

# Potentialen hos mikro- och radiovågsbaserad mätning av fukthalt och andra virkesegenskaper

Systemanalys och litteratursammanställning

Kari Hyll, Anders Eriksson

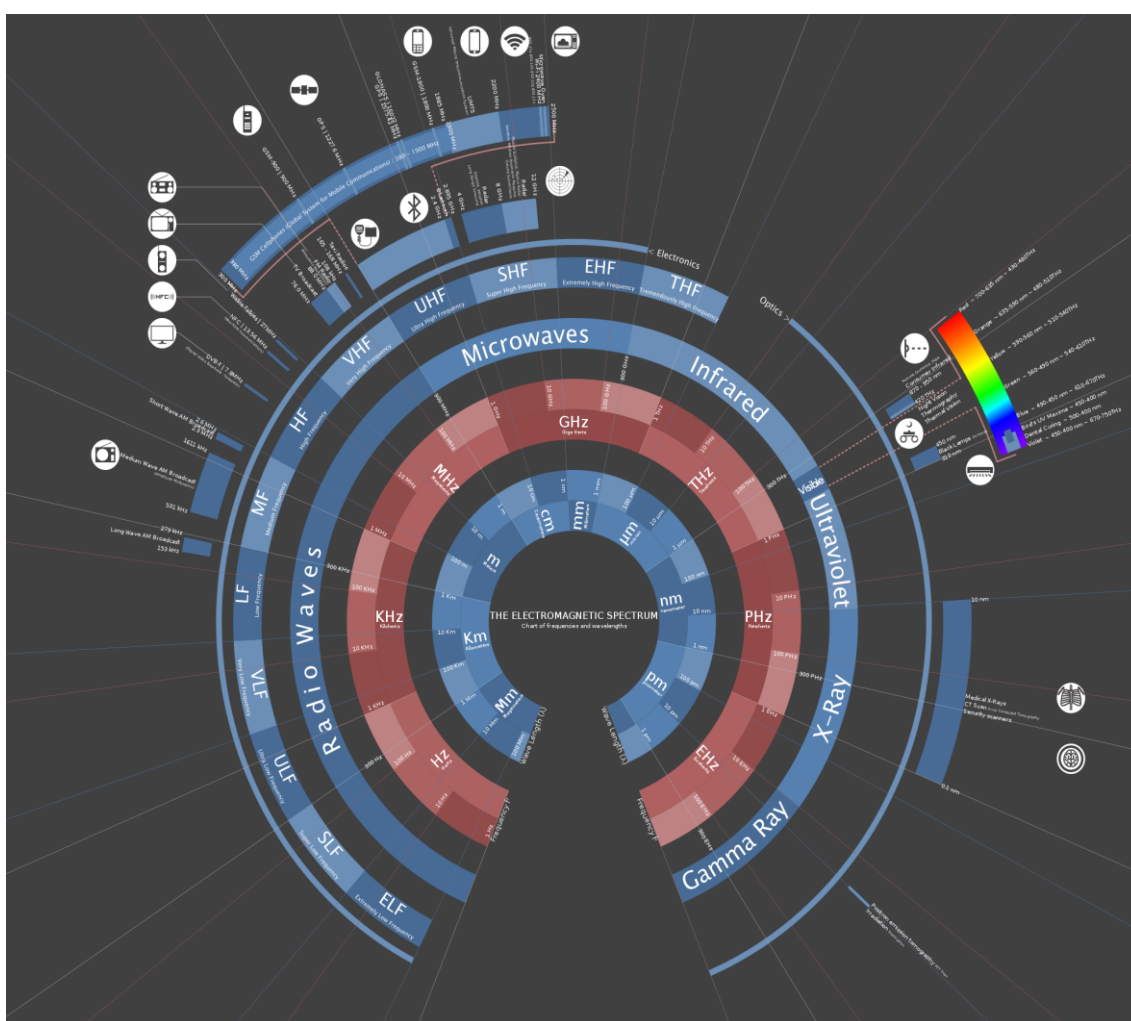


Bild: Det elektromagnetiska spektrat. Källa: Wikimedia Commons

# Innehåll

Förord .....	4
Sammanfattning.....	5
Summary .....	7
<b>Introduktion till mikro- och radiovågor .....</b>	<b>9</b>
Frekvensområden .....	9
Komponenter och bandbredd .....	9
Interaktion mellan mikro- och radiovågor och material.....	10
<b>Egenskaper hos den elektromagnetiska vågen.....</b>	<b>10</b>
<b>Penetrationsdjup .....</b>	<b>11</b>
<b>Signalens färd i materialet.....</b>	<b>11</b>
<b>Anisotropi hos materialet.....</b>	<b>12</b>
<b>Dielektriska egenskaper hos materialet.....</b>	<b>12</b>
<b>Spatial upplösning, kontrast och storlek.....</b>	<b>13</b>
<b>Fukt och fukthalt.....</b>	<b>14</b>
<b>Salthalt och askhalt.....</b>	<b>14</b>
<b>Fryst material .....</b>	<b>14</b>
<b>Systemanalys av mikrovågsbaserad fukthaltsmätning av biobränsleflis för fjärrvärmesektorn .16</b>	<b>16</b>
Bakgrund.....	16
Syfte och avgränsningar.....	17
Metod .....	18
Teknikbeskrivning .....	18
<b>Mätning av flis på lastbil.....</b>	<b>19</b>
<b>Mätning i skopa på lastmaskin.....</b>	<b>19</b>
<b>Stickprovsmätning i mätlåda .....</b>	<b>20</b>
<b>Kontinuerlig mätning på transportband .....</b>	<b>21</b>
Analys.....	21
<b>Teknikens erbjudande – Hur påverkas dagens biobränslesystem .....</b>	<b>21</b>
<b>Möjligheter med bättre information.....</b>	<b>22</b>
<b>Plats i tillförselkedjan .....</b>	<b>24</b>
<b>Branschens perspektiv .....</b>	<b>26</b>
Större värmeverk (>50 MW).....	26
Mindre värmeverk (<5 MW).....	27
Biobränsleterminal .....	27
Skogsbränsleföretag .....	27
Massabruk .....	28
<b>Marknadspotentialen .....</b>	<b>28</b>
Diskussion .....	29
Slutsatser .....	29
<b>Sammanställning av tidigare erfarenheter av mätning av andra virkesegenskaper än fukthalt med mikro- eller radiovågor .....</b>	<b>30</b>
Syfte .....	30
Material .....	30
Litteratursammanställning.....	31
<b>Mätning av diameter under bark .....</b>	<b>32</b>
<b>Densitet .....</b>	<b>32</b>
<b>Kvistposition- och storlek .....</b>	<b>35</b>
<b>Fiberorientering och toppbrott .....</b>	<b>37</b>
<b>Röta .....</b>	<b>39</b>
<b>Styrkeegenskaper .....</b>	<b>40</b>
<b>Virkeskomponenter .....</b>	<b>41</b>
<b>Kemiska egenskaper .....</b>	<b>43</b>
<b>Storleksfördelning.....</b>	<b>44</b>

<b>Massflöde</b> .....	44
<b>Frusenhet och snöväthet</b> .....	45
Diskussion .....	45
<b>Enskilda egenskaper</b> .....	45
<b>Tillämpningsområden</b> .....	48
<b>Kommersialisering och användning</b> .....	49
Slutsatser .....	50
<b>Privat kommunikation</b> .....	<b>51</b>
<b>Referenser</b> .....	<b>52</b>
<b>Appendix</b> .....	<b>56</b>
Frekvensband i mikro- och radiovågsområdet .....	56
Värden på de dielektriska egenskaperna hos virke.....	56



Uppsala Science Park, 751 83 Uppsala  
skogforsk@skogforsk.se  
skogforsk.se

---

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts 21 december 2021 av Maria Nordström, Bitr. programchef. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering den 5:e april 2022.

Redaktör: Hanna Andtbacka, hanna.andtbacka@skogforsk.se  
©Skogforsk 2022 ISSN 1404-305X

# Förord

Den här rapporten har genomförts som en del av projektet *VELOX – Snabb fukthaltsmätning av trädbränslen i hela tillförselsprocessen*, som finansierats av Energimyndigheten.

Vi vill tacka alla som bidragit med kunskap och inspel till de två delstudierna i denna rapport. Särskilda tack går till Patrik Ottosson (Radarbolaget), Daniel Andersson (Radarbolaget) och Daniel Rönnow (Högskolan i Gävle).

Kari Hyll och Anders Eriksson

Januari 2022

# Sammanfattning

Det finns ett behov av förbättrade metoder för mätning av kvalitetsegenskaper hos rundved och sönderdelat skogsbränsle. Metoder baserade på mikro- och radiovågor kan ge snabb och ofarlig mätning av inre egenskaper, möjligheten till kompakt och smidig mätutrustning, samt möjligheten att mäta genom stora volymer bulkmaterial, exempelvis skäppor och travar. Detta belyses i två delstudier i denna rapport.

Den första delstudien analyserade hur implementering av en mikrovågsbaserad teknik för snabb fukthaltmätning av olika skogsbränslesortiment skulle påverka aktörerna i värdekedjan för bränsle. Flisade biobränslen är heterogena med stora variationer i kvalitet och form. Idag saknas det korrekt och tillgänglig information på många ställen i försörjnings- och hanteringskedjan. Bristen på information skapar osäkerhet och försvårar en optimal planering kring hantering, logistik, lagring och kvalitet.

Analysen bygger på intervjuer med olika aktörer samt experter på enskilda moment i kedjan. Resultaten är baserade på ett scenario där utrustningen har ett konkurrenskraftigt pris, är anpassade för det logistiska flödet och kan mäta tillfredsställande på både ofruset och fruset material.

Av analysen framkommer att tekniken skulle kunna öppna upp för tre stora möjligheter:

1. Bättre affärsmässiga beslut i biobränslesystemet, för att på så sätt öka den interna effektiviteten, sänka kostnaderna eller minska förlusterna
2. En rättvisare biobränsleaffär med ökad transparens
3. Den dörr som öppnas mot framtidens mer automatiska mätförfarande där dagens manuella mätning byts ut.

Den andra delstudien har genom en litteratursammanställning undersökt potentialen för att använda mikro- och radiovågor vid mätning av andra egenskaper än fukthalt, hos såväl sönderdelat skogsbränsle som andra virkesbaserade sortiment och produkter. Fokus var studier eller användarfall som var max 20 år gamla och som utfört mätningar på sågade trävaror (enskilda plankor), stockar (enstaka eller travade) och flis (prover eller bulk mängder/skäppor).

För sågade trävaror har torr- och rådensitet, kvistposition, fiberorientering, och styrka (MOE, MOR) mätts. Mikrovågor har använts i större utsträckning än radiovågor. Mätningen av densitet, fiberorientering och kvistposition tycks fungera väl i labb, medan intrycket är att mätningen av styrkeegenskaper fungerar måttligt. Dessa egenskaper kan även mätas relativt väl med röntgenbaserade skanners. Fördelen med mikro- eller radiovågsbaserad mätning är den lättare kan ge fuktkvotsinformation, jämfört med röntgenskanners, samt potentiellt mäta genom stackade eller paketerade trävaror.

För enskilda stockar har torr- och rådensitet, fiberorientering, kviststruktur, röta, kådhalt, kärnvedsandel och diameter under bark undersökts med antingen mikro- eller radiovågsbaserad utrustning. Mätningen av densitet, fiberorientering och kvistar tycks fungera relativt väl under laborieförhållanden, medan övriga egenskaper kräver ytterligare studier innan slutsatser kan dras. För mätning av enskilda stockar vore fukthalt och rötförekomst de mest intressanta parametrarna att utveckla vidare, då röntgenmätningar i dagsläget inte kan mäta dessa väl. I litteratursammanställningen hittades inga studier där travade stockar hade mätts med mikro- eller radiovågor. Här finns en outnyttjad potential att mäta direkt i flödet då stockar ofta transporteras i trave, framför allt för fukthaltmätning men potentiellt även för densitet och kemiska egenskaper.

Ett mindre antal studier har mätt på sönderdelat skogsbränsle. Här har främst radiovågsbaserad teknik använts, för att undersöka salthalt samt klassa barkhalt, kärnvedsandel och trädslagsblandning. Det finns även kommersiella mikrovågsbaserade produkter för flisflödesmätning vid exempelvis transportband eller matarskruv. Den studie som undersökte salthalt lyfte fram att askhalt potentiellt skulle kunna mätas på liknande sätt som salthalt. Då det idag saknas metoder för att mäta askhalt på bulk mängder av flis vore detta av stort intresse. Betydligt mer arbete krävs dock för att avgöra om dessa mätprinciper är användbara i praktiska situationer, exempelvis med realistiska blandningar av trädslag och när materialet är fruset.

Nästan alla studier har skett i laboratoriemiljö, och få studier har kommenterat hur metoden skulle fungera under produktionsförhållanden. Produktionsförhållanden kan exempelvis innebära att mätningen måste gå snabbt, vara enkel att genomföra, okänslig för vibrationer och väderlek, kunna hantera behov av fukthalts- och densitetsinformation, och fungera på fruset virke. En studie beskriver förutsättningar för att mikrovågsmätning ska kunna användas i skördaraggregat, men rapporterar inga mätningar från praktisk drift. En annan studie beskriver testmätningar från mynningen av en flishugg, där miljöförhållandena inte utgjorde ett hinder, men där mätningarna inte skedde över en längre period.

Sammanfattningsvis finns betydande potential i mikro- och radiovågsmätningar av virkesegenskaper, men låg kommersialiseringsgrad inom många tillämpningar. En förklaring kan vara den komplexa signalbehandlingen och -analysen. De flesta kommersiella utrustningarna mäter fukthalt hos sågade trävaror eller flis. Förutom dessa finns det mikrovågsbaserad linjeskannerutrustning för detektion av kvistar i sågade trävaror och markradarsystem som marknadsförs för detektion av röta och håligheter i stående träd. Den nuvarande låga kommersialiseringsgraden gör det intressant att följa de nya mikrovågsbaserade fukthaltmätutrustningar för hjullastarskopa, transportband och referensmätningar som nu närmar sig marknaden. Slutligen behövs ökad kunskap om varför ny mätteknik för virke antingen upphör att användas efter en tid eller etablerar sig.

# Summary

There is a need for improved methods for measuring the quality properties of roundwood and chipped forest fuel. Methods based on micro- and radio waves can provide fast and harmless measurement of internal properties, compact and flexible measuring equipment, as well as the possibility of measuring through large volumes of bulk material, such as chip trucks and roundwood stacks. This is surveyed in two sub-studies in this report.

The first sub-study analysed how the implementation of a microwave-based technology for rapid moisture content measurement of different forest fuel assortments would affect the players in the value chain for forest fuel. Chipped forest fuels are heterogeneous with large variations in quality and shape. Today, accurate and accessible information is lacking in many places in the supply and handling chain. The lack of information creates uncertainty and complicates optimal planning around handling, logistics, storage and quality.

The analysis is based on interviews with various actors and experts on individual elements in the value chain. The results are based on a scenario where the equipment has a competitive price, is adapted to the logistical flow and can measure satisfactorily on both unfrozen and frozen material.

The analysis shows that the technology could open up three major possibilities:

1. Better business decisions in the biofuel system in order to increase internal efficiency, reduce costs or reduce losses
2. A fairer biofuel deal with increased transparency
3. The door that opens towards the more automatic measurement procedure of the future where today's manual measurement is replaced.

The second sub-study has, through a literature review, investigated the potential for using micro- and radio waves in measuring properties other than moisture content, on chipped forest fuel as well as other wood-based assortments and products. The focus was on studies or user cases that were a maximum of 20 years old and where measurements were performed on sawn wood products (individual lumber), logs (single or stacked) and wood chips (samples or bulk quantities).

For lumber, the properties dryness, rot, density, twig position, fibre orientation, and strength (MOE, MOR) have been measured. Microwave-based equipment has been used, rather than radiowave-based. The measurement of density, fibre orientation and twig position seem to work well under laboratory conditions, while the impression is that the measurement of strength properties works moderately. These properties can also be measured relatively well with X-ray-based scanners. The advantage of measurements based on micro- or radio waves is that it can simultaneously provide moisture ratio information, unlike X-ray scanners, and potentially measure through stacked or packaged lumber.

For individual logs, the properties dryness, rot, density, fibre orientation, twig structure, rot, resin content, heartwood content and diameter under bark have been investigated with either micro- or radio-wave based equipment. The measurement of density, fibre orientation and twigs seem to work relatively well under laboratory conditions, while other properties require further studies before conclusions can be made. For the measurement of individual logs, the moisture content and the presence of rot would be the most interesting parameters to develop further, as X-ray scanners cannot currently

measure these well. In the literature review, no studies were found where stacked logs had been measured with micro- or radio waves. Trials suggest that micro- or radio waves could be used to measure on entire roundwood stacks, implying an untapped potential to measure moisture content and potentially also for density and chemical properties directly on timber trucks.

A small number of studies have measured chipped forest fuel. Here, mainly radio wave-based technology has been used, to investigate salinity and classify bark content, heartwood content and tree species mixture. There are also commercial microwave-based products for chip flow measurement at, for example, conveyor belts or feed screws. The study that examined salinity highlighted that ash content could potentially be measured in a similar way as salinity. As there are currently no methods for measuring ash content on bulk quantities of wood chips, that would be of great interest. Significantly more work is required, however, to determine whether these measurement principles are useful in practical situations, for example with realistic mixtures of tree species and when the chips are frozen.

Almost all studies have taken place in a laboratory environment, and few studies have commented on how the micro- or radio wave measurements would work in production environments. Production conditions can, for example, mean that the measurement must be fast, easy to carry out, insensitive to vibrations, able to handle the need for moisture content and density information, and work on frozen wood. One study details requirements for microwave sensors in harvester heads but does not report any practical evaluation. Another possible application for micro- or radio wave equipment would be at woodchipper outflows, to measure moisture content at the time of chipping. However, no studies on woodchippers were reported.

In summary, there is significant potential in micro- or radio-wave measurements of wood properties, but a low degree of commercialization in many applications. One explanation may be the complex signal processing and analysis. Most commercial equipment measures the moisture content of lumber or wood chips. In addition to these, there is a commercial microwave-based line scanner equipment for the detection of twigs in sawn wood products, and ground-based radar systems that market themselves for the detection of rot and cavities in standing trees. The low degree of commercialization makes it interesting to follow the new microwave-based moisture content measuring equipment for wheel loader buckets and reference measurements that are now close to commercialisation. Furthermore, there is a need for increased knowledge about why new measurement technology for forest products either ceases to be used after a while or establishes itself.



# Introduktion till mikro- och radiovågor

Denna bakgrund syftar till att ge en teknisk introduktion till begrepp som kan förklara vad som skiljer de utrustningar och metoder som används i olika studier och tillämpningar åt, exempelvis:

- Skillnaden mellan olika frekvenser som mätningen kan ske vid
- Olika sätt att använda mätsignalens information – dämpning, fasförskjutning, tidsåtgång
- Dielektriska parametrar – dielektricitetskonstanten och förlustfaktorn
- Olika sätt att beräkna virkesegenskaper – antingen direkt från mätsignalen, eller genom att först beräkna dielektriska parametrar, och sedan virkesegenskaper från dessa
- Olika antenntyper
- Mätning i transmission eller reflektion
- Materialets påverkan

## Frekvensområden

Mikro- och radiovågor har en stor potential i att de kan mäta inre egenskaper hos biobaserade material på ett oförstörande och kontaktfritt sätt. Mikro- och radiovågor är grannar i det elektromagnetiska spektrumet, se Tabell 1. Strålningen beskrivs ofta genom sin våglängd eller frekvens, vilka är relaterade storheter som kan beräknas från varandra. En mikrovågsugn använder sig av frekvensen 2,45 GHz, vilket motsvarar en våglängd om ca 12 cm. Mobiltelefoner använder sig av 0,8–1,9 GHz, motsvarande våglängderna 16–37 cm. Något förvirrande utförs radarmätningar oftast med mikrovågsfrekvenser (Ku-bandet; 8–12 GHz). Mikro- och radiovågsmätningar brukar utföras med strålningsenergies som är jämförbara med eller lägre än vad en mobiltelefon avger, och därmed är de ofarliga för människor, vilket är en fördel. Förutom de breda frekvensområdena talas ibland om frekvensband inom mikro- och radiovågsområdet, exempelvis K eller Ku. En tabell över frekvensbanden finns i Appendix.

Tabell 1. Ungefärliga våglängds- och frekvensområden för terahertz-, mikro- och radiovågor. Terahertz-bandet överlappar med de mellan- och långvågiga infraröda banden.

	VÅGLÄNGDER	FREKVENSER
Terahertzvågor	3 $\mu\text{m}$ – 1 mm	10 THz - 300 GHz
Mikrovågor	1 mm – 1 m	0,3 GHz – 300 GHz
Radiovågor	> 1 m	< 0,3 GHz

## Komponenter och bandbredd

Klassiska mikro- och radiovågssystem består ofta av en sändare, en antenn som skickar ut sändarens energi, samt en mottagande antenn. Dielektriska linser kan användas för att fokusera eller sprida signalen. En vågledare kan användas för att leda signalen likt en optisk fiber. En nätverksanalysator kan användas för att skicka ut och/eller ta emot

signalen. De flesta mätningar för industriella tillämpningar använder sig av så kallade frirymdsmätningar (free space transmission), där signalen bitvis går genom luft. Andra mätmetoder som använder sig av mikro- eller radiovågor är närfältsskanning med modulerad spridning (NFS) samt markradar (Ground Penetrating Radar, GPR).

Olika typer av antenner har olika bandbredd, det vill säga med få (smalbandiga) eller många (bredbandiga eller ultra-bredbandiga) frekvenser i signalen. Hornantenner är bredbandiga och har god signalförstärkning (riktningsverkan), men är relativt skrymmande. Deras utseende påminner om megafoner. Vivaldiantenner påminner mer om fyrkantiga, stora kretskort. De är bredbandiga eller ultra-bredbandiga (UWB) och har god signalförstärkning. Patchantenner är en annan vanlig kategori. De är platta, små och billiga men har liten bandbredd och låg signalförstärkning. Andra förekommande bredbandiga antenntyper är bland annat självkomplementära, bowtie-, spiral-, monopol-, quasyagi- och elevenantenner (Javashvili 2009; Maalik 2010).

Det finns även metoder som använder sig av elektroder snarare än antenner. Elektrokemisk impedansspektroskopi (EIS) och radiofrekvensimpedans (RF-impedans) använder sig av elektroder för att påverka joner i materialet, som då skickar ut långvågiga radiovågssignaler som sedan analyseras (Tomppo m.fl. 2009; Sobue & Woodhead 2010; Tiitta m.fl. 2020). Det är en berörande metod, även om den inte skadar materialet. Det finns även kapacitansbaserade metoder som fungerar på liknande sätt (Bikkina 2002; Fuchs m.fl. 2008; Laleicke & Kamke 2018), och bland annat används för enkla kommersiella fukthaltsmätare.

## Interaktion mellan mikro- och radiovågor och material

Vid designen av en mikro- eller radiovågsbaserad utrustning finns ett stort antal vägval, till exempel antenntyp, centrumfrekvens, antal frekvenser (bredbandigt eller smalbandigt), reflektions- eller transmissionsmätning, och om modelleringen till mätstorheten ska ske via dielektriska egenskaper eller göras direkt från signalen. Kommande avsnitt ger bakgrundskunskap om vissa av dessa avväganden.

Interaktionen mellan elektromagnetisk strålning och biomaterial är bland annat beroende av våglängd, temperatur, densitet, polarisation, materialets dimension och fukthalt. Att interaktionen beror på dessa egenskaper innebär att det finns en potential att mäta sagda egenskaper med hjälp av elektromagnetiska vågor. För metalliska material kommer även magnetiska effekter påverka mätsignalen, men dessa anses vanligen försumbara vid mätningar på virke.

## Egenskaper hos den elektromagnetiska vågen

En mätutrustning baserat på mikro- eller radiovågor jämför normalt förändringarna i den elektromagnetiska vågen innan och efter att den har interagerat med ett material. Tre vanliga storheter som studeras är:

1. Signalens styrka (amplitud). Genom att jämföra den kända utskickade signalstyrkan med den mottagna kan dämpningen  $\alpha$  (hur mycket den har absorberats eller spridits) beräknas. För mikro- och radiovågor är det vanligt att mäta signalstyrkan eller dämpningen i milliwatt [mW], som omräknas till decibel-milliwatt [dBmW].
2. Signalens fasförskjutning  $\beta$ . Fasvinkeln  $\delta$  är relaterad till dämpningen och tidsförskjutningen i signalen. Hastigheten hos signalen blir långsammare när den går genom virke än när den går genom luft. Detta leder till en tidsförskjutning

jämfört med om signalen bara hade gått genom luft. Eftersom virke är anisotrop (rotationskänsligt) får signalen olika hastighet i de två olika polarisationsriktningarna.

3. Den tid  $t$  det tagit för signalen att färdas. Om  $t$  är relativt stor kan det tyda på att signalen går långsamt genom materialet, och därmed säga något om provets struktur, exempelvis densitet och temperatur. Denna typ av så kallad tidsdomänmätning eller time-of-flight görs enklast med UWB-tekniken. Tidsfördröjningen kan även bestämmas när signalen analyseras som funktion av frekvens, så kallad frekvensdomän.

## Penetrationsdjup

Mikro- och radiovågor har olika penetrationsdjup i olika material, det vill säga hur långt in i ett objekt som signalen når. Därmed går det att mäta inre egenskaper i materialet. Penetrationsdjupet är starkt beroende av materialets egenskaper, men generellt sett ökar penetrationsdjupet med minskande frekvens (ökande våglängd) och med signalens styrka. För mikrovågor har penetrationsdjup på 2,6 meter rapporterats vid mätning genom fuktigt sönderdelat skogsbränsle (Ottosson m.fl. 2018).

I jämförelse penetrerar bara infraröd strålning (NIR, SWIR, MWIR, LWIR) mindre än 0,5 mm in i fuktigt trä (Dupleix m.fl. 2013). Något mer genomträngande är terahertzvågor, även kallad fjärrinfraröd strålning (far-infrared, FIR), som bland annat har använts för fukthaltsmätning av papper och för att studera densiteten hos sågade trävaror (Koch m.fl. 1998; Banerjee m.fl. 2008). Proverna har i dessa fall varit några millimeter tjocka. Terahertz-vågor bör ha otillräckligt penetrationsdjup för mätning av inre egenskaper hos bredare prover som stockar och bulkmängder av flis.

Röntgenstrålning har trots sin korta våglängd ett betydande penetrationsdjup, på grund av den höga energin i strålningen. Penetrationsdjupet är fullt tillräckligt för enskilda stockar, till exempel i röntgenmätrammar på sågverk. För att penetrera större mängder fuktig biomassa, till exempel travade stockar, krävs dock strålningsnivåer som blir skadliga för levande varelser (Johan Oja, LTU, personlig kommunikation 2021).

## Signalens färd i materialet

Ett objekt eller material består ofta av olika komponenter på både makroskopisk och mikroskopisk nivå. För trästockar kan det vara luft, bark, splintved, kärnved och vatten. Om elektromagnetisk strålning färdas genom ett objekt och stöter på en övergång mellan två materialkomponenter kommer strålningen att spridas (ändra riktning) ifall de två komponenterna har olika brytningsindex. Strålningen kan exempelvis reflekteras tillbaka i riktningen (om den infallande vinkel är noll) som den kom ifrån. Det gör att det blir en något mindre strålningsstyrka som färdas vidare framåt i materialet, det uppfattas som att signalen dämpas.

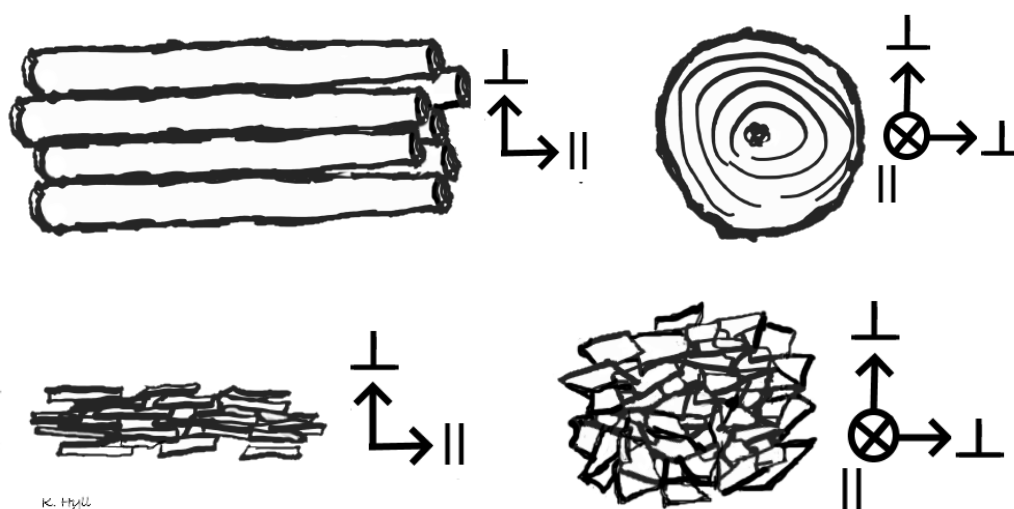
Oftast är den primära (första) reflektionen, som brukar vara mellan luften och ytan hos objektet som ska mätas, starkast. Även den sekundära (andra) reflektionen kan vara relativt stark. Ju mindre skillnaden i brytningsindex är mellan två materialkomponenter och ju längre in i materialet som signalen redan har färdats desto svårare är det generellt sett att mäta reflektionen.

Det är vanligt att en del av mikro- eller radiovågssignalen går igenom materialet, och en annan del går runt materialet, så kallar multipathing eller flervägsutbredning (Meaney & Paulsen 2018). Eftersom den runtgående signaldelen saknar information om materialet

är det viktigt att kunna identifiera och filtrera bort den vid signalbehandlingen. Det kan göras genom att den delen av signalen som går runt materialet oftast är starkare, eftersom den inte dämpats av materialet, och att den har längre tid på sig att nå detektorn. Att mikro- och radiovågor tenderar att flervägsutbreda sig är en orsak till att tekniken kan vara mer komplex jämfört med exempelvis röntgenmätning. I mätningssammanhang försöker man undvika mätupställningar där signalen går runt materialet.

## Anisotropi hos materialet

Ett material är anisotropt om den elektromagnetiska vågen förändras på olika sätt beroende på riktningen hos vågens elektriska fält i materialet. Virke är ett anisotropt material, bland annat på grund av vedfibrernas tydliga orientering i en dominant riktning, men också mikro- och nanofibrillernas orientering (Torgovnikov 1993). På grund av anisotropin så utförs mikro- och radiovågsmätningar av stockar och plank ofta i två riktningar: parallellt med mörgen (symboliseras med  $\parallel$ ), och vinkelrätt (tangentiellt) mot mörgen (symboliseras med  $\perp$ ), se Figur 1. Alternativt kan signalen vara elliptiskt polariserad, vilket innebär att den innehåller båda två polarisationsriktningarna.



Figur 1. Illustration över polarisationsriktningar för olika provtyper. Överst till vänster: Travad rundved sedd från sidan. Överst till höger: stock sett från ändytan.  $\otimes$  = riktningen går in i skärmen. Nederst till vänster: Flis sett från sidan. Nederst till höger: flis sett ovanifrån.  $\parallel$  = parallell/horisontell polarisationsriktning.  $\perp$  = vinkelrät/vertikal polarisationsriktning.

När flis packas kan även flisbitarna få en orientering, baserat på deras platta geometri. Vid mätning av flis förekommer det att polarisationsriktningarna därför definieras parallellt respektive vertikalt mot flisens packningsorientering. Anisotropin hos flisen på grund av hur vedfibrerna i flisbitarna är orienterade är försumbar i jämförelse (Ottosson m.fl. 2018).

## Dielektriska egenskaper hos materialet

Material som dels är elektriska isolatorer, dels kan polariseras när det utsätts för elektromagnetisk strålning kallas dielektriska material. Trä är ett sådant material. På vilket sätt materialet påverkas, till exempel graden av polarisering, styrs av dess

dielektriska parametrar. Om de dielektriska parametrarna är kända så kan mikro- och radiovågsmätningar användas för att räkna ut egenskaper hos materialet som är relaterade till de dielektriska parametrarna, till exempel densitet och fukthalt. För att få en hög noggrannhet i beräkningarna bör även materialets temperatur, avståndet mellan antennerna och avståndet mellan antennerna och provet mätas.

Från signalens dämpning, fasförskjutning och färdtid går det att räkna ut materialets dielektriska parametrar för den givna våglängden eller frekvensen, i form av dielektricitetskonstanten  $\epsilon'$  och förlustfaktorn  $\epsilon''$ . Görs detta vid olika frekvenser kallas det ibland för dielektrisk spektroskopi. Från ovanstående parametrar går det att räkna ut förlusttangenta  $\tan(\delta)$  och en förlustkvot som i denna rapport kallas  $R_\epsilon$ , som båda används för att studera material:

$$\tan(\delta) \approx \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

$$R_\epsilon = \frac{\epsilon''}{1 - \epsilon'}$$

Förlustkvoten  $R_\epsilon$  anses vara relativt oberoende av materialets densitet (Tomppo m.fl. 2009).

### **Spatial upplösning, kontrast och storlek**

Vid en mätning finns det en poäng med att skilja mellan vad som alls går att detektera, och hur små detaljer som går att särskilja från varandra (den spatiala upplösningen). Det kan gå att detektera betydligt mindre strukturer än vad som går att mäta i detalj.

Våglängden (eller frekvensen) hos strålningen i kombination med materialets egenskaper avgör den spatiala upplösningen. För en signal med frekvensen 2,0 GHz som undersöker trä går det grovt att säga att detaljer med storlek på max en tredjedel av våglängden går att urskilja från varandra, vilket i det här fallet är 5 cm.

Om kontrasten (skillnaden i de dielektriska egenskaperna) hos strukturerna i ett material, till exempel mellan en kvist och dess omgivning är stor kan strukturer med storlek kring 1/10 av våglängden gå att detektera (Lundgren 2007). Då kan det exempelvis gå att mäta positionen hos kvisten och dess fibervinkel, vilket bara kräver att kvisten kan detekteras, men inte hur stor den är, vilket skulle kräva tillräcklig spatial upplösning (Kaestner & Bååth 2005).

Relationen mellan strålningens våglängd och storleken på objekt som den interagerar med går i vissa sammanhang att använda för att mäta storleksfördelning. Den vanligaste tillämpningen är att använda optiskt ljus för mäta storleksfördelningen hos mikrometerstora objekt, och brukar kallas laserdiffraktionsmätning (Merkus 2009). Mätningen baseras på Mies spridningsteori, som förutsäger hur spridningen påverkas av relationen mellan strålningens våglängd och storleken hos det objekt som strålningen interagerar med. Bland annat säger teorin att spridningen är som störst, och därmed som lättast att detektera, då objektets radie är ungefär en sjättedel av våglängden. För de flesta storleksfraktioner av flis innebär det att denna maxvåglängd ligger i mikrovågsområdet. Laserdiffraktionsprincipen kan dock vara svår att tillämpa i praktiken, bland annat beroende på att flisbitars form inte är regelbunden och för att bitarna helst ska vara separerade från varandra vid mätning.

## Fukt och fukthalt

Vid många frekvenser i mikro- och radiovågsområdet reagerar signalen starkt på provets fukthalt (eller, relaterat, torrhalt). Ett stort antal arbeten har gjorts kring mikro- eller radiovågsmätning av fukthalt hos produkter från skogen, framför allt på sågade trävaror. För träflis finns kommersiella fukthaltsmätare för transportband och matare som baserar sig på reflekterande respektive transmitterande mikrovågsmätning (Berthold 2021; PCE Instruments 2021; Valmet 2021). En annan relativt vanlig kategori av kommersiella fukthaltsmätare är de så kallade kapacitans-fukthaltsmätarna, som använder radiofrekvenser mellan 1–50 Mhz. På grund av att fukthaltsmätning kan sägas vara den mest utredda mikro- eller radiovågsbaserade mätningen av virke är det inte fokuset för denna sammanställning.

Grönt (rått) virke innehåller i allmänhet vatten i två tillstånd: fritt och bundet. Det bundna vattnet, som utgör cirka 30 procent av virkets torrvolym, är fasthållet av fibrerna och kan därför inte orientera sig som en reaktion på mikro- eller radiovågor (Merlan 2016). Det innebär att det bundna vattnet inte heller går att mäta vid dessa frekvenser, utan måste skattas. Vid en viss fukthalt kan inte virket binda mer vatten kemiskt, utan börjar i stället lagra fritt vatten i olika hålrum, vilken kallas för fibermättnadspunkten. Den andel av fukthalten som ligger över fibermättnadspunkten består därför av fritt vatten, som reagerar starkt på mikro- och radiovågor. Därför är det svårare att mäta fukthalten hos relativt torra prover, jämfört med fuktigare prover.

På grund av fuktens starka påverkan på mätsignalen är det viktigt att veta provets fukthalt när andra virkesegenskaper mäts med mikro- eller radiovågor.

## Salthalt och askhalt

Saltad mat går något snabbare att värma i en mikrovågsugn än osaltad mat, eftersom saltet gör ökar matens (biomassans) absorptivitet för mikrovågsstrålning (Chaplin 2008). Det beror på att ökad salthalt minskar dielektricitetskonstanten  $\epsilon'$  och ökar förlustfaktorn  $\epsilon''$  vid de flesta frekvenser. Att dielektricitetskonstanten minskar beror på att saltet binder vattenmolekylerna och hindrar dem från att röra sig i respons till det elektromagnetiska fältet. Att förlustfaktorn ökar beror på att den del av förlustfaktorn som beror på fria joner ökar. Eftersom aska innehåller salter så ger ökad askhalt i biomaterial ett liknande beteende som ökad salthalt (Torgovnikov 1993; Sipahioglu & Barringer 2003).

## Fryst material

Mikrovågor interagerar olika med ofruset och fruset material. Ett exempel är att det går långsammare att värma upp frusen mat i mikrovågsugn än vad det går att värma redan tinad mat. Som tidigare nämnts innehåller virke normalt både fritt och bundet vatten, där det främst är det fria vattnet som reagerar på mikrovågor (Torgovnikov 1993). När fritt vatten fryser håller isen fast molekylerna i en kristallliknande struktur som hindrar dem från att absorbera mikrovågorna och rotera. Det får två följder; dels går mikrovågorna igenom materialet snabbare, dels dämpas (absorberas) inte lika mycket av strålningen. Bundet vatten i biomassa påverkas inte på samma sätt när det fryser, eftersom det fortsätter vara flytande ner till åtminstone  $-20^{\circ}\text{C}$  (Paz 2010). Effekten blir dock densamma, eftersom bundet vatten inte interagerar särskilt mycket med mikrovågor oavsett om det är flytande eller fruset.

En komplicerande omständighet är att mikrovågorna beter sig på ett liknande sätt när de går igenom torrt virke, som när de går igenom fruset virke. Vid frånvaron av den starkt absorberande fukten rör sig strålningen snabbare och dämpas mindre i det torra materialet. Exempel på hur värdena på de dielektriska egenskaperna påverkas finns i Appendix. Det är med andra ord lätt att konstatera om mikrovågorna inte dämpas särskilt mycket av materialet, men svårt att avgöra om det beror på att materialet är fuktigt men fruset, eller att det är torrt. En annan komplicerande faktor är att torrdensiteten, som behövs i vissa beräkningar, ändras när virket är fruset jämfört med när det är ofruset, eftersom volymen ökar när vatten fryser (Ottosson m.fl. 2016). I praktiken innebär det att det behövs olika modeller för att översätta den uppmätta signalen till ett mätvärde för när virket är ofruset respektive när det är fruset. Det innebär också att information om virkets tillstånd behövs för att mätsignalen ska kunna tolkas på ett korrekt sätt.

Det finns inga etablerade mätmetoder för att avgöra om virke är fruset, eller graden av frusenhet. Termometer och temperatur eller vikt kombinerat med tidsupplöst väderdata kan användas som en grov skattning. Om temperaturen, som virket har omgivits av, har varit  $>5$  °C under en längre tid kan vi anta att virket är ofruset, medan om temperaturen under en längre tid har varit  $<5$  °C kan vi anta att virket är fruset. Utmaningen uppstår i gränslandet däremellan, när virket delvis kan vara fruset och delvis ofruset.

Snö är ett granulärt material bestående av en mix av ispartiklar, luft, och vid vissa temperaturer även flytande vatten (Techel & Pielmeier 2011). När snö tinar ökar dess andel flytande vatten, och det får en högre våthet (snow wetness). Snövåthet eller snövattenandel (snow liquid water content, LWC) skulle därför potentiellt kunna användas som en indikator på frusenhet även för virke.

Vissa utrustningstillverkare av mikrovågsbaserade fukthaltsmätare har löst känsligheten för fruset material genom en uppvärmningsanordning (Valmet 2021).

## Delstudie 1

# Systemanalys av mikrovågsbaserad fukthaltsmätning av biobränsleflis för fjärrvärmesektorn

### Bakgrund

Sveriges energisystem ställs idag om som ett led i att möta den pågående klimatförändringen och fossilbaserad energi byts mot förnybara alternativ. De senaste 40 åren har biobränsletillförseln tredubblats och uppgår idag till 145 TWh på årsbasis (Energimyndigheten 2020). Stora förändringar har skett på värmemarknaden, där fossil olja fasats ut i villapannor och fjärrvärmeverk och ersatts av bland annat biobränslen och värmepumpslösningar. På fjärrvärmemarknaden, som utgör cirka hälften av värmemarknaden, har råolja gått från att stå för 90 procent av bränslebasen i början på 80-talet, till att idag endast ha en marginell betydelse. Oljekriserna på sjuttioalet startade en omställningsresa som senare drevs vidare av klimataspekter (Werner 2017). De biobränslen vi ser i dag i fjärrvärmesektorn kommer till allra största del från restprodukter från skogsbruket och skogsindustrin.

Med övergången till biobränslen kommer dock nya utmaningar att hantera då dessa är mer komplexa med avseende på hantering, logistik, lagring, kvalitet och form jämfört med de tidigare fossila alternativen (Olsson m.fl. 2016). Biobränslen måste ofta säsongslagras för att möjliggöra att matcha ihop en jämn bränsleproduktion med en ojämn efterfrågan, eller för att buffra för kortsiktiga efterfrågeförändringar. Under lagringsperioden förändras bränslets egenskaper vilket ytterligare bidrar till ökad variation. Skillnader finns mellan olika leveranser, men också inom enskild leverans trots samma lagringsförutsättningar. Fukthalten är den viktigaste kvalitetsparametern eftersom det ekonomiska värdet, värmevärdet och transportegenskaper starkt relaterar till den. Under lagring kan bränslet torka under gynnsamma väderförhållanden, men kan likväl återfuktas av till exempel regn, och det går inte att tillförlitligt prediktera vad som kommer levereras utan att mäta.

De ekonomiska transaktioner som kopplar till dagens biobränsleaffär regleras av virkesmätninglagen (SFS 2014:1005), vilken syftar till att ge säljare och köpare likvärdiga möjligheter att bedöma om ersättningen för det som överlåtits är rimlig. Det finns krav på mätning i det första handelsledet från skogsägaren till kunden. Dagens biobränslesystem för leveranser till värmeverk går ofta direkt från skogen till kunden där bränsle levereras i flisad form. Där mäts flisen in och fukthalt bestäms genom att en handfull prover om 1–2 liter vilka sedan slås ihop till ett generalprov. Proven tas från lastbilen eller från det avtippade materialet vid ankomst. Generalprovet reduceras ned till ett delprov på några liter som torkas i torkskåp i 105 °C i ett dygn tills konstant vikt uppnås och initial fukthalt kan bestämmas (Fridh 2017). Det finns en mindre del som hanteras via terminal före leverans till värmeverk. Då sker provtagning och fukthaltbestämning på terminal för att reglera betalning. Material som levereras från



terminal mäts ofta också in vid värmeverk för att stödja transaktionen mellan köpare och säljare av biobränslet.

Dagens system och teknik för fukthaltmätning har dock en del begränsningar och det saknas information om fukthalt på flera ställen i biobränslekedjan. Där fukthalt mäts finns en stickprovsproblematik och när väl resultatet erhålls så är redan en rad viktiga beslut tagna. Att resultatet erhålls ett dygn efter provtagning är ett problem eftersom planen för avtippning och vidarehantering påverkas av vad som levereras, vilket i det läget är okänt. Under lagring, på värmeverk eller terminal, förändras fukthalten vilket gör att den inmätta fukthalten inte kan antas gälla för beslut längre fram i tiden. I ett större perspektiv så krävs bättre fukthaltsinformation för att skapa en korrekt affär som gynnar alla parter i kedjan. Dagens system med små stickprovstagningar ger inte en tillräckligt bra bild av vad som är levererat, speciellt eftersom biobränslen ofta är heterogena, vilket sänker noggrannheten och därmed trovärdigheten.

Fukthaltmätning med mikrovågor har studerats under lång tid (James & Hamill 1965; Torgovnikov 1993; Merlan 2016), och även lett till kommersiella produkter inom vissa applikationer (Fernandez-Lacruz & Bergström 2014; Berthold 2021; Exotek Instruments 2021; PCE Instruments 2021; Valmet 2021). Få av dessa har dock använts inom industrin. Sannolikt beror det på en kombination av kostnad, utmaningar i hantering/kalibrering, oklar mätnoggrannhet, begränsningar i vilka fukthalter som kan mätas, och var i processen informationen behövs. Det finns en rad möjliga tekniskspår för en förändrad fukthaltmätning som skulle kunna adressera en eller flera av ovan nämnda begränsningar (Sjöström 2011; Hyll & Nordström 2020). Flera av dessa tekniskspår börjar närma sig kommersiella produkter, vilket motiverar en studie kring hur dessa skulle påverka biobränslesystemet.

## Syfte och avgränsningar

Den här systemanalysen fokuserar på att utvärdera Radarbolagets mikrovågsbaserade teknik för fukthaltbestämning av biobränsleflis mot fjärrvärmemarknaden. Radarbolaget är ett Gävlebaserat teknikföretag som sedan år 2010 utvecklat mikrovågsbaserad mätteknik med inriktning mot processindustrin.

Det övergripande syftet med systemanalysen är att ge en bild av vad tekniken innebär för olika aktörer kopplade till biobränslehantering och användning. De specifika målen är att:

- Beskriva hur olika tekniklösningar med mikrovågsbaserad fukthaltmätning passar in i kedjan
- Beskriva hur marknaden ser ut för implementering
- Beskriva, och om möjligt, kvantifiera nyttorna med bättre fukthaltsinformation

Applikationer så som mätning av cellulosafelis faller utanför analysen. Avgränsningen motiveras av den redan jämna kvalitén hos cellulosafelis med mindre fukthaltvariationer, samt att det leveranssystemet ser annorlunda ut jämfört med leverans till värmeverk. Vidare utgår analysen från en färdig produkt som kan hantera mätning av fruset och halvfruset biobränsle med acceptabel noggrannhet. Det förutsätter viss metodutveckling utifrån från dagens status.

Tekniken som utvärderas finns designad i fyra olika applikationer, som analyseras i denna rapport:

- Mätning av hela flisbilar genom skanning vid ankomst
- Mätning i skopa på lastmaskin vid hantering

- Stickprovsmätning i mätlåda för uppföljning
- Kontinuerlig mätning på transportband

## Metod

Systemanalysen för den mikrovågsbaserade tekniken för fukthaltmätning baseras på en kvalitativ del och en kvantitativ del. Den kvalitativa delen genomfördes genom semi-strukturerade telefonintervjuer där respondenter från följande kategorier återfanns:

- Utvecklaren av mättekniken
- Kund – mindre värmeverk (<10 MW)
- Kund – större värmeverk (>50MW)
- Massabruk
- Skogsbränsleföretag
- Terminalägare

Intervjuerna syftade till att samla in branschens perspektiv på möjliga nyttor kopplade till den nya tekniken, samt hur en tillämpning av den skulle kunna påverka deras verksamhet idag.

I den kvantitativa analysen intervjuades två forskare från akademien som är experter på lagring av biobränslen respektive storskalig förbränning av biobränslen, detta för att ge input kring hur nyttorna med teknikimplementeringen kan kvantifieras. I den kvantitativa delen analyserades också marknaden i stort för att ge indikationer på i vilken omfattning tekniken har potential att introduceras och komma att användas.

Det finns också andra vägar att skaffa fukthaltsinformation, Sjöström (2011) går igenom konkurrerande tekniker som kan fungera för vissa sortiment och för vissa applikationer. Den här systemanalysen gör dock ingen jämförelse av Radarbolagets teknik gentemot andra nya tekniker utan fokuserar på hur en möjlig implementering påverkar dagens system och aktörer.

## Teknikbeskrivning

Kort kan Radarbolagets teknik för fukthaltmätning beskrivas som utrustningar som frekvensmässigt opererar någonstans mellan radio- och mikrovågsbanden och antingen nyttjar en sändare och en mottagare på var sida om ett flisat provmaterial, eller en kombinerad sändare och mottagare som tar emot en reflekterad signal. Signalen översätts och tolkas sen för att beskriva materialets fukthalt (Ottosson m.fl. 2018; Choudhary & Rönnow 2020). Tekniken har troligtvis högst mätnoggrannhet på ofruset material. Om materialet är fruset ser kalibreringen och tolkningen av signaler annorlunda ut (Ottosson m.fl. 2016). Störst mätosäkerhet föreligger när materialet är halvfruset, och det pågår fortfarande forskning och utveckling kring metoder för att öka noggrannheten vid fruset eller halvfruset material. Mer information om mätprincipen finns i denna rapportens andra delstudie.

Tekniken har i dagsläget designats i fyra olika produktapplikationer, kort förklarade nedan. Gemensamt för teknikerna är att fukthaltsinformationen erhålls direkt efter provtillfället, eller närmare bestämt efter cirka 60 sekunder. Noggrannheten för tekniken anges till cirka 1–3 procentenheter. Det ligger i paritet med mätosäkerheten för dagens metod baserad på torkskåp som anges till 2 procentenheter (Aulin m.fl. 2008). Dagens metod har dock en utmaning vid mätning av heterogena bränslen på grund av stickprovsproblematiken samt risken att flyktiga ämnen avgår under torkning i 105 °C.

## Mätning av flis på lastbil

Applikationen använder en fast monterad sändare och mottagare placerade vid mätplatsen vid en terminal eller ett värmeverk mellan vilka ankommande bilar passerar och får sitt lass mätt (Figur 2). Genom att mäta rakt igenom flislasset som passerar ges en bra bild av innehållets fukthalt. Mätningen kan förenklat beskrivas som en cylinder med en diameter på ungefär 1 m i diameter. För en flisbil med en bredd på 2,6 meter innebär det att mätaren känner av 2040 liter flis, vilket är en stor ökning jämfört med dagens stickprovsmetoder. Görs mätningen på flera ställen längs skäppan ökar provmängden ytterligare. Applikationen har demonstrerats, men det finns idag ingen färdig produkt på marknaden. Prisbildningen för den färdiga produkten är inte satt och kommer att påverkas av exakt utförande (Patrik Ottosson, Radarbolaget, personlig kommunikation 2021).



Figur 2. Mätning av inkommande flisbil med sändare och mottagare på var sida om bilen. Foto: Patrik Ottosson, Radarbolaget

## Mätning i skopa på lastmaskin

Vid hantering av bränsleflis på värmeverk och terminal används ofta lastmaskiner med stora skopor. I den här applikationen är en till tre sändar- och mottagarpar monterade i en lastmaskinsskopa, vilka mäter den del av flisen som finns mellan dem (Figur 3), cirka 50–100 liter per sändar- och mottagarpar av skopans totala volym på 6–24 m<sup>3</sup>. Applikationen ligger närmare en färdig kommersiell produkt än den direkta mätningen på flisbilar. Kostnadsmissigt skulle den färdiga produkten kunna hamna i storleksordningen 100–150 tusen kronor (Patrik Ottosson, Radarbolaget, personlig kommunikation 2021).



Figur 3. Lastmaskin med mätskopa för integrerad mätning samtidigt som flis hanteras. Foto: Daniel Andersson, Radarbolaget

### Stickprovsmätning i mätlåda

Sändare och mottagare är i det här fallet placerade i en provlåda med en volym på cirka 50 liter som fylls manuellt med flis (Figur 4). I stort liknar tekniken dagens stickprovsförfarande med provhinkar men med undantaget att resultatet erhålls direkt samt att en något större provmängd kan mätas. Även den här applikationen ligger nära en färdig kommersiell produkt. Slutpriset för en sådan produkt bör bli lägre jämfört med mätskopen, beroende på bland annat att bara ett sändar- och mottagarpar används. Ett slutpris på cirka 75–100 tusen bedöms rimligt (Patrik Ottosson, Radarbolaget, personlig kommunikation 2021).



Figur 4. Mätlåda för snabb stickprovsmätning av bränsleflis. Foto: Patrik Ottosson, Radarbolaget

## Kontinuerlig mätning på transportband

Det finns även en framtagen applikation av mätkonceptet där sändare och mottagare är placerade så att material på ett transportband kan mätas kontinuerligt. Kommersialiseringsgraden mot färdig produkt för den här applikationen är linje med mätskopa och mätlåda. Ett slutpris på cirka 200–225 tusen bedöms rimligt (Patrik Ottosson, Radarbolaget, personlig kommunikation 2022).



Figur 5. Mätanordning för kontinuerlig mätning på transportband. Foto: Daniel Andersson, Radarbolaget

## Analys

### Teknikens erbjudande – Hur påverkas dagens biobränslesystem

Den mikrovågsbaserade tekniken för fukthaltmätning kan användas i tre olika syften:

1. Möjliggöra bättre affärsmässiga beslut i biobränslesystemet
2. Möjliggöra en rättvisare biobränsleaffär med ökad transparens
3. Öppna för ett automatiskt mätförfarande där dagens manuella metod byts ut

Att implementera ny teknik för att stödja internt beslutsfattande är relativt lätt att göra. En förutsättning är att det finns ett upplevt problem och ett trovärdigt sätt att angripa problemet. Om tekniklösningens kostnadsbild i relation till nyttorna som kommer med implementeringen är på en rimlig nivå så finns incitament och möjligheter för att introducera tekniken.

Det andra syftet med tekniken är att kunna förbättra dagens bränsleaffär och skapa en mer trovärdig och transparent uppgörelse där båda parter gynnas. Har både säljare och köpare snabb information kring vad som levererats, utan osäkerheter kring stickprovsproblematik, är det lättare för dessa att gemensamt sträva mot samma mål för leveranserna. En sådan implementering är svårare, men skapar också helt andra systemmässiga värden. Svårigheten i en sådan implementering ligger i att det kopplar mot många aktörer och affärsuppgörelsen mellan dessa.

Den tredje delen som öppnar upp för ett mer digitalt och automatiskt mätförfarande påverkar såklart dagens upplägg, mätsystem samt personalen i det. Kostnad för mätpersonal, provhantering och torkskåp försvinner vid en övergång till ett automatiskt mätförfarande. En förändring kan därför vara långsammare och svårare att få till stånd beroende på såväl de affärsmässiga grunderna som trögheten i att ersätta något som funnit en längre tid. Tiden det tar att bygga upp acceptans för ett nytt system ska inte underskattas.

Erbjudandet från tekniken kan sammanfattas med *snabbare och bättre information*. En implementering ger i regel bättre information än idag, oavsett vilken av applikationerna man väljer att fokusera på. Förbättringen ligger både i att en större del av materialet kan mätas för att komma ifrån stickprovsproblematiken samt att information kan erhållas på snabbare och på nya platser i hanteringskedjan.

## **Möjligheter med bättre information**

### ***Skoglig styrning***

Den kanske enskilt viktigaste kvalitetsparametern i försörjningskedjan för skogsflis är fukthalt. Den påverkar transportegenskaper, ekonomiskt värde samt energiinnehåll. När transport och sönderdelning planeras finns det ingen fukthaltsinformation för vältorna vid vägkant trots att man kan ha en bränslespecifikation gentemot kunden att förhålla sig till. Det försvårar leveransplaneringen. Idag kan fukthalten variera mycket mellan olika objekt. Hade fukthaltsinformationen varit känd redan vid inmätning hade det funnits en möjlighet att avvisa och styra om leveranser som inte matchade kraven från den specifika kunden innan de tippades av. Det skulle också vara möjligt att byta grotvälta om man inser att det första lasset från ett objekt till exempel är för blött. Den möjligheten är viktigast vid leveranser till kunder med snäva kvalitetskrav.

### ***Produktvärde***

Med bättre fukthaltsinformation vid utleveranser från terminal finns bättre möjligheter att leverera rätt bränsle till rätt kund, vilket skulle öppna upp för en möjlighet att via differentiering ta mer betalt för bränslet. Med mer information kan man identifiera och separera premiumprodukter för kunder med snäva kvalitetskrav eller bättre styra utleveranser efter speciella kvalitetsönskemål. Snabb information vid inleverans tillsammans med möjlighet till kontinuerlig uppföljning möjliggör en kvalitetsmedveten hantering vilket underlättar senare kvalitetsmedvetna utleveranser. I en mer utvecklad bioekonomi med nya industritillämpningar kan värdet av fukthaltsinformationen bli än

mer avgörande för att åstadkomma skräddarsydda flöden och en ökad produktifiering av biomassan.

### **Lagerstyrning**

Det är sedan länge känt att lagring av biobränslen, speciellt i sönderdelad form, är förknippat med risker så som självantändning och bränder, nedbrytning av materialet och substansförluster samt arbetsmiljöproblem genom mikrobiell aktivitet och sporbildning (Jirjis 1995). Det är också sedan länge känt att dessa risker är störst vid lagring av material med olika egenskaper i samma stackar, till exempel olika fukthalter. (Lehtikangas 1999). Därför är det viktigt att fukthaltsinformationen finns tillgänglig direkt vid leverans så lagringen och stackningen kan planeras med avseende på fukthalt.

Den ökade risken för självantändning är svår att kvantifiera. Effekterna av det ser vi dock exempel på varje år med bränder på terminaler och värmeverk.

För att illustrera vad substansförluster innebär för lagring av skogsflis ges här ett räkneexempel. Antag att värmeverk i Sverige årligen förbrukar 10 TWh grothflis. Dessa omsätts normalt snabbt på värmeverken och lagras endast under några dagar eller upp till någon vecka (Olsson m.fl. 2016). Det förekommer dock långtidslagring av flisad groth, främst på terminal, men även i undantagsfall på värmeverk. I litteraturen finns uppskattningar av substansförluster i storleksordningen 2 procent per månad (Jirjis 1995). Om 10 procent av all grothflis som förbrukas i Sverige under ett år (1 TWh av totalt cirka 10 TWh) långtidslagras under 6 månader (från sommar till vinter) och tappar 2 procent per månad innebär det, givet ett pris på 200 kr/MWh, att bränsle till ett värde av 24 miljoner kronor om året försvinner.

För fjärrvärmebranschens del blir den ekonomiska konsekvensen av lagringsförluster under 2 veckors lagring av allt bränsle (10 TWh) innanför grindarna 20 miljoner kronor om året, givet samma antaganden som innan. Det gäller under förutsättning att värmevärde och fukthalt förblir oförändrade.

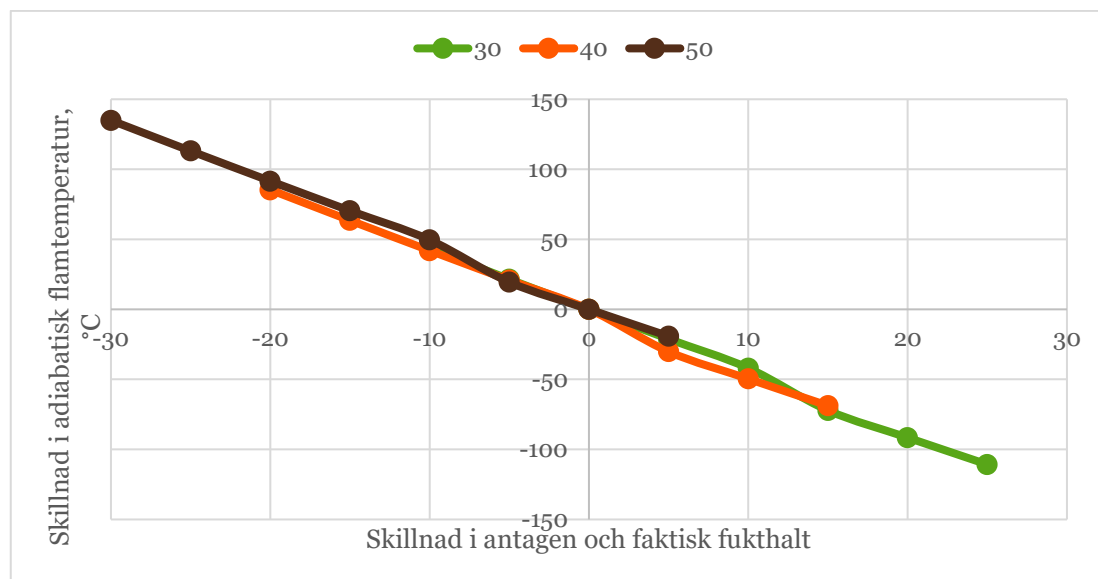
Perfekt fukthaltsinformation och lagring av olika fukthalter i olika stackar skulle inte ta bort dessa förluster helt, även om de borde kunna minskas. Exakt hur mycket är dock svårt att kvantifiera. En konsekvens av att lagra material med olika fukthalter åtskilda är dock fler och mindre stackar. Det bör i sin tur också motverka substansförluster eftersom stora stackar har mer värmeutveckling och högre substansförluster än mindre stackar (Lehtikangas, 1999).

### **Förbränningseffektivisering**

Förbränningsprocessen i ett värmeverk är komplex med många faktorer att kontrollera samt göra avvägningar mellan. En förutsättning för en optimal process är dock att information gällande fukthalten på det bränsle som matas in är känt. Idag har man ofta inte de uppgifterna vilket gör att det finns en utvecklingspotential, förutsatt att bra fukthaltsinformation vore möjlig att få. Vinsterna ligger i ett bättre utnyttjande av bränslet, en jämnare förbränning och mindre slitage på pannan. Fukthaltsinformation direkt från bränsleinmatningen till pannan skulle kunna användas för att styra förbränningen. Indirekt kan mätningar på lastmaskinsskopen användas för att gasa eller bromsa genom att fylla torrare eller blötare bränsle i silos och inmatningsfickor. För att på så sätt succesivt förändra vad som matas in. Idag finns ingen exakt fukthaltsinformation tillgänglig så inmatningen baseras på skattningar av bränslets egenskaper.

För att kvantitativt visa på vad en skillnad i antagen och verklig fukthalt innebär för förbränningsprocessen visas här ett teoretiskt räkneexempel där effekten för den adiabatiska flamtemperaturen<sup>1</sup> beräknats. Värmevärde, bränslesammansättning, värmekapacitivet, stökiometriskt samt verkligt luftbehov och utsläpp ligger till grund för beräkningarna. Av Figur 5 framgår att effekten för den adiabatiska flamtemperaturen av att underskatta respektive överskatta fukthalten är linjär i det undersökta fukthaltsspannet. Är den verkliga fukthalten 10 procent högre än förväntat kommer det medföra att den adiabatiska flamtemperaturen blir 40 till 50°C lägre. Omvänt, alltså om fukthalten överskattas och bränslet i själva verket är 10 procent torrare kommer den adiabatiska flamtemperaturen bli 40–50°C högre. Bristen på information får konsekvenser för förbränningen i pannan. En skillnad i temperatur på ett tiotal grader kan ge stor påverkan på NO<sub>x</sub>-utsläppen. Temperaturen påverkar också reaktionshastigheten vilket direkt kopplar mot effekten på anläggningen vid en given tidpunkt.

För värmevärdet och den energi som matas in i pannan spelar också fukthalten en viktig roll. Här kommer fukthaltens variation att påverka hur mycket bränsle som matas in. Är värmevärdet lägre kommer mer bränsle behövas för att producera samma värme. Om fukthalten bara är osäker, men känd i medeltal, blir det i det större perspektivet ingen nettoförändring av producerad värme. Det samma gäller för elverkningsgraden som kopplar mot fukthalten. Dock, givet dagens stickprovsproblematik och med beaktande av kvalitetsförändringar under lagring innanför grindarna har vi idag också en osäkerhet lagrad energimängd på värmeverken.



Figur 5. Konsekvens för den adiabatiska flamtemperaturen av en skillnad i antagen fukthalt (30, 40, 50 %) mot verklig fukthalt.

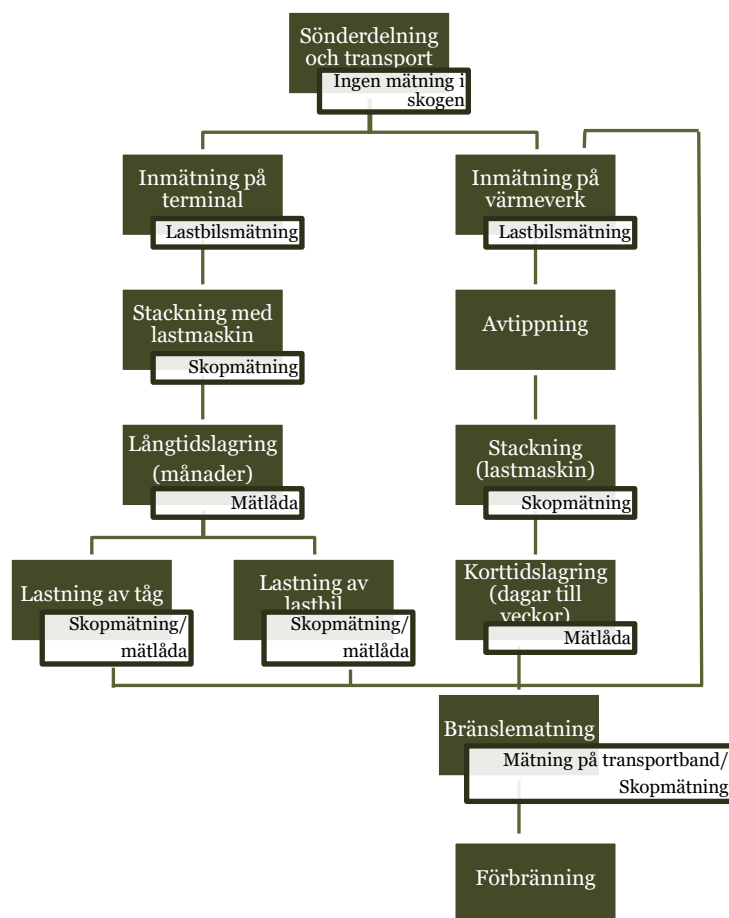
### Plats i tillförselkedjan

Som tidigare nämnts kan tekniken komma in på ett eller flera olika ställen i tillförselkedjan och där addera information. Figur 4 sammanfattar vilken eller vilka av de

<sup>1</sup> Adiabatisk flamtemperatur är den ideala temperatur som blir uppnås vid förbränning vid konstant tryck och där ingen värmeenergi eller mekanisk energi utväxlas med omgivningen.



fyra tillämpningarna som är mest aktuella för var och en av aktiviteterna som typiskt förekommer från skog till panna.



Figur 6. Flödesskiss för de två huvudsakliga flödena för skogsflis (via terminal eller direkt till kund) där möjliga teknikapplikationer visas.

Utöver de fyra teknikapplikationerna som presenterats i den här systemanalysen har ytterligare en applikation tidigare studerats. Den bygger på mätning direkt i flisutblåset på en mobil flishugg. Här finns ingen färdig produkt eller prototyp men konceptet har utvärderats i tidigare studier. De utmaningar som nämns där är att flis kommer i hög hastighet och med ett pulslignande variabelt flöde. Slutsatsen var att mätningen av den stötvis flödande flisen var tekniskt möjligt, men att signalbehandlingen var mer utmanande jämfört med mätning av kontinuerligt flödande flis (Ottosson & Andersson 2017).

### **Flisbil**

Med flisbilmätning erhålls en mer korrekt och nyanserad bild av vad flisbilen verkligen innehåller, förutsatt att tekniken i sig kan mäta flisbilens innehåll på ett korrekt sätt. Styrkan ligger i att en större del av leveransen mäts samt att variationer i ett inhomogent material kan fångas. Dessutom får man information snabbare än idag. En robust lösning för att mäta flis på lastbilar har möjlighet att användas för interna företagsbeslut och styrning, samt att i framtiden även ge en betalningsgrundande mätning.

## **Skopa**

Med skopmätning erhålls information på ett ställe i hanteringskedjan som idag saknar information. Det saknas fukthaltsinformation både på det nyss avtippade materialet som ska stackas och det finns inte heller någon fukthaltsinformation för material som har lagrats en tid. Man kan förvisso mäta vikt med lastmaskinens skopa redan idag, vilket kan indikera stora avvikelser i fukthalt eftersom vikten är olika på torrt och fuktigt material. Främsta uppsidan av att kunna mäta fukthalten direkt i skopan blir att ge en indikation på fukthalt hos det hanterade materialet vilket kan användas för att styra nästa led i hanteringen, till exempel hur materialet ska stackas, kan blandas eller hur ett tåg ska lastas för att nyttja vagnarna maximalt eller styra utleveranser av specifika kvaliteter. Däremot är det inte troligt att tekniken kan komma att ersätta dagens vederlagsmätning med stickprovtagning och torkning i torkskåp eftersom hanteringen med skopa inte alltid följer direkt efter avtippningen av flis, vilket gör det omöjligt att para ihop rätt bil med rätt material.

## **Mätlåda**

Även om materialet efter inmätning separerats och lagrats med material med likande egenskaper så förändras fukthalten över tid, vilket gör att den tidigare informationen snabbt blir utdaterad. Fukthaltsinformation via mätlåda kan ge vägledning och information på ett valfritt ställe i kedjan där information annars saknas.

## **Transportband**

Mätning på transportband är en ny applikationen på ett ställe i hanteringskedjan där det idag saknas information. Här fås momentan information kring det som matas in till exempelvis pannan eller en bränslesilo.

Sammanfattningsvis kan alla fyra applikationer kombineras utan att någon behöver vara överflödig i informationskedjan. Flisbilmätning ger korrekt och snabb information vid inleverans till terminal eller värmeverk. Skopmätningen fångar upp förändringar som skett sedan leverans när nästa hanteringssteg påbörjas, till exempel lastning eller bränslemätning. Mätlådan kan komma in mellan dessa för lageruppföljning och övervakning. Mätning på transportband ger information kring exakt vad resultatet blir av den bränslemix vad som matas in i pannan.

## **Branschens perspektiv**

Baserat på de genomförda intervjuerna ser samtliga aktörer relaterade till biobränsleanvändning positivt på bättre fukthaltsinformation. Nyttan med informationen ser dock olika ut utifrån deras olika perspektiv. Utgångspunkten har varit att det finns en fungerande teknik med en mätosäkerhet på 1–3 procent. Ingen svarande nämnde att mätosäkerheten skulle vara ett problem för implementering.

## **Större värmeverk (>50 MW)**

De större värmeverken/kraftvärmeverken ser stora fördelar processtekniskt kopplat till bättre information om bränslet. Bland fördelarna som nämns finns möjligheten att gå från ett reaktivt agerande till en mer aktiv och informerad bränsleinmatning. Medvetna val görs utifrån rådande situation och tillgängliga material. Bland de strategier som nämns finns en mer medveten blandning av material med olika fukthalter. Mätning på

lastskopan ses som ett välkommet tillskott för att aktivt styra inmatningen och det recept man försöker åstadkomma. Mätning på transportband nämns också som välkommet då det ger en möjlighet att direkt styra förbränning efter vad som faktiskt matas in. Från de större värmeverkens håll lyfts att den största fördelen är mätning på hela flisbilar vid inleverans. Rättviseaspekterna med en bättre mätning tillsammans med möjligheten att rationalisera bort dagens mätförfarande nämns som de viktigaste faktorerna även om möjligheten med snabb information också framhålls.

### **Mindre värmeverk (<5 MW)**

De mindre värmeverken ser inte de förbränningstekniska fördelarna lika tydligt som de större. Hos dem finns ofta inte en så stor valfrihet kopplat till olika tillgängliga bränslen på anläggningen, utan det som finns matas in. Dessutom har de redan en mycket snävare kvalitetsspecifikation, vilket gör att det bränsle som matas in redan är mer homogent. Många av anläggningarna i den här kategorin körs redan på mer homogena bränslen så som pellets eller ren stamvedsflis, vilket ger mer förutsägbara förutsättningar. De små pannorna har inte heller samma processövervakning och aktiva styrning som större pannor har. Generellt är ny teknik svårare att motivera här på grund av de relativt sett mindre skalfördelarna jämfört med de som hanterar större mängder biobränslen. Värdet av att mäta ankommande flisbilar, mäta via lastmaskinsskopa, en mätlåda eller på transportband är mindre, vilket gör att prisbilden måste vara relativt sett lägre här för att tekniken ska vara intressant även för dessa aktörer. En möjlighet som lyfts fram är dock att använda mätlåda för att kvalitetssäkra flisen vilket kan vara aktuellt om mer heterogena bränslen köps in, till exempel grotflis.

### **Biobränsleterminal**

Även om den skogliga informationen tas tillvara med avverkningsdatum, tidpunkt för skotning och avläggsförhållanden finns ännu ingen säker prediktion på fukthalt vid inleverans. Utifrån en terminals perspektiv är den bästa applikationen att kunna skanna hela flislass på lastbilar om det kan göras på ett korrekt sätt utan allt för stora fördröjningar. En stor fördel blir då att fukthalten är känd redan vid avtippning. Mycket av stackningsarbetet görs med en lång raka och förutsätter att materialet redan ligger på någorlunda rätt ställe. Att transportera runt material på terminalen i skopa är för kostsamt. Att mäta fukthalt med mätlåda har testats på vissa terminaler och ses som ett bra verktyg för lagerövervakning och kvalitetsstyrning, vilket leder till att rätt material kan levereras till rätt kund. Att känna fukthalten gör också att man kan undvika att blanda material med olika fukthalter vilket medför en minskad brandrisk. Prisbilden måste dock vara rätt i relation till nyttan. Hanteringen hade definitivt sett annorlunda ut om fukthaltsinformationen var tillgänglig. Vid leverans av stamvedsflis mot mindre kunder med snäva kvalitetskrav vore det en trygghet med informationen för att bättre kunna planera och styra utleveranserna. Det skiljer mycket mellan lagrade högar under regniga perioder, färskt material eller sommartorra högar. För skogsflis kan man lagra inkommande torra lass separerade från mer fuktiga lass. Vid utlastning av tåg, där totalvikten ska balanseras, vore det en trygghet med tillgänglig fukthaltsinformation.

### **Skogsbränsleföretag**

Från skogsbränsleföretagen uttrycks att den största vinsten skulle vara den snabbare och bättre information för att öka transparensen och möjliggörandet av en bättre affär som gynnar alla parter. Om flisbilar kunde mätas direkt vid ankomst till industri kunde den fukthaltsinformationen direkt påverka prioritering av objekt i skogen. Även efter leverans

finns många vinster, dessa tillfaller dock kunden. Vid terminal finns också stora vinster, dessa finns redovisade under rubriken biobränsleterminal.

## **Massabruk**

Utifrån ett massabruks perspektiv är den viktigaste möjligheten att förändra dagens modell för fukthaltsmätning av cellulosaflis med långa svarstider för mätning, stickprovsproblematik samt dyr mätprocedur med personal och torkugnar. Rättvisaspekterna med hur ett inhomogent bränsle kan mätas ses också som ett viktigt förbättringsområde. Att kunna mäta hela lastbilar med flis och få det att fungera robust på alla bilar och allt material för att på så sätt kunna rationalisera bort dagens teknik ses som önskvärt. Lagerfrågorna med de risker som finns vid blandande av olika material ses också som en viktig fråga. Däremot ses inte den interna användningen och förbränningseffektiviteten som ett prioriterat område. Billig bark ligger i basen och motiverar inte några större förbättringar.

## **Marknadspotentialen**

Idag finns drygt 500 fjärrvärmenät i Sverige där merparten använder biobränslen i någon utsträckning. Dessutom finns drygt 200 skogliga terminaler där biobränslen hanteras. De årliga biobränsleleveranserna till fjärrvärmesektorn är cirka 36 TWh vilket motsvarar 7,2 miljarder kronor om de handlas till 199 kr/MWh (Energimyndigheten 2021). I tillägg kan tekniken även användas för att mäta biobränslen och flisat material i andra sektorer än fjärrvärmesektorn, till exempel papper- och massaindustrin eller sågverksindustrin.

Dagens tekniklösning med mikrovågsbaserad flisbilmätning som skannar genom hela bilar fungerar bara på flisskåp av komposit och inte containerbilar där mikrovågorna har svårt att tränga igenom metallen. Idag transporteras knappt 30 procent av de primära skogsbränslena med ett containerekipage. För att möjliggöra att tekniken kommer in och förenklar affären fullt ut genom en storskalig implementering med ersättningsgrundande mätning behövs en lösning som också kan hantera containerekipagen. Alternativet att försöka hitta värmeverk med en låg andel containerekipage är inte långsiktigt bra då transporterna kan skilja mellan olika år och leder då till dubbla system. Det bör dock inte vara en teknisk omöjlighet att modifiera dagens mätutrustning så även containerbilar kan mätas, till exempel genom att mäta ovanifrån med studsande signal (Patrik Ottosson, Radarbolaget, personlig kommunikation 2021).

Mätning via lastmaskinskopa är en teknik som kan komma in på samtliga ställen där flisade biobränslen hanteras med lastmaskin. På både värmeverk och terminal hanteras bränsle med lastmaskin vilket gör att det finns en stor nisch här för mätskopa. Antas en mätskopa per värmeverk och terminal kan marknaden omfatta drygt 700 skopor i Sverige.

Mätning av flis med mätlåda kan ha en ännu bredare tillämpning än applikationen med lastmaskin eftersom den inte kräver en lastmaskin och specialutrustad skopa. På samtliga ställen där flis hanteras och lagras kan ett behov finnas för egna stickprovsmätningar vilket gör att den tillämpningen potentiellt sett är störst sett till antal enheter, särskilt om man sätter nyttan i relation till investeringskostnaden.

Lösningen med att mäta på transportband begränsar sig användarmässigt ofta till sena tillämpningar i kedjan. Transportband vid till exempel värmeverk i samband med bränsleinmatning är ett bra exempel. På en terminal förekommer sällan transportband även om man kan tänka sig det i samband med sällning och sortering av material. Denna

lösning ger även potential att optimera styrningen och förbränningsprocessen i pannan, vilket skulle öka effekten och därmed minska bränsleåtgången, samt även potentiellt minska skadliga utsläpp.

## Diskussion

På ett konceptuellt plan kan man fundera kring om det i framtiden kommer finnas ett behov av att veta fukthalten eller om utvecklingen kommer gå mot att betrakta skogsbränslen som en bulkvara där kvalitet inte är en avgörande faktor. Utifrån intervjuavaren, men också baserat på det generellt sett ökade fokuset på förädlingsvärden i skogsbranschen i stort med mer detaljstyrda processer så bör det i framtiden finnas ett fortsatt behov av bra fukthaltsinformation. Givet det behovet, blir nästa fråga om vägen för att erhålla bra fukthaltsinformation är att mäta den eller om det i stället kommer finnas trovärdiga prediktionsmodeller för det. Dagens utveckling med mer tillgängliga data skulle kunna öppna upp för bättre möjligheter att prediktera förändringar i fukthalt i de tidigare leden innan leverans av skogsbränsle. Det finns en stor efterfrågan på prediktionsmodeller för fukthalt, vilket har resulterat i forskningsinsatser i både Sverige, Finland och Österrike (Erber m.fl. 2014). I Finland resulterade det i en modell för prediktion av fukthalt för skogsbränsle. Vad som dock framkommer från de tidigare forskningsprojekten är att fuktförändringsförloppen har en stor del stokastiska inslag vilket gör dem svårpredikerade, i alla fall med stor noggrannhet. Precisionen måste dock sättas i relation till vad informationen ska användas till. För att bättre styra rätt bränsleleveranser mot rätt kundtyper skulle en mindre noggrann prediktionsmodell ändå kunna fungera, och på så sätt hjälp till att ta bättre beslut än idag. Vid industri ökar dock kravet på precision vilket gör att ett mätbehov ändå finns, även om fukthalten tidigare predikerats med en modell. Således måste syftet med fukthaltsinformationen sättas i relation till väg att införskaffa den samma och noggrannheten med vilket det låter sig göras. Vad som också måste tas i beaktande när man diskuterar och försöker kvantifiera nyttorna med bättre information är att informationen inte per automatik leder till alla förväntade nyttor och fördelarna. Det är hur man använder informationen och vilka beslut man tar baserat på den som i slutändan styr nyttan.

## Slutsatser

Slutsatserna baserat på analysen är att en implementering av en mikrovågsbaserad teknik för fukthaltsmätning skulle öppna upp för flertalet effektiviserings- och förbättringsmöjligheter. Det gäller för samtliga aktörer i leveranskedjan för skogsbränslen. Det gäller också för samtliga av de fyra teknikapplikationerna som undersökts; flisbilmätning, mätlåda, mätskopa och transportbandsmätning. Var den nya informationen adderas påverkar vilka möjligheter de olika aktörerna har till att agera baserat på den, och påverkar därigenom vilka möjligheter som öppnats upp.

## Delstudie 2

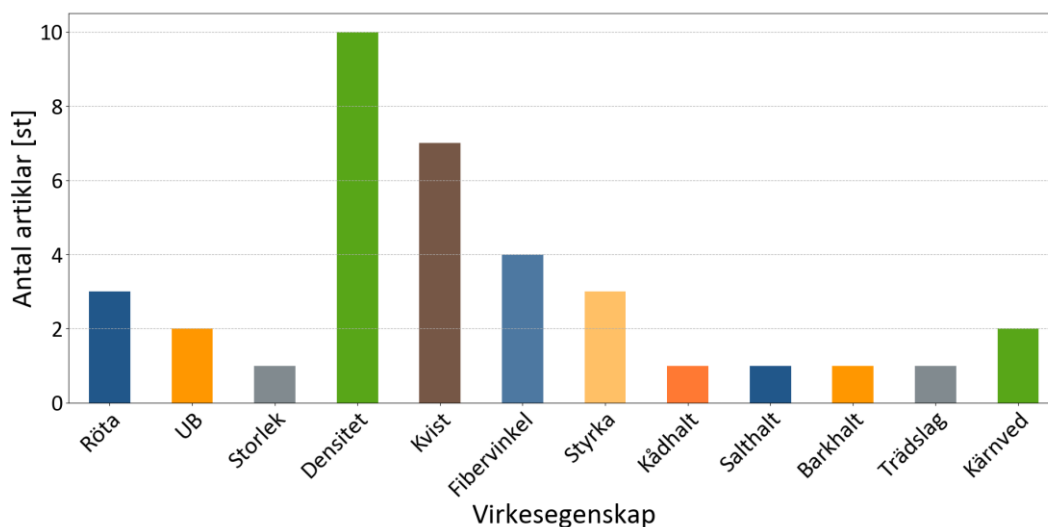
# Sammanställning av tidigare erfarenheter av mätning av andra virkesegenskaper än fukthalt med mikro- eller radiovågor

### Syfte

Det har forskats på interaktionen mellan mikro- och radiovågor och virke åtminstone sedan 1940-talet (Skaar 1949; Wittkoff & Macdonald 1949). Sedan dess har många forskare och utvecklare provat att tillämpa kunskapen för att mäta egenskaper hos virke. Sammanställningar av dessa arbeten har gjorts bland annat av Torgovnikov (1993), som betraktas som standardverket på ämnet, och Bogosanovic m.fl. (2010), som fokuserade på sågade trävaror. Givet att båda dessa har några år på nacken finns det anledning att gå igenom vad som har hänt sedan dess, och utöka perspektivet till att även inkludera stockar och flis. Det övergripande syftet är att identifiera områden för vidare teknikutveckling.

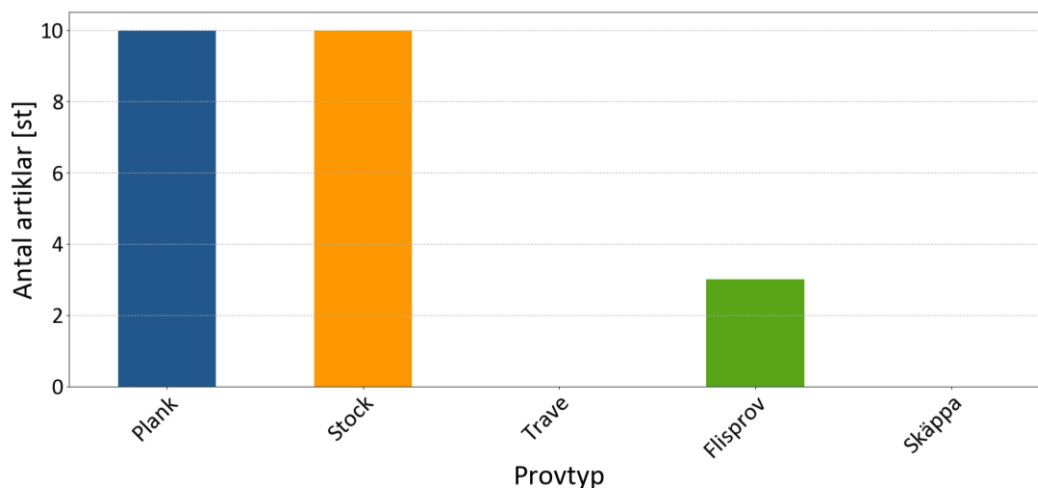
### Material

Totalt 22 studier ingick i sammanställningen. I många av studierna mättes fler än en egenskap. Flest studier avsåg densitet, följt av kvistegenskaper och fibervinkel, se Figur 7:



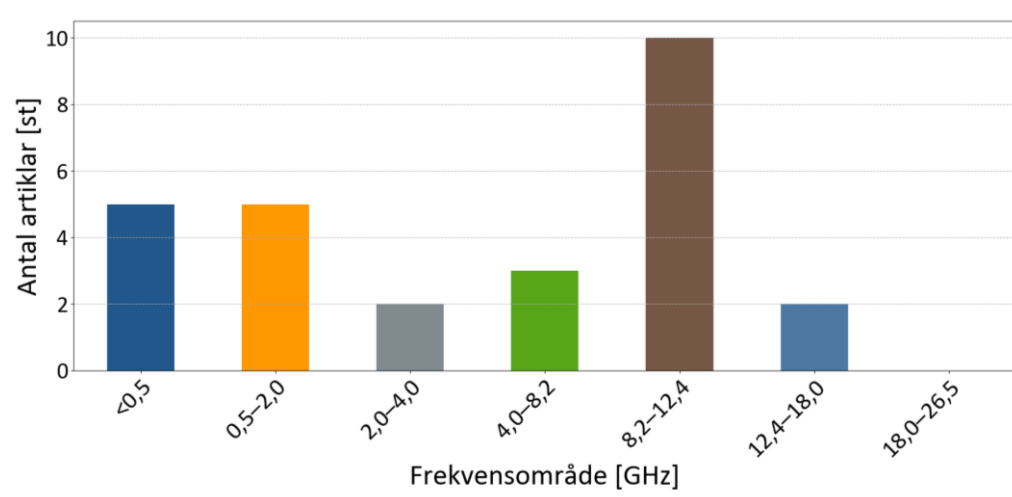
Figur 7. De virkesegenskaper som studerats i de olika artiklarna. Notera att samma artikel kan studera flera egenskaper, som då båda räknas med.

Ungefär lika många artiklar handlade om mätning på stockar eller delar av stockar som sågade trävaror (Figur 8). Ett mindre antal artiklar avsåg mätningar på prover av flis. Inga studier hittades där mätningar gjorts på travad rundved eller större bulk mängder av flis, till exempel skäppor.



Figur 8. Provtyperna för de olika artiklarna. "Plank" betecknar här samtliga prover som sågats i stockens längdriktning. "Stock" betecknar hela stockar, trissor, eller längder däremellan. "Flisprov" betecknar flismängder mindre än hela skäppor.

En betydande andel av studierna använde sig av frekvensområdet 8,2–12,4 GHz, se Figur 9. Detta hänger samman med att många studier använde sig av Satimos linjeskanner, som opererade i detta frekvensområde.



Figur 9. Frekvensområde som används för mätning av de olika studierna. Radiovågor är < 0,5 GHz, övriga frekvensband ligger inom mikrovågsområdet.

## Litteratursammanställning

I det här avsnittet redovisas publicerade användningar av mikro- och radiovågor för att mäta underbarksdiameter, densitet, röta, fiberorientering, kvistar, styrkeegenskaper, virkeskomponenter, kemiska egenskaper, storleksfördelning, massflöde och snövåthet.

Utgångspunkten är publicerad litteratur med fokus på de senaste 20 åren.

Sammanställningen av studierna fokuserar på:

- Vilken sorts virke som har mätts (stockar, plank, flis) och av vilket trädslag
- Vid vilken fukthalt och tillstånd (fruset/ofruset)
- Vid vilken/vilka frekvenser
- Med vilken typ av utrustning och mätprincip
- Slutsatser och identifierade svårigheter

### **Mätning av diameter under bark**

Persson (2013) gjorde ett försök med underbarksmätning av enskilda stockar baserat på en mikrovågstomograf med frekvenser mellan 0,3 och 3,0 GHz. Hypotesen var att varje övergång mellan bark och ved bör ge en reflektion, som kan identifieras och extraheras med signalbehandling. De preliminära resultaten såg lovande ut men forskarna bedömde inte att tillräckligt med engagemang fanns från skogsbruket för att säkra finansiering för vidare utveckling.

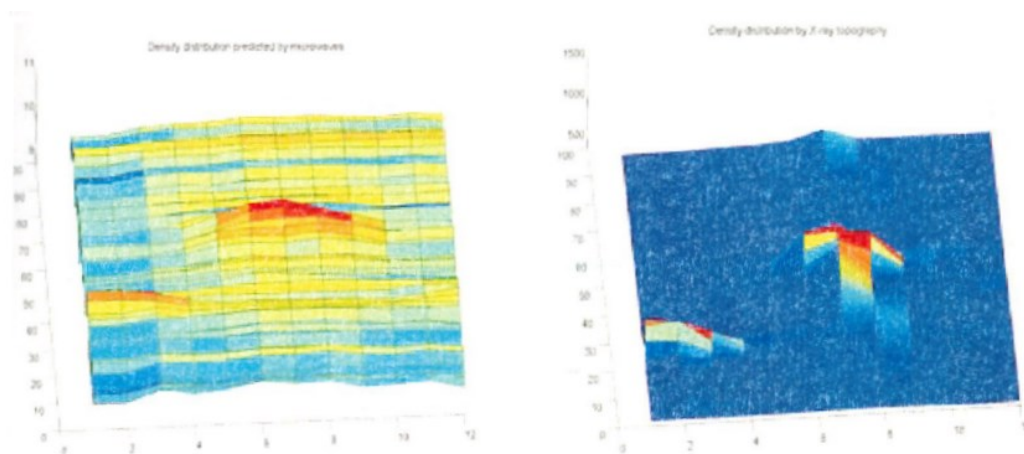
Radarbolaget gjorde ett försök att mäta under bark på en gran- respektive en tallstock med UWB-utrustning med mittfrekvens 2,0 GHz och bandbredd  $\pm 50$  procent av mittfrekvensen. Mätsignalen bedömdes vara känslig för veden och inte barken, och att resultatet därför blev en diameter under bark som kunde subtraheras från ett manuellt mått på bark för att få barktjockleken. Slutsatsen var att de uppmätta värdena på barktjockleken var rimliga, men att ytterligare undersökningar skulle behövas för att avgöra metodens potential (Ottosson 2014).

Sammanfattningsvis så tycks underbarksmätning av diameter vara möjlig, men studier saknas som visar vilken mätnoggrannhet som går att uppnå.

### **Densitet**

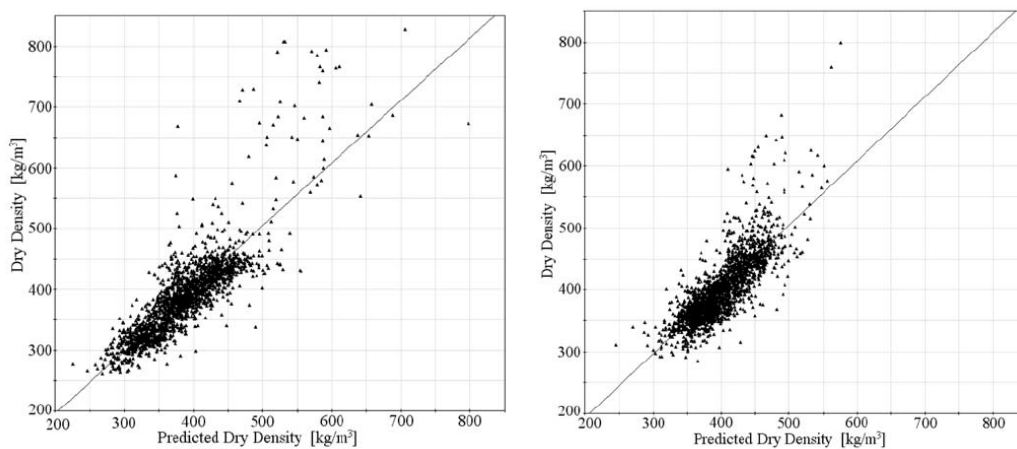
Johansson (2001) använde sig av Satimos transmissionsbaserade linjeskanner med mittfrekvens 9,375 för att mäta torrdensitet (och fukthalt och styrkeegenskaper) hos sågad tall med olika fukthalter. Utrustningen bestod av 128 dubbelpolariserade dioder placerade med 8 mm mellanrum, vilket innebar möjlighet att detektera strukturer med storlek över 8 mm. Proverna matades genom linjeskannern vilket resulterade i en tvådimensionell bild. Johansson (2001) jämförde också mikrovågsmätningarna med röntgenmätningar, se Figur 10, och drog slutsatsen att densitetsfördelningen generellt gick att mäta väl, med ett  $R^2$ -värde på 0,95 mellan referensmätt och predikterad densitet. Noggranna mätningar kring kvistar skulle dock kräva ytterligare signalbehandling, och mätningens osäkerhet ökade kring plankornas ytterkanter.





Figur 10. Densitetsfördelningen hos sågad tall mätt med mikrovågstransmission (vänster) och medicinsk röntgenbaserad CT-skanner (höger). Två kvistar syns i bilden. Källa: Johansson (2001)

Lundgren m.fl. (2006; 2007) använde sig också av Satimos transmissionsbaserade linjeskanner med mittfrekvens 9,375 GHz, för att mäta torrdensitet (och fukthalt) hos 2,5 cm respektive 5,0 cm tjocka tallplankor. För plankorna med 2,5-cm tjocklek hade mätningen ett  $R^2 = 0,71$  och  $RMSE = 38 \text{ kg/m}^3$ , medan motsvarande för plankorna med 5,0 cm tjocklek var  $R^2 = 0,64$  och  $RMSE = 32 \text{ kg/m}^3$ , se Figur 11.

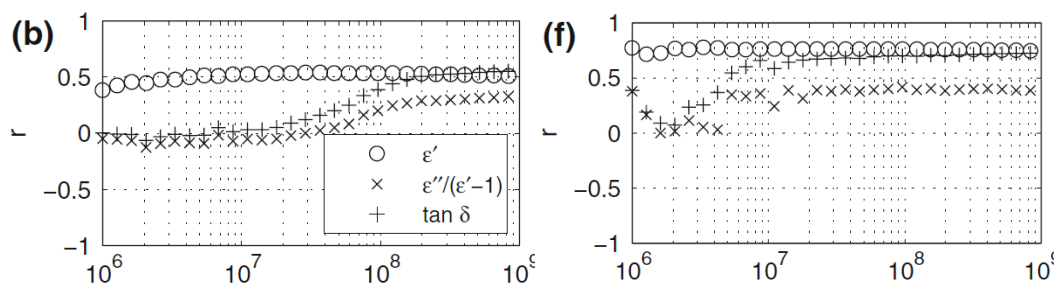


Figur 11. Mikrovågsbaserade densitetsmätningar av 2,5 cm tjocka tallplankor (vänster) respektive 5,0 cm tjocka tallplankor (höger). Källa: Lundgren (2007).

Schajer & Orhan (2005; 2006) använde mikrovågor för att mäta torrdensitet (samt fiberorientering och fukthalt) på sågade prover av hemlock (tsuga) och Douglasträd. Utrustningen var baserad på modularad dipolspridning (MDS) med hornantennor med en mittfrekvens på 10 GHz. Signalens transmission och reflektion mättes. Deras slutsats var att densiteten hos proverna kunde mätas med en noggrannhet på  $3,7 \text{ kg/m}^3$  för rådensitet och  $16 \text{ kg/m}^3$  för torrdensitet.

Tomppo m.fl. (2009) använde impedansbaserad mikro- och radiovågsspektroskopi för att mäta torrdensitet (och fukthalt och kådhalt) hos trissor och kärnveds- respektive splintvedsutsnitt av gran. Signalens frekvens varierade mellan 0,001 och 1,0 GHz och

sändes ut antingen vertikalt eller horisontellt polariserat i förhållande till fiberriktningen. Proverna mättes i ofruset respektive fruset samt rått respektive torkat tillstånd. Korrelationerna mellan referensmätt densitet och uppmätta värden på dielektricitetskonstanten ( $\epsilon'$ ), förlustfaktorn ( $\epsilon''$ ), förlusttangenta ( $\tan(\delta)$ ) och förlustkvoten ( $R_e$ ) var mellan 0,5 och 0,84, beroende på prov, parameter och polarisationsriktning. Eftersom få studier har utförts på frusna prover är det värt att notera att korrelation mellan densiteten hos frusen kärnved och  $\epsilon'$  var åtminstone måttlig. Störst korrelation fanns vid låga frekvenser (radiovågsområdet), med R-tal upp mot 0,5 eller 0,8, beroende på polarisationsriktning (se Figur 12).



Figur 12. Korrelation (R-tal) mellan referensmätt densitet och dielektriska parametrar hos kärnved av gran, uppmätta med horisontell polarisation för olika radio- och mikrovågsfrekvenser (x-axeln, enhet Hertz) och prover i olika tillstånd, där vänstra figuren är fruset prov (fukthalt 65%) och högra figuren är ofruset prov (fukthalt 65%). Källa: Tomppo m.fl. (2009)

Paz (2010) och Trabelsi m.fl. (2013) gjorde mikrovågsbaserade mätningar av densitet (typ av densitet oklart, men sannolikt torrdensitet) hos pellets av jordnötsskal, i samband med andra mätningar på sönderdelat skogsbränsle. Sett till materialegenskaper är även jordnötsskal relativt likt virke. Mätningarna skedde med ett frirymdbaserat system med hornantennor som gav frekvenser mellan 5,0 och 15,0 GHz och mätte på provvolymen i storleksordningen 10 liter. Mät noggrannheten i densitetsmätningen var mellan 1,6 kg/m<sup>3</sup> och 2,3 kg/m<sup>3</sup>.

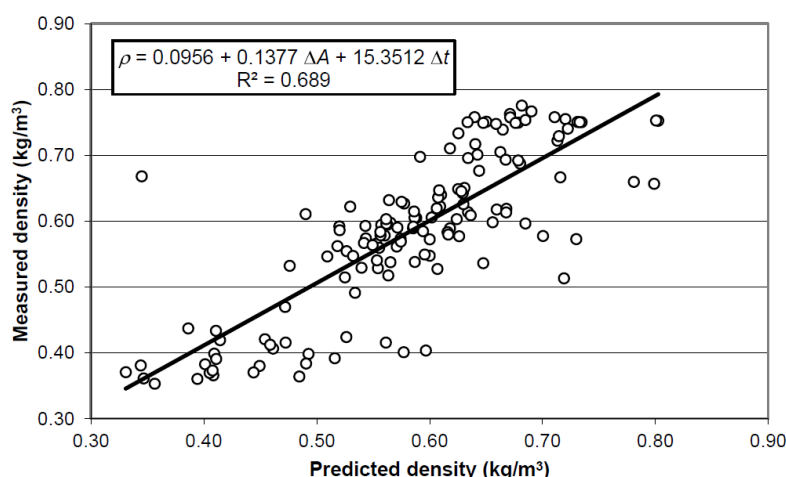
Denzler m.fl. (2014) använde mikrovågstransmission för att mäta densitet (och fukthalt) hos sågade prover av gran. Typen av densitet framgick inte tydligt av artikeln, men var troligen torrdensitet. Uppställningen bestod av 28 små patchantennor som vardera hade en upplösning (pixelstorlek) på 1,25 x 1,25 cm. Antennorna var dubbelpolariserade, vilket innebär att de kunde mäta både horisontell och vertikal polarisation samtidigt. Mätningarna skedde vid frekvensen 12 GHz. Densiteten beräknades med en modell baserad på signalens fasskiftning och dämpning, samt det sågade provets tjocklek. R<sup>2</sup>-värdet mellan den modellerade och referensmätta densiteten var 92 procent eller högre.

Kol och Şahin (2015) genomförde mikrovågsmätningar av torrdensitet (och styrkeegenskaper) på sågad ek och tall med fukthalt 65 procent. Mätningarna skedde med en centrumfrekvens på 9,8 GHz genom att provet fästes vid en slitsad vågledare. Korrelationen mellan referensmätt densitet och dielektricitetskonstanten  $\epsilon'$  var 0,74 för tall och 0,79 för ek, medan motsvarande för förlustfaktorn  $\epsilon''$  var 0,56 respektive 0,78.

Aichholzer m.fl. (2016) använde en bredbandig utrustning med frekvenser 8,0–12,5 GHz för att mäta torr- och rådensitet (samt fukthalt och fiberorientering) på sågade trävaror av gran. Mätningarna gjordes i transmissionsläge. Densitetsmätningen hade en RMSE på max 11,5 kg/m<sup>3</sup> för fuktiga prover och 12,6 kg/m<sup>3</sup> för helt torra prover, med ett spann på

284-527 kg/m<sup>3</sup>. Författarna påtalade även vikten av att mäta fiberorienteringen för att undvika mätfel baserade på mikrovågssignalens beroende av fiberorienteringen.

Bejo m.fl. (2018) använde 4,4 GHz-utrustning för att mäta torr- och rådensitet (och fukthalt) på fuktigt plank av ett tiotal olika träslag under torkningsprocessen. R<sup>2</sup>-värden mellan 0,69 och 0,71 rapporterades. Vissa av mätningarna gjordes på nytorkade prover med temperatur 100 °C, och författarna kommenterade att mätsignalen vid dessa temperaturer hade ett högt beroende av just temperaturen.



Figur 13. Referensmätt vs. mikrovågsmätt densitet, där punkterna baseras på mätningar av sågade prover vid flera olika fukthalter och från ett tiotal olika träslag. Källa: Bejo m.fl. (2018).

På den kommersiella sidan finns företaget TEWS, som marknadsför sina mikrovågsbaserade sensorer för densitetsmätning (och fukthaltmätning) av pellets från skogsråvara (Jadot 2014). Inga studier som utvärderat utrustningen gick dock att hitta.

Sammanfattningsvis så har majoriteten av studierna mätt global densitet hos sågade trävaror, under laboratorieförhållanden. Någon enstaka studie har mätt lokal densitet hos sågade trävaror, eller mätt på trissor, som bör påminna mer om mätning av hela stockar. Det är ofta otydligt om rådensitet, torrdensitet eller torr-rådensitet avses. Snittvärdet för R<sup>2</sup> mellan referensmätt och mikrovågsmätt densitet för de sågade trävarorna var cirka 0,8, och snittvärdet på mätosäkerheten för de fall den angavs var cirka 15 kg/m<sup>3</sup>. Inga studier mätte på hela stockar, travar av rundved eller prover eller skäppor av flis.

### Kvistposition- och storlek

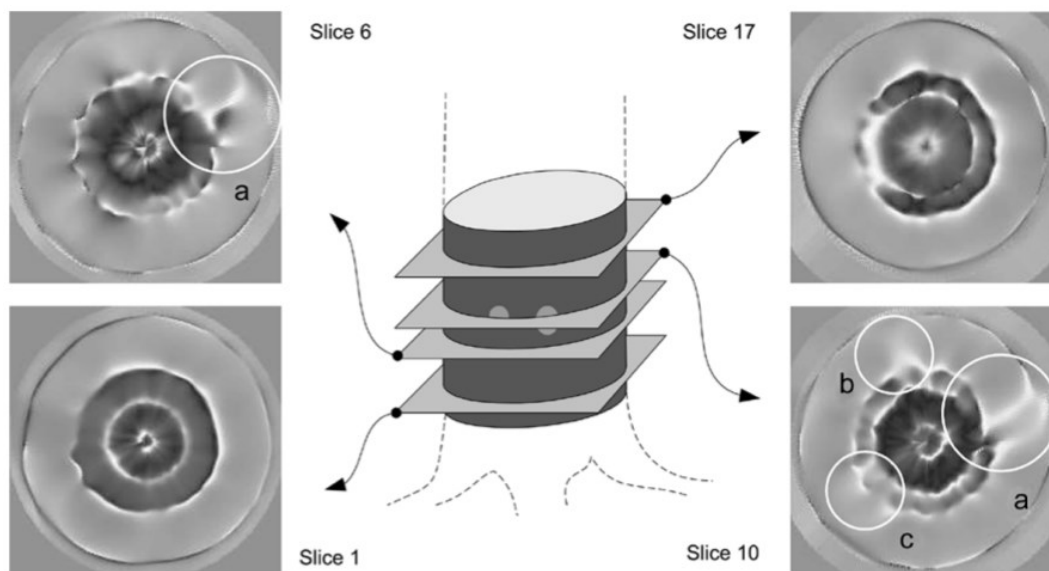
Eskelinen och Harju (1998) använde mikrovågsutrustning med mittfrekvensen 15,0 GHz för att detektera kvistars position på sågade trävaror. Utrustningen bestod av en hornantenn och i labbversion med en nätverksanalysator, som mätte både den reflekterade och transmitterade signalen. De kommenterade att inhomogeniteter i träet syntes tydlig i signalens gruppfördröjning (*group delay*) vid 15,0 GHz, men rapporterade inga kvantitativa resultat.

Eskelinen och Eskelinen (2000) använde både samma utrustning som Eskelinen och Harju (1998), samt en annan utrustning baserat på hornantenn, med frekvensområde 2-6 GHz, som var tänkt att kunna monteras i ett skördaraggregat. Fem stockar av gran och tall mättes i laboratoriemiljö. Författarna drog slutsatsen att kvistars position generellt sett gick att detektera baserat på signalens dämpning, med en osäkerhet i

positionen på  $\pm 20$  mm. Ett antal utmaningar med mikrovågsmätning i skördaraggregat togs dock upp: 1) att identifiera vilka variationer i signaler som kom från inre strukturer, och vilka som kom från variationer i stockens bark. Dels att mätningen och signalbehandlingen behövde ske mycket snabbt, på grund av aggregatets produktionshastighet som gjorde att varje kvist bara mättes under ett par millisekunder. 2) att snö och is kunde ge upphov till multipla reflektioner eller frost på glaset på den kapsel som signalgivaren var monterad i, 3) att signalen behövde vara vertikalt eller elliptiskt polariserad, då den horisontella polariseringen inte tog sig igenom stocken, och 4) att mätning av signalens gruppfördröjning vore ännu mer utmanande.

Bikkina (2002) använde radiovågor för att mäta kvistars area, djup och vinkel hos stockar av okänt trädslag. Mätssystemet var kapacitansbaserat och bestod av sex elektroder som placerades i en ring runt stocken. Radiovågsfrekvenser mellan 0,2 och 2200 MHz genererades och olika signalstyrkor utvärderades. Slutsatsen var att kvistarnas area och djup korrelerade väl med mätsignalen, men att vinkeln inte gjorde det.

Kaestner och Bååth (2005) använde en mikrovågstomograf för att studera kviststrukturen hos kapade granstockar. Mätningarna gjordes med en bredbandig hornantenn i frekvensområdet 4–8 GHz och gjordes i radarläge, det vill säga mätning av reflekterade signaler från ytan och inne i stocken. De konstaterar att mätning av förändringen i signalens styrka i huvudsak gav information om stockens yta samt att intensitetsmätningen gav ett begränsat penetrationsdjup (10 procent av stockens diameter för det aktuella frekvensområdet). De fokuserade därför mätningen på förändringen i mikrovågssignalens polarisation, då detta skulle kunna ge information om strukturer djupare in i stocken. Provet roterades för att ge mätning i olika vinklar, och olika tvärsnitt av den mättes, se Figur 14. Slutsatsen var att den polarisationsbaserade metoden kunde detektera både positionen och vinkeln hos kvistarna i stocken, medan en mätning som baserade sig på mikrovågornas intensitet enbart kunde detektera grova kvistar.



Figur 14. Mikrovågstomografmätning av kviststrukturen hos en kapad granstock. Källa: Kaestner & Bååth (2005).

Baradit m.fl. (2006; 2009) använde sig av polariserade mikrovågor med mittfrekvens 10,5 GHz och med en styrka på 10 mW för att detektera kvistar i torra och fuktiga stockar.

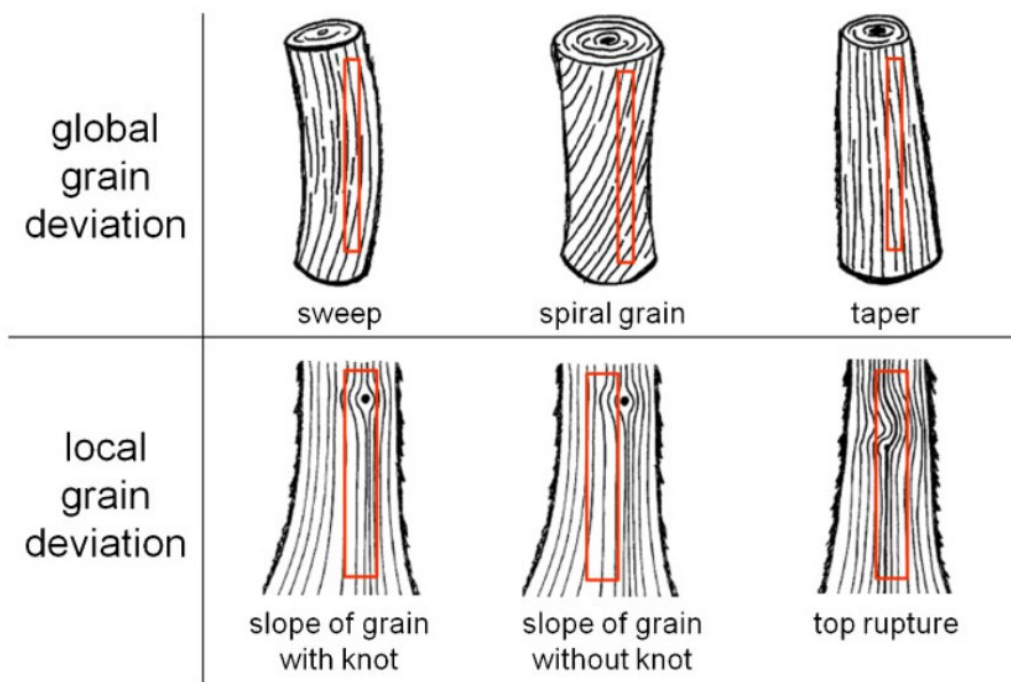
Slutsatsen var att den uppmätta kviststrukturen stämde väl överens med en visuell bedömning av kvistarna.

Den kommersiella mikrovågsbaserade linjeskannerutrustningen Dentre LRX från Microwave Vision Systems nämner i sitt informationsmaterial att den kan detektera kvistar i trä (MVG 2013) med en upplösning på 10 mm. Dentre LRX är en vidareutveckling av den skanner-utrustning från Satimo som använts i flera studier. Företaget specificerar inte vilket frekvensområde som används, men en kvalificerad gissning är att det är samma som för Satimo, det vill säga 9,375 GHz. Företaget har gjort några tester för mätning av densitet och fukthalt på trä (sannolikt sågade trävaror) men drog slutsatsen att noggrannheten i mätningen var otillräcklig (Nicolas Doare, MVG, personlig kommunikation 2021).

Sammanfattningsvis tycks kvistposition och kviststorlek kunna detekteras relativt väl med mikrovågor hos både plank och stockar. Det kräver dock att mätningarna görs med rörlig punkt- eller linjeskanning, i bild (2D) eller 3D (tomografi), och med frekvenser som ger tillräcklig spatial upplösning för att kunna detektera de strukturer som är av intresse. Det är beklagligt att inga tester i produktionsmiljö rapporterades för den utrustning som togs fram för användning i skördaraggregat.

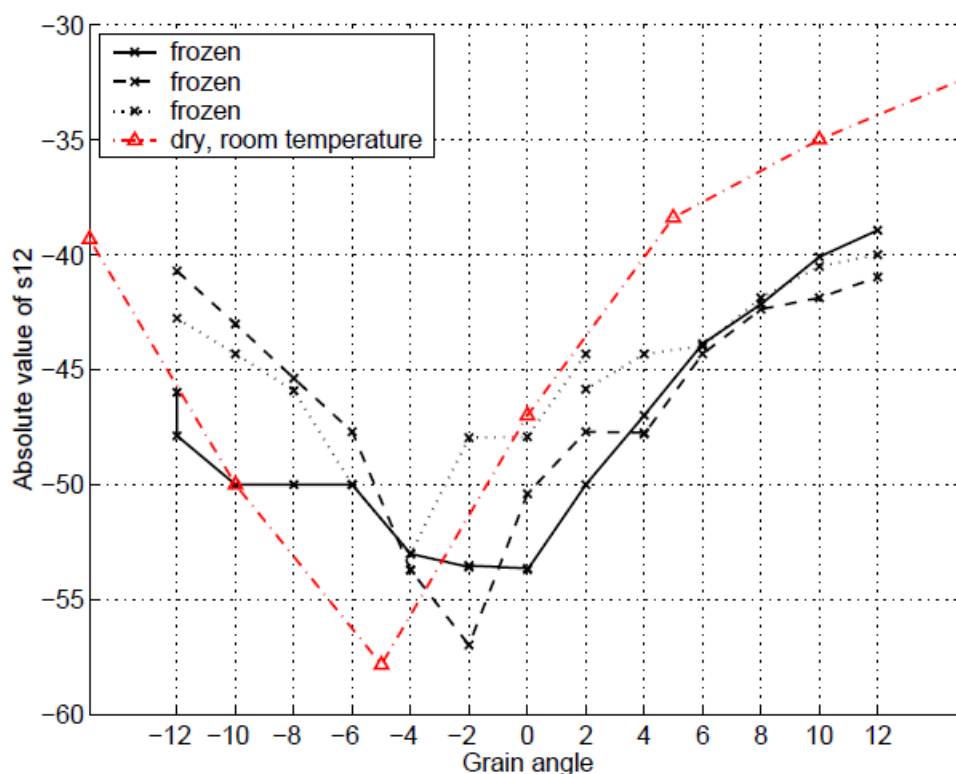
### Fiberorientering och toppbrott

Virke har vanligen en global fiberorientering samt lokala fiberorienteringar kring exempelvis kvistar, se Figur 15. Hur känslig en mikro- eller radiovågssignal är för global respektive lokal fiberorientering beror framför allt på frekvensen (vilket ger den spatiala upplösningen eller ”pixelstorleken”, polarisationsriktningen, samt hur stort prov som mäts.



Figur 15. Olika kategorier av fiberorienteringar enligt Denzler m.fl. (2013). Översta raden från vänster: krök, växtvridenhet, avsmalning. Nedersta raden från vänster: kvist, kvistnära, toppbrott.

Sjöden m.fl. (2005) simulerade en tänkt uppställning för mikrovågsbaserad mätning av global fiberorientering (växtvridenhet) hos stockar, samt utförde några experimentella mätningar. Simuleringarna utfördes för centrumfrekvensen 2,375 GHz, och mätningarna utfördes på torra ofrusna respektive frusna sågade prover av gran vid centrumfrekvens 9,0 GHz (Figur 16). Författarna konstaterade att fruset virke behöll det dielektriska beteende som tillät mätningen av fiberorientering. Ytterligare experimentell validering genomfördes dock inte.

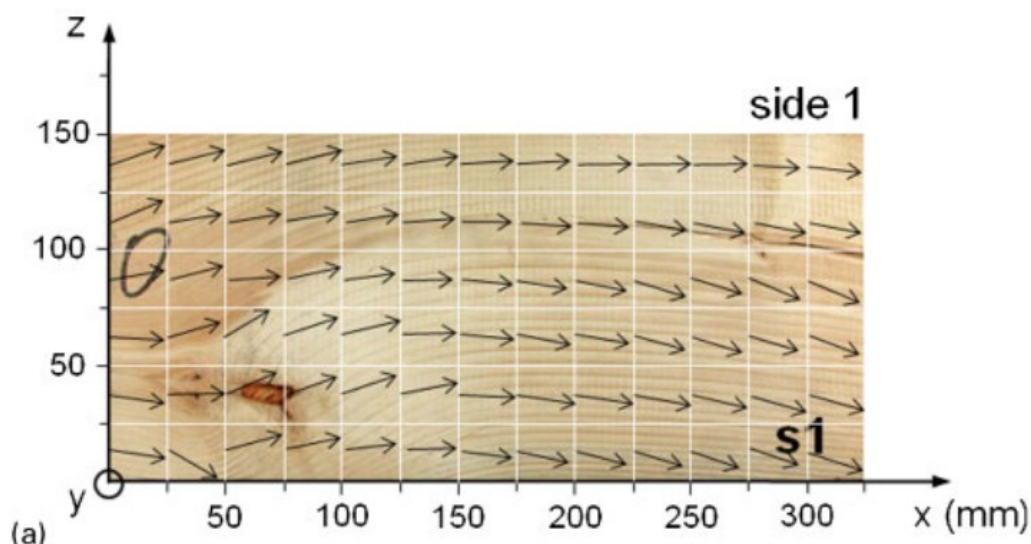


Figur 16. Uppmätt global fiberorientering hos frusen och ofrusen gran vid centrumfrekvens 9,0 GHz. Källa: Sjöden m.fl. (2005).

Schajer & Orhan (2005; 2006) använde mikrovågor för att mäta global fiberorientering (samt densitet och fukthalt) på sågade prover av hemlock (tsuga) och Douglasträd. Utrustningen var baserad på modularad dipolspridning (MDS) med hornantennar med en mittfrekvens på 10 GHz. Signalens transmission och reflektion mättes. Deras slutsats var att fiberorienteringen kunde mätas med en noggrannhet på mellan 0,9° och 2,5°.

Denzler m.fl. (2013) samt Denzler och Weidenhiller (2015) använde mikrovågstransmission för att mäta lokal fiberorientering hos sågade plank av gran. Uppställningen bestod av en hornantenn som kunde roteras för att ge två olika polarisationsriktningar, en förflyttningsbar mottagare på andra sidan provet, och en nätverksanalysator. I den första studien skedde mätningarna vid frekvenserna 10 och 12 GHz, vilket gav en spatial upplösning (pixelstorlek) om 2,5 x 2,5 cm respektive 3,0 x 3,0 cm, se Figur 17. En relativ noggrannhet om  $\pm 1^\circ$  rapporterades. Värdena nära plankans kant var dock opålitliga, vilket förklarades med optiska kanteffekter. I den senare studien användes en liknande uppställning för att detektera toppbrott i sågade plankor av gran, baserat på avvikelser i fiberorienteringen. Mätningen skedde i detta fall vid frekvensen 12 GHz och med en spatial upplösning på 1,25 x 1,25 cm. 90 procent av de plankor som hade

toppbrott blev korrekt klassade som sådana, medan 20 procent av de plankor som inte hade toppbrott blev felklassade som havandes toppbrott. Författarna kommenterade att detta troligen berodde på förekomsten av kvistar, och de lokala fiberorienteringsavvikelserna runt kvisten. De konstaterade också att labbuppställningen skulle behöva en del utveckling för att lämpa sig för produktionsmiljö.



Figur 17. Mätning av lokal fiberorientering runt en kvist, mätt vid frekvensen 12 GHz. Källa: Denzler m.fl. (2013).

Aichholzer m.fl. (2016) använde en bredbandig utrustning med frekvenser 8,0–12,5 GHz för att mäta global fiberorientering (samt fukthalt och densitet) på sågade trävaror av gran. Utrustningen bestod av en linjärpolarisator hornantenn på vardera sida om provet, samt en nätverksanalysator. Mätningarna var transmissionsbaserade och gjordes i provets närfält. Analysen av fiberorienteringen baserades på mätsignalens depolarisering. Författarna kommenterade att just fiberorienteringen kunde mätas för ett enskilt prov, medan fukthalten och densiteten krävde statistiska samband baserade på många prover. Författarna fann att fiberorienteringen kunde bestämmas med en noggrannhet på  $0,14^\circ$  för fuktiga prover and  $0,40^\circ$  för ugnstorkade prover.

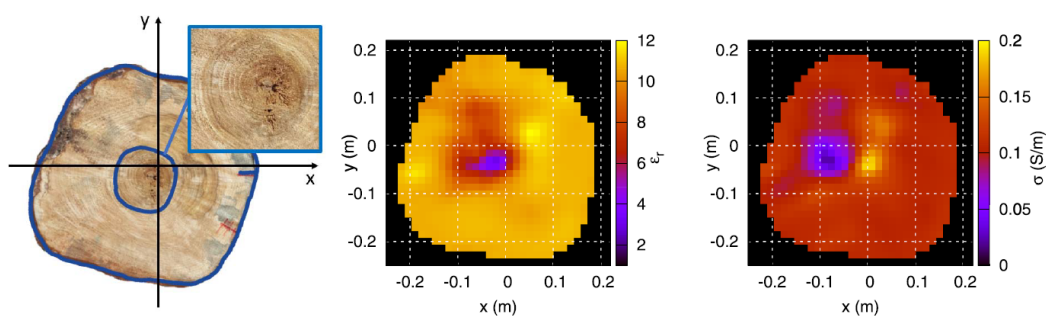
Sammanfattningsvis så tycks global fiberorientering (växtvridenhet) kunna mätas relativt väl hos sågade prover. Fysikaliskt sett bör samma gälla för hela stockar, men här saknas tillräckliga studier. Samma sak tycks gälla lokal fiberorientering, men dessa mätningar är sannolikt långsammare och dyrare till följd av den detaljeringsgrad som krävs.

## Röta

Idag finns ingen automatisk mätmetod som tillfredsställande kan detektera skogs- eller lagringsröta i stockar (Hyll & Nordström 2020).

Persson (2013) gjorde en förstudie där en bredbandig mikrovågstomograf utvecklad för medicinska tillämpningar användes för att mäta röta på granstockar. Tomografen bestod av 12 triangelformade, bredbandiga patchantennor som genererade frekvenser mellan 0,3–3,0 GHz. Förstudiens slutsats var att frisk gran kunde skiljas från rötskadad gran. Forskarna bedömde inte att tillräckligt med engagemang fanns från skogsbruket för att säkra finansiering för vidare utveckling.

Boero m.fl. (2018) utvecklade en bredbandig mikro- och radiovågstomograf för mätning av hela stockar vid frekvenser mellan 0,4 och 1,4 GHz. I studien gav mätningen en bild över de dielektriska egenskaperna, som kopplades till röta och håligheter hos den stock som utrustningen utvärderades på. Baserat på bilderna bör den spatiala upplösningen ha varit cirka 1 cm. Resultaten kvantifierades inte närmare. Författarna nämnde att stockar med oregelbunden form utgjorde en utmaning när mätsignalen skulle rekonstrueras till en 3D-bild.



Figur 18. Detektion av röta hos en stock (vänster) via mätning av den relativa permittiviteten (mitten) och relativa konduktiviteten (höger) vid frekvensen 0,5 GHz. Källa: Boero m.fl. (2018)

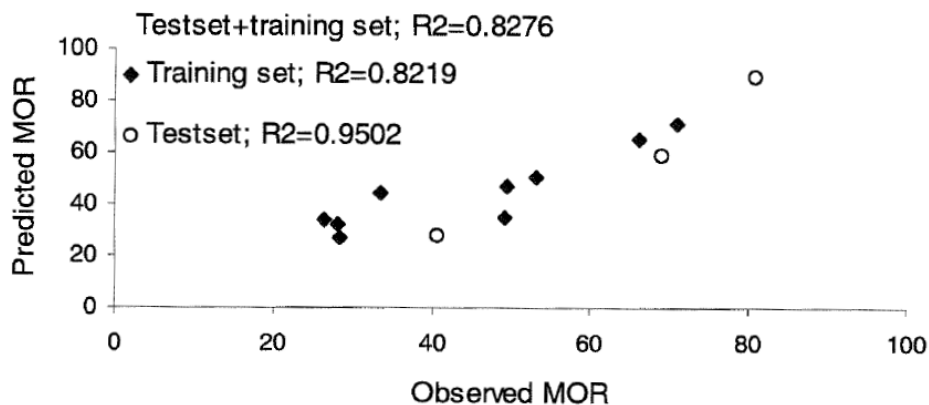
Ett flertal studier har använt mikrovågor för att mäta röta eller håligheter på stående träd eller på träkonstruktioner i byggnader, oftast i form av mikrovågstomografi (Pastorino m.fl. 2015; Maurizka & Munir 2017; Alani m.fl. 2019) och/eller markradar (Rodrigues m.fl. 2021). Ofta kombineras minst två olika tekniker, till exempel mikrovågor/markradar och ultraljud, för att få en acceptabel tillförlitlighet i mätningen. De flesta studier är dock av *proof-of-concept*-karaktär, där mätningen har utvärderats på ett mycket begränsat antal stockar, och oftast enbart kvalitativt. En artikel utvärderade det kommersiella markradarsystemet TRU System, som utvecklats för inspektion av stående träd och använder sig av frekvenserna 0,4, 0,9, 1,6, och 2,0 GHz (Xi m.fl. 2018). Mätningen av begynnande röta hos ett antal kinesiska trädslag visade att markradarn gav opålitliga resultat, särskilt på stockar med liten diameter och oregelbunden stamform. Rodrigues m.fl. (2021) påpekar att mikrovågsdetektering av röta ofta baseras på en förändring i fukthalt i de rötade områdena, och att typer av röta som inte ger upphov till fuktförändringar därför är svårare att detektera.

Sammanfattningsvis finns mycket som tyder på att det går att mäta röta i viss utsträckning med mikro- eller radiovågor, men inga kvantifierade resultat över vilken allvarlighetsgrad eller typ av röta som går att mäta.

### Styrkeegenskaper

Johansson (2001) använde Satimos linjeskanner med centerfrekvens 9,375 för att mäta styrkeegenskaper (och densitet och fukthalt) på sågad tall. Styrkeegenskaperna rapporterades huvudsakligen i form av brotthållfasthet (Modulus of Rupture, MOR). R2-värdet mellan predikterad och referensmätt MOR var mellan 0,7 och 0,9 (exempel visas i Figur 19).





Figur 19. Mikrovågsmätt vs. Referensmätt Modulus of Rupture (MOR) på 50 x 100 mm tallplankor. Källa: Johansson (2001).

Lundgren (2007) mätte styrkeegenskaper hos sågade plankor av tall med Satimos linjeskanner. Ett R<sup>2</sup>-värde på 0,44 mellan uppmätt MOR och predikterat MOR beräknades. Ingen korrelation mellan mikrovågsmätningen och MOE hittades. Författaren nämnde att det kan ha berott på handhavandefel vid referensmätningen av MOE.

Kol och Şahin (2015) genomförde mikrovågsmätningar av styrkeegenskaper (och densitet) på sågad ek och tall med fukthalt 65 procent. Mätningarna skedde på en centrumfrekvens på 9,8 GHz genom att provet fästes vid en slitsad vågledare. I analysen korrelerades den uppmätta dielektricitetskonstanten  $\epsilon'$ , förlustfaktorn  $\epsilon''$  och förlusttangenta  $\tan(\delta)$  till referensmätt brotthållfasthet (Modulus of Rupture, MOR), böjhållfasthet (Modulus of Elasticity, MOE), slaghållfasthet (Impact Bending Strength, IBS) och kompressionsstyrka (Compression Strength, CS). R<sup>2</sup>-värdena var 0,47–0,78 för MOR, 0,35–0,72 för MOE, 0,36–0,70 för kompressionsstyrka och 0,36–0,66 för slaghållfasthet, där det högre värdet gäller för ek och det lägre för tall. Författarna konstaterade att dielektricitetskonstanten  $\epsilon'$  hade högre korrelation till styrkeegenskaperna än de andra dielektriska parametrarna.

Sammanfattningsvis så tycks resultatet av mikrovågsbaserad mätning av styrkeegenskaper variera mycket beroende på provmaterialets tjocklek och träslag. Det indikerar att det kan vara svårt att ta fram en mätutrustning som passar alla typer av prover. Sannolikt är det ännu svårare att mäta på hela stockar för att prediktera styrkeegenskaper på sågade trävaror, men här saknas studier.

## Virkeskomponenter

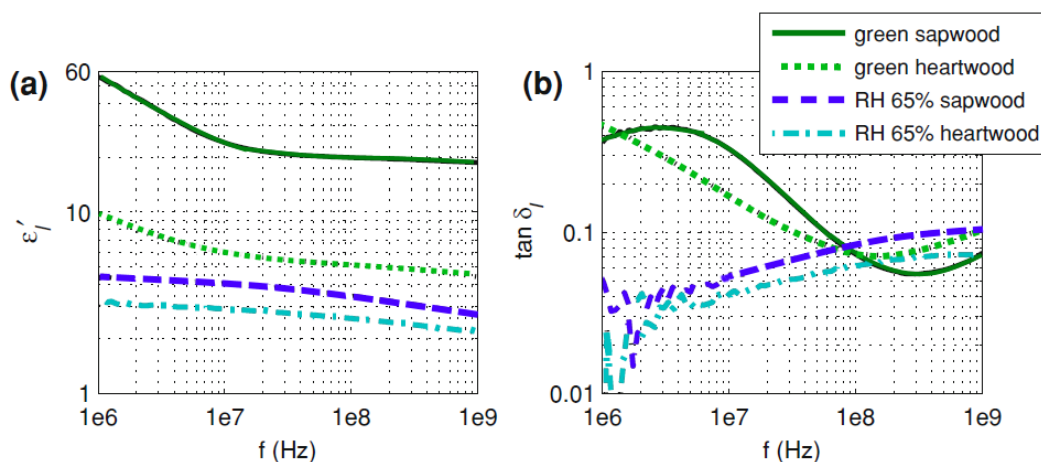
### Barkhalt

Tiitta m.fl. (2020) använde elektrisk impedansspektroskopi för att klassa barkhalt hos sönderdelad (flisad) björk. Hypotesen var att bark och stamved skulle gå att skilja från varandra genom sin skillnad i förekomst av extraktivämnen, då dessa förmodades reagera på radiovågssignalen. Mätningarna utfördes vid 34 olika radiovågsfrekvenser mellan 42 Hz och 5 MHz och på vid olika fukthalter. Stamvedsflis och bark av björk mixades till prover med 0 procent, 25 procent, 50 procent, 75 procent och 100 procent barkhalt. När klassad barkhalt jämfördes med referensmätt var träffsäkerheten 91 procent för rena

björkprover. När björk och tall blandades sjönk träffsäkerheten till 64 procent. Mätningen fungerade som bäst när fukthalten var över fibermättnadspunkten.

### Kärn- och splintvedsandel

Tomppo m.fl. (2009) använde impedansbaserad mikro- och radiovågsspektroskopi med frekvenser 0,001–1,0 GHz för att mäta dielektriska egenskaper hos kärn- och splintvedsprover från tall. Kärn- och splintved uppvisade tydliga skillnader i dielektriska egenskaper, framför allt när virket var i grönt (rått) tillstånd, se Figur 20. Det tyder på möjlighet att skilja mellan kärn- och splintved med mikro- och radiovågor, något som dock inte testades i studien.



Figur 20. Uppmätt dielektricitetskonstant (vänster) och förlusttangens (höger) hos kärn- respektive splintved hos tall, vid frekvenser 0.001-1,0 GHz och två olika fukthalter. Färglagd för ökad tydlighet. Källa: Tomppo m.fl. (2009)

Tiitta m.fl. (2020) använde elektrisk impedansspektroskopi för att klassa kärnvedsandel hos flisad tall. Skillnaden i extraktivämnen mellan kärnved och splintved förmodades ge utslag i radiovågssignalen. Stockar flisades och mixades så att de resulterande proverna hade 0 procent, 25 procent, 50 procent, 75 procent och 100 procent kärnvedsandel. När klassad kärnvedsandel jämfördes med referensmätt var träffsäkerheten 90 procent för rena tallprover. När tall och björk blandades sjönk träffsäkerheten till 73 procent.

### Trädslagsblandning

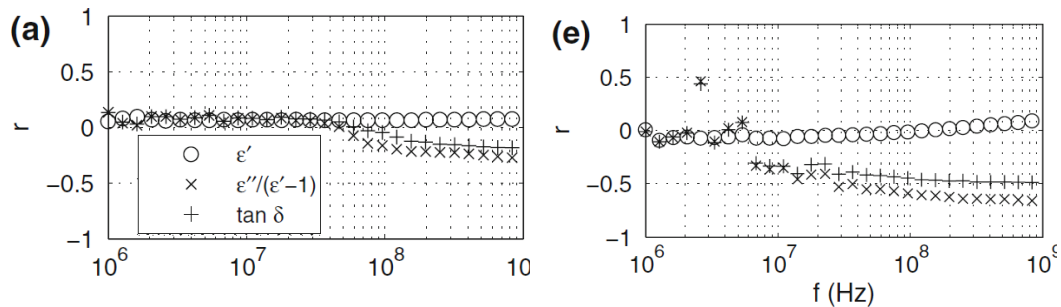
Tiitta m.fl. (2020) använde också elektrisk impedansspektroskopi för att klassa trädslagsblandning. Prover bestående av antingen 100-procentig tall eller 75-procentig tall och 25-procentig björk klassades. Träffprocenten i klassningen var på 69–89 procent, oberoende av fukthalt. Författarna kommenterade att radiovågssignalen sannolikt reagerade på skillnaden i densitet mellan tall och björk, förutom skillnaden i mängden extraktivämnen.

Sammanfattningsvis tycks det finnas potential att skilja mellan olika virkeskomponenter med mikro- eller radiovågor, åtminstone i grova klasser. Många fler studier skulle dock behövas för att undersöka vilka tillämpningar som fungerar, exempelvis om gran kan skiljas från tall trots att likartade densitet, och om mätningarna fungerar om komponenterna har olika fukthalter, vilket påverkar densiteten.

## Kemiska egenskaper

### Kådhalt

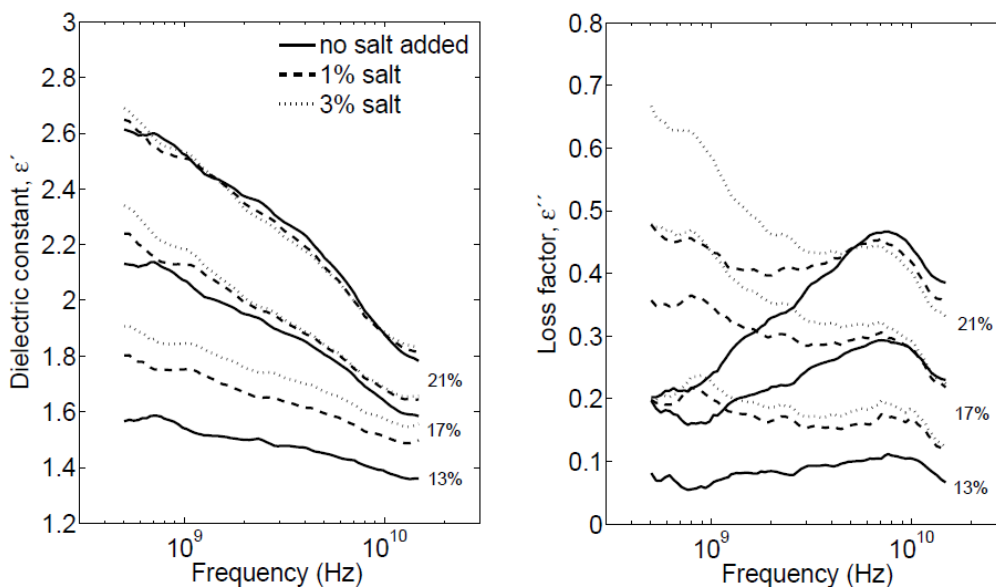
Som tidigare nämnt använde Tomppo m.fl. (2009) mikro- och radiovågsspektroskopi för att mäta kådhalt (samt fukthalt och densitet) hos trissor och kärnveds- respektive splintvedsutsnitt av gran. Vid frekvensen 1 GHz var korrelationen mellan referensmätt kådhalt och de dielektriska egenskaperna mellan -0,66 och -0,56, med ett p-värde lägre än 0,001, där de högsta korrelationerna fanns för höga frekvenser och ofrusna prover, se Figur 21:



Figur 21. Korrelation (R-tal) mellan referensmätt kådhalt och dielektriska parametrar hos kärnved av gran, uppmätta med vertikal polarisation för olika radio- och mikrovågssfrekvenser (x-axeln, enhet Hertz) och prover i olika tillstånd, där vänstra figuren är fruset prov (fukthalt 65 %) och högra figuren är ofruset prov (fukthalt 65 %). Källa: Tomppo m.fl. (2009).

### Salthalt

Paz (2010) mätte salthalt (samt fukthalt och densitet) hos sågspån och andra sönderdelade biomaterial. Mätningarna utfördes med två olika mikrovågsbaserade utrustningar. Den ena var en dielektrisk provsond som gav frekvenser mellan 0,5 och 15,0 GHz och mätte på provvolymen i storleksordningen 10 liter. Den andra var ett frirymdbaserat system med hornantennor som gav frekvenser mellan 5,0 och 15,0 GHz och mätte på provvolymen i storleksordningen 1 liter. Hypotesen var att mätningen av salthalten skulle ge ledtrådar till om det även gick att mäta askhalt hos bränslet, då båda skapade fria joner i materialet. Resultaten visade att salthalten gav utslag i mätsignalen, framför allt på frekvenser lägre än 4 GHz, se Figur 22. Det föreslogs att salthalten hos sönderdelat skogsbränsle skulle kunna mätas genom att kombinera två frekvenser; en där salthalten gav ett kraftigt utslag i mätsignalen, och en där den inte gav något utslag.



Figur 22. Mikrovågsmätt mätning av sågspån med tre olika fukthalter (13%, 17%, 21%) och tre olika salthalter (0%, 1%, 3%). Källa: Paz (2010)

Sammantaget har flera studier visat god eller måttlig potential för att mäta vissa kemiska egenskaper med mikro- eller radiovågor. Dock har varje egenskap bara mätts i en enstaka studie, och fler studier behövs för att styrka eller avfärda potentialen. Av kemiska egenskaper som inte har studerats sticker ligninhalt ut, då det är en egenskap av stort intresse för bland annat massaindustrin.

### Storleksfördelning

Ingen studie hittades där mikro- eller radiovågor använts för att mäta storleksfördelning hos sönderdelat skogsbränsle, eller något annat biomaterial. Radarbolaget gjorde ett ej rapporterat förförsök år 2020 där olika flisfraktioner (10, 20, 50 mm) hos rå stamvedsflis mättes med deras mätlåda med mittfrekvensen 2,5 GHz. Där sågs ingen skillnad i signalen mellan olika fraktioner. I en annan mätning sågs dock tydliga skillnader mellan sågspån och träflis med storleken 50 mm (Patrik Ottosson, Radarbolaget, privat kommunikation 2021), vilket indikerar att grova klassningar kanske skulle gå att göra. En utmaning är dock att avgöra vilka skillnader i mätsignalen som kommer från storleken i sig, och vilka skillnader som beror på exempelvis fukt- eller densitetsskillnader mellan olika fraktioner. Sammanfattningsvis är området tämligen outforskat, och en ordentlig utvärdering skulle kräva betydligt fler mätningar på olika fraktioner och sortiment.

### Massflöde

Det finns flera kommersiella mikrovågsbaserade för övervakning av bulkflöden, exempelvis för att avgöra om vedflis passerar eller inte passerar en viss punkt i processen (Valmet, Endress, Envea, Mütec, m. fl). Dessa mätare fungerar av allt att döma väl, och kommer inte att belysas i större detalj.

## Frusenhet och snöväthet

Merparten av ovanstående mätningar har gjorts på tempererade sågade trävaror och annat ofruset material. För inmätning av stockar eller travar under vinterhalvåret behöver mätmetoden kunna hantera att virket är fruset.

Som tidigare nämnt finns inga publicerade studier som försökt mäta frusenheten (fruset/ofruset) eller snövätheten hos virke. För att mäta snödjup och snövattenandel hos ren snö har frekvenser i Ku-bandet (12-18 GHz) använts (Hübner & Kaatze 2016). För livsmedel har nukleomagnetisk resonans (NMR) använts, även om metoderna huvudsakligen baseras på laboratorieinstrument snarare än online-mätning.

En annan möjlighet för att mäta snöväthet är att hitta parametrar och frekvenser där interaktionen mellan strålningen och materialet på annat sätt skiljer sig åt för fruset och torrt ofruset material. Tomppo m.fl. (2009) gjorde en studie där fukthalten hos granprover mättes vid olika frekvenser, två olika polarisationsriktningar, två olika fukthalter, och fruset respektive ofruset. Resultaten visar att de dielektriska egenskaperna hos fruset och torrt (65 procent relativ fuktighet) ofruset material är tämligen lika, men att det finns frekvenser där de skiljer sig åt mer, exempelvis kring 1,0 MHz och 50 MHz för den tangentiella polarisationsriktningen.

Sammanfattningsvis finns ett stort behov av studier på området, givet det svenska klimatet och mikro- och radiovågornas känslighet för frusenhet.

## Diskussion

### Enskilda egenskaper

Följande avsnitt summerar intrycken från de mätningar av olika parametrar som förekommer i litteraturen, fukthalt undantaget. Det bör nämnas att potentialen att användas för produktionsförhållanden avseende snabbhet, enkelhet, robusthet eller kostnadsläge, oftast inte rapporteras i studierna. Över lag anges sällan hur lång tid mätningarna tar eller hur stora prover som kan mätas. Det kan även vara så att en egenskap som inte gick att mäta väl med en viss utrustning eller vid en viss frekvens skulle kunna mätas bättre med en alternativ uppställning eller metodik.

### *Stor potential*

Densitet: Ett stort antal studier har visat att mikro- eller radiovågor kan uppnå hög korrelation mellan uppmätt och referensmätt densitet. Frekvenser mellan 1 MHz och 12 GHz har använts, och mätnoggrannheter på 3,7–13 kg/m<sup>3</sup> har rapporterats, beroende på om rå- eller torrdensitet har mätts. Studierna har gjorts på trissor och sågade prover, vilket gör att studier på hela stockar vore av intresse. Flera studier har samtidigt mätt fukthalt och torr- eller rådensitet, vilket ökar användbarheten i mätningen. Via skillnader i densitet mellan olika komponenter i virket kan potentiellt även andra egenskaper mätas, såsom kärnved och tjurvedsförekomst. En studie gjordes på pellets, där densiteten mättes med en noggrannhet kring 2,0 kg/m<sup>3</sup>. I sammanhanget kan dock nämnas att fukthaltsmätning av sönderdelat bränsle i praktiken tar bort behovet av att mäta densiteten, åtminstone vid inmätning, då både vikt och volym vanligen mäts och kan användas för att beräkna rådensiteten, som med hjälp av fukthalten kan omräknas till en torrdensitet.

**Kvistposition:** Studierna visar på att kvistar går att detektera med mikrovågstekniken, vid flera olika frekvenser och för både sågade prover och stockar. För sågade prover räcker sannolikt linjeskanning (2D-mätning + rörelse) för att göra detta. Däremot krävs det sannolikt en tomografisk uppställning (3D-mätning) för att göra detta i stockar, som har fler kvistar på olika positioner och djup jämfört med plank.

**Fiberorientering:** Ett antal studier har länkat mikro- och radiovågssignaler med fiberorienteringen hos trissor och sågade prover eller plank, med gott resultat. Mätningarna har utförts vid frekvenser 9–12 GHz. En studie hade även med detektion av toppbrott på plank, med relativt gott resultat. Här vore en studie på stockar intressant, samt en jämförelse med toppbrottsdetektion gjord av röntgenmätram.

### ***Måttlig potential***

**Röta:** Studierna tyder på att mikrovågor kan detektera åtminstone allvarligare grad av röta i stockar och stående träd. Det är oklart från studierna om detektionen baserar sig på skillnader i fukthalt mellan det rötade området och omgivningen, skillnader i densitet, skillnader i kemisk sammansättning, eller en kombination. Baserat på litteraturen går det inte att bedöma om detektion av lätt eller måttlig röta är möjlig. Det vore därför önskvärt med kvantitativa studier på svenska träslag, samt jämförelser mellan röntgenmätramars och mikrovågsutrustningars röttdetektion.

**Styrkeegenskaper:** De studier som gjorts för att relatera mikro- eller radiovågsmätningar med styrkeegenskaper har uppvisat måttliga korrelationer. Styrkeegenskaper är generellt sett beroende av flera underliggande egenskaper såsom densitet, fiberorientering och årsringsbredd. En mätning som försöker relatera mikro- eller radiovågssignaler till styrkeegenskaper kommer därför enbart att ta hänsyn till underliggande egenskaper som går att detektera med mikro- eller radiovågor. Det är därför förväntat att förklaringsgraden kommer att vara begränsad.

### ***Liten potential***

**Storleksfördelning:** Den magra litteraturen och erfarenheter från förförsök på träflis tyder på låg potential i mätningen av storleksfördelning med mikro- eller radiovågor. Fler och mer systematiska studier på såväl flis som travade stockar skulle dock behövas för att helt styrka eller avfärda potentialen.

### ***Oklar potential***

**Underbarksmätning:** Två förstudier visar på potential för mätning av stockars diameter under bark med mikrovågor. Fler studier skulle dock behövas för att styrka eller avfärda potentialen.

**Kemiska egenskaper:** Enskilda studier har visat på god eller måttlig potential för att mäta kådhalt och salthalt hos sönderdelat skogsbränsle med radiovågor. På grund av salt och askas liknande påverkan på mätsignalen bedömdes det som troligt att mätprincipen för salthalt skulle kunna användas även för askhalt. Mätningen skulle sannolikt vara mycket utmanande, då flera andra egenskaper hos virket troligen skulle ge starkare utslag i mätsignalen än askhalten. Likväl går det inte att utesluta att det skulle kunna gå att hitta frekvenser där askhaltens utslag är starkt relativt andra egenskaper.

**Virkeskomponenter:** Även här har enstaka studier visat på god potential för att med radiovågor skilja mellan stamvedsflis och bark och mellan kärnved och splintved. I specifika fall tycks även möjligheten att klassa träslagsblandning vara god.

Mätprinciperna tycks dels nyttja skillnader i komponenternas kemiska sammansättning, dels skillnader i densitet. För alla de nämnda tillämpningarna behövs dock många fler studier, inte minst som involverar flis från gran, samt fraktioner med olika fukthalt, för att se om detta försvårar klassningen. Även studier på frusen flis skulle behövas, då efterfrågan på flis är som störst den kalla delen av året.

Snöväthet: Denna parameter vore önskvärd att mäta för fruset virke, så att rätt modeller för att koppla mikrovågssignalen till egenskaper kan väljas eller mixas. Det finns dock inga studier som visar på sådana mätningar hos stockar, varken med mikro- eller radiovågor, eller andra metoder.

### **Övriga egenskaper**

Genom att kombinera mätning av densitet, fukthalt, kemisk profil och eventuellt kviststruktur skulle det potentiellt vara möjligt att skilja olika stockars trädslag åt. Fukthalten bör mätas för att torrdensiteten ska kunna beräknas. Inga studier som testat denna princip på stockar hittades.

Tjurved är en relevant defekt hos stockar, som röntgenmätramar har svårt att detektera och som inte tycks ha studerats med mikro- eller radiovågsteknik.

### **Jämförelse med röntgentekniker**

Den teknik som främst konkurrerar med mikro- och radiovågsmätningar för mätning av inre egenskaper är röntgentekniker, exempelvis de röntgenmätramar som förekommer i sågverk. De flesta röntgenmätramar baserar sig på mätning av signalens dämpning och analyserar inte signalen som funktion av frekvens eller energi (Skog 2013). Det finns dock röntgenbaserade instrument för träflis och stockar som analyserar två olika energier (Mantex 2019). Både röntgen- och mikrovågstekniker kan, beroende på mätningens utförande, ge ett snabbt resultat. Jämfört med röntgenmätramar har mikrovågsbaserad utrustning en grövre rumslig upplösning, vilket hänger ihop med våglängden. Däremot utgör inte mikrovågor samma risk för mänsklig hälsa som röntgenstrålar, och har möjlighet att även mäta signalens tidsfördröjning, vilket kan ge ytterligare information.

Dagens röntgenmätramar har svårt att skilja mellan vatten och färsk ved. I jämförelse har mikro- och radiovågstekniken lättare för att mäta fukthalt. Den långa våglängden gör även att mikro- och radiovågor är mindre känsliga för exempelvis spikar och andra små metallföremål än röntgentekniken. Både mikro- och röntgentekniken kan mäta densitet, där röntgentekniken sannolikt har högre mätnoggrannhet. Medan röntgentekniken ger rådensitet har mikro- och radiovågstekniken möjlighet att genom fukthaltsmätning ge torrdensitet, vilket ofta efterfrågas mer än rådensitet. Att enbart mäta fukthalt räcker dock i de flesta fall för att ge rådensitet, då virkets vikt och volym vanligen mäts vid mätplatsen och kan användas för att ge rådensitet, som tillsammans med fukthalten omvandlas till torrdensitet.

Mikro- och radiovågsmätningar har mycket större utmaningar med fruset virke jämfört med röntgentekniker. Mätning med röntgen påverkas i stort sett inte av om materialet är fruset eller ej (Johan Oja, LTU, personlig kommunikation 2021), medan mikro- och radiovågsmätning ofta kräver olika samband mellan signal och egenskap för ofruset respektive fruset virke. Det kan också vara nödvändigt att kunna skatta vilken grad av frusenhet virket har, och om ren snö eller is finns i provet. Bedömningen är dock att metodutvecklingen för mätning på fruset virke går framåt (Daniel Rönnow, Högskolan i Gävle, personlig kommunikation 2021).

En fördel för mikro- och radiovågsutrustningar är att deras komponenter tenderar att vara kompaktare och billigare än motsvarande för röntgenutrustningar, vilket skulle kunna borge för billigare tillverkning och pris mot kund (Johan Oja, Luleå Tekniska Universitet, personlig kommunikation 2021; Patrik Ottosson, Radarbolaget, personlig kommunikation 2021). Andra sidan skulle röntgenbaserade utrustningar kunna erbjuda mätning av andra egenskaper, samt likvärdig mätning för ofruset och fruset material.

## **Tillämpningsområden**

### ***Sågade trävaror***

Sett till litteraturen har mycket forskning kring mikro- och radiobaserad mätning av virke gjorts just på sågade trävaror. En av fördelarna med sågade trävaror jämfört med andra provtyper är att de sällan är frusna vid mätning. Mikro- och radiovågors ändrade beteende för fruset material behöver därför inte beaktas. En annan fördel är att meningsfull information i större utsträckning kan fås från plankans yta. Mätningar kan därför baserat antingen på ytreflektion eller transmission, medan mätningar på stockar kräver att signalen penetrerar in i materialet, vilket ger ett större behov av transmissionsmätningar. Samtidigt kan de egenskaper som går att mäta med mikrovågor (torr- och rådensitet, kvistposition, fiberorientering, styrka) mätas väl på individuella plank även med andra tekniker, exempelvis röntgenskanning eller när-infraröd skanning. I jämförelse med andra mättekniker skulle mikro- och radiovågor ha högre användbarhet vid mätning av paketerade eller stackade plank, exempelvis för att mäta fuktkvot under torkning. Det hittades dock inga studier kring mätning av stackade trävaror.

På den kommersiella sidan finns en tillverkare av mikrovågsbaserat skannerutrustning, Microwave Vision Systems, med linjeskannern Dentre LRX. Tillverkaren drog dock slutsatsen att densitet eller fukthalt inte kunde mätas med tillfredsställande noggrannhet på sågade trävaror. Flera studier i denna rapport har använt en föregångare av Dentre LRX; Satimos 9,375 GHz-skanner. Att tillverkaren drog slutsatsen att mätnoggrannheten var otillfredsställande kan innebära att även de metoder som beskrivs i dessa artiklar i slutändan inte är användbara i produktionsmiljö.

### ***Stock- och travmätning***

Studier har mätt torr- och rådensitet, fiberorientering, kviststruktur, röta, kådhalt, kärnvedsandel och diameter under bark på enskilda stockar. Mätningen av densitet, fiberorientering och kvistar tycks fungera relativt väl under laboratorieförhållanden, medan övriga egenskaper kräver ytterligare studier innan slutsatser kan dras. För mätning av enskilda stockar vore fukthalt och rötförekomst de mest intressanta parametrarna att utveckla vidare, då röntgenmätningar i dagsläget inte kan mäta dessa väl. Som tidigare nämnt utgör inte mikro- och radiovågor inte samma risk för mänsklig hälsa som röntgenstrålar. Det gör tekniken mer lämplig att använda för mätning nära människor, exempelvis i virkestransporter där chauffören sitter kvar i bilen under mätningen, eller i skördaraggregatet, åtminstone så länge skördaren inte är fjärrstyrd eller autonom.

Beklagligt nog finns inga studier där mikro- eller radiovågsmätning har testats i praktisk drift i skördare, även om Eskelinen och Eskelinen (2000) undersökte konceptet. Deras studie fokuserade på kvistposition, men även röta och fiberorientering (växtvridenhet) vore av intresse att mäta i samband med skörd. De tekniska utmaningarna med



beröringsfri mätning i skördaraggregat skall dock inte underskattas (Hyll & Nordström 2020).

Inga studier som använde mikro- eller radiovågor för att mäta virkesegenskaper hos hela travar hittades. Här finns en outnyttjad potential, framför allt för fukthaltsmätning men potentiellt även för densitet och kemiska egenskaper. Det är dock inte alla egenskaper som är intressanta att mäta på travnivå, eftersom mätresultatet i de flesta fall skulle bli ett medelvärde för alla stockar i traven, och individuella avvikelser därmed skulle slätas ut.

Det finns ingen dedikerad kommersiell mikrovågsbaserad utrustning för mätning av enskilda stockar. Däremot finns några kommersiella utrustningar för mätning av stående träd, vilket ur det tekniska perspektivet är likvärdigt med stockar. Här kan dock nämnas att genomlysande mätmetoder för stående träd brukar karaktäriseras av att de är dyra och omständliga att använda. De markradarbaserade kommersiella utrustningarna för stående träd har inte imponerat i de studier som utvärderat dem, även om andra litteratursammanfattningar har funnit dem lovande (Ondrejka m.fl. 2021).

### **Mätning av flis**

Litteraturgenomgången visade att ett mindre antal studier har mätt på sönderdelat skogsbränsle. Här har främst radiovågsbaserad teknik använts, för att undersöka salthalt och klassa barkhalt, kärnvedsandel och trädslagsblandning. För bulkvolymen av virke, exempelvis hela travar och flislass, finns inga etablerade genomlysande mätmetoder. Fukthalt, (torr)densitet och kemiska egenskaper som askhalt, kådhalt och ligninhalt vore sannolikt mest intressanta. Beröringsfria mätningar på hela lass är ofta rationella, med den bildbaserade fjärrmätningen av massaved som ett exempel, och här finns en betydande potential för mikro- eller radiovågsmätning.

En annan möjlig tillämpning vore att sätta mätare vid utloppet på en flishugg för att exempelvis mäta fukthalt, massflöde och densitet, likt hur mikrovågsbaserad mätteknik har testats i skördetröskor för att mäta fukthalt och massflöde på passerade spannmål (Putri m.fl. 2016). Som tidigare nämnts har testmätningar av fukthalt gjorts med mikrovågsbaserad utrustning i ett flishuggsutlopp (Ottosson & Andersson 2017). Det finns också ett antal kommersiella mikrovågsbaserade utrustningar för mätning av fukthalt och massflöde på flis och annat sönderdelat virke (Valmet 2019; Berthold 2021; PCE Instruments 2021, m. fl.).

### **Kommersialisering och användning**

De flesta kommersiella mikro- eller radiovågsbaserade mätutrustningarna för virke mäter en egenskap: fukthalt. Detta skiljer sig från litteraturen då flera studier mäter ett antal egenskaper simultant, exempelvis fukthalt, densitet och fiberorientering. Givet att samtida mätning av flera egenskaper hade givit ett betydande extra värde för kunden indikerar detta att det i praktiken är komplicerat att mäta flera egenskaper simultant. Över lag behövs mer kunskap om vad som leder till att mätutrustningar för virke dels kommersialiseras, dels inköps och används över tid. Ett exempel är de olika typer av fukthaltsmätare som forskades fram och installerades hos ett antal industrier kring år 2010, men där flera av dem inte längre tycks användas.

Det tycks inte finnas några kommersiella mikrovågstomografer (3D-mätare) för industriellt bruk. En bidragande orsak kan vara att de matematiska beräkningarna som ligger bakom tomografin är komplex för flervägsutbredande strålning (Patrik Ottosson, Radarbolaget, personlig kommunikation 2021). En annan orsak kan vara att den spatiala

upplösningen blir relativt låg, vilket minskar 3D-bildernas användbarhet. Zhipeng och Wang (2017) beskriver dock utvecklingen av en industriell mikrovågstomograf bestående av 16 antenner med frekvensen 1 GHz. Utrustningen kunde mäta stillastående eller flödande prover upp till 15 cm, med beskrivna tillämpningar bland annat inom livsmedelssektorn. I dagsläget tycks det oklart om mikrovågsbaserade system kommer att kommersialiseras på bred front, eller enbart i mer nischade tillämpningar.

## Slutsatser

- Vid sidan om fukthalt har ett stort antal virkesegenskaper mätts med hjälp av mikro- eller radiovågor i olika studier: underbarksdiameter, torr- och rådensitet, röta, kviststruktur, lokal och global fiberorientering, styrkeegenskaper, kådhalt, salthalt, kärnvedsandel, barkhalt, trädslagsfördelning och storleksfördelning
- Majoriteten av studierna har skett i labbmiljö
- De flesta mätningarna har skett på enskilda stockar eller enskilda plankor, och ett fåtal mätningar på flisprover. Inga studier rapporterats på stackade trävaror, travar eller flisskäppor.
- Mikro- och radiovågsteknik har begränsade fördelar vid mätning på enskilda plank samt för mätning av enskilda stockar i sågverksmiljö, då det redan finns väl fungerande kommersiella lösningar baserade på andra tekniker. För stackade plankor, travar eller för mätning av enskilda stockar i andra miljöer, exempelvis i samband med skörd, finns större potential
- För mätning av sönderdelat virke har mikro- och radiovågsteknik relativt stora fördelar jämfört med andra mätmetoder. Ytterligare tillämpningspotential finns bland annat för mätning av skäppor och vid utloppet på flishuggar
- Mätning av storleksfördelning (flis), röta (stock), diamettermätning under bark (stock), ligninhalt (flis/stock) och askhalt (flis) har störst potential jämfört med andra mätmetoder. Dessa tillämpningar bör därför beforskas eller testas vidare, även om mätningen sannolikt är utmanande eller mycket utmanande
- Mer kunskap behövs om vad som leder till att mätutrustningar dels kommersialiseras, dels inköps och används över tid

# Personlig kommunikation

Daniel Rönnow, Högskolan i Gävle, personlig kommunikation 2021

Johan Oja, Luleå Tekniska Universitet (LTU), personlig kommunikation 2021

Nicolas Doare, Microwave Vision Group, personlig kommunikation 2021

Patrik Ottosson, Radarbolaget, personlig kommunikation 2021

# Referenser

- Aichholzer, A., Schuberth, C., Mayer, H. & Arthaber, H. 2016. Microwave testing of moist and oven-dry wood to evaluate grain angle, density, moisture content and the dielectric constant of spruce from 8 GHz to 12 GHz. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76, 89–103.
- Alani, A. M., Soldovieri, F., Catapano, I., Giannakis, I., Gennarelli, G., Lantini, L., Ludeno, G. & Tosti, F. 2019. Use of Ground Penetrating Radar and Microwave Tomography for the Detection of Decay and Cavities in Tree Trunks. *Remote Sensing*, 11, 1-18.
- Antti, L. 1999. Heating and drying wood using microwave power. Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, 27 s.
- Banerjee, D., von Spiegel, W., Thomson, M. D., Schabel, S. & Roskos, H. G. 2008. Diagnosing water content in paper by terahertz radiation. *Optics Express*, 26, 9060-9066.
- Baradit, E., Aedo, R. & Aguilera, C. 2009. Imaging processing for knot detection in wood using microwaves. *Wood Research*, 54, 55-60.
- Baradit, E., Aedo, R. & Correa, J. 2006. Knots detection in wood using microwaves. *Wood Science and Technology*, 40.
- Bejo, L., Jakocs, M., Divos, F. & Fathi, S. Simultaneous Measurement of Density and Moisture Content Using Microwave Radar: Preliminary Results. 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 2018 Freiburg, Germany. 71-78.
- Berthold 2021. Moisture measurement for wood chips brochure. 1-3 s.
- Bikkina, S. P. 2002. Detection of Knots in the Logs Using Finite Element Analysis. Mississippi State University, 60 s.
- Boero, F., Fedeli, A., Lanini, M., Maffongelli, M., Monleone, R., Pastorino, M., Randazzo, A., Salvadè, A. & Sansalone, A. 2018. Microwave Tomography for the Inspection of Wood Materials: Imaging System and Experimental Results. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66, 3497-3510.
- Bogosanovic, M., Al Anbuky, A. & Emms, G. W. 2010. Overview and comparison of microwave noncontact wood measurement techniques. *J Wood Sci*, 56, 357–365.
- Chaplin, M. 2008. Water structure and behaviour. Oregon State University. URL: [http://sites.science.oregonstate.edu/~hetheriw/astro/rt/info/water/water\\_dielectric\\_function\\_and\\_microwave\\_radiation.html](http://sites.science.oregonstate.edu/~hetheriw/astro/rt/info/water/water_dielectric_function_and_microwave_radiation.html) [Hämtad 2022-03-05].
- Choudhary, V. & Rönnow, D. 2020. A Nondestructive Testing Method for the Determination of the Complex Refractive Index Using Ultra Wideband Radar in Industrial Applications. *Sensors*, 20, 1-19.
- Denzler, J. K., Koppensteiner, J. & Arthaber, H. 2013. Grain angle detection on local scale using microwave transmission. *International Wood Products Journal*, 4, 68-74.
- Denzler, J. K., Lux, C. & Arthaber, H. 2014. Contactless moisture content and density evaluation of sawn timber using microwave transmission. *International Wood Products Journal*, 5, 200-206.
- Denzler, J. K. & Weidenhiller, A. 2015. Microwave scanning as an additional grading principle for sawn timber. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73, 423–431.
- Dupleix, A., de Sousa Meneses, D., Mark, H. & Marchal, R. 2013. Mid-infrared absorption properties of green wood. Mid-infrared absorption properties of green wood. HAL, hal-00844551, 1-12.
- Energimyndigheten 2020. Energiläget 2020. Statens Energimyndighet, s.
- Energimyndigheten 2021. Trädbränsle, torv- och avfallspriser. Energimyndigheten, s.
- Eskelinen, P. & Eskelinen, H. 2000. A K-Band Microwave Measuring System for the Analysis of Tree Stems. *Silva Fennica*, 34.
- Eskelinen, P. & Harju, P. 1998. Characterizing Wood by Microwaves. *IEEE AES Systems Magazine*, 13, 34-35.

- Exotek Instruments 2021. Electronic moisture meter for wood chips/bio fuels FMG-3000 brochure. 1-2 s.
- Fernandez-Lacruz, R. & Bergström, D. 2014. Assessment of high-frequency technologies for determining the moisture content of comminuted solid wood fuels. *Wood Material Science & Engineering*, 1-13.
- Fridh, L. 2017. Measuring Forest Fuel Quality for Trade and Production Management. PhD Thesis, Umeå University, 67 s.
- Fuchs, A., Moser, M. & Zangl, H. 2008. Investigation on the Dependency of the Electrical Capacitance on the Moisture Content of Wood Pellets. *International journal on smart sensing and intelligent systems*, 2, 293-308.
- Hübner, C. & Kaatze, U. 2016. *Electromagnetic Moisture Measurement - Principles and Applications*, Universitätsverlag Göttingen, 315 s.
- Hyll, K. & Nordström, M. 2020. Kartläggning av teknik, metoder och informationsflöde för mätning av skogens produkter. Arbetsrapport, Skogforsk, 90 s.
- Jadot, P. 2014. Microwave Technology Aids Moisture, Density Measurements. *Biomass Magazine* [Online]. URL: <http://biomassmagazine.com/articles/10904/microwave-technology-aids-moisture-density-measurements> [Hämtad 2021-10-22].
- James, W. L. & Hamill, D. 1965. Dielectric properties of Douglas-fir measured at microwave frequencies. *Forest Products Journal*, 15, 51-56.
- Javashvili, O. 2009. UWB-Antennas for Wall Penetrating Radar Systems. Master, University of Gävle, 1-45 s.
- Jirjis, R. 1995. Storage and drying of wood fuel. *Biomass and bioenergy*, 9, 181-190.
- Johansson, J. 2001. Property predictions of wood using microwaves. LTU Luleå University of Technology, s.
- Kaestner, A. & Bååth, L. 2005. Microwave Polarimetry Tomography of Wood. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 5, 209-215.
- Koch, M., Hunsche, S., Schumacher, P., Nuss, M. C., J., F. & Fromm, J. 1998. THz-imaging: a new method for density mapping of wood. *Wood Science and Technology*, 32, 421-427.
- Kol, Ş. H. & Şahin, Y. 2015. Predicting wood strength using dielectric parameters. *BioRes.*, 10, 6496-6511.
- Laleicke, P. F. & Kamke, F. A. 2018. A capacitive multi-wavelength sensor for moisture content gradient sensing in wood. *Wood Science and Technology*, 52, 717-732.
- Lethikangas, P. 1999. *Lagringshandbok för trädbränslen*, Uppsala, SLU, 116 s.
- Lundgren, N. 2007. *Microwave Sensors for Scanning of Sawn Timber*. Doctoral, LTU Luleå Tekniska Universitet, s.
- Lundgren, N., Hagman, O. & Johansson, J. 2006. Predicting moisture content and density distribution of Scots pine by microwave scanning of sawn timber II: evaluation of models generated on a pixel level. *Journal of Wood Science*, 52, 39-43.
- Maalik, S. 2010. *Antenna Design for UWB Radar Detection Application*. Master Thesis, Chalmers University of Technology, 1-42 s.
- Mantex. 2019. Biofuel Analyzer. Mantex. URL: <https://www.mantex.se/products/biofuel-analyzer/features/> [Hämtad 2019-12-19].
- Maurizka, A. & Munir, A. 2017. Experimental Validation of Microwave Imaging for Wood Inspection. *Progress In Electromagnetics Research Symposium*. Singapore.
- Meaney, P. & Paulsen, K. 2018. Addressing Multipath Signal Corruption in Microwave Tomography and the Influence on System Design and Algorithm Development. *Open access journal of biomedical engineering and biosciences*, 1, 102.
- Merkus, H. G. 2009. *Particle Size Measurements*, Springer-Verlag New York Inc., 534 s.
- Merlan, M. 2016. Study and realization of a microwaves system to estimate the moisture content in wood biomass. PhD Thesis, Université Pierre et Marie Curie, 131 s.
- MVG 2013. *Dentro LRX brochure*. Microwave Vision Group, 1-8 s.
- Olsson, O., Eriksson, A., Sjöström, J. & Anerud, E. 2016. Keep that fire burning: Fuel supply risk management strategies of Swedish district heating plants and implications for energy security. *Biomass and Bioenergy*, 90.

- Ondrejka, V., Gergel, T., Bucha, T. & Pástor, M. 2021. Innovative methods of non-destructive evaluation of log quality. *Cent. Eur. For. J.*, 67, 3-13.
- Ottosson, P. 2014. Stockmätning med radar. Radarbolaget, 1-5 s.
- Ottosson, P. & Andersson, D. 2017. Snabb III - Effektivare mätning av trädbränsle i tillförselprocessen med radartechnik. Arbetsrapport, Skogforsk, 55 s.
- Ottosson, P., Andersson, D. & Fridh, L. 2016. Radartechnik för fukthaltsmätning – en förstudie. Arbetsrapport 915, Skogforsk, 1-32 s.
- Ottosson, P., Andersson, D. & Rönnow, D. 2018. UWB Radio Measurement and Time-Domain Analysis of Anisotropy in Wood Chips. *IEEE Sensors Journal*, 18, 9112-9119.
- Pastorino, M., Randazzo, A., Fedeli, A., Salvadè, A., Poretti, S. & Maffongelli, M. 2015. A microwave tomographic system for wood characterization in the forest products industry. *Wood Material Science & Engineering*, 10, 75–85.
- Paz, A. M. 2010. The dielectric properties of solid biofuels. PhD Thesis, Mälardalen University, 62 s.
- PCE Instruments. 2021. Wood Moisture Meter PCE-MWM 300P. PCE Instruments. URL: [https://www.pce-instruments.com/eu/measuring-instruments/test-meters/wood-moisture-meter-pce-instruments-wood-moisture-meter-pce-mwm-300p-det\\_5972527.htm](https://www.pce-instruments.com/eu/measuring-instruments/test-meters/wood-moisture-meter-pce-instruments-wood-moisture-meter-pce-mwm-300p-det_5972527.htm) [Hämtad].
- Persson, M. 2013. Mikrovågor spårar röta i träd. Göteborg: Chalmers tekniska högskola. URL: <https://www.chalmers.se/sv/institutioner/e2/nyheter/Sidor/Mikrov%C3%A5gor-sp%C3%A5rar-r%C3%B6ta-i-tr%C3%A4d.aspx> [Hämtad 2019-10-16].
- Putri, R. E., Yahya, A., Adam, N. M. & Abd Aziz, S. 2016. Performance Evaluation of Yield Monitoring System for Rice Combine Harvester in Selangor, Malaysia. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, 6, 35-.
- Rodrigues, B. P., Senalik, C. A., Wu, X. & Wacker, J. 2021. Use of Ground Penetrating Radar in the Evaluation of Wood Structures: A Review. *Forests*, 12, 492.
- Schajer, G. S. & Orhan, F. B. 2005. Microwave Non-Destructive Testing of Wood and Similar Orthotropic Materials. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 6, 293-313.
- Schajer, G. S. & Orhan, F. B. 2006. Measurement of wood grain angle, moisture content and density using microwaves. *Wood and Wood Properties*, 64, 483-490.
- Sipahioglu, O. & Barringer, S. A. 2003. Dielectric Properties of Vegetables and Fruits as a Function of Temperature, Ash, and Moisture Content. *Journal of Food Science*, 68, 234-239.
- Sjöden, T., Nilsson, B. & Nordebo, S. 2005. Microwave modelling and measurements for early detection of spiral grain in wood. 14th Int. Symp. Nondestructive Testing of Wood.
- Sjöström, L. 2011. Tekniska principer för fukthaltsmätning av skogsbränsle. Arbetsrapport, Skogforsk, 1-39 s.
- Skaar, C. 1949. The dielectric properties of wood at several radio frequencies. N.Y. State College of Forestry, Syracuse, Tech. Pub. , 33 s.
- Skog, J. 2013. Charaterization of sawlogs using industrial X-ray and 3D scanning. Doctoral thesis, Luleå Universitet, 1-162 s.
- Sobue, N. & Woodhead, I. 2010. Improvement of Simple Impedance Tomography Method in RF Range for Estimating Moisture Distribution in Squared Timbers. *Journal of Wood Science*, 56, 366-370.
- Techel, F. & Pielmeier, C. 2011. Point observations of liquid water content in wet snow – investigating methodical, spatial and temporal aspects. *Cryosphere*, 5, 405-418.
- Tiitta, M., Tiitta, V., Heikkinen, J., Lappalainen, R. & Tomppo, L. 2020. Classification of Wood Chips Using Electrical Impedance Spectroscopy and Machine Learning. *Sensors*, 20, 1-12.
- Tomppo, L., Tiitta, M., Laakso, T., Harju, A., Venäläinen, M. & Lappalainen, R. 2009. Dielectric spectroscopy of Scots pine. *Wood Science and Technology*, 43, 653–667.

- Torgovnikov, G. I. 1993. Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials, Springer Verlag Berlin, 196 s.
- Trabelsi, S., Paz, A. M. & Nelson, S. O. 2013. Microwave dielectric method for the rapid, nondestructive determination of bulk density and moisture content of peanut hull pellets. *Biosystems Engineering*, 115, 332-338.
- Valmet. 2019. Valmet MR Moisture Analyzer. Valmet. URL: <https://www.valmet.com/automation/analyzers-measurements/analyzers/mr-moisture/> [Hämtad 2019-11-04].
- Valmet 2021. Valmet Online Wood Chip Moisture Measurement brochure. s.
- Werner, S. 2017. District heating and cooling in Sweden. *Energy*, 126, 419-429.
- Wittkoff, J. J. & Macdonald, M. D. 1949. Dielectric properties of Douglas Fir at high frequencies. *Oregon State College Bulletin*, s.
- Xi, W., Guanghui, L., Jiao, Z. & Xiping, W. 2018. Reliability of acoustic tomography and ground-penetrating radar for tree decay detection. *Appl Plant Sci.*, 6, 1-12.
- Zhipeng, W. & Wang, H. 2017. Microwave Tomography for Industrial Process Imaging. *IEEE antennas & propagation magazine*, 59, 61-71.

# Appendix

## Frekvensband i mikro- och radiovågsområdet

Tabell 2. Frekvensband inom mikro- och radiovågsområdet

BAND	GHZ	BAND	GHZ
P	<0,5	Q	40–60
L	0,5–2,0	V	50–75
S	2,0–4,0	E	60–90
C	4,0–8,2	W	75–110
X	8,2–12,4	F	90–140
Ku	12,4–18,0	D	110–170
K	18,0–26,5	G	140–220
Ka	26,5–40,0	H	220–325

## Värden på de dielektriska egenskaperna hos virke

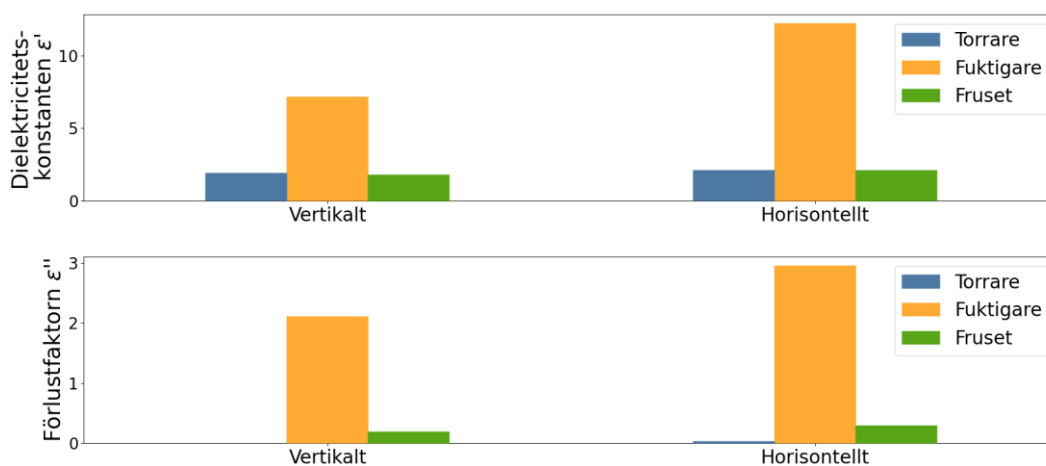
Tabell 3. Typiska värden på dielektricitetskonstanten  $\epsilon'$  och förlustfaktorn  $\epsilon''$  för träflis uppmätt med vertikal polarisation jämfört med fiberriktningen. Källa: Ottosson (2014) samt Patrik Ottosson, Radarbolaget, personlig kommunikation 2021. \*Fukthalt 58% av råvikten. Enligt Ottosson (2014) är typiska värden för torr trä (oklar torrhalt) 2-7.

E', FREKVENS	POLARISATION	BLÖTT TRÄ*	FRUSET TRÄ
2,0 GHz	Vertikal	7,1	2,0
2,5 GHz	Vertikal	7,1	1,9
3,125 GHz	Vertikal	7,6	2,1
2,0 GHz	Horisontell	13,0	2,2
2,5 GHz	Horisontell	12,2	2,1
3,125 GHz	Horisontell	12,6	2,2

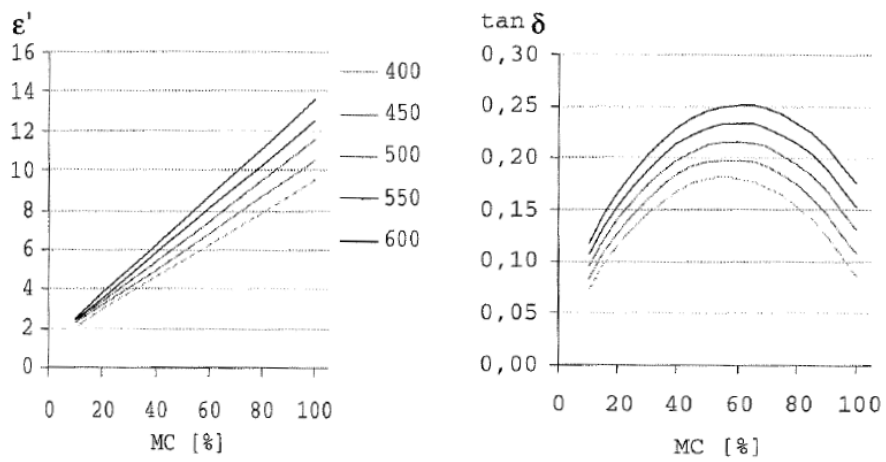
Tabell 4. Typiska värden på dielektricitetskonstanten  $\epsilon'$  och förlustfaktorn  $\epsilon''$  för träflis uppmätt med horisontell polarisation jämfört med fiberriktningen. Källa: Ottosson (2014) samt Patrik Ottosson, Radarbolaget, personlig kommunikation 2021. \*Fukthalt 58% av råvikten.



$\epsilon''$ , FREKVENNS	POLARISATION	BLÖTT TRÄ*	FRUSET TRÄ
2,0 GHz	Vertikal	2,1	0
2,5 GHz	Vertikal	2,1	0
3,125 GHz	Vertikal	1,3	0
2,0 GHz	Horisontell	3,1	0,03
2,5 GHz	Horisontell	3,0	0,02
3,125 GHz	Horisontell	3,1	0,2



Figur 23. Värden på dielektricitetskonstanten  $\epsilon'$  och förlustfaktorn  $\epsilon''$  för flis i olika tillstånd, vid frekvensen 2,5 GHz och två olika polarisationer; vertikal och horisontell. Torrare = 26% fukthalt av råvikten, fuktigare = 58% fukthalt av råvikten, fruset = 58% fruset vid fukthalt av råvikten. Källa: Daniel Andersson och Patrik Ottosson, Radarbolaget, personlig kommunikation 2021.



Figur 24. Dielektricitetskonstanten  $\epsilon'$  samt  $\tan(\delta)$  som funktion av fuktalt och densitet (olika kurvor, enhet kg/m<sup>3</sup>) vid frekvensen 2,45 GHz. Källa: Antti (1999) via Johansson (2001).