

Potentialen i mikrovågs-baserad fukthaltsmätning av travat rundvirke

Kari Hyll, Daniel Ranta, Anders Ohlsson, Anders Eriksson, Patrik Ottosson, Sunil Kumar Telagam Setti och Daniel Rönnow



Projektets generation 3-mätare (blå, utskjutande skyddslådor) för mätning av fukthalt hos travat rundvirke, samt metoder för referensprovtagning. Foton: Radarbolaget.

Innehåll

Förord	6
Summary	7
Sammanfattning	9
Bakgrund	11
Rapportens struktur	12
Delstudie A – optimal referensmetod.....	14
Introduktion	14
Resistansmätning / stiftning.....	14
Borrprov med ugnstorkning.....	15
Trisskapning med ugnstorkning	15
Tre trissor i änden av stocken	15
Trissor längs med stocken.....	16
Två trissor i änden av stocken.....	16
Diskussion trisskapning med ugnstorkning	17
Uppflisning med ugnstorkning	17
Diskussion och slutsats	19
Delstudie B – beteendet hos travat rundvirke vid dielektriska mätningar	20
Introduktion	20
Mål.....	21
Gemensamma material och metoder	21
Inverkan av temperatur	22
Material och metoder	22
Resultat och diskussion.....	24
Inverkan av mätlängd.....	25
Material och metoder	25
Inverkan av anisotropi (polarisation)	27
Bakgrund	27
Material och metoder	27
Resultat	28
Diskussion	29
Inverkan av fastillstånd (fruset/ofruset)	29
Metod.....	29
Resultat och diskussion.....	32
Metod för klassning av stockars fastillstånd	33

Bakgrund	33
Material och metoder	33
Resultat och diskussion	35
Simulering av vågfrontsutbredning	36
Introduktion	36
Metod	37
Resultat	39
Diskussion	41
Gemensam diskussion, delstudie B	41
Delstudie C – utveckling av metod för fukthaltsmätning på travat rundvirke och flis på lastbil	43
Mål	43
Utveckling av andra generationens mätenhet	43
Första generationens mätare	43
Senaste generationens mätelektronik	43
Uppdaterad mjukvara	44
Transversell rörelse	44
Artificiella Neurala Nätverk (ANN)	45
Material och metod för fukthaltsmätning på rundvirkesbil	45
Metodik för modellframtagning	48
Introduktion	48
Signalbehandling	48
Modeller	48
Resultat	50
Diskussion	51
Material och metod för fukthaltsmätning av flis på lastbil	52
Resultat och diskussion för fukthaltsmätning av flis på lastbil	53
Delstudie D – demonstration vid industri	56
Introduktion	56
Mål	56
Material och metod	56
Utveckling av generation 3-mätaren	56
Installation	57
Metod, demonstration, mätningar	57
Resultat	58
Diskussion	58
Biometrias typgodkännandeprocess	58

CE-märkning	59
ETSI, European Telecommunications Standards Institut	59
Molntjänst	59
Mätning på flera positioner	60
Tillämpbarhet på enskilda stockar	60
Slutsatser	60
Delstudie E – systemstudie över potentialen i fukthaltsmätning på travat rundvirke.....	61
Fukthalten i stockar – kan och vill vi veta den?	61
Fukthalt som kvalitetsparameter	61
Traditionella metoder för fukthaltsmätning	62
Framtidens innovativa mätmetod.....	62
Systemanalys som metod	62
Värdet av informationen	63
Framtidsvisionen för en uppkopplad skoglig värdekedja	63
Utmaningar för teknikintegrering hos slutanvändaren	64
Slutsats	64
Övergripande slutsatser	66
Referenser	67
Bilaga 1A – fördjupning i simuleringarna	69
Metod	69
Simuleringar	69
Beräkningar av dielektriska parametrar med EMA	70
Mätarliknande signalbehandling	70
Simulerade scenarion och parametrar	71
Simulering med frekvens 1,0 GHz	71
Mätning i luft – referensen	71
Travad rundved utan mellanrum	73
Travad rundved med större mellanrum	74
Resultat	76
Simulering med mittfrekvens 0,3 GHz	78
Travad rundved med större mellanrum	78
Resultat	80
Bilaga 2 – fördjupning för mätningar stockar under torkning.....	82
Metod	82
Resultat.....	83
Bilaga 3 – Fördjupning av mätningar på rundvirkesbilar	86

Metod	86
Mätningar.....	86
Signalbehandling	86
Packningstäthet antal stockar i linje och diameter	87
Påverkan från torrdensitet.....	89
Resultat.....	91
Tillägg av torrdensitet i modellen	95
Bilaga 4 – fördjupning av mätningar på flisbilar	97



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

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts i oktober 2025 av Maria Iwarsson Wide, Programchef. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering 15 december 2025.

Redaktör: Anna Franck, anna@annafranck.se
©Skogforsk 2025 ISSN 1404-305X

Förord

Vi tackar Helene Blomqvist på Gävle Energi - Kraftvärme, Lennart Stenqvist och Mikael Fredriksson på StoraEnso samt Håkan Broman på Sveaskog för deras aktiva deltagande i projektet. Vi minns med värme och saknad vår projektkollega Jahn Johansson på Gävle Energi - Kraftvärme.

Vi tackar särskilt Energimyndigheten för sitt finansiella stöd till projektet inom programmet Bio+.

Kari Hyll, projektledare

Uppsala den 12 december 2025

Summary

Today, there is no effective method for measuring moisture content in roundwood in general and stacked roundwood in particular. This project has investigated the possibility of determining moisture content in stacked roundwood using microwave transmission (also called radio measurements). The project has also further developed methods for measuring moisture content in decomposed forest fuel using the same technology.

The project was carried out as five sub-studies:

- In sub-study A, the best reference method for measuring moisture content in roundwood was evaluated.
- In sub-study B, the dielectric properties of frozen and unfrozen roundwood at different temperatures were investigated in laboratory conditions.
- In sub-study C, a series of measurements of stacked roundwood on a truck were made with the aim of developing a model for the relationship between the measured microwave signal and moisture content.
- In sub-study D, the technology for measuring decomposed forest fuel was demonstrated at the Johannes bio-combustion plant in Gävle.
- In sub-study E, a systems study was conducted in which the system-changing potential of rapid moisture content measurement of stacked roundwood was investigated.

The results confirmed that it is technically possible to obtain a sufficient measurement signal through a standard stack of logs. The measurements showed a clear correlation with the moisture content, but with significant noise that gives uncertainty in individual measurements. A translation model was developed for unfrozen logs, which translated the measurement signal into moisture content. The model had an RMSE of ± 4.0 percentage points. Several factors are considered to contribute to the measurement uncertainty:

- Reference sampling, i.e. the determination of the true moisture content of the logs, is significantly more labor-intensive for roundwood compared to, for example, wood chips. Taking reference rollers at the end surfaces of the logs, which is most practical, results in an underestimate of the moisture content due to the higher drying of the end surface. The study shows that the best accuracy is achieved by chipping the entire stack and measuring moisture content using the oven method.
- The diameter of the logs is of the same order of magnitude as the wavelength of the microwaves, which creates complex scattering phenomena, which in turn makes data difficult to analyze.
- A wood pile contains more air than a bushel of shredded forest fuel, in an inhomogeneous pattern, which creates challenges in signal interpretation.

Overall, the project showed that microwave-based moisture content measurement of roundwood is significantly more complex than the application to shredded forest fuel. However, it seems feasible to develop the measurement to provide the same or better accuracy than the manual, time- and labor-intensive methods used today.

Future work needs to increase the amount of measurements used to train the model, preferably reference measured by chipping the entire pile. Further understanding of the impact of the degree of compaction is needed. Increased understanding is needed of the dielectric properties of semi-frozen chips and semi-frozen logs. Weather data can be

linked to the results to increase the possibility of predicting the degree of freezing of the material.

An alternative to reduce complexity is to test measurements with longer wavelengths (lower frequency). This would give the roundwood signal a scattering behavior that is more reminiscent of how wood chips behave at the current wavelength distribution. However, this would entail a significantly larger size of the antennas and thus of the equipment as a whole.

Sammanfattning

Idag finns ingen effektiv metod för att mäta fukthalt på rundvirke i allmänhet och travat rundvirke i synnerhet. Detta projekt har undersökt möjligheten att bestämma fukthalt hos travat rundvirke med hjälp av mikrovågstransmission (även kallat radiomätningar). Projektet har också vidareutvecklat metoder för att mäta fukthalt hos sönderdelat skogsbränsle med samma teknik.

Projektet genomfördes som fem delstudier:

- I delstudie A utvärderades vilken referensmetod som var bäst för fukthaltsmätning på rundvirke.
- I delstudie B undersöktes de dielektriska egenskaperna hos fruset och ofruset rundvirke med olika temperatur i laboratorieförhållanden.
- I delstudie C gjordes en serie mätningar av travat rundvirke på lastbil med målet att utveckla en modell för sambandet mellan uppmätt mikrovågssignal och fukthalt.
- I delstudie D demonstrerades tekniken för att mäta sönderdelat skogsbränsle vid Johannes biokraftvärmeverk i Gävle.
- I delstudie E genomfördes en systemstudie där den systemförändrande potentialen i snabb fukthaltsmätning av travat rundvirke genomfördes.

Resultaten bekräftade att det är tekniskt möjligt att få tillräcklig mätsignal genom en standardtrave stockar. Mätningarna visade på tydlig korrelation med fukthalten, men med betydande brus som ger osäkerhet i enskilda mätningar. En översättningsmodell togs fram för ofrusna stockar, som översatte mätsignalen till fukthalt. Modellen hade ett RMSE på $\pm 4,0$ procentenheter. Flera faktorer bedöms bidra till mätosäkerheten:

- Referensprovtagningen, det vill säga bestämningen av stockarnas sanna fukthalt, är betydligt mer arbetskrävande för rundvirke jämfört med exempelvis grothlis. Att ta referenstrissor vid stockarnas ändtytor, vilket är mest praktiskt, resulterar i en underskattning av fukthalten på grund av ändytans högre uttorkning. Studien visar att bäst noggrannhet uppnås genom att flisa hela traven och mäta fukthalt på stickprov genom ugnsmetoden.
- Stockarnas diameter har samma storleksordning som mikrovågornas våglängd vilket skapar komplexa spridningsfenomen, vilket i sin tur gör data svåra att analysera.
- En virkestrave innehåller större luftfickor än en skäppa sönderdelat skogsbränsle i ett inhomogent mönster, vilket skapar utmaningar vid signaltolkningen.

Sammantaget visade projektet att mikrovågsbaserad fukthaltsmätning av rundvirke är signifikant mer komplex än tillämpningen på sönderdelat skogsbränsle. Det synes dock görbart att utveckla mätningen till att ge samma eller bättre noggrannhet än de manuella, tids- och arbetskrävande metoder som används idag.

Framtida arbete behöver utöka mängden mätningar som används för att träna modellen, helst referensmätt genom att flisa hela traven. Ytterligare förståelse av packningsgradens inverkan behövs. Ökad förståelse behövs av de dielektriska egenskaperna hos halvfrusen flis och halvfrusna stockar. Väderdata kan kopplas till resultaten för att öka möjligheten att prediktera frusenhetsgraden hos materialet.

Ett alternativ för att minska komplexiteten är att testa mätning med längre våglängder (lägre frekvens). Det skulle ge rundvirkessignalen ett spridningsbeteende som påminner mer om hur flis beter sig vid nuvarande våglängdsfördelning. Detta skulle dock medföra betydligt större storlek på antennerna och därmed på utrustningen som helhet.

Bakgrund

Det finns en ökad konkurrens om råvaror från skogen, samt ett ökat intresse för att dessa råvaror ska användas på ett miljömässigt, ekonomiskt och socialt hållbart sätt. Inte minst har debatten om bränsleved varit aktuell. Barkborreskador och periodvisa skogsbränder har lett till ett större utbud av rundvirke med lägre fukthalt, vilket har skapat utmaningar för marknaden. Sammantaget finns det ett värde i att tydligt kunna egenskapsdeklarerat råvaran för att visa varför den tilldelats ett visst sortiment. Flis samt bränsle- och massaved transporteras vanligen i bulk, i form av flislass och rundvirkestravar. Volymen hos rundvirkestravar mäts vanligen direkt på lastbil vid ankomst till industri, genom bildbaserad fjärrmätning. Fukthalten är ofta avgörande för om en rundvirkestrave klassas som bränsleved eller massaved. Information om fukthalt ger också förutsättningar för att optimera transport, turordningsplanering, sortering samt förbrännings- och tillverkningsprocesser. Vidare finns ekonomiska incitament till att betala bränsle- och massaved baserat på den mest processrelevanta egenskapen: bränslevärde respektive torr fibervikt. Idag saknas dock kommersiellt användbara metoder för att mäta fukthalten hos travat rundvirke, och effektiva metoder för fukthaltsmätning av flis.

Fukthaltsmätning av träflis görs vanligen genom stickprov, vägning och torkning. Då fukthalten erhålls först efter 24 timmar kan inte sortering och lagring baserat på fukthalt genomföras. Mätnoggrannheten är låg då mätningen görs på få och små stickprov. Beröringsfria fukthaltsmätare baserade på exempelvis när-infraröd (NIR) strålning, akustiska vågor, magnetonukleär resonans (NMR) eller röntgenstrålning förekommer, men anses inte kostnadseffektiva (Roux 2010).

Färskheten i rundvirke kan undersökas manuellt genom att granska barken eller veden direkt under barken. För fukthaltsmätning går det att kapa trissor av stocken eller att ta sågspånsprov med motorsåg. Dessa manuella metoder är dock förknippade med arbetsmiljörisker. Dessutom värms trissan eller sågspånen upp vid sågning, vilket bidrar till torkning och minskar noggrannheten i fukthaltsbestämningen. Fukthaltsmätning görs genomgående på alla ankommande flisbilar till ett värmekraftverk, men i mindre omfattning på massabruk. Fukthaltsmätning på rundvirke görs inte i någon större omfattning, då hanteringen är för kostsam och omfattande med dagens manuella metoder.

Radarbolaget har utvecklat en mätmetod för fukthaltsbestämning av träflis på lastbilar, baserad på bredbandig (ultra-wideband, UWB) mikrovågsteknik. När mikrovågorna används genomlysande (i transmission) kallas denna typ av mätningar även för radiomätningar, medan de kallas för radarmätningar när de används reflekterande.

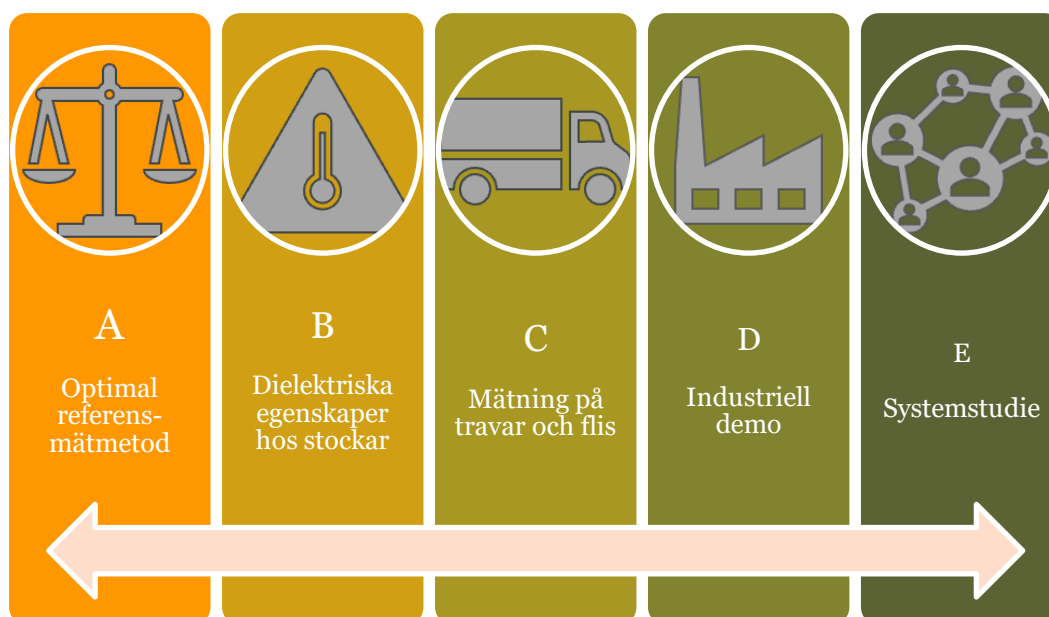
Globalt sett finns få andra kommersiella aktörer som tillverkar bredbandig mikrovågsteknik, vars styrka är dess konfigurerbarhet. I ett tidigare projekt (avslutades 2021-12-30) har en enkel prototyp för lastbils-mätning av träflis tillverkats. Metod och modell fungerade väl för fukthaltsmätning, som gick att bestämma med en noggrannhet på 1–2 procent. Mätningen var snabb och gav ett medelvärde för hela lastbredden (ca 2,5 m), med en mät radi på ca 1 m. Det motsvarar ca 2000 liter virke, vilket gav hög statistisk representativitet. Den första lastbilsprototypen baserades på en enkel design och en tidigare generation av Radarbolagets radioteknik, som nu har förfinats. Vidare håller nya modeller för fruset virke på att utvecklas i det befintliga projektet. Sammantaget finns betydande utvecklingspotential för både prototypen (utrustningen) och databehandlingen/modellen.

I ett inledande försök tillämpades fukthaltsmätaren för flis på travat rundvirke. Det konstaterades att mätning genom en 2,5–2,8 meter bred trave var möjligt, och att resultaten blev rimliga. Därmed borde utrustningen för fukthaltsmätning på rundvirkesbilar kunna vara densamma som för flisbilar, men att metod och modeller anpassas efter råvaran.

Detta projekts mål var att ta tekniken fram till en driftsatt prototyp. Så långt vår kännedom sträcker sig görs ingen annan vetenskaplig forskning kring beröringsfri och penetrerande fukthaltsmätning av flislass eller motsvarande bulk mängder av flis, och inte heller av travad massaved. Utveckling av när-infraröd ytmätning av fukthalt och andra egenskaper hos mindre mängder flis har gjorts av RISE Bioeconomy (Wallbäcks & Grahn 2018, Willbo m.fl. 2025). Ett par vetenskapliga studier har gjorts kring fukthaltsmätning av enstaka rundvirkesstockar med mikrovågstekniken time domain reflectometry (TDR), där provspetsar behöver stickas in i materialet (Malicki & Kotlinski 1998, Dahlen m.fl. 2020). Metoden tycks inte användas kommersiellt idag. Kring år 2009 gjordes ett doktorandarbete i Finland där neutron-aktiveringsanalys (Prompt Gamma Neutron Activation Analysis) användes för att mäta fukt hos travad massaved. Förändringar i fukthalten hos travar kunde mätas, men med en mättid på flera dygn (Päiviö 2009). I slutsatserna nämndes att det fanns potential att utveckla metoden för att mäta absolut fukthalt, men utrustningen var så dyr att ingen vidare utveckling gjordes. Mikrovågsbaserad utrustning har tillämpats för att mäta fukthalt och densitet hos enstaka stockar, med relativt goda resultat (Hans m.fl. 2015a, Hans m.fl. 2015b, Duchesne m.fl. 2023, Guo m.fl. 2023). Sammanfattningsvis finns ett vetenskapligt intresse för att använda mikrovågor för att mäta fukthalt på större mängder skogsråvara, men ingen kommersiell lösning baserad på principen.

Rapportens struktur

Rapporten är strukturerad i fem delstudier (Figur 1).



Figur 1. Rapportens upplägg i fem delstudier.

För delstudie B och D ingick betydande arbete med beräkningar och signalanalys för att få fram modell och simuleringar. Dessa sammanfattas i denna rapport, och finns mer utförligt beskrivna i bilagorna.

Delstudie A – optimal referensmetod

Introduktion

Referensmätning av fukthalten i travat rundvirke var en central del i projektet.

Referensfukthalten användes exempelvis vid:

- Träning och kalibrering av modellen som beräknar fukthalten utifrån förändringar i mikrovågssignalen
- Utvärdering av hur rätt och noggrant mikrovågsutrustningen mäter fukthalten

Att få fram referensvärde på fukthalten i rundvirke är en utmaning, och under projektet har flera metoder utvärderats:

- Resistansmätning / stiftning
- Borrprov med ugnstorkning
- Trissa med ugnstorkning
- Uppflisning med stickprov och ugnstorkning

En av utmaningarna vid utvärderingarna var referensprovvolymen. Fukthalten kan variera betydligt inom ett lastbilslass med rundvirke. En komponent för att erhålla ett noggrant och representativt referensvärde på fukthalten är att mängden material som används vid referensprovtagningen är tillräcklig. Större mängd material ger dels ett större prov som statistiskt ökar noggrannheten, dels blir provet robustare under analysen. Exempelvis spelar vågens noggrannhet och upplösning samt material som separeras från provet vid fukthaltsbestämning med ugnsmetoden mindre roll vid ett stort prov. Ett mycket stort prov innebär dock logistiska utmaningar såväl som förlorat material i leveransen.

En annan utmaning var samplingen. För att få ett representativt värde för hela lastbilslasset behöver tillräckligt många prover tas och så utspritt över lasset som möjligt. En av begränsningarna är att referensprover endast kan tas i de yttre delarna av lasset såvida inte hela traven lastas av. Kapning av trissor kan i praktiken bara göras i ändarna av rundvirket, och impedansmätning med så kallad stiftning mäter bara fukten i en volym nära ytan på rundvirket och traven.

Utvärderingen av de olika metoderna beskrivs utförligare nedan.

Resistansmätning / stiftning

Resistansmätning gjordes med ett standardverktyg, där två stift trycks in i materialet och resistansen i materialet mellan stiften mäts. Metoden är vanlig för fukthaltsmätning av torkat, sågat virke. Fördelarna med metoden är att den är enkel, snabb och billig. Två stora nackdelar är att den bara mäter fukthalten i ytan på rundvirket, och att metoden ger dålig noggrannhet vid fukthalter över fibermättnadspunkten (ca 25 procent fukthalt), vilket ofta är fallet för rundvirke. Metoden ansågs därför inte lämplig för referensprovtagning.

Borrprov med ugnstorkning

Referensmätning med borrarprov sågs som en lovande metod. Försök gjordes med att ta ut prover ur rundvirket med hjälp av en 38 mm borrar, som borrades in axiellt och radiellt, medan borrarspånen samlades upp på en presenning (Figur 2).



Figur 2. Provborrar och borrade stockar. Foton: Radarbolaget.

I praktiken fungerade dock metoden dåligt. Stor kraft behövdes för att få borrar att borra sig in i virket, vilket dels gjorde metoden långsam och tungarbetad, dels skapade det värme i materialet som riskerade att påverka fukthalten i provet. Även uppsamlingen av borrarspånen var en utmanande uppgift. Metoden valdes på grund av detta bort.

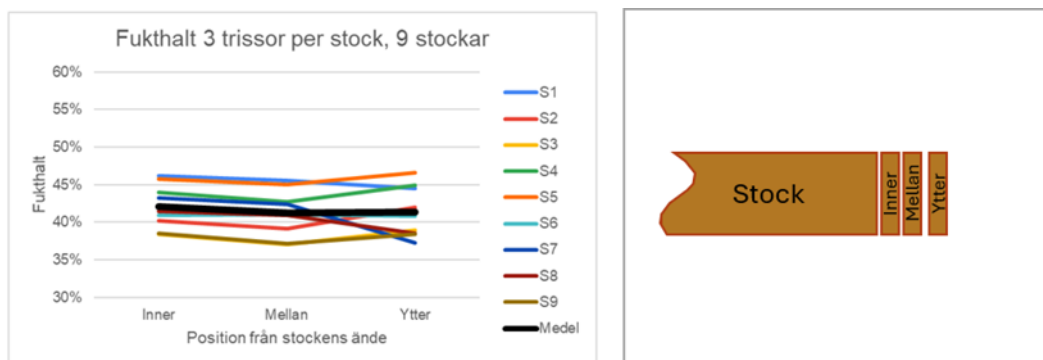
Trisskapning med ugnstorkning

En vanlig metod för fukthaltsmätning av rundvirke är att kapa av änden på en stock så att man får en trissa, vilken vägs, torkas och vägs igen för att få fram fukthalten. Metoden är relativt enkel att utföra. En osäkerhetsfaktor är risken att änden av stocken har en annan fukthalt än resten av stocken. En serie experiment utfördes för att utvärdera hur fukthalten varierar längs med stocken och speciellt i ändarna av stocken, genom tre kapningsstrategier:

- Tre trissor i änden av stocken
- Trissor längs med stocken
- Två trissor i änden av stocken

Tre trissor i änden av stocken

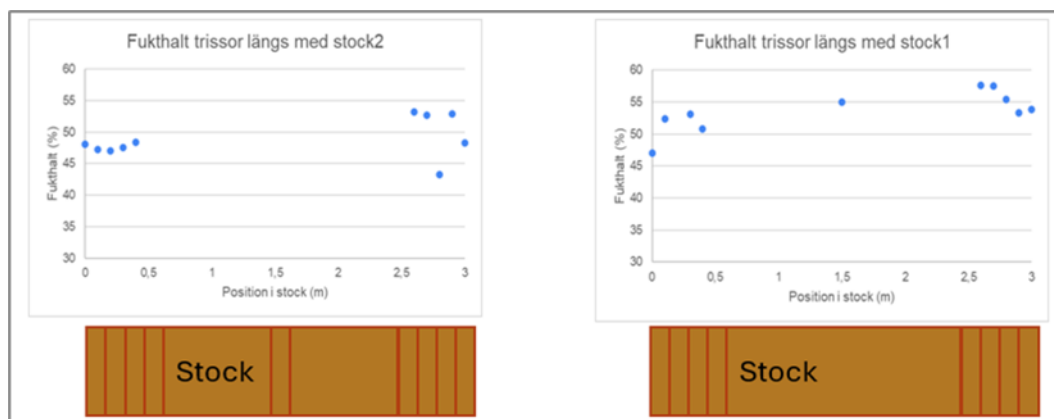
För att utvärdera hur fukthalten varierar i änden kapades tre trissor av på nio olika stockar på en rundvirkesbil som kom direkt från skogen. En viss variation mellan fukthalten i de tre trissorerna kunde ses (Figur 3), men när medelvärdet för de nio stockarna beräknades blev fukthalten för inre, mittersta och yttre trissan 42,1 %, 41,2 % respektive 41,3 %, det vill säga en spridning på 0,9 procentenheter, vilket i sammanhanget bedöms som lågt.



Figur 3. Experimentet med kapning av tre trissor i änden av stocken. Vänster: fukthalt i trissor. Höger: illustration av kapens position.

Trissor längs med stocken

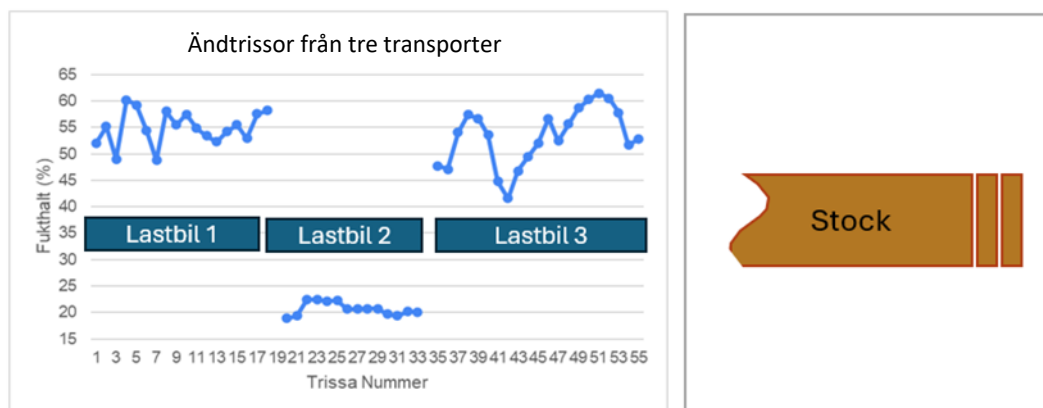
Från två stockar kapades fem trissor i varje ände och för ena stocken även en trissa i mitten på stocken. Trissornas fukthalt bestämdes med ugnsmetoden. Resultatet visar att spridningen i fukthalt mellan trissor är betydande, i storleksordningen ± 5 procentenheter (Figur 4). Variationen följer inte någon tydlig systematik längs med stocken, utan verkar vara relativt slumpmässig.



Figur 4. Experimentet med kapning av trissor längs med stocken. Vänster: fukthalten i 11 trissor från stock #1 samt illustration av kapens position. Höger: fukthalten i 10 trissor från stock #2 samt illustration av kapens position.

Två trissor i änden av stocken

Från tre rundvirkesbilar med olika sortiment, varje rundvirkesbil med tre ekipage, kapades två trissor från tre till fyra stockar per ekipage (trave). I resultaten syns att fukthalten varierar mellan trissorna, upp till ± 10 procentenheter inom samma sortiment, utan eller med svårtolkad systematik (Figur 5).



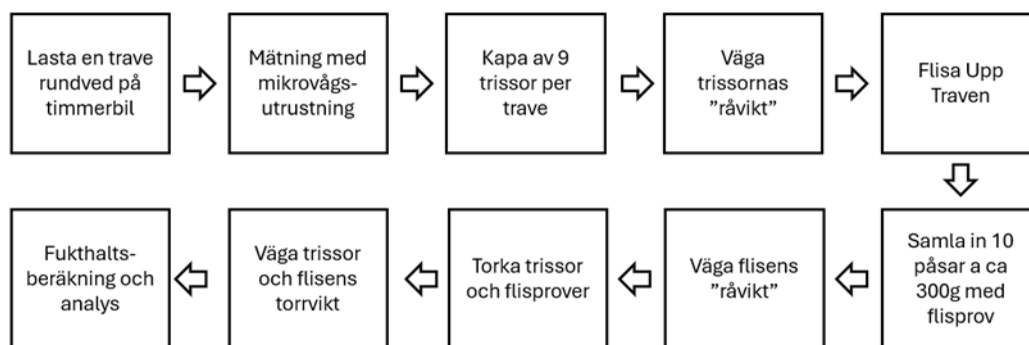
Figur 5. Experimentet med kapning av två trissor i änden av stocken. Vänster: Fukthalten från ca 60 trissor från tre sortiment. Höger: illustration av kapens position.

Diskussion trisskapning med ugnstorkning

Att kapa trissor från ändarna av stockarna i en trave ger en betydande spridning i fukthalt mellan olika trissor. Stockarnas dimension, fukthalt, väder och hur de lagras gör att fukthalten i olika delar längs stocken varierar. Vid hanteringen av trissor som torkas, kan också delar av provet, exempelvis bark, ramla bort vilket bidrar till fel för enskilda trissor. Då en stor del av variationen är slumpmässig, hjälper det att ta ett flertal trissor från varje trave så att medelvärdesbildning minskar felet.

Uppflisning med ugnstorkning

I ett annat experiment jämfördes referensprovtagning med trissor med att flisa upp hela traven och ta prover från flisen. Under experimentet mättes också fukthalten med den installerade mikrovågsutrustningen på Gävle Energi. Processen beskrivs i Figur 6 och visas i Figur 7.

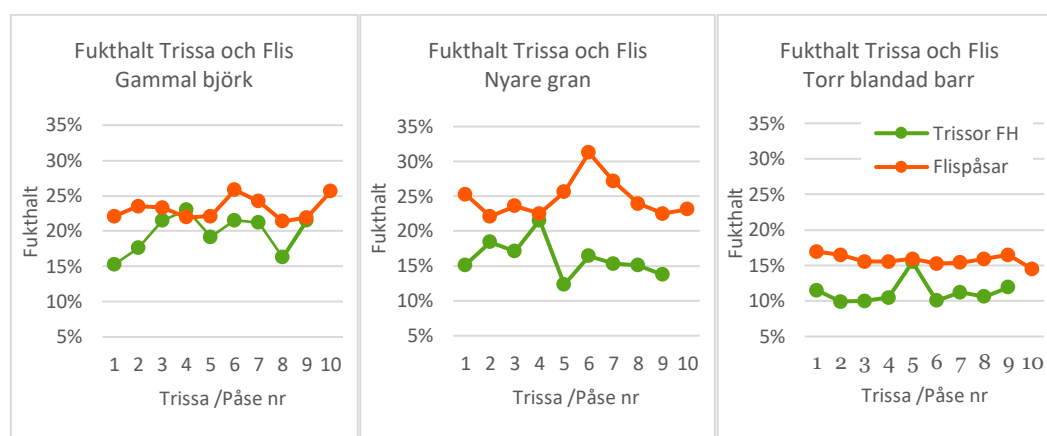


Figur 6. Illustration av experimentprocessen vid utvärdering av uppflisning och ugnstorkning som referensmetod för fukthaltsmätning.



Figur 7. Foton från processen där trissmätning och uppflising jämförs som referensmetoder. Från vänster: mätning med mikrovågor, referenstrissor, uppflising, tre flishögar. Foton: Radarbolaget.

Resultatet från mätningarna redovisas i Figur 8.



Figur 8. Resultat från experimentet där referensprovtagning genom trisskapning respektive flisning av stockar jämförs för tre olika sortiment. Vänster: björkstockar som lagrats under längre tid. Mitten: färsk gran. Höger: torra, blandade barrstockar.

Analysen visar att fukthalten i trissorna varierar betydligt, trots att det var torra stockar som användes. Variationen mellan trissorna synes slumpartad med ett spann på ca ± 5 procentenheter. Även proverna från flisen uppvisar betydande variation med ett spann på ca ± 4 procentenheter. Skillnaden mellan uppmätt fukthalt i trissor och i flis för de tre sortimenten var 3,5, 8,6 respektive 4,5 procentenheter, där det flisade materialet visade på en högre fukthalt. Under experimentet noterades att stockarna legat någon vecka i strålende sol, vilket skulle kunna resultera i att ändarna på stockarna, och därmed trissorna, är torrare än mitten av stocken.

Diskussion och slutsats

Målet i projektet med de genomförda mätningarna är att så bra som möjligt uppskatta medelfukthalten för en rundvirkestrave, vilket gäller för både referensmetoden och mätningarna med mikrovågsutrustningen.

Den metod som rimligen ger mest rättvisande resultat är att under kontrollerade former flisa upp hela traven, ta ut ett stort antal slumpmässiga prover på det flisade materialet och analysera fukthalten med hjälp av ugnsmetoden. Metoden är dock inte praktiskt användbar i produktion, och i forskning och utveckling blir metoden resurs-, tids- och kostnadskrävande. Metoden anses dock användbar som referensmetod för att validera andra mätmetoder.

Den metod som sammantaget anses lämpligast som referensmetod för mikrovågs-mätningen i projektet är trissa med ugnstorkning:

- Metoden har minimal påverkan på traven
- Metoden är praktiskt och tidsmässigt hanterbar med 1–2 arbetstimmar per trave.
- Metoden använder tillräcklig massa (volym) för att göra fel från våg och materialförluster i hanteringen små
- Trissor tagna från nio slumpmässigt valda stockar ger en rimlig slumpmässig sampling av traven
- En nackdel är att alla trissor tas i ändarna på stockar, vilket bidrar med ett systematiskt fel. Detta systematiska fel har dock en spridning i båda riktningarna så även här är det en fördel om provserien är stor, där provserien här får tolkas som rundvirkesbilar.

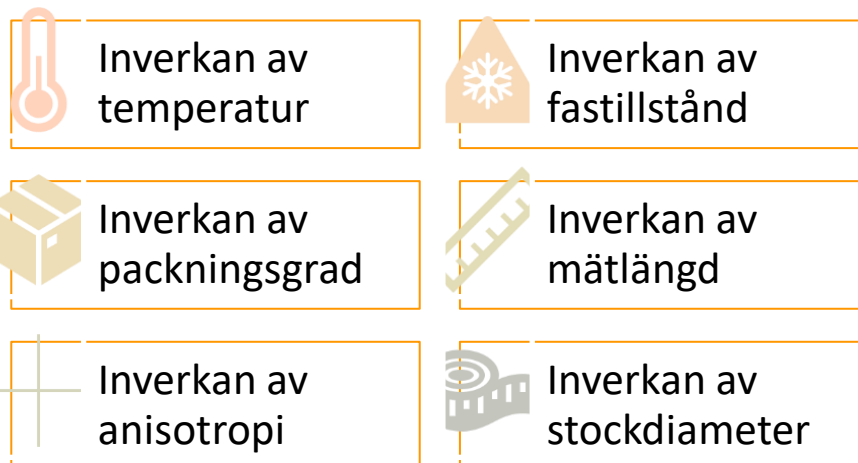
Delstudie B – beteendet hos travat rundvirke vid dielektriska mätningar

Introduktion

Den framtagna mikrovågsprototypen använder sig av dielektrisk mätning, vilket innebär att den nyttjar verkets elektriska egenskaper vid mikro- och radiovåglängder. Förutom signalfrekvens och fukthalt finns flera materialvariabler som influerar signalen vid dielektrisk mätning:

- Temperatur
- Fastillstånd (fruset eller ofruset)
- Densitet (träslag, växtförutsättningar)
- Stockdiameter (grovhet)
- Packningsgrad/fastvolymprocent (förekomst av luft mellan stockarna)
- Anisotropi (signalpolariserande egenskaper)

Få vetenskapliga studier finns publicerade om hur dessa variabler påverkar dielektrisk mätning av rundvirke. Denna delstudie syftar därför till att öka kunskapen om hur dessa faktorer påverkar dielektriska mätningar, specifikt mätningar med mittfrekvensen 1 GHz. De dielektriska egenskaper som undersöks är bland annat relativ permittivitet, dielektrisk förlust, dämpning och deras beroende av radiovågens polarisation. Dessa egenskaper används i sin tur för att räkna ut fukthalten vid tillämpade mätningar med prototypen.



Figur 9. Experiment i delstudie B.

För att undersöka inverkan av ett urval materialvariabler (Figur 9) genomfördes ett antal experiment och undersökningar:

- Kontinuerlig mätning av rundvirke under kontinuerlig torkning
- Mätning vid varierande mätlängd
- Mätning med olika polarisation
- Mätning av fruset och icke-fruset rundvirke, inklusive framtagande av modell för att klassa fastillstånd

Vidare genomfördes simuleringar av vågfrontsutbredning där bland annat stockdiameter och packningsgrad varierades.

Mål

- Undersöka de dielektriska egenskaperna hos fruset och ofruset rundvirke med olika temperatur i laboratorieförhållanden
- Genomföra referensmätningar med mikrovågor på rundvirke med olika fukthalt i kontrollerad miljö (labbmiljö)
- Ta fram en metod för klassning av stockars tillstånd (fruset respektive ofruset)

Gemensamma material och metoder

För att undersöka dielektriska egenskaper hos travat rundvirke utfördes ett flertal experiment i labbliknande miljö för att öka förståelse och kunskapsbas. Mätutrustningen bestod främst av Radarbolagets egenutvecklade, mikrovågsbaserade mätsystem. Systemets huvudkomponenter är en sändarantenn, en mottagarantenn och ett mätkort (modell DiRP 1.3). Mätkortet skickar en bredbandig (Ultra Wide Band) mikrovågssignal med mittfrekvensen 1,0 GHz från ena antennen, igenom provvolymen, till den andra antennen. Vid mätning görs (normalt först) en referensmätning med luft i testlådan, så kallad nollmätning. När testobjektet, här stockarna, placeras i testlådan fås sedan en fördröjning och en minskning i signalens amplitud.

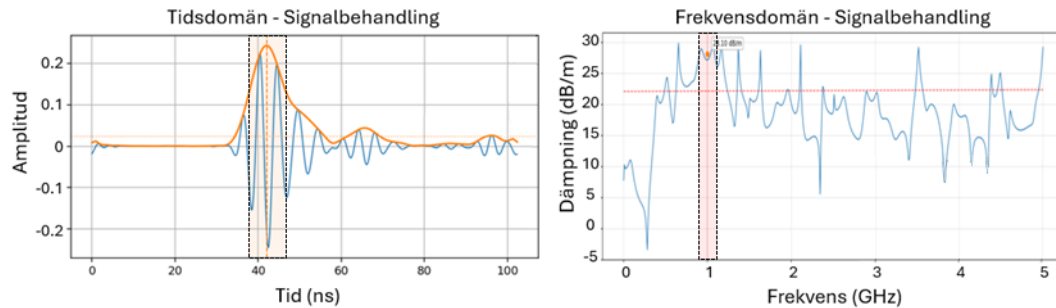
Antennerna ger en planpolariserad signal. Utrustningen jämför utsänd och mottagen signal vilket ger information om:

- Tiden det tar mellan att signalen skickas och tas emot
- Mottagen amplitud som funktion av frekvens (frekvensdomänen)
- Mottagen amplitud som funktion av tid (tidsdomänen)

Detta kvantifieras i tre parametrar som kommer att återkomma på många ställen i rapporten:

- ϵ_r : den relativa permittiviteten. Mätsignalens tidsfördröjning används för att beräkna vågutbredningshastigheten i materialet. Hastigheten i luft delat med hastigheten i materialet ger materialets effektiva brytningsindex. ϵ_r är approximativt lika med kvadraten på brytningsindex.
- α_{energy} : den effektiva dämpningen beräknad i tidsdomänen. Parametern kvantifierar materialets dämpning i ett smalt område i tidsdomänen (se vänstra delen av Figur 10), vilket innebär att alla frekvenser inkluderas.

- α_{f_0} : den effektiva dämpningen beräknad i frekvensdomänen. Parametern kvantifierar materialets dämpning i ett smalt område i frekvensdomänen, ± 100 kHz runt mittfrekvensen f_0 (se högra delen av Figur 10).



Figur 10. Vänster: beräkning av α_{energy} i tidsdomänen, där beräkningsområdet på ± 6 ns visualiseras omgivet av en svart streckad ram. Höger: beräkning av α_{f_0} i frekvensdomänen, där beräkningsområdet på $\pm 0,1$ GHz visualiseras omgivet av en svart streckad ram.

Signalbehandling och beräkningstung analys gjordes med hjälp av i huvudsak egenutvecklad kod och med standardfunktioner i Scilab 6.1.0 i första delen av projektet och i Python 3 med hjälp av biblioteken numpy, pandas och matplotlib.pyplot i de senare delarna av projektet. De viktigaste delstegen i signalbehandlingen är:

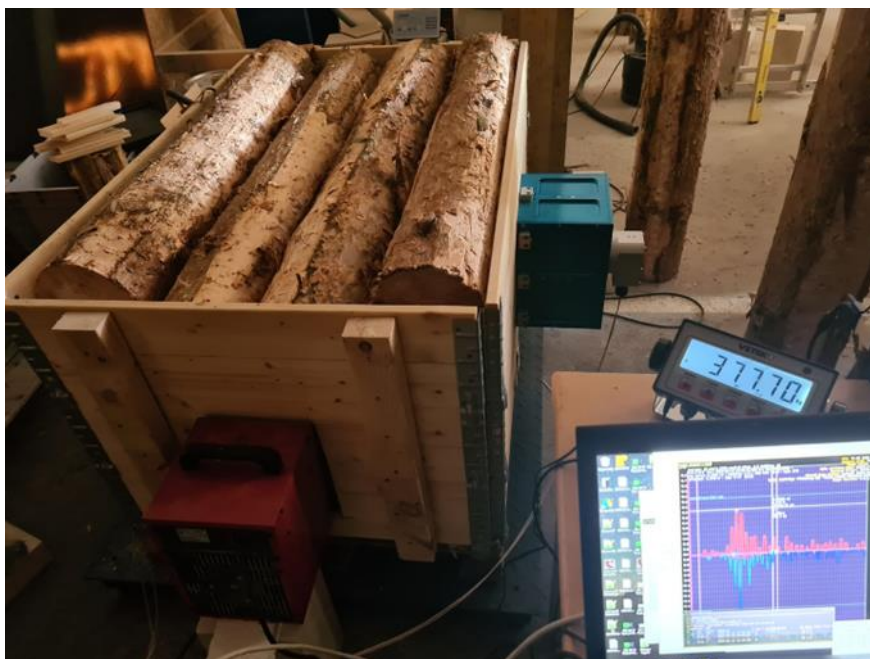
1. Filtrering för att minska mätbrus i signalen
2. Hitta nyckelegenskaper som beskriver signalen, förenklat beskrivet som tidpunkt för början på signalen och signalens amplitud. Exempel på nyckelegenskaper är nollgenomgångar och toppar i signalen (Figur 14)
3. Beräkna tidsfördröjning och den relativa amplitudminskningen mellan nollmätning igenom luft och den aktuella mätningen igenom stockar.

Inverkan av temperatur

Material och metoder

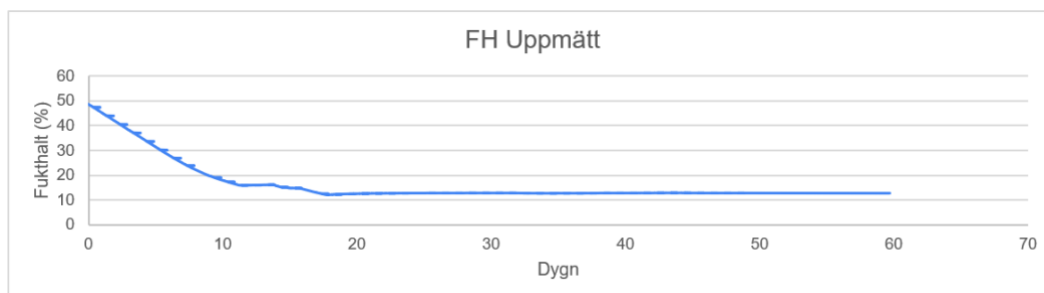
För att utvärdera fukthaltens inverkan på de dielektriska egenskaperna hos travat rundvirke vid så kontrollerade och konstanta förhållanden som möjligt gjordes ett kontinuerligt experiment under 60 dygn.

Försökupställningen bestod av en låda bestående av en EU-pall med kragar, vilken fylldes med elva tallstockar kapade till längden en meter (Figur 11). På båda kortsidorna monterades en värmefläkt, vilken blåste varm luft in i lådan för att långsamt torka stockarna. Lådan stod på en våg med noggrannhet 0,01 kg. Vikten registrerades kontinuerligt, och med det indirekt vikten av den fukt som avgått från stockarna.



Figur 11. Försökuppställning: stockar, mikrovågsutrustning, våg och torkfläkt. Foto: Radarbolaget.

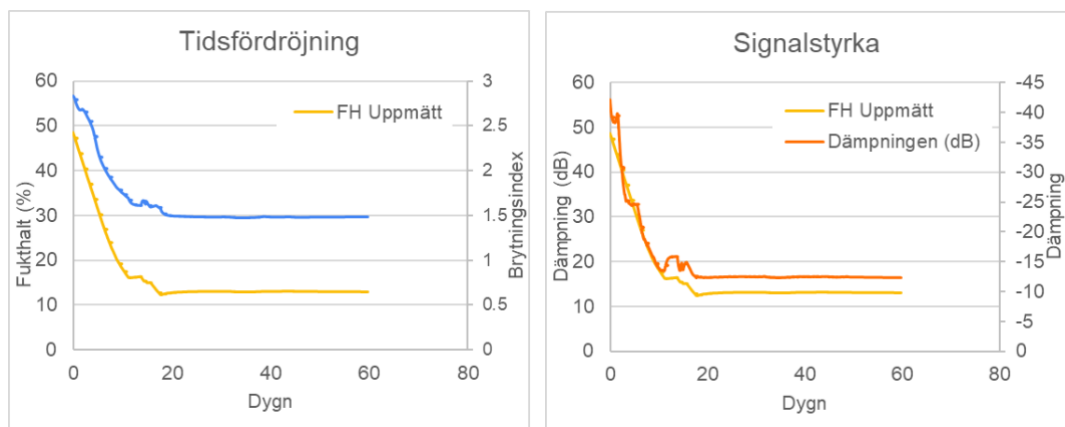
Under de ca 17 första dygnen minskade vikten från motsvarande ca 49 procent fukthalt till ca 13 procent fukthalt, vartefter vikt och fukthalt höll sig konstant (Figur 12).



Figur 12. Fukthalt (y-axel) mot tid (x-axel, dygn) vid torkning av stockar.

Under experimentet mätte mikrovågsutrustningen kontinuerligt hur signalen påverkades av stockarna. Via ändringen i styrkan på mottagen signal, kalibrerat mot nollmätningen, beräknades materialets dämpning på signalen vid olika fukthalt. Även signalens tidsfördröjning, relativt nollmätningen, uppmättes. Via tidsfördröjningen och signalens hastighet i luft (approximativt samma som ljusets hastighet i vakuum) beräknades mikrovågornas utbredningshastighet i lådan och det effektiva brytningsindexet hos stockarna (hastighet i luft / hastighet igenom stocktraven). Sist i experimentet mättes signalen med en tom låda för att få en referens till experimentet, så kallad "nollmätning".

Exempel på resultaten visas i Figur 13.

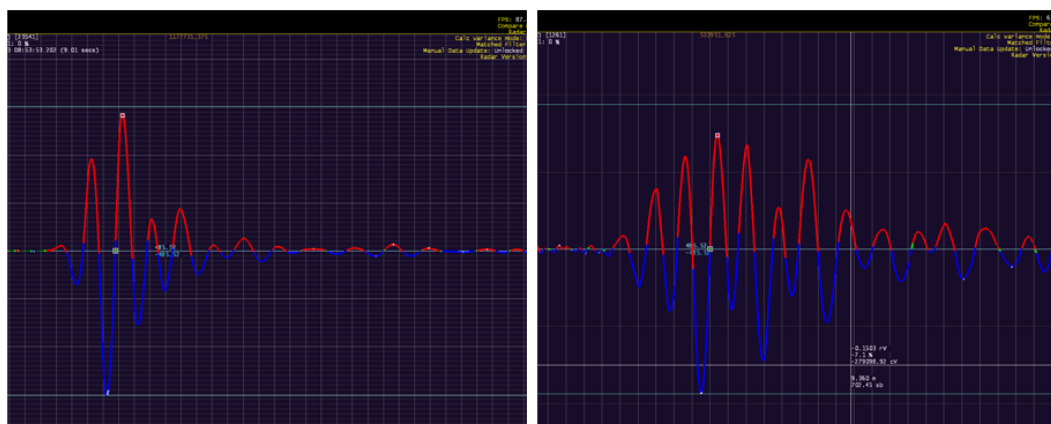


Figur 13. Brytningsindex (vänster) och dämpning (höger) mot tid (dygn) vid torkning av stockar.

Referensprovtagningen genomfördes enligt följande metod. Vid experimentets slut kapades tre trissor per stock från stockarnas ändyta, för att användas som referens för fukthalten. Trissorna vägdes, torkades i ugn i 48 h och vägdes igen, varvid slutfukthalten beräknades. Via den kontinuerliga mätningen av stockarnas vikt kunde sedan fukthalten vid varje tillfälle beräknas.

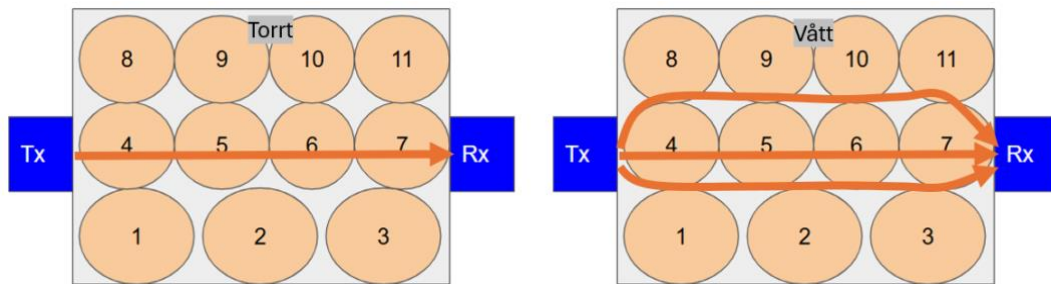
Resultat och diskussion

Vid analys av signalen vid olika fukthalt noterades att vid låg fukthalt fås en kort och lättanalyserad signal, medan vid hög fukthalt fås en mer komplex signal som är utsträckt över tid (Figur 14).



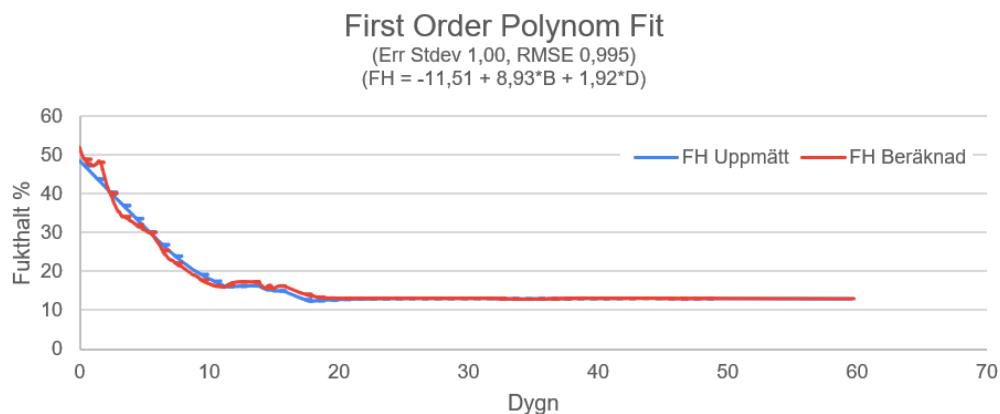
Figur 14. Vänster: signal vid låg fukthalt. Höger: signal vid hög fukthalt.

En hypotes som diskuterades är att så kallad flervägsutbredning blir mer uttalad vid hög fukthalt, då fuktiga stockar har ett högre brytningsindex och med det större inverkan på vågutbredningen i traven. Vid flervägsutbredning kan delar av signalen smita förbi via längre, men snabbare vägar, än närmaste vägen igenom stockarna (Figur 15).



Figur 15. Förenklad schematisk bild på enkelutbredning respektive flervägsutbredning. Vänster: torrt virke, då enkelutbredning dominerar. Höger: vått virke, då flervägsutbredning blir vanligare.

Genom att anpassa ett förstgradspolynom som beräknar fukthalt utifrån dämpning och brytningsindex fås en bra passning och en noggrann modell för beräkning av fukthalten för uppställningen i experimentet (Figur 16).



Figur 16. Enkel modell för fukthaltsberäkning för försöksuppställningen.

Både brytningsindex och dämpning följer fukthalten väl, vilket stödjer att fukthalten i en rundvirkestrave kan mätas med god noggrannhet med hjälp av mikrovågsteknik. Dock noteras att ovanstående är ett experiment under mycket kontrollerade former. Speciellt noteras att det under hela experimentet är samma stockar med samma position. Puckeln vid dygn 11 till 16 kom från att värmebläcktarna då var avslagna.

Inverkan av mätlängd

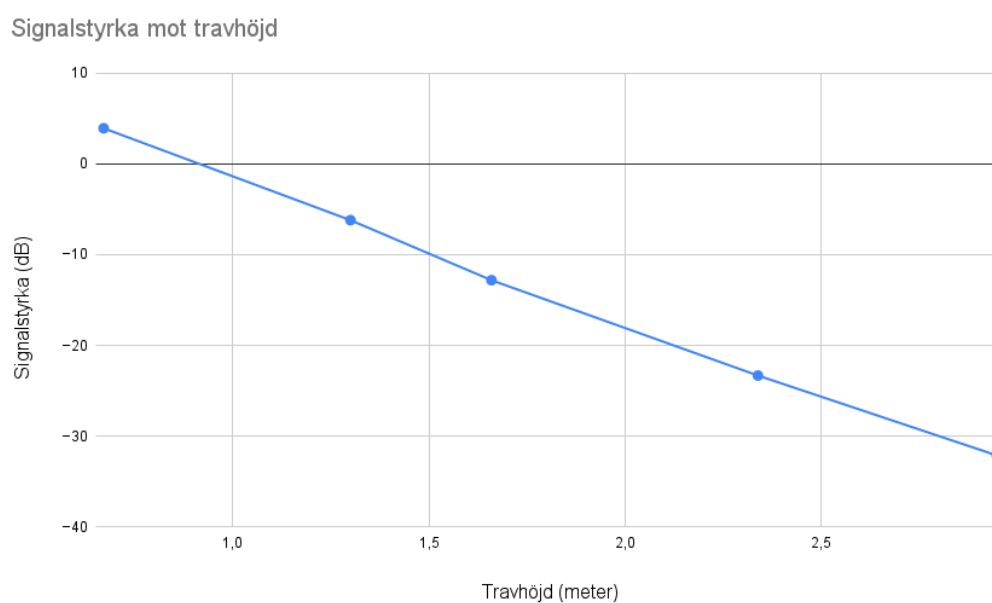
Material och metoder

För att få bättre förståelse för hur olika stora travar påverkar mätningen gjordes ett experiment där travens storlek, framför allt höjd, varierades. Till experimentet användes en virkeställning och ett lass bränsleved. Ena antennen monterades under ställningen medan den andra placerades ovanpå traven. Höjden på traven varierades i steg mellan ca 0,5 m och 3,0 m (Figur 17).



Figur 17. Antenner (orangea lådor) på vardera sida om olika mängd travad bränsleved. Vänster: mätning med ca 1 m virkeslängd. Höger: mätning med ca 3 m virkeslängd. Foto: Kari Hyll, Skogforsk.

Under analysen lades fokus på att analysera signalens dämpning (Figur 18).



Figur 18. Uppmätt signalstyrka som funktion av travhöjd.

Ett viktigt resultat var att signalen var detekterbar vid en provlängd om 2,8 m och att signalstyrkan avtog linjärt mot travhöjden, vilket innebär att mätningar har förutsättningar att fungera även på rundvirkesbilar, där normal travbredd är 2,4–2,5 m.

Mätresultatet avvek från det resultat som var förväntat baserat på tillämpad fysik. Eftersom mättekniken bygger på en modell som översätter mätsignalen till fukthalt, finns inget absolut behov av fysikalisk förståelse, men ökad förståelse för mättekniken möjliggör utveckling av mer en robust och noggrann mätare.

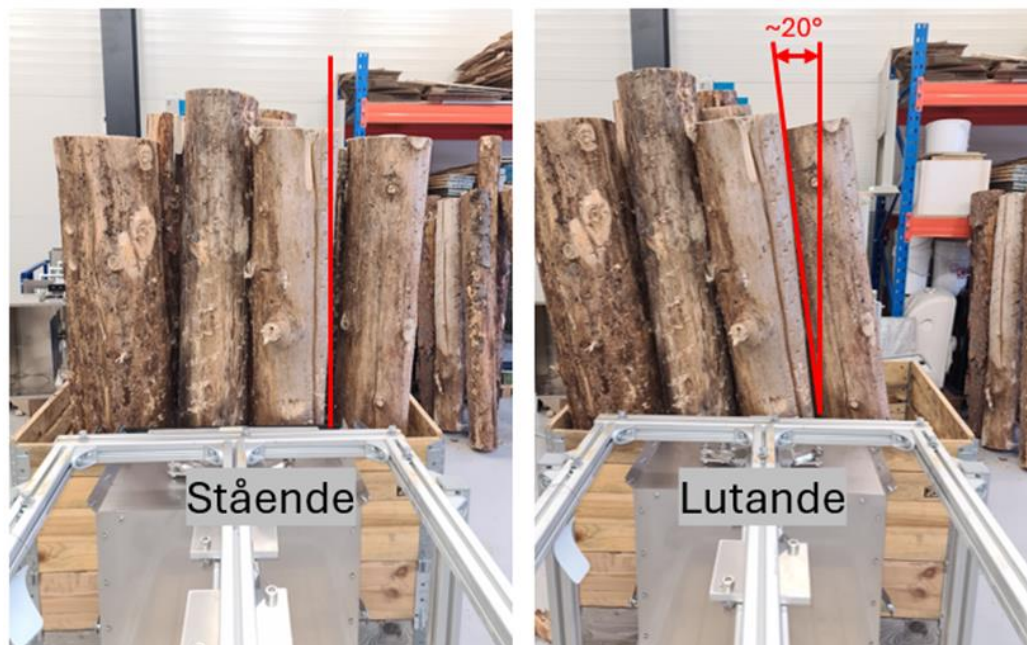
Inverkan av anisotropi (polarisation)

Bakgrund

De dielektriska egenskaperna för trä är starkt beroende av polarisationen på mikrovågorna i mätsystemet relativt träfibrens riktning (Torgovnikov 1993), vilket ofta kallas för anisotropi. Potentiellt påverkas den effektiva anisotropin för travat rundvirke även av stockarnas orientering. Material med dubbelbrytande egenskaper har även en förmåga att vrida polarisationen och även stockarnas geometri och orientering kan bidra till vridning av polarisationen via exempelvis reflektion, spridning och flervägsutbredning. Vridningen i polarisation kan både skapa osäkerhet i mätningarna, och bidra med extra analyserbar information om materialet. Experimentet utfördes för att skapa en bättre förståelse kring hur polarisation påverkar mätning av travat rundvirke.

Material och metoder

I experimentet användes en ”trave” med kapad bränsleved som placerades dels vertikalt, dels med en lutning på 20° relativt vertikallinjen mellan antennerna (Figur 19).



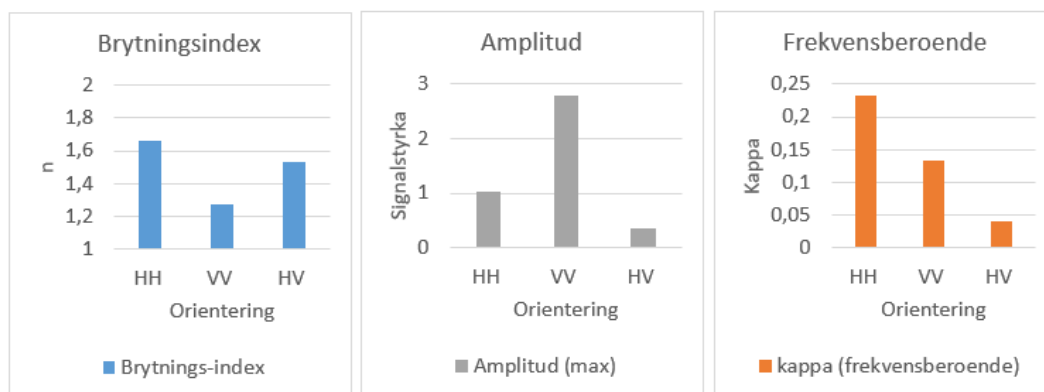
Figur 19. Försöksuppställning för studie av polarisation. Vänster: stående trave. Höger: lutande trave. Antenn syns i förgrunden. Foton: Radarbolaget.

Antennerna orienterades i tre riktningskombinationer enligt nedan, där H för horisontell ska tolkas som parallellt med stockarnas längdriktning och V för vertikalt som vinkelrätt mot stockarnas längdriktning:

- HH: båda antennerna horisontellt
- VV: båda antennerna vertikalt
- HV: en antenn horisontellt och en vertikalt (korspolarisation)
- VH: ger samma information som HV, varför dessa mätningar inte gjordes.

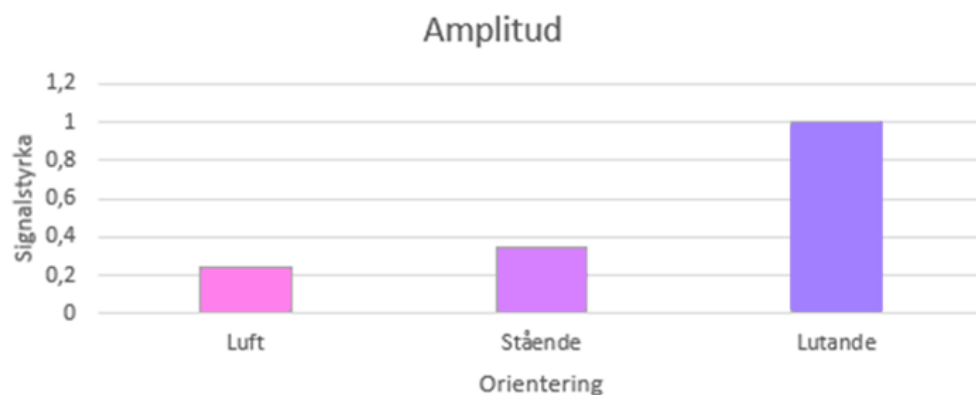
Resultat

För rakt stående stockar visade mätresultaten för brytningsindex och amplitud att VV-riktningen både ger starkast signal (högst amplitud) och är den signal som först når mottagaren (lägst brytningsindex), se Figur 20. Detta var väntat, och orientering VV är därför den polarisation som föredras för mätning av rundvirke.



Figur 20. Mätresultat från rakt stående stockar vid olika polarisation.

Insikt i stockarnas inverkan på korspolarisationen (HV) kan fås vid jämförelse mellan signalstyrkan igenom luft, rakt stående stockar och lutande stockar (Figur 21). För korspolarisationen HV fås den lägsta amplituden, vilket också är enligt förväntningarna.



Figur 21. Amplitud vid korspolarisation igenom luft, stående stockar och lutande stockar.

Med perfekt polarisation ska ingen signal nå fram mellan antenner med polarisationen vriden 90° mot varandra (HV). I verkligheten, som inte är perfekt, når dock alltid en liten del av mikrovågssignalen fram. När stående stockar placeras mellan antennerna, ökar signalstyrkan, trots att stockarna i sig dämpar signalen. När stockarna lutas, ökar signalstyrkan ytterligare. Detta visar på att stockarnas dubbelbrytande egenskap vrider polarisationen och skapar korspolarisation, vilken förstärks när stockarna lutas.

En ökning av amplituden vid korspolarisation (HV) innebär samtidigt att amplituden i den normala, önskade mättriakningen (VV) minskar.

Diskussion

Vid en given polarisation på mätutrustningen, exempelvis VV, har stockarnas orientering en betydande inverkan på signalen. I en perfekt, teoretisk rundvirkestrave med alla stockar helt horisontellt har travens dubbelbrytande och polarisationsvridande egenskaper troligen försumbar inverkan på mätningen. I en verklig rundvirkestrave ligger dock inte alla stockar perfekt horisontellt och stockarnas riktning inverkar i någon mån på mätsignalen. Eventuellt samverkar variationer i stockarnas orientering med variationer i exempelvis stockarnas diameter, packningsgrad och fukthalt, som tillsammans ger polarisationseffekter som är svåra att skatta.

Inverkan av fastillstånd (fruset/ofruset)

Metod

För att utvärdera dielektriska egenskaper hos fruset rundvirke gjordes en mätserie på tre set med rundvirke av olika fukthalt vid temperaturer från -15°C till $+15^\circ\text{C}$ och med olika polarisation på mikrovågorna.

Provmaterialet bestod av nyavverkade stockar av gran och tall av okänt sortiment. Rundvirket kapades till korta stockar med en längd på 1,2 m och hade en medeldiameter på 22 cm. De tre seten, benämnda Fack A, Fack B respektive Fack C, staplades i tre kragförsedda EU-pallar med dimensionen 120 x 80 cm. Volymen innanför pallkragarna uppmättes till 116,5 x 58 x 120 cm (L x B x H).

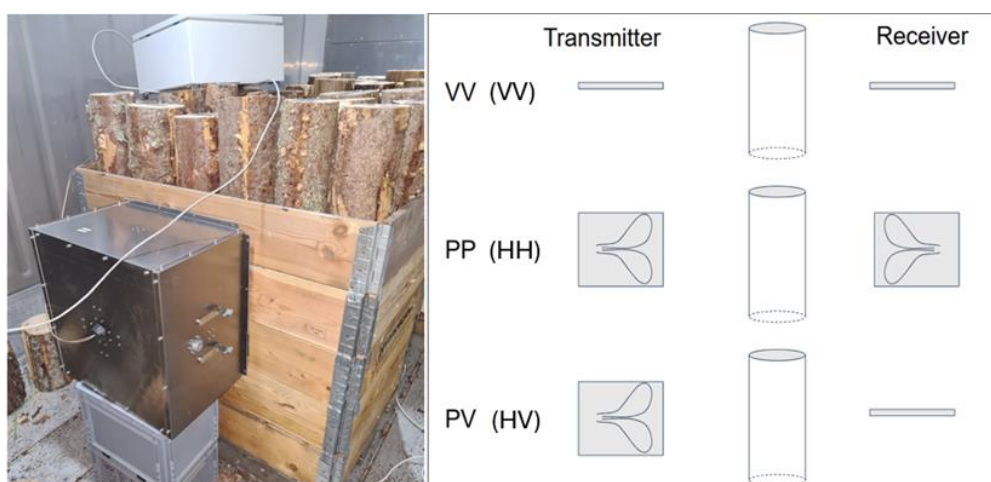
De tre EU-pallarna placerades i en container med kylaggregat (temperaturnoggrannhet $\pm 1^\circ\text{C}$) så att temperaturen kunde styras (Figur 22).



Figur 22. Försökupställning för studie av fastillståndets inverkan, där stockar i Fack A, B och C visas i containern. Foton: Radarbolaget.

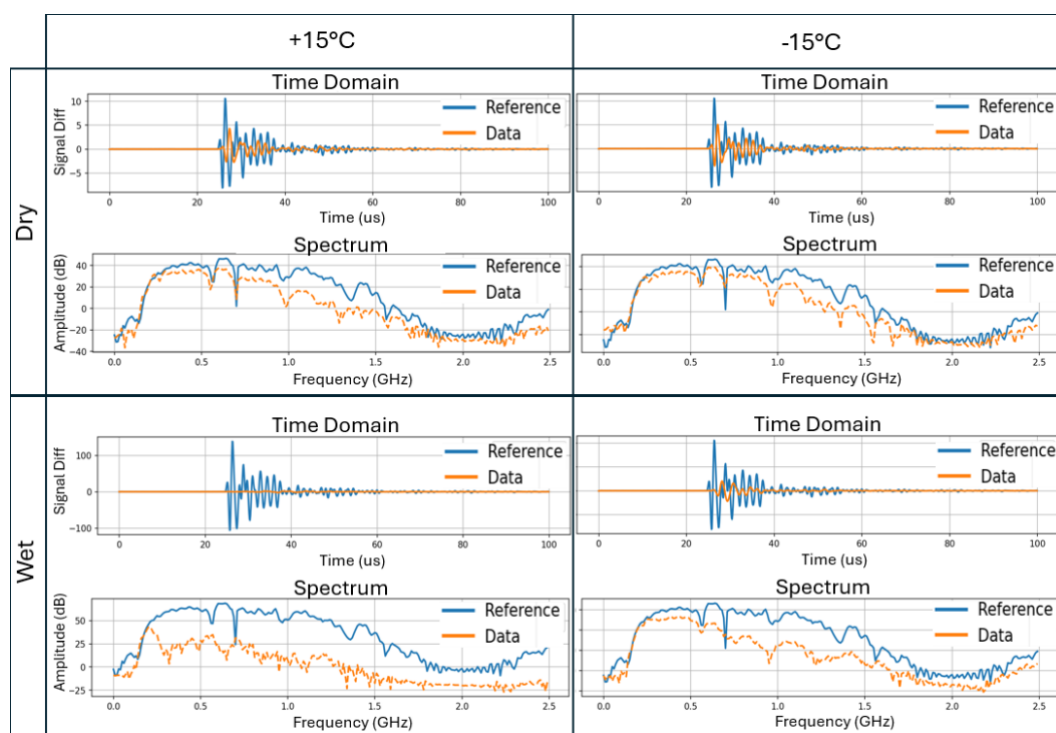
För mätning placerades mätutrustningens antenner på var sin sida om EU-pallen. Mätningar genomfördes i två riktningar, dels från kortsida till kortsida, dels från långsida till långsida (Figur 23). Vid varje riktning gjordes också mätningar i tre polarisationskombinationer:

- VV, vinkelrätt mot stockarnas längdriktning (ovan benämnt VVs)
- PP, parallellt med stockarnas längdriktning (ovan benämnt HH)
- PV, korspolariserat med ena antennen riktad längs med stockarna och andra antennen riktad vinkelrätt mot stockarna (ovan benämnt HV)



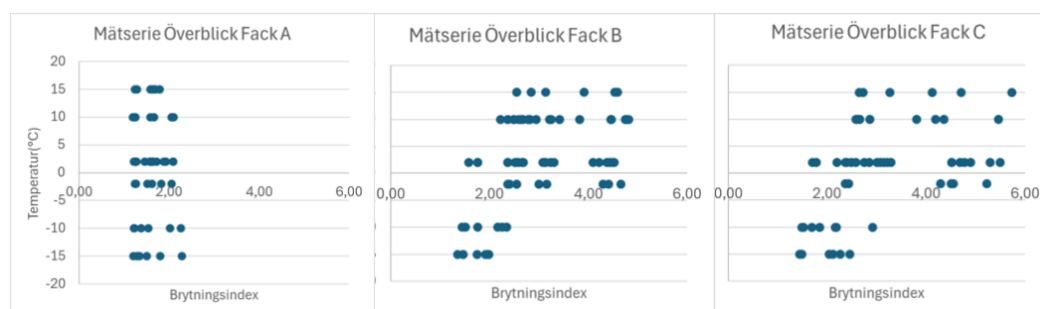
Figur 23. Vänster: försökupställning med antenn och stockar. Foto: Radarbolaget. Höger: Tre polarisationsriktningar.

Temperaturen i containern varierades i stegen -15, -10, -2, +2, +10, +15 °C, och mellan varje ändring hölls temperaturen i containern konstant för att stockarna skulle anta jämn och avsedd temperatur innan mätningen genomfördes. Två stockar vid sidan om lådan hade försetts med temperaturmätare i mitten av stocken för att bedöma när rätt och stabil temperatur uppnått. Mikrovågssignalen analyserades i tids- och frekvensdomänen. I Figur 24 syns fyra exempel där signalen igenom luft tolkas som referens för signalen igenom torra respektive våta stockar vid +15 °C respektive -15°C. Blå signal är referensmätningen i luft i de fyra fallen, medan den orangea är signalen igenom traven. Man ser till exempel att i nedre vänstra exemplet med fuktiga, icke frusna stockar blir den orangea mottagna signalen dels svag, dels tidsförskjuten till höger.



Figur 24. Exempel på mätsignaler i tids- och frekvensdomänerna.

Sammanlagt gjordes 175 mätningar på stockarna. Figur 25 visar en överblick på mätdata sorterat efter fack, temperatur och brytningsindex från mätningen.



Figur 25. Överblick av mätserie. Tre fack med olika fukthalt vid olika omgivningstemperaturer.

Referensprovtagningen av fukthalt genomfördes enligt följande metod. För att beräkna fukthalten i de tre seten/facken kapades trissor från samtliga stockar både före och efter mätserien. Fukthalten bestämdes med ugnsmetoden (vägning, torkning, vägning) och ett medelvärde på fukthalten beräknades för respektive fack. Medelfukthalten var väsentligen densamma före och efter mätserien (Tabell 1).

Tabell 1. Fukthalt hos referenstrissorerna vid studien av inverkan hos fastillståndet.

	Fukthalt före (%)	Fukthalt efter (%)	Ändring (procentenheter)
Fack A	14,1	15,7	+1,6
Fack B	52,6	51,2	-1,4
Fack C	54,7	52,4	-2,3

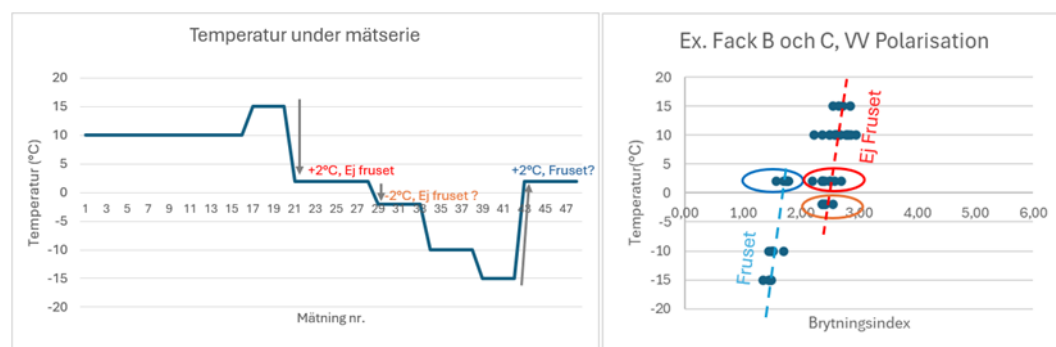
Resultat och diskussion

Vid analysen av mätningarna observerades att registreringarna vid -15, -10, +10 och +15 °C gav stabila mätningar i linje med förväntningarna. Registreringarna vid -2 och +2 °C avvek dock från förväntat resultat. Vid en noggrannare analys konstaterades att temperaturen i stockarna sannolikt inte hade stabiliserats, vilket medförde att:

- Stockarna som mättes vid +2 °C vid ena tillfället troligen inte var frusna, men vid andra tillfället troligen var frusna.
- Stockarna som mättes vid -2 °C troligen inte var frusna.

Hypotesen är att stockarna inte hade avsett tillstånd med avseende på fruset och icke fruset vid två av tre mättillfällen vid temperaturerna +2 och -2 °C, då smältvärmen för vatten är stor och smältning, respektive frysning av stockarna därmed tar lång tid, längre än hålltiden i experimentet.

I vänstra grafen nedan (Figur 26) ses i tidserien från vilket ”håll” temperaturen i stockarna går innan mätning vid +2 respektive -2 °C. I högra grafen syns att mätningarna bildar två serier, en för fruset och en för icke fruset, som båda sträcker sig över nollgradersgenomgången.



Figur 26. Vänster: tidserie för mätningar. Höger: brytningsindex mot temperatur.

Vidare noteras att temperaturen för både frusna och icke frusna stockar verkar påverka brytningsindex för de fuktiga stockarna i Fack B och C signifikant. Exempelvis för de fuktiga frusna stockarna i Fack B och C ökar brytningsindex med ca 0,14 för varje grad.

Via den i projektet framtagna modellen för rundvirkesbilar blir effekten i storleksordningen att 20 °C skillnad i temperatur motsvarar 10 procentenheters skillnad i fukthalt. Motsvarande jämförelse mellan brytningsindex och temperatur för relevant frekvens och fukthalt har inte hittats vid litteratursökning. Det kan inte heller uteslutas att mätutrustningen, så som den är uppsatt i experimentet, i sig påverkas av temperaturen även om den är konstruerad och testad för att vara robust mot temperaturvariationer.

Metod för klassning av stockars fastillstånd

Bakgrund

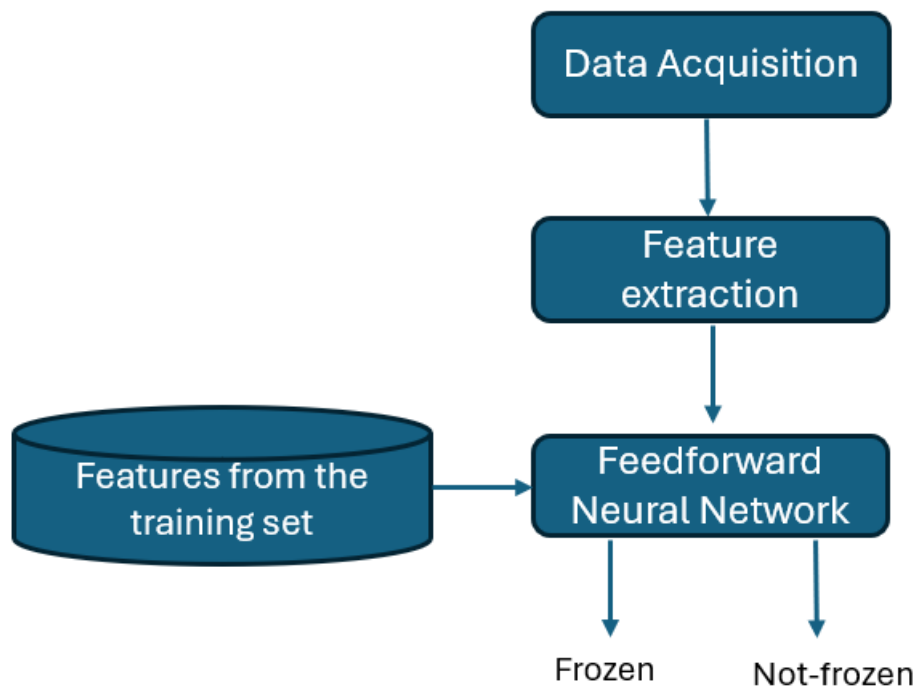
Det finns flera arbeten (Zhao m.fl. 2015, Özkan 2022, Zhou m.fl. 2024) som studerat de mekaniska egenskaperna hos frysta stockar, men få arbeten har gjorts om mätning av stockars fastillstånd (det vill säga om stockarna är frusna eller inte). Metoden i Denzler och Weidenhiller (2016) fokuserade på klassificeringen av stockar som innehåller fruset och ofruset vatten med hjälp av mekaniska frekvensbaserade oförstörande testmetoder. Mer specifikt mätte författarna den mekaniska frekvensen hos en stock genom att placera den på två smala gummimattor som fungerade som elastiska stöd. Vibrationer inducerades genom att träffa ena änden av stocken, och de resulterande oscillationerna fångades på samma sida med hjälp av en vibrationsmätare. Denna metod uppnådde en noggrannhet på cirka 60 procent.

I motsats till befintliga metoder syftar den här studien till att utveckla en automatiserad icke-förstörande teknik för att identifiera fastillståndet hos stockar med hjälp av mikrovågstransmission (även kallat radiomätning). Dessutom fokuserar detta arbete på att klassificera staplat rundvirke, eftersom det mesta virket lagras och transporteras staplat på lastbilar. Fördelen med att använda mikrovågor jämfört med mekaniska vibrationer, som i Denzler och Weidenhiller (2016), är att man inte behöver ha mekanisk kontakt med stockarna; antenner kan placeras en bit ifrån de stockar man mäter på.

Fukthalten och fastillståndet påverkar träets dielektriska egenskaper (permittiviteten) och därmed mikrovågornas utbredning i träarna. Våglängden för den elektromagnetiska strålningen i ett UWB-system är i detta fall av samma storleksordning som heterogeniteterna, det vill säga stockarnas tvärsnitt. Således är den effektiva komplexa permittiviteten inte väldefinierad och vågutbredning blir komplicerad med effekter som ökad spridning och multipla reflexer. Som ett alternativ till att analysera vågutbredningen med fysikaliska metoder – vilket i fallet med rundvirke skulle vara utmanande – använder denna studie maskininlärning på experimentella data för att klassificera rundvirkets fastillstånd (fryst eller icke-fryst).

Material och metoder

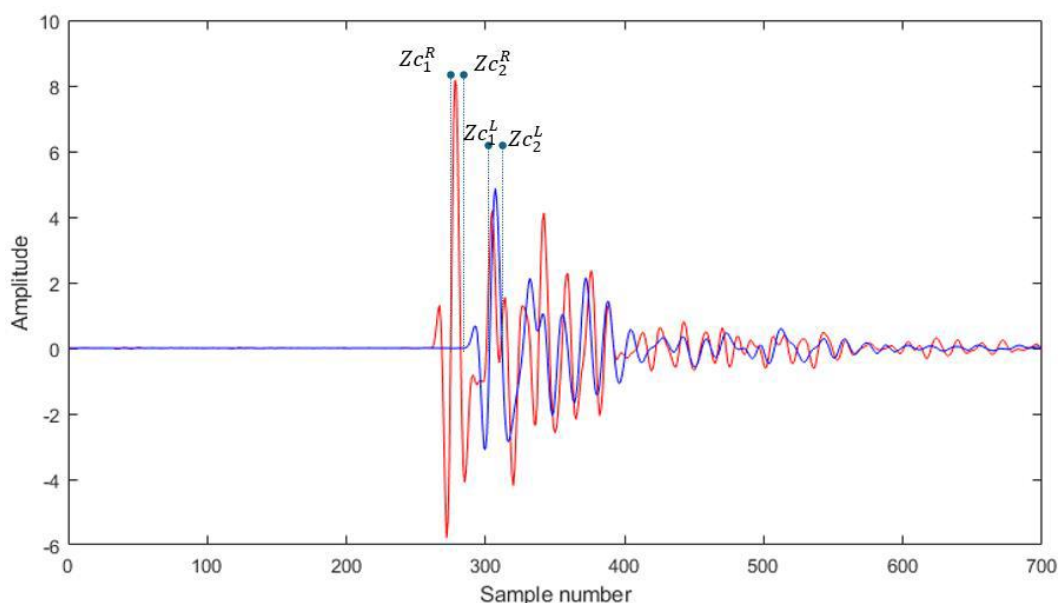
I Figur 27 visas ett blockdiagram av den föreslagna och använda metoden i denna studie.



Figur 27. Blockschema över den föreslagna metoden för klassificering av fryst och icke-fryst rundvirke.

Som tidigare beskrivet omfattade data 175 mätta signaler (inklusive PP-, PV- och VV-polariseringar). I ett första steg, innan maskininlärningsmetoden används, beräknas tre karakteristika för de uppmätta mikrovågorna (Figur 28). Dessa karakteristika beräknas från nollgenomgångar och amplitudvärden, mer specifikt:

1. Skillnaderna i fördröjningar mellan första och andra nollgenomgångarna, vilket motsvarar dämpningens frekvensberoende.
2. Fördröjningsskillnad mellan referenssignal och signal genom rundvirke, vilket motsvarar brytningsindex.
3. Amplitudförhållanden mellan största topp i signal genom rundvirke och referenssignal, vilket motsvarar totala dämpningen.



Figur 28. Signaler från mätning på den tomma behållaren (röd) och genom rundvirke (blå).

Ett artificiellt neuralt nätverk tränades för att klassificera fastillståndet hos travat rundvirke. Neurala nätverk är utformade för att känna igen icke-linjära mönster och relationer i data. De består av sammankopplade lager av neuroner, inklusive inmatningslager, dolda lager och utmatningslager, som bearbetar information genom viktade kopplingar och aktiveringsfunktioner. Genom att lära av träningsdata justerar neurala nätverk sina vikter för att förbättra klassificeringsnoggrannheten.

Nätverket var av typen feed-forward (FFNN), hade ett dolt lager, 10 neuroner, och använde aktiveringsfunktionen ReLu. Inmatningsfunktionerna bestod av våra tre karakteristiska, det vill säga fördröjningsskillnad, brytningsindex och amplitudförhållande. Utmatningsfunktionen var fastillstånd (fryst eller ofryst).

Resultat och diskussion

Den föreslagna metoden uppnådde en noggrannhet på 74,9 procent vid klassificering av fryst och icke-fryst rundvirke med hjälp av UWB-mikrovågor (Tabell 2). I Tabell 2 beskriver siffran 39 antalet fall med frusna stockar som (korrekt) klassificerades som frusna; siffran 18 antalet fall med frusna stockar som (felaktigt) klassificerades som icke frusna; siffran 92 antalet fall med icke frusna stockar som (korrekt) klassificerades som icke-frusna; och siffran 26 antalet fall med icke frusna stockar som (felaktigt) klassificerades som frusna. Ett betydande antal frysta stockar klassificerades således som icke-frysta. Detta berodde främst på närvaron av både fryst och flytande vatten i stockarna, vilket resulterade i brusiga signaler runt fryspunkten. Våra resultat överensstämmer också med metoden i Schimleck m.fl. (2019).

Tabell 2. Förvirringsmatris vid klassning av fastillstånd hos rundvirke.

	Frusna	Ej frusna
Frusna	39	18
Ej frusna	26	92

För att ytterligare undersöka prestandan hos den föreslagna metoden togs osäkra data kring fryspunkten (mellan -2 °C och +2 °C) bort. Efter att ha exkluderat ovannämnda data ökade klassificeringsnoggrannheten till 84,9 procent (Tabell 3).

Tabell 3. Sammanblandningsmatris för varje fastillstånd av rundvirke när data kring fryspunkter exkluderas.

	Frusna	Ej frusna
Frusna	30	7
Ej frusna	7	49

Resultaten visar att mätningar med UWB-mikrovågor är användbara vid klassificering av frysta och icke-frysta staplar med rundvirke. Resultaten behöver dock förbättras ytterligare för att kunna användas inom skogsindustrin. Framtida arbete bör inkludera ytterligare data kring fryspunkten. Dessutom kan djupinlärningsmodeller utforskas för att automatiskt extrahera egenskaper och förbättra klassificeringsnoggrannheten.

Metodens lämplighet för att klassificera enskilda stockar behöver fortfarande undersökas. Staplat rundvirke utgör den lämpligaste tillämpningen, såsom att underlätta valet av kalibreringskurva vid mätning av fukthalt i staplat rundvirke. Dessutom har den föreslagna metoden potential att användas för andra biomassatyper, såsom kvalitetsbedömning av frysta livsmedel.

Simulering av vågfrontsutbredning

Introduktion

Den genomsnittliga diametern på rundvirket som användes under experimenten varierade mellan ca 10 cm och 30 cm. Den bredbandiga mätsignalen hade en våglängd på 30 cm för mittfrekvensen 1,0 GHz. Det innebär att våglängden är i samma storleksordning som diametern hos virket, illustrerat i Figur 29.



Figur 29. Visuell jämförelse av materialstorlek jämfört med våglängd. Vänster: Grovt rundvirke. Mitten: klenrundvirke. Höger: flis. Foton: Radarbolaget.

Små objekt. När material som mikrovågorna passerar består av objekt som är mycket mindre än våglängden, beter sig materialet approximativt som ett homogent så kallat effektivt medium. Variationer i objektens storlek och form har då liten inverkan på det effektiva mediets dielektriska egenskaper och har därmed begränsad påverkan på signalen. Detta nyttjas exempelvis vid fukthaltsmätning på sönderdelat material som träflis.

Stora objekt. Med objekt som är stora relativt våglängden beter sig vågutbredningen mer som vid fysikalisk optik, där varje yta reflekterar, transmitterar och bryter de infallande strålarna av mikrovågor. Stora objekt resulterar också i stora luftgap mellan objekten.

För en rundvirkestrave med grov diameter beter sig vågutbredningen därmed mer likt fysikalisk optik där varje stock agerar som ett element, vilket ger en komplex vågutbredning. Resonansmässigt blir konsekvensen att för en rundvirkestrave har virkets diameter och packningsgrad påverkan på travens effektiva dielektriska egenskaper och betydande påverkan på signalen.

Det verkar även sannolikt att rundvirkets cylindriska form och utsträckning i en riktning i traven förstärker den fysikaliskt optiska effekten relativt träflis som har en mer stokastisk orientering och slumpmässig geometri.

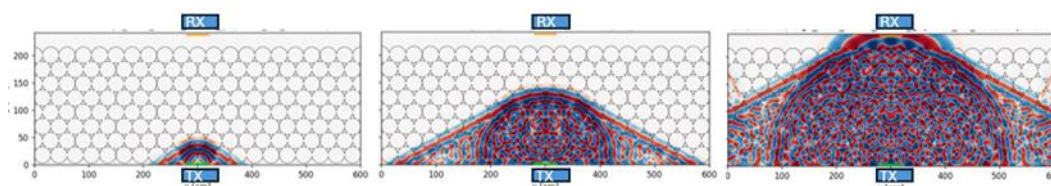
Mikrovågutbredning i enskilda rundvirkessstockar har i viss utsträckning studerats genom simulering (Sjöden 2012, Hans m.fl. 2015a, Sanchez-Montero m.fl. 2018). Simulering av utbredningen i travar tycks däremot saknas i litteraturen.

Metod

I tidigare projekt på sönderdelat skogsbränsle har Effektivt Medium Analys (EMA) framgångsrikt använts för att modellera virket och utföra teoretiska beräkningar (Ottoström & Andersson 2017). Vid mätning på travar av rundvirke med mikrovågor med en frekvens i storleksordningen 1,0 GHz, ställdes hypotesen att traven *inte* kan

approximeras till ett effektivt material där stockarnas geometri och position har försumbar inverkan.

För att utvärdera hypotesen användes simulering av vågornas utbredning med hjälp av FDTD (Finite-Difference Time-Domain) analys. I simuleringen lades tvådimensionella stockar med förutbestämda värden på fukthalt och dielektriska parametrar ut i ett valfritt mönster som bildade en trave (Figur 30). Sedan "skickades" samma typ av UWB-mikrovågssignal som i mätutrustningen från en sändarantenn (Tx), där E-fältet ligger parallellt med stockarnas axlar. Vågorna breder ut sig igenom stockar och i luften mellan stockarna, reflekteras och transmittas vid varje yta och når så småningom mottagarantennen (Rx).



Figur 30. Simulering av vågfrontsutbredning i hexagonalt packade stockar, som funktion av tid. Vänster: start av tidssekvensen. Mitten: halvvägs genom tidssekvensen. Höger: nära slutet av tidssekvensen.

Inför simuleringen behöver värden på de dielektriska parametrarna hos enskilda stockar anges. När stockarna sedan läggs samman till en trave kommer även de dielektriska egenskaperna hos luft att bidra till mätsignalen, samt faktorer relaterade till travens packning och geometri. Det betyder att den simulerade signalen som når mottagaren kommer att representera den kombinerade interaktionen, med andra ord travens dielektriska parametrar.

Travens dielektriska parametrar beräknades från den simulerade signalen med två olika metoder:

1. Med Effektivt Medium Analys (EMA) baserad på andelen trä och andelen luft som radiovågen transporteras genom.
2. Med samma signalbehandling som vid mätning på riktiga rundvirkes- och flisbilar

För att utvärdera om och hur variationer i packning och diameter på stockarna inverkar på resultaten varierades följande parametrar i simuleringarna:

- Avståndet mellan stockarna (packningsgrad, fastvolymprocent)
- Stockarnas diameter
- Stockarnas fukthalt
- Antalet lager (rader) med stockar

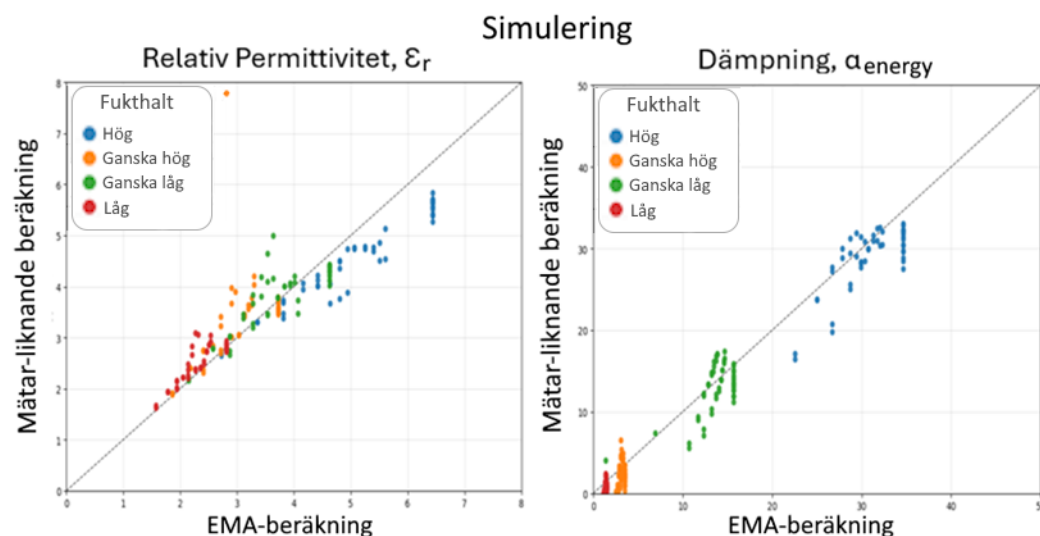
För att utvärdera hypotesen att en den relativt låga mittfrekvensen 1,0 GHz (motsvarande våglängden 30 cm) gör mätningen känslig för variationer i stockarnas storlek och packning, gjordes även en simulering med mittfrekvensen 0,3 GHz (motsvarande våglängden 100 cm).

Simuleringen genomfördes med Python-paketet flaport/fdtd, som använder Yee Discretization för att lösa Maxwells ekvationer (laporte 2025). Med paketet går det att göra simuleringar i 3D, där stockarna approximeras som cylindrar, men i detta fall

bedömdes att det räckte att göra simuleringarna i 2D och approximera stockarna som tvärsnitt. För detaljerad beskrivning av metod, analys och resultat, se Bilaga 1.

Resultat

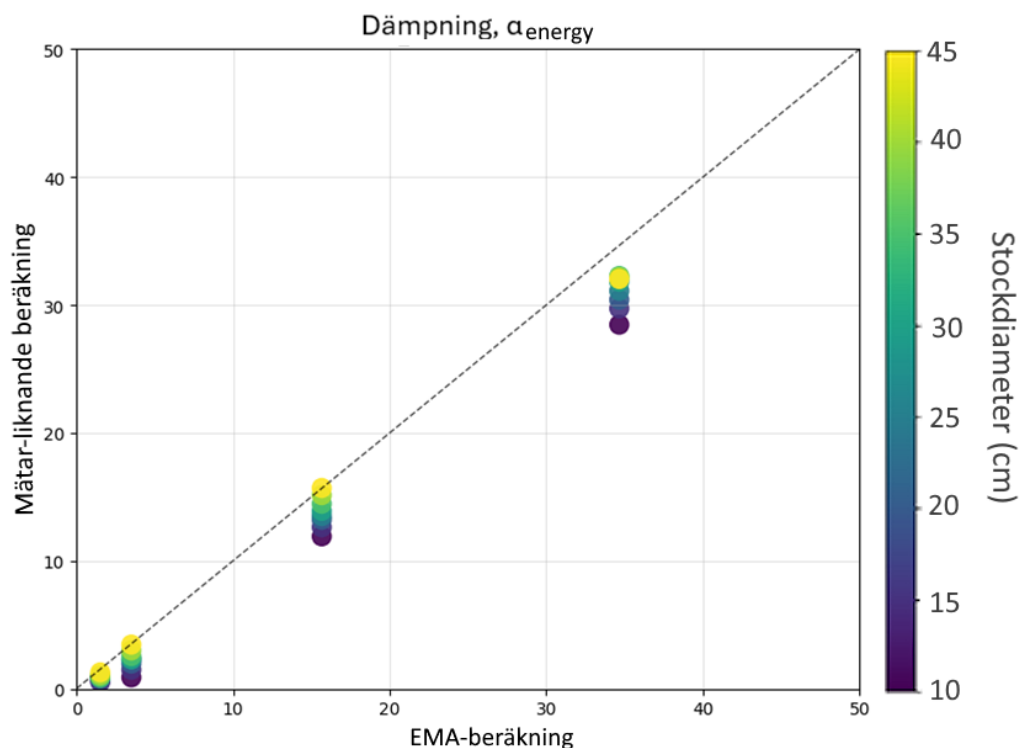
För att EMA ska vara en användbar analysmetod ska den ge ungefär samma värde som simuleringen, alternativt att det bör finnas ett linjärt samband mellan resultaten. I Figur 31 motsvaras det av att resultaten hamnar längs den diagonala linjen i diagrammet, alternativt på linje i dess närhet. I diagrammen nedan ses att både ϵ_r till vänster och dämpningen till höger ger en relativt god korrelation, om än med viss spridning kring diagonalen.



Figur 31. Vänster: simulerad relativ permittivitet (y-axel) mot värde beräknat via EMA (x-axel), Höger: simulerad dämpning (y-axel) jämfört med värde beräknat via EMA (x-axel).

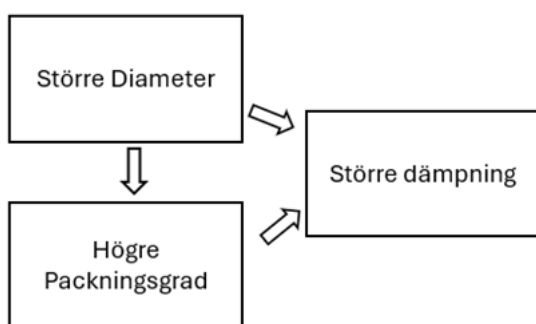
Den relativt goda korrelationen indikerar att en trave i relativt hög grad beter sig som ett effektivt medium. Spridningen runt diagonalen indikerar dock att traven inte perfekt kan approximeras som ett effektivt medium utan att, utöver packningsgraden, även stockarnas diameter, avstånd och antalet stockar, påverkar egenskaperna.

Under projektet har stockdiameterns inverkan diskuterats, och speciellt har en inverkan av diameter på dämpningen observerats. Med anledning av det, gjordes en serie simuleringar där endast fukthalt och diameter varierades. Resultatet (Figur 32) visar en systematisk inverkan där större diameter (gult) ger högre dämpning.



Figur 32. Uppmätt α_{energy} (dämpning, y-axel) mot effektiv α_{energy} (EMA, x-axel), färgkodat efter diameter.

Det har också konstaterats att större diameter och packningsgrad samverkar. Större diameter innebär i praktiken generellt en högre packningsgrad i travat rundvirke (Biometria 2025). Detta gör att travar med större diameter ökar signalens dämpning både direkt via den större diametern och indirekt via den högre packningsgraden för större diameterar (Figur 33).

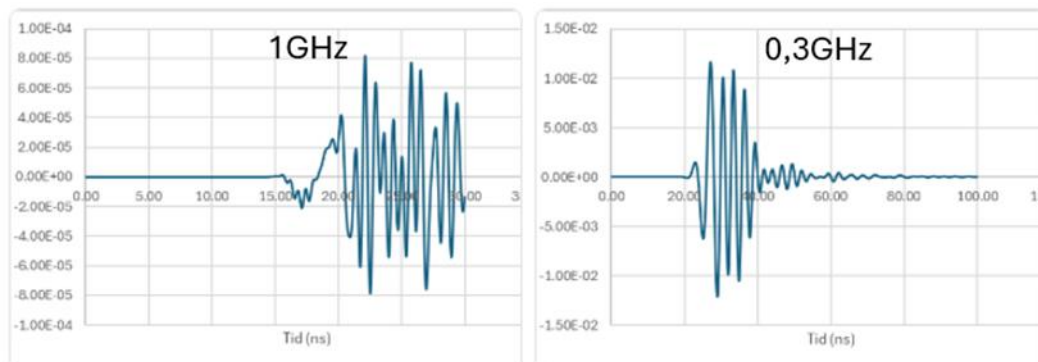


Figur 33. Samspelet mellan diameter och packningsgrad. Större diameter ger större dämpning, både direkt och indirekt.

Eftersom det finns ett samband mellan diameter och packningsgrad och båda påverkar mätsignalen på liknande sätt, verkar det rimligt att inkludering av metadata från antingen diameter eller packningsgrad kan öka noggrannheten vid fukthaltsmätning med mikrovågor.

Vid 1,0 GHz, som använts i projektet fås en relativt ”stökig” signal som kräver filtrering för att kunna analyseras (Figur 34). Vid simulering med 0,3 GHz blir signalen ren och

tydlig. Detta stämmer med teori och hypotes att vid 1,0 m våglängd ”syns” inte de enskilda stockarna tydligt, och signalen tar därför i stort bara en väg genom traven och traven kan mer ses som ett effektivt material. Detta till skillnad mot mätning med 0,3 m våglängd där flervägsutbredning skapar flera överlappande signaler vid mottagaren.



Figur 34. Simulerad mot mottagen signal. Vänster: 1 GHz, stökig signal. Höger: 0,3 GHz, klarare signal.

Diskussion

De genomförda simuleringarna kan beskrivas som relativt systematiska, exempelvis har staplingen varit i ett symmetriskt, hexagonalt mönster med lika stora stockar i varje simulering. Variationen i en verklig trave är därför rimligen större än i simuleringen. Om antalet stockar i mätningen varit mycket stort och variationerna slumpmässiga, verkar det troligt att inverkan på mätosäkerheten skulle bli liten. För en trave på rundvirkesbil är dock antalet stockar relativt litet och variationen inte slumpmässig. Potentiellt bidrar därför stockarnas variation och staplingen av dem med en signifikant osäkerhet i mätningen.

Resonemang och simuleringar indikerar att en lägre frekvens och med det större våglängd blir mindre känslig för travens invändiga geometri, ger en bättre signal och potentiellt en robustare mätning.

Gemensam diskussion, delstudie B

Funktionsmässigt har projektets experiment visat att det går utmärkt att mäta travat rundvirke på exempelvis en rundvirkesbil med mikrovågsteknik. Mikrovågorna går igenom alla kombinationer av träslag, fukthalter och dimensioner, temperaturer och fasttillstånd (fruset/ofruset) som har undersökts. Signalen reagerar tydligt på fukthalten, så grundläggande förutsättningar för mikrovågsbaserad mätning av fukthalt finns.

Genomförda experiment och analyser har också visat att travat rundvirke har egenskaper där travens interna geometri i form av bland annat stockarnas diameter, packningstäthet och orientering påverkar mätningen. Detta innebär att travens egenskaper avviker signifikant från approximationen av ett effektivt medium.

Frusna stockar beter sig mättekniskt liknande som icke frusna stockar med mycket lägre fukthalt. Genom analys av mätsignalen går det till viss del att automatiskt klassificera uppmätta travar som frusen eller icke frusen ved och använda den informationen för att möjliggöra fukthaltsmätning oavsett travens temperatur. Att bara använda mätningens egenskaper verkar dock inte ge tillräcklig säkerhet i klassificeringen. Kombinationen av analys av mätsignalen och metadata, exempelvis grov uppskattning av fukthalt och

temperatur, för traven skulle troligen möjliggöra god klassificering, då klassnings-svårigheten är som störst när det gäller att skilja torr ved från frusen ved. Exempelvis fås likande mätresultat för frusen ved med ~50 procent fukthalt och torr ved med fukthalt ~20 procent.

För temperaturer kring fryspunkten behövs ytterligare mätningar för att klargöra signalens beteende. Sådana mätningar skulle kunna genomföras genom att kontinuerligt mäta en trave med fruset virke som får tina långsamt i ett garage, med temperatur-sensorer som läggs inne i traven under lastning.

Delstudie C – utveckling av metod för fukthaltsmätning på travat rundvirke och flis på lastbil

Mål

Målet för delstudie C var att, baserat på kunskapen från delstudie A och B, ta fram en modell för sambandet mellan uppmätt mikrovågssignal och travfukthalt genom upprepade mätningar. En förutsättning för detta var framtagningen av en effektiv referensmetod för fukthaltsmätning av rundvirke.

Utveckling av andra generationens mätenhet

Första generationens mätare

I ett tidigare projekt utfördes mätningar på sönderdelat skogsbaserat trädbränsle på lastbil i syfte att bestämma bränslets fukthalt. Mätningen utfördes med Radarbolagets mikrovågsbaserade utrustning, vilken mäter förändring av mikrovågornas egenskaper när de passerar igenom lasset på lastbilen. För projektet och baserat på erfarenheterna från tidigare projekt togs en uppdaterad version, generation 2, av mätutrustningen fram för mätning på lastbil av både travat rundvirke och sönderdelat träflis.

Senaste generationens mätelektronik

För att förbättra mätutrustningens noggrannhet jämfört med tidigare försök, använder Radarbolagets nya generation elektronik av typen DiRP 1.3 (Figur 35). Vanligtvis används en DiRP-enhet (Digital Radar Processor) för att skicka, ta emot och utföra signalbehandling under mätning. Men för att minimera dämpningar från långa kablar och störningar från att ha sändaren på samma enhet som mottagaren, användes en DiRP-enhet på varje sida. Enheterna kommunicerar med varandra via fiber för att utföra mätning och analys.



Figur 35 . Foto på DiRP-enhet (Digital Radar Processor). Foto: Radarbolaget.

Uppdaterad mjukvara

Baserat på tidigare egen erfarenhet och exempelvis Torgovnikov (1993), minskar dämpningen i trämaterial med frekvensen. För att öka signalstyrkan på mottagarsidan bestämdes att en lägre frekvens, 1 GHz, än tidigare skulle användas för mätningen, vilket medförde att mjukvaran behövde skrivas om för att möjliggöra användning av en lågfrekvent och bredbandig signal.

Transversell rörelse

För att ytterligare öka signalstyrkan och minimera störningar från signaler som smiter runt traven konstruerades och tillverkades en ställning där antennerna kan skjutas transversellt manuellt så att de kommer så nära traven som möjligt (Figur 36).

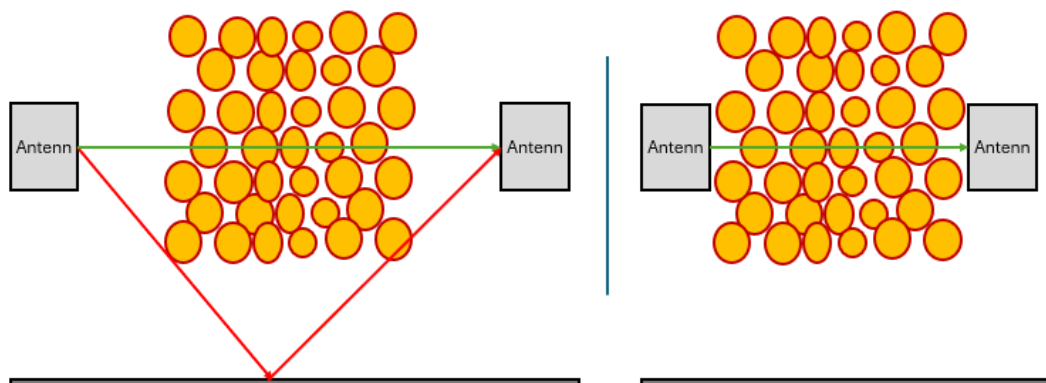


Figur 36. Vänster: antenn i viloläge. Höger: antenn transversellt utskjuten. Foton: Radarbolaget.

Rörliga antenner ger flera fördelar mot fasta antenner, då fasta antenner måste sitta så långt ifrån varandra att en lastbil med backspeglar säkert kan passera utrustningen:

- Mätavståndet blir mindre, vilket ger en starkare signal då signalstyrkan minskar approximativt med kvadraten på avståndet.
- Signalstyrkan som går in i traven ökar, i stället för att reflekteras.
- Mikro vågor som smiter runt traven, exempelvis under traven med hjälp av reflex i golvet, och skapar icke önskvärda signaler för mottagaren minimeras.

Skillnaden illustreras i Figur 37.



Figur 37. Vänster: gap mellan antenner och trave. Höger: antenner ligger dikt an mot trave.

Artificiella Neurala Nätverk (ANN)

Tidigare versioner av mätutrustningen har använt en så kallad överräkningsmodell bestående av ett polynom som översätter signalens förändring till fukthalt. Polynomet anpassades med hjälp av linjär regression för att skapa en modell mellan egenskaperna i mätsignalen och fukthalten. Artificiella Neurala Nätverk (ANN) är en kraftfull metod för att modellera komplexa och icke-linjära samband och relationer mellan ingående data. ANN behöver dock stora mängder data för att tränas till bra resultat, men är även vid mindre datamängder ett bra verktyg för analys. För att möjliggöra användning av ANN gjordes betydande förändringar av både utvecklingsmiljön som används off-line och konfigurationen av datorn som används i realtid i mätutrustningen. Under projektet användes både regressionsanalys och ANN för att skapa modeller.

Material och metod för fukthaltsmätning på rundvirkesbil

Mätutrustningen monterades först i Radarbolagets lokaler. En rundvirkesbil backades in och mätningar utfördes på två till fem positioner längs med lastbilen (Figur 38). Totalt mättes 17 rundvirkesbilar, som transporterade en blandning av gran och tall. Senare genomfördes även tre ytterligare lastbilmätningar på Johannes biokraftvärmeverk (Gävle Energi).

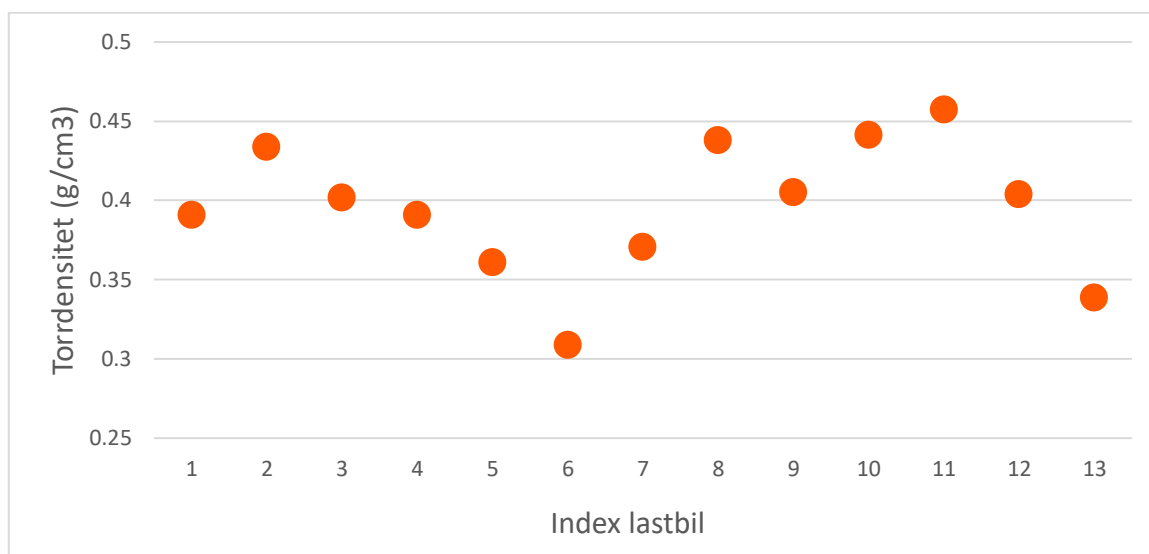


Figur 38. Fukthaltsmätning i Radarbolagets labb. Foton: Radarbolaget.

Trissor med en längd av ca 10 cm kapades av vid ändarna på nio slumpvis utvalda stockar i traven. Trissorna mättes och vägdes, torkades i ugn och vägdes igen. Från den råa och torkade vikten beräknades trissornas fukthalt och deras medelvärde fick representera travens genomsnittliga fukthalt.

För de rundvirkesklass som mättes hos Radarbolaget beräknades trissornas torrdensitet. Det är känt att densitet har en betydande inverkan på dielektriska egenskaper (Torgovnikov 1993, Hyll 2024). Efter torkningen mättes trissornas omkrets med måttband och höjden med skjutmått. Från dessa räknades cylindervolymen ut. Till följd av ojämn kapning var mätningen av höjd förknippad med viss osäkerhet. Tillsammans med den tidigare mätta torrvikten beräknades trissornas densitet (g/cm^3), se Figur 39.

Den uppmätta torrdensiteten var relativt jämn, vilket förklaras av att sortimentet var barr och att tall och gran har närliggande densitet.



Figur 39. Uppmätt torrdensitet hos lassen av barrmassaved med temperatur över 3 °C, baserat på medelvärdet av trissorna från varje lass.

Efter mätning fotades varje traves ändyta. Utifrån bilden räknades antalet stockar längs en linje i bildperspektivets mitt, vilket gav ett mått på stockarnas diameter. Omkretsen på trissorna mättes och gav ytterligare ett mått på diametern. Information om sortimentet noterades. Även temperaturen på stockarna mättes med en infraröd termometer. Försök gjordes även att analysera packningsgraden via bildanalys (Figur 38), vilket verkar lovande, men kräver bilder med bättre perspektiv och belysning vid bildtagning.



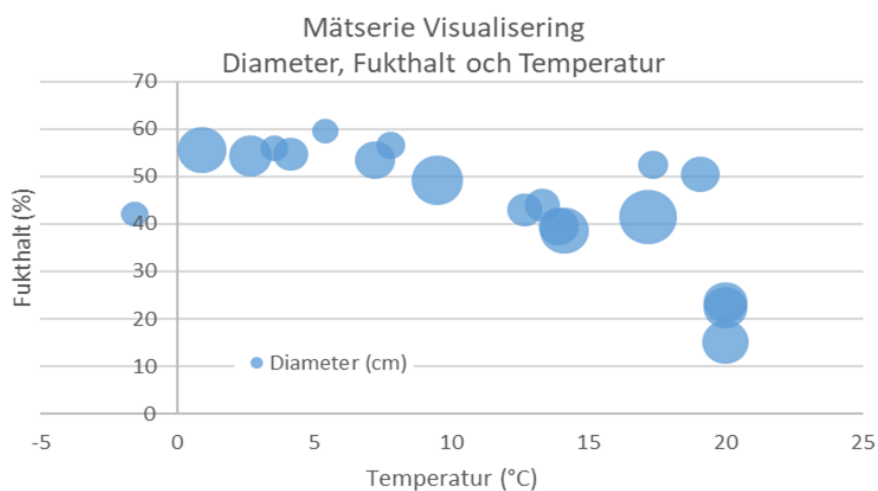
Figur 40. Vänster: bildanalys av packningsgrad. Höger: räkning av antal stockar mitt i bildens perspektiv. Foton: Radarbolaget.

Totalt 20 lastbilar mättes, varav 14 bestod av barrmassaved, tre av lövmassaved, två av barrbränsleved och en av lövbränsleved (Tabell 4).

Tabell 4. Tabell över mät- och metadata för mätningarna på rundvirkesbil. RB: Radarbolaget. JK: Johannes Biokraftvärmeverk. BMV: barrmassaved. LMV: lövmassaved. BBV: barrbränsleved. LBV: lövbränsleved.

Index lastbil	Mät-plats	Sortiment	Antal mät-positioner	Antal referens-stockar	Temp. (°C)	Medel-diameter (m)	Referens-fukthalt (%)	Torr-densitet (g/cm ³)
1	RB	BMV	4	8	-	-	43,8	-
2	RB	BMV	3	8	0,9	0,18	55,6	0,39
3	RB	BMV	5	12	4,1	0,13	54,7	0,43
4	RB	BMV	4	9	2,7	0,16	54,3	0,40
5	RB	BMV	4	14	14,1	0,18	38,7	0,39
6	RB	BMV	5	16	13,9	0,15	39,5	0,36
7	RB	BMV	5	16	17,4	0,11	52,6	0,31
8	RB	BMV	4	14	19,1	0,14	50,5	0,37
9	RB	BMV	5	6	17,2	0,21	41,5	0,44
10	RB	BMV	5	10	9,5	0,19	49,2	0,40
11	RB	BMV	5	8	7,2	0,15	53,5	0,44
12	RB	BMV	5	13	7,8	0,11	56,6	0,46
13	RB	LMV	5	13	12,7	0,13	42,9	0,70
14	RB	LMV	5	14	13,3	0,13	43,9	-
15	RB	BMV	5	13	3,5	0,1	56,0	0,40
16	RB	BMV	5	14	5,4	0,1	59,6	0,34
17	RB	LMV	4	15	-1,6	0,1	42,1	-
18	JK	LBV	2	13	20	0,16	22,4	-
19	JK	BBV	3	11	20	0,16	23,5	-
20	JK	BBV	3	10	20	0,17	15,2	-

Data från tabellen visualiseras i Figur 41, som visar på kombinationerna av stockarnas medeldiameter, referensfukthalt och temperatur för varje rundvirkesbil.



Figur 41. Mätserie över travarnas medeldiameter, referensfukthalt och temperatur. Storleken på ringarna visar medeldiameter, referensdiameter 1 cm syns nere till vänster i diagrammet.

Under mätserien noterades att mikrovågssignalen kom igenom traven på alla rundvirkesbilar som mättes, vilket var en grundförutsättning för vidare analys. Det noterades också att den transmittade signalen upplevdes som svagare vid mätning på travar med rundvirke av större diameter.

Metodik för modellframtagning

Introduktion

Generellt, genom att samköra egenskaper från mätsignalen med fukthalten från referensmätning skapas en överräkningsmodell, eller bara modell, som översätter mätsignalen till fukthalt. När mätsignalen går igenom traven påverkas bland annat tiden det tar för signalen att gå från sändare till mottagare och amplituden på signalen som når mottagaren jämfört med om signalen bara går igenom luft. Överräkningsmodellen kan skapas på olika sätt, och är i sin enklaste form en anpassad linjär funktion mellan signalens tidsfördröjning, eller dämpning, och travens fukthalt. Med mer komplexa funktioner, alternativt användning av Artificiella Neurala Nätverk, kan komplexa samband och flera in-parametrar öka noggrannheten på överräkningsmodellen och med det noggrannheten i mätningen.

För mätserien på rundvirkesbilar skapades och utvärderades ett antal olika typer av modeller kombinerat med avancerad signalbehandling i stort, enligt Figur 42. Erfarenheterna från delstudie B visar att olika modeller behövs för frusna och ofrusna stockar. För att inte blanda frusna och icke frusna stockar i samma modell sorterades mätningar med lägre temperatur än 3 °C bort (3 st). Den första lastbilen exkluderades också, då borrhning användes för referensfukthaltstagnung i stället för trissor och temperatur och diameter registrerades inte. I detta projekt kunde inte ett tillräckligt stort antal mätningar göras på frusna travar för att ge nog med data till utvecklingen av en separat modell.



Figur 42. Process för framtagning av överräkningsmodell som översätter mätsignalen till fukthalt.

Signalbehandling

Med hjälp av signalbehandling beräknades de tre dielektriska nyckeltalen ϵ_r , α_{energy} och α_{f0} . Parametrarna beskrivs närmare i Delrapport B medan signalbehandlingen beskrivs närmare i Bilaga 1.

Modeller

Ett antal modeller utvärderades för att se vilka kombinationer som gav bäst anpassning mellan av modellen beräknad fukthalt och referensfukthalten (Tabell 5). Modellerna för fukthalten (FH) var av första graden:

$$FH_{mätt} = b_0 + \sum (b_i \cdot feature_i) \quad [\text{Ekv. 1}]$$

där b_0 är den konstant som beskriver kurvans skärningspunkt och b_i är en feature-beroende koefficient.

Tabell 5. Kurvanpassningar med olika kombinationer av parametrar och utvärderingsmått vid jämförelse mot uppmätt fukthalt.

Nr	Modell (feature_i)	n	R2	RMSE
1	$\epsilon_r + \alpha_{f0} +$ Diameter + Temperatur + Densitet	71	0,88	3,96
2	$\epsilon_r + \alpha_{f0} +$ Diameter + Temperatur	71	0,88	3,98
3	$\alpha_{f0} +$ Diameter + Temperatur	71	0,86	4,19
4	$\epsilon_r + \alpha_{\text{energy}} +$ Diameter + Temperatur	71	0,83	4,65
5	$\epsilon_r + \alpha_{f0} +$ Diameter	71	0,82	4,79
6	$\alpha_{f0} +$ Temperatur	71	0,80	5,07
7	$\alpha_{f0} +$ Diameter	71	0,80	5,12
8	$\alpha_{\text{energy}} +$ Diameter + Temperatur	71	0,79	5,23
9	$\epsilon_r + \alpha_{\text{energy}} +$ Diameter	71	0,78	5,24
10	$\alpha_{\text{energy}} +$ Diameter	71	0,71	6,03
11	$\epsilon_r + \alpha_{f0} +$ antal stockar	71	0,68	6,41
12	$\alpha_{f0} +$ antal stockar	71	0,64	6,81
13	$\alpha_{\text{energy}} +$ Temperatur	71	0,61	7,05
14	$\epsilon_r + \alpha_{\text{energy}} +$ antal stockar	71	0,52	7,79
15	$\alpha_{\text{energy}} +$ antal stockar	71	0,42	8,62

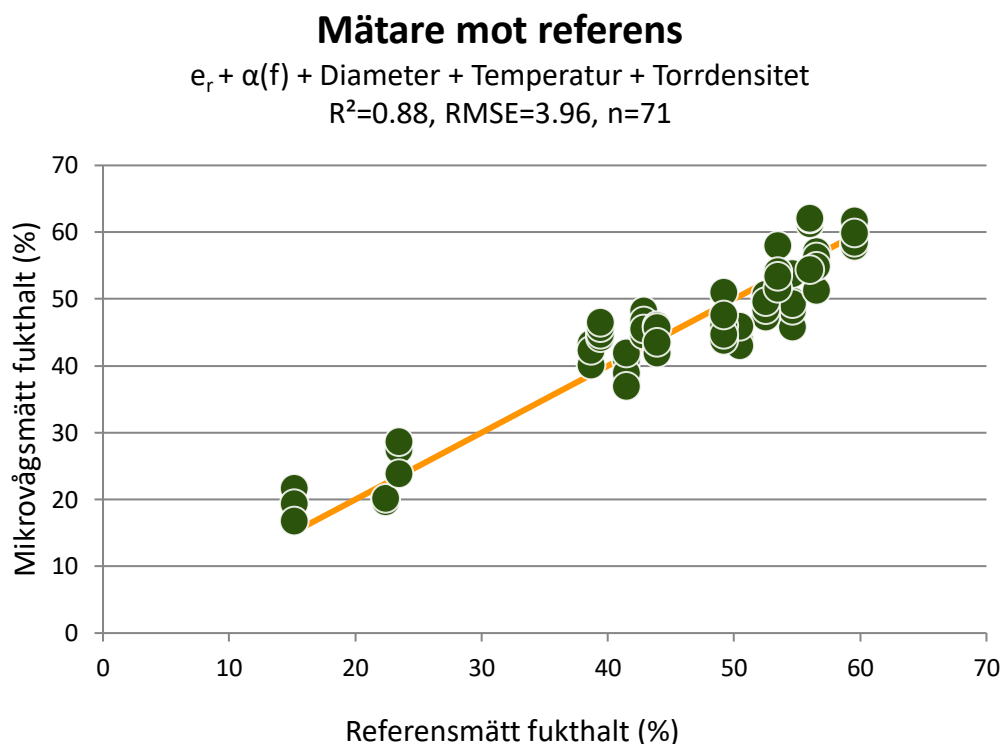
Resultat

Bäst anpassning gav modell #1 i tabellen, med indata från relativ permittivitet, dämpning, diameter, torrdensitet och temperatur (se även Ekvation A1, Bilaga 1). Denna gav en avvikelse i fukthalten mätt som RMSE (Root Mean Square Error) på 4,0 procentenheter. Värt att notera är att avvikelsen beror både på osäkerhet i mätaren (mätfel och modellfel) och på fel i referensfukthalten från trissorna.

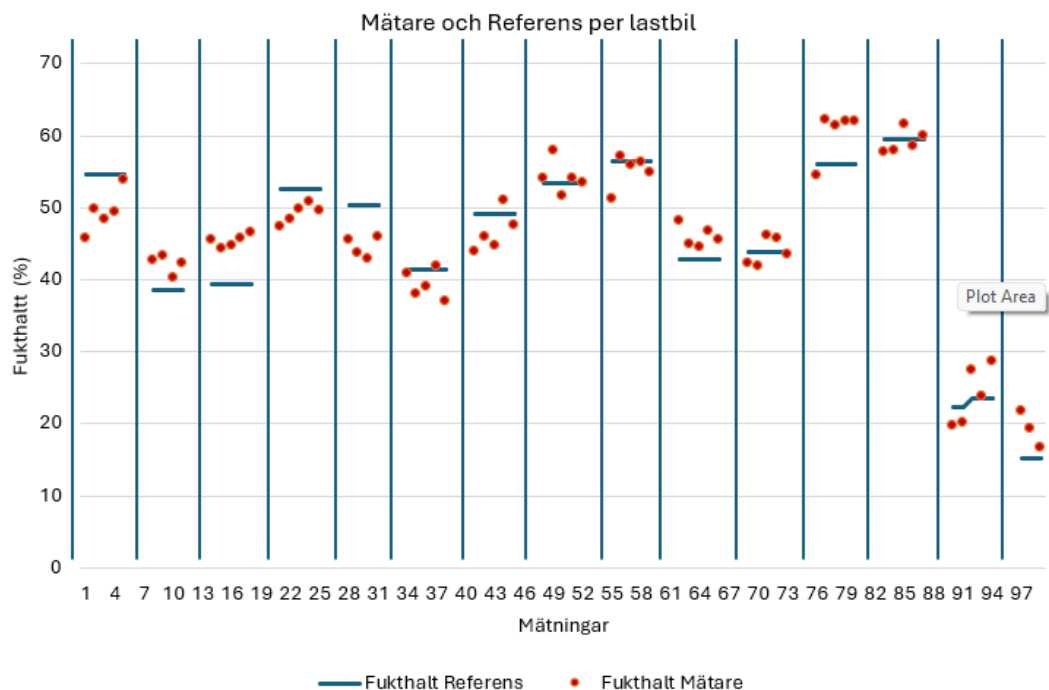
Att indata från relativ permittivitet, dämpning, diameter och temperatur gav bäst resultat, stämmer med resultaten från delstudie B:

- Relativ permittivitet och dämpning: dessa parametrar är grundläggande för mikrovågsbaserad mätning av fukthalten i virke
- Stockdiameter (grovlek): från observationer, resonemang och simuleringar redovisade i delstudie B påverkas signalen av stockarnas diameter
- Temperatur: från mät försök i klimatkammare redovisade i delstudie B konstaterades en tydlig påverkan på signalen av temperaturen

I Figur 43 och Figur 44 visas mätningarna från de 16 rundvirkesbilar som användes till modellen där fukthalten från modell #1 ställs mot referensfukthalten.



Figur 43. Fukthalt baserad på mikrovågs-mätning (y-axel) mot referensfukthalt (x-axel). Den orangea linjen är översättningsmodell #1. De gröna cirlarna representerar mätpunkter.



Figur 44. Fukthalt på rundvirkestransporter enligt mikrovägs-mätning (modell #1, blåa horisontella streck) och fukthalt från referens (trissor).

Värt att notera är att modell #1 utöver mikrovågsutrustningen också utnyttjar metadata i form av genomsnittsdiameter för stockarna, torrdensiteten och travens temperatur. I en industriell användning kan temperaturen mätas automatiskt relativt enkelt. Torrdensitet kan modelleras via skördardata eller så kan schablonvärden baserat på sortimentet användas. Vid en del befintliga mätstationer sker även mätning av stockarnas diameter på annat sätt, exempelvis med bildbaserad fjärrmätning eller manuell inmätning.

Noterbart är att inverkan av torrdensiteten är låg – förbättringen i RMSE är liten jämfört med modell #2, som inte nyttjar densiteten. Detta kan dock förklaras av att de lass som densiteten mättes för hade relativt homogen torrdensitet. Vidare är det noterbart att det endast blir 1,2 procentenheter sämre RMSE om även medelstockdiametern exkluderas ur modellen, vilket görs i modell #5. Beroende på vilka sortiment som mäts in vid den aktuella mätplatsen samt behovet av mätnoggrannhet går det alltså att förenkla metadataanvändningen.

Diskussion

Försöken i projektet att mäta fukthalten på rundvirkesbilar har bekräftat att det går bra att skicka en bredbandig signal med mikrovågor igenom traven, att ta emot signalen på andra sidan och att analysera travens påverkan på signalen. Det är värt att notera de logistiska utmaningarna i att få tag på travar med olika medelfukthalter, något som behövdes för att utveckla en representativ översättningsmodell. Exempelvis hade inga travar medelfukthalter mellan 30 och 40 procent. Samarbetet med energi- och skogsbolagen i projektet har varit viktigt för att få rundvirkesbilar att avvika från sin ordinarie rutt och stanna till för mikrovägs-mätning och trissprovtagning hos Radarbolaget.

Analys och resultat visar att det går att skapa en modell som ger en förhållandevis bra beräkning av fukthalten för ofruset virke, speciellt om stockarnas temperatur och diameter tas med i beräkningen. För processtyrning indikerar en tidigare systemanalys att en noggrannhet i uppmätt fukthalt på ± 5 procentenheter anses godtagbart för branschen (Hyll & Eriksson 2022). För vederlagsgrundande mätning skulle noggrannheten sannolikt behöva vara högre. Kravet på noggrannhet för ugnsmetoden, som används för handel med flis i torrsvikt, är ± 2 procentenheter i systematisk avvikelse och ± 1 procentenhet i slumpmässig avvikelse (Biometria 2024). Det bör dock tas i beaktan att den av projektet framtagna metoden ger ett medelvärde för en stor del av traven, och därmed kan betraktas som en form av travmätning. Vid travmätning tolereras vanligen något högre mätosäkerhet. För travmätning av stockars fastvolym under bark är kravet på noggrannhet i den systematiska avvikelsen 6–9 procent av den uppmätta volymen.

Det verkar rimligt att anta att med vidareutveckling och förbättrad metodik skulle en mer noggrann mätare kunna åstadkommas. Möjliga förbättringar är till exempel:

- Automatisk temperaturmätning med IR-mätare
- Automatiserad diamettermätning med kamera
- Automatiserad mätning av packningstäthet
- Lägre frekvens på mätsignalen
- Medelvärdesbildning från flera mätningar per trave eller lastbil
- Förbättrad provtagning av referensfukthalt
- Större mätserie med fler rundvirkesbilar
- Packningsgrad som parameter i översättningsmodellen
- Sortiment som parameter i översättningsmodellen, då barr och löv generellt har olika materialdensitet.

Antalet rundvirkesbilar med frusna och halvfrusna stockar i mätserien var för litet för meningsfull analys. Med en mätserie också för frusna och halvfrusna stockar, kan en modell även för dessa fall tas fram och utvärderas.

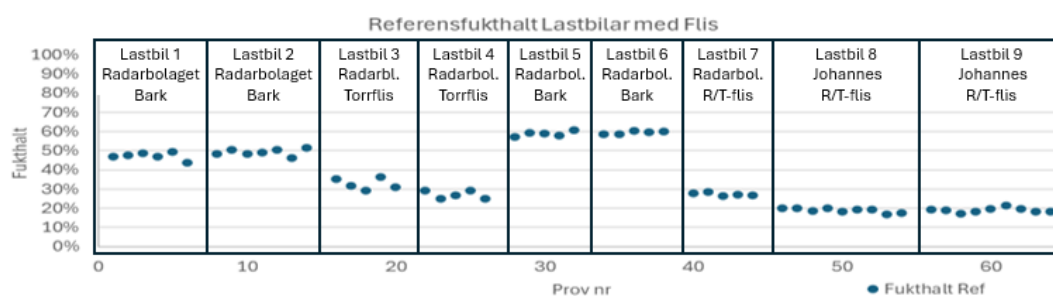
Material och metod för fukthaltsmätning av flis på lastbil

I en serie tidigare projekt utvecklades Radarbolagets generation 1-mätare avsedd för mätning av flisskåpor på lastbil (Ottosson m.fl. 2016, Ottosson & Andersson 2017, Ottosson m.fl. 2022). För att vidareutveckla och utvärdera fukthaltsmätning på lastbilar med flis med generation 2-mätaren utfördes mätningar vid tre tillfällen. Fotografier från en av mätningarna visas i Figur 45. Fyra av mätningarna gjordes på bark, två på torrflis, och tre på returträflis (R/T-flis).



Figur 45. Vänster: Fotografi av flisbil under mätning. Höger: närbild på mäthuset och dess skyddsplåtar när den ligger dikt an mot skäppan. Foton: Radarbolaget.

Vid första tillfället mättes flisbil #1 och #2 med mätaren på Radarbolaget, vid andra tillfället mättes flisbil #3–7 på Radarbolaget och vid tredje tillfället mättes flisbil/ekipage #8 och #9 på Johannes Biokraftvärmeverk. Efter mätningen tippades flisen ut på Johannes Biokraftvärmeverks bränslegård, varefter ett antal flisprover samlades in och en referensfukthalt beräknades med hjälp av ugnsmetoden. Referensfukthalterna visas i Figur 46.

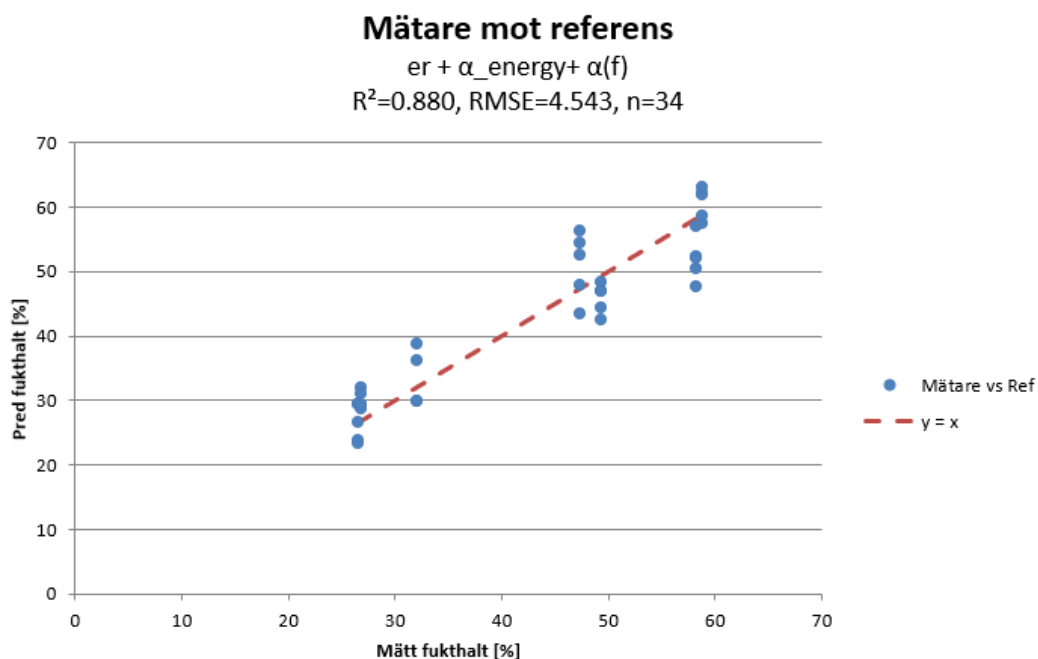


Figur 46. Referensfukthalt samt sortiment vid mätningarna av flisskåpor (flislastbilar).

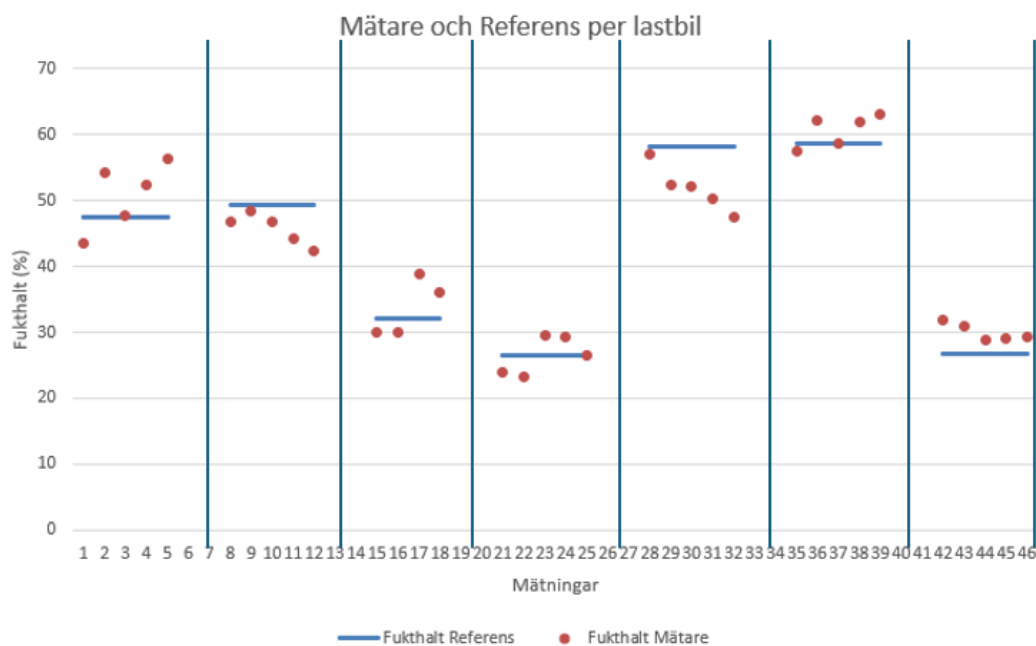
Resultat och diskussion för fukthaltsmätning av flis på lastbil

För samtliga flisbilar gick det bra att skicka signalen igenom flislasset.

En modell som översätter signalen från flisbilsmätningen till fukthalt togs fram baserad på mätningar gjorda på de sju första flisbilarna. Korrelationen mellan mätarens fukthalt och referensfukthalten från proverna var relativt god, med en avvikelse mätt som RMSE på 3,3 procentenheter (Figur 47 och Figur 48, se även Bilaga 1). Det felet innehåller, som alltid, bidrag både från mätare och referens.



Figur 47. Fukthalt baserad på mikrovågsmätning (y-axel) mot referensfukthalt (x-axel) för flisbilar. Den streckade linjen är översättningsmodellen. De blå cirkarna representerar mätpunkter. Notera att för varje mikrovågsmätt fukthalt finns ett flertal referensmätta flisprover från olika positioner i skäppan.



Figur 48. Fukthalt enligt mikrovågsmätning med modell 1 och fukthalt från referens (flisprover).

Vid analysen av mätningarna på flisbil som gjordes i projektet noterades några punkter värda att ha i åtanke för kommande arbeten:

- Flisbilar ger ett relativt väldefinierat mätavstånd, avståndet mellan lastbilens sidor. Det noterades dock att sidorna buktar ut en del på mitten av lasset när lastbilen är välfylld, vilket ger variation beroende på var längs skåpet mätningen görs.
- För rundvirke noterades temperaturberoende i mätningen. För flisen mättes ej temperaturen, så den har inte kunnat användas i modellen.
- Sortimentet varierar betydligt, mellan exempelvis bark, returträ och stamflis. Olika sortiment har erfarenhetsmässigt lite olika dielektriska egenskaper. Eftersom sortimenten normalt är kända vid transport, är det tänkbart att använda sortimentsinformation i framtida modeller för ökad noggrannhet.

Mikrovågsbaserad fukthaltsmätning på flisbilar är möjlig och resultaten från projektet visar att noggrannheten är i samma storleksordning som manuella mätmetoder med ugnsmetoden.

Då mätning på travat rundvirke hade ett större fokus under projektet, synes flera lågt hängande frukter finnas vad gäller förbättringar i prestanda för mätning på flis. Mätningar på frusen och halvfrusen flis med generation 2-mätaren bör också genomföras.

Delstudie D – demonstration vid industri

Introduktion

Den utvecklade mätaren är avsedd att stå utomhus året om vid mottagningsplatsen vid en industri eller terminal. Tidsåtgången och hanteringen behöver vara så enkel och effektiv att den inte stör det logistiska flödet. Det effektivaste sättet att säkerställa att utrustningen klarar produktionsmässig användning är en demonstrationsinstallation.

Mål

- Installation och demonstration vid industri (produktionsmässiga förhållanden)
- Valideringsmätningar på rundvirkesbilar med den nya prototypmätaren
- Utveckla digital molntjänst och applikation i mobil för automatiserad och digital mättningsprocess
- Utvärdera harmonisering med befintliga standarder inom radioområdet (ETSI) och för fukthaltsmätning (Biometria)

Material och metod

Utveckling av generation 3-mätaren

I ett tidigare projekt utfördes mätningar på sönderdelat skogsbaserat träddränsle på lastbil i syfte att bestämma bränslets fukthalt. Mätningen utfördes med Radarbolagets mikrovågsbaserade generation 1-mätare, vilken mäter förändring av mikrovågornas egenskaper när de passerar igenom lasten på lastbilen. Inom nuvarande projekt utvecklades generation 2 för mätning i labbmiljö, vilken beskrivs tidigare i rapporten under delstudie C.

För implementation av mättekniken i industriell miljö vidareutvecklades utrustningen till generation 3. Förändringarna innebär framför allt att motorisera den transversella rörelsen som flyttar antennerna mot lastbilen inför mätningen. En saxbaserad ställning konstruerades, tillverkades, programmerades och driftsattes. Saxen förbereddes med exempelvis ändlägesbrytare, säkerhetsfunktioner och möjlighet att startas på signal från mätutrustningen så att hela mätcykeln kan utföras automatiskt efter att exempelvis lastbilsföraren trycker på en starta-mätning-knapp.



Figur 49. Saxmekanik med och utan skyddsplåtar. Foton: Radarbolaget.

Installation

Mätutrustningen med tillhörande saxmekanik och ställning monterades på Johannes Biokraftvärmeverk i anslutning till vågen som används för in- och utvägning av lastbilsleveranser (Figur 50).



Figur 50. Mätare installerade vid vågen på Johannes biokraftvärmeverk. Foto: Radarbolaget.

Metod, demonstration, mätningar

Mätningar av både lastbil med skäppa och rundvirkesbil utfördes på plats, både för att demonstrera mätarens funktion i relevant industriell miljö och för att samla in ytterligare data för utvecklingen av mätaren. Fotografier från mätningarna visas i Figur 51.



Figur 51. Vänster: mätning på flisbil med skäppor. Höger: mätning på rundvirkesbil. Foton: Radarbolaget.

Efter varje genomförd mätning togs referensprover från rundvirkesbilen. För lastbilar med flis tippades flisen ut på bränslegården varefter prover togs, sex stycken för lastbilen och nio stycken för släpet, vilka ugnstorkades och fukthalt beräknades. För rundvirkesbilen kapades nio trissor som ugnstorkades och fukthalten beräknades.

Resultat

Resultaten visar på att utrustningen både tål den industriella miljön och fungerar som avsett för att mäta fukthalt i både travat rundvirke och träflis. Mätresultat från labb och industriell miljö passar in i samma modell, vilket styrker att mätningen fungerar väsentligt lika i den industriella miljön som på labb.

Tidsåtgången för en mätcykel där mätaren matas ut, mätningen utförs, och mätaren dras in, är ca idag ca tre minuter vid halvautomatiserad mätning. Utmatning och inmatning tar cirka 30 sekunder var, mätningen fem sekunder och resterande tid är ställtid. Resultatet kan sedan fås i stort sett momentant.

Diskussion

För att skapa en färdig produkt som kan lanseras på marknaden behöver produkten godkännas och certifieras. Nedan följer en översyn av vad det skulle innebära.

Biometrias typgodkännandeprocess

En central anledning till utvecklingen av mikrovågsbaserad mätutrustning för fukthaltsmätning är att använda mätresultaten i beräkningen av ersättning för levererat rundvirke eller sönderdelat skogsbränsle. Grunden för ersättningsberäkning finns i Virkesmätningsslagen, Lag (2014:1005) om virkesmätning. Biometria är den organisation som ansvarar för mätning inom stora delar av branschen och ansvarar även för typgodkännande av mätutrustning som ska användas för vederlagsmätning. I processen för att utfärda ett typgodkännande utgår Biometria normalt från en av cirka 25 stycken befintliga kontrollanvisningar för att bedöma att utrustningens mätnoggrannhet överensstämmer med virkesmätningsslagen. Utöver det finns ett antal funktionskrav.

Bedömningen idag är att det inte finns någon kontrollanvisning för att godkänna mätning med mikrovågor igenom stockar eller flis på en hel lastbil med utrustningen som används

i projektet. En ny kontrollanvisning skulle därför behöva tas fram. Huvudstegen i kontrollanvisningen skulle exempelvis kunna vara:

- Mätning med mikrovågsutrustningen på ett antal lastbilar med flis eller rundvirke
- Flisning av alla travar
- Referensprovtagning av flis med 12 påsar från hela leveransen
- Fukthaltsbestämning av referensproverna med ugnsmetod
- Jämförelse mellan fukthalt från mikrovågsutrustningen och referensproverna
- Analys relativt virkesmätningssystemen.

Utrustningen behöver bland annat också vara CE-märkt och kunna kommunicera med VIOL, Biometrias branschgemensamma system för virkesaffärer.

CE-märkning

För att få sälja utrustningen i Europa och för att få utrustningen typgodkänd av Biometria, behöver den vara CE-märkt.

Utrustningen i projektet är i stora delar samma som Radarbolagets fukthaltsmätare för flis på transportband, benämnd Velox CB, vilken redan är CE märkt. CE-märkning innebär ett omfattande arbete med testning och dokumentation. Tack vare likheten med Velox CB, där arbetet redan är gjort, kan sannolikt stora delar av arbetet och dokumentationen återanvändas.

ETSI, European Telecommunications Standards Institut

ETSI, är en icke vinstdrivande organisation som tar fram globalt tillämpliga standarder för informations- och kommunikationsteknik (IKT/ICT), inklusive fast, mobil, radio, konvergerad teknik, sändningsteknik och internetteknik. Eftersom mätutrustningen utsänder elektromagnetiska vågor, behöver utrustningen godkännas så att utsänd strålning ligger inom tillåtna gränser i tillämplig standard. Utrustningen i projektet är i stora delar samma som Radarbolagets fukthaltsmätare för transportband, benämnd Velox CB, vilken är godkänd i den applikationen. För det godkännandet användes ETSI standard för markradar, vilken främst består i att med kalibrerad utrustning mäta utsänd effekt i olika frekvensband.

Molntjänst

I projektet analyserades möjligheten att utveckla en molntjänst med tillhörande mobilapp för att tillgängliggöra mätdata från fukthaltsmätningen. Under projektet beslutades det dock att inte genomföra den aktiviteten av två huvudsakliga skäl:

- Kraftigt ökat fokus på IT-säkerhet på Gävle Energi - Kraftvärme så väl som de flesta liknande industrier gör det svårt att implementera dataöverföring som möjliggör molnlösningar och access via app. Svårigheten gör också att intresset för den typen av lösningar minskat kraftigt i industrin.
- Eftersom avsikten är att mätdata från fukthaltsmätningen ska exporteras till befintliga IT-system och datalager, såsom Viol 3, ansågs dessa befintliga system som redan har mer komplett information om leveranserna vara en lämpligare källa för data till moln och applösningar.

Mätning på flera positioner

Det finns inget som hindrar förutom tiden att mätningen görs på flera positioner i travens längd- eller höjddled. Om antennen positioneras närmare än ca 0,5 meter från kanten på traven kan ytterligare effekter börja påverka signalen. Eftersom signalens känslighetsradie är ca 0,5 m kommer luften som omger traven att bidra till mätningen när antennen närmar sig travkanten. Eftersom luft dämpar signalen mindre än virke kommer fukthalten att underskattas, såvida inte den mindre fastvolymprocenten kompenseras för i beräkningen. Vidare kan kanteffekter från stockarnas ändrar komma att påverka signalen. Om mätningen sker i mitten av traven kommer stockarna ur mätarens synvinkel att likna oändliga cylindrar. Om mätningen sker nära stockändarna kommer signalen att bete sig annorlunda där, vilket sannolikt introducerar mätosäkerhet (Redman m.fl. 2016).

Metoden har i dagsläget ingen möjlighet att skilja mellan delmängder av travar och kan därmed inte mäta fukthalt på delade travar.

Tillämpbarhet på enskilda stockar

På sågverk och massabruk finns ibland önskan att mäta fukthalt hos enskilda stockar, exempelvis för att bedöma deras färskhet. Tidigare vetenskapliga studier har visat att det är fysikaliskt möjligt (Duchesne m.fl. 2023) och signalbehandlingen skulle troligen vara signifikant enklare. En högre mikrovågsfrekvens (kortare våglängd) skulle troligen vara fördelaktig, då högre frekvens ger högre upplösning och noggrannhet i tidsdomänen. Drivkraften att använda låga frekvenser vid mätning på travad rundved för att signalen ska gå igenom en hel trave finns inte vid mätning av enskilda stockar. En identifierad, men bedömd hanterbar, utmaning är att blockera signalen som går runt stocken i stället för igenom den, alternativt separera den via signalbehandling.

Slutsatser

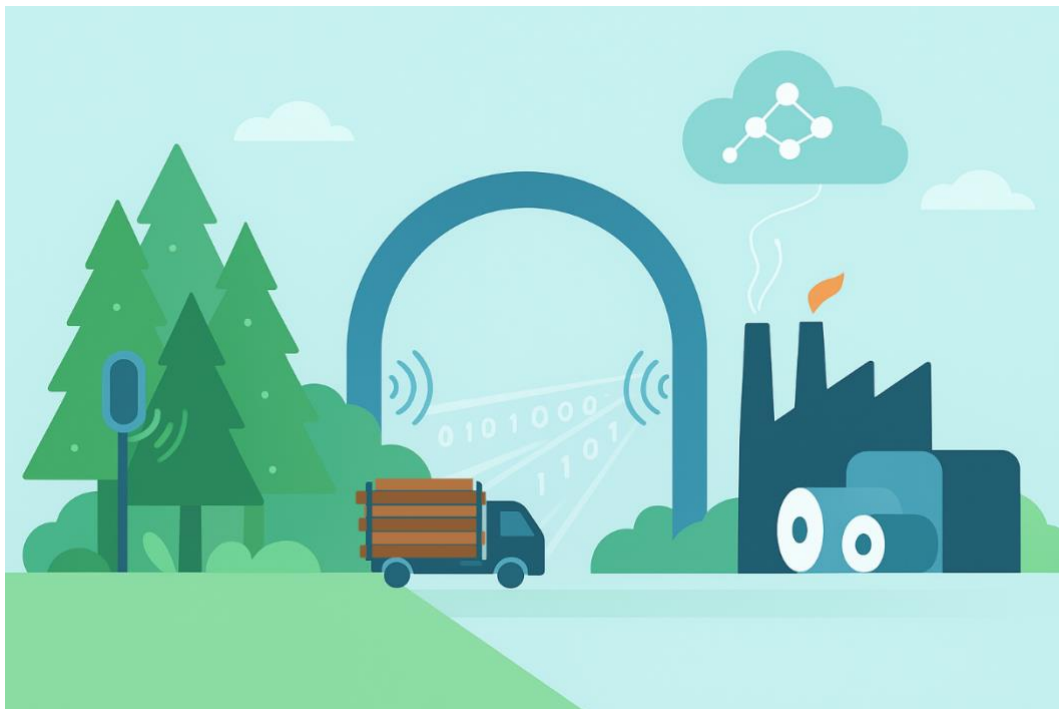
Installationen av mätare på Johannes biokraftvärmeverk och genomförda mätningar med densamma visar på att utrustningen både tål den industriella miljön och fungerar som avsett att mäta fukthalt i både travat rundvirke och träflis. Mätresultat från labb och industriell miljö passar in i samma modell, vilket styrker att mätningen fungerar väsentligt lika i den industriella miljön som på labb.

En begränsning för utrustningen är att, eftersom mikrovågorna inte går igenom metall, går det inte att använda mätaren för leveranser av träflis som lastats i stålcontainer.

Delstudie E – systemstudie över potentialen i fukthaltsmätning på travat rundvirke

Fukthalten i stockar – kan och vill vi veta den?

En mikrovågsbaserad teknik för snabb mätning av fukthalt i hela rundvirkesklass har utvecklats och testats. Men vad innebär tillgången till information i ett systemperspektiv (Figur 52)?



Figur 52. Illustration av en digital mät- och informationskedja. Illustration: genererad av ChatGPT4, därefter modifierad.

Fukthalt som kvalitetsparameter

Fukthalten i rundvirke är en avgörande kvalitetsparameter som påverkar både ekonomiska och operativa aspekter inom skogs- och biobaserad industri. För energived påverkar fukthalten energiinnehållet i bränslet, vilket i sin tur påverkar dess värde och effektivitet vid förbränning. Hög fukthalt innebär att onödigt vatten transporteras från skogen och att en större del av energin går åt till att avdunsta vattnet i stället för att generera värme, vilket minskar bränslets effektivitet. Därför är det viktigt att ha noggrann information om fukthalten för att säkerställa rätt betalning, optimera logistik och i senare skede optimera förbränningen. För massaved är fukthalten och färskheten också en viktig parameter, då den har stor påverkan på massaprocessen. Både ekonomin och kvaliteten på processen kan förbättras av en korrekt och snabb fukthaltsinformation.

Traditionella metoder för fukthaltsmätning

På energisidan har traditionellt fukthalten mätts genom ugnsvägning. Metoden innebär att stickprover tas från ett flisat biobränsle, vägs, torkas i en ugn i 24 timmar och vägs igen. Skillnaden i vikt före och efter torkning används för att beräkna fukthalten. Processen är noggrann men tidskrävande, vilket omöjliggör ett snabbt beslutsfattande. Dessutom krävs en del manuellt arbete. Den stora utmaningen är dock att få representativa prover, särskilt om trädbränslet är heterogent. NIR (Near-Infrared) spektroskopi används också. Metoden analyserar hur ljus absorberas och reflekteras. Vattenmolekyler har specifika absorptionsband i NIR-spektrumet, vilket gör det möjligt att kvantifiera fukthalten. Metoden är snabb vilket gör den idealisk för kontinuerlig övervakning och kvalitetskontroll. En svaghet är dock att den bara mäter på ytan, vilket kan vara ett problem för heterogena material.

Framtidens innovativa mätmetod

Mikrovågsbaserad fukthaltsmätning är en ny innovativ metod för att mäta fukthalt. Den har tidigare visat sig fungera bra för flisat material, och testas nu för rundvirke. Metoden använder bredbandiga mikrovågsantennor som placeras på båda sidor av ett rundvirkeslass eller trave. Mikrovågor sänds genom traven från en sändare till en mottagare, och dessa mikrovågor interagerar med vattnet i träet, vilket påverkar signalens styrka och hastighet. Genom att analysera förändringarna i mikrovågssignalen kan fukthalten bestämmas. Denna metod har potential att erbjuda snabb och noggrann mätning av fukthalten i realtid. Dessutom mäts en större del av materialet jämfört med stickprovsbaserade metoder.

Systemanalys som metod

För att beskriva värdet av snabbare och bättre fukthaltsinformation om rundvirke användes semi-strukturerade intervjuer. Både kundsidan, i form av massabruk, och leveranssidan, i form av skogsbolag, intervjuades. Syftet med intervjuerna som ligger till grund för systemanalysen var att sätta tekniken och lösningen i ett sammanhang för att se vad den skulle kunna innebära, på både kort och lång sikt utifrån de olika perspektiven.



Figur 53. Illustration av metodiken för systemstudien. Illustration: genererad av ChatGPT4, därefter modifierad.

Värdet av informationen

Information som erhålls genom mikrovågsbaserad fukthaltsmätning skapar flera värden, dessutom för några olika aktörer. Det mest uppenbara är att det för råvaruanvändaren ger en möjlighet till processoptimering och kvalitetskontroll. Det gäller oavsett om materialet ska användas till energi eller massa. För energi kan processen optimeras, effektiviteten ökas och utsläpp minskas. För massatillämpningen är fukthaltsinformation viktigt, då doseringen av kemikalier är en kritisk faktor som påverkar processkvalitet och ekonomi.

Den ekonomiska transaktionen mellan leverantör och köpare skulle också kunna göras mer transparent om fukthaltsinformationen hade funnits vid leverans. Det blir tydligare vad som handlas och affärer baserat på ton torrsvikt skulle vara möjliga. Ton torrsvikt är ett robust mått som inte är så volatilt.

För leveranssidan skulle snabb fukthaltsinformation på hela rundvirkesklass innebära en möjlighet till återkoppling bakåt i kedjan och en potential att använda informationen för att styra kommande leveranser. Det skulle kunna bana väg för en förbättrad logistik och en optimerad transport och lagring, vilket minskar kostnader och ökar effektiviteten.

En fördel är att tekniken kan skapa många olika värden hos olika aktörer. Det innebär å andra sidan att det inte är självklart vem som ska driva implementering, vilket kan skapa en bromsande osäkerhet. Leveranssidan tycker till exempel att kundsidan ska vara drivande.

Framtidsvisionen för en uppkopplad skoglig värdekedja

Mikrovågsbaserad fukthaltsmätning öppnar upp flera möjligheter för framtiden. Den kan integreras i befintliga logistiksystem, vilket möjliggör automatiserad och kontinuerlig

mätning av fukthalten i hela tillförselkedjan. Detta kan leda till förbättrad spårbarhet och transparens, vilket är viktigt för att säkerställa hållbarhet och kvalitet i skogsindustrin.

Dessutom kan metoden användas för att utveckla nya affärsmodeller, såsom betalning baserad på egenskaper och fukthalt i stället för på vikt och volym, vilket kan leda till rättvisare och mer lönsamma affärer för både köpare och säljare av biomassa, liksom för olika tjänsteleverantörer i försörjningskedjan. Industrilandskapet är i förändring och framtidens biobaserade industrier ökar just nu fokuset mot att maximera förädlingsvärdet genom att jobba med skräddarsydda lösningar och integrera information genom hela kedjan.

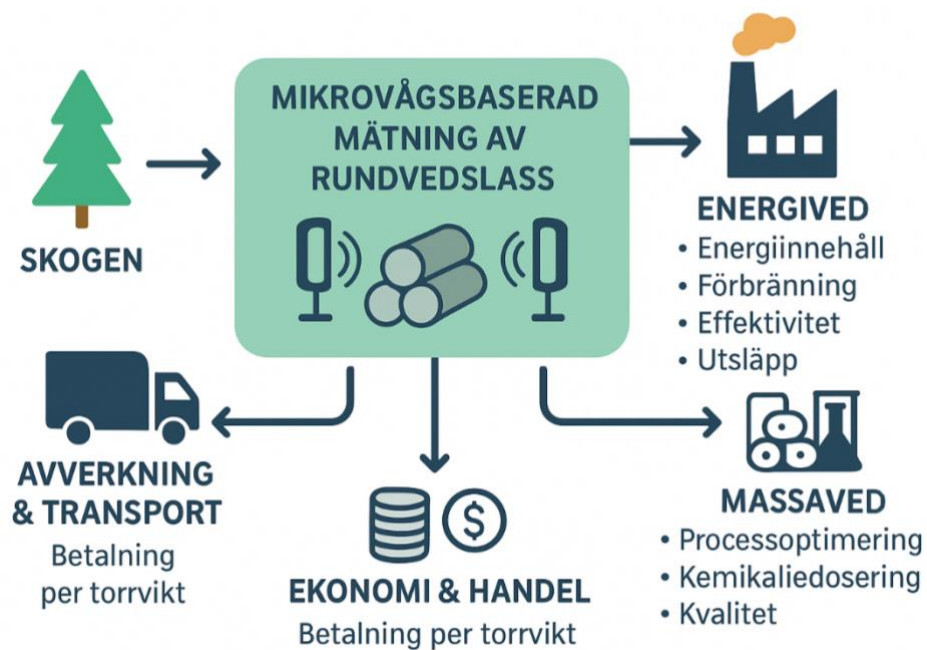
Utmaningar för teknikintegrering hos slutanvändaren

En utmaning för fukthaltsmätning av rundvirke vid leverans är att den skapade informationen riskerar att tappas eller suddas innan den kan addera värde hos slutanvändaren. För ett massabruk är flis in i processen det viktiga steget, men det är lång väg dit från massavedsleveransen. Massaveden kan lagras, vattnas, blandas med mera innan den matas in i processen. Att föra med information genom de interna stegen är utmanande. Här ter sig mätning direkt på flis in i processen mer rationellt ur ett processoptimeringsperspektiv. Detsamma gäller för energived där den kan lagras lång tid innan den flisas och används.

Det finns andra metoder för att skatta fukthalten i rundvirke. En metod är att använda skördardata, som kan innehålla information om trädens tillväxtförhållanden, tidpunkt för avverkning och väderförhållanden vid avverkningstillfället. Denna information kan användas för att uppskatta fukthalten genom att kombinera den med modeller som tar hänsyn till dessa faktorer. Vidare kan man tänka sig att volym- och viktmätning kombineras med densitetsprediktioner för att skatta fukthalt vid leverans.

Slutsats

Sammanfattningsvis är fukthalten en viktig kvalitetsparameter inom skogsbaserad industri som påverkar ekonomiska, logistiska och operativa aspekter (Figur 54). Traditionella metoder för att mäta fukthalt via torkning och vägning är noggranna men tidskrävande och ineffektiva, och det är framför allt utmanande att ta representativa stickprov. Mikrovågsbaserad fukthaltsmätning erbjuder en snabb och potentiellt noggrann metod för att mäta fukthalten i realtid, vilket skapar flera värden och öppnar upp nya möjligheter för framtiden. Mera transparenta affärer och effektivare logistik och styrning är de tydligaste fördelarna som pekas ut. Intern processoptimering baserad på det levererade rundvirkets fukthalt är dock mer utmanande, då informationen vid leverans riskerar att tappas internt fram till användning i processen.



Figur 54. Sammanfattande illustration av aspekterna som tas upp i systemanalysen. Illustration: genererad av ChatGPT4, därefter modifierad.

Övergripande slutsatser

Idag mäts inte fukthalt på rundvirke då rationella metoder saknas. Projektets resultat tyder på att det är möjligt att använda mikrovågstransmission för att mäta fukthalt hos travat rundvirke. Sannolikt går det att utveckla metoden till att ge samma eller bättre noggrannhet än de manuella, tids- och arbetskrävande alternativ som finns idag. Mätningen av rundvirke är dock signifikant mer komplex än tillämpningen på sönderdelat skogsbränsle.

Metoden möjliggör snabb och rätt debitering, sortering i olika kvaliteter och effektivisering av depålagringen, som därigenom ger mer säkerställd blandning och matning till respektive process (förbränning i värmeverk, flisning och massatillverkning).

Samma utrustning kan användas för både flis- och rundvirkesbilar, vilket ökar användbarheten. Den nya mätmetoden kommer att vara världsunik, motsvara behov av fukthaltsinformation som finns även internationellt, och tillämpbar även för rundvirke som avverkas i längre längder. När mätmetoden väl är utvecklad för gran och tall kommer tillämpning på andra träslag att vara relativt enkel.

Rätt råvara till rätt kund åstadkoms genom att industriens olika krav på virkets fukthalt och färskhet kan bejaktas. Vidare säkerställs att rätt råvara går till förbränning och rätt råvara går som massaved, och att rundvirke inte som försiktighetsåtgärd klassas som bränsleved på grund av saknad fukthaltsinformation.

Processen i sig kan förändras vid ökad kännedom om råvarans beskaffenhet. Noggrann mätning av träråvarans fukthalt ger också möjlighet till rätt debitering kopplad till färskhet och torrsvikt. För skogsbränsle skulle det innebära en möjlighet att harmonisera handeln, där bränsleved idag betalas i volym och sönderdelat material vanligen i ton torrsvikt. Rättvisan i handeln ökar när priset för olika sortiment lättare kan jämföras. Vidare kan betalningen för bränsleved ske i ett mått relaterat till energivärdet. Även för massaved möjliggör fukthaltsmätning av rundvirke en betalning i önskade egenskaper såsom mängden träfiber och färskhet, vilket i sin tur påverkar såväl utbytet som massans kvalitet. Virkeshandel i torrsvikt ökar även rättvisan genom att köparen inte behöver betala för förändringar i fukthalt som de inte kunnat påverka, exempelvis från säljarens eller transportörens hantering/lagring.

Referenser

- Bejo, L., Jakocs, M., Divos, F. & Fathi, S. 2018. 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.
- Biometria 2024. Kontroll torrhaltsmätare för mindre provmängder. Biometrias kontrollanvisningar, Biometria. Publicerad 2024-02-01. 1–6 s.
- Biometria 2025. Travmätning av rundvirke. Nationella bestämmelser för virkesmätning 2025-04-01. s 14.
- Choy, T. C. 2015. Effective Medium Theory: Principles and Applications, Oxford University Press, 256 s.
- Dahlen, J., Schimleck, L. & Schilling, E. B. 2020. Modeling and Monitoring of Wood Moisture Content Using Time-Domain Reflectometry. *Forests*, 11, 1–19.
- Duchesne, I., Tong, Q. & Hans, G. 2023. Using Ground Penetrating Radar (GPR) to Predict Log Moisture Content of Commercially Important Canadian Softwoods. *Forests*, 14, 2396.
- Hans, G., Redman, D., Leblon, B., Nader, J. & La Rocque, A. 2015a. Determination of log moisture content using ground penetrating radar (GPR). Part 1. Partial least squares (PLS) method. *Holzforschung*, 69.
- Hans, G., Redman, D., Leblon, B., Nader, J. & La Rocque, A. 2015b. Determination of log moisture content using ground penetrating radar (GPR). Part 2. Propagation velocity (PV) method. *Holzforschung*, 69.
- Hyll, K. & Eriksson, A. 2022. Potentialen hos mikro- och radiovågsbaserad mätning av fukthalt och andra virkesegenskaper. Arbetsrapport 1112, Skogforsk. 1–58 s.
- Hyll, K. & Nordström, M. 2020. Kartläggning av teknik, metoder och informationsflöde för mätning av skogens produkter. Arbetsrapport, Skogforsk. 90 s.
- laporte, F. (2025). flaport/fdtd - Python 3D FDTD Simulator.
<https://github.com/flaport/fdtd>
- Malicki, M. A. & Kotlinski, J. 1998. Dielectric determination of moisture of wood using time domain reflectometry. *Int. Agrophys.*, 12, 217–220.
- Ottosson, P. & Andersson, D. 2017. Snabb III - Effektivare mätning av trädbränsle i tillförselprocessen med radarteknik. Arbetsrapport, Skogforsk. 55 s.
- Ottosson, P., Andersson, D. & Fridh, L. 2016. Radarteknik för fukthaltsmätning – en förstudie. Arbetsrapport 915, Skogforsk. 1–32 s.
- Ottosson, P., Andersson, D. & Hyll, K. 2022. Snabb fukthaltsmätning i hela tillförselprocessen av trädbränsle. Arbetsrapport 1172-2023. 99 s.
- Redman, J. D., Hans, G. & Diamanti, N. 2016. Impact of Wood Sample Shape and Size on Moisture Content Measurement Using a GPR-Based Sensor. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9, 221–227.
- Roux, S. 2010. Trial of portable moisture meters for assessing moisture content in wood chips and roundwood. Forest Research (UK) / Biomass Energy Centre. 1–2 s.

Sanchez-Montero, R., Lopez-Espi, P.-L., Martinez-Rojas, J. A., Alpuente-Hermosilla, J. & Alen-Cordero, C. 2018. Numerical Study of Focusing Effects of Microwaves inside Wood Due to Timber Ring Structure. *Forests*, 9, 2–16.

Sjöden, T. 2012. Sensitivity Analysis and Material Parameter Estimation using Electromagnetic Modelling. PhD thesis, Linnaeus University, 1–35 s.

Torgovnikov, G. I. 1993. Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials, Springer Verlag Berlin, 196 s.

Landsbyggs- och infrastrukturdepartementet. 2014. Lag (2014:1005) om virkesmätning.

Wallbäcks, L. & Grahn, T. 2018. Wood and wood chip quality monitoring using NIR - Softwood. Innventia Report 852, Innventia. 28 s.

Willbo, M., Grahn, T., Ekblad, L., Pirinen, A., Fagerblom, N. & Vikberg, T. 2025. Automatisk mätning av timmer med NIR och AI/visionteknik – steg 2. Slutrapport, RISE. Published 2025-05-15. 32 s.

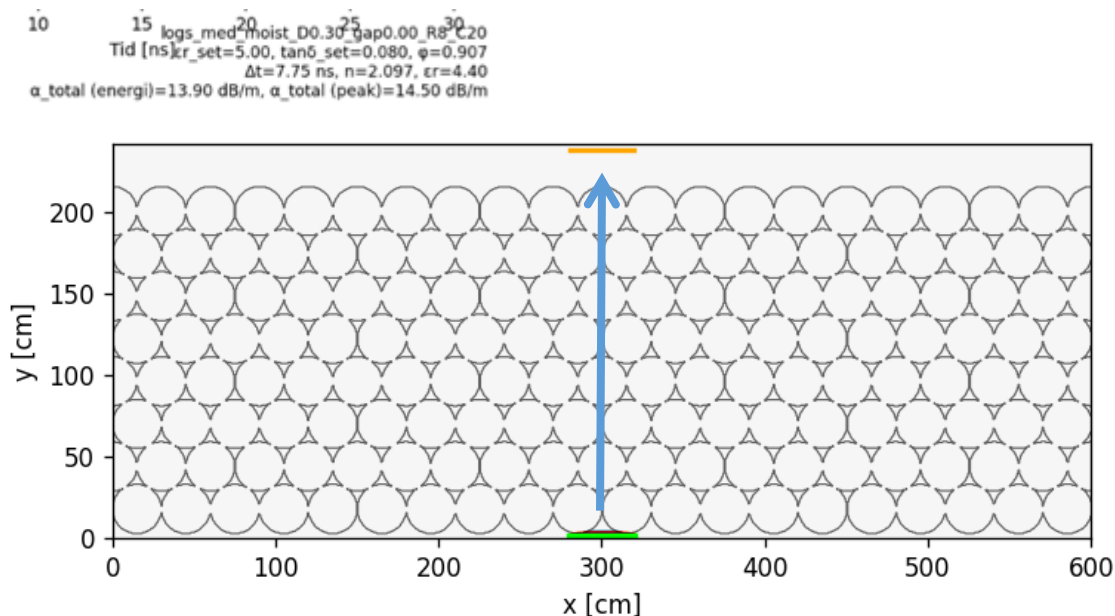
Bilaga 1A – fördjupning i simuleringarna

Metod

Simuleringar

För simuleringarna har FDTD (Finite-Difference Time-Domain) analys använts för att efterlikna rörelserna från de elektromagnetiska vågorna, se exempel i Figur A 1. Genom att simulera med olika geometrier och placeringar går det att undersöka vilka parametrar som påverkar resultatet mest. Skriptet där simuleringarna utfördes gavs namnet *Jupyter FDTD-v3.o.ipynb* och delas gärna på begäran. Ett exempel på en simuleringsuppställning visas i Figur A 1.

Simuleringen exciterar ett z-polariserat gaussmodulerat 0,30/1 GHz-GHz-pulsfält via en linjekälla. E-fältet ligger parallellt med stockarnas axlar, och materialets $\epsilon_r/\tan\delta$ sveps för att representera stigande fukthalt och därmed ökande brytning och dämpning.



Figur A 1. Simulering innan signalen har skickats i väg. Grön markering är sändaren (Tx) och orange markering är mottagaren (Rx). Bilden visar åtta rader av stockar med diametern 30 cm tätt packade, signalvägen (markerad med en blå pil) kommer innehålla både virke och luft.

Först simuleras en signal till mottagarantennen utan stockar ($R_{x_{luft}}$) och sedan en signal med stockar ($R_{x_{trave}}$). Då bredden hos "traven" är känd kan den relativa permittiviteten och dämpningsfaktorn beräknas genom att jämföra dessa två signaler.

Som beskrivet i Delrapport B extraherades travens dielektriska parametrar med två olika metoder:

1. Effektivt medium analys (EMA)
2. Mätarliktande signalbehandling

Beräkningar av dielektriska parametrar med EMA

I tidigare projekt har en ambition varit att mikrovågssignalens beteende ska gå att modelleras, och därmed bättre förstås, med en fysikalisk modell. Den fysikaliska modell som har använts har varit EMA.

Enligt den använda EMA:n går de dielektriska egenskaperna hos en virkestrave att approximeras som en linjär kombination av de dielektriska värdena hos luft respektive virke (Choy 2015). Om man antar ett enkelt volymviktat medelvärde mellan virke och luft fås:

$$\epsilon_{r,eff} = (1 - \phi) \cdot \epsilon_{r,luft} + \phi \cdot \epsilon_{r,virke} \quad [\text{Ekv. A1}]$$

där ϕ är travens packningsgrad (volymandel virke i den effektiva cellen, på en skala noll till ett), $\epsilon_{r,virke}$ är den relativa permittiviteten för virket, och $\epsilon_{r,luft}$ är den relativa permittiviteten för luft.

Då $\epsilon_{r,luft}$ approximativt har värdet ett förenklat uttrycket till:

$$\epsilon_{r,eff} \approx 1 + \phi (\epsilon_{r,virke} - 1) \quad [\text{Ekv. A2}]$$

Dämpningen α_{energy} ges av följande uttryck:

$$\alpha_{energy} (\text{Np/m}) \approx \omega \cdot \frac{\sqrt{\epsilon_{r,eff}}}{2 \cdot c_0} \cdot \tan \delta \quad [\text{Ekv. A3}]$$

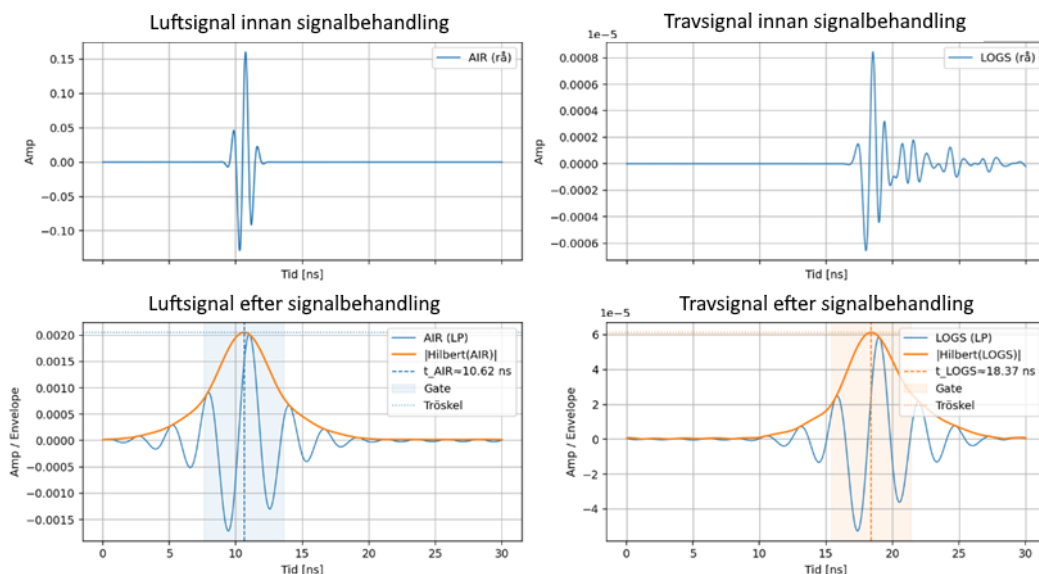
där $\tan \delta$ är förlusttangenta för virket (litteraturvärde anpassat till aktuell fukthalt och frekvens), c_0 är ljusets hastighet i vakuum (299 792 458 m/s) och ω är vinkelfrekvensen ($2\pi f$, där f är frekvensen).

Ekvation A3 ger dämpningen i neper per meter (Np/m), där neper är en enhet som bland annat används inom mikrovågselektronik. Neper, som är snarlik decibel men med en annan logaritmisk skala, omvandlas till enheten dB/m med följande konversion:

$$\alpha_{energy} (\text{dB/m}) = 8,686 \cdot \alpha_{energy} (\text{Np/m}) \quad [\text{Ekv. A4}]$$

Mätarliknande signalbehandling

För att dämpa påverkan av interferens och flervägsutbredning används ett lågpasfilter på både referenssignalen och signalen genom stockarna (Figur A 2). Med andra ord tas alla signaler lägre än en viss frekvens bort. Därefter beräknas den så kallade analytiska versionen av signalen med hjälp av Hilbert-transformen. Den analytiska signalen har samma amplitud- och fasinformation men bara positiva värden, vilket gör den lättare att bearbeta matematiskt. Därefter adderas en så kallad gate. Toppen av den analytiska signalen användes som beslutspunkt för tiden. Den totala energin mättes i ett område runt beslutspunkten.



Figur A 2. Exempel på simulerade rådata och signalbehandlade data. Övre vänster: rå mottagarsignal med enbart luft (Rx_{luft}). Övre höger: rå mottagarsignal med stockar (Rx_{trave}). Nedre vänster: behandlad mottagarsignal med enbart luft. Nedre höger: behandlad mottagarsignal med stockar.

Simulerade scenarion och parametrar

Simulerade scenarion beskrivs i Tabell A 1.

Tabell A 1. Parametrar och värden som användes i simuleringarna.

Parameter	Simulerade värden
Fukthalt ($\epsilon_{r, virke}$, $\tan\delta$)	(7, 0,15) (5, 0,08) (4, 0,02) (3, 0,01)
Diameter på stockarna (cm)	10 15 20 25 30 40 45
Avstånd mellan stockarna (cm)	0 5 10
Antal rader av stockar	6 8

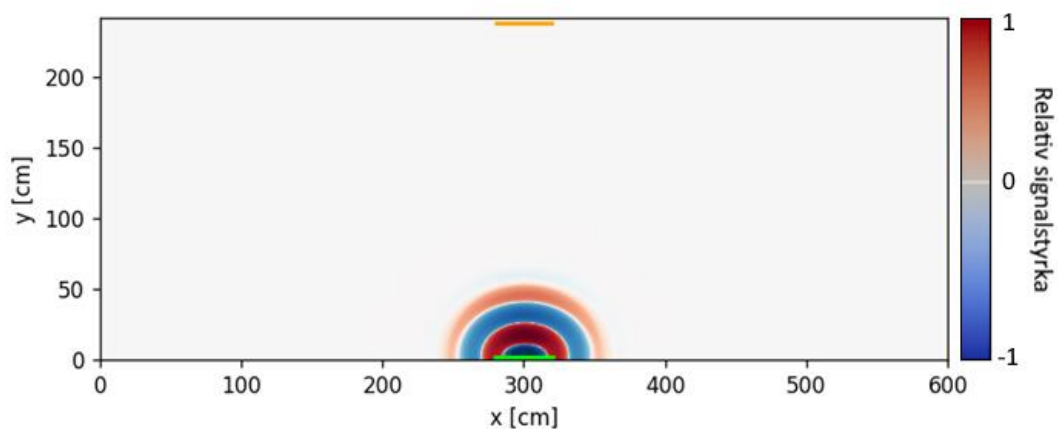
En av utmaningarna i verklig mätning av stockarna är att stockarna inte kommer vara geometriskt lika eller tätt packade. I simuleringen ändras ett gap mellan stockarna (vilket är orimligt i verkligheten) som kan ge en indikation om hur signalen ser ut när stockarna inte ligger i kontakt med varandra.

Simulering med frekvens 1,0 GHz

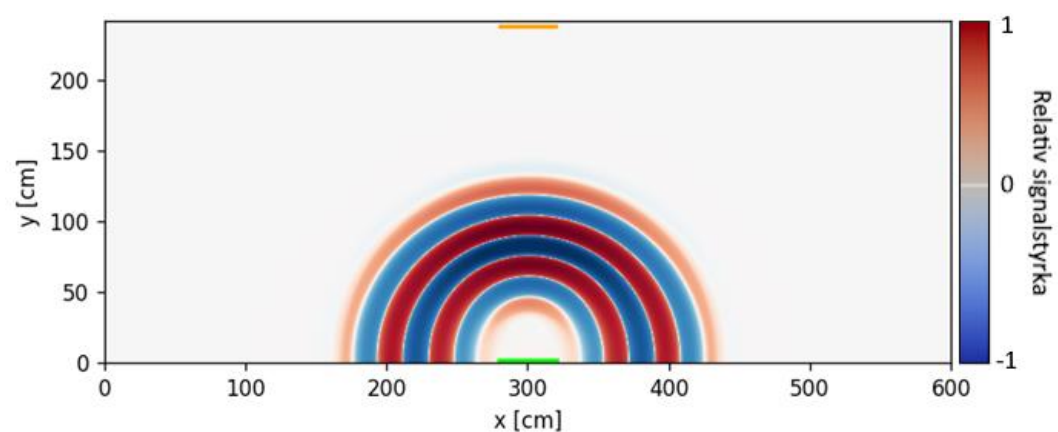
I denna simulering användes mittfrekvens 1,0 GHz, vilket motsvarar en våglängd på 30 cm och är samma mittfrekvens som används i mätutrustningen som utvecklats inom projektet. Här är våglängden i samma storleksordning som stockdiametern, vilket gör att en ”stökig” signal förväntas.

Mätning i luft – referensen

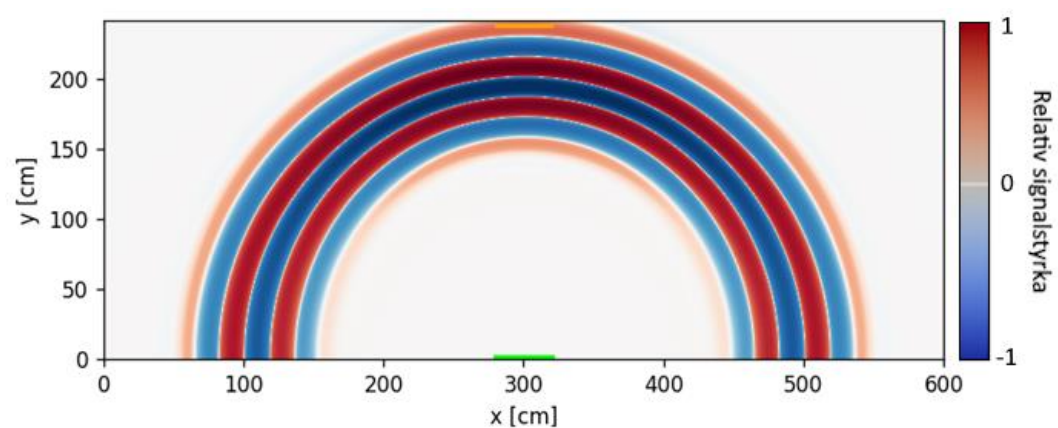
Med olika diametrar och stockrader kommer avståndet mellan sändaren och mottagaren att ändras. Därför simuleras det först en mätning i bara luft för att använda som referenssignal (Rx_{luft}). Resultaten visas i Figur A 3 till Figur A 5.



Figur A 3. Signalens utseende tidigt i simuleringen, vid simulering med enbart luft och frekvens 1,0 GHz.



Figur A 4. Signalens utseende på väg mot mottagaren, vid simulering med enbart luft och frekvens 1,0 GHz.



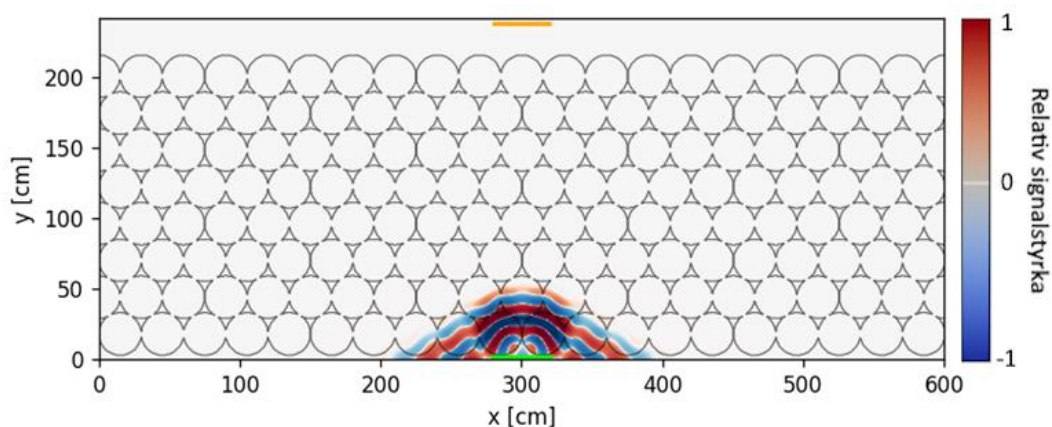
Figur A 5. Signalens utseende när den når mottagaren, vid simulering med enbart luft och frekvens 1,0 GHz.

Travad rundved utan mellanrum

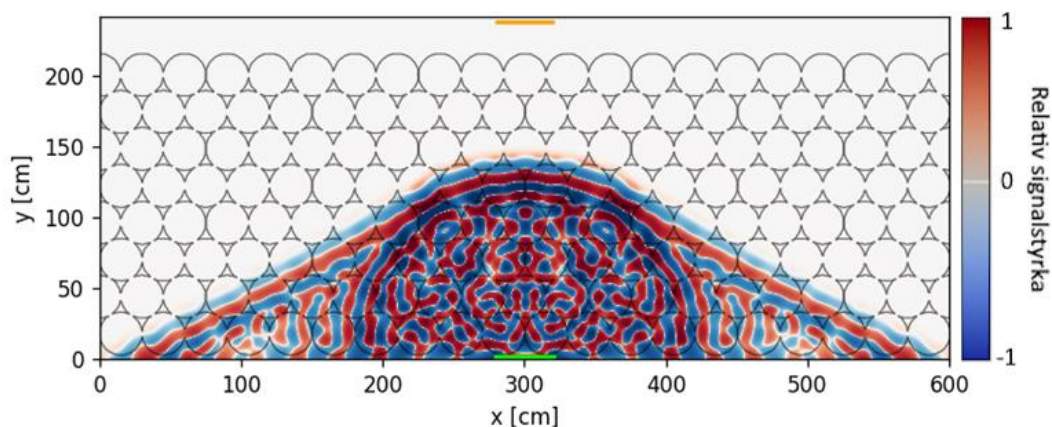
Resultat från en simulering med tätt packade stockar (utan mellanrum i vertikal och horisontell riktning) visas i Figur A 6 till Figur A 8. Parametrarna visas i Tabell A 2.

Tabell A 2. Parametrar vid simulering av tätt packade stockar.

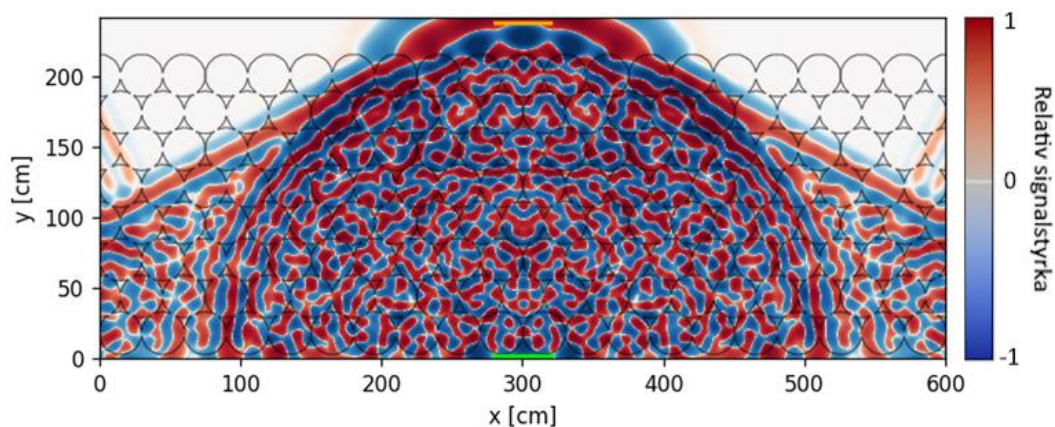
Parameter	Värde
Mittfrekvens	1,0 GHz
Lågpasstrereringströskel	0,3 GHz
Stockdiameter	30 cm
Antal stockrader	8 st
Avstånd mellan stockar	0 cm



Figur A 6. Signalens utseende tidigt i simuleringen, vid simulering av tätt packade stockar och frekvens 1,0 GHz.

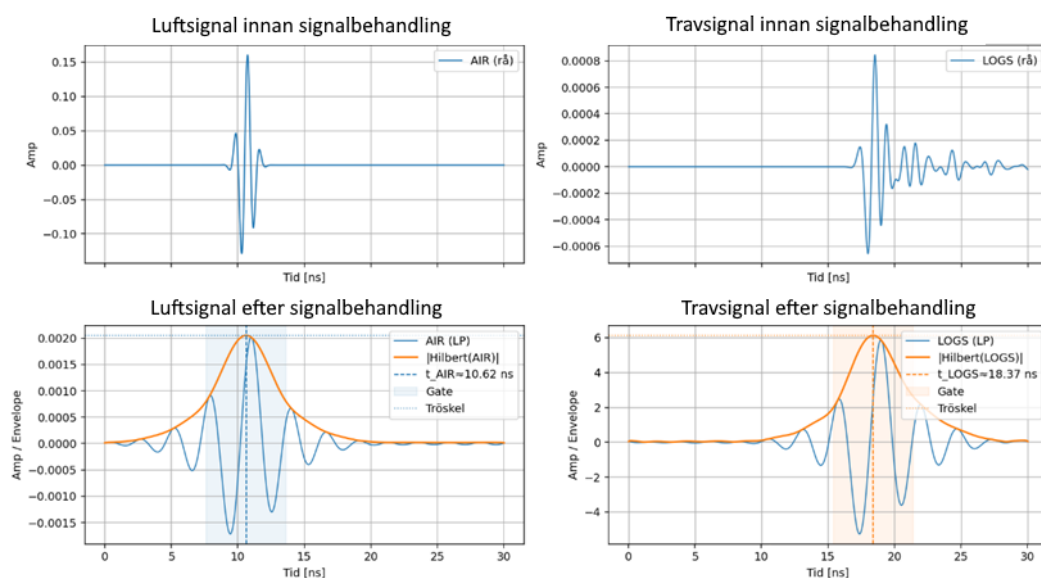


Figur A 7. Signalens utseende på väg mot mottagaren, vid simulering av tätt packade stockar och frekvens 1,0 GHz.



Figur A 8. Signalens utseende när den når mottagaren, vid simulering av tätt packade stockar och frekvens 1,0 GHz.

Den simulerade signalen för luft respektive tätt packade stockar med diameter 30 cm visas i Figur A 9.



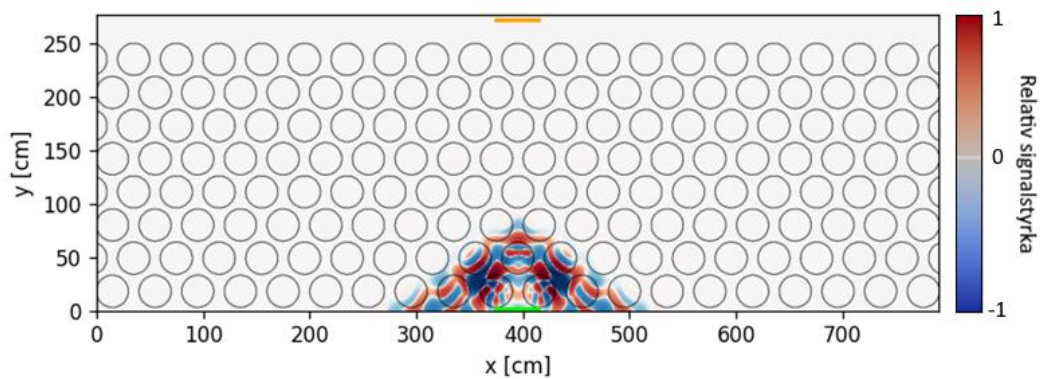
Figur A 9. Simulerade rådata och signalbehandlade data, vid simulering av tätt packade stockar och frekvens 1,0 GHz. Övre vänster: rå mottagarsignal med enbart luft ($R_{x_{luft}}$). Övre höger: rå mottagarsignal med stockar ($R_{x_{trave}}$). Nedre vänster: behandlad mottagarsignal med enbart luft. Nedre höger: behandlad mottagarsignal med stockar.

Travad rundved med större mellanrum

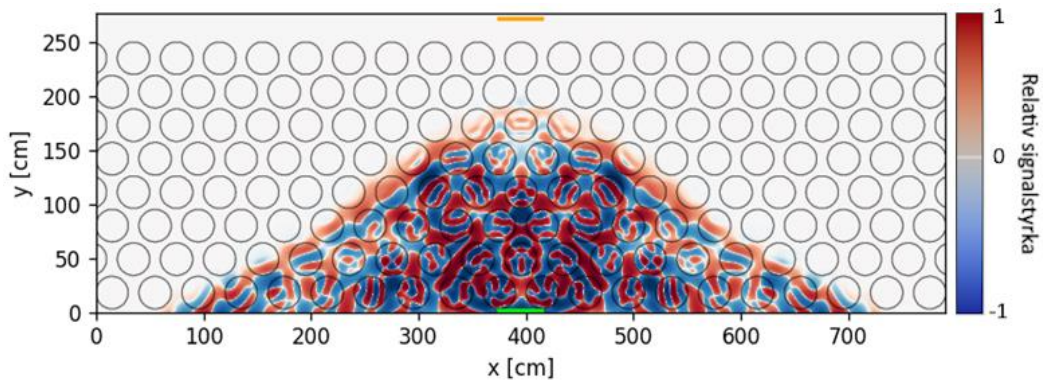
En simulering med luftigt packade stockar (mellanrum 10 cm) visas i Figur A 10 till Figur A 12. Parametrarna visas i [Tabell A 3](#).

Tabell A 3. Parametrar vid simulering av luftigt packade stockar.

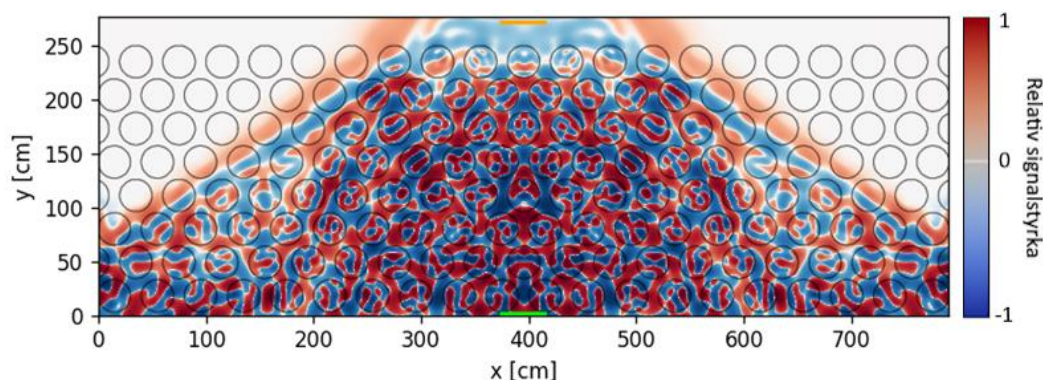
Parameter	Värde
Mittfrekvens	1,0 GHz
Lågpasfiltreringströskel	0,3 GHz
Stockdiameter	30 cm
Antal stockrader	8 st
Avstånd mellan stockar	10 cm



Figur A 10. Signalens utseende tidigt i simuleringen, vid simulering av luftigt packade stockar vid frekvens 1,0 GHz.

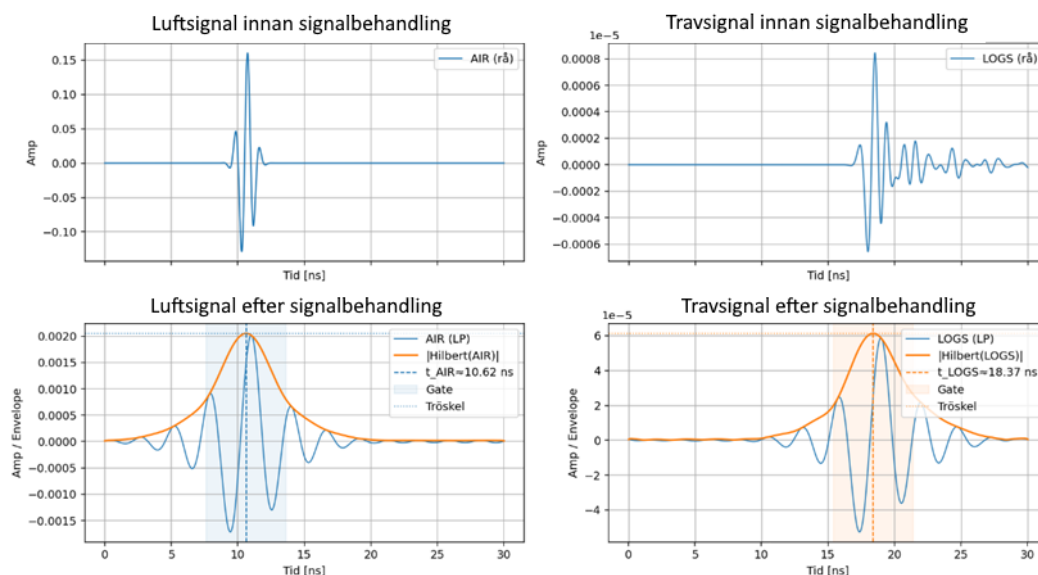


Figur A 11. Signalens utseende på väg mot mottagaren, vid simulering av luftigt packade stockar vid frekvens 1,0 GHz.



Figur A 12. Signalens (fältstyrkans) utseende när den når mottagaren, vid simulering av luftigt packade stockar vid frekvens 1,0 GHz.

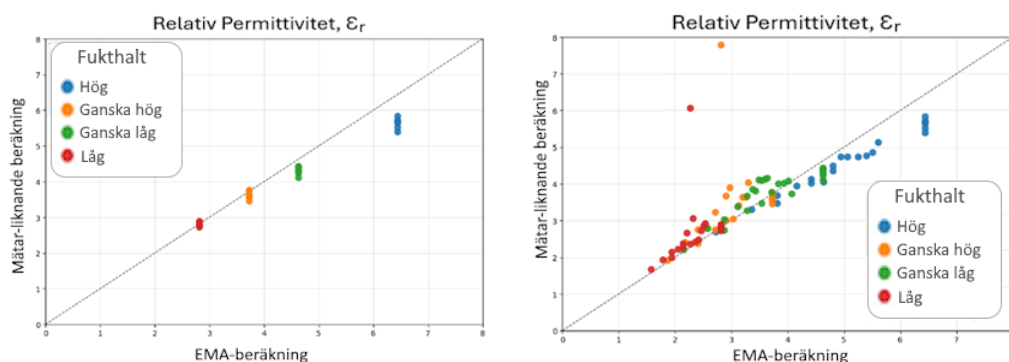
Den simulerade signalen för luft respektive luftigt packade stockar med diameter 30 cm visas i Figur A 13.



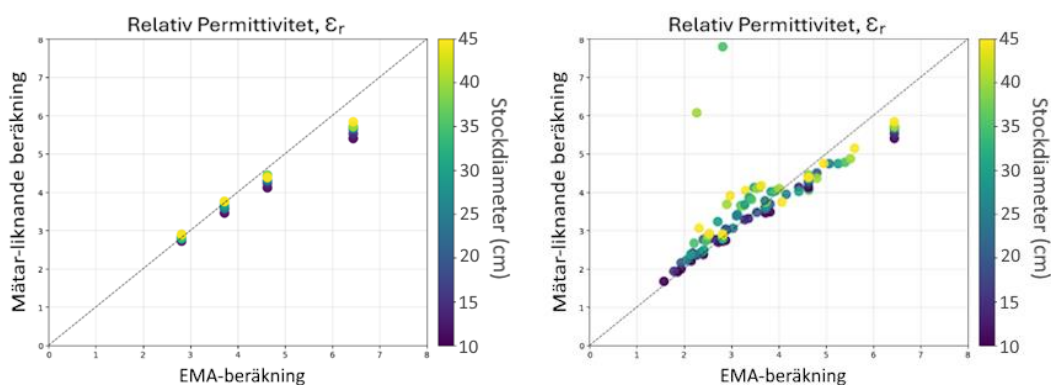
Figur A 13. Simulerade rådata och signalbehandlade data, vid simulering av luftigt packade stockar och frekvens 1,0 GHz. Övre vänster: rå mottagarsignal med enbart luft ($R_{x_{luft}}$). Övre höger: rå mottagarsignal med stockar ($R_{x_{trave}}$). Nedre vänster: behandlad mottagarsignal med enbart luft. Nedre höger: behandlad mottagarsignal med stockar.

Resultat

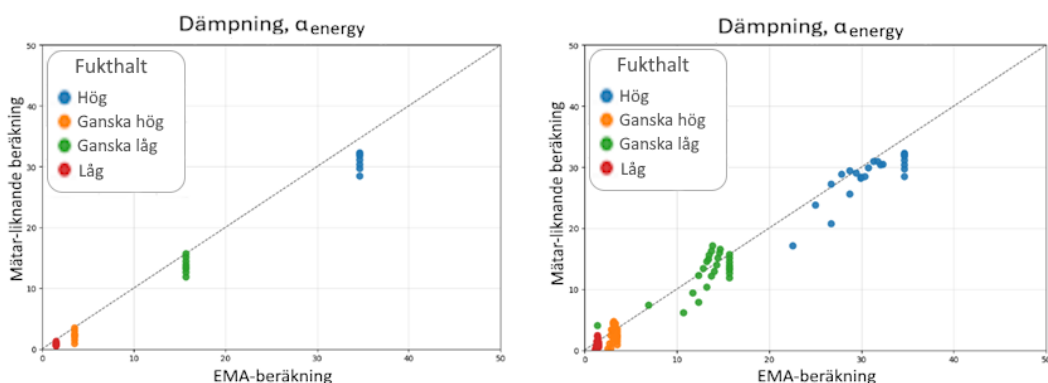
För samtliga simuleringar med mittfrekvens 1,0 GHz så har ϵ_r och α_{energy} beräknats från skillnaden i tid och dämpning mellan $R_{x_{luft}}$ och $R_{x_{trave}}$ och bredden på traven. Den jämförs mot den teoretiska ϵ_r och α_{energy} som är beräknat med EMA. Resultaten visas med respektive utan avstånden mellan stockarna för lättare förståelse av hur ökat avstånd påverkar resultaten, se Figur A 14 till Figur A 17.



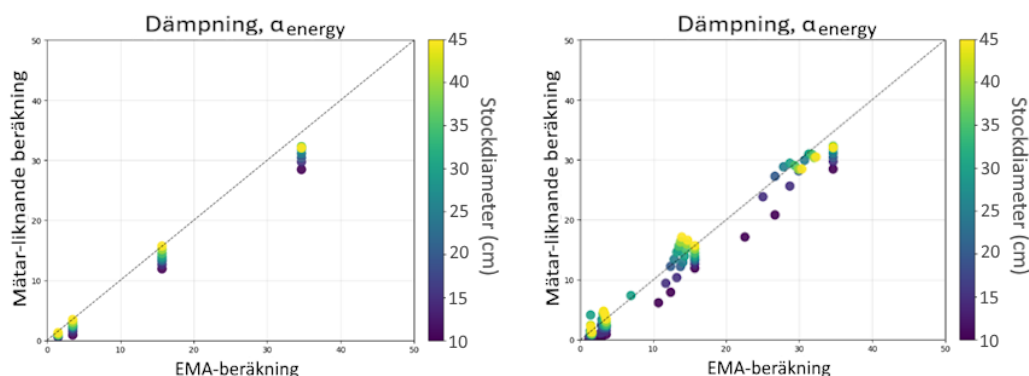
Figur A 14. ϵ_r beräknad med EMA (x-axel) mot ϵ_r beräknad med mätarliktande signalbehandling (y-axel). Simulering med frekvens 1,0 GHz. Datapunkterna är färgkodade efter fukthaltsklass, där blått är mycket fuktig, orange är ganska fuktig, grön är måttligt fuktig och röd är torrt. Vänster: 0 cm avstånd mellan stockarna. Höger: övriga simulerade avstånd mellan stockarna (10–45 cm).



Figur A 15. ϵ_r beräknad med EMA (x-axel) mot ϵ_r beräknad med mätarliktande signalbehandling (y-axel). Simulering med frekvens 1,0 GHz. Datapunkterna är färgkodade efter stockmedeldiameter. Vänster: 0 cm avstånd mellan stockarna. Höger: övriga simulerade avstånd mellan stockarna (10–45 cm).



Figur A 16. α_{energy} beräknad med EMA (x-axel) mot α_{energy} beräknad med mätarliktande signalbehandling (y-axel). Simulering med frekvens 1,0 GHz. Datapunkterna är färgkodade efter fukthaltsklass, där blått är mycket fuktig, orange är ganska fuktig, grön är måttligt fuktig och röd är torrt. Vänster: 0 cm avstånd mellan stockarna. Höger: övriga simulerade avstånd mellan stockarna (10–45 cm).



Figur A 17. α_{energy} beräknad med EMA (x-axel) mot α_{energy} beräknad med mätarliknande signalbehandling (y-axel). Simulering med frekvens 1,0 GHz datapunkterna är färgkodade efter stockmedeldiameter. Vänster: 0 cm avstånd mellan stockarna. Höger: övriga simulerade avstånd mellan stockarna (10–45 cm).

Beräkningarna av ϵ_r och α_{energy} stämmer väl överens med det teoretiska värdet baserat på den tämligen enkla EMA-analysen för låga fukthalter, men mindre bra för högre fukthalter. Då vi ämnar använda maskininlärning för fukthaltsberäkningen är överensstämmelsen med EMA inte ett måste utan det viktiga är att mätningarna för de olika fukthalterna är väl separerade och inte sprider sig.

Vid mätningen med olika dimensioner och antal rader i den tätt packade traven håller sig mätningarna tämligen väl samlade och signalerna genom stockarna påverkas tämligen lite av de luftspalter som ändå skapas mellan stockarna. Skapar man extra luftspalter mellan stockarna blir den mottagna signalen påverkad från signalvägar runt stockarna samt reflexer mellan stockarna. Med vald signalbehandling fås ändå ett tämligen gott resultat för ϵ_r om man kan prediktera packningstätheten. Större diameter av stockarna gav generellt högre ϵ_r och α_{energy} .

Simulering med mittfrekvens 0,3 GHz

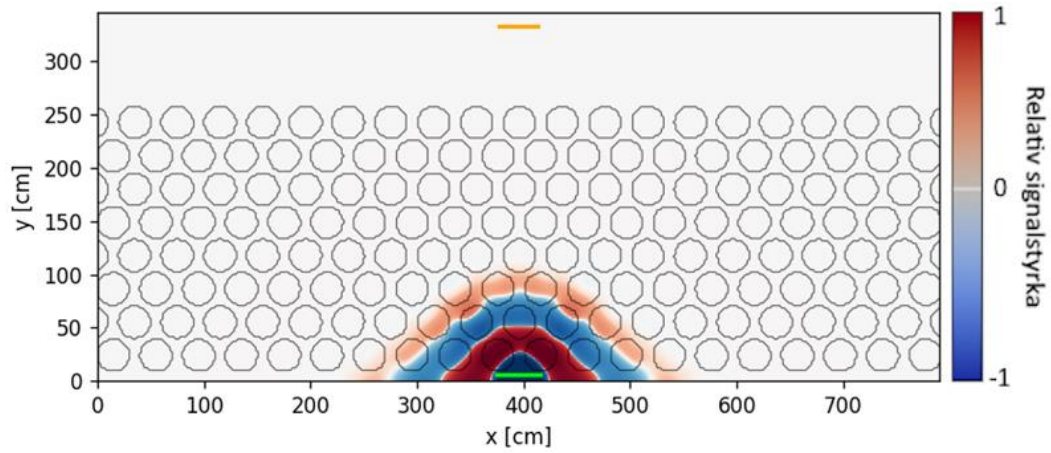
För att jämföra resultat vid ändring av frekvensen utfördes samma testscenarion vid 0,3 GHz, motsvarande en våglängd på 1,0 m. Här är våglängden betydligt större än stockdiameteren, vilket borde medföra en enklare signal. Ett exempel från simuleringsresultaten för ϵ_r och α_{energy} visas i figurer nedan.

Travad rundved med större mellanrum

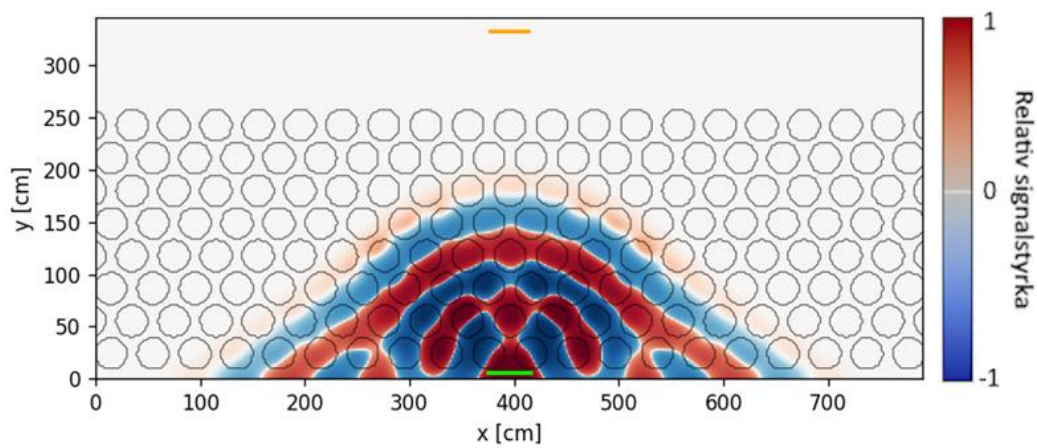
En simulering med luftigt packade stockar visas i [Figur A 18](#) till [Figur A 20](#). Parametrarna visas i [Tabell A 4](#).

Tabell A 4. Parametrar vid simulering av tätt packade stockar.

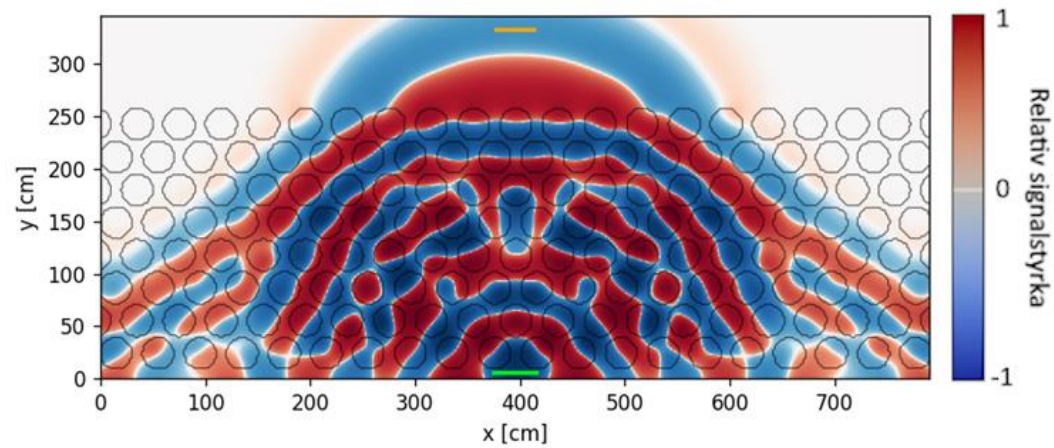
Parameter	Värde
Mittfrekvens	0,3 GHz
Lågpasströskel	90 MHz
Stockdiameter	30 cm
Antal stockrader	8 st
Avstånd mellan stockar	10 cm



Figur A 18. Signalens utseende tidigt i simuleringen, vid simulering av luftigt packade stockar vid frekvens 0,3 GHz.

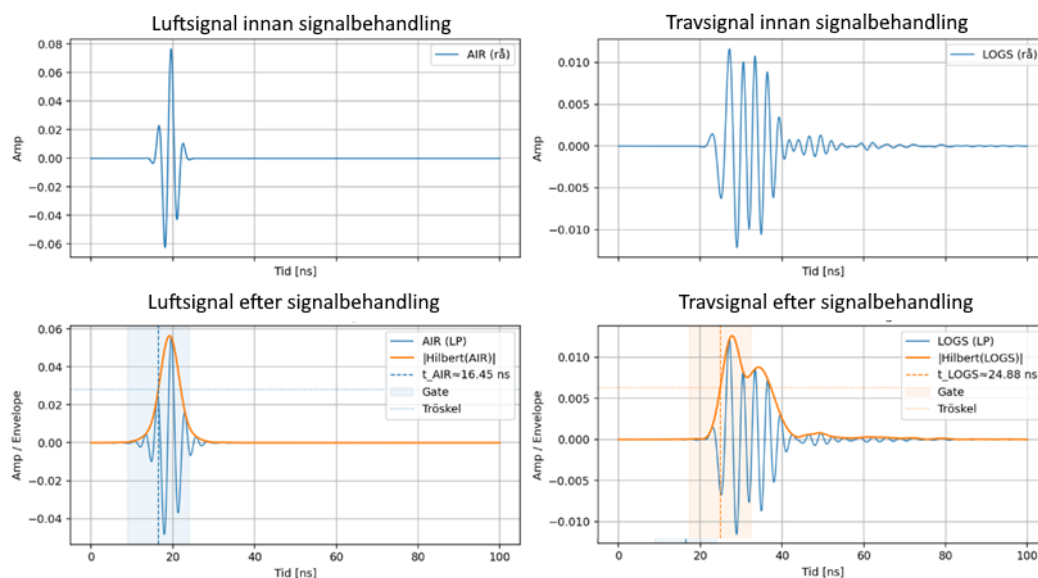


Figur A 19. Signalens utseende på väg mot mottagaren, vid simulering av luftigt packade stockar vid frekvens 0,3 GHz.



Figur A 20. Signalens utseende när den når mottagaren, vid simulering av luftigt packade stockar vid frekvens 0,3 GHz.

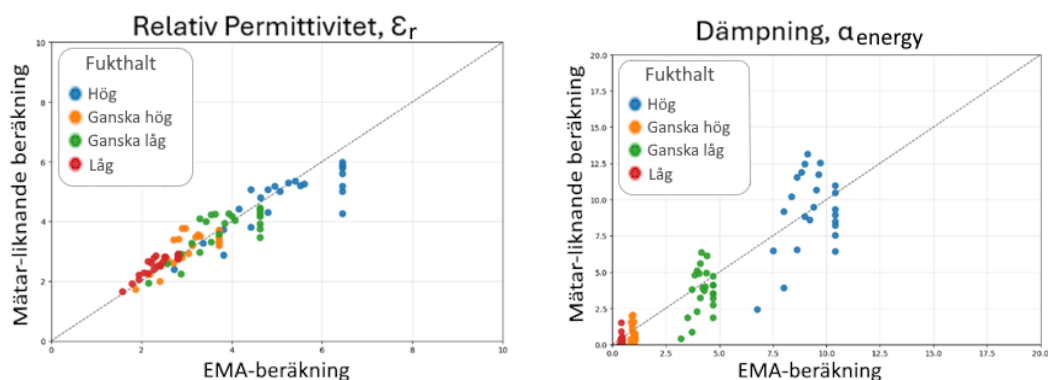
Den simulerade signalen för luft respektive luftigt packade stockar med diameter 30 cm visas i **Figur A 21**.



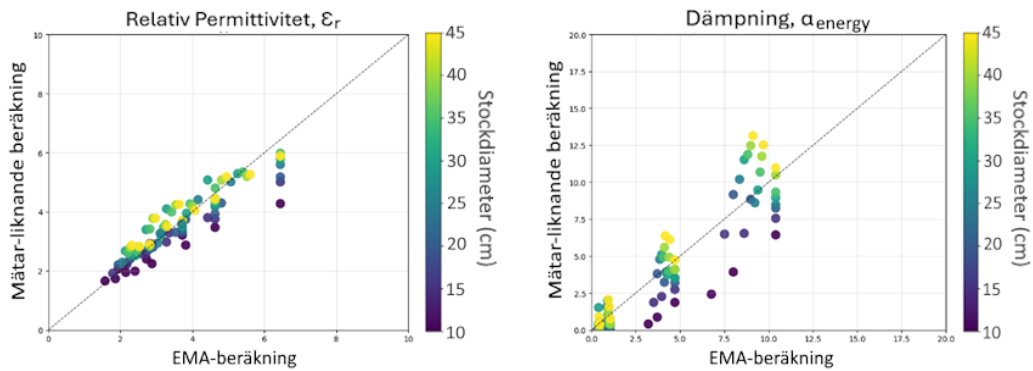
Figur A 21. Simulerade rådata och signalbehandlade data, vid simulering av luftigt packade stockar och frekvens 0,3 GHz. Övre vänster: rå mottagarsignal med enbart luft (Rx_{luft}). Övre höger: rå mottagarsignal med stockar (Rx_{trave}). Nedre vänster: behandlad mottagarsignal med enbart luft. Nedre höger: behandlad mottagarsignal med stockar.

Resultat

Resultatet av simuleringarna med mittfrekvens 0,3 GHz och stockavstånd 10 cm visas i **Figur A 22** och **Figur A 23**.



Figur A 22. Simulerade dielektriska parametrar beräknade med EMA (x-axel) respektive mätarlänkande signalbehandling (y-axel) vid frekvens 0,3 GHz. Datapunkterna är färgkodade efter fukthaltsklass, där blått är mycket fuktig, orange är ganska fuktig, grön är måttligt fuktig och röd är torrt. Vänster: ϵ_r . Höger: α_{energy} .



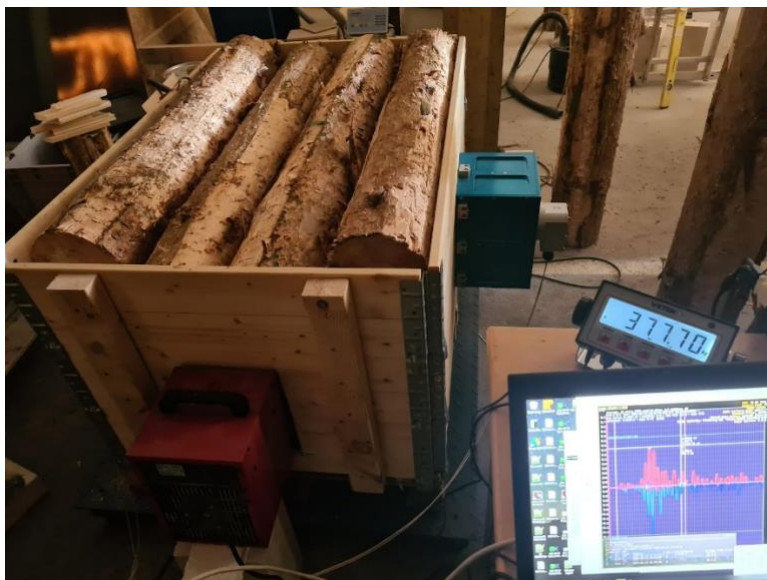
Figur A 23. Simulerade dielektriska parametrar beräknade med EMA (x-axel) respektive mätarliknande signalbehandling (y-axel) vid frekvens 0,3 GHz. Datapunkterna är färgkodade efter stockmedeldiameter. Vänster: 0 cm avstånd mellan stockarna. Vänster: ϵ_r . Höger: α_{energy} .

Vid simulering med 0,3 GHz blir signalen ren och tydlig. Dämpningen av signalen blir mindre. Detta stämmer med teori och hypotes att vid 1,0 m våglängd "syns" inte de enskilda stockarna tydligt, och signalen tar därför i stort bara en väg igenom traven och traven kan mer ses som ett effektivt material. Detta till skillnad mot mätning med frekvens 1,0 GHz där flervägsutbredning skapar flera överlappande signaler vid mottagaren. Ändring av frekvensen från 1,0 GHz till 0,3 GHz gav dock något sämre överensstämmelse mellan de två beräkningsmetoderna av travens dielektriska parametrar.

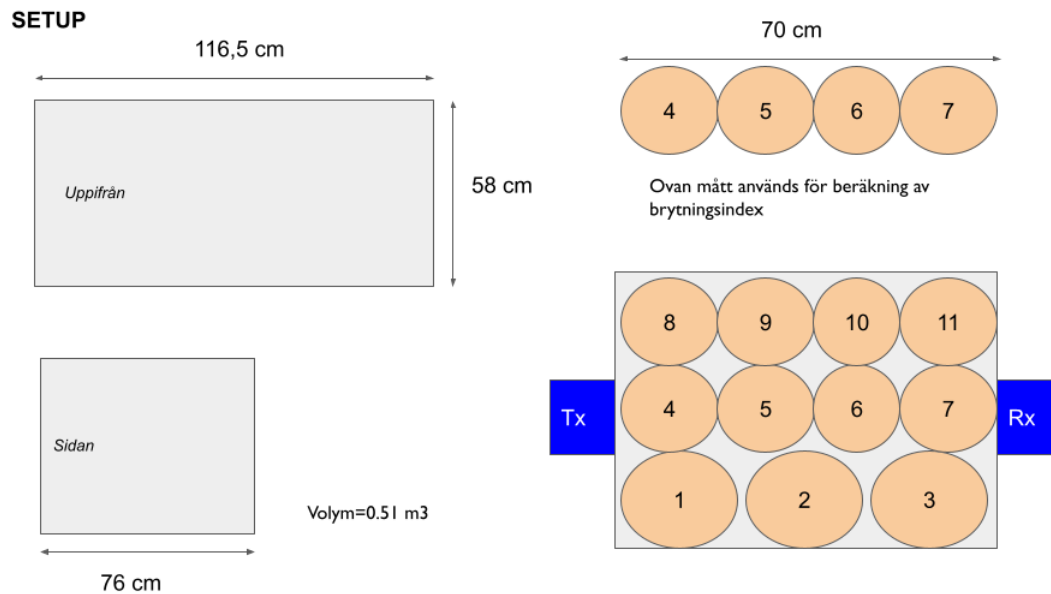
Bilaga 2 – fördjupning för mätningar av stockar under torkning

Metod

Stockarna placerades i en träställning ovanpå en våg (Figur A 24 och Figur A 25). Totalt rymdes det 11 stockar i träställningen. Mikrovågsutrustningen ställdes in med en mittfrekvens på 0,75 GHz och en samplingshastighet på 11,25 GHz. Medan vikten och mätsignalen registrerades torkades stockarna med två fläktar på varsin sida. När vikten inte längre minskade kapades tre trissor från varje stock för vidare torkning i ugn >48 timmar för att bestämma vikten när stockarna var helt torra.



Figur A 24. Fotografi över experimentuppställningen. Foto: Radarbolaget.

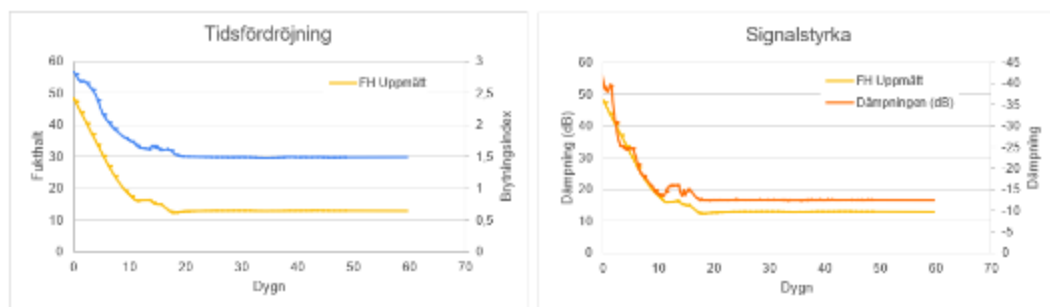


Figur A 25. Storleken på torklådan och placeringen av stockarna.

Fukthalten kunde sedan beräknas baserat på vikten från vågen och torkningen av trissorna. Resultatet och beräkningarna är dels med den initiala signalbehandlingen från tidpunkten för mätningen, dels omräknade med förbättrade signalbehandlingen som användes för lastbilarna och simuleringarna (Figur A 26 till Figur A 29).

Python-skriptet för beräkningarna gavs namnet *Velox Truck_v3.ipynb* och delas gärna på begäran.

Resultat

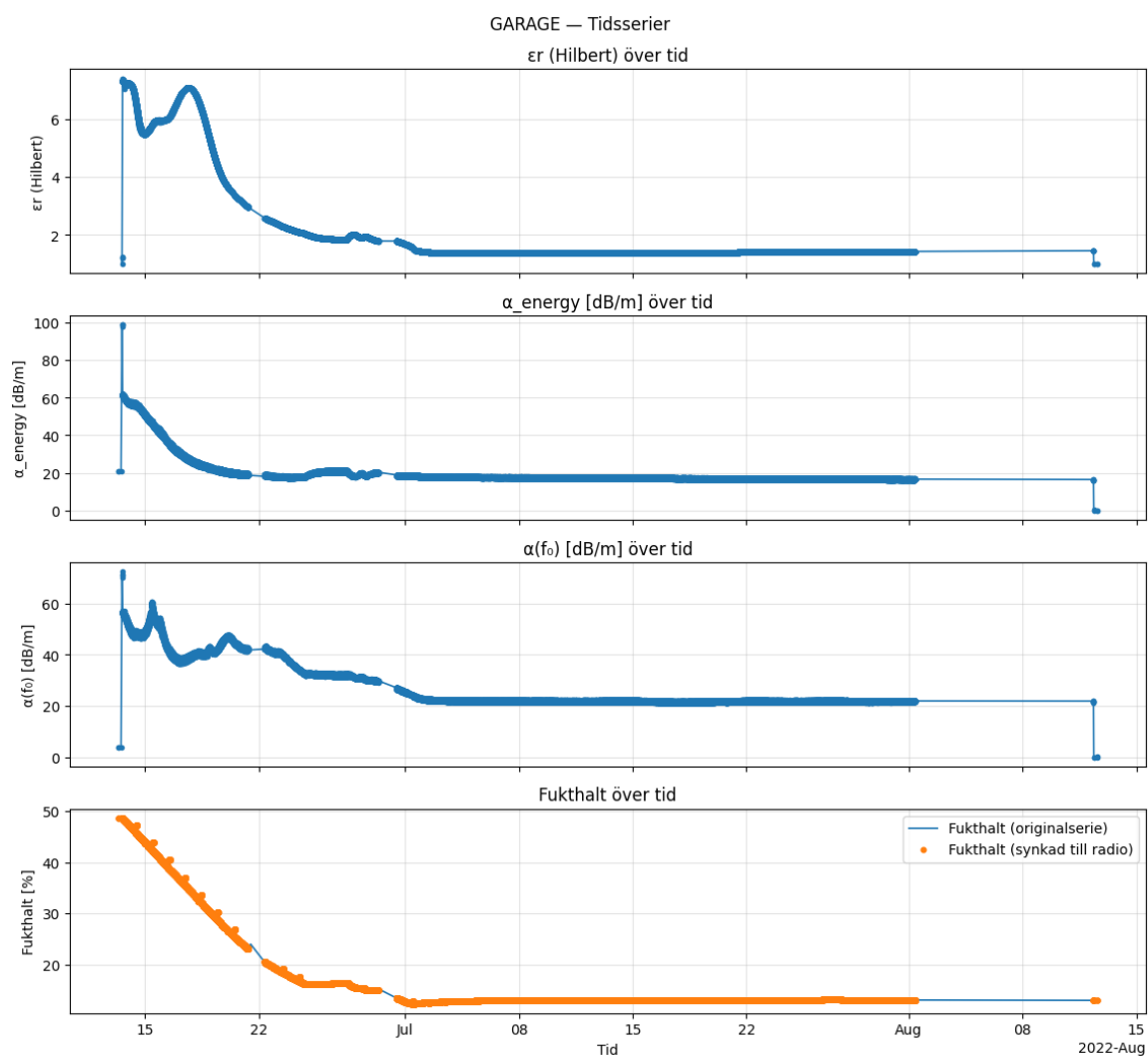


Figur A 26. Referensmätt fukthalt och tidsfördröjning (vänster) respektive signalstyrka (höger) som funktion av tid under torkning, baserat på initial signalbehandling.

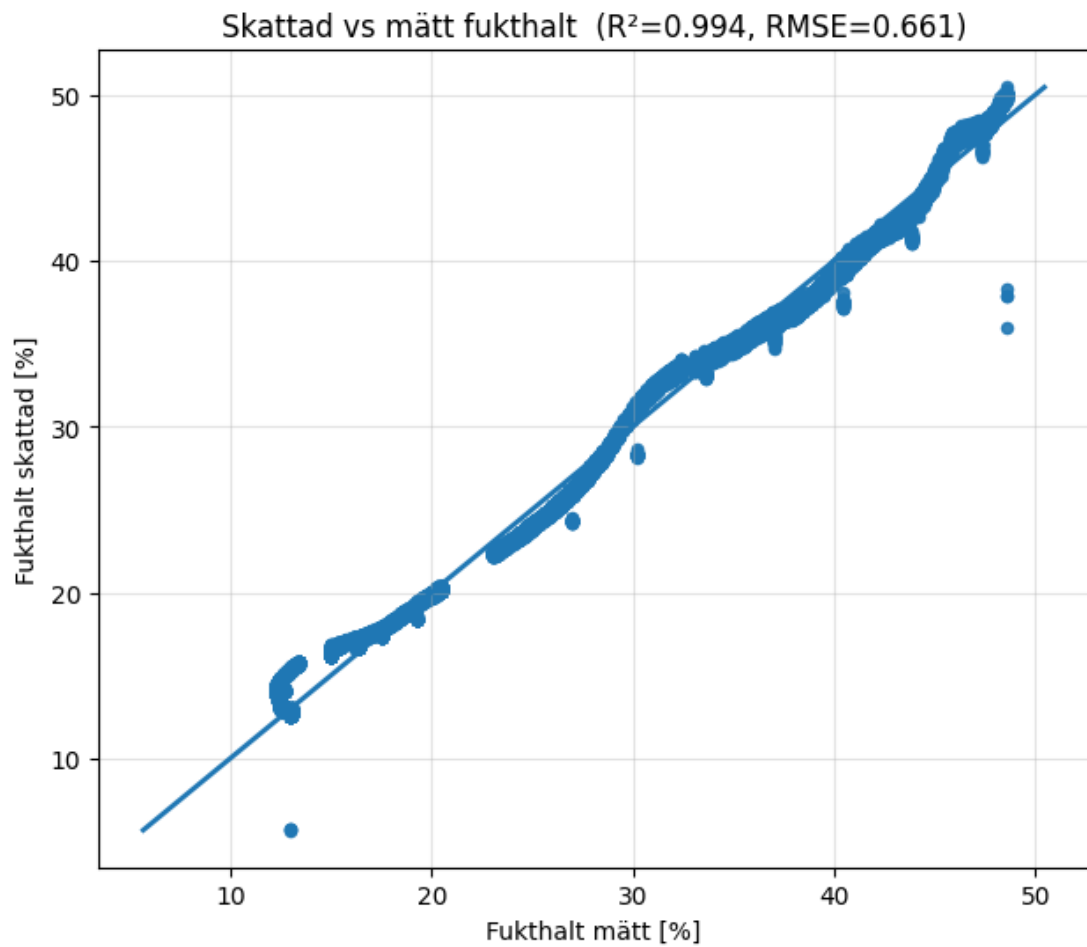
Signalen och tidsfördröjningen stabiliserades efter ca 18 dygn. Puckeln som syns mellan 10–17 dygn berodde på en strömförlust till fläkten.



Figur A 27. Mikrovågsmätt + modellerad fukthalt samt referensmätt fukthalt som funktion av tid under torkning, baserat på initial signalbehandling.



Figur A 28. Beräknade dielektriska parametrar som funktion av tid under torkning, baserat på förbättrad signalbehandling. Överst: ϵ_r . Övre mitten: α_{energy} . Nedre mitten: α_{f_0} . Nedre: fukthalt (%).



Figur A 29. Jämförelse mellan mikrovågsmätt + modellerad fukthalt samt referensmätt fukthalt, baserad på förbättrad signalbehandling. Den mikrovågsmätta fukthalten divergerar som mest från den referensmätta vid mycket låga respektive mycket höga fukthalter.

Bilaga 3 – Fördjupning av mätningar på rundvirkesbilar

Metod

Mätningar

19 mätningar på rundvirkesbilar med blandade dimensioner och träslag utfördes under perioden 2024-02-15 till 2025-08-14. Trissor från lasset kapades och torkades för att beräkna fukthalten. Med en infraröd spot-termometer utfördes också temperaturmätning av ändarna av stockarna.

För varje rundvirkesbil utfördes 2–5 mätningar vid olika positioner längs traven, totalt 82 mätningar. 16 av mätningarna utfördes vid Radarbolagets kontor, där rundvirkesbilen backade in i labbet för mätning. Tre av mätningarna utfördes vid demonstrationsinstallationen vid Johannes biokraftvärmeverk. I båda fallen placerades en sändare på en sida av traven och en mottagare på andra (Figur A 30). Avståndet på bredden av traven var 2,32 meter.

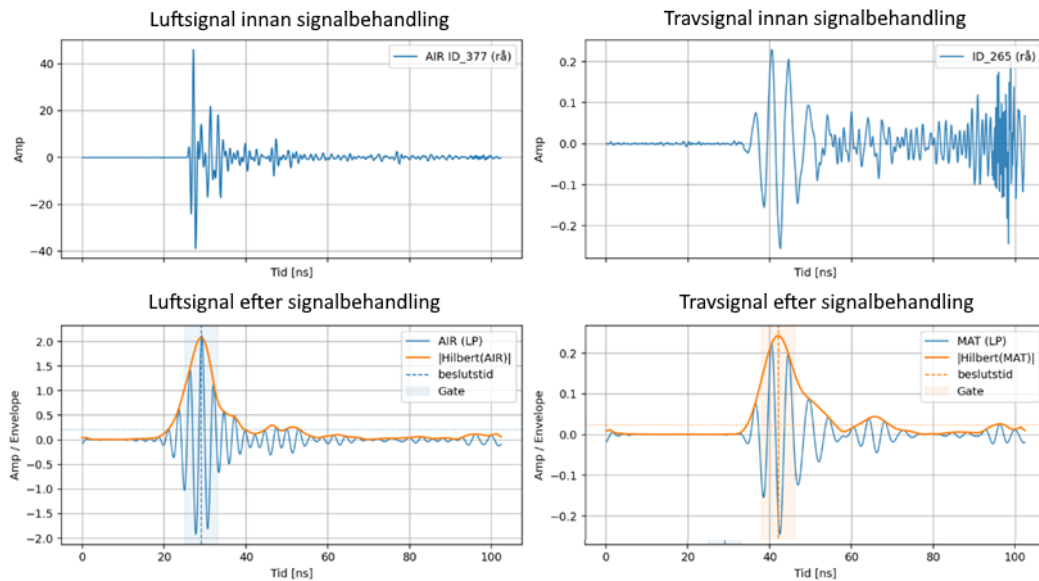


Figur A 30. Vänster: mätning hos Radarbolaget (mätarna/antennerna syns som silvriga lådor). Höger: mätning på Johannes biokraftvärmeverk (ena mätaren syns som en blå låda). Foton: Radarbolaget.

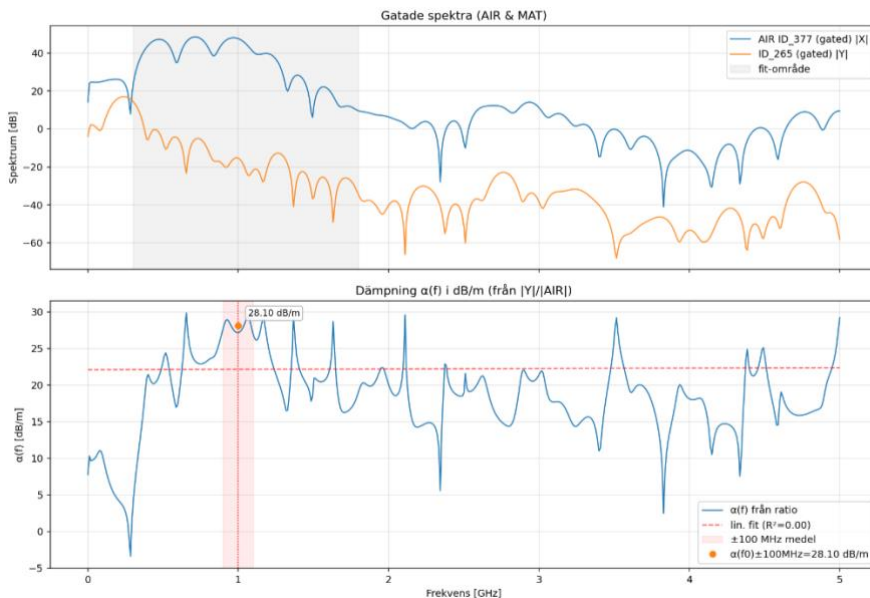
Signalbehandling

Den relativa permittiviteten ϵ_r beräknas genom att mäta tidsskillnaden mellan mätningen i luft $R_{X_{luft}}$ och mätningen genom stockarna $R_{X_{trave}}$. För att göra beräkningen mer robust mot multipla reflektioner och andra störningar lågpasfilteras signalen först (Figur A 31). Efter det beräknas den analytiska signalen, varav toppen på den får avgöra tiden för signalen.

Dämpningen beräknas på två sätt. För parametern α_{energy} beräknas den från den totala energin i tidsdomänen i ett valt område runt toppen av den analytiska signalen (övre delen av Figur A 32). För parametern α_{f0} beräknas den i en omgivning (± 100 MHz) kring centerfrekvensen 1,0 GHz (nedre delen av Figur A 32).



Figur A 31. Exempel på signalbehandling vid mätning på rundvirkesbil. Övre vänster: rå mottagarsignal med enbart luft ($R_{x_{luft}}$). Övre höger: rå mottagarsignal med stockar ($R_{x_{trave}}$). Nedre vänster: behandlad mottagarsignal med enbart luft. Nedre höger: behandlad mottagarsignal med stockar.



Figur A 32. Exempel på beräkning av dielektriska parametrar vid mätning av rundvirkesbil. Övre: beräkning av α_{energy} från frekvensdomänen, där kurvorna visar $R_{x_{luft}}$ och $R_{x_{trave}}$. Nedre: beräkning av α_{f0} .

Packningstäthet antal stockar i linje och diameter

För varje mätning beräknades medeldiametern på de trissor som togs per lass. Den beräknades genom att mäta omkretsen och räkna ut diametern.

Ett nyckeltal för antal stockar beräknades för varje rundvirkesbil. I höjd med antennerna räknades antal stockar längs en tänkt horisontell linje (Figur A 33 och Figur A 34).

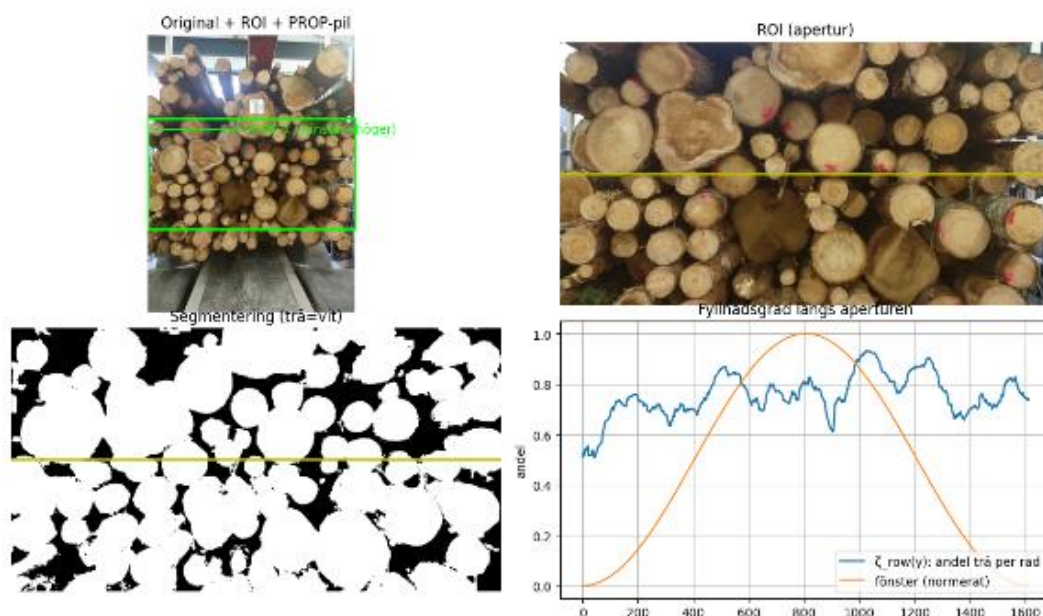


Figur A 33. Exempel på beräkning av medelstockdiametern hos klena stockar. Medeldiametern för stockarna längs den gröna linjen beräknades till 9 cm. Foto: Radarbolaget.



Figur A 34. Exempel på beräkning av medelstockdiametern hos klena stockar. Medeldiametern för stockarna längs den gröna linjen beräknades till 14 cm. Foto: Radarbolaget.

Utvecklingsarbete gjordes också kring hur man med bildbehandling kan beräkna ett mer noggrannare värde på packningstätheten. Figur A 35 visar ett exempel på den föreslagna bildbehandlingen. Den kräver dock perfekta ljusförhållanden och att fotot är taget med långt avstånd så att inte perspektivet blir fel.



Figur A 35. Metodik för beräkning av packningstäthet. Antalet vita områden (rundvirkesstockar) respektive svarta områden (luft) beräknades genom bildanalys. Beräkningen gjordes horisontellt i bilden vid liknande höjd som antennerna och viktades för att ge större betydelse åt mitten av bilden. I detta exempel blev packningstätheten 0,782.

Påverkan från torrdensitet

En uppskattning av torrdensiteten för rundveden på lastbilarna har utförts på de trissor som kapades. Omkretsen mättes med ett måttband och höjden på trissan bestämdes med en tumstock för beräkning av volymen. Beräkningen av radien genom att mäta omkretsen borde bli tämligen god, höjdberäkningen blev dock osäker då trissorna inte kapades rakt.

Ökad torrdensitet ger högre värde på permittiviteten vid samma fukthalt. G.I Torgovnikov mätte upp skillnaderna enligt nedan (Figur A 36) i sin bok "Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials". Streckade linjer är vid samma frekvens (1 GHz) som vi använt i våra mätningar.

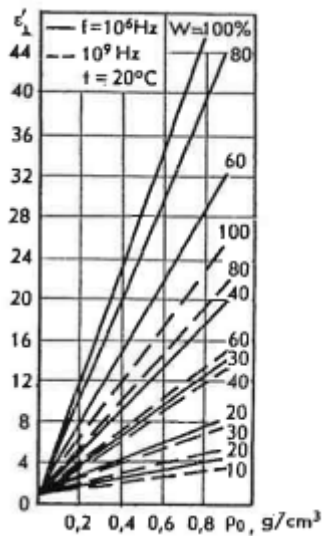
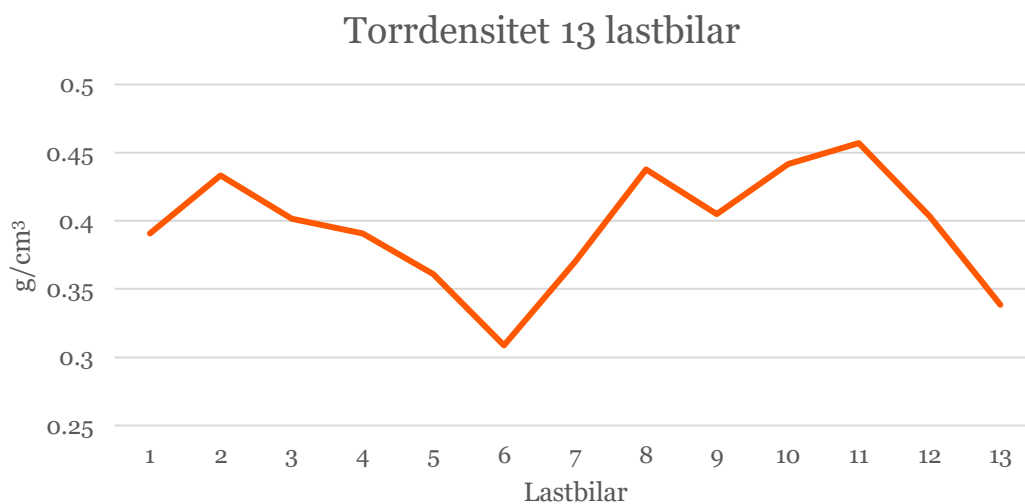


Fig. 5.7. Dependence of the dielectric constant ϵ' on wood density and moisture content at frequencies of 10^6 and 10^9 Hz and temperature $t = 20^\circ\text{C}$: ρ_0 density value of oven-dry wood; W moisture content

Figur A 36. Sambandet mellan permittiviteten och fukthalt hämtat från boken Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials av G.I. Torgovnikov.

Från diagrammet kan man se att ϵ' förhåller sig linjärt mot torrdensiteten. Vid en fuktkvot (torrbaserad) på 60 procent som är lika som 37,5 procent i fukthalt (vattenbaserad) så skiljer sig ϵ' från ca 7 till ca 14 om torrdensiteten ökar från 0,4 g/cm³ till 0,8 g/cm³. Träslagen skiljer sig mycket åt. Furu och gran har torrdensitet mellan 0,4-0,5 g/cm³ i medel, medan björk har ett medel kring 0,6 till 0,8 g/cm³. I vårt dataset där stockarnas temperatur var tempererade (högre än 3 °C) hade vi bara tall eller tall och gran blandat. I [Figur A 37](#) visas medeltorrdensiteten för 13 av de 16 lastbilar som vi mätte torrdensiteten på.



Figur A 37. Torrdensiteten på 13 av de 16 lastbilar med stockar som har högre temperatur än 3 grader som vi mätte torrdensiteten på.

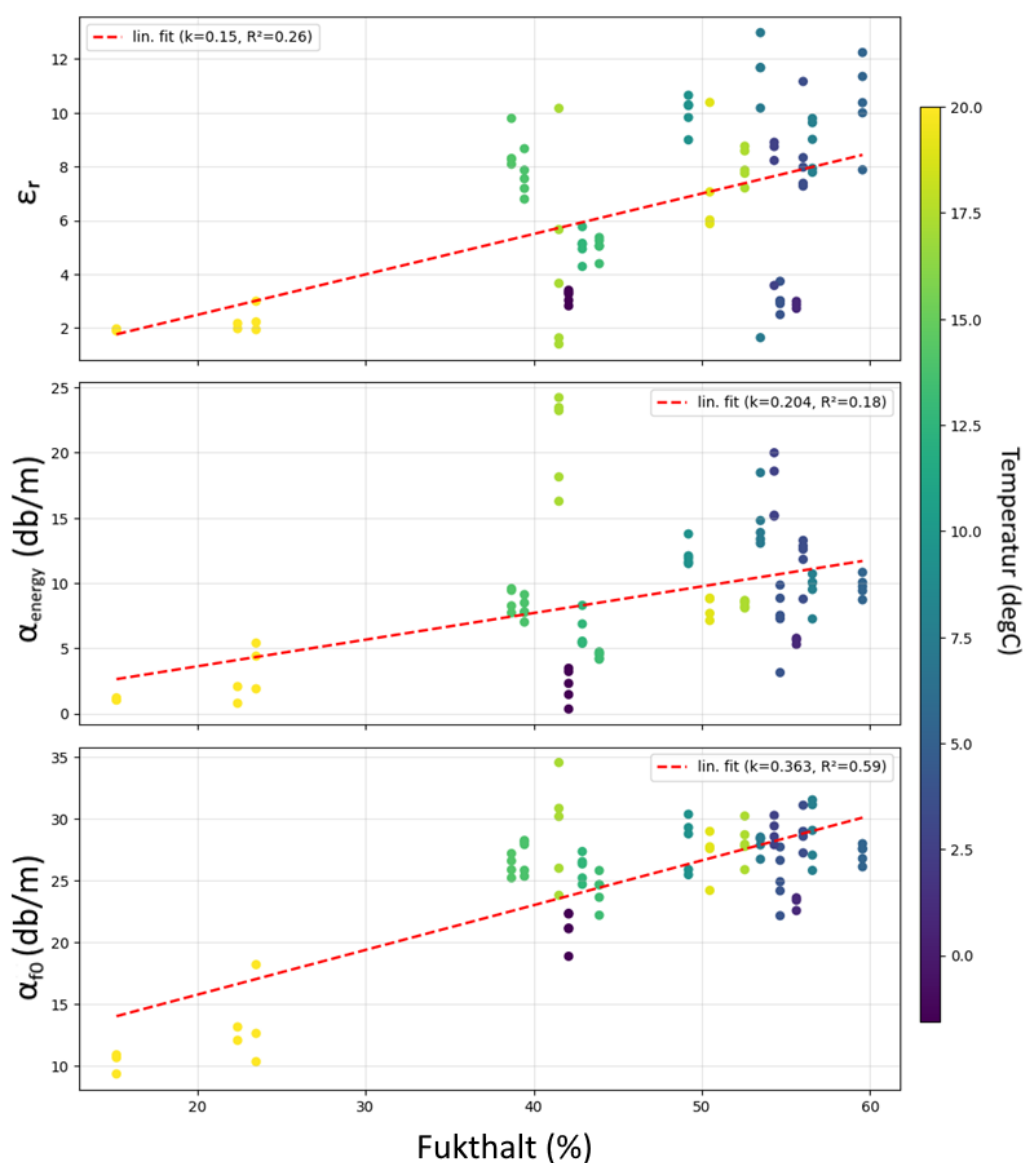
Mätningarna visar att stockarna ligger i spannet runt 0,4 g/cm³. För en av lastbilarna som hade en temperatur under 3 grader var hela lasset björk, för den mättes torrdensiteten till 0,7 g/cm³. Även då mätningarna av torrdensiteten bör vara behäftade med ganska stora

fel på grund av oregelbundna trissor och små sampel så understryker mätningarna de teoretiska värdena.

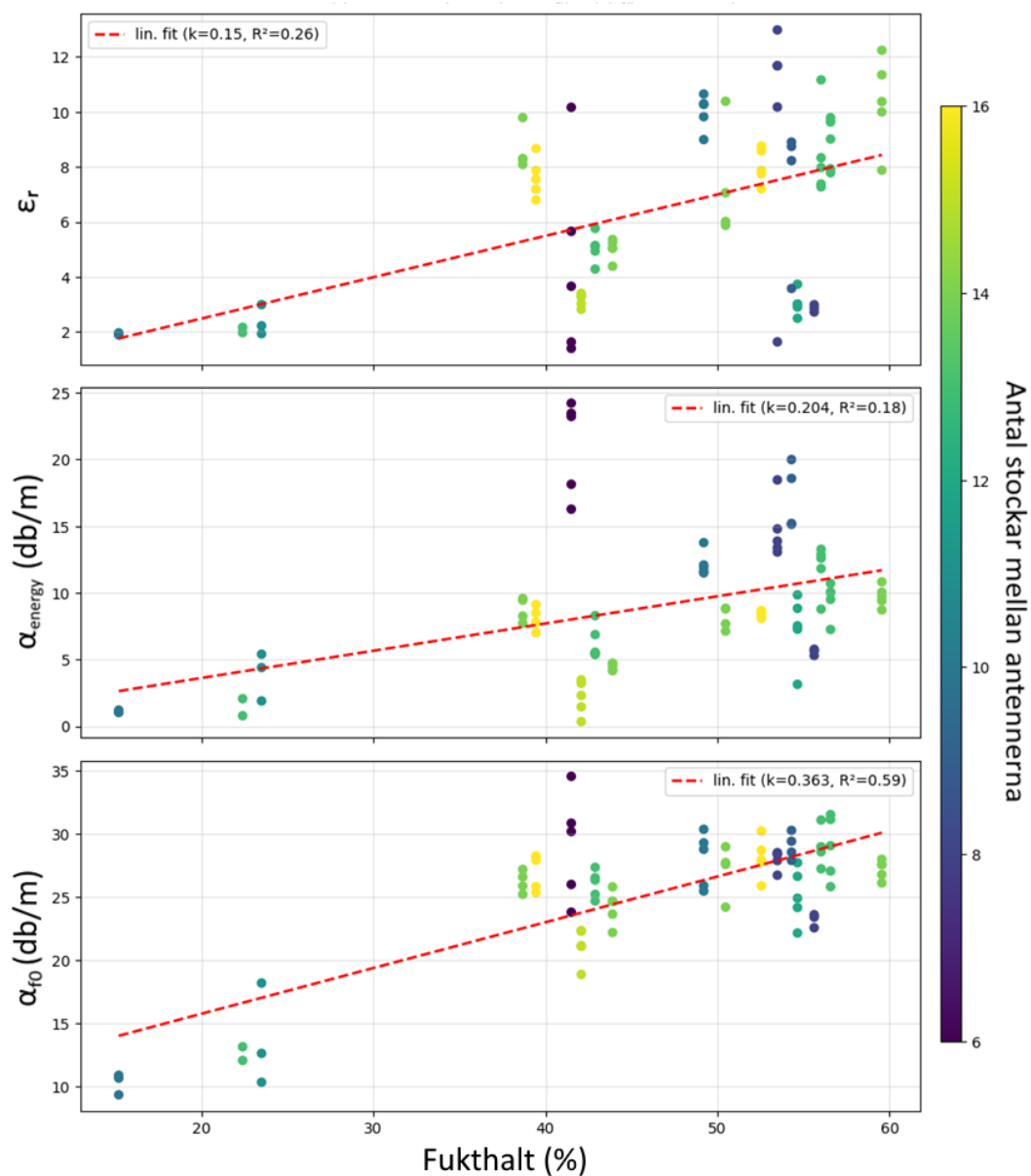
Även då vi inte hade möjligheten att visa resultat på det vid våra mätningar, så bör torrdensiteten för olika träslag vara med i beräkningen av packningsgraden vid en fullskalig modell.

Resultat

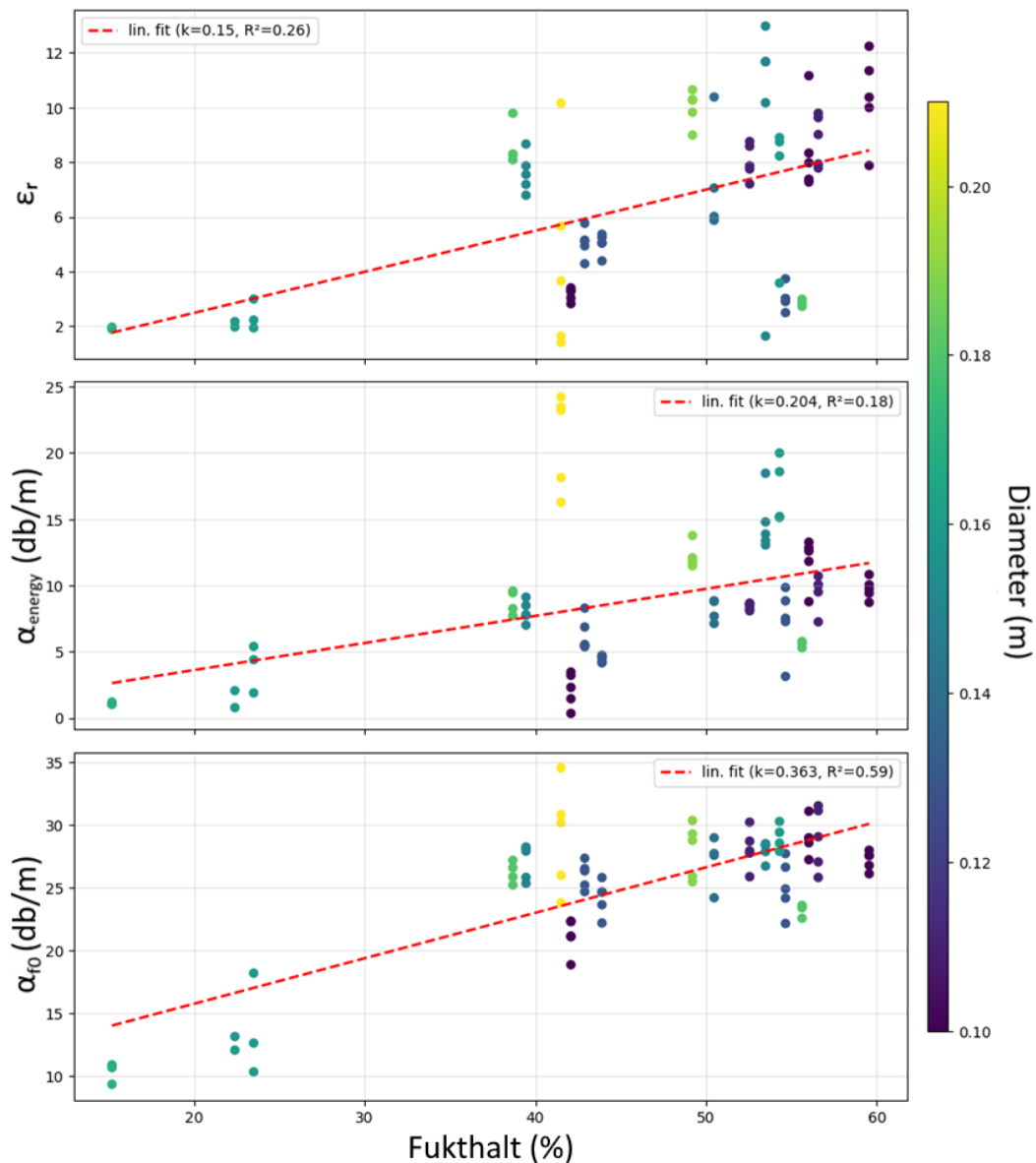
Genom att göra en enkel anpassning mot fukthalten kan man bestämma vilka parametrar som passar bäst mot fukthalten. Genom att färgkoda mätningar för antingen temperatur (Figur A), antal stockar (Figur A) eller diameter (Figur A) går det att se om det är några mätningar som sticker ut.



Figur A 36. Variation av temperatur vid mätning av rundvirkesbilar. Graferna visar de dielektriska parametrarna ϵ_r (överst), α_{energy} (mitten) och α_{r0} (underst) mot fukthalt. Färgkodningen visar olika temperaturer.



Figur A 37. Variation av antal stockar mellan antennerna vid mätning av rundvirkesbilar. Graferna visar de dielektriska parametrarna ϵ_r (överst), α_{energy} (mitten) och α_{f0} (underst) mot fukthalt. Färgkodningen visar olika antal stockar i linje.



Figur A 40. Variation av stockdiameter vid mätning av rundvirkesbilar. Graferna visar de dielektriska parametrarna ϵ_r (överst), α_{energy} (mitten) och α_{r0} (underst) mot fukthalt. Färgkodningen visar diametern på stockarna.

Resultatet från analysen av graferna är att antalet stockar i linje och diametern har betydelse. Många av de punkter som inte riktigt passar har få antal stockar i linje och hög diameter. Vad gäller temperaturen bör bara de mätningar där man vet att stockarna inte är frysta tas med. Då det är få antal mätningar är det inte trovärdigt att bygga en stor modell kring resultaten, men en enkel linjär anpassning ger en indikation vilka parametrar som tillsammans bäst beskriver fukthalten och en indikation på noggrannheten i mätningen (Tabell A 5).

Tabell A 5. Tabell över översättningsmodeller (anpassningar) med olika kombinationer av parametrar vid jämförelse med uppmätt fukthalt för värden med temperaturen över 3 grader. n = antal mätvärden.

Modell	n	R2	RMSE
$\varepsilon_r + \alpha_{f0} + \text{diameter} + \text{temperatur}$	71	0,875607	3,983519
$\alpha_{f0} + \text{diameter} + \text{temperatur}$	71	0,86233	4,190722
$\varepsilon_r + \alpha_{\text{energy}} + \text{diameter} + \text{temperatur}$	71	0,830519	4,649738
$\varepsilon_r + \alpha_{f0} + \text{diameter}$	71	0,819838	4,794026
$\alpha_{f0} + \text{temperatur}$	71	0,798137	5,074544
$\alpha_{f0} + \text{diameter}$	71	0,794818	5,116095
$\alpha_{\text{energy}} + \text{diameter} + \text{temperatur}$	71	0,785803	5,227276
$\varepsilon_r + \alpha_{\text{energy}} + \text{diameter}$	71	0,784379	5,244616
$\alpha_{\text{energy}} + \text{diameter}$	71	0,714713	6,032671
$\varepsilon_r + \alpha_{f0} + \text{antal stockar}$	71	0,67754	6,413671
$\alpha_{f0} + \text{antal stockar}$	71	0,636224	6,812175
$\alpha_{\text{energy}} + \text{temperatur}$	71	0,610701	7,047092
$\varepsilon_r + \alpha_{\text{energy}} + \text{antal stockar}$	71	0,524182	7,790925
$\alpha_{\text{energy}} + \text{antal stockar}$	71	0,41806	8,616039

Följande ekvation gav bäst anpassning för mätningarna av rundvirkesbilar med temperatur över 3°C:

$$FH \approx b_0 + b_1 \cdot \varepsilon_r + b_2 \cdot \alpha_{f0} + b_3 \cdot \text{Diameter} + b_4 \cdot \text{Temperatur} \quad [\text{Ekv. A5}]$$

Värdena på konstanterna b_i visas i Tabell A 6, medan utvärderingsmått visas i Tabell A 7.

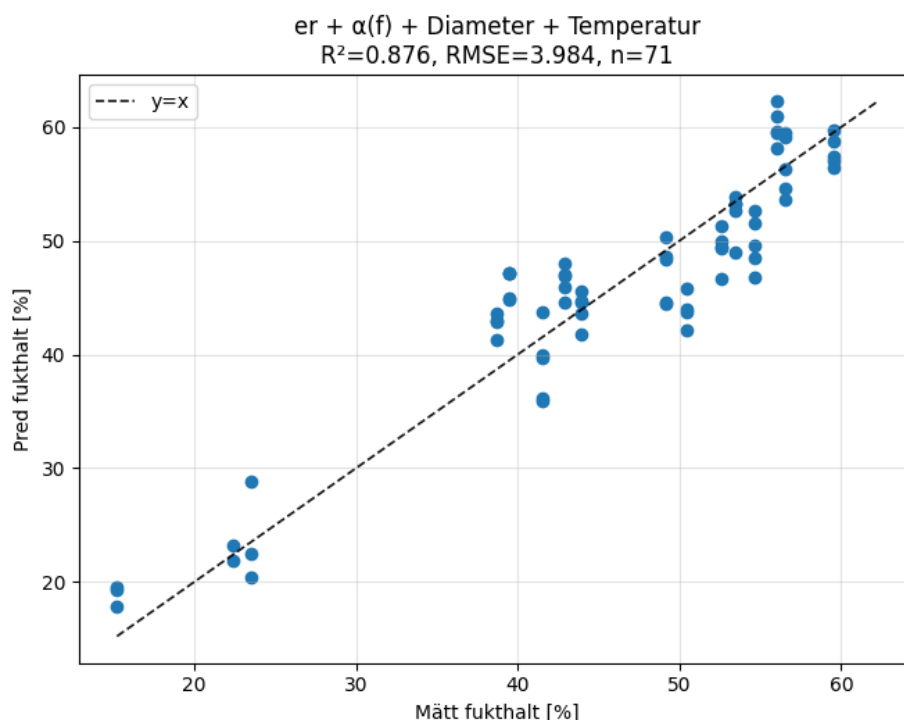
Tabell A 6. Värden på koefficienter för olika parametrar för den bästa modellen vid mätning av rundvirkesbilar.

Koefficient	Parameter	Enhet	Värde
b_0	Intercept		35,4446
b_1	ε_r		0,4899
b_2	α_{f0}	db/m	1,1211
b_3	Stockmedeldiameter	m	-97,45
b_4	Travtemperatur	°C	-0,6221

Tabell A 7. Utvärderingsmått för den bästa modellen vid mätning av rundvirkesbilar.

Utvärderingsmått	Värde
Antal mätpunkter	71
R2	0,876
RMSE	3,984

Anpassningen mellan mätpunkterna och översättningsmodellen visas i Figur A .



Figur A 41. Referensmätt (x-axeln) jämfört med mikrovågsmätt fukthalt (y-axeln) vid mätning på rundvirkesbilar. Den streckade linjen visar bästa anpassningen (översättningsmodellen) och de blå cirkelarna representerar mätvärden.

Tillägg av torrdensitet i modellen

Följande ekvation gav bäst anpassning för mätningarna av rundvirkesbilar med temperatur över 3 °C:

$$FH \approx b_0 + b_1 \cdot \varepsilon_r + b_2 \cdot \alpha_{f0} + b_3 \cdot Diameter + b_4 \cdot Temperatur + b_5 \cdot Densitet \quad [\text{Ekv. A5}]$$

Värdena på konstanterna b_i visas i Tabell A 8 Tabell A 6, medan utvärderingsmått visas i Tabell A 9.

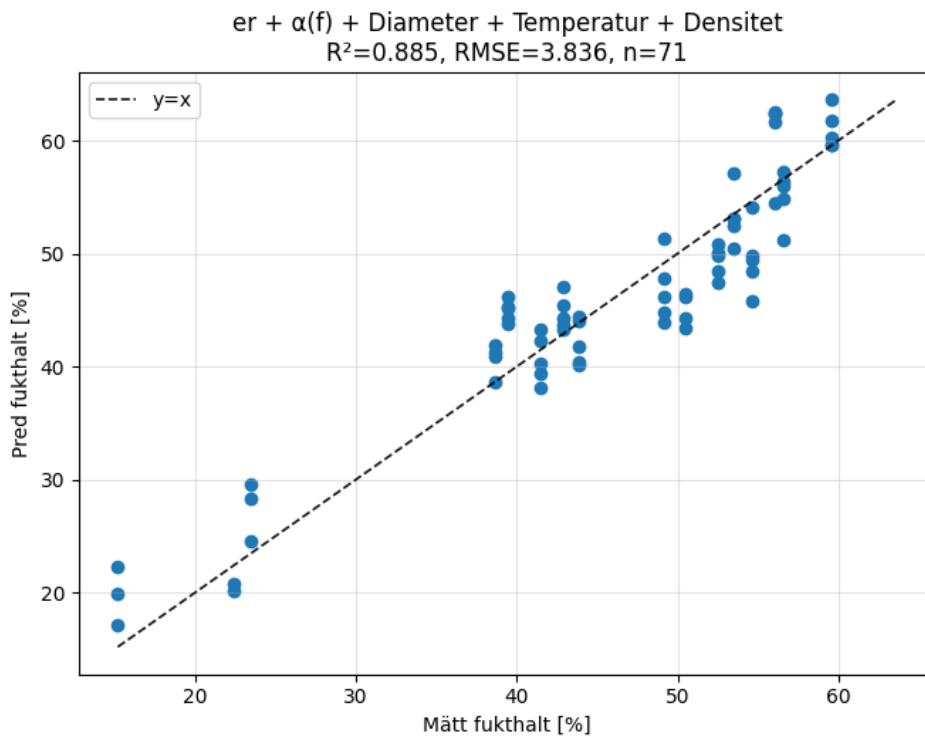
Tabell A 8. Värden på koefficienter för olika parametrar för den bästa modellen vid mätning av rundvirkesbilar med temperatur och densitet inkluderad i modellen.

Koefficient	Parameter	Enhet	Värde
b_0	Intercept		44,3021
b_1	ε_r		0,4658
b_2	α_{f0}	db/m	1,4087
b_3	Stockmedeldiameter	m	-132,4553
b_4	Travtemperatur	°C	-0,5603
b_5	Torrdensitet	g/cm ₃	-0,0240

Tabell A 9. Utvärderingsmått för den bästa modellen vid mätning av rundvirkesbilar.

Utvärderingsmått	Värde
Antal mätpunkter	71
R ²	0,885
RMSE	3,836

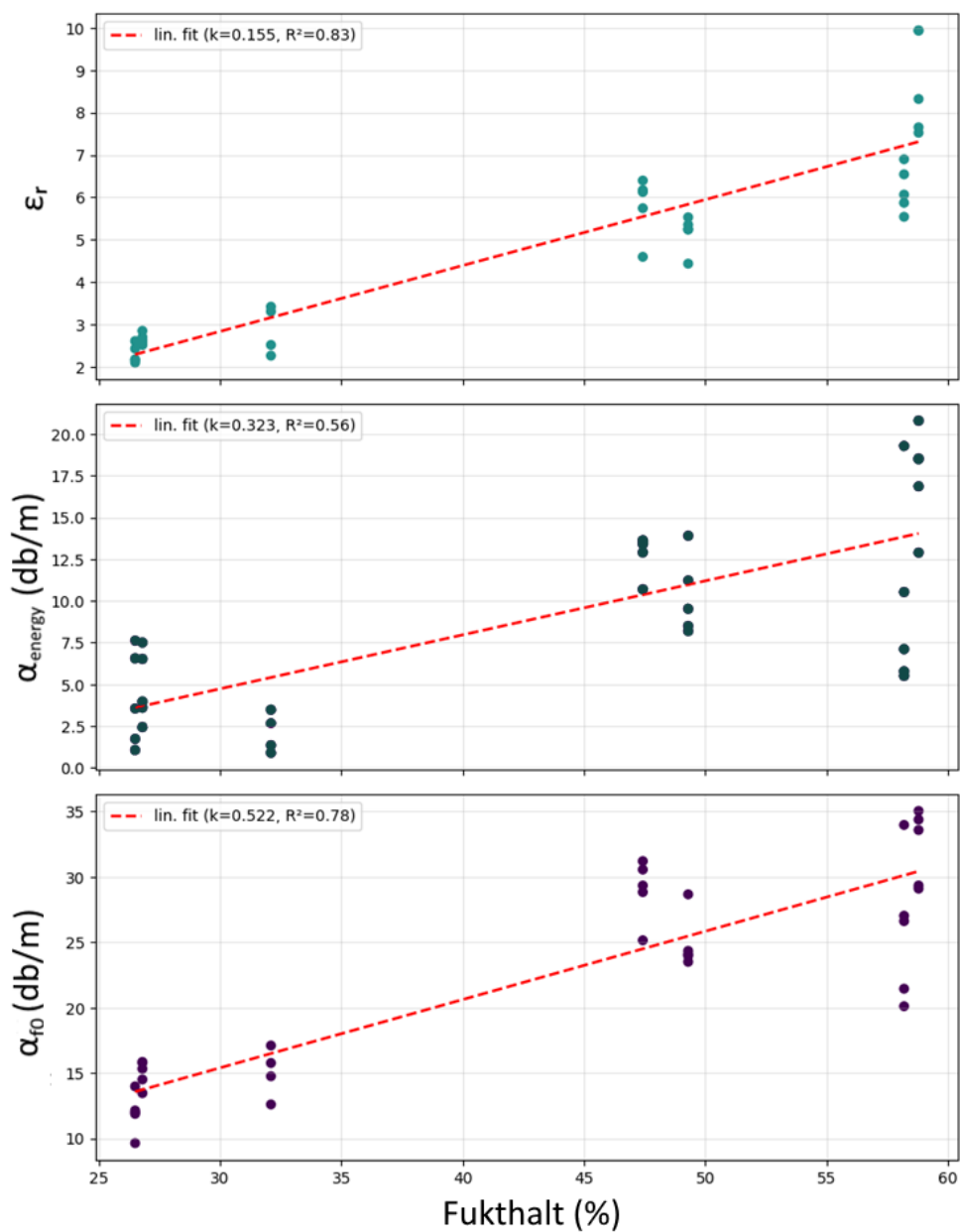
Test gjordes att använda torrdensiteten vid anpassningen mot fukthalten utan större märkbar skillnad. RMSE gick från 3,984 till 3,836 (Figur A).



Figur A 38. Referensmätt (x-axeln) jämfört med mikrovågsmätt fukthalt (y-axeln) vid mätning på rundvirkesbilar, där densiteten inkluderas i modellen. Den streckade linjen visar bästa anpassningen (översättningsmodellen) och de blå cirkarna representerar mätvärden.

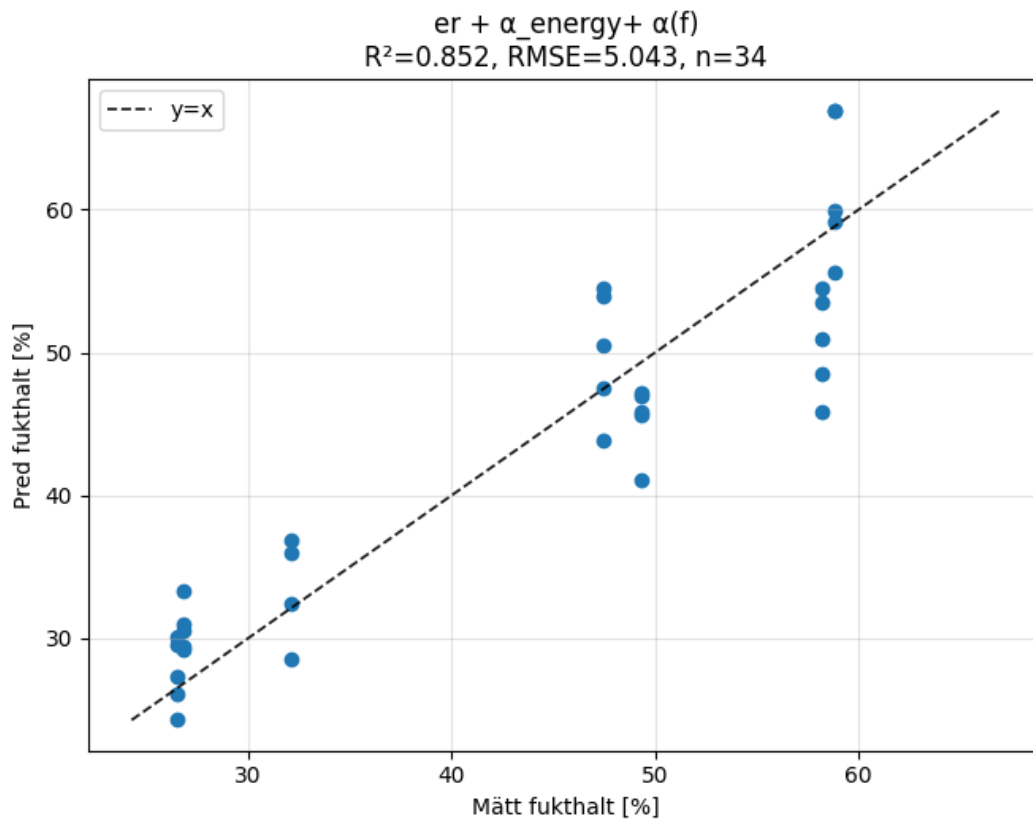
Bilaga 4 – fördjupning av mätningar på flisbilar

Under testperioden mättes sju bilar med flis. För varje flisbil togs fem till nio referensprover från olika ställen i skäppan, som sedan fukthaltsbestämdes med ugnsmetoden. Figur A 39 visar de dielektriska parametrarna ϵ_r , α_{energy} och α_{f0} mot respektive referensprovs fukthalt.



Figur A 39. Dielektriska parametrar mot fukthalt (%) vid mätning av flisskäppor. Överst: ϵ_r . Mitten: α_{energy} . Nederst: α_{f0} .

Då temperaturen ej loggades vid tillfället för mätningarna kunde enbart parametrarna ε_r , α_{energy} och α_{f0} anpassas mot varandra. Bäst anpassning gav en kombination av ε_r , α_{energy} och α_{f0} . Denna anpassning visas i Figur A .



Figur A 40. Referensmätt fukthalt (x-axel) jämfört med mikrovågsmätt fukthalt (y-axel) vid mätning på flisbilar. Den streckade linjen visar bästa anpassningen (översättningsmodellen) och de blå cirkarna representerar mätvärden. Notera att för varje mikrovågsmätt fukthalt finns ett flertal referensmätta flisprover från olika positioner i skäppan.

Den bästa översättningsmodellen vid mätning av flisbilar med anpassning mot enskilda referensprov var:

$$FH \approx b_0 + b_1 \cdot \varepsilon_r + b_2 \cdot \alpha_{\text{energy}} + b_3 \cdot \alpha_{f0} \quad [\text{Ekv. A6}]$$

Värdena på konstanterna b_i visas i Tabell A 10, medan utvärderingsmått visas i Tabell A 11.

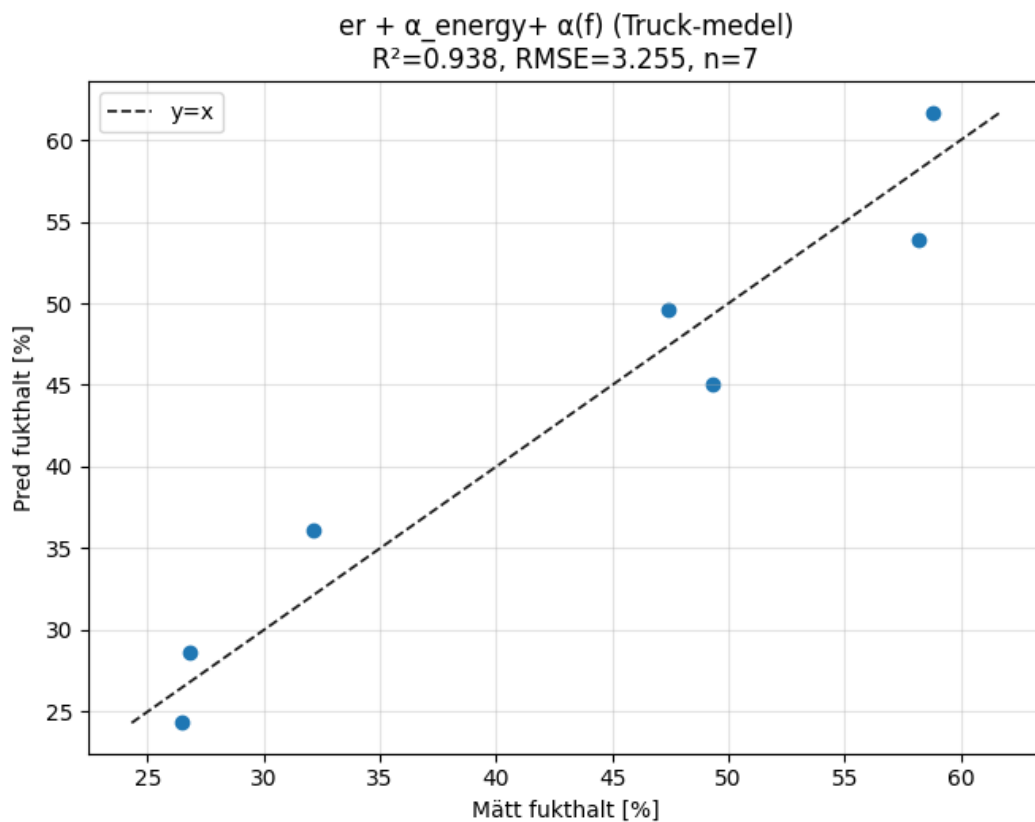
Tabell A 10. Värden på koefficienter för olika parametrar för den bästa modellen vid mätning av flisbilar och modellanpassning mot enskilda referensprov.

Koefficienter	Parameter	Enhet	Värde
b_0	Intercept		15,2303
b_1	ε_r		3,5713
b_2	α_{energy}	db/m	-0,8136
b_3	α_{f0}	db/m	-97,45

Tabell A 11. Utvärderingsmått för den bästa modellen vid mätning av flisbilar anpassning mot enskilda referensprov.

Utvärderingsmått	Värde
Antal mätpunkter	34
R2	0,852
RMSE	5,043

Om modellen anpassas mot medelvärdet av referensfukthaltsproverna för varje flisbil, istället för de enskilda referensproverna, blir resultatet enligt Figur A :



Figur A 41. Referensmätt (x-axeln) jämfört med mikrovågsmätt fukthalt (y-axeln) vid mätning på flisbilar. Den streckade linjen visar anpassningen (översättningsmodellen) och de blå cirkarna representerar mätvärden.

Modellen innehåller samma parametrar som tidigare (Ekvation A 6), men med andra koefficienter för bästa anpassning (Tabell A 12 och Tabell A 13).

Tabell A 12. Värden på koefficienter för olika parametrar för den bästa modellen vid mätning av flisbilar och modellanpassning mot medelvärdet av referensproven.

Koefficienter	Parameter	Enhet	Värde
b_0	Intercept		9,5445
b_1	ϵ_r		5,1664
b_2	α_{energy}	db/m	-2,4075
b_3	α_{f0}	db/m	-1,7858

Tabell A 13. Utvärderingsmått för den bästa modellen vid mätning av flisbilar med anpassning mot medelvärdet av referensproven.

Utvärderingsmått	Värde
Antal mätpunkter	7
R2	0,938
RMSE	3,255