
$f < 1,73$		-85
$1,73 \leq f < 2,2$	-65	-70
$2,2 \leq f < 2,5$		-50
$2,5 \leq f < 2,69$	-65 (see note 1)	-70
$2,69 \leq f < 2,7$ (see note 2)	-55	-75
$2,7 \leq f < 2,9$	-50	-70
$2,9 \leq f < 3,4$	-50	-70
$3,4 \leq f < 3,8$ (see note 2)	-50	-70
$3,8 \leq f < 4,8$		-50
$4,8 \leq f < 5$ (see note 2)	-55	-75
$5 \leq f < 5,25$		-50
$5,25 \leq f < 5,35$	-50	-60
$5,35 \leq f < 5,6$		-50
$5,6 \leq f < 5,65$	-50	-65
$5,65 \leq f < 5,725$	-50	-60
$5,725 \leq f < 8,5$		-50
$8,5 \leq f < 10,6$		-65
$f \geq 10,6$		-85

NOTE 1: Devices using a Listen Before Talk (LBT) mechanism, as described in the present document are permitted to operate in frequency range 2,5 GHz to 2,69 GHz with a maximum mean e.i.r.p. spectral density of -50 dBm/MHz.

NOTE 2: Limitation of the Duty Cycle to 10 % per second.

3 Metoder

3.1 DIELEKTRISKA EGENSKAPER OCH FUKTHALT

Trä består av cellämnen, luft och vatten. Även ett lass träflis har dessa beståndsdelar. Andelen luft är naturligtvis större i ett lass träflis. Trä är hygroskopiskt och kommer att ta upp fukt från omgivande miljö, t.ex. fuktig luft eller fritt vatten. Vatten finns tillsammans med trä som bundet eller fritt vatten enligt tabell 3.

Tabell 3. Vatten finns i trä i bunden eller fri form

	Torrbaserad fukthalt	Våtbaserad fukthalt
Monomolekylär fukt	0 – 5%	0 – 4,8 %
Polymolekylär fukt	5 – 18–23 %	4,8 – 15,3-18,7 %
Kapillärkondenserad fukt (under fiberns mättnadspunkt)	18–23 – 30 %	15,3-18,7 – 23,1 %
Fritt vatten (över fiber fiberns mättnadspunkt)	>30 %	>23,1 %

Fukthalten i ett lass träflis kan variera 20–70 procent. Mestadels ligger fukthalten kring 40–50 procent. Lichtenecker (1926) föreslår en sammansatt dielektrisk modell för bestämning av fukthalt i trä. Inom området markradar, vilket är en liknande teknik som UWB-baserad radiomätning, föreslår Roth et al. (1990) en liknande modell. En sammansatt dielektrisk modell för trä (w), fritt vatten (fw), bundet vatten (bw), och luft (a) kan för träflis (wc) uttryckas som:

$$(\epsilon'_{wc})^\alpha = V_w(\epsilon'_w)^\alpha + V_{fw}(\epsilon'_{fw})^\alpha + V_{bw}(\epsilon'_{bw})^\alpha + V_a(\epsilon'_a)^\alpha \quad (9)$$

där ϵ'_{wc} , ϵ'_w , ϵ'_{fw} , ϵ'_{bw} , ϵ'_a , V_w , V_{fw} , V_{bw} , V_a är dielektricitetskonstant och volymsandelar för träflis, trä, fritt vatten, bundet vatten och luft. α är en koefficient som tillåts variera mellan 0 och 1, och måste bestämmas med minsta kvadrat-metoden.

I en verklig situation mäts ϵ'_{wc} medan ϵ'_w , ϵ'_{fw} , ϵ'_{bw} , ϵ'_a , och α måste vara kända och V_w , V_{fw} , V_{bw} , och V_a måste beräknas. V_w , V_{bw} , och V_a kan estimeras i förväg (à priori) om densiteten är konstant eller har små variationer. Under nedfuktning av träflis så ersätts vatten med luft i träfibern. Om man utgår från att träflis (wc) har en fukthalt över fiberns mättnadspunkt (ws) så kan ett förenklat uttryck användas:

$$\epsilon'_{wc} = \epsilon'_{ws} + V_{fw}(\epsilon'_w - \epsilon'_a) = \epsilon'_{ws} + V_{fw}(\epsilon'_w - 1) \quad (10)$$

där ϵ'_{ws} flislassets (inklusive trä, vatten och luft) dielektricitetskonstant vid mättnadsgraden 23 procent. Det enda som förändras över mättnadsgraden är volymandelen fritt vatten, V_{fw} , som ersätter luft i trämateriallet, vilket ger $V_{fw}(\epsilon'_w - 1)$.

Under nedfuktningprocessen så ökar dock trävolymen, vilket leder till en minskad relativ densitetsökning torrt trä. Denna densitetsminskning är ungefär 0,87 procent för varje 1 procent *torrbaserad fukthalt* över 30 procent. Minskningen kan skilja mellan träsorter. Det relativa innehållet fritt vatten i trä kan uttryckas som (beräknat från tabelldata i Torgovnikov, 1993):

$$V_{fw} = 0,87 \cdot d \cdot (M_w - 0,3) \quad (11)$$

där d är ugnstorr densitet (kg/dm³) och M_w är det relativa innehållet fritt vatten. Om dielektricitetskonstant för träflis vid mätnadspunkten (ϵ'_{ws}) och vatten ($\epsilon'_w = 78,34$) är kända så kan dielektricitetskonstanten för träflis över mätnadspunkten (ϵ'_{wc}) mätas, och att densiteten (ugnstorr och fuktig densitet) är samma eller nästan samma vid varje mättillfälle, då är det möjligt att uttrycka M_w som:

$$M_w = \frac{(\epsilon'_{wc} - \epsilon'_{ws})}{(\epsilon'_w - 1) \cdot 0,87 \cdot d} + 0,3 \quad (12)$$

Det förenklade sambandet kan inte användas för att bestämma fukthalter under 23 procent (under fiberns mätnadspunkt). Dielektricitetskonstanten för bundet vatten, ϵ'_{bw} , varierar 1–78 för fukthalten 0–23 procent. Detta är inte något stort problem eftersom fukthalten alltid överstiger 23 procent i normala leveranser av träflis till fjärrvärmeanläggningar och pappersmassaindustrier. Dielektricitetskonstanten för mättad bark och träflis har uppmätts till $\epsilon'_{ws} = 2,4$. Torgovnikov (1993) uppskattade dielektricitetskonstanten till $\epsilon'_{ws} = 3,3$ för solitt trä med densiteten 0,3 g/cm³. Densiteten för ugnstorr träflis (trä/bark och luft) finns redovisad i tabell 4.

Tabell 4. Densitet för olika former av ugnstorr träflis (barrträ)

	Densitet
Bark (riven)	0.09-0.16
GROT (grenar och toppar)	0.20-0.28
R-trä (returträ)	0.16-0.24

3.2 POLYNOMANPASSNING AV FUKTHALT OCH DIELECTRICITETSKONSTANT

I detta projekt används en apparat för UWB-radiomätning inom frekvensintervallet 0,5–1 GHz (centerfrekvens på 0,75 GHz). Vid denna centerfrekvens på 0,75 GHz kommer dielektricitetskonstanten för trä ändras med olika temperatur och densitet (tall och gran) enligt tabell 5.

Tabell 5. Dielektricitetskonstanten för tall och gran vid olika fukthalter och temperaturer, interpolerat från (Torgovnikov, 1993).

Densitet, ugnstorr	Temperatur	Torrbaserad fukthalt/ Våtbaserad fukthalt					
		0/0	10/9	20/17	30/23	60/38	100/50
Tall, 0,40 g/cm³	-20°C	1,6	1,9	2,2	2,3	2,8	3,3
	+20°C	1,7	2,3	3,1	4,0	6,1	11,9
	+50°C	1,8	2,4	3,1	4,1	6,2	12
	+90°C	1,9	2,6	3,3	4,2	6,3	12,2
Gran, 0,43 g/cm³	-20°C	1,6	2,0	2,2	2,4	2,9	3,4
	+20°C	1,7	2,4	3,2	4,2	6,5	12,7
	+50°C	1,8	2,5	3,3	4,3	6,7	12,8
	+90°C	1,9	2,7	3,4	4,4	6,8	13,0

I tabell 5 går det att se att fruset trä beter sig på annat sätt än tempererat trä. Dielektricitetskonstanten är lägre och mer lika för olika fukthalter om träet är fruset. Därför måste fuktigt trä i fruset och temperat tillstånd modelleras var för sig.

Topp et al. (1980) har föreslagit ett tredjegradspolynom för beräkning av fukthalt i jord från dielektricitetskonstanten. Genom att använda detta sätt kan fukthalten, M_w , och dielektricitetskonstanten, ϵ , formuleras som:

$$M_w = a + b \cdot \varepsilon' + b \cdot \varepsilon'^2 + c \cdot \varepsilon'^3 \quad (13)$$

Svensk tall och gran kan modelleras med Topp-funktionen (13) från data i tabell 3. Om man tar hänsyn till om träet är fruset och tempererat vid frekvensen 0,75 GHz så erhålls genom minsta-kvadratmetoden följande ekvationer för bestämning av fukthalten:

$$M_{w < 0^\circ C} = -0,04 - 0,3 \cdot \varepsilon' + 0,3 \cdot \varepsilon'^2 - 0,039 \cdot \varepsilon'^3 - 0,0007 \cdot t - 0,02 \cdot d \quad (14)$$

$$M_{w > 0^\circ C} = -0,2 + 0,2 \cdot \varepsilon' - 0,01 \cdot \varepsilon'^2 + 0,0004 \cdot \varepsilon'^3 - 0,0003 \cdot t - 0,09 \cdot d \quad (15)$$

där ε' är den mätta dielektricitetskonstanten, t är temperaturen i grader Celsius, och d är ungstorr densitet (kg/dm^3). Standardavvikelsen för ekvationerna (14) och (15) är ungefär 1 procentenhet. Dessa ekvationer ska dock betraktas som en matematisk anpassning av ett fysiskt fenomen. Högre graders polynom kommer naturligtvis att ge ännu bättre anpassning.

3.3 TEMPERATUR, DENSITET OCH FIBERRIKTNING

Torgovnikov (1993) har utöver fukthalt även modellerat dielektricitetskonstanten för trä med olika temperatur, fiberriktning och densitet. Fukthalten har mest påverkan på dielektricitetskonstanten. Densitet påverkar näst mest, men även temperatur har en viss påverkan. Hänsyn måste tas till antennpolarisationen relativt orienteringen till fiber- och träflisriktningen. Olika polarisationer (horisontell och vertikal) resulterar i varierande dielektricitetskonstant. Torgovnikov (1993) modellerade trä med olika temperatur, fukthalter och fiberriktning enligt:

$$\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_{(+20)} [1 + k_{\varepsilon'}^t (T - 293)] \text{ vid temperaturer över } 0^\circ\text{C} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_{(-20)} [1 + k_{\varepsilon'}^t (T - 253)] \text{ vid temperaturer } -5 \text{ till } -30^\circ\text{C} \quad (17)$$

där $k_{\varepsilon'}^t$ för 0,75 GHz redovisas i tabell 6 och 7 (data är interpolerade från tabell 5). Temperaturer, T , anges i kelvin.

Tabell 6. Koefficient $k_{\varepsilon'}^t \cdot 10^{-3} K^{-1}$ vid MC% 40–120, interpolerad (Torgovnikov, 1993)

t (°C)	0-90						-0 -30					
MC%	40		60		80		100		120		40-120	
f (GHz)	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥
0,75	0,5	0,65	0,5	0,6	0,5	0,6	0,25	0,3	0	0	11,25	11,7

Tabell 7. Koefficient $k_{\varepsilon'}^t \cdot 10^{-3} K^{-1}$ vid MC% 5–30, interpolerad (Torgovnikov, 1993)

t (°C)	0-90									
MC%	5		10		15		20		25-30	
f (GHz)	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥
0,75	1,75	1,825	1,75	1,825	1,225	1,3	0,875	1,025	0,5	0,65

Exempel 1: Temperatur=+30°C (T=303), frekvens=0,75 GHz, MC%=100 (torrbaserad fukthalt), sort=tall (densitet=0,43 g/cm^3). $\varepsilon_{(+20)} = 12,685$

$$\varepsilon_{(+30)} = 12,685 [1 + 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot (303 - 293)] = 12,72 \quad (18)$$

3.4 VATTEN, IS OCH MIKROVÅGOR

Vatten påverkar mikrovågor (och tvärtom) på ett betydande sätt. Vatten består av dipolmolekyler, vilka orienterar sig så att näraliggande molekyler vänder sina olikladdade sidor mot varandra. Den elektriska dipolen i vatten försöker kontinuerligt orientera sig när den utsätts för elektromagnetisk strålning och dess oscillerande elektriska fält. Dipolenta rörelser är sålunda frekvensberoende.

Dielektricitetskonstanten förändras därför med vattenmolekylens rörelse och tillstånd med frekvens, temperatur, orientering, tryck, ämnesblandningar och molekylstrukturer.

Den molekylära strukturen i is skiljer sig väsentligt från den hos flytande vatten, vilket också påverkar dess dielektriska egenskaper. Vattenmolekyler bildar vätebindningar med syreatomen till angränsande molekyler, vilket gör dem lättörliga, se figur 5. Vattenmolekyler i fruset tillstånd bildar däremot tre vätebindningar, vilket gör dem oförmögna att rotera under påverkan av ett yttre elektriskt fält vid mikrovågsfrekvenser (GHz). Densiteten kommer dock alltid att påverka mikrovågorna.



Figur 5. a) Fruset vatten med tre vätebindningar, b) Tempererat vatten med vätebindningar till syreatom, och c) Ånga utan bindningar (bild från: Sinauer Associates).

Vatten i trä finns som fritt vatten och som bundet vatten (molekylärt, mekaniskt och kemiskt bundet). Det bundna vattnet anses uppgå till maximalt 23 procent av massans torrmaterial (fibers mättnadspunkt). Bundet vatten har liknande egenskaper som is och ska inte kunna detekteras inom GHz-området. Därför är det endast det fria vatten som ska kunna detekteras.

Sålunda, fritt och bundet vatten skiljer sig åt. Fruset och temperat vatten skiljer sig åt. Trädbränsle med enbart bundet vatten är nog ytterst ovanligt, därför behöver inte detta särskilt beaktas. Däremot kan fruset, halvfruset och tempererat vatten finnas i en och samma lastbil. Det är också känt att vattnets fryspunkt är lägre än smältpunkten för is. Därför kan material med exakt samma temperatur och fukthalt uppvisa olika dielektriska egenskaper beroende på om det håller på att frysa respektive smälta.

4 Mätningens beroenden och noggrannhet

4.1 FEL VID STICKPROV OCH MÄTNINGAR

Det finns utmaningar i korrelationen mellan referensmätt fukthalt och mätdata från radiotransmissionsmätning. Referensmätning görs idag med torkning av träflis under 24 timmar i torkskåp vid $+103 \pm 2^\circ\text{C}$. Träflisen får inte återfuktas, varför vikten måste mätas omedelbart. Fukthalten beräknas med ekvation (2). Denna del i referensmätningen är tillförlitlig och borde inte generera större fel om stickproven vägs direkt efter stickprovstagning och efter torkning. Det är dock stickprovstagningen som visade sig vara den stora utmaningen eftersom:

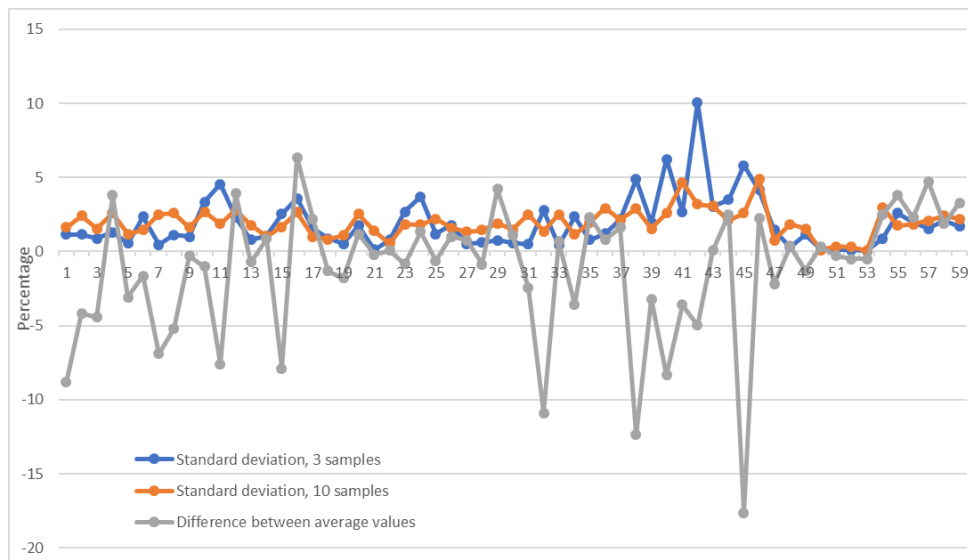
- Det finns stor spridning i fukthalt i ett lastbilslass med träflis. I en provlåda eller ett lastbilslass brukar spridningen vara 5–10 procentenheter, men kan i vissa fall vara 20–30 procentenheter. Det är svårt att ta ett korrekt antal stickprov för att uppnå korrekt och jämförbar noggrannhet vid stor spridning, och
- Radiosignalerna inte kan observeras under mätningarna så är det svårt att ta stickprov på korrekt plats (tvärsnittet för radiosignalerna).

Dessa två förutsättningar leder till osäkerheter i referensmätningarna. För en känd population så kan antalet nödvändiga stickprov, som måste tas, beräknas enligt

$$n = \frac{(\alpha^2 \cdot s^2)}{(\sigma^2 + (\alpha^2 \cdot s^2 / N))} \quad (19)$$

där α är sigmanivån, σ är standardavvikelsen för hela populationen (önskad noggrannhet), s är standardavvikelsen för alla stickprov (känd eller uppskattad noggrannhet), N är totala antalet av den populationen, och n är antalet stickprov som måste genomföras för att uppnå önskad noggrannhet.

Vid ett noggrannhetstest så togs tre (3) stickprov slumpmässigt från toppen på en 88-liters provlåda. Innehållet var bark. Från samma provlåda togs också tio (10) stickprov slumpmässigt från förmodat tvärsnitt för radiosignalen, vilket i detta fall var framför antennen och i höjd med E-fältet (elektriska). Figur 6 visar resultatet från stickprovstestet. Det är känt att bark och GROT (grenar och toppar) har större spridning än träflis av stamved. Returträ kan också ha större spridning på grund av sitt spridda ursprung. Det är också känt att spridningen varierar mellan leverantörer, personer som lastar träflis, säsong och väder.



Figur 6. Standardavvikelse för 59 stickprov som är mätta i provlåda samt differensen mellan medelvärdena för tre respektive tio stickprov.

Största differensen mellan medelvärdena för tre och tio stickprov är 17 procentenheter (stickprov 45). För samma stickprov är inte standardavvikelsen alarmerande stor. Detsamma gäller för stickprov 1, 7, 11, 15, 32 och 38. Figur 4 visar således att låga standardavvikelser inte är någon garanti för ett korrekt återgivet medelvärde.

Tillförlitlig stickprovstagning inkluderade följande steg:

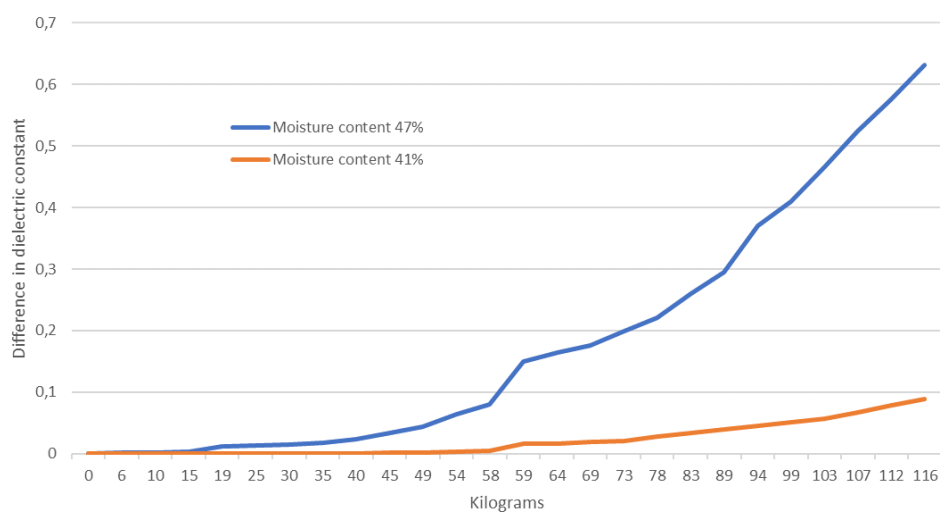
- Fylla provlåda med likformigt urval av träflis och fukthalt,
- Ta stickprov från förmodat tvärsnitt för radiosignalen,
- Ta minst tio stickprov,
- Blanda inte stickproven med varandra (standardavvikelsen blir felaktig),
- Vägning och torkning av träflis ska göras på standardiserat och typgodkänt sätt.

4.2 PÅVERKAN AV DENSITET

Träflis kommer att ha olika densitet beroende på olika kompakteringsprocesser. Högre densitet kommer att öka mängden vatten och träflis per volymenhet (luften kommer att försvinna). Trots det så kommer fukthalten för träflisen vara densamma, eftersom fukthalten relateras till vikten. Högre densitet kommer således att öka påverkan på utskickade radiosignaler. Vid två tester exponerades träflis med olika fukthalt i en 164-liters provlåda successivt för högre tryck med vikter (0–116 kg), se figur 7. Denna successiva tryckökning orsakade högre och högre densitet hos träflisen. Samtidigt skickades radiosignaler genom provlådan, vilket resulterade i en ökad dielektricitetskonstant, se figur 8.



Figur 7. Densitetsmätning gjordes genom att successivt öka trycket på träflisen med vikter från 0–116 kg.



Figur 8. Ökat tryck genom med vikter (0–116 kg) resulterade i ökad dielektricitetskonstant.

Ökningen av dielektricitetskonstanten är enligt förväntan högre för högre fukthalt (volymprocent), vilket orsakas av högre densitet. Efter tryck med ungefär 50 kg så togs vikterna bort. Densitet och dielektricitetskonstanten var desamma med eller utan vikter. Sålunda, när väl träflisen är komprimerad så kommer den förbli i det tillståndet. I figur 5 så förändras dielektricitetskonstanten som mest 0,63 enheter, varför densiteten måste beaktas vid mätning och tester. I en verklig lastbil med träflis så är det sagt att densiteten blir konstant efter 30 minuters färd, vilket är normalfallet vid de flesta leveranser. I provlåda ska träflisen packas enligt följande för att erhålla en enhetlig densitet:

- Håll träflisen i en provlåda från 30 cm höjd,
- Släpp provlåda tre gånger från en höjd på 15 cm mot hårt underlag (träplanka), och
- Skrapa av överflödiga träflis, stäng locket.

4.3 TEMPERATUR, SORTER OCH FIBERRIKTNING

Nyström (2006) och Paz (2010) har skrivit om dielektriska egenskaper och träflis. De har bland annat skrivit att olika temperaturer i träflis inte har eller har liten påverkan på radiosignalerna. De har dock bara undersökt träflis i det temperade området.

Torgovnikov (1993) visar att olika temperaturer i solitt trä har inflytande på radiosignalerna. Detta är också fallet för rent vatten i olika temperaturer.

Olika träsorter har olika densitet, men även olika cellväggskonstruktioner. Denna rapport behandlar endast svensk tall och gran, och de sorterna kan betraktas som likvärdiga eller nästan likvärdiga förutom att de har lite olika densitet. Till och med bark anses ha likvärdiga dielektriska egenskaper som stamved. Vid kalibrering och finjustering av ett mätningförfarande skall olika sorter och träddelar beaktas för högre mättnoggrannhet. Torgovnikov (1993) har också visat att fiberriktningen påverkar kapacitansmätningen. Han mäter med en så kallad kapacitansbrygga, som principiellt liknar en radiomätning. I vårt fall har det visat sig att träflisens riktning påverkar radiosignalerna med koppling till antennpolarisationen och antennrotationen (Ottosson et al., 2017a).

5 Modell för fukthaltsbestämning

5.1 MÄTNING OCH DATA

Radiotransmissionsmätning genomfördes på fuktig bark. Anledning till att bark valdes ut var på grund av materialets höga fukthaltsvariationer. Mätningarna genomfördes i en särskild anordning där två olika sorters antennstorlekar och antennhus användes, se figur 9. Totalt genomfördes 59 mätningar. Barken hade en fukthalt mellan 0 och 57 procent. Antennerna var placerade i horisontell polarisationsriktning. Dielektricitetskonstanten varierade mellan 1,3 och 11,7.



Figur 9. Mättrigg med två olika storlekar på antennhus (stor=stålfärg, liten=vit färg). Grå provlåda i plast innehöll träflis.

5.2 MODELLERING AV FUKTHALT FRÅN DIELEKTRICITETSKONSTANT

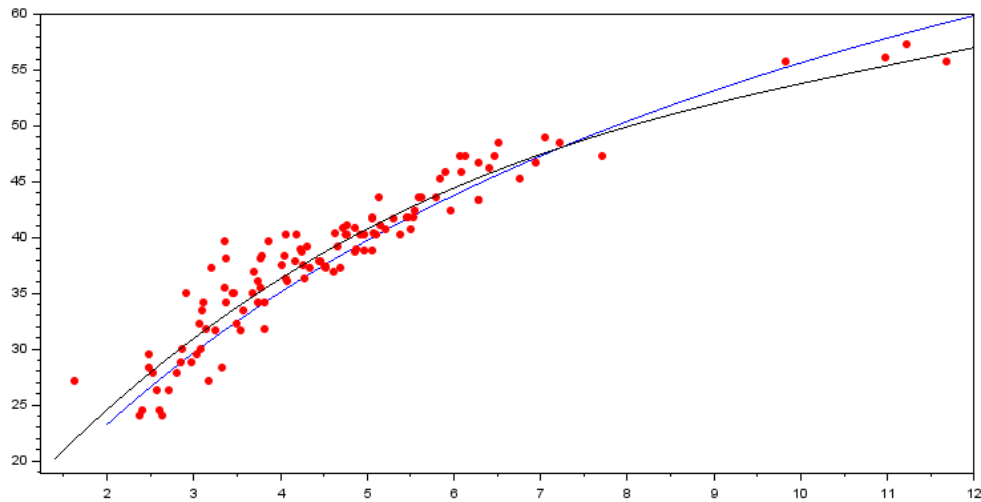
Under mätnadsgraden på 23 procent kommer dielektricitetskonstanten för bundet vatten att variera från 78,34 till 0, vilket gör ekvation (9) svåranalyserad. Detta beror på att det bundna vattnet interagerar med träet på olika sätt, vid mätnadspunkten som fritt vatten. Vid ett normalt fjärrvärmeverk eller vid en pappersmassfabrik existerar sällan träflis som är torrare än 23 procent. Ekvation (12) måste räknas om för att redovisa våtbaserad fukthalt enligt (Ottosson et al., 2017b):

$$\text{Sammansatt dielektrisk modell (torrbaserad): } M_w = \frac{(\epsilon'_{wc} - \epsilon'_{ws})}{(\epsilon'_{w-1}) \cdot 0.87 \cdot d} + 0,3 \quad (20a)$$

$$\text{Sammansatt dielektrisk modell (våtbaserad): } M_w = \frac{M_d}{1 + M_d} \quad (20b)$$

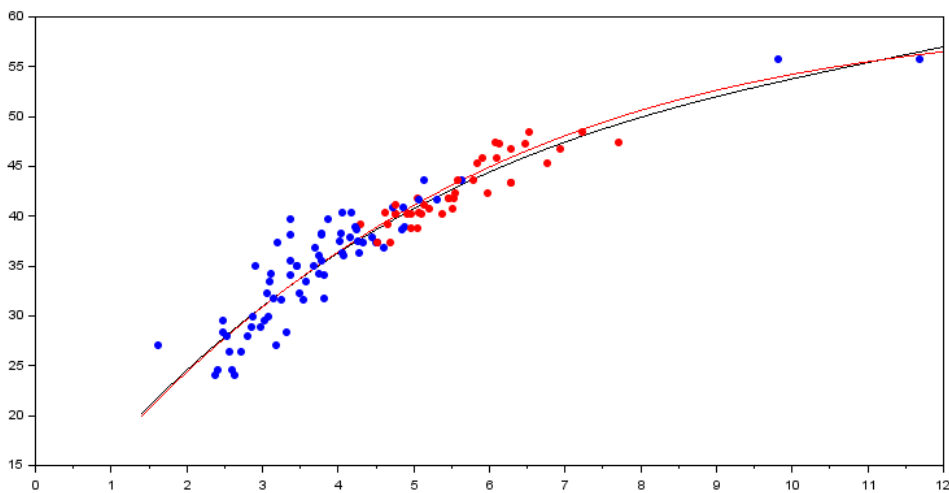
Figur 10 visar mätt fukthalt (23–57 procent) utritad mot mätt dielektricitetskonstanten samt minsta kvadrat-anpassade och genererade kurvor från ekvationerna (13) och (20). Eftersom Topp-funktionen, ekvation (13), är en matematisk anpassning och ett tredjegradspolynom så anpassar den sig bra till data. Nackdelen med ett tredjegradspolynom är att den anpassar sig till ändområden i dataintervallet på ett överdrivet sätt. Mätningarna genomfördes under sommartid, varför det var svårt att hitta blöta bark (>50 procent). Topp-funktionen och den sammansatta dielektrisk modell ger liknande resultat och noggrannhet ($\sigma=2,1$ procentenheter). Det går att anta att förhållandet mellan fukthalt och brytningsindex är linjärt (i figur 8 används kvadraten för brytningsindex, vilket motsvarar dielektricitetskonstanten). Den

sammansatta dielektriska modellen har ett linjärt samband, därför är den modellen att föredra.



Figur 10. Fukthalt, M_w , (y-axel, över 23 procent) i förhållande till dielektricitetskonstanten för bark (x-axel) (röd=mätdata, blå= sammansatt dielektrisk modell, svart=Topp-funktionen). Densitet=0,125 kg/dm³ och dielektricitetskonstanten $\epsilon'_{ws} = 1,98$.

Under mätning mättes temperaturen med en IR-mätare. Temperaturen för träflis varierade mellan 13,2°C och 44,2°C. Temperaturer över 15–20°C orsakades troligtvis av biologisk nedbrytning. I och med att mätningarna gjordes under sommarhalvåret så låg genomsnittstemperaturen på ca +15°C. Figur 11 visar skillnaden mellan Topp-funktionen med och utan anpassning till temperaturer.



Figur 11. Topp-funktionen (svart=utan temperaturanpassning, röd= med temperaturanpassning). Mätdata med temperaturer $\geq 25^\circ\text{C}$ är utritade som röda punkter, och $< 25^\circ\text{C}$ utritade som blå.

Standardavvikelsen för anpassningen i figur 11 är i båda fallen $\sigma=2,1$ procentenheter. Bara genom att undersöka de röda punkterna i figur 11 så indikeras att olika temperaturer inte påverkar radiosignaler på ett uppenbart sätt. Det är dock intressant att notera att varmare (med biologisk aktivitet) träflis återfinns i fukthaltsintervallet 38–48 procent.

6 Anisotropi och dubbelbrytande egenskaper

6.1 ANISOTROPI I ETT LASS MED TRÄFLIS

Vid en första anblick kan ett lass med träflis uppfattas som flis med slumpmässigt orienterade riktningar. Träflisen är ofta 2–5 mm höga och 20–100 mm breda och långa, dvs. arean för övre/undre ytan är mycket större än kanten. Vid en närmare betraktelse så orienterar sig träflis med största ytan upp/ner och med kanten till sidan, se figur 12, på grund av gravitationen och lastningsprocessen. Sett från toppen så kommer träflis dock att vara slumpmässigt roterade.



Figur 12. Slumpmässig rotation av träflis, sett från toppen.

Regelbundet och strukturerad orientering av träflis indikerar att ett lass träflis är ett anisotropiskt effektivt medium som har olika dielektriska egenskaper längs med huvudaxlarna i ett medium. Dielektrisk anisotropi skapas genom att elektromagnetiska vågor sprider sig genom objekt och strukturer, som i genomsnitt är placerade i en särskild ordning eller orientering. När man observerar träflis från sidan så finns det två huvudsakliga axlar i observationsplanet: parallellt med fliskanterna (antennens horisontella riktning) och rätvinkligt mot fliskanterna (antennens vertikala riktning). Om träflisen observeras uppifrån och ned så är träflisen slumpmässigt roterade, sålunda det finns ingen huvudsaklig polarisationsriktning i det tvärgående observationsplanet. I en hög med träflis skapar träflisen makroskopiska strukturer medan fiberorienteringarna skapar mikroskopiska strukturer. Orienteringen i dessa två strukturer sammanfaller.

6.2 DUBBELBRYTANDE EGENSKAPER

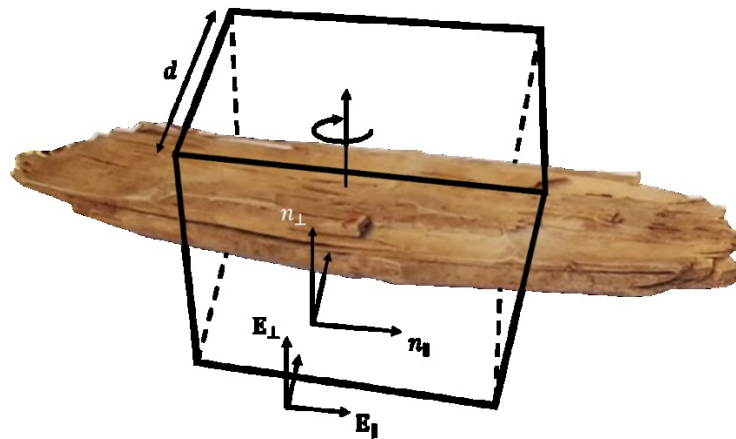
Den nederländska vetenskapsmannen Christian Huygens förklarade på 1600-talet det fysikaliska fenomenet dubbelbrytning. Dubbelbrytande material genererar två vågfronter längs huvudaxlarna i observationsplanet och dessa vågfronter kommer att ha olika dielektricitetskonstant.

Träfibern består av cellulosa, hemicellulosa och lignin, vilka är dielektriskt polära polymerer. Cellulosa-polarisationen i ett elektriskt fält kopplas till förflyttningar av hydroxylgrupper (-OH), metylolgrupper (-CH₂OH) och cellulosamolekyler (Torgovnikov, 1993). Cellulosapolymerer kan vara grupperade i enheter om 800 till 10 000 molekyler i en polymerkedja. Polymerkedjor kommer att ha olika dielektriska egenskaper i olika riktningar (Cambridge Polymer Group, 2004). Cellulosa,

hemicellulosa och lignin är grundmaterialen i en träfiber. Polymerstrukturer och träfiber är mikroskopiska strukturer som bidrar till dubbelbrytande beteende.

Om E-fältet är orienterat såsom i figur 13 så sprids mikrovågorna långsammare längs med träflisen och träfibern (n_{\parallel} -riktningen) och snabbare vinkelrät mot träflisen (n_{\perp} -riktningen). När radiosignaler sprids uppifrån och ner genom slumpmässigt roterad träflis, se figur 12, så kommer de dielektriska egenskaperna vara nästintill identiska med spridningen i n_{\parallel} -riktningen. Lager av träflis har sålunda tre huvudsakliga orienteringar i två plan:

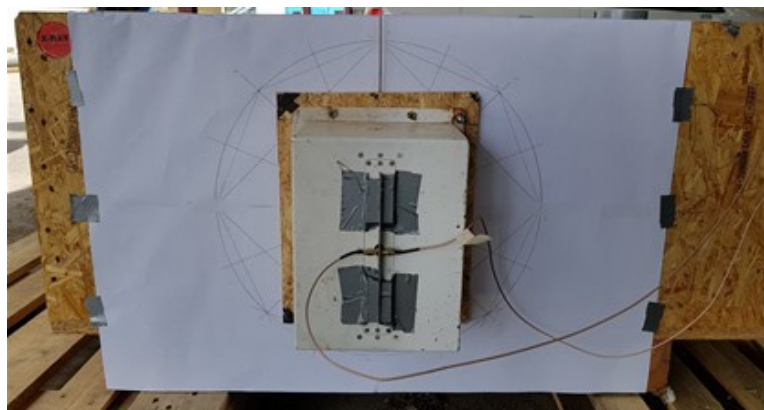
- parallellt med orienteringen för träflislagren,
- vinkelrätt mot orienteringen för träflislagren, och
- i tvärgående observationsplanet uppifrån och ned genom träflislagren.



Figur 13. Träflis med fiberriktningar och E-fältets orientering, vilket skapar den dielektriska anisotropin.

6.3 MÄTNINGAR PÅ PROVLÅDA

Dubbelbrytande egenskaper på träflis har observerats både vid mätningar på lastbil och provlådor. Vid mätningar på provlådor mättes träflisen med antenner i både horisontell och vertikal riktning. I undersökningar av träflis i provlådor användes en roterbar antenn, se figur 14. Antennerna kunde roteras i 0 och 90 grader.



Figur 14. Roterbara antenner användes för mätning av träflis i 104 provlådor. Två mätningar per provlåda gjordes dels i vertikal riktning, dels i horisontell riktning.

Vid mätning av träflis i provlådor med roterbar antenn användes en centerfrekvens på 0,75 GHz. Detta är den normala frekvensen som används i mätprocessen av träflis på

lastbilar för att undvika kraftig absorption av radiosignaler, som framför allt sker i träflis med fukthalt över 50 procent. Totalt mättes 104 provlådor i vertikal och horisontell riktning. Under dessa testmätningar användes bark med fukthalten 22 till 58 procent. Därutöver gjordes tre mätningar på en utvald provlåda med antennerna i parallel och vinkelriktning på kort- och långsidan samt uppifrån och ned, se tabell 9.

Tabell 9. Träflis i provlåda mättes från sidan (kort- och långsida) och uppifrån. Dielektricitetskonstanten bestämda för de parallella och vinkelrät riktningarna.

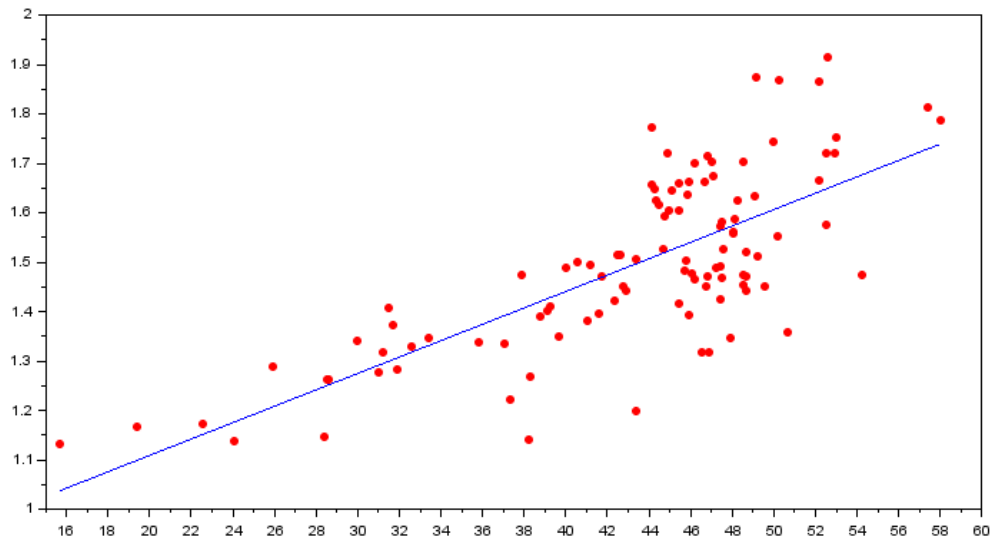
	ϵ'_{\parallel}	ϵ'_{\perp}	k
Långsida	10,54	6,47	1,63
Kortsida	11,07	6,62	1,67
Uppifrån	10,09	9,36	1,08

Tabell 9 visar att ϵ'_{\parallel} (parallell riktning) för sidomätningarna är relativt väl överensstämmande med ϵ'_{\parallel} och ϵ'_{\perp} (tvärgående observationsplan) för mätningarna uppifrån. Kvoten, k , kan beräknas ur:

$$\epsilon'_{\parallel} = k \cdot \epsilon'_{\perp} \quad (21)$$

Mätningarna uppifrån uppvisar viss oregelbunden anisotropi, men ska i detta betraktas som relativt lika i båda riktningarna. Det finns inte heller någon större skillnad mellan mätningarna på provlådans lång- och kortsida. Mindre skillnader är kopplade till inhomogeniteten i träflisens packning och att exakt samma material inte kan mätas.

Utifrån de 104 mätningarna kan en kvot mellan horisontell och vertikal polarisation beräknas. Kvoten, k , varierar mellan $k=1,14$ och $k=1,86$. Om kvoten, k , plottas mot fukthalten erhålls figur 15. Dielektricitetskonstanten ökar med anledning av ökad fukthalt, vilket i sin tur även ökar kvoten, k . En viss spridning erhålls i och med att $\sigma=2$ pe.

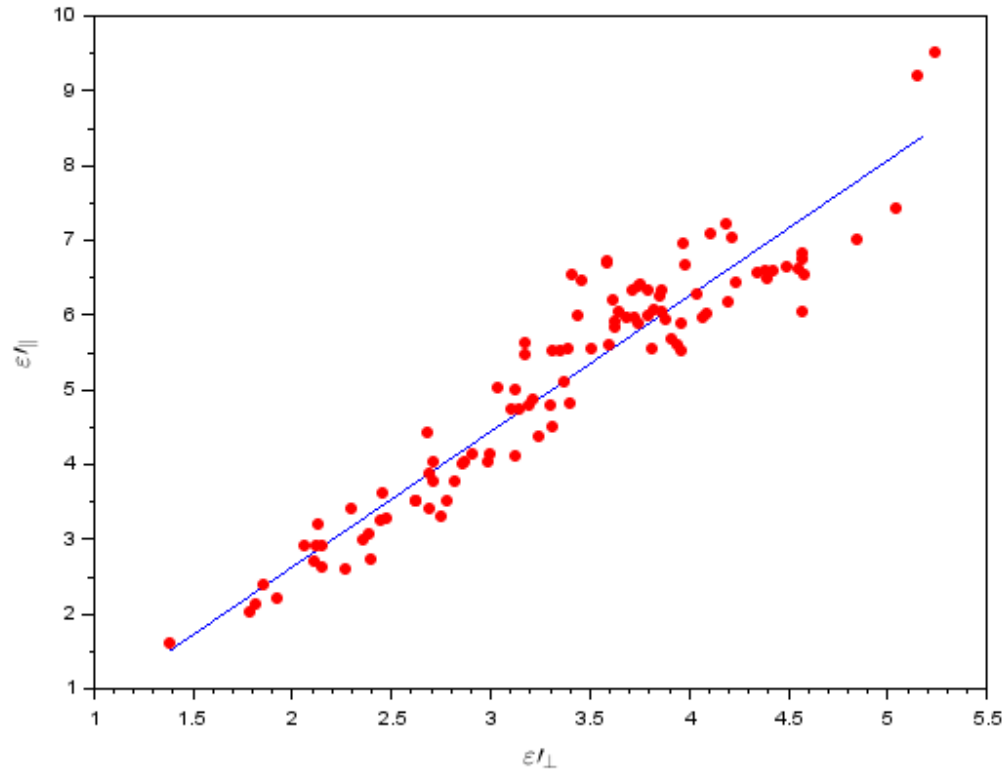


Figur 15. Samband mellan 104 mätningar med dielektricitetskonstant i horisontell, ϵ'_{\parallel} , respektive vertikal polarisation, ϵ'_{\perp} .

Sambandet mellan dielektricitetskonstanten i vertikal och horisontell riktning kan alternativt uttryckas som

$$\varepsilon'_{\parallel} = -1,00 + 1,81 \cdot \varepsilon'_{\perp} \quad (22)$$

Ekvation (22) är utritad med alla 104 mätningarna i figur 16. Ekvationen är endast tillämplig ovanför fibermättnadsgraden, vilken motsvarar en fukthalt >23 procent. Spridningen i figur 16 blir mindre än i figur 15 eftersom felet i referensmätningarna elimineras.



Figur 16. Samband mellan 104 mätningar med dielektricitetskonstant i horisontell, ε'_{\perp} , respektive vertikal polarisation, ε'_{\parallel} .

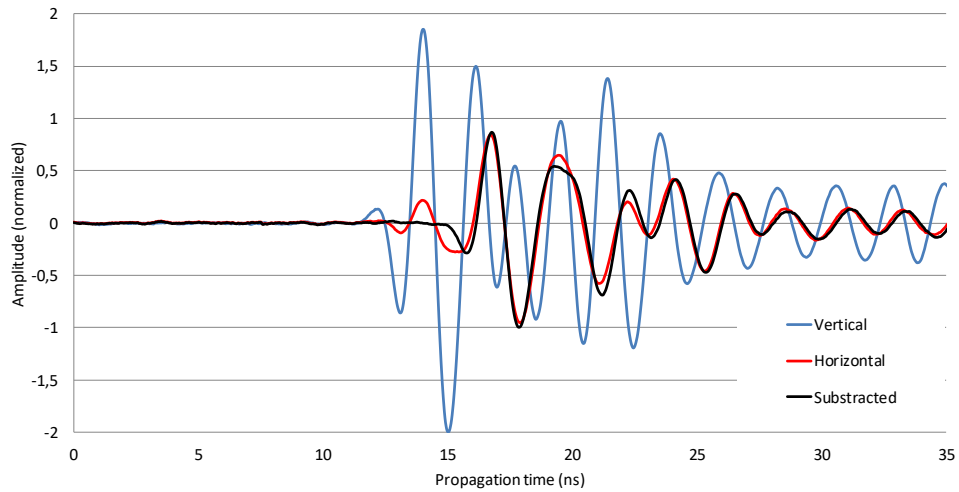
6.4 ANALYS AV DIELEKTRISK ANISOTROPI

Ett lass med träflis i provlådor och lastbilar är ett så kallat dubbelbrytande effektivt medium. Orsaken till de dubbelbrytande egenskaperna är den strukturerade orienteringen av träflis och träfiber i lager. Figur 16 visar ett tydligt och linjärt samband mellan vertikal och horisontell polarisation för olika fukthalter.

En tidig idé var att använda träflisens dubbelbrytande egenskaper för att undersöka träflisens riktning i lastbilar och eventuellt korrigera mätningen på lämpligt sätt. Normalt så lastas en lastbil med träflis uppifrån med en högtippande hjullastare. Därför sorteras träflisen i horisontella lager. Ibland så lastas en lastbil med en utkastare från en huggmaskin, vilket kan resultera i att träflisen orienteras i en 45-gradig vinkel längs med lastbilen. Radiosignalernas två vågfronter kan i detta fall ha något lägre amplitud, men det kommer inte att vara någon tids- eller avståndsskillnad. Sålunda, roterad träflis torde inte påverka mät noggrannheten.

Signalen i den vertikala polarisationsriktningen är mest gynnsam eftersom den har mindre kritisk interferens med den horisontella signalen (se figur 17), den har också högre signal-till-brusförhållande (SNR), och den penetrerar även fuktig träflis på längre avstånd. En nackdel är dock att den vertikala signalens utbredningshastighet är lägre, vilket resulterar i en "kortare" skala, vilket numeriskt ger en något lägre noggrannhet. Samtidigt är den vertikala signalen större och renare, vilket i sig ger högre

noggrannhet. Den vertikala polarisationsriktningen är sålunda att föredra vid mätning på träflis i lastbilar.



Figur 17. Radiosignaler från mätning på flisbil med träbränsle. Vertikal mätriktning genererar blå signal. Horisontell mätriktning genererar röd signal. Den röda signalen (horisontell) kan subtraheras med en normaliserad och skalad vertikal signal, vilket skapar en renare (icke interfererad) svart signal.

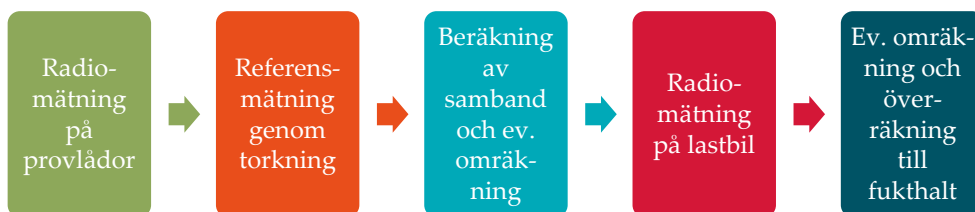
I och med att kunskapen om träflisens dubbelbrytande och anisotropiska egenskaperna upptäcktes i slutet av projektet så var alla ekvationer baserade på den horisontella polarisationen. Det var inte försvarbart att genomföra förnyade mätningar och beräkningar. Ekvationen (19) kan med fördel användas för överräkning mellan mätningar gjorda i horisontell och vertikal polarisation.

7 Tillämpad mätning på lastbil

7.1 FRÅN AX TILL LIMPA

Fukthaltsbestämning från radiomätning på lastbil kräver en bra modell. Den processen som utvecklades under projektet bestod av fem steg (se figur 18):

1. Genomför radiomätning på provlådor med träflis,
2. Genomför referensmätning av träflis, helst genom torkning av hela provlådan för att undvika stickprovspanorproblematik eller genom att ta stickprov i radartvärnsnittet,
3. Beräkna samband mellan radiosignal och fukthalt. Beräkna samband för eventuell överräkning om olika antennpolarisationer har använts,
4. Genomför radiomätning på lastbil med träflis, och
5. Gör eventuell överräkning av radiosignal om olika antennpolarisationer har använts. Beräkna fukthalt från radiosignal.



Figur 18. Kalibrering av över- och omräkningsmodeller samt tillämpning av dem vid mätning på lastbil med träflis.

7.2 LASTBILSMÄTNING

Radiotransmissionsmätning med vertikalt riktade antenner gjordes på lastbilar med fuktig bark. Bark valdes med anledning av dess höga variationer i fukthalt, men också för att alla kalibreringsmätningar var gjorda för detta sortiment. Flyttbara radarsensorer placerades på varsin sida om lastbilen, se figur 19. Därefter genomfördes tre mätningar (fram, mitten, bak) på tre olika lass med träflis (samma lastbil, men med olika lass av bark och olika fukthalt).



Figur 19. Mätuppställning med flyttbara sensorer (rostfärgad) i vertikal riktning.

Dielektricitetskonstanten för horisontell polarisation överräknades från mätningarna i vertikal riktning genom ekvation (22). Därefter beräknades fukthalten från ekvation (13) och (20). Tabell 10 visar data från de tre mätningarna:

- Mätt dielektricitetskonstant i vertikal antenriktning, ϵ'_{\perp} ,
- Överräknad dielektricitetskonstant för horisontell antenriktning, ϵ'_{\parallel} ,
- Beräknad fukthalt med Topp-funktion, MC_{topp} , och sammansatt dielektrisk modell, MC_{CDM} ,
- Standardiserade stickprovsmetod från lastbilar: 6 stickprov à 1 liter med träflis läggs i en hink, träflisen blandas och från blandning tas ett stickprov à 1 liter som torkas och undersöks, $MC_{standard}$,
- Stickprovstagning i tvärsnittet för radiomätningen: 30 stickprov à 1 liter, MC_{RCS} , och
- Slumpvis stickprovstagning för att estimeras genomsnittlig fukthalt i hela lastbilen: 20 stickprov à 1 liter, MC_{random} .

Tabell 10. Radiotransmissionsmätning, beräknad fukthalt (MC), och referensmätning av MC (torkning). RCS=radartvårsnittet. CDM=sammansatt dielektrisk modell.

	Mätt ϵ'_{\perp}	Över- räknad ϵ'_{\parallel}	MC_{topp}	MC_{CDM}	$MC_{standard}$	MC_{RCS}	MC_{random}
1	5,73	9,36	52,7%	54,1%			
	5,38	8,74	51,5%	52,5%			
	5,72	9,35	52,6%	54,1%			
Stdav.			0,7 pe	0,9 pe	-	0,9 pe	0,9 pe
Medel			52,3%	53,6%	55,1%	53,4%	54,0%
Residual _{topp}					-2,8 pe	-1,1 pe	-1,7 pe
Residual _{CDM}					-1,5 pe	+0,2 pe	-0,4 pe
2	3,46	5,27	41,8%	40,9%			
	3,15	4,71	39,6%	38,5%			
	2,95	4,33	37,9%	36,8%			
Stdav.			2,0 pe	2,1 pe	-	5,5 pe	2,9 pe
Medel			39,8%	38,7%	39,6%	39,3%	39,0%
Residual _{topp}					+0,2 pe	+0,5 pe	+0,8 pe
Residual _{CDM}					-0,9 pe	-0,6 pe	-0,3 pe
3	-	-	-	-			
	3,69	5,67	43,3%	42,6%			
	4,79	7,68	49,2%	49,5%			
Stdav.			4,2 pe	4,9 pe	-	3,7 pe	1,5 pe
Medel			46,2%	46,0%	46,1%	43,8%	46,2%
Residual _{topp}					+0,1 pe	+2,4 pe	+0 pe
Residual _{CDM}					-0,1 pe	+2,2 pe	-0,2 pe

Första mätningen på lastbil 3 kunde inte göras på grund av att radioutrustningen inte var rätt kalibrerad. Spridningen mellan olika stickprovsmetoder var liten. Största standardavvikelsen mellan radio- och referensmätning var kopplad till mätning 2 (därefter mätning 3). Alla stickprov sammanföll väl med både Topp-funktion (13) och sammansatt dielektriska modell (20). Lastbilen körde endast ett par hundra meter. Därför skedde ingen transportpackning. Medelfelet i fukthalt, beräknat från sammansatt dielektriska modell (MC_{CDM}) och slumpvis stickprovstagning (MC_{random}) var 0,3 procentenheter. Högre fel för stickprovstagning i tvärsnittet (MC_{RCS}) och för

standardiserade stickprovsmetod ($MC_{standard}$) beror på att det var svårt att matcha verkligt radiotvårsnitt med stickprov.

7.3 ANALYS AV LASTBILSMÄTNING

Vid respektive lastbilmätning togs bark från samma hög och hade ungefär samma fukthalt, densitet, struktur etc. I normala fall undviker leverantörerna att blanda träflis med olika egenskaper. Större variationer i fukthalten på en lastbil kan eventuellt kräva fler än tre mätpunkter för att uppnå hög noggrannhet. Det är dock inte undersökt. Det kan vara så att 2–3 mätpunkter väl representerar hela lasset i och med att varje mätpunkt motsvarar ett medel på 2–3 kubikmeter träflis.

Mätningarna i provlådor (se figur 5) visade att högre densitet ger högre dielektricitetskonstant. Generellt sett så transporteras träflis mer än 30 minuter från depå till fjärrvärmecentral och anses därför vara fullständigt packad samt ha samma densitet vid alla ankomster. Därför torde densiteten ha liten påverkan på noggrannheten, vilket inte heller har kunnat uppvisas vid några mätningar på lastbil. Det har inte heller varit möjligt att belägga att temperaturen har någon påverkan på noggrannheten.

Den största felkällan vid mätningar på provlådor och lastbilar var dagens stickprovsprocess. Idag används en standardiserad metod för stickprov: 6 stickprov à 1 liter med träflis läggs i en hink, träflisen blandas och från blandning tas ett stickprov à 1 liter som torkas och undersöks. Denna metod har brister och antar att den kända eller estimerade noggrannhet, s , i ekvation (19) är samma för alla leverantörer och sortiment. Bark, returträ och GROT (grenar och toppar) har högre variationer av fukthalt än stamved, men även träflis från hugget rundvirke kan ha stora variationer av fukthalt.

Vid mätning av träflis i provlådor togs stickprov från radiosignalens förmodade tvärsnitt. Dessa mätningar resulterade i en noggrannhet på $\sigma=1,5$ –2 procentenheter. Vid mätning av träflis på lastbilar så erhöles en noggrannhet på $\sigma=0,3$ procentenheter. Denna noggrannhet var 5–10 gånger högre än förväntat. Det kan bero på att referensmetoden baserade på många slumpvisa stickprov. Noggrannheten måste vidare undersökas på fler lastbilar.

8 Processmätning på lastbilar

8.1 INSTALLATION AV SENSOR OCH DATAINTEGRATION

Projektet inleddes med mätningar på flera tusen lastbilar (mätningar gjordes även på bilar som inte ingick i försöken, t.ex. plåtbilar med okrossad och oflisad returträ). Syftet var att undersöka en möjlig mätprocess samt se hur sensorerna fungerade i denna relativt tuffa miljö (snö, regn, fukt, solsken, damm, varmt och kallt). Särskilda sensorhus tillverkades, se figur 20–21, vilka monterades på Gävle Energis anläggning vid Johannes bränsledepå. Sensorerna placerades i ena ändan av vågplattan för att möjliggöra skanning av hela lastbilen. Befintliga rör för dragning av fiber, elsladd och kabel kunde användas. Installationen inbegrep även kamera för övervakning och IR-sensor för temperaturmätning. Antennhusen var placerade cirka sextio centimeter från lastbilarna, främst med hänsyn till lastbilarnas backspeglar.



Figur 20. Installation på Johannes bränsledepå av sensorer för radiotransmissionsmätning.

En dator användas för kontinuerlig registrering av data. Mätningar gjordes från november 2016 till april 2017. Registrerade data lagrades lokalt. Via en VPN-uppkoppling kunde systemet styras och kontrolleras på distans. Data kunde också överföras, vilket möjliggjorde omfattande databeräkningar. Installation och integrationsarbetet gick snabbt. Ifall inte befintlig rördragning hade kunnat användas så hade ett mer omfattande installationsarbete behövt göras.



Figur 21. Hopbyggnad av sensor samt dator för övervakning av radarsystem, temperatursensor och kamera.

8.2 VIOL-DATA

En förutsättning för jämförelser mellan mätdata och de referensmätningar som kontinuerligt gjordes på lastbilarna under mätperioden var VIOL-data. VIOL är SDC:s branschgemensamma system för affärer och aktuell information om genomförda leveranser i hela kedjan mellan skog och industri. Här samlas alla mätningar in och bearbetas. Inom ramen för VIOL finns olika funktioner som underlättar redovisning och administration för alla inom skogsnäringen - bland annat informationssystemet VIS, virkesorder, transportredovisning och prisberäkning.

Underlaget för pristräkning för levererat sortiment görs genom stickprovsmätning. Dagens standardiserade stickprovsmetod från lastbilar görs genom att ta 6 stickprov med träflis à 1 liter som läggs i en hink, träflisen blandas och från blandning tas ett stickprov à 1 liter som torkas och undersöks.

Under perioden 2016-12-05 till 2017-04-03 anlände 961 lastbilar med trädbränsle, se tabell 11. Ej sönderdelat trä och bottenaska mättes inte.

Tabell 11. Andelen sortiment som levererades till Gävle Energi på Johannes bränsledepå.

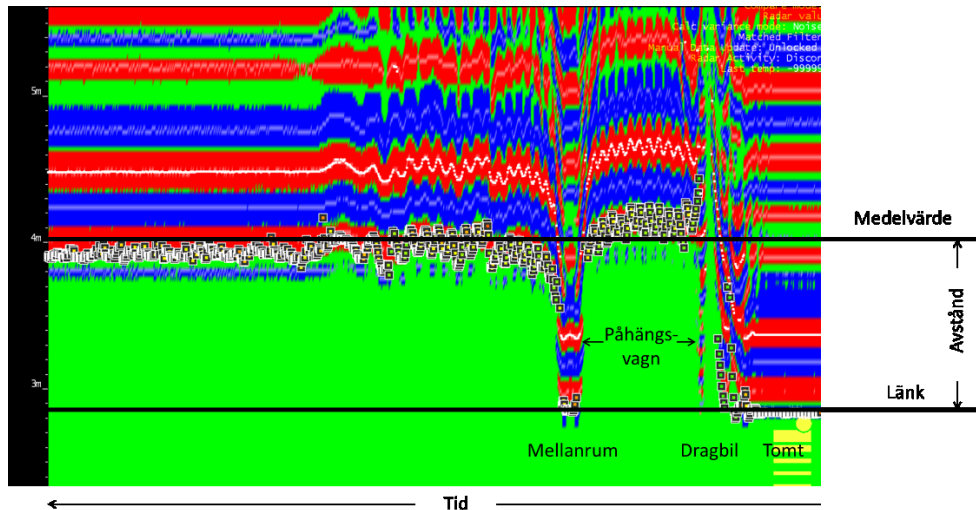
SSTE	Sortiment	Total		Möjligt att mäta	
		Antal	Andel	Antal	Andel
4911	Returträ ej sönderdelat	158	16,4%	-	-
4913	Flisad returträ	6	0,6%	163	20,4%
4914	Krossat returträ	22	2,2%		
4923	Returträ Målat Flisat	2	0,2%		
4924	Returträ Målat Krossat	133	13,8%		
6403	Flisad Grotflis Barr	72	7,5%	72	9,0%
7810	Bottenaska	3	0,3%	-	-
8400	Torrflis Barr	10	1,0%	10	1,3%
8500	Bark Barr	190	19,8%	554	69,3%
8503	Riven Bark Barr	364	37,9%		
	TOTAL	961	100%	799	100%

Stickprovsförfarande görs utifrån 6 liter träflis för respektive ankommande lastbil. Metoden har sina brister dels i att 6 liter inte är direkt representativt för 100 kubikmeter träflis av alla sortiment, dels om det dessutom inte utförs på rätt sätt. Åkerierna såsom Unite, Dalafrakt och Skogsåakarna levererar bark. Dessa anses göra mätningarna på ett tillförlitligt sätt, men det är viktigt att komma ihåg att det är ett femtiotal personer som kör träflis för dessa tre åkerier så det kan finnas stora variationer hur proverna görs.

8.3 RADIOMÄTNINGAR

Radiomätutrustningen mätte dygnet runt med en mätcykeltid på 15 millisekunder, vilket motsvarar 67 mätningar per sekund. När en lastbil passerade sensorn så

triggades systemet och data sparades. En lastbil passerade sensorn på 3–6 sekunder, vilket sålunda genererade 200–400 mätningar per lastbil. En radiosignal ser ut enligt figur 3. Om flera sådana signaler läggs bredvid varandra samtidigt som alla positiva amplitudvärden över ett visst gränsvärde färgas röda och de negativa blåa så erhålls ett så kallat radargram, se figur 22. Grön färg i ett radargram är alla amplitudvärden mellan positivt och negativt gränsvärde, dvs. värdena runt noll.

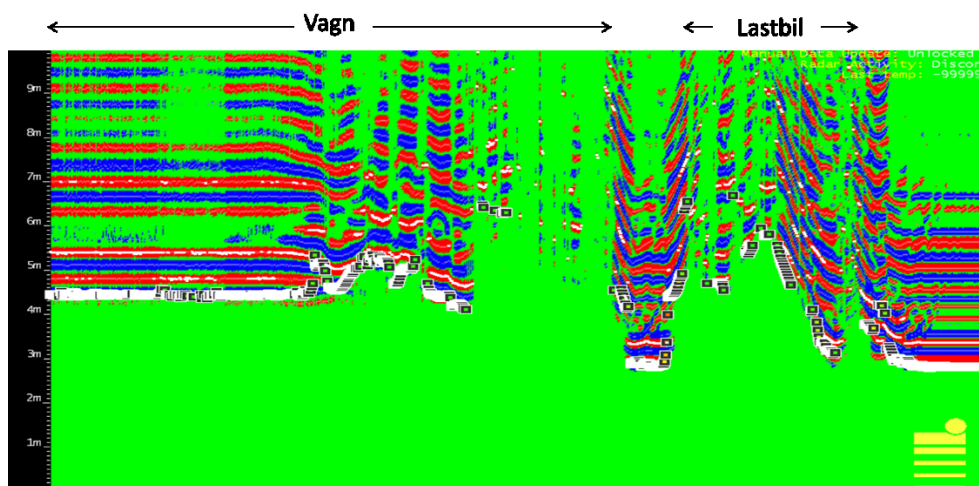


Figur 22. Radargram för visualisering av flera på varandra följande radiosignaler.

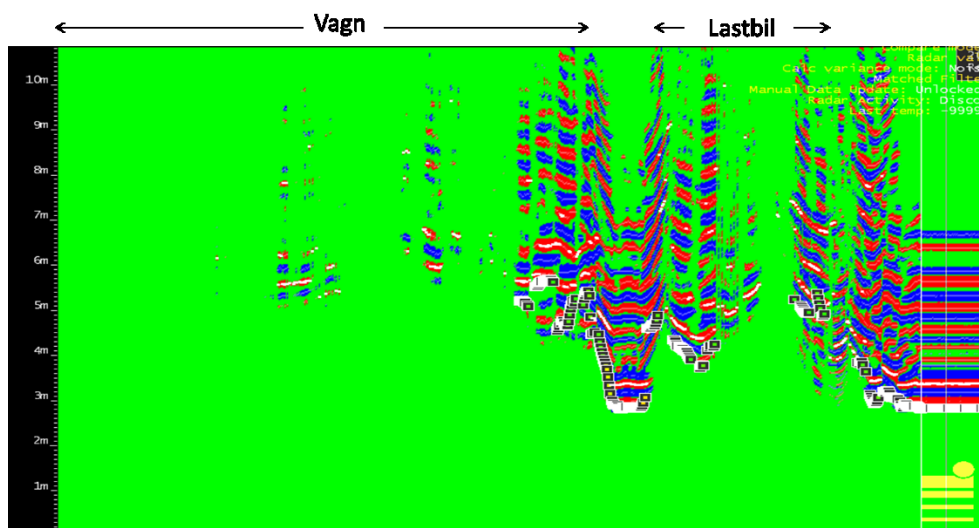
Figur 22 visar mätningar på en lastbil med påhängsvagn och släpvagn som närmar sig radiosensorn (till höger i radargrammet). Det första hacket motsvarar dragbilen, därefter kommer påhängsvagnen och släpvagnen. Vid mätning kommer av tidsskillnad att uppstå, vilket också kan räknas om till en avståndsskillnad. När ingen lastbil står framför sensorn så mäts den så kallade länken i luften (free space). Utifrån de 200–400 mätningarna beräknades ett medelvärde. Alla gränsvärden och mellanrum är borträknade. Det var inte helt trivialt att välja och filtrera data på ett bra sätt.

Utmaningarna ligger i att:

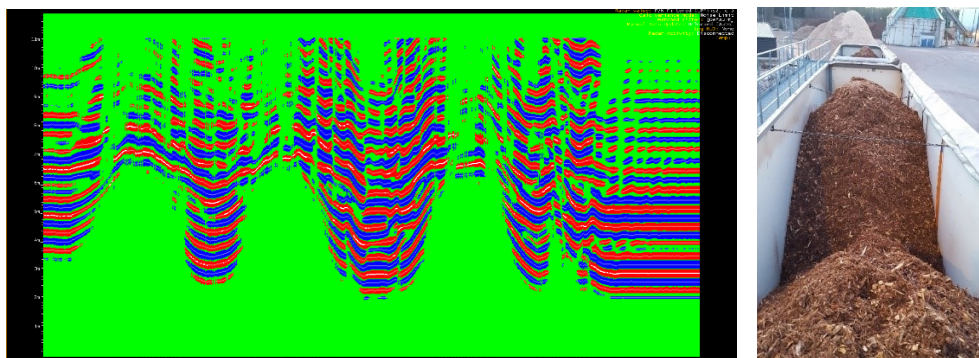
- Mätningar i början och slutet av en vagn tar en snabbare väg än rakt genom lastbilen → avståndet blir för kort,
- Mätningar på träflis med hög fukthalt blev otydliga eller eliminerades helt (se figur 23a-b),
- Mätningar på puckellastad träflis (se figur 23c) tar en snabbare väg än rakt genom lastbilen → avståndet blir för kort.



Figur 23a. Otydligt radargram för fuktig träflis. Det går att hitta mätpunkter.



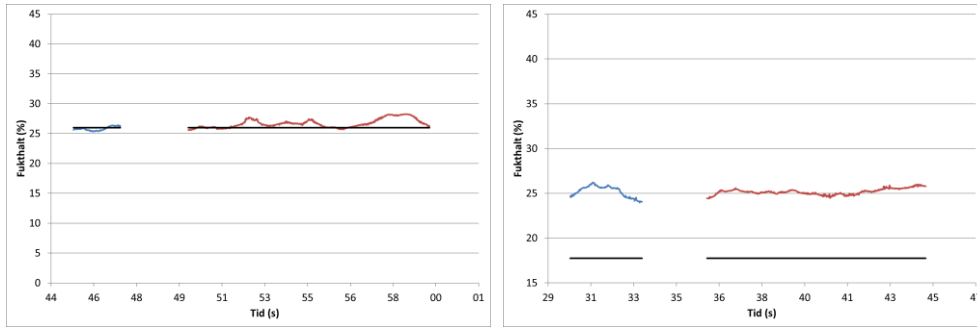
Figur 23b. Oanvändbart radargram för fuktig träflis. Inga mätpunkter kan användas.



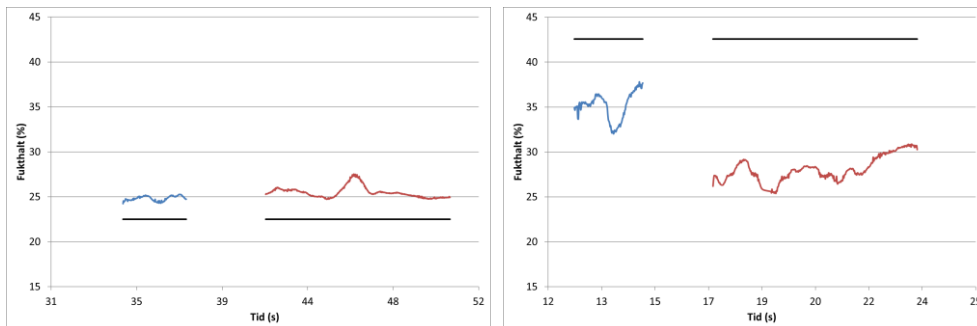
Figur 23c. Radargram för puckellastade vagnar. Träflis med hög fukthalt lastas över hjulparen. Mellan pucklarna går radarsignalen i fri luft.

8.4 RADARMÄTNINGAR OCH RESULTAT

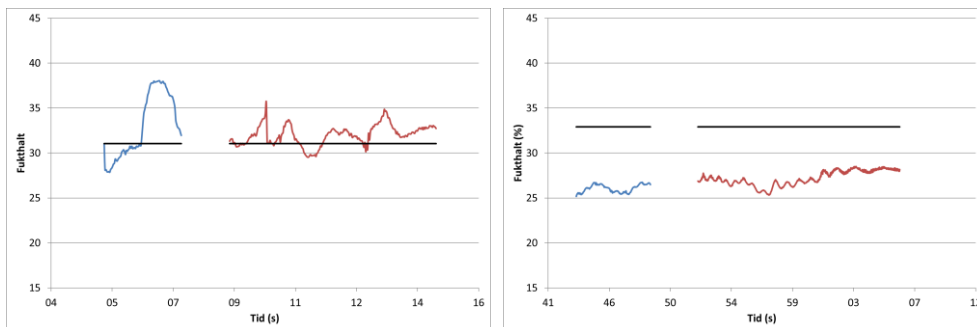
Under mätperioden november 2016 till april 2017 mättes 799 lastbilar med lastvagnssidor av glasfiber (se tabell 11). Av dessa är åtta lastbilar (fram- och bakvagn) utplockade för närmare analys (se figur 24a-h). Dessa var lastade med returträ och fukthalten varierade mellan 15 och 45 procent.



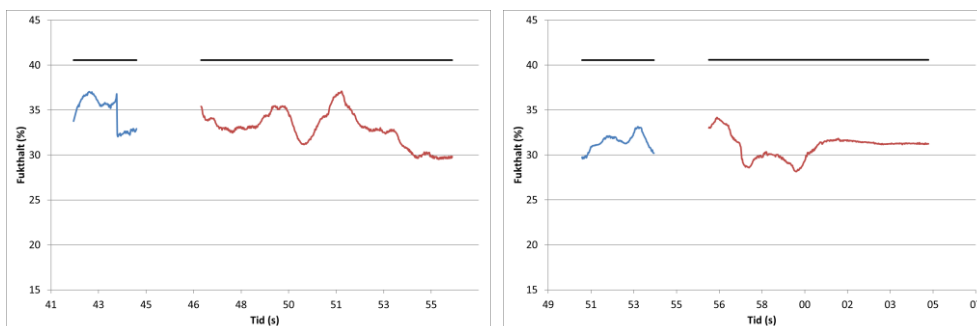
Figur 24 a-b. Bil 1–2. Fuktalt uppmätt genom skanning av lastbil med returträ. Blå = framvagn, röd = bakvagn, svart = referensmätt fuktalt.



Figur 24 c-d. Bil 3–4. Fuktalt uppmätt genom skanning av lastbil med returträ. Blå = framvagn, röd = bakvagn, svart = referensmätt fuktalt.



Figur 24 e-f. Bil 5–6. Fuktalt uppmätt genom skanning av lastbil med returträ. Blå = framvagn, röd = bakvagn, svart = referensmätt fuktalt.



Figur 24 g-h. Bil 7–8. Fuktalt uppmätt genom skanning av lastbil med returträ. Blå = framvagn, röd = bakvagn, svart = referensmätt fuktalt.

Utifrån graferna i figur 24 går det att dra följande slutsatser:

- Standardavvikelse i radiomätningarna blir relativt låga, i medel 1,05 procentenheter (pe) och maximalt, 3,58 pe för framvagn, bil 5 (figur 25e). De låga avvikelseberor på att radiomätningarna i varje mät punkt genererar ett

medel för flera kubikmeter och att varje mätning vara relativt representativ för hela vagnslasten.

- Låga standardavvikelser indikerar att mätning i 2–3 diskreta punkter per vagn torde var möjligt för att fortfarande uppnå hög noggrannhet.
- Avvikelse mellan referensmätt (torkat) stickprov och radiomätning uppgår till, i medel 2,74 pe och maximalt till 15 pe för bakvagn, bil 4 (figur 25d). Variationerna är i enlighet med tidigare erfarenheter och kopplas till problem med stickprovstagningen.
- Fukthalt i fram- och bakvagn brukar vara ungefär lika, men för bil 4 går det att konstatera att fukthalten varierar ca 7 pe. Vanligtvis lastas lastbilarna med trädbränsle av samma sortiment och fukthalt. Det är dock möjligt att ha både olika sortiment och olika fukthalt i fram- och bakvagn. Vid en framtida logistikförändring måste sådana här fall beaktas.

Mätningar på lastbilar i processen förstärker att stickprovsförfarande för bestämning av fukthalten inte är tillförlitlig. Det har noterats fel på 20 procentenheter i enskilda fall. Lastbilarna hade olika hastighet vid mätningarna, vilket påverkade samplingshastigheten och -tid. I figur 24 är samplingstiden ca 15 sekunder, men i vissa fall passerade vissa chauffören sensorerna under 10 sekunder.

8.5 MÖJLIGA PROCESSFÖRBÄTTRINGAR

Processmätningarna gjordes innan det var helt klarlagt hur stickprovets låga tillförlitlighet påverkade resultatet. Om man placerar antennhus lågt och nära lastbilen samt gör referensmätningarna/stickproven så bra som möjligt visar tabell 7 på en potentiell och uppmätt noggrannhet på $\sigma=0,3$ procentenheter. Det är kanske ett för bra värde, men det är rimligt att anta att noggrannhet skulle kunna vara $\sigma=1,5-2$ procentenheter. Uppenbara åtgärder som direkt skulle förbättra mätnoggrannheten är:

- **Lägre placering av sensorer.** På så sätt kommer puckellastad lastbilar att kunna mätas bättre.
- **Närmare placering av sensorer.** Signalstyrkan blir högre vilket möjliggör mätning på träflis med högre fukthalt.
- **Ange om träflisen är puckellastad.** Mätning fokuseras främst på puckels mitt.
- **Mäta maximalt 1–1,5 meter från vagnens kant.** Felaktiga gränsvärdesmätningar undviks.
- **Mäta under längre tid.** Kan mätningen förlängas från 3–6 sekunder till 30–60 sekunder så skulle mycket mera data erhållas. Radiomätsystemet kan också självkalibrera sig själv för att åstadkomma bättre radiosignaler.
- **Skanna jämt och kontinuerligt på stillastående lastbil.** Samplingshastigheten skulle bli jämn och representativ.

9 Processmätning i skopa

9.1 HJULLASTARE OCH SKOPOR

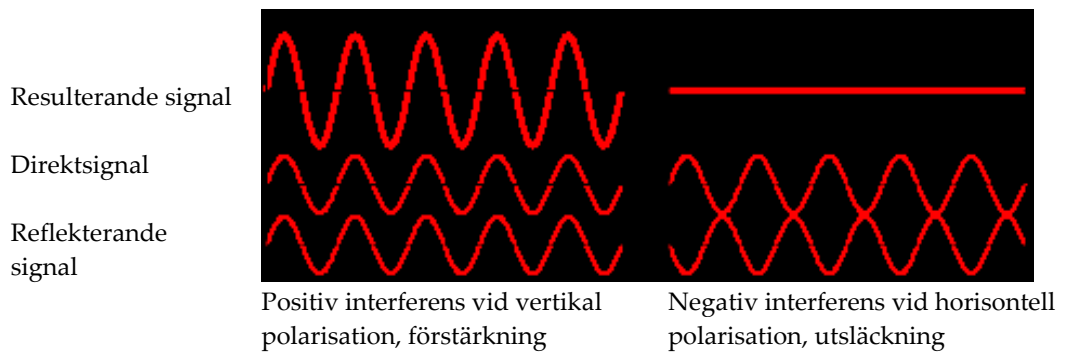
Hjullastare används genomgående på bränsledepåer för lastning samt vid förflyttning och sortering av träflis, se figur 25. Skoporna kan lasta upp emot 15 kubikmeter. Bredden på en skopa är 3–4 meter, vilket är något större än bredden på en lastbil. Det finns uppskattningsvis 500–1 000 hjullastare för hantering av träflis i Sverige. Idag har man möjlighet att mäta vikten av träflisen i skopan, vilket är viktigt vid lastning. Vikten indikerar också fukthalten i träflisen. Om det vore möjligt att mäta fukthalten i en skopa så skulle träflisens fukthalt kunna bestämmas i många delar i logistikkedjan, t.ex. vid sortering av flishögar vid bränsledepåer, vid lastning och vid matning till fjärrvärmepannor.



Figur 25. En hjullastare med en så kallad högtippningsskopa för lastning av en lastbil.

9.2 MÄTNING I SKOPA

I och med att en skopa har ungefär samma bredd som eller något bredare än en lastbil så finns det samma utmaningar som vid mätning på lastbil, t.ex. hög absorption av radiosignaler vid hög fukthalt. Därutöver finns det också risk för utsläckning av radiosignalen och andra interferensfenomen i skopor eftersom de är gjorda av metall. Anledning till att en radiosignal kan släckas ut är att signalen vid horisontell polarisation vänder på sig vid reflektion samtidigt som en oreflekterad signal går rakt fram, se figur 26. Vid vertikal polarisation sker det motsatta: signalen vänder sig inte och kan då förstärkas. Dessa fenomen kräver att gångvägen för signalen i mycket lika. Interferens kommer alltid att ske även om gångvägarna är mycket olika, fast som fördröjd interferens. Fördröjd interferens är inget problem. I en skopa finns risk för reflektion och interferens av både vertikal och horisontell polarisation om antennen måste placeras i skopans hörn.

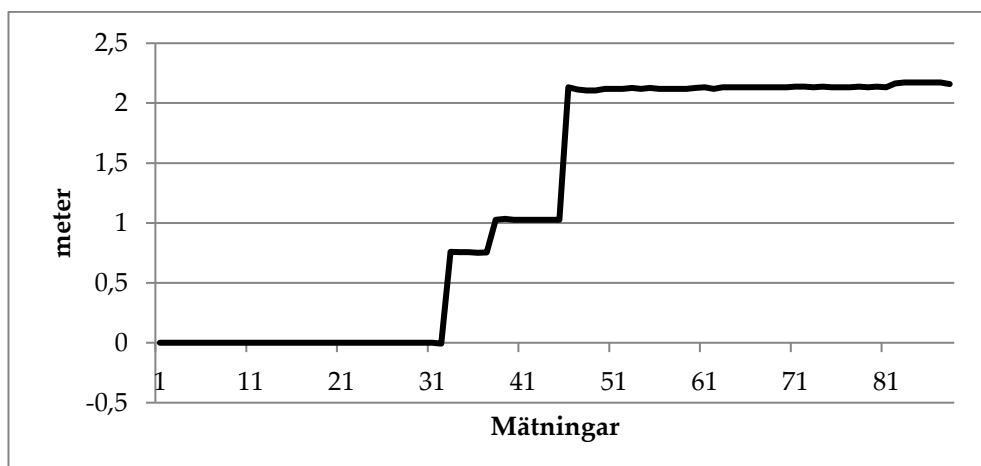


Figur 26. Interferensfenomen av reflektion av olika polarisation.

Syftet med testmätningar i skopa var sålunda att identifiera problem med interferens. Två antennhus placerades i en skopa, se figur 27. Därefter fylldes den successivt med träflis samtidigt som mätningar genomfördes, se figur 28. Mätningarna i figur 28 redovisas som längdförändringar. Vid undersökning av radiosignal så kunde ingen problematisk interferens identifieras. I mätningen förändrades längden på ett förväntat sätt.



Figur 27. Mätning i skopa med antennhus och påfylld av träflis.



Figur 28. Längdförändring vid kontinuerlig mätning och påfyllnad i skopa med träflis.

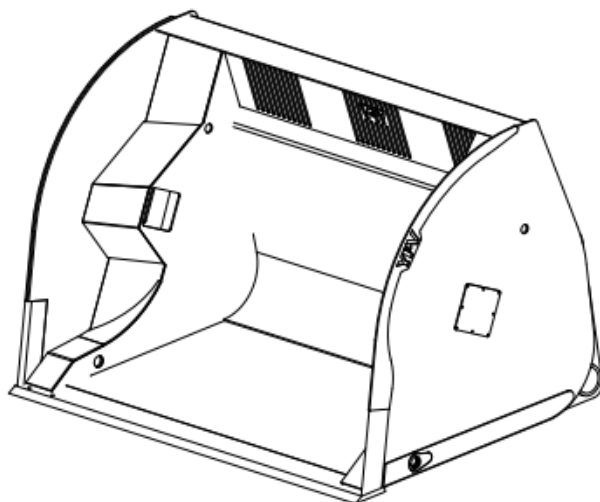
Mätning i skopa kan, till skillnad från lastbilsmätning, göras under lång mättid. Mättiden kan vara flera sekunder, vilket ska jämföras med 15 millisekunder per mätpunkt vid skanning av en lastbil. Längre mättid möjliggör mätning på fuktigare material, men också mätning med högre noggrannhet. Utmaningen med skopmätning

är placering och anpassning av antenner och radiomätutrustning i denna relativt tuffa miljö. Placering av antennhus enligt figur 27 är uppenbart inte tillämplig. Vid implementation på skopa krävs:

- **Nya antenner som är plana**, t.ex. Bowtie-antenner. Dagens Vivaldi-antenner har fördelen att inte skicka ut strålning bakåt. Plana antenner skickar ofta ut signaler bakåt, vilket är negativt utifrån placering eller typgodkännande. Därför krävs forskning och utveckling av antenn och omkonstruktion för att hantera bakåtstrålningen.
- **Placering av antenn och radiomätutrustning** i skopa måste göras på lämpligt sätt. Skopan måste således ha möjlighet till placering av antennerna i sidorna, vilket t.ex. skopan i figur 29a-b har. Radiomätutrustningen kommer att utsättas för stora G-krafter då skopas släpps i backen. Därför måste elektroniken anpassas efter dessa förutsättningen.
- **Integration av radiomätutrustningen.** Till en början kan integrationen göras genom enkel visualisering och med medeltalsberäkning för kortare tidsperiod, t.ex. timme eller dag.



Figur 29a. Skopa med möjlig placering av antenner i sidorna (bild: www.ypv.se).



Figur 29b. CAD-skiss på placering av antenner i skopa.

10 Processmätning i sönderdelning

10.1 TRANSPORTBAND

Transport av träflis sker många gånger på transportband. I de fall transportbandet är gjort av gummi med icke metallisk fiberförstärkning så kan radiomätutrustning används för transmissionsmätning. På Johannes bränsledepå vid Gävle Energi används transportband för transport av träflis till bränslepannan. En möjlig mätimplementation på gummiduken redovisas i figur 30. Mottagare och sändare placeras på var sida om gummiduken och träflisen.



Figur 30. Mätuppställning av radiomätutrustning på transportband.

Syftet med testmätningar på transportband var att klarlägga om träflis med lika fukthalt, men med olika höjder kunde mätas och bestämmas. I detta fall var inte fukthalten känd, vilket innebär att mätt höjd och radiobestämning i absoluta mått kommer att avvika från varandra. Fyra olika geometriska träflisformer skapades, se figur 31a-b. Mottagare och sändare förflyttades i steg om 50 mm längs den geometriska formen. Höjden till träflisen mättes samtidigt som radiomätningen registrerade en längdavvikelse för den mellanliggande träflisen, se figur 32. Relativ överensstämmelse mellan mätt höjd och längdavvikelse var god. I detta fall bortser vi från att det finns en skalskillnad.



Figur 31a. Mätning på olika geometriska former.

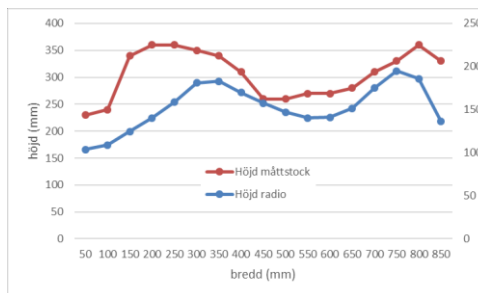


Platå

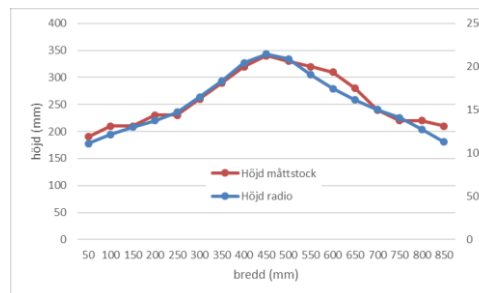


Lutande plan

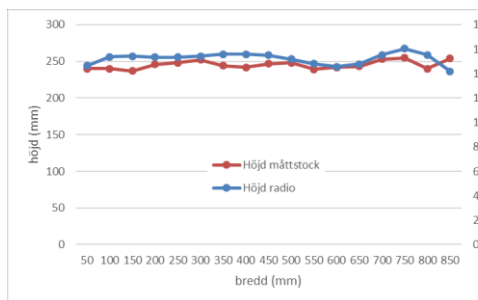
Figur 31b. Mätning på olika geometriska former.



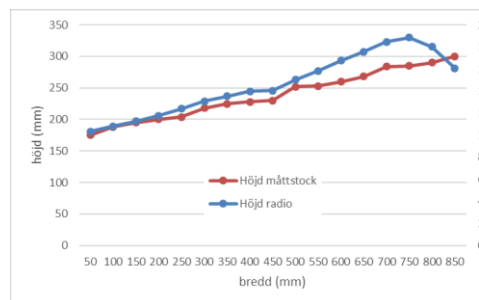
Dubbeltopp



Enkeltopp



Platå



Lutande plan

Figur 32. Mätresultat på olika geometriska former. Måtten är relativa och normaliserade.

Mätning på transportband kräver snabb mätning, t.ex. 50–60 mätningar per sekund. Samtidigt krävs en robust höjdmätare så att höjden på träflisflödet mäts. Höjd måste vara kända för att radioutrustning ska kunna bestämma dielektricitetskonstanten och sedermera fukthalten. En lämplig höjdmätare för detta ändamål är ultraljudssensorn. Ultraljudssensorer fungerar väl i dammiga miljöer och kommer registrera en medelhöjd för träflisen, men hänsyn måste tas till den långa mätcykeln på 100–200 ms. Vid implementation vid transportband krävs att:

- **Sändare och mottagare placeras nära träflisen.** Mekanisk avjämning av träflisflödet krävs för att inte utrustning ska träffas av flisen och gå sönder. Det kan göras med en eller flera gummidukar, se figur 33.
- **Mätningarna kalibreras för aktuell densitet.** Troligtvis är densiteten på träflisen lägre på transportbandet än i lastbilar.



Figur 33. Transportband på Johannes bränsledepå vid Gävle Energi.

10.2 HUGGMASKIN OCH UTKASTARE

Det finns stationära och mobila flishuggare. Stationära huggare används på sönderdelningscentraler och bränsledepåer för att hugga returträ, stockar och annat icke sönderdelat trämaterial. De mobila huggarna används företrädesvis för huggning av grenar och toppar (GROT) i anslutning till hyggen och efter skogsgallring. En mobil huggare är vanligtvis monterad på en flisbil eller traktor. En huggmaskin består i princip av en inmatningsenhet (t.ex. rullar med taggar), en huggkniv, en flisaccelerator och en utkastare.

I jordbruksmaskiner såsom skördetröskor finns det möjlighet att genomföra fukthaltsmätning på säd i en uppfyllnadszon tack vare att sädeskornen förflyttas i skördetröskan med relativt låg hastighet. I en huggmaskin anses detta vara omöjligt eftersom träflisen huggs och kastas ut med hög hastighet. Sättet att mäta fukthalten såsom i skördetröskor hade varit att föredra och en relativt okomplicerad lösning. Projektet har undersökt om träflisens fukthalt kan mätas i utkastaren, se figur 34.



Figur 34. Huggmaskin och en utkastare. Radiomätssystemet är monterat längst ut på själva utkastaren.

Utmaningen med att mäta fukthalten längst ut i utkastaren är att träflisen kommer stötvis, vilket innebär att den har varierande densitet (luft blandat med träflis). Radiomätutrustningen kommer sålunda att mäta variationer både i densitet och i fukthalt. Flisaccelerator, som sitter efter huggkniven, registrerar trycket på passerande flis, vilket är en indikator på hur mycket träflis som förflyttas i huggen och mot

utkastaren. Med hjälp av denna tryckmätning skulle den varierande densiteten från fukthaltsmätningen kunna korrigeras.

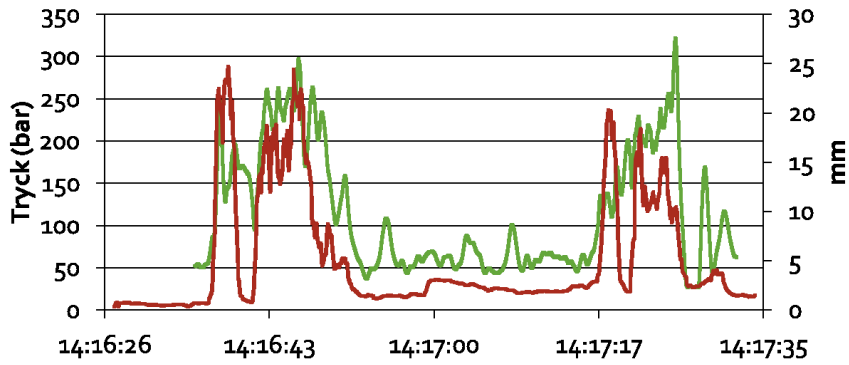
Fyra mätningar gjordes på två trädknippen och två trädstockar, se figur 35. Dessa höggs till träflis (se figur 36). Vid teststillfället var det -15°C och det hade varit mycket kallt i området under lång tid. Därför var allt trämaterial fruset. Radiomätningar har inte samma samband för beräkning av fukthalt (se ekvation 20) för frusen och tempererad träflis. I detta test var det dock principen som skulle testas och inte exakt bestämma relationen mellan radiomätningarna och fukthalten. Mätresultaten från radiomätutrustningen och tryckmätaren visas i figur 37a-d i bar repsektive som längdförändringar.



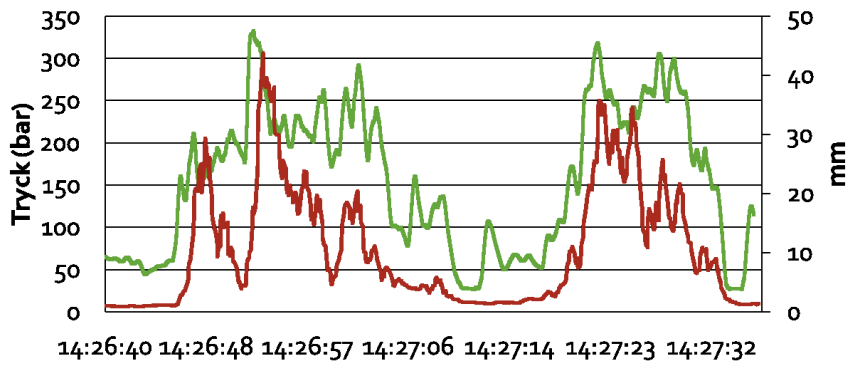
Figur 35. Hög med grenar, toppar och stammar.



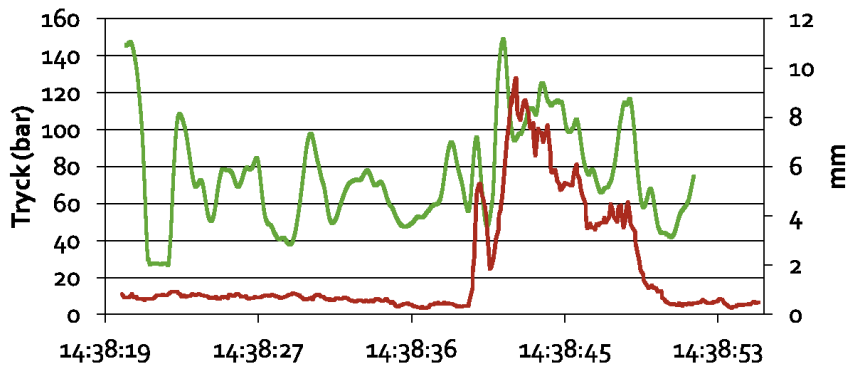
Figur 36. Huggen träflis under projektet.



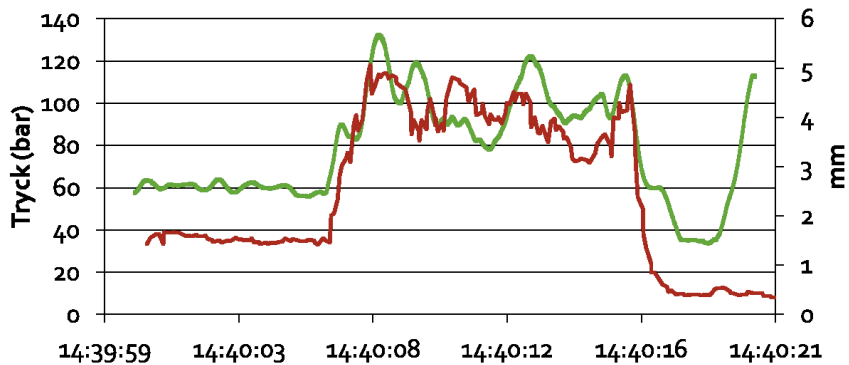
Figur 37a. Trädknippe 1. Grön=tryck i accelerator. Röd=längdförändring radiomätning.



Figur 37b. Trädknippe 2. Grön=tryck i accelerator. Röd=längdförändring radiomätning.



Figur 37c. Träd 1. Grön=tryck i accelerator. Röd=längdförändring radiomätning.



Figur 37d. Träd 2. Grön=tryck i accelerator. Röd=längdförändring radiomätning.

Vid kontrollmätning av träflisen, se figur 38, varierade dielektricitetskonstanten mellan 1,44 och 1,74, vilket motsvarar en fukthalt på 17–20 procent enligt ekvation 20. Det var

dock känt att träflisen var frusen, vilket också bekräftades med de låga värdena på dielektricitetskonstanterna.



Figur 38. Referens mätning på provlåda.

Mätningarna i figur 37a-d är rimliga. Om utkastaren hade varit maximalt fylld med träflis så torde radiomätningarna ha genererat en förlängning på 90–140 mm, vilket är 2–3 gånger längre än genomförda mätningar. Vid mätning på ett enskilt träd blev längdmätningarna mycket kortare, vilket kan förklaras med en lägre densitet (mer luftinnehåll). Radiosignalen varierar dock kraftigt under mätningarna. Resultaten i figur 37a-d har anpassats med glidande medelvärde. Det kvarstår sålunda en del signalbehandling och svar på frågeställningarna:

- kan **maxvärden** användas för bestämning av fukthalt,
- kan **medelvärden** användas för bestämning av fukthalt, eller
- kan **datamining och erfarenhetsdata**, exempelvis normalfördelningskurva, användas för bestämning av fukthalt?

Det finns en korrelation mellan tryckmätningarna i acceleratorm och radiomätningarna. Det finns en förskjutning i tid på 1,3 sekunder mellan respektive mätning. Tryckmätningarna klingar dock av snabbare än radiomätningarna. Projektet har inte utrett hur tryckmätningarna skulle kunna användas för att ta hänsyn till densiteten. Detta måste utredas vidare.

Mätningarna gjordes på fryst material, som har 3–4 ggr lägre dielektricitetskonstant än tempererat material. Mätningar på tempererat material torde ge betydligt större utslag än de som nu genomfördes på fryst material.

Montering av radiomätutrustningen gick mycket bra. Sammanfattningsvis går det att säga att radiomätningarna på träflis fungerade bra även om det krävs vidare forskning och utveckling. Signalbehandling och dataanalys måste utredas vidare. Det är större chans att bestämma fukthalten för en större mängd träflis (flisbil) än att kontinuerligt bestämma fukthalten med hög noggrannhet (kontinuerligt i utkastaren).

11 Diskussion och framtid

11.1 MODELL OCH METOD

Projektet förutsatte att det inte var någon skillnad mellan vertikal och horisontell antennpolarisation eftersom träflisen ansågs vara slumpmässigt fördelad. Det visade sig dock att träflisen skiktat sig i höjded och att träflisen sedd uppifrån har slumpmässig orientering. För bestämning av modellen, enligt ekvation (13) och (20), så gjordes alla mätningar i provlåda med horisontell antennpolarisation. Det visade sig dock att vertikal antennpolarisation är att föredra eftersom den ger en mer robust signal. Förhållandet mellan vertikal och horisontell antennpolarisation är dock linjär, varför det gick att göra en överräkning av modellen från horisontell till vertikal antennpolarisation. Modellen, enligt ekvation (20), är en sammansatt dielektrisk modell där hänsyn tas till volymen av respektive del: bundet vatten, fritt vatten, trä och luft. Modellen kan användas direkt på mätningar utförda på lastbilar med träflis och den uppvisade en hög noggrannhet, $\sigma=0,3$ procentenheter. Modellen får därför betraktas som robust. De stora utmaningarna med modellen är att:

- **Komplettera modellen med anpassningar till olika sortiment.** Genom att anpassa modellen till olika sortiment så skulle en hög noggrannhet erhållas för respektive sortiment.
- **Ta fram en generell och genomsnittlig modell.** Utifrån olika modeller för olika sortiment kan en genomsnittlig modell utvecklas. En generell modell kan medföra snabbare initial implementering av ett mätsystem.
- **En modell eller beslutsträd måste utvecklas för fruset material.** Frusen träflis har en lägre dielektricitetskonstant än motsvarande träflis i tempererat tillstånd. Det krävs mer forskning kring en modell för detektion och bestämning av fukthalten i frusen träflis.

11.2 NOGGRANNHET OCH FELKÄLLOR

En stor utmaning vid kalibrering och utveckling av en radiobaserad fukthaltsmätare är att göra referensmätningarna på rätt sätt. Vid stickprovsundersökningarna måste hänsyn tas till sortiment och leverantör. Det viktigaste är dock att ta tillräckligt många stickprov, ta stickproven på ett repetitivt sätt och ta stickproven väl fördelat över behållarens volym. Det har upptäckts stickprovfel på upp emot 20 procentenheter. Därför har det varit svårt att koppla radiomätningarna på lastbil till de standardiserade stickprovsmätningarna (VIOL-data). De stora utmaningarna med referensmätningarna är att:

- **Eliminera eller starkt reducera felkällorna från stickprov på provlåda.** Det kan t.ex. göras genom att använda mindre provlådor och referensstorka allt innehåll i en låda. Detta kräver i sin tur en särskild mätapparat.
- **Minska felkällorna från stickprov på lastbil.** Det kan göras genom att ta ett stort antal stickprov (25–30 st), väl fördelade över en lastbil.
- **Verifiera att modell framtagen för provlåda fungerar för lastbil.** Projektet verifierade att modellen var robust och hade hög noggrannhet vid mätning på tre lastbilar. Det kvarstår dock att verifiera hur många radiomätningar som behövs för att väl representera fukthalten på en lastbil. Räcker 2–3 diskreta punkter? Hur mycket bättre blir fukthalten bestämd om lastbilen skannas i sid- och höjded?

11.3 PROCESSMÄTNING PÅ LASTBIL

Om referensmätningar av fukthalt görs på ett korrekt sätt så är noggrannheten vid bestämning av fukthalt med radioutrustning $\sigma=1,5-2$ procentenheter. I projektet har det gått att visa att mätning på tre lastbilar hade en medelnoggrannhet på $\sigma=0,3$ procentenheter. Mätning med radio på lastbilar visar på god potential och ska kunna utvecklas vidare. De stora utmaningarna är att:

- **Placera sensorer så nära lastbilen som möjligt.** Det är framför allt en mekanisk processfråga.
- **Skanna tätt, jämt och kontinuerligt under längre tid.** Det är också en mekanisk processfråga.

11.4 PROCESSMÄTNING PÅ TRANSPORTBAND

Utmaningen vid mätning på transportband är träflisens variationer i höjd. Träflisen har ofta en höjd $<0,5$ meter, vilket erbjuder bra mätresultat. Variationerna i höjd kan bestämmas med en ultraljudssensor. Det är möjligt att använda en radiomätutrustning med högre frekvenser för att därigenom minska storleken på utrustningen. En annorlunda frekvens är dock opraktisk vid kalibreringsförfarandet. Vid mätning i processen måste man dock förutse att blandat träflismaterial ska mätas, därför kan en generell fukthaltsmodell användas. Det finns dock gott om plats för placering av antennhus. Mätning med radio på transportband har god potential att kunna utvecklas vidare. De största utmaningarna med transportbandsmätning är:

- **Synkronisering och mätning av träflisens höjd.**
- Se till att träflisen har en **relativt plan yta**. Det kan göras med ett gummihinder/matta.
- **Placera sensorerna lågt** så att ingen smitsignal erhålls, dvs. att radiosignal tar en alternativt kortare väg runt träflisen.

11.5 PROCESSMÄTNING I SKOPA

Vid mätning på hjullastarskopa uppstod inga interferensfenomen. De kunde ha uppkommit vid reflektion mot baksida och nedre sida av skopan. I och med att hjullastarskopor vid träflishantering är stora, upp emot 15 kubikmeter, så borde detta fenomen inte dyka upp så länge placeringen av sensorn är 0,3-0,5 m från kanten. I och med att skopan till dimension överensstämmer med en lastbil (skopan kan vara lite större ibland, 3-4 m) så krävs samma frekvens och kalibrering som för mätning på lastbil. Mätning med radio i skopa har god potential att kunna utvecklas vidare, men kräver en del utveckling. De stora utmaningarna med skopmätning är:

- **Utveckling av antenner** för placering i skopans sida. Det finns antensorter som är plana, men de har nackdelen att sända ut radiosignaler bakåt (åt skopans sida). Därför behövs någon form av dämpningsmaterial för att eliminera denna utsändning. Görs inte denna elimination så fungerar inte antennen. Absorptionsmaterialet bör monteras bakom antennen.
- Placering av radarsystemet i skopa kräver att elektroniken **skyddas mot höga G-krafter**. Det är möjligt med särskild skuminpackning av elektronik.
- **Elektronik, antenner och kablar måste skyddas** på lämpligt sätt i denna utsatta miljö, t.ex. genom inbyggnad i skopan.

- Det krävs **kommunikation med förarhytten** för visualisering eller lagring av mätresultat. Någon form av snabbkoppling krävs för hopkoppling av radarenhet med hytt.

Absorption av mikrovågor är relativt komplicerat eftersom det krävs ett material eller struktur som är speciellt konstruerat för den frekvens eller det frekvensspektrum som används. För bredbandig teknik (UWB) så blir detta särskilt komplicerat eftersom spektrumet är så pass brett. Stealth-teknik för avancerade flyg- och sjöfarkoster är exempel där absorptionsmaterial används. Det finns ferriter (järnbaserade material) och metamaterial, se figur 39.



Figur 39. a) Stealth-teknik på stridsflygplan används för att minska reflektionen av radiosignaler. Absorberande material används på kanter, i hörn och i skarvar. b) Ferritiskt absorptionsmaterial från Holland Shielding system. c) Flerskiktig metamaterial utvecklat av Radarbolaget och Högskolan i Gävle

11.6 PROCESSMÄTNING I HUGGMASKIN

Vid mätning i huggmaskin registrerade radiomätutrustningen den passerande träflisen på ett tillförlitligt sätt. Montering gick bra. I och med att träflisen rör sig i luften är den resulterade mätningen en kombination av densitetsmätning (träflis och luft) och fukthaltsmätning (träflis och vatten). Mätningarna kunde till stor del synkroniseras med tryckmätning från flisaggregatets accelerator. Det är inte utrett med vilken noggrannhet det går att mäta fukthalten i en huggmaskin. Troligtvis är det utmanande att mäta fukthalten kontinuerligt på millisekund- eller sekund-nivå. Däremot är det troligtvis möjligt att estimeras fukthalten sett över en längre tidsperiod eller för en större mängd träflis (delar eller hela lasset på en flisbil). I dagsläget går det inte att uppskatta om en längre tidsperiod innebär 10 sekunder, 1 minut eller 10 minuter. Signalbehandling och dataanalys måste sålunda utredas vidare. De största utmaningarna med mätning i huggmaskin är:

- **Modellera variationer i densitet** så att fukthalten kan estimeras tillförlitligt.
- **Hitta en dataanalysmetod** som estimerar fukthalten över en längre tidsperiod. Troligtvis krävs någon form av normalfördelningsanalys eller liknande.
- På sikt kommer det säkert att **finnas installationstekniska utmaningar**.
- Träflisen kommer emellanåt att vara **frusen vid verklig mätning**. Samband och detektion för frusen träflis måste undersökas vidare.

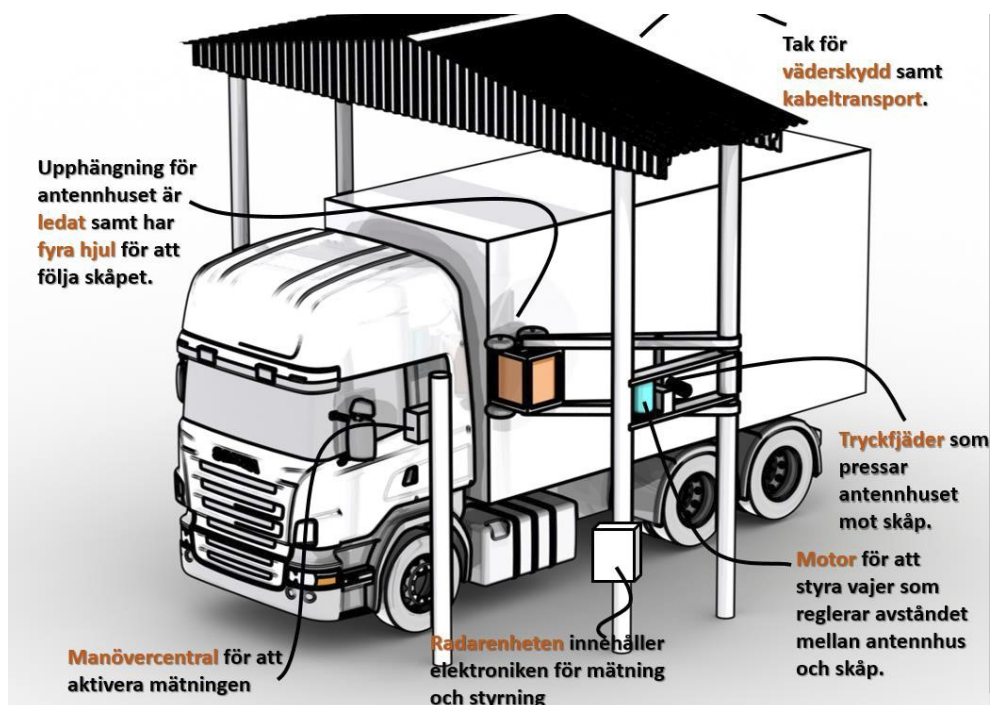
11.7 FRAMTIDA MÅLBILD OCH REFERENSINSTALLATION

Processmätning på lastbil med fast sensor placerad 60 cm från lastbilen, enligt figur 16, påvisade ett antal brister som påverkade radiosignalen, t.ex. låg signal vid hög fukthalt i träflis, smitsignal vid puckellastning. Vid de mer kontrollerade mätningarna, som gjordes med antennhus placerade dikt an mot lastbilen enligt figur 15, påvisades en

god potential gällande radiosignal och mätnoggrannhet. Utifrån erfarenheterna från genomförda mätningar på lastbilar kan man tänka sig tre mekaniska installationer:

1. **Skanning av lastbil när lastbilen rör sig**, se figur 40. Fördel: inga rörliga delar behövs, relativt enkel installation. Nackdel: kort mättid (10-15 sekunder), risk för påkörning, olika hastighet/samplingstid, kräver avancerad styrning och positionering av sensor,
2. **Skanning av stillastående lastbil med sensor som rör sig längs lastbilssidorna**, se figur 41-42. Fördel: lång mättid (30-60 sekunder), minskad risk för påkörning, jämn hastighet/samplingstid. Nackdel: installation mer komplicerad, mer känslig för väder i markplan (rälsgående), kräver avancerad styrning. Om travers (räls ovan mark) används så minskar risken för väder och yttre påverkan,
3. **Mätning i ett antal diskreta punkter**, se figur 15. Fördel: lång mättid (30-60 sekunder), minskad risk för påkörning, enklaste installationen (ställdon), snabbt från idé till installation, enkel styrning. Nackdel: få mätpunkter, men det går inte att utesluta att 2-3 mätpunkter kan vara representativt för hela lasset. Mätning i diskreta punkter torde även kunna göras med skannande mätutrustning enligt figur 40-42.

De tre alternativa installationerna bör ha fysiska skydd i sida för minskad risk för påkörning. Det görs lämpligtvis genom montering av guiderör i markplan, se figur 42. Guiderören gör att lastbilen inte kan köra snett eller ligga i fel sida. Väderskyddet kan både fungera som skydd mot väder (t.ex. regn, snö och starkt solsken) och reducere av radiostrålning (EMC). Det senare kan vara viktigt vid typgodkännande enligt EU:s standarder för utsändning av radiostrålning, ETSI (European Telecommunications Standards Institute).



Figur 40. Skanning av lastbil under rörelse.



Figur 41. Skanning av stillastående lastbil. I detta fall lastbilstvätt.



Figur 42. Skanning av stillastående lastbil. I detta fall en röntgenskanner med guiderör. Guiderören gör att fordonet inte kan köra snett eller ligga i fel sida.

12 Referenser

- Cambridge Polymer Group, "The Theory of Birefringence", 2004,
http://www.campoly.com/files/4213/7122/7769/014_New_birefringence_theory.pdf
- K. Lichtenecker, "Die Dielektrizitätskonstante Natürlicher und Künstlicher Mischkörper," *Phys. Z.*, 27, 1926, pp. 115-158.
- P. Ottosson, D. Andersson, and D. Rönnow, "Time-Domain Measurement for Determination of Birefringence Properties of Wood Chips," 2018a, to be published.
- P. Ottosson, D. Andersson, and L. Fridh, "Radio transmission measurement of moist wood chips," 2018b, to be published.
- K. Roth, R. Schulin, H. Fluehler, and W. Attinger, "Calibration of Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement Using a Composite Dielectric Approach," *Water Resour. Res.*, 26, 1990, pp. 2267-2273.
- G.C. Topp, J.L. Davis, and A.P. Annan, "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines," *Water Resour. Res.*, 16, 1980, pp. 574-582.
- G. Torgovnikov, "Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials, Springer Series in Wood Science", Springer-Verlag, 1993.
- J. Nyström and E. Dahlquist, "Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants—a review", *Fuel* Vol. 83, pp. 773–779, 2004.
- A.M. Paz, S. Trabelsi, S.O. Nelson, and E. Thorin, "Measurement of the Dielectric Properties of Sawdust Between 0.5 and 15 GHz," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, No. 10, pp. 3384 – 3390, Oct. 2011.