

Upptäcka dämpningsvariationer av TV-signaler som passerar genom skog

Utveckling och utvärdering av experimentellt mätsystem för att undersöka dämpningsvariationer i skog, en möjlig metod för att övervaka vattenstress och torka

Kandidatarbete vid Rymd-, geo- och miljövetenskap (SEEX16)

Ella Backlund
Alice Engström
Carl Hernqvist Larsson
Andreas Wallberg
Jonathan Wyssbrod

INSTITUTIONEN FÖR MILJÖ- OCH ENERGIVETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2026

Upptäcka dämpningsvariationer av TV-signaler som passerar genom skog

Utveckling och utvärdering av experimentellt mätsystem för att undersöka dämpningsvariationer i skog, en möjlig metod för att övervaka vattenstress och torka

Ella Backlund
Alice Engström
Carl Hernqvist Larsson
Andreas Wallberg
Jonathan Wyssbrod



CHALMERS

Institutionen för Miljö- och energivetenskaper
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2026

Upptäcka dämpningsvariationer av TV-signalerna som passerar genom skog

Ella Backlund, Globala System, ellabac@chalmers.se
Alice Engström, Globala System, aliceng@chalmers.se
Carl Hernqvist Larsson, Globala System, carlher@chalmers.se
Andreas Wallberg, Teknisk Fysik, andwallb@chalmers.se
Jonathan Wyssbrod, Globala System, wyssbrod@chalmers.se

© Ella Backlund, Alice Engström, Carl Hernqvist Larsson, Andreas Wallberg, Jonathan Wyssbrod, 2026.

Handledare: Albert Monteith, Institutionen för Miljö- och energivetenskaper
Handledare: Theresa Leistner, Institutionen för Miljö- och energivetenskaper
Examinator: Lars Ulander, Institutionen för Miljö- och energivetenskaper

Kandidatarbete 2026
Institutionen för Miljö- och energivetenskaper
- Tidigare Institutionen för Rymd-, geo- och miljövetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Skriven i L^AT_EX
Göteborg, 17 juni 2026

Sammandrag

Det är av vikt att undersöka torka i skog för att förebygga bränder och skadedjursangrepp. I det här kandidatarbetet undersöks därför möjligheten att upptäcka vattenstress och torka i skog med hjälp av signaler från TV-master. Vatten i träden dämpar TV-signaler. Eftersom trädens vatteninnehåll förändras över dygnet varierar också dämpningen av TV-signalerna som passerar genom skogen. Genom att mäta variationer i mottagen signalstyrka från TV-masten kan man därför identifiera förändringar i skogens vatteninnehåll. I projektet skapades två mätsystem vars syfte var att mäta signalstyrkan från Brudaremossenmasten i Göteborg samt samla in väderparametrar under dagtid, från kl 09:00 till 16:00. Utöver detta har data från radartornet BorealScat-2 analyserats för att jämföras med fältmätningen vid Brudaremossenmasten.

Fältmätningen genomfördes i Delsjöområdet, där ett mätsystem placerades så att TV-signalen enbart passerar genom luft och det andra så att signalen också passerar genom ett stycke skog. Genom att studera skillnaden i mottagen effekt mellan de två mätsystemen utlästes att signalen dämpades successivt mindre från kl 09:00 till kl 13:00, då det minsta värdet uppnåddes. Den maximala skillnaden i dämpning uppgick till 2 dB. Detta stämmer väl överens med teori, där trädens vatteninnehåll följer samma nedåtgående trend, samt resultatet från BorealScat-2. Resultatet visar på möjligheten att observera dygnsvariationer av vatteninnehåll med signaler från TV-master, men för att komma fram till om det går att upptäcka torka under en längre period krävs vidare studier med mätningar på olika platser, väderförhållanden och under längre tid.

Detecting variation in attenuation of TV-signals propagating through forests

Ella Backlund, Global Systems, ellabac@chalmers.se
Alice Engström, Global Systems, aliceng@chalmers.se
Carl Hernqvist Larsson, Global Systems, carlher@chalmers.se
Andreas Wallberg, Engineering Physics, andwallb@chalmers.se
Jonathan Wyssbrod, Global Systems, wyssbrod@chalmers.se

Department of Environmental and Energy Sciences
Chalmers University of Technology

Abstract

It is of importance to investigate drought in forests to prevent wildfires and insect infestations. Therefore, this bachelor's thesis investigates the possibility to detect water scarcity and drought in forests with signals from TV-masts. Water in trees attenuates TV-signals. Since the water status in trees varies throughout the day, the attenuation of TV-signals through trees also varies. By measuring variation in power from the received signal it is possible to detect changes in the water content of the forest. In this project two separate systems were constructed with the purpose of measuring the power of the received signal from the Brudaremossen mast in Gothenburg, together with surrounding weather parameters. In addition, data from the radar tower BorealScat-2 has been analysed and compared with the results from Brudaremostenmasten.

The experiment was carried out in the Delsjö area, where one system was placed such that the signal solely propagated through air, and the other such that the signal also propagated through forest vegetation. Studying the difference in received power from the two systems, it was observed that the attenuation of the TV-signal decreased continuously with time, and reached its lowest value midday. The maximal difference in attenuation amounted to 2,0 dB. This strongly agrees with theory, where the water content of trees follow the same descending trend, as well as the results from BorealScat-2. The results show the feasibility to observe daily fluctuations in water content with signals from TV-masts. To further investigate whether identifying drought is possible, additional studies in different locations, weather conditions and during longer time periods are necessary.

Förord

Tack

Vi vill rikta ett stort tack till våra handledare, Albert Monteith och Theresa Leister, för deras kontinuerliga stöd genom projektet. Ett extra stort tack till Albert som har bidragit med allt från förklaringar av fysikaliska samband, beställningar av produkter till hjälp med logistik kring utförandet av mätningarna.

Vi vill också tacka institutionen för Miljö- och energivetenskaper samt Adlerbertska forskningsstiftelsen (beslut 2024-09-17) som har tillhandahållit och finansierat utrustning som användes vid mätningarna.

Till läsaren

Rapporten har ett omfattande avsnitt för bilagor. Dessa delar är inte kritiska för att förstå rapportens innehåll men är användbara för den som vill återskapa mätningen som genomfördes och förklarar metoden mer ingående.



Översiktligt collage associerat till projektet. Översta raden till vänster: Radartornet vid Svartberget Försökspark. Översta raden till höger: Mätantennen som använts vid fältmätning. Nedersta raden till vänster: Uppstart av fältmätning. Nedersta raden till höger: Översikt över vissa av mätsystemets komponenter.

Nomenklatur

Definitioner

Luftsystemet	Syftar till mätsystemet som mäter signalstyrka där signalen endast färdas genom luft, d.v.s., fri sikt till masten.
Mätserie	En serie av mätningar med avgränsning i tid.
Skogssystemet	Syftar till mätsystemet som mäter signalstyrka där signalen även färdas genom skog.

Förkortningar

A/D	Analog till Digital
AVP	Actual Vapour Pressure
KI	Konfidensintervall
LST	Local Solar Time
OFDM	Ortogonal Frekvensdelningsmultiplex
RF	Radiofrekvens
RPI	Raspberry Pi
RX	Receiver
SVP	Saturated Vapour Pressure
TX	Transmitter
UTC	Coordinated Universal Time
VPD	Vapour Pressure Deficit

Begrepp

Autokorrelation	Ett normaliserat mått på hur mycket två efterföljande sampel korrelerar.
Autokovarians	Ett mått på hur mycket två efterföljande sampel samvarierar.
Bandpassignal	En signal som verkar inom ett frekvensområde med en centerfrekvens mycket större än 0 Hz.
Basbandssignal	En signal som verkar inom ett frekvensområde centrerat kring 0 Hz.
Bärvåg	En högfrekvent sinusformad signal som används för att transportera information mellan sändarantenn och mottagarantenn.
Datalogger	En apparat som samlar in och lagrar mätdata från anslutna mätinstrument.
DVB-T/T2	Står för 'Digital Video Broadcasting'. Standard för marksänd digital TV. DVB-T2 är nyare, mer effektiv och används för HD-sändningar.
Ethernet	En standard för trådbunden kommunikation mellan datorer i ett nätverk.
Fädning	Variationer i en signals styrka orsakat av konstruktiv eller destruktiv interferens (i rum och tid).
GPIO	Även kallat 'General-purpose input/output'. En serie av anslutningar (vanligtvis i form av stift) på en dator som kan anslutas till elektriska kretsar. Anslutningarna kan programmeras för att skicka eller ta emot elektriska signaler.
Kubisk spline	Matematisk funktion som med hjälp av tredjegradspolynom skapar mjuka kurvor genom en uppsättning datapunkter.
Korspolariserad	Cross-polarized på engelska, beskriver den polarisationen som är ortogonal mot den ursprungliga polarisationen.
Modulering	Processen att ändra egenskaper hos en bärvåg (frekvens, amplitud, fas) för att överföra information.
Overflow	När TV-signalen samplas kan sampel gå förlorade mellan SDR och dator på grund av kapacitetsbrist i datorn. Denna händelse kallas för en overflow.
Sampel	Diskreta mätvärden som erhålls genom sampling av en kontinuerlig signal.
Sampolariserad	Co-polarized på engelska, beskriver den polarisationen som antennen är avsedd att sända och ta emot.
SFP port	En typ av port för dataöverföring som stödjer anslutning till flera typer av medium, exempelvis ethernet.

Rasterdata	Ett rutnät av till exempel kartdata där varje pixel har ett tillhörande värde, exempelvis höjddata.
Underbärvåg	Används då flera signaler ska överföras på en bärvågsfrekvens.
VNC	Även kallat 'Virtual Network Computing'. En typ av programvara som tillåter en dator att fjärrstyra en annan dator inom ett nätverk.

Innehåll

Nomenklatur	vii
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Frågeställning	2
1.4 Avgränsningar	3
2 Teori	4
2.1 Kommunikationssystem och radiovågor	4
2.1.1 Effekt från mätning av radiovågor	5
2.1.2 Teoretiskt beräknad effekt	7
2.1.3 Ortogonal frekvensdelningsmultiplex	9
2.1.4 Rayleighfördelning	9
2.1.5 Flervägsutbredning och Rayleighfädning	10
2.2 Trädens transpiration och vatteninnehåll	10
2.3 Dämpning i vegetation	11
2.4 Stokastiska tidsserier	14
3 Metod	16
3.1 Mätssystem	16
3.1.1 SDR, Mätantenn och Kalibrerings slinga	18
3.1.2 Datalogger (Raspberry Pi 4B)	20
3.1.3 Väderutrustning	21
3.1.4 Övrig hårdvara	24
3.2 Mätplatser	25
3.2.1 Svartberget	25
3.2.2 Brudaremossenmasten och närliggande områden	26
3.2.3 Val av mätplats	27
3.2.4 Avstånd och vinklar mot masten	28
3.3 Val av mätsekvens	30
3.4 Genomförande av mätning	31
3.5 Dataanalys	32
3.5.1 Radardata från BorealScat-2	32
3.5.2 Data från Brudaremossen	34
4 Resultat	36

4.1	Radardata från BorealScat-2	36
4.2	Mätningar från Brudaremossenmasten	42
4.2.1	Dämpning av TV-signaler genom skog	42
4.2.2	Tidsseriemätningar från luftsystemet	44
4.2.3	Tidsseriemätningar från skogssystemet	46
4.2.4	Polarisationens inverkan på dämpning	48
4.2.5	Statistisk inblick i mätdata	49
5	Diskussion	52
5.1	BorealScat-2	52
5.2	Brudaremossenmasten	52
5.3	Mätsekvens och statistisk fördelning	54
5.4	Felkällor	55
5.5	Vidare studier	56
5.6	Produktifiering	57
6	Slutsats	58
	Efterord	60
	Litteratur	61
A	Bilagor	68
A.1	GitLab-projekt med kod och data	68
A.2	Komponenttabell	69
A.3	Fördjupning SDR	69
A.3.1	Uteffektmätning av SDR	69
A.3.2	Utvärdering av antal overflows vid autonom drift av SDR	70
A.3.3	Test av förstärkarinställning	71
A.4	Fördjupning Raspberry Pi	73
A.4.1	Inställningar på Raspberry Pi	73
A.4.2	Skript på Raspberry Pi	74
A.4.3	GNU Radio skript	76
A.5	GPS-mottagare och tidssynkronisering	77
A.6	SDI-12 adapter	78
A.7	3D-utskrivningar	81
A.8	Beräkning av vinklar samt sträckor	83

1

Introduktion

1.1 Bakgrund

Skogen i Sverige har stor betydelse för klimat, miljö och ekonomi. Den fungerar som en viktig kolsänka och som en förnybar materialresurs och energikälla (Naturvårdsverket, 2024). Skogsindustrin är också en av Sveriges viktigaste exportsektorer vilket gör skogen väsentlig för Sveriges sysselsättning och ekonomiska stabilitet (Skogsindustrierna, 2025).

I takt med klimatförändringarna ökar påfrestningen på de svenska skogarna. I Sverige väntas högre temperaturer och högre förekomst av torra, vilket ökar risken för skadedjursangrepp och skogsbränder i skogarna. Konsekvenserna av detta blev särskilt tydligt 2018 då omkring 22 000 hektar skog förstördes till följd av skogsbränder (Bohlin, 2025).

Skog som är utsatt för torra under en längre period kan innebära att skogen riskerar att skadas och kan kallas för vattenstressad skog. Vattenstressad skog är särskilt sårbar eftersom en lägre fuktnivå innebär minskad motståndskraft mot skogsbrand och skadedjursangrepp såsom granbarkborren (Bohlin, 2025; Greiser m. fl., 2025). Att tidigt identifiera vattenstressad skog ökar möjligheten för skogsägare och myndigheter att vidta förebyggande åtgärder vilket skulle kunna minska omfattningen av de ekonomiska och ekologiska skador som skogsbränder och skadedjursangrepp innebär.

Mätning av växters vattenstatus är viktigt för att övervaka växternas fysiologiska tillstånd och bedöma risk för torra och brand i naturen. Även om provtagning av enskilda blad och skott i fält ger den mest exakta bedömningen av växters vattenstatus, är sådana metoder inte praktiska när uppskattningar behövs för stora vegetationsområden (Peden m. fl., 2021). För att uppnå detta krävs teknik som kan övervaka skogarnas tillstånd autonomt över stora områden. Radiovågor dämpas av vattenmolekyler i trädkronor, vilket innebär att signalens dämpning påverkas av trädens vatteninnehåll. Genom att mäta skillnaden i TV-signalens dämpning mellan två radiomottagare, en med fri siktlinje till masten och en vars signal dämpas av träd, finns potential att mäta variationer i trädens vatteninnehåll och upptäcka vattenstressförhållanden. Denna metod kan möjliggöra ett kostnadseffektivt sätt

att tidigt identifiera skogsbestånd med högre risk för skogsbrand och skadedjursangrepp.

Idag finns forskningssatelliter som övervakar torka i skog men problemet är att de inte upptäcker situationer med risk för torka tillräckligt tidigt och effektivt, eftersom mätningar sker med för stort mellanrum (Le m. fl., 2023). Det finns också annan forskning där GPS-signaler används för att övervaka vattenstressade träd som gett tydliga resultat av hur vatteninnehållet i träd förändras över tid (Humphrey & Frankenberg, 2023). Att använda signaler från TV-master för att mäta vatteninnehållet över tid är en alternativ metod med fördelen att signalkällan är starkare jämfört med GPS-satelliter och att den lägre frekvensen på TV-signalen kan tränga djupare in i skogen. Ytterligare en fördel med TV-signaler är att signalbehandlingen blir lättare eftersom man inte behöver skilja mellan flera satellitsändare. Dessutom finns det redan runt 600 TV-master i Sverige, vilket innebär att befintlig infrastruktur kan användas. Utifrån dessa fördelar är det av intresse att undersöka om TV-masters signaler är användbara eftersom de på ett effektivt sätt skulle kunna hjälpa till att identifiera områden med vattenstressad skog.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att undersöka om det med befintlig infrastruktur och radiomottagare är möjligt att övervaka torka i skog. Specifikt ska arbetet identifiera hur TV-signaler från Brudaremossenmasten dämpas genom närliggande skog över tid och analysera hur dämpningen korrelerar med meteorologiska variabler relaterat till vatteninnehållet i träd. Även data från radartornet BorealScat-2 analyseras. Tyngdpunkten ligger på att undersöka variationer i dämpning av TV-signalen snarare än att bygga en fysikalisk modell av TV-signalens interaktion med växtligheten.

1.3 Frågeställning

För att konkretisera uppgiften är målet med arbetet att försöka besvara dessa huvudfrågor:

1. Hur varierar dämpningen av signaler från TV-master som färdas genom skog över tid?
2. Vilka samband kan identifieras mellan signalstyrkan, meteorologiska variabler, data från BorealScat-2 och trädens vatteninnehåll?

1.4 Avgränsningar

Tidsintervallet för arbetet sträcker sig över 16 veckor vilket inte möjliggör datainsamling under en längre period för att kontinuerligt observera säsongsvariationer. Arbetet fokuserar därför på att observera variationer i dämpningar under kortare tider (timmar) och utifrån detta dra slutsatser om radiofrekvens (RF) signaler från TV-master är användbara för att undersöka skogens vattenstressnivå.

Den geografiska avgränsningen för vår datainsamling är Brudaremossenmasten och närliggande skogar där fri siktlinje till masten finns. Även tidigare uppmätt radardata från Svartbergets forskningsstation utanför Umeå kommer analyseras. Orsaker till att signalen påverkas av marktopografi eller sjöar undersöks inte i arbetet. Metoden som används är avgränsad till signalens medeleffekt och ingen avancerad signalbehandling utöver detta kommer undersökas.

Brudaremossenmasten är ett skyddsobjekt, vilket gör viss data svårtillgänglig. Därför kommer antaganden om strålningsmönster hos antennerna göras. Skogsområdet runt masten där mätningarna kommer genomföras utgörs av naturreservat, vilket gör att bekräftande mätningar på trädens vatteninnehåll genom att borra i dem inte kommer att utföras och markfuktighetssensorer kommer inte grävas ner i marken. Arbetet förlitar sig istället på tidigare studier om hur trädets vatteninnehåll varierar över dygnet och meteorologiska variabler för att verifiera mätdata.

2

Teori

För att förstå hur signalen från en TV-mast dämpas genom skog, behövs en förståelse för radiosignaler, vad som påverkar dämpning, och trädens vatteninnehåll. I teoridelen förklaras dessa samt en grund till statistiska fördelningar som är relevanta för analys av radiosignaler och resultatet.

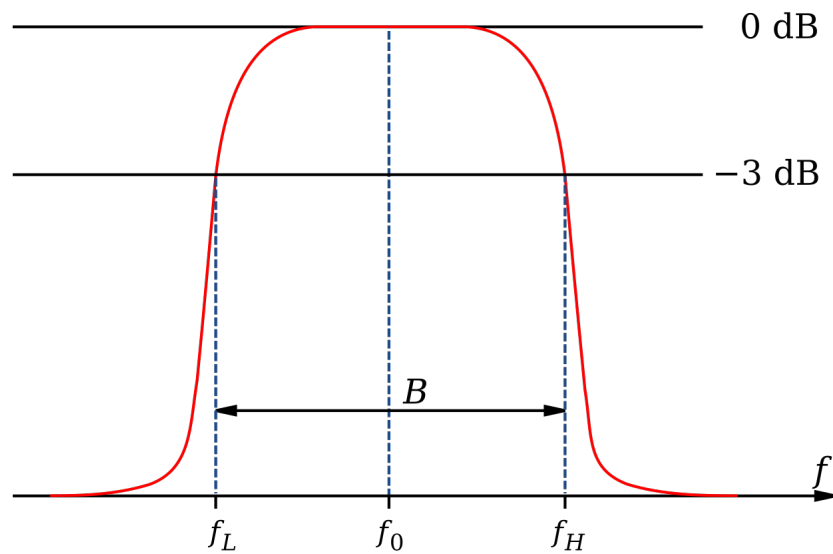
2.1 Kommunikationssystem och radiovågor

Inom elektriska kommunikationssystem finns det flera sätt att överföra information. En av de vanligaste kommunikationskanalerna är frirymd, där elektriska signaler konverteras till elektromagnetiska vågor som propagerar genom luften. Hur dessa vågor varierar över tid (amplitud, fas och frekvens) bestämmer vilken information de innehåller. Signalerna fångas upp och konverteras till önskat format av en mottagare. Att använda frirymd som medium kallas radio, och används som kommunikationssystem av en rad olika vardagstekniker som exempelvis TV, mobiltelefoner, internet och radar (Frenzel, 2023).

Kommunikationssystemen som nämnts ovan verkar inom radiofrekvensspektrumet eller RF-spektrumet. Elektromagnetiska vågor inom detta spektrum kallas därför för radiovågor. RF-banden sträcker sig mellan 30 kHz - 300 GHz. De flesta TV-signaler verkar antingen inom VHF-bandet (30 MHz-300 MHz), very high frequency, eller UHF-bandet (300 MHz-3 GHz), ultra high frequency (ITU, 2015).

Elektromagnetiska vågor beskrivs av Maxwells ekvationer och består av elektriska och magnetiska fält, \mathbf{E} och \mathbf{H} , som oscillerar i fas i vinkelräta riktningar (Tong, 2015). Elektromagnetiska vågor kan beskrivas som sinusformade vågfunktioner, uttryckt som exempelvis $A \sin(kx - \omega t)$, där A beskriver amplituden, kx variationer i rummet och ωt variation i tiden. k kallas vågtalet och bestäms av $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. ω är vinkelfrekvensen, $\omega = 2\pi f$. Frekvensen f , våglängden λ och vågens utbredningshastighet c (ljusets hastighet i vakuum), är relaterade genom sambandet $\lambda = \frac{c}{f}$, i fri rymd (Young & Freedman, 2019).

En antenn sänder en signal med en viss bandbredd. Bandbredden (B) är frekvensområdet på båda sidor av en centerfrekvens f_0 (se figur 2.1) (Balanis, 2005).



Figur 2.1: Visar centerfrekvensen, f_0 , och bandbredden, B , runt centerfrekvensen f_0 . f_L visar den minsta och f_H den maximala frekvensen i bandbredden. Den vertikala axeln representerar effekt (Inductiveload, 2008). Public Domain.

Många radiosystem använder en högfrekvent sinusformad signal, kallad bärvåg, för att transportera information mellan sändarantenn och mottagarantenn. Signaler som verkar inom ett frekvensområde med viss bandbredd och en centerfrekvens som är mycket större än 0 Hz kallas för bandpassignaler (Lichtman, 2026).

En radioantenn skickar ut en elektromagnetisk signal med en viss polarisation, linjär, cirkulär eller elliptisk. Polarisation beskriver hur det elektriska fältets vektor hos en elektromagnetisk våg varierar i riktning och amplitud över tid i vågens utbredningsriktning. För att inte få förluster i polarisation mellan linjärt polariserade sändare och mottagare bör dessa vara inriktade för samma polarisation. Om polarisationen hos en mottagarantenn är ortogonal mot sändarpolarisationen kommer den mottagna effekten att dämpas och effekten blir maximal om de är parallella (Balanis, 2005).

En specifik typ av radiosystem är radar (*Radio Detection and Ranging*) vilken skickar ut och tar emot elektromagnetiska signaler från en eller flera antenner. Den elektromagnetiska signalen reflekteras mot objektet och detekteras av radarn, varpå objektets position och hastighet, samt reflekterad intensitet kan beräknas (Sullivan, 2004, s. 1-25).

2.1.1 Effekt från mätning av radiovågor

För att digitalt spara och analysera en signal behövs sampling. Signalsampling innebär att en kontinuerlig signal diskretiseras i tiden och kvantiseras i amplitud (värdet vid en given diskret punkt). Digitala värden sparas punkt för punkt vid bestämda tidsintervall. Hur många punkter som sparas per sekund bestäms av en samplingsfrekvens f_s . Generellt gäller att ju högre samplingsfrekvens desto fler sampel

erhålls, desto mindre blir tiden mellan punkterna och desto mer liknar den diskreta signalen originalsignalen. En hög samplingsfrekvens kan leda till stora mängder data (Li, 2024). Om samplingsfrekvensen däremot är för låg, blir avståndet mellan samplingspunkterna för stort och gör att den diskreta signalen inte längre återger originalsignalens egenskaper på ett korrekt sätt och information går förlorad (Li, 2024).

Enligt Nyquist samplingsteorem ska sampling i tidsdomänen ske så att samplingsintervallet är mindre eller lika med halva perioden för signalens högsta frekvenskomponent (Li, 2024). Då samplingsintervallet T är samma som $\frac{1}{f_s}$, är detta samma sak som att säga att sampling i tidsdomänen måste ske sådan att samplingsfrekvensen är minst 2 gånger så stor som signalens högsta frekvenskomponent f_H : $f_s \geq 2f_H$ (Lichtman, 2026).

Bandpass signaler kan nedkonverteras till basbandssignaler centrerade kring 0 Hz genom en blandare i en radiomottagare. Detta sker innan digital signalbehandling genomförs och möjliggör lägre samplingsfrekvenser och effektivare signalbehandling. Genom nedkonvertering blir istället signalens maximala frekvenskomponent detsamma som halva bandbredden och sampling kan istället ske med en frekvens lika med signalens bandbredd B : $f_s \geq B$ (Lichtman, 2026).

Efter nedkonvertering representeras signalen ofta med i-fas- och kvadraturkomponenter, så kallade I/Q-komponenter (ITU, 2018). Q komponenten är 90 grader fasförskjuten relativt I komponenten och tillsammans kan de beskriva signalens amplitud och fas. Det som når antennen är en reell signal som konverteras till I/Q-värden med en kvadraturdemodulator (Lichtman, 2026).

Signalen som kan representeras av funktionen $A \cos(\omega t + \theta)$ kan istället representeras av en real- och imaginärdel på formen:

$$A \cos(\omega t + \theta) = I \cos(\omega t) + Q \sin(\omega t)$$

där A är den ursprungliga RF-signalens amplitud, $I = \frac{A}{2} \cos(\theta)$ och $Q = \frac{A}{2} \sin(\theta)$. Här brukar $I \cos(\omega t)$ istället kallas för i-fas-komponenten och $Q \sin(\omega t)$ för kvadraturkomponenten, som tillsammans bildar I/Q-data (Bonicatto, 2025).

I en digital radio representeras en diskret punkt av signalen som ett komplext tal på formen: $I + jQ$. För att räkna ut effekten från den diskreta komplexa signalen tas absolutbeloppet av varje sampel och kvadreras för att sedan beräkna medeleffekten \bar{P} över N sampel enligt

$$P[n] = |x[n]|^2 \tag{2.1}$$

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P[n] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x[n]|^2 \tag{2.2}$$

där $x[n] = I[n] + jQ[n]$ är sampel för tidsindex $n = 1 \dots N$ (Lichtman, 2026).

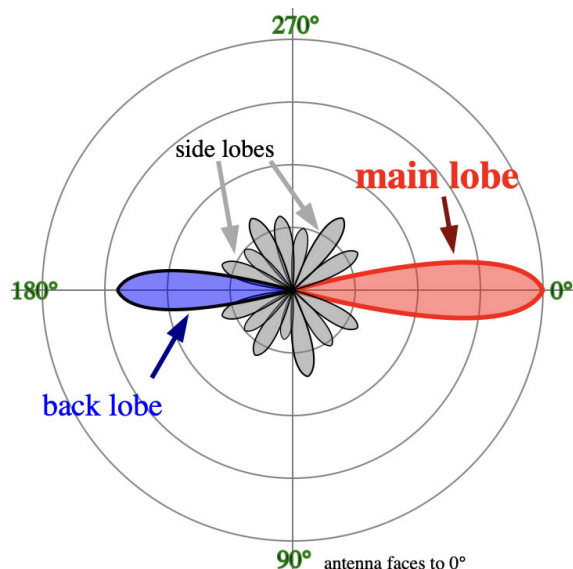
2.1.2 Teoretiskt beräknad effekt

Det finns olika sätt att beskriva en antennis utstrålade effekt i antennens huvudriktning. Antingen genom elektrisk fältstyrka på ett specifikt avstånd från antennen, den effektiva utstrålade isotropiska effekten (EIRP) eller effektiv utstrålad effekt (ERP). En isotropisk antenn är en hypotetisk antenn som har samma utstrålade effekt i alla riktningar och EIRP är effekten som behövs för att en isotropisk antenn ska utstråla samma elektriska fältstyrka i huvudriktningen som den verkliga antennen. ERP liknar EIRP, men är effekten en halv vågsdipol skulle behöva sända ut för att ge samma fältstyrka i huvudriktningen som den verkliga antennen. En halv vågs dipolantenn strålar mer energi i vissa riktningar, och behöver då en lägre effekt för att få samma elektriska fältstyrka i huvudriktningen. Förhållandet mellan ERP och EIRP förklaras av (Loy & Karingattil, 2005)

$$\text{EIRP} = \text{ERP} \cdot 1,64 = P_t G_t [W] \quad (2.3)$$

där P_t är ingångseffekt till antennen och G_t är antennförstärkning i huvudriktningen. Antennförstärkning anges vanligtvis i decibelenheten dBi (förstärkningen i förhållande till en ideal isotropisk antenn).

En antenn har ett specifikt strålningsmönster som behöver tas i beaktning när beräkningar på sändarens utstrålade effekt genomförs. Strålningsmönstret hos en antenn är tredimensionellt och beror både på θ och ϕ i sfäriska koordinater. Strålningsmönstret hos antenner består normalt av en huvudlob i huvudriktningen och vid dess sida ett antal sidolober (se figur 2.2). Backloben kan ses som en sidolob. För att räkna ut vågens effekttäthet i en viss riktning används antennförstärkningen $G_t(\theta, \phi)$, vilket är förhållandet mellan den strålade effekttätheten i (θ, ϕ) -riktningen jämfört med den strålade effekttätheten från en isotropisk antenn (Cheng, 2014).



Figur 2.2: Strålningsmönster hos en antenn. Avståndet från origo visar effekttätheten eller antennförstärkningen som funktion av vinkeln. Huvudloben (main lobe) är antennförstärkningen i antennens huvudriktning, backloben (back lobe) kan ses som en sidolob (side lobe). (Truckle, 2008). [CC BY-SA 4.0].

Ekvationen för att beräkna den maximala effekttätheten $S(R)$ under ideala förhållanden från en antenn beror på avståndet R , antennförstärkningen i huvudriktningen G_t och effekten från sändaren P_t enligt

$$S(R) = \frac{EIRP}{A_{\text{sfer}}} = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} [W/m^2] \quad (2.4)$$

där A_{sfer} är arean runt en sfär med radien R (Cheng, 2014).

En mottagarantenn fångar elektromagnetiska vågor. För att beräkna den mottagna effekten används begreppet effektiv area som beskriver en antens förmåga att ta åt sig effekt ur en elektromagnetisk våg utifrån ideala förhållanden. Den effektiva arean A_e beror på våglängden λ samt antennförstärkningen för mottagarantennen $G_r(\theta, \varphi)$ och beskrivs i ekvation 2.5 (Balanis, 2005). Om den effektiva arean multipliceras med effekttätheten beräknas medeleffekten P_r som fångas av antennen enligt ekvation 2.6, (Cheng, 2014).

$$A_e = \frac{G_r(\theta, \varphi) \lambda^2}{4\pi} [m^2] \quad (2.5)$$

$$P_r = S(R) A_e = \frac{P_t G_t G_r(\theta, \varphi) \lambda^2}{(4\pi R)^2} [W] \quad (2.6)$$

Under icke ideala förhållanden där vågen dämpas under propagering läggs en förlustfaktor D till enligt följande

$$P_r = \frac{S(R)A_e}{D} = \frac{P_t G_t G_r(\theta, \varphi) \lambda^2}{D(4\pi R)^2} [W] \quad (2.7)$$

D är då den totala dämpningen genom ett medium där vågen färdas från sändarantenn till avståndet R (Rappaport, 2009).

Relationen mellan P_r och P_t kallas för Friis transmissions formel och kan med en omskrivning enligt ekvation 2.8 användas för att beräkna avståndet från sändarantennen till en plats med viss mottagen effekt (Cheng, 2014).

$$R = \sqrt{\frac{EIRP \cdot G_r \lambda^2}{P_r (4\pi)^2}} [m] \quad (2.8)$$

2.1.3 Ortogonal frekvensdelningsmultiplex

En vanlig moduleringssteknik inom kommunikationssystem är en typ av digital modulering som kallas kvadraturamplitudmodulering (QAM), där digital information transmitteras som variationer i både signalens amplitud och fas (Goldsmith, 2005, s. 126-148). För TV-signaler (DVB-T/T2) används ortogonal frekvensdelningsmultiplex (OFDM) som är en form av flerbärvågsmodulering över flera närliggande frekvenser, där varje underbärvåg moduleras med QAM (Goldsmith, 2005, s. 374-386).

Med hjälp av centrala gränsvärdessatsen kan det visas att för varje sampel av en OFDM-signal med många QAM underbärvågor kan I/Q-komponenterna approximeras som komplexa normalfördelade slumpvariabler med medelvärde noll. (Goldsmith, 2005, s. 394). OFDM-signalen kan även approximeras som vitt brus med okorrelerade sampel om den samplade bandbredden endast täcker OFDM-bandet, d.v.s, så att spektrumet är platt mellan $-f_s/2$ till $f_s/2$ (Schulze & Luders, 2005, avsnitt 4.2 s. 160-175).

2.1.4 Rayleighfördelning

Rayleighfördelningen är en sannolikhetsfördelning (Blom, 1989, s. 57, 58). För I/Q-data uppmätt från OFDM-signaler där i-fas- och kvadraturkomponenterna är normalfördelade kring noll och har samma varians $\sigma_I^2 = \sigma_Q^2$, kan det visas att amplituden $A = |I + jQ|$ är Rayleighfördelad. Effekten $P = A^2 = |I + jQ|^2$ följer då en exponentialfördelning med medelvärdet $2\sigma_I^2$ (Goldsmith, 2005, s. 78). För en exponentialfördelning gäller det allmänt att medelvärdet är lika med standardavvikelsen av exponentialfördelningen (Blom, 1989, s. 105), vilket för I/Q-data blir $\sigma_{exp} = 2\sigma_I^2 = 2\sigma_Q^2$.

2.1.5 Flervägsutbredning och Rayleighfädning

Signalen från sändaren kan nå mottagaren via flera olika färdvägar till följd av reflektion och spridning, vilket kallas flervägsutbredning. Eftersom reflekterade signalkomponenter färdas en längre sträcka än den direkta siktlinjen kommer en utsänd signal att spridas ut över tid. Den signalkomponent som färdas längs den direkta siktlinjen anländer först, följt av en serie av fördröjda signalkomponenter. Fördröjningen beror på längden av färdvägen för respektive signalkomponent och leder till variationer i antalet mottagna signalkomponenter, amplitud och tidsfördröjning. Detta resulterar i variationer av mottagen effekt över tid och rum vilket kallas Rayleighfädning (Goldsmith, 2005, s. 64-65). Se figur 2.3.

I miljöer där direkt siktlinje mellan sändare och mottagare saknas, som i skog, kan den mottagna signalen domineras av flervägsutbredning. Enligt centrala gränsvärdesatsen kan det visas att för ett stort antal flervägsutbredningar kommer den uppmätta signalen bestå utav komplexa normalfördelade sampel med medelvärde noll (Goldsmith, 2005, s. 71). Signalens amplitud följer därmed en Rayleighfördelning för olika mottagarplatser i rummet.

Flervägsutbredning där förändringar i färdväg sker på grund av rörelser i miljön (exempelvis träd i vind), leder till variationer i antalet mottagna signalkomponenter, amplitud och tidsfördröjning, men på en betydligt längre tidsskala än vad som beskrevs i första paragrafen i detta stycket. Amplituden följer i detta fall också en Rayleighfördelning över tid. (Goldsmith, 2005, s. 64).

2.2 Trädens transpiration och vatteninnehåll

Träd innehåller vatten som lagras i olika vävnader som blad, grenar, stam och rötter. Det lagrade vattnet har stor betydelse för den dagliga transpirationen, där studier visar att mellan 10 och 50 % av den dagliga transpirationen försörjs av vatten som lagrats i stammen (Matheny m. fl., 2015). Hur mycket vatten som lagras och används varierar mellan olika träddarter, trädens storlek samt olika vattenförhållanden (Matheny m. fl., 2015).

Vatteninnehållet i träd under dagen bestäms av vattenflöden i trädet, vilket varierar över tid till följd av olika miljöfaktorer (Luo m. fl., 2020). Det vertikala flödet utgör den huvudsakliga transporten av vatten, medan det radiella flödet möjliggör vattenförflyttning mellan olika vävnader. Dessa flöden bestämmer tillsammans förändringar i trädets vatteninnehåll. Studier har visat att den relativa förändringen i vatteninnehåll kan variera kraftigt, upp till 20 %, men att denna variation beror på lokala miljöförhållanden och träddarter (Luo m. fl., 2020).

Vattentransporten i träden drivs främst av skillnader i vattenpotential, det vill säga vattnets energitillstånd i olika delar av trädet. Den huvudsakliga drivkraften är transpiration (Eckersten m. fl., 1998). Transpiration beskriver avdunstning av vatten från växter och sker via mikroskopiskt små öppningar på växternas blad, så kallade klyvöppningar. Detta som en del av fotosyntesen där dessa klyvöppningar öppnas

för att ta emot koldioxid och i samma process avger vattenånga till atmosfären (Monteith & Unsworth, 2013).

Transpirationen drivs framförallt av skillnad i ångtryck mellan blad och atmosfär. Där låg luftfuktighet ger ett högt ångtrycksunderskott (VPD) och därmed ökad transpiration (Monteith & Unsworth, 2013). VPD står för *Vapour Pressure Deficit* och beskriver skillnaden mellan den maximala mängd vattenånga som luften kan innehålla vid ett givet lufttillstånd (SVP) och den faktiska mängden vattenånga som finns i luften (AVP). Ju högre temperatur desto högre blir den maximala vattenångan luften kan innehålla (Koverda, 2020). Det finns även andra faktorer som påverkar transpirationen. Solinstrålning ger förutsättning till transpiration genom fotosyntes och energiomvandling, men påverkar även temperaturen på bladet och öppningsgraden av klyvöppningarna, vilket påverkar avdunstningen. Vindhastigheten påverkar genom att öka turbulensen och förflytta fukt från bladen, vilket kan öka transpirationen. Markens vattenhalt påverkar vattenpotentialen i marken och vid en låg vattenhalt binds vattnet hårdare i marken vilket skapar motstånd för vattenupptag (Eckersten m. fl., 1998).

Trädets vatteninnehåll varierar under dygnet och bestäms av skillnaden i vattenupptag via rötterna och vattenförluster via transpiration. Transpirationen ökar på morgonen och når sitt maximum på förmiddagen, sedan minskar den trots fortsatt hög solinstrålning. Detta beror på att trädets vattenstatus försämras och klyvöppningarnas öppningsgrad minskar vilket motverkar transpiration och vattenförluster. Samtidigt fortsätter vattenupptaget från marken och kan senare bli större än transpirationen vilket gör att trädet återhämtar sitt vatteninnehåll. Klyvöppningarna stängs även under kvällen till följd av minskad solinstrålning. Trädets vattenstatus är därmed som lägst under dagen och återhämtar sig senare under dygnet (Eckersten m. fl., 1998).

Vatten som lagras i trädets stam fungerar som en buffert under perioder med hög transpiration och bidrar till att jämna ut variationer i vattenflödet. Den interna vattenlagringen återfylls när transpirationen minskar och bidrar därmed till trädets dagliga vattenbalans (Luo m. fl., 2020).

2.3 Dämpning i vegetation

Radiosignaler dämpas när de passerar genom vegetation på grund av absorption och spridning från olika delar som grenar, stammar och blad. Signalens våglängd avgör vilka komponenter som har störst påverkan på den elektromagnetiska vågen (Lemmetyinen m. fl., 2022). Radiovågor interagerar starkt med vatten i vegetation och studier har visat att RF-förlust genom vegetation är starkt beroende av vegetationens vattenhalt (Peden m. fl., 2021).

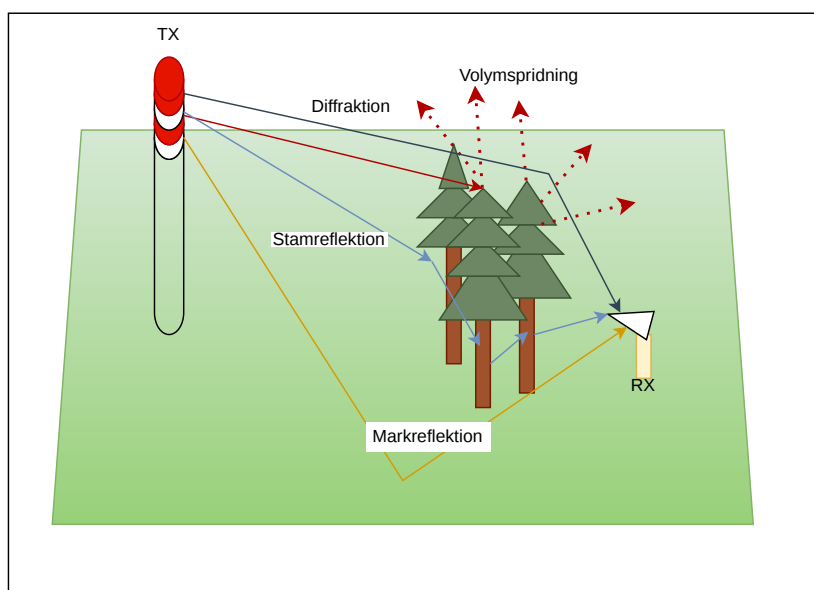
Vatteninnehållet påverkar vegetationens dielektriska egenskaper som beskriver samspillet mellan EM-vågor och material samt hur material absorberar energi (Trabelsi, 2015). Studier har även visat att både den dielektriska konstanten och de dielekt-

riska förlusterna ökar med ökande vattenhalt i vegetation. Detta leder till en ökad absorption av den elektromagnetiska vågen och därmed en högre signaldämpning. (Chauhan m. fl., 2024).

På grund av att vatten har hög permittivitet, jämfört med den omgivande vegetationen vars permittivitet är nära vakuum, kan man anta att de dielektriska egenskaperna hos vegetation är dominerade av vatten. Det är därför intressant att undersöka vilka faktorer som påverkar vattnets permittivitet för att förstå vad som påverkar dämpning i vegetation (Salas m. fl., 1994).

Permittiviteten beskriver hur ett material påverkas av ett elektromagnetiskt fält. Den förklarar ett materials förmåga att lagra energi samt dess elektriska konduktivitet som avgör storleken på energiförlusterna. Relativ permittivitet representeras av det komplexa talet $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ (Salas m. fl., 1994). Den reella delen ϵ' beskriver förmågan att lagra energi, hur väl vattenmolekyler riktar in sig efter det elektromagnetiska fältet, vilket är möjligt eftersom vattenmolekyler är dipoler. Den imaginära delen ϵ'' förklarar hur mycket energi som omvandlas till annan energiform när vattenmolekyler roterar och krockar med varandra. Utöver detta påverkas också permittiviteten hos materialet av faktorer som temperatur, joner i materialet, samt volymetriskt vatteninnehåll. För frekvenser upp till ca 600 MHz är den huvudsakliga mekanismen bakom RF-förlust jonernas rörelse och är därmed starkt kopplat till mediets elektriska konduktivitet (Peden m. fl., 2021).

Övrig dämpning i vegetation sker på grund av distribuerade objekt såsom slumpmässigt fördelade blad, kvistar, grenar och trädstammar, med olika dielektriska egenskaper (se figur 2.3). De orsakar spridning, diffraktion och polarisationsförändringar av de utbredda radiovågorna (Lemmetyinen m. fl., 2022; Meng m. fl., 2009).



Figur 2.3: Illustration över signalens utbredning i vegetation mellan sändare (TX) och mottagare (RX), inklusive utbredningsmekanismer som markreflektion, stamreflektion, diffraktion och volymstridning.

En radiovåg som träffar ett hinder har en naturlig tendens att böja sig runt eller över hindret. Denna böjning kallas diffraktion och uppstår om objektet är stort i jämförelse med signalens våglängd. Signalen kan även nå antennen genom flervägsutbredning vilket innebär att signalen når mottagarantennen via flera olika vägar, exempelvis via reflektion och volymstridning. Detta kan leda till att den mottagna signalen försvagas (Rosu, u.å.).

Polarisationen och polarisationskombinationen hos signalen påverkar hur signalen interagerar med vegetationen. En sampolariserad signal beskriver den polarisationen som antennen är avsedd att sända ut eller ta emot, medan korspolarisationen beskriver den polarisation som är ortogonal mot den ursprungliga polarisationen (Balanis, 2005). När en elektromagnetisk våg propagerar genom vegetation kan dess polarisation förändras till följd av utbredning, reflektion, spridning eller diffraktion. Detta kallas depolarisering (Caldeirinha & Al-Nuaimi, 2017). Vid radiovågsutbredning i skogsområden återemitteras och sprids signalen av vegetationens olika strukturer och egenskaper, vilket ger upphov till korspolariserade komponenter. En ökning av de korspolariserade komponenterna är kopplat till att den ursprungliga sampolariserade signalen försvagats (Popov, 2019).

När en radiosignal passerar genom tät vegetation kan polarisationen ändras så pass mycket att den korspolariserade signalen blir nästan lika stark som den ursprungliga sampolariserade signalen. Detta gäller främst för djup vegetation och för högre frekvenser där signalen dämpas i hög grad (ITU, 2021).

2.4 Stokastiska tidsserier

För att bedöma resultatets tillförlitlighet behöver mätosäkerheten i effektmätningarna kvantifieras. I detta avsnitt presenteras de matematiska uttryck som används för att uppskatta mätosäkerheten.

Stokastiska processer

En RF-signal kan i sig vara slumpmässig, till exempel en OFDM-signal. Dessutom kan fädning och brus ge upphov till slumpmässiga variationer. Detta innebär att den uppmätta signalen kan modelleras som en stokastisk process, det vill säga en tidsserie där varje sampel beskrivs av en statistisk fördelning och sin kovarians till övriga sampel. En specifik underkategori av stokastiska processer är *stationära* processer, vilket betyder att deras statistiska egenskaper är konstanta över tid (Lindgren m. fl., 2014, s. 19).

Svagt stationär process

En svagt stationär process definieras av att dess medelvärde är konstant och att autokovariansfunktionen mellan två tidpunkter s och t endast beror på tidsskillnaden $k = t - s$ mellan dem. Från autokovariansfunktionen för en svagt stationär process kan dess autokorrelationsfunktion bestämmas (Lindgren m. fl., 2014, s. 32).

Autokorrelationsfunktionen beskriver beroendet mellan efterföljande sampel för den stokastiska processen och antar värden mellan 1 och -1. Värden nära 1 innebär att sampel med en tidsförskjutning k fortfarande är starkt korrelerade med varandra, medan värden kring 0 innebär att de är okorrelerade (Lindgren m. fl., 2014, s. 22-27).

Enligt Wiener–Khinchins teorem kan autokorrelationsfunktionen för en svagt stationär stokastisk process beräknas från signalens effektspektrum med hjälp av Fouriertransform (Lindgren m. fl., 2014, s. 82).

Mätosäkerhet

För en process med $N \gtrsim 30$ oberoende och likafördelade sampel x_i kan det 95-procentiga konfidensintervallet (KI) för medelvärdet $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ approximeras som

$$\text{KI}_{95\%} \approx \bar{x} \pm 1,96 \frac{s_x}{\sqrt{N}} \quad (2.9)$$

där

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

är stickprovsstandardavvikelsen för sampel x_i (Olofsson & Andersson, 2012, s. 302, 400).

Verkliga mätresultat botten emellertid i fysiska system som ofta är begränsade i hur snabbt de kan förändra sitt tillstånd. Detta leder till att närliggande datapunkter i tidserier från mätningar av fysikaliska storheter oftast är korrelerade med varandra. Den egentliga mätosäkerheten minskar då proportionerligt mot $1/\sqrt{N_{eff}}$, där N_{eff} är antalet okorrelerade sampel (Olofsson & Andersson, 2012, s. 444).

För en svagt stationär stokastisk process är efterföljande sampel korrelerade och \sqrt{N} gäller inte längre. Istället beräknas det 95-procentiga konfidensintervallet enligt

$$KI_{95\%} = \bar{x} \pm 1,96 \frac{s_x}{\sqrt{N_{eff}}} \quad (2.10)$$

under antagandet att $N_{eff} \gtrsim 30$. Antalet effektivt oberoende sampel N_{eff} beräknas enligt $N_{eff} = N/\tau_{int}$ där N är totala antalet sampel. τ_{int} är den integrerade korrelationstiden som beräknas från autokorrelationsfunktionen enligt

$$\tau_{int} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \rho(k) = \rho(0) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \rho(k) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \rho(k) \quad (2.11)$$

där $\rho(k)$ är autokorrelationsfunktionen för en tidsskillnad k (Lindgren m. fl., 2014, s. 42). Sammantaget beror mätosäkerheten av beräknad medeleffekt på korrelationen mellan sampel.

3

Metod

I metoden beskrivs de centrala delarna kring utförandet av projektet. En mer detaljerad beskrivning av utförandet beskrivs i refererade bilagor. I avsnitt 3.1 beskrivs vilka instrument som har använts och hur de är konfigurerade. I avsnitt 3.2 presenteras hur valet av positionering av mätsystemen har genomförts. Detta följs sedan av avsnitt 3.3 där motivering presenteras för val av parametrar till mätningen. Avsnitt 3.4 beskriver det praktiska genomförandet av fältmätningen. Till sist i avsnitt 3.5 beskrivs hur data från mätserien behandlades och analyserades.

3.1 Mätsystem

Mätsystemet består av ett flertal sammankopplade komponenter för att samla in mätdata, kontrollera mätutrustningen samt spara insamlade data, se figur 3.1. Två stycken mätsystem används, ett placerat så att signalen går genom skog (figur 3.2) och ett för referenssignal med fri sikt mot sändarantennen. Det här avsnittet ger en övergripande bild av hur systemet fungerar. Kursiva komponentnamn nedan återfinns i figur 3.1. En komplett komponentlista återfinns i bilaga A.2.

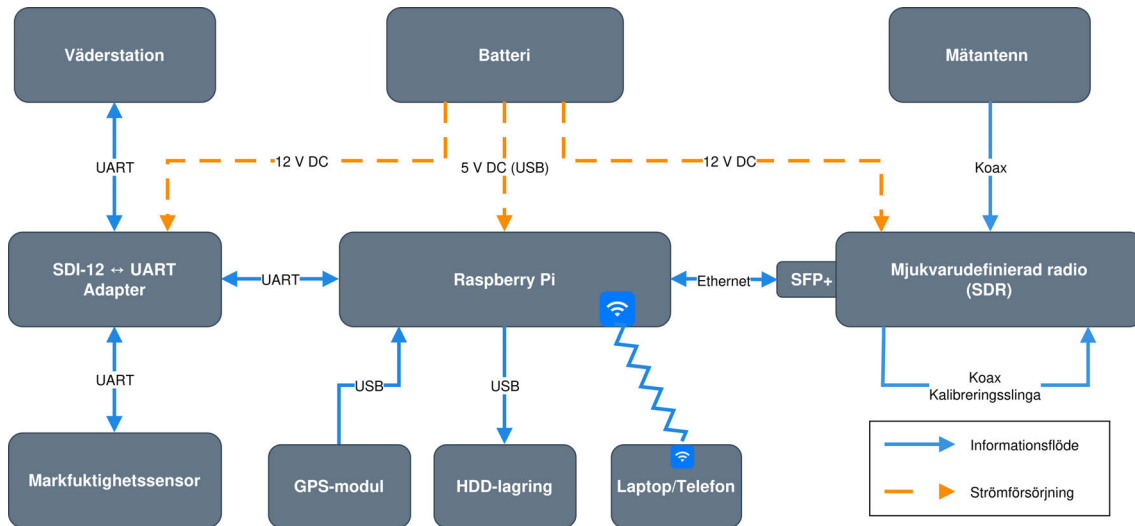
Centrum i mätsystem är en *Raspberry Pi 4B* enkortsdator som används som en data-logger. På datorn finns programkod som kontrollerar och kommunicerar med övriga komponenter. Raspberry Pi:n tar emot och lagrar all data på en extern *hårddisk (HDD)*. För att säkerställa att tiden mellan de två mätsystemen är samma används en *GPS-mottagare* som är kopplad till Raspberry Pi:n.

Vid varje mätsystem finns en *mätantenn* som tar emot signalen från sändaren på TV-masten och en *markfuktighetssensor*. Vid skogssystemet finns även en *väderstation*. För att styra vilken information mottagarantennen ska ta emot samt för att behandla de analoga signalerna från mottagarantenn används en *mjukvarudefinierad radio (SDR)* som kommunicerar med Raspberry Pi:n. Genom en kalibreringsslinga i den mjukvarudefinierade radion sändes och mottogs en kalibreringssignal för att upptäcka skillnader i mätsystemet över tid.

Väderstationen och markfuktighetssensorn samlar data och kommunicerar via det digitala kommunikationsprotokollet *SDI-12*. Raspberry Pi:n stödjer inte detta och därför har en *SDI-12 adapter* utvecklats för att omvandla signalen vilket möjliggör

kommunikation mellan Raspberry Pi och sensor.

För att förse komponenterna med ström under fältmätningar används ett *batteri*. Komponenterna som är kopplade till batteriet är Raspberry Pi:n, SDI-12 kretsen, samt den mjukvarudefinierade radion.



Figur 3.1: Schematisk figur över ett mätsystem, i detta fall skogssystemet då väderstationen är inkluderad. Raspberry Pi:n styr sensorerna, markfuktighetssensorn och väderstation, genom en SDI-12 adapter. Enkortsdatoren styr även SDR:en som samlar in data från Mätantennen som skickas tillbaka via en SFP-port. GPS-modulen ger tid till dataloggen, HDD lagrar alla insamlad data och Raspberry Pi:n kan styras med laptop/telefon via Wi-Fi. Batteriet förser anslutna komponenter med ström.



Figur 3.2: Skogssystemet uppställt i skogen med mätantenn till vänster och väderstation till höger.

3.1.1 SDR, Mätantenn och Kalibrerings slinga

RF-signalerna från TV-masten har uppmätts med två mottagarantennar, vilka anslöts via koaxialkabel till varsin SDR av modell Ettus USRP E320. För att undvika överbelastning av radiorna har koaxialdämpare använts i signalkedjan, och för att övervaka SDR:ernas stabilitet över tid implementerades en kalibrerings slinga.

SDR:ens hårdvara styrdes av en Python-kod, genererad med hjälp av den öppna programvaran GNU Radio vilket möjliggjorde stor flexibilitet vid val av olika mätparametrar, såsom bandbredd, filter och centerfrekvens. Centerfrekvensen sattes till 546 MHz och bandbredden sattes till 8 MHz för att stämma överens med TV-signalen. För ett konkret exempel på ett flödesdiagram genererat med GNU Radio, se figur A.6.

SDR:en består huvudsakligen av tre delsystem som omvandlar RF-signaler från antennen till 64-bitars komplexa sampel. I ett första steg filtreras och förstärks signalen från mätantennen av en analog 2-kanals sändtagare (tranciever). Därefter nedkonverteras signalen med en kvadraturdemodulator, som delar upp signalen i en reell och en imaginär komponent, benämnda I och Q. Detta möjliggör sampling av både amplitud och fas då signalen digitaliseras med en A/D-omvandlare (Ettus Research, u.å.). De digitala sampel bearbetas därefter i en Field Programmable Gate Array (FPGA) vilket är en snabb, programmerbar logikkrets avsedd för digital signalbehandling. Utöver FPGA-kretsen är SDR:en utrustad med en inbyggd ARM-processor som kan köra den genererade Python-koden direkt på SDR:en och därmed möjliggöra självständig drift av SDR:en utan anslutning till en extern dator (Ettus Research, u.å.). Denna metod begränsades dock av processorns prestanda, vilken visade sig vara otillräcklig för mätningar med samplingsfrekvensen på 8 MHz och resulterade i dataförluster. Se bilaga A.3 för ytterligare information.

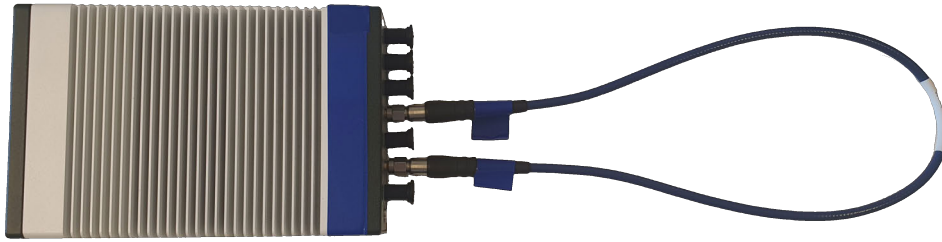
Till SDR:en anslöts en mätantenn av modell Rohde & Schwarz HL040E som är av typen logperiodisk bredbandsantenn, se figur 3.3. Den är linjärpolariserad och kan ta emot och sända signaler inom frekvensbandet 400-6000 MHz, vilket täcker UHF-bandet för TV-sändningar. Dess antennförstärkning vid 546 MHz är ca 6,1 dBi och den är riktad med en halvvärdesbredd på cirka 65° i E-planet respektive 115° i H-planet (Azimut respektive elevation för mätuppsättning i figur 3.3). Korspolarisation för antennen understiger -30 dB vid mätning på 546 MHz (Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2014). Detta innebär att antennerna är betydligt känsligare för sampolariserade signaler som ankommer längs med antennens riktning, jämfört med signaler från andra riktningar och med annan polarisation, se avsnitt 2.1. Antennen lämpar sig därför väl för metoden, eftersom den önskade signalen kan urskiljas genom att mätantennen riktas mot TV-sändaren på Brudaremossenmasten.



Figur 3.3: Antenn under fältmätning. Den anslöts med en koaxialkabel till en SDR. Koaxialkabeln täcktes med aluminiumfolie för att undvika störningar i signalen orsakat av solinstrålning.

Inför mätningen införskaffades en koaxialdämpare på 10 och 20 dB för vardera mät-system, i syfte att reducera det område kring Brudaremossenmasten där den mottagna effekten överskrider SDR:ens maximala rekommenderade mottagareffekt på -15 dBm ($\sim 0,03$ mW). Detta beskrivs mer ingående i avsnitt 3.2.3.

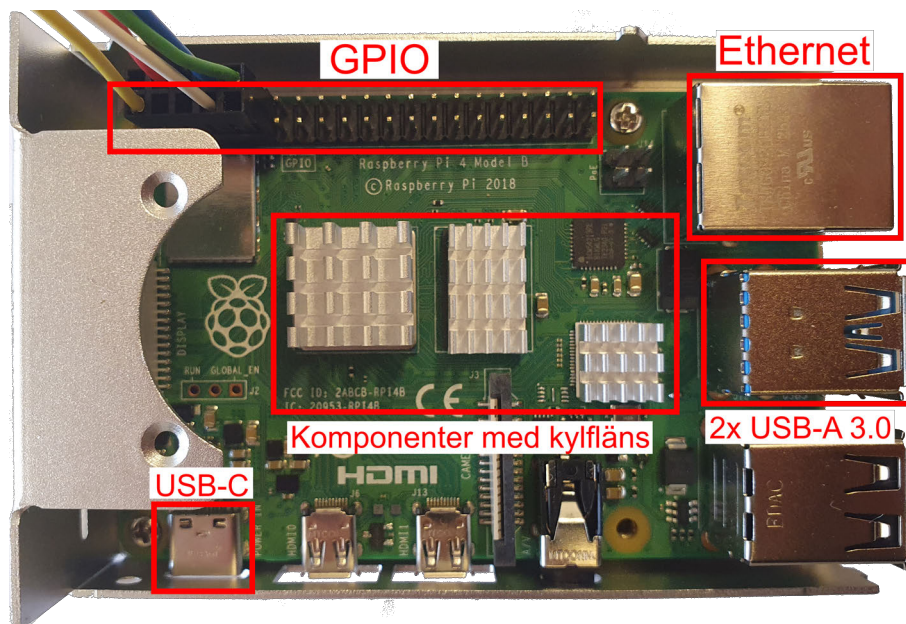
För att säkerställa att de två mätsystemen var stabila över tid undersöktes en intern kalibreringsmetod där en känd signal skickades genom en referenskabel mellan sändarkanalerna och mottagarkanalerna på SDR:erna, se figur 3.4. Referenskabeln var av samma modell som antennkabeln men med halva dess längd. Genom att analysera hur mycket signalstyrkan varierade under mätserien fås en uppskattning av mätsystemets stabilitet över tid. Vid större variationer kan den insamlade mätdata från kalibreringsslingan användas för att kompensera för systematiska fel i signalen från mätantennen. Båda SDR:ernas uteffekter kontrollerades innan fältstudien med en spektrumanalysator. Se bilaga A.3.1 för mer information. En detaljerad beskrivning av GNU Radio-skriptet som användes för att styra kalibreringsslingan återfinns i bilaga A.4.3.



Figur 3.4: Kalibrerings slinga ansluten mellan SDR:ens sändar- och mottagarkanal. Koaxialkabeln i figuren är av modellen HUBER+SUHNER ST18/SMAm/mSMA/24in.

3.1.2 Datalogger (Raspberry Pi 4B)

För att styra och begära data från mätsystemets sensorer krävs en datalogger. För att göra detta används enkortsdatoren *Raspberry Pi 4B*, 4 GB (se figur 3.5). Valet av denna dator baseras på dess lättillgänglighet, snabba USB anslutning (USB 3.0), processorprestanda, gigabit ethernet port och RAM-storlek (Raspberry Pi Ltd, 2025). Raspberry Pi 4B har dessutom exponerade GPIO-stift (se figur 3.5) vilket underlättar anslutning till vädersensorer. Raspberry Pi 4B strömförsörjs med en 15 W USB-C anslutning till batteriet. Genom att installera kylflänsar på vissa komponenter minskar risken för överhettning vid hög arbetsbelastning.



Figur 3.5: Raspberry Pi 4B, 4 GB med relevanta anslutningar för mätsystemet markerade. Kylflänsarna installerades för att undvika överhettning vid hög arbetsbelastning.

På enkortsdatorn installerades operativsystemet Raspberry Pi OS Trixie. Utöver detta installeras drivrutinen USRP UHD som tillåter kommunikation mellan dator och SDR. Programvaran GNU Radio installeras även för att kunna felsöka och kontrollera dataflödet för TV-signalen samtidigt som GNU Radio inkluderar viktiga Python-bibliotek som krävs för mätning av TV-signal.

Raspberry Pi:n aktiverar mätning av TV-signal från antenn, signal från kalibreringsringsslinga och väderdata från vädersensorer enligt ett bestämt intervall (se avsnitt 3.3). Insamlad data lagras sedan i en mapp som automatiskt skapas vid varje mätning. Utöver detta sparas terminalutdata efter varje mätning. En mätning tar ca 2 minuter att genomföra då det är flera stora filer som flyttas mellan olika filsystem. En beskrivning av skripten som genomför mätningar anges i bilaga A.4.2. För att genomföra mätningar krävs dessutom att flera inställningar konfigureras. Dessa beskrivs i bilaga A.4.1.

3.1.3 Väderutrustning

Det är av intresse att studera hur effektdämpningen varierar med olika typer av vädervariabler. Därav har data insamlats via vädersensorer under fältmätning. Till mätsystemen har en multiväderstation och två markfuktighetssensorer använts.

Väderstationen är av modellen *Campbell Scientific ClimaVue 50* (se figur 3.6) och anslöts till skogsmätsystemet.



Figur 3.6: ClimaVue 50 väderstation

Väderstationen mäter följande relevanta parametrar (Campbell Scientific, 2024, s. 21):

- **Solinstrålning** [W/m^2] (Risk för systematiskt fel)
- **Vindhastighet** [m/s] (Risk för systematiskt fel)
- **Vindby (10 s intervall)** [m/s] (Risk för systematiskt fel)
- **Lufttemperatur** [$^{\circ}C$]
- **Ångtryck (AVP)** [kPa]
- **Lufttryck** [kPa]
- **Relativ luftfuktighet** [%]

Observera att vissa parametrar har ökad risk för systematiskt fel. Detta gäller eftersom väderstationen är placerad nära träd vilket kan orsaka störningar. Valet att placera väderstationen i skogen görs för att ta reda på VPD i luften omkring skogen (se avsnitt 2.2). Utöver detta mäter även väderstationen flera mindre relevanta parametrar som inte har angivits i listan ovan som exempelvis nederbörd och närliggande blixtnedslag. Väderstationen gör en mätning var 10:e sekund och adderar detta till ett snitt för respektive parameter. Snittet återställs sedan då Raspberry Pi:n begär data vilket sker enligt ett bestämt tidsintervall. Därav motsvarar värdena från väderstationen uppmätta genomsnitt under ett visst tidsintervall angivet i avsnitt 3.3.

Markfuktighetssensorerna är av modellen *Meter Teros 11* (se figur 3.7) och en sensor ansluts till båda mätsystemen.



Figur 3.7: Meter Teros 11 markfuktighetssensor under mätning.

Markfuktighetssensorerna mäter följande relevanta parametrar (Meter Group, 2025b, s. 9).

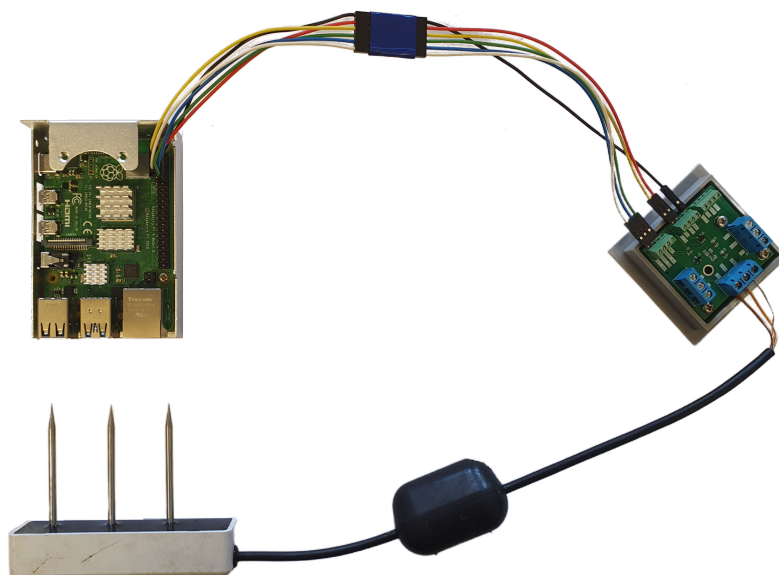
- **Volymetrisk vattenhalt** [%] (Risk för systematiskt fel)
- **Marktemperatur** [$^{\circ}C$] (Risk för systematiskt fel)

Båda parametrarna som markfuktighetssensorerna mäter har risk för systematiskt fel. Detta eftersom markfuktighetssensorn enligt instruktionen ska grävas ner cirka 30 cm under marken. På grund av regler i naturreservatet är detta inte tillåtet. Sensorn installeras därav direkt på markytan vilket kan skapa systematiskt fel (Meter Group, 2025a).

Rådata för den volymetriska vattenhalten behöver kalibreras för att motsvara den volymetriska vattenhalten i jord. Detta görs med följande formel där r motsvarar rådata och θ motsvarar den kalibrerade volymetriska vattenhalten (Meter Group, 2025a, s. 19)

$$\theta = 3,879 \times 10^{-4} \cdot r - 0,6956 \quad (3.1)$$

Både Teros 11 och ClimaVue 50 kommunicerar digitalt enligt SDI-12 protokollet. Protokollet är en standard som beskriver hur kommunikation mellan vädersensorer och datorer kan genomföras (SDI-12 Support Group, 2023b). Raspberry Pi:n kan inte direkt kommunicera i enlighet med SDI-12 protokollet. För att möjliggöra detta har en adapter designats av en handledare, som ansluts mellan Raspberry Pi:n och vädersensorerna (se figur 3.8). Mer om hur adaptern har designats och hur kommunikationen mellan Raspberry Pi och sensor genomförs beskrivs i avsnitt A.6.



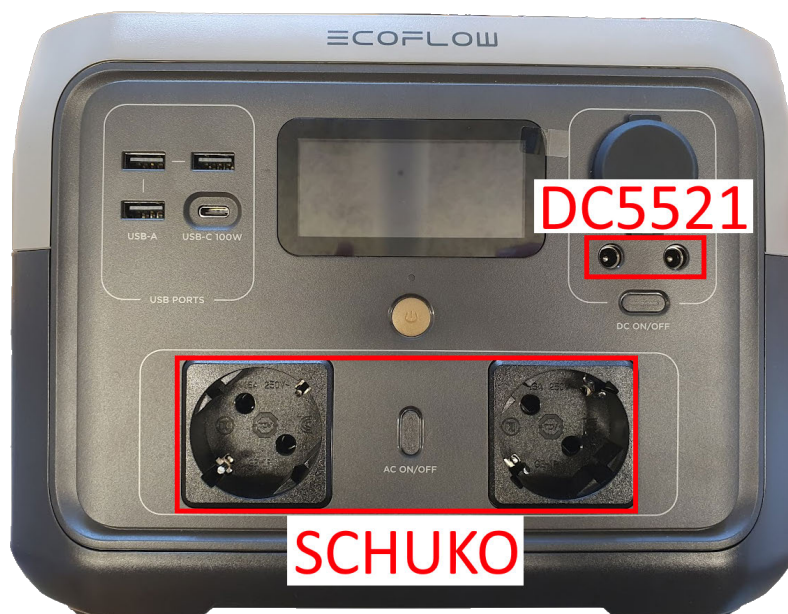
Figur 3.8: Raspberry Pi, SDI-12 adapter och Teros 11 korrekt anslutna. I figuren är ingen komponent strömförsörjd.

3.1.4 Övrig hårdvara

Utöver de ovan nämnda komponenter finns det ytterligare väsentlig utrustning till mätsystemet, vilket beskrivs i detta avsnitt.

Batteri

Då det saknas el under fältmätning krävs ett portabelt batteri. För detta ändamål nyttjades en *Ecoflow River 2 Max* vid respektive mätsystem, se figur 3.9. Batteriet har en kapacitet på 512 Wh vilket är mer än tillräckligt för att strömförsörja mätsystemet under en hel dag. Batteriet har två 230 V AC Schuko-anlutningar och två 12 V DC5521-kontakter (Ecoflow, 2022). Med dessa anslutningar kan alla komponenter i mätsystemet strömförsörjas.



Figur 3.9: Batteriet som använts för ett mätsystem med anslutningarna som har använts markerade.

Till DC5521-kontakten ansluts en anpassad kabel för att strömförsörja vädersensornerna via SDI-12 adaptorn, se figur A.10.

Hårddisk

För att lagra all mätdata krävs en hårddisk som har tillräckligt med utrymme för att lagra en hel mätserie. Genom att välja en hårddisk med 1 TB kapacitet kan 1380 mätningar sparas vilket är mer än tillräckligt (se avsnitt 3.3). För detta användes en *Verbatim 53071 Store 'n Go 1 TB* hårddisk vid respektive mätsystem.

GPS-mottagare

För att synkronisera mätserierna i tid, utrustades vardera mätsystem med en GPS-mottagare (Adafruit Ultimate GPS GNSS with USB) som uppdaterade Raspberry Pi:ns systemtid en gång per sekund med hjälp av mjukvarupaketerna *gpsd* och *Chrony* (Chrony Project, 2024; GPSD Project, 2026). En detaljerad beskrivning för GPS-mottagarens konfiguration återges i bilaga A.5.

Laptop och mobiltelefon

Raspberry Pi:n bör kunna styras med hjälp av en annan dator under mätning. Det tillåter kontrollering av att mätningarna genomförs korrekt med hjälp av skärmspeglning. För att göra detta krävs det att en VNC-klient är installerad på datorn. Datorn ansluts trådlöst till Raspberry Pi:ns trådlösa hotspot vilket via VNC tillåter skärmspeglning via programvaran *TigerVNC*. Samma tillvägagångssätt kan även göras med en mobiltelefonen, men då med programvaran *RealVNC* istället. På mobiltelefonen installeras även *Phyphox* som används för att ta reda på antennens vinkel och positionering, se avsnitt 3.2.4.

SFP+ adapter

Den snabbaste möjliga dataöverföring mellan Raspberry Pi och SDR sker vid anslutning till SDR:ens SFP+ port. För att göra denna anslutning krävs en adapter som ansluter SFP+ porten till en ethernetkabel.

3.2 Mätplatser

För att bestämma mätplats behövs en beskrivning över området där mätningarna genomfördes samt ett tillvägagångssätt för att välja mätplatsen. Utifrån den valda platsen har beräkningar gjorts för att rikta in antennerna mot masten och för att beräkna värden som sträcka genom skog och avstånd till masten.

3.2.1 Svartberget

Svartberget försökspark och dess tillhörande radartorn BorealScat-2 ligger 50 km nordväst om Umeå. Skogen vid Svartberget består främst av barrskog där tall och gran är de vanligaste arterna. Skogen är runt 100 år gammal och har en medelhöjd på 18 m och en medelstamdiameter på 20 cm (Leistner m. fl., 2026).

Radartornet BorealScat-2 består av ett 50 m högt torn där tre stycken antennuppsättningar är placerade nära dess topp (se figur 3.10). En av antenngrupperna använder frekvenser mellan 0,3-2 GHz, vilket är inom UHF-bandet. (Ulander m. fl., 2024). Det finns en reflektor med fri sikt till tornet och en reflektor i skogen som används för att studera hur dämpningen från skogen varierar. Med reflektorn dämpas signalen två gånger av skogen. BorealScat-2 samlar in tidsserier på reflektionen från skogen nedanför på en timvis tidsskala. Utöver radardata finns även kompletterande data på stamvattenhalt och omkrets på träden (Leistner m. fl., 2026). Från ICOS-tornet

vid området finns även data på markfuktighet och annan meteorologisk data (Peichl m. fl., 2024)



Figur 3.10: Radartornet BorealScat-2, vid Svartbergets försökspark.

3.2.2 Brudaremossenmasten och närliggande områden

Brudaremossenmasten är en 331 m hög mast som bland annat sänder TV- och radiosignal. TV-sändaren är placerad 310 m upp på masten och masten står 120 m.ö.h. vilket innebär en total antennhöjd på 430 m.ö.h. TV-effekt är 50,119 kW ERP rundstrålande med DVB-T/T2 standard. Centerfrekvens för TV-sändning från masten är 546 MHz (A. Nydegger (Post och Telestyrelsen), personlig kommunikation, 2 Mars, 2026). Polarisationen från TV-sändaren är horisontell, vilket bestämdes genom en testmätning där effekten var betydligt högre vid horisontell mottagning. Vid testmätning noterades även att bandbredden var runt 7,6 MHz.

Det finns två stycken naturreservat i anslutning till masten, Delsjöområdets- och Knipeflågsbergens naturreservat. Båda områdena är karakteriserade av nord-sydliga bergsryggar som går genom landskapet med stora höjdskillnader. På höjderna är jordtäcket tunt och i övrigt är det en stor variation av natur som varierar mellan barrskog, lövskogar, myrar, sumpskogar och hållmarker (Länsstyrelsen Västra Götaland, u.å.-a, u.å.-b). Se figur 3.11 för en karta över området.

3.2.3 Val av mätplats

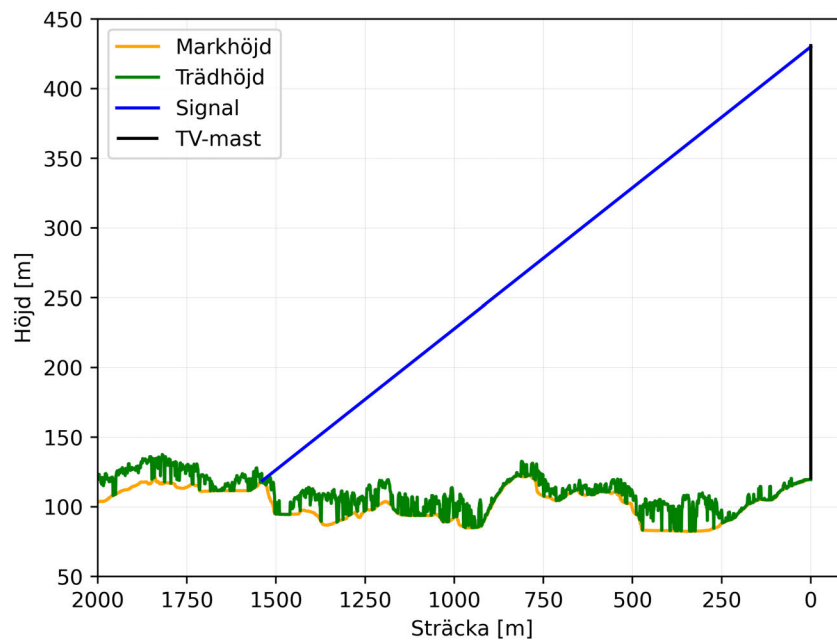
Ett antal parametrar bestämdes för att hitta en lämplig mätplats i området runt Brudaremossenmasten. De består både av följande praktiska och tekniska avgränsningar:

1. **Tillgänglighet (avstånd från bil/cykelväg):** För att mätningarna ska vara praktiskt genomförbara behöver mätutrustningen som är otymplig och tung transporteras till mätplatsen. Därav finns en avgränsning till platser inom 500 m från bilväg alternativt 500 m från en cykelväg.
2. **Fri sikt till masten samt sträcka genom skog:** Det krävs en plats med fri sikt till masten samt en närliggande plats där signalen går tillräckligt långt genom skogen. Det har genom arbetet definierats att sträckan genom skogen bör vara runt 50 m. Att motivera och definiera vad lagom avstånd genom skogen för mätningen är ligger utanför projektets omfång.
3. **Vinkel till masten:** Den horisontella vinkeln till masten bör vara runt 10 grader för att signalen ska hållas inom huvudloben (se avsnitt 2.1).
4. **Sluttning:** För att minimera att signalen studsar mot marken och sedan tillbaka till mottagarantennen mäts signalen med fördel i nerförsbacke.
5. **Maximal mottagareffekt:** Den maximala effekten radion bör ta emot är -15 dBm. Hur stor effekt radion tar emot beror på avståndet från sändaren. För att beräkna minsta säkerhetsavståndet från masten skapades en Python-kod där avståndet enligt Friis transmissionsformel beräknades till 4485 m (se avsnitt 2.1). Eftersom detta i hög grad begränsar antalet tillgängliga mätplatser i omgivningen av masten används koaxialdämpare till antennen. Till varje antenn finns en 10 dB dämpare och en 20 dB dämpare, med totalt upp till 30 dB dämpning vilket ger ett säkerhetsavstånd på 142 m från masten.

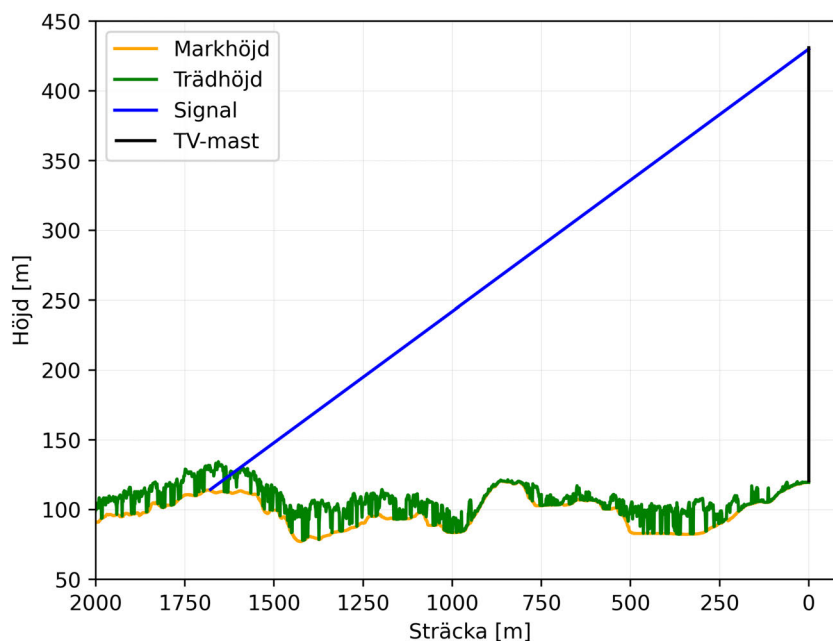
Enligt dessa parametrar markerades fem potentiella platser för fältmätning på en karta enligt figur 3.11. Området kring de fem platserna inspekterades och en lämplig mätplats lokaliserades vid koordinat $57^{\circ}41'19.2\text{N}$, $12^{\circ}04'56.1\text{E}$ för skogssystemet och vid $57^{\circ}41'13.8\text{N}$ $12^{\circ}05'00.5\text{E}$ för luftsystemet (se figur 3.12a, 3.12b och 3.11). Skogen framför skogssystemet består främst av tall och gran. Avståndet mellan mätplatserna är ungefär 170 m, luftsystemets antenn är placerat 119 m.ö.h. och skogssystemets 114 m.ö.h.

mottagarna visas i figur 3.13 och 3.14. Mer utförlig beskrivning av kartdata och beräkningar finns i appendix A.8.

För att mottagarantennen ska vara vinklad mot sändaren på masten har en telefonhållare skapats i designverktyget Autodesk Fusion, 3D printats och monterats på antenntativet. Telefonen läggs på hållaren och ställs in enligt beräknade vinklar med hjälp av appen Phyphox. Se avsnitt A.7 mer information om 3D-hållaren.



Figur 3.13: Signalstråle från sändarantenn till mottagaren i luftsystemet, samt omgivande terräng.



Figur 3.14: Signalstråle från sändarantenn till mottagaren i skogssystemet, samt omgivande terräng.

3.3 Val av mätsekvens

Under mätserien utfördes mätningar var femte minut, vardera på 10 s, vilket bedömdes ge tillräcklig tidsupplösning utan att överbelasta mätsystemets datahanteeringskapacitet. Mätsekvensen utformades genom en avvägning mellan mätsystemets hårdvarubegränsningar och behovet av att mäta TV-signalens intensitet med tillräcklig precision och tidsupplösning för att kunna detektera dämpningsförändringar över dygnet.

För att avgöra om uppmätt dämpningsskillnad beror på mätosäkerhet eller variation av vattenmängden i träden, behöver signalen vid varje mättillfälle samplas under tillräckligt lång tid för att kunna fastställas med en osäkerhet som är mindre än den förväntade dämpningsvariationen. Tidigare mätdata från BorealScat-2 visar att förändringen av tvåvägsdämpning över ett dygn är upp till 1-2 dB (Leistner m. fl., 2026). Detta kan dock endast med stor försiktighet extrapoleras till skogen i Delsjöområdet men ger en uppfattning om storleksordning.

För okorrelerade sampel minskar mätosäkerheten proportionerligt mot antalet sampel. I praktiken är närliggande sampel ofta korrelerade och således uppstår det en gräns till vilket samplingsfrekvensen kan ökas för att datapunkterna fortfarande ska vara okorrelerade. Den egentliga mätosäkerheten minskar därmed proportionerligt mot antalet okorrelerade sampel vilket beskrivs i teoriavsnitt 2.4.

Eftersom tiden mellan okorrelerade sampel var okänd på förhand, är det mättiden vid varje mättillfälle som kan justeras för att uppnå lämplig precision. Utifrån en praktisk avvägning mellan ökad precision och hårdvarubegränsningar såsom datahanteringskapacitet valdes mättiden till 10 s. Mätskriptet designades med hjälp av GNU Radio, se bilaga A.4.3. Tio sekunders mätning motsvarar 80 miljoner sampel och genererade ca 640 MB data per mätsystem och mättillfälle. Utöver detta tillkom cirka 80 MB data från kalibreringsslingan, samt data från markfuktighetssensorer och väderstationen.

Den snabbaste dämpningsförändringen som kan detekteras över dygnet är beroende av tidsintervallen mellan varje mättillfälle. Eftersom den maximala förändringshastigheten på dämpningen hos skogen i Delsjöområdet var okänd på förhand, eftersträvades ett relativt kort tidsintervall mellan varje mättillfälle. Emellertid förekom begränsningar i hur snabbt Raspberry Pi kan köra mät- och kalibreringsskripten samt skriva data till hårddisken (se avsnitt 3.1.2). En avvägning gjordes mellan ökad tidsupplösning och vad som bedömdes som en hanterbar datamängd. Tidsintervallet mellan mättillfällena sattes därför till fem minuter. Hypotetiskt enligt Nyquist kriteriet, se avsnitt 2.1.1 innebär det att den snabbaste dämpningsförändringen som kan detekteras är variationer på cirka 10 minuter. Mätsystemet har därmed goda förutsättningar att detektera dämpningsförändringar i skogen till följd av transpiration som vanligtvis sker över flera timmar.

3.4 Genomförande av mätning

Inför mätningen i skogen upprättades en mätplan med specifika instruktioner för dess genomförande, packlista samt annan nödvändig information som felsökning på Raspberry Pi:n. Mer information om mätplanen finns tillgänglig i bilaga A.1.

Nedan följer en övergripande beskrivning över mätningen som genomfördes den 20 april 2026. Inför mätningen delades utrustningen upp i två uppsättningar, en med allt material till skogssystemet och en till luftsystemet. Polisen och Länsstyrelsen kontaktades och informerades om att en mätning skulle genomföras i området. Materialet transporterades med bil till närmaste parkering och bars till respektive mätplats. Vid platsen monterades utrustningen enligt mätuppsättningen i figur 3.1. Markfuktighetssensorn placerades i närheten i anslutning till ett träd och koaxialkabeln från antennen till SDR samt kalibreringsslingan kläddes i aluminiumfolie för att reflektera solens strålar och minimera uppvärmning. Den exakta positionen samt höjd för mätantennen noterades och skrevs in i Python-skriptet. Därefter beräknades vinklar mot masten, antennen riktades därefter in enligt vinklarna (se tabell 3.1). I nära anslutning placerades en skylt med information om projektet för allmänheten.

Tabell 3.1: Olika parametrar för luftsystemet och skogssystemet som visar hur de förhåller sig till Brudaremossenmasten och dess TV-sändare.

	Luftsystem	Skogssystem
Position	57°41'19.2N, 12°04'56.1"E	57°41'13.8N 12°05'00.5"E
Elevationsvinkel	12.5°	11.7°
Vinkel från nord	297°	301°
Sträcka genom skog	0 m	51 m
Avstånd till sändare	1568 m	1707 m

Dator eller telefon kopplades upp till Raspberry Pi:n genom VNC för att styra systemet. För att upptäcka en tillräckligt stor skillnad mellan brusgolv och signalen från masten användes GNU Radio som kan plotta signalens frekvensspektrum. Skillnaden i decibel var bestämd till att vara minst 20 dB. Se bilaga A.3.3 för mer information. När det var säkerställt att Raspberry Pi:n var synkroniserad till GPS-tiden startades mätningen. Varje halvtimme kopplades en dator/telefon upp med VNC till Raspberry Pi:n och kontrollerade att data hade sparats ner. Kl. 09.30 (svensk tid) var båda uppsättningarna igång och sparade ner data. Kl. 16.02 roterades antennen från horisontellt till vertikalt och två mätningar genomfördes. Kl 16.10 gjordes sista mätningen och efter detta monterades mätsystemen ner.

3.5 Dataanalys

Dataanalys utfördes med Python. Nedan följer en beskrivning i ord hur dataanalysen är utförd. För fullständig kod se avsnitt A.1.

3.5.1 Radardata från BorealScat-2

Data från forskningsprojektet BorealScat-2 i Svartbergets försökspark har analyserats. Där används radartornet för att studera reflektion av EM-vågor från skogen nedanför. Genom att analysera denna data över ungefär samma frekvensband (582 - 630 MHz) som för TV-signaler (542 - 550 MHz) kan den relateras till och fungera som grund för vad som kan förväntas av mätningen vid Brudaremossen. Det som är av intresse är variationer över tid, och hur relevanta variabler hänger ihop.

Det som studerats från radartornet är tomogram för varje tidssteg. Ett tomogram är en tvådimensionell avbildning av reflektion i ett vertikalt plan. I detta fall visar tomogrammen en 2D bild av varifrån EM-vågor reflekteras och med vilken intensitet (se figur 3.15). Radardata analyseras för perioden 14 maj - 15 juli 2024 vilket är en period som förväntas visa starka dygnsvariationer.

Radardata behandlades enligt följande

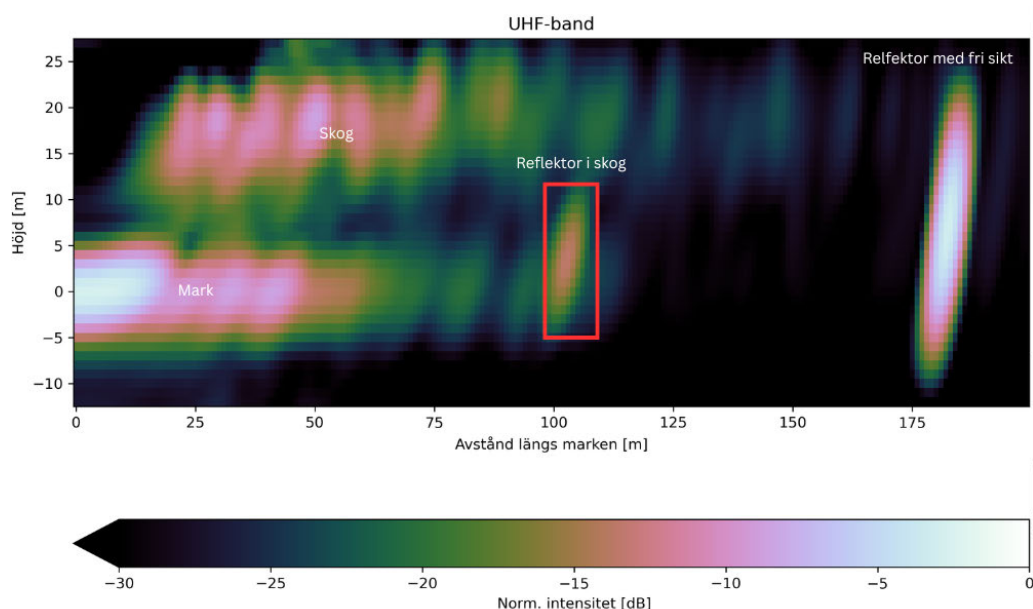
1. Reflektorn i skogen valdes ut (se figur 3.15). För varje tidssteg sparades maxvärdet P_{max} i reflektorrutan. Detta är alltså ett värde på intensiteten av EM-

vågorna som reflekteras av reflektorn. Vågorna dämpas då två gånger av skogen.

2. För att få ett mått på dämpning D inverterades varje maxvärde: $D = 1/P_{max}$.
3. Dämpningen konverterades till dB med dämpningens högsta värde som referens enligt

$$D_{norm}(t)[dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{D(t)}{\max(D(t))} \right) \quad (3.2)$$

4. Den genomsnittliga utvecklingen över ett dygn beräknades och dämpningen visualiserades tillsammans med kompletterande variabler över ett genomsnittligt dygn, hela perioden samt ett specifikt dygn.



Figur 3.15: Tomogram för 2024-05-14 kl. 00.04. Intensiteten hos de reflekterade vågorna representeras med färgkodning i dB. Det 50 m höga radartornet är inte synligt i figuren men skulle vara placerat på dess vänstra sida. Notera att reflektionerna från "Reflektor med fri sikt" och "Mark" är starkast. Bilden visar även trädliknande strukturer som är skogen som vågorna passerar innan de når det rödmarkerade området, vilket är reflektorn gömd i skogen. Det är endast det rödmarkerade området som studeras.

Utöver detta gjordes även ett spridningsdiagram mellan stamvattenhalt och dämpning för att ytterligare undersöka hur dämpning och stamvattenhalt korrelerar. För att antalet datapunkter skulle stämma överens behövdes dämpningsdata interpoleras till samma mättider som data för stamvattenhalten.

3.5.2 Data från Brudaremossen

Data från de två mätsystemen inkluderar både I/Q-data och kompletterande data. All data hade en filstruktur enligt figur A.5. Varje fil med I/Q-data konverteras från komplexa tal till effekt enligt

$$P_i = |a + jb|^2 [W] \quad (3.3)$$

Därefter beräknas medeleffekt \bar{P} samt det 95-procentiga konfidensintervallet för medeleffekt och lades tillsammans med den kompletterande datan från varje mätuppsättning till i en datatabell indexerat på tid. En datatabell för mätserien från skogssystemet och en för matserien från luftsystemet.

Efterbehandling av data har gjorts. VPD beräknades enligt

$$VPD = SVP - AVP [kPa] \quad (3.4)$$

Där AVP är det faktiska ångtrycket givet av väderstationen och SVP det mättade ångtrycket som ges av ekvationen

$$SVP = 0,61078e^{\frac{17,27T}{T+237,3}} [kPa] \quad (3.5)$$

Där T är temperaturen i Celsius (Monteith & Unsworth, 2013, s. 11-13). Detta lades till i datatabellen för skogssystemet.

Mätningarna är gjorda utefter lokal svensk tid. Konvertering till lokal soltid (LST) gjordes genom att först subtrahera två timmar för att erhålla koordinerad universell tid (UTC). Sedan beräknas LST med hjälp av mätplatsens longitud. Soltiden var 1 h och 12 min bakom svensk lokal tid. Det vill säga 08:18 lokal soltid motsvarar 09:30 svensk tid.

All effektdata skalades utefter vilken koaxialdämpning och förstärkning som använts på de olika mätuppsättningarna. Detta för att få en förståelse för skillnaden i styrka på de olika signalerna. Luftsystemet hade en 10 dB dämpare och 15 dB förstärkning, alltså en total förstärkning på 5 dB. I effekt motsvarar det att dividera effektdata med 3,16. För skogssystemet användes 25 dB förstärkning och inga dämpare. Här dividerades effektdata med 316,23. Sedan konverterades effektdata till decibel enligt

$$\bar{P}[dBW] = 10 \log_{10}(\bar{P}[W]) \quad (3.6)$$

Dämpningen D beräknades enligt

$$D[dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{\bar{P}_{luft}[W]}{\bar{P}_{skog}[W]} \right) \quad (3.7)$$

Till dämpningen gjordes också en kubisk utjämningspline för att visa den generella trenden genom dagen (de Boor, 1978).

Statistiska beräkningar för att studera osäkerheten av mätningarna gjorts. Fördelningar för komplex- och realdelen av I/Q-data, för absolutbeloppet av I/Q-data (amplituden) samt för effekten (amplituden i kvadrat) beräknades och visualiserades.

Glidande blockmedelvärde har använts för att undersöka variationer i medelvärdet inom en 10 sekunders mätning samt för beräkning av konfidensintervall (KI). Detta beräknades genom att dela upp en lista med effektvärden, som består av 80 miljoner sampel, i ett mindre antal block med ett visst antal sampel i varje. För varje block beräknades medelvärdet.

För att beräkna det 95-procentiga konfidensintervallet för medelvärdet till följd av variationer i effekt över en 10 s mätning antogs en svagt stationär process, se teoriavsnitt 2.4. $KI_{95\%}$ för medelvärdet \bar{P} beräknades med hjälp av det glidande blockmedelvärdet av 8 miljoner block med 10 sampel i varje. Detta på grund av att det är beräknings effektivt. Detta är möjligt eftersom de 10 sampel inom varje block antogs okorrelerade på grund av att OFDM kan approximeras som vitt brus, se avsnitt 2.1.3. Det 95-procentiga konfidensintervallet för varje medelvärde \bar{P} ges av

$$KI_{95\%} = \bar{P} \pm 1,96 \frac{s}{\sqrt{N_{eff}}} \quad (3.8)$$

där s är stickprovsstandardavvikelsen för fördelningen av alla block och N_{eff} är antalet okorrelerade block som ges av

$$N_{eff} = \frac{N_{block}}{\tau_{int}} \quad (3.9)$$

Där N_{block} är totala antalet block (8 miljoner) och τ_{int} är *integrerad korrelationstid* och kan ses som ett mått på hur många block som kan tolkas som ett okorrelerat block. τ_{int} ges av

$$\tau_{int} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \rho(k) = \rho(0) + 2 \sum_{k=1}^n \rho(k) \quad (3.10)$$

där $\rho(k)$ är autokorrelationen mellan block. Den övre summationsgränsen n varierar för varje 10 sekunders mätning och valdes som det sista värdet innan $\rho(k)$ blir 0. τ_{int} är då så många block som utelämnas innan två block kan ses som okorrelerade, vilket är det som är av intresse. För beräkning av $\rho(k)$ användes Wiener-Khinchins teorem, se avsnitt 2.4.

4

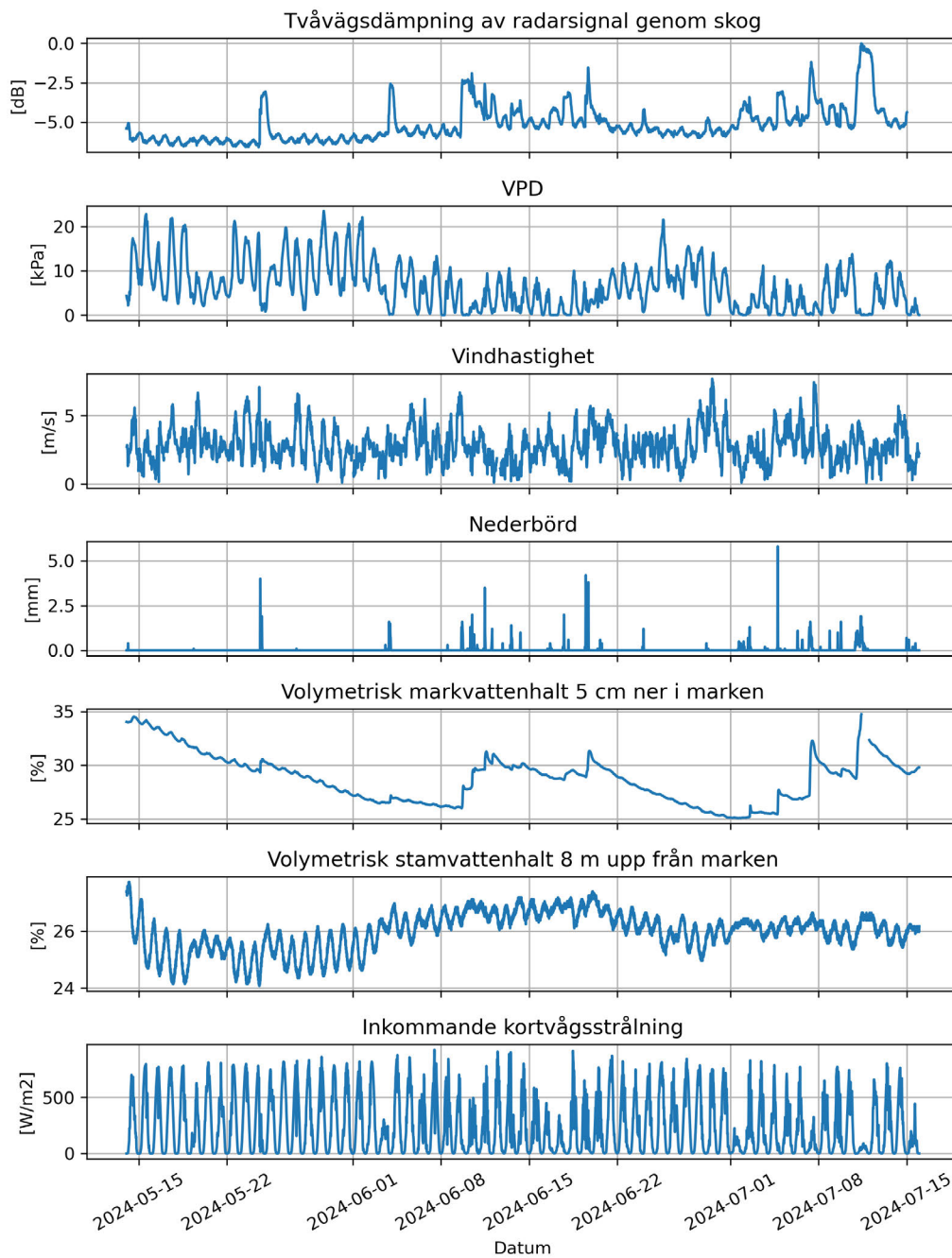
Resultat

I detta avsnitt presenteras den behandlade mätdata som har tagits fram från BorealScat-2 data och från mätsystemen använda i Delsjöområdet. Detta görs med hjälp av figurer som beskriver de olika uppmätta parametrarna på olika tidsskalor.

4.1 Radardata från BorealScat-2

Figur 4.1 visar dygnsperiodiskt beteende för dämpning, VPD, markvattenhalt, stamvattenhalt, inkommande kortvågstrålning (solinstrålning) och till viss del även vind. Notera att grafen för dämpningen är relativt sitt högsta värde enligt ekvation 3.2. Grafen visar inte hur mycket som skogen faktiskt dämpar, bara hur dämpningen förändras över tid. Detta gäller även för figur 4.2, 4.3 och 4.4. Det noteras att dämpningen ökar kraftigt vid vissa tillfällen, detta korrelerar med när det finns nederbörd. VPD korrelerar också med nederbörd, under perioder med mycket nederbörd är VPD lägre. Vinden uppvisar ingen tydlig korrelation med de andra variablerna. Det noteras att markvattenhalten justeras upp varje gång det regnar men att den totalt över perioden minskar. Stamvattenhalten uppvisar tydligt dygnsperiodiskt beteende, det finns även antydning till att den är högre när markvattenhalten är högre. Den inkommande kortvågsstrålningen är också mycket dygnsperiodisk, men uppvisar lite lägre värden vid vissa tillfällen. Detta korrelerar med när det regnar.

4. Resultat

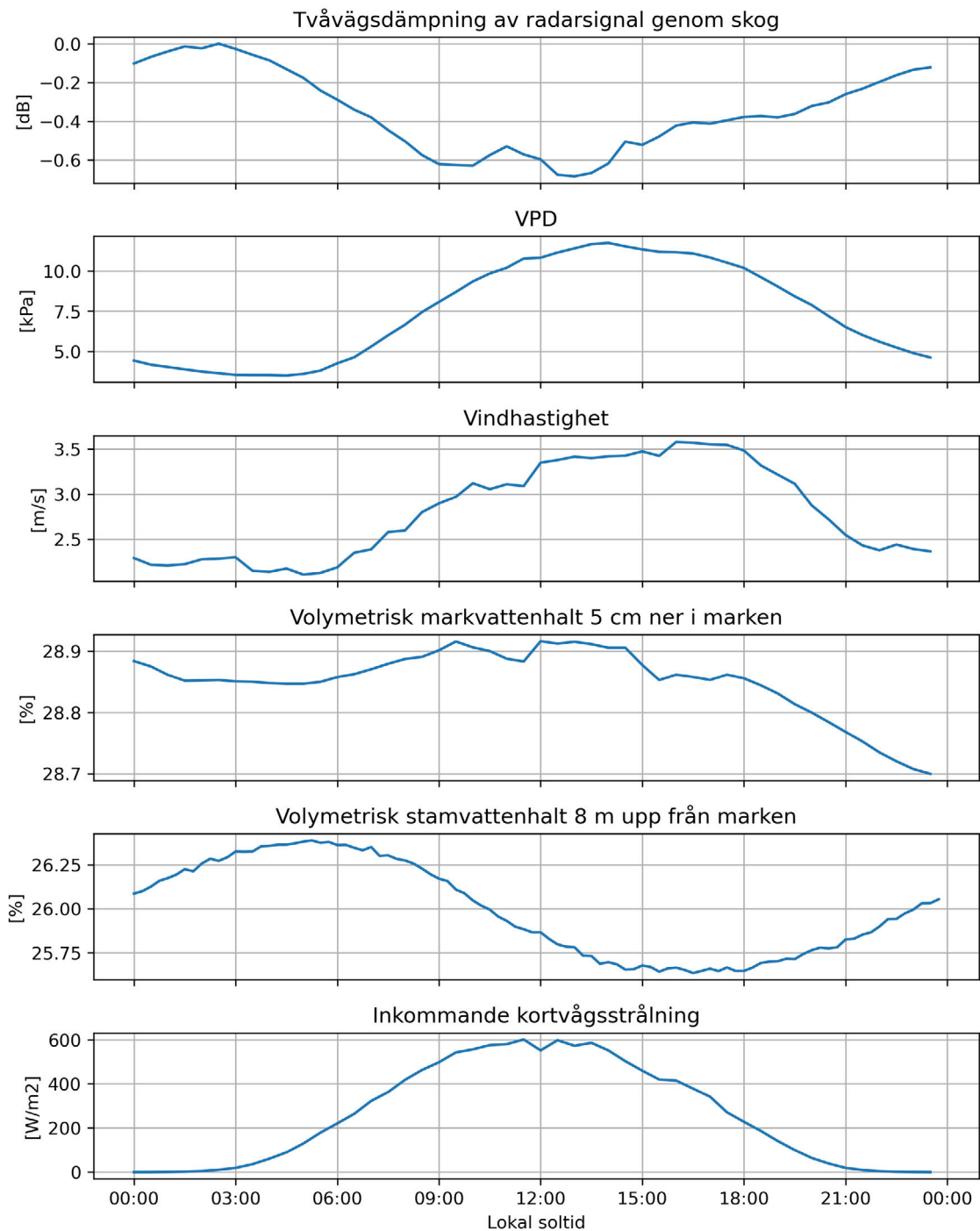


Figur 4.1: Variationer för dämpning, VPD, vindhastighet, nederbörd, markvattenhalt, stamvattenhalt samt inkommande kortvågsstrålning över perioden 2024-05-14 - 2024-07-15. Notera att dämpningen, VPD, stamvattenhalt och inkommande kortvågsstrålning uppvisar tydligt dygnsperiodiskt beteende. Nederbörd korrelerar med ökad dämpning, minskning av VPD, ökning av markvattenhalt samt minskning i inkommande kortvågsstrålning. Markvattenhalten uppvisar svagt dygnsperiodiskt beteende. Vindhastigheten uppvisar ingen tydlig korrelation med de andra variablerna.

Figur 4.2 visar det genomsnittliga dygnet baserat på samma period som visades i figur 4.1. Dygnsoscillationerna som observerades i figur 4.1 blir ännu tydligare här. Dämpningen minskar under dagen med knappt 0,7 dB och är som minst kring kl. 12.00 lokal soltid. Däremot noteras en liten topp precis innan kl. 12.00. Denna topp sammanfaller inte tydligt med andra parametrar, vad den beror på har inte undersökts på djupet, men en anledning kan vara att genomsnittet även inkluderar dagar med regn. VPD och vindhastighet är som högst runt kl. 14.00 och har då ett värde på över 10 kPa och 3,5 m/s. Markvattenhalten visar på en genomsnittlig nedåtgående trend på 0,2 procentenheter per dag, vilket förklaras av den nedåtgående trenden som noteras i figur 4.1. Markvattenhalten uppvisar också ett dygnsperiodiskt beteende och uppnår sitt högsta värde runt kl. 12.00, något som förklaras av att träden tar upp vatten ur marken periodiskt. Stamvattenhalten uppvisar ett tydligt periodiskt dygnsbeteende där vattenhalten pendlar mellan 25,6 % och 26,4 %. Stamvattenhalten ökar i träden från kl. 00.00 till kl. 06.00, minskar från ungefär kl. 06.00 till kl. 18.00, och börjar öka igen fram till kl. 06.00 nästa dag. Dämpningens minimum är ca 3 timmar innan stamvattenhaltens minimum, vilket kan förklaras av fuktsensors låga höjd (8 m) i förhållande till träd Kronans höjd (ca 20 m) vilket förväntas dominera dämpningen. Det vill säga, vattenhalten minskar först längst upp i träden där transpirationen sker och det är först efter en tidsfördröjning som vattenhalten minskar längre ner i stammen också. Den inkommande kortvågsstrålningen uppvisar också ett tydligt periodiskt beteende där den är som störst på över 500 W/m^2 kl. 12.00.

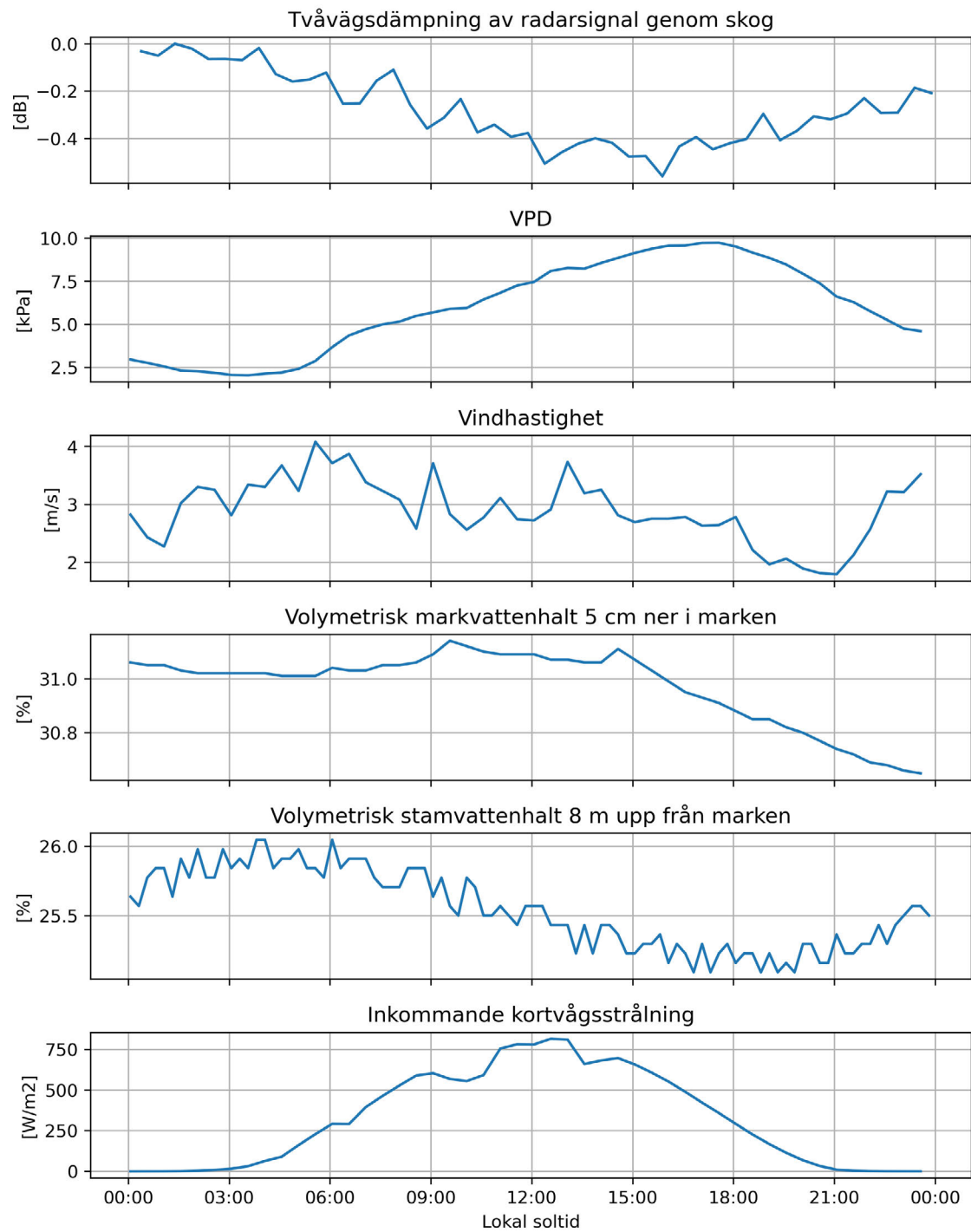
Figur 4.3 visar ett specifikt dygn inom perioden som visas i figur 4.1. Det noteras att de genomsnittliga dygnsvariationerna i figur 4.2 inte nödvändigtvis är lika jämna för ett specifikt dygn. Dämpningen minskar med 0,5 dB under dagen och är som minst runt kl. 16.00. VPD når sitt högsta värde (10 kPa) precis innan kl. 18.00. Vindhastigheten uppvisar ingen korrelation med andra variabler. Markvattenhalten visar framförallt en nedåtgående trend från 31,05 % till 30,65 %. Stamvattenhalten, och till viss del även markvattenhalten, visar på liknande dygnsperiodiska beteende som i figur 4.2. Stamvattenhalten är som störst runt kl 06:00 på 26 % och minst runt kl. 17.00 på 25 %. Den inkommande kortvågsstrålningen är relativt lik den i figur 4.2 med att den är som störst runt kl. 12:00, däremot är värdet här högre, cirka 800 W/m^2 .

4. Resultat



Figur 4.2: Genomsnittlig daglig översikt. Figuren visar den genomsnittliga utvecklingen över ett dygn. Genomsnitten baseras på tidsperioden som visas i figur 4.1 (2024-05-14 - 2024-07-15). Notera att alla variabler visar på dygnsperiodisk beteende. Dämpningen är som minst kl. 12.00, då är den inkommande kortvågstrålningen som störst. VPD och vindhastigheten når sitt största värde runt kl. 15.00. Notera även att stamvattenhalten är som minst runt kl. 16.30, vilket är en förskjutning med när dämpningen når sitt minsta värde.

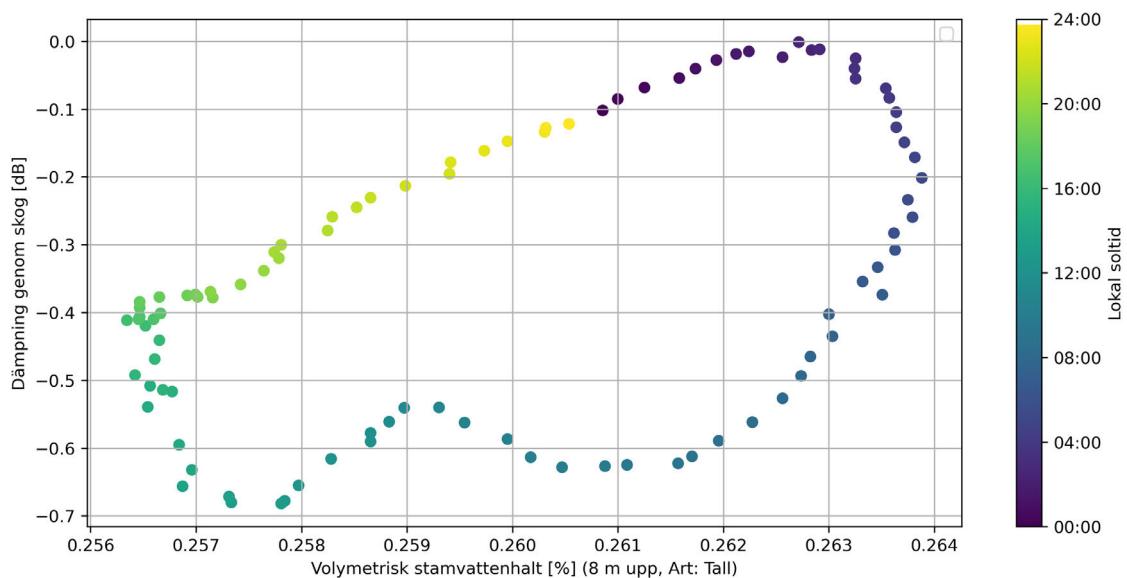
4. Resultat



Figur 4.3: Daglig översikt för 20/5 - 2024 över hur dämpning, VPD, vindhastighet, markvattenhalt, stamvattenhalt och inkommande kortvågstrålning varierar över valt dygn. Under dygnet var medeltemperaturen 7,1 °C och det regnade 0 mm. Dygnsperiodiskt beteende som i figur 4.2 uppvisas för samtliga variabler utom vindhastighet, men med större variation. Dämpningens minsta värde noteras vid kl. 16.00 och VPD når sitt högsta värde strax efter. Inkommande kortvågstrålningen, stamvattenhalten och till viss del även markvattenhalten visar på liknande beteende som i figur 4.2.

4. Resultat

Figur 4.4 visar hur genomsnittlig stamvattenhalt och dämpning korrelerar. Vid kl. 00.00, precis som i figur 4.2, är stamvattenhalten knappt 26,1 % och dämpningen -0,1 dB. Dämpningen ökar fram till kl. 02.30 där den når sitt maxvärde och börjar sedan att minska. Stamvattenhalten fortsätter att öka fram till kl. 05.20 och når då sin största värde på 26,39 %. Därefter följer en minskning i både dämpning och stamvattenhalt. Dämpningen är som minst kl. 13.00 på nästan -0,7 dB och stamvatteninnehållet är som minst kl. 16.30 på 25,63 %. Därefter ökar både dämpning och stamvattenhalt fram till kl. 00.00 nästa dag. Vi kan alltså utläsa att det råder en viss förskjutning mellan dämpningen och stamvattenhalten i tid. Detta kan som nämnt under figur 4.2 bero på en tidsfördröjning i vattenhaltsförändringar från träd-kronan som dominerar dämpningen till stammen där stamvatteninnehållsensorn är installerad.



Figur 4.4: Spridningsdiagram mellan volymetriskt stamvattenhalt och dämpning över ett genomsnittligt dygn, färgkodat efter tid på dygnet. Genomsnitten är samma som i figur 4.2 men dämpningen har interpolerats från 48 till 96 datapunkter för att stämma överens med antalet datapunkter för stamvattenhalten. Notera att det finns en viss förskjutning i tid mellan dämpningen och stamvattenhalten.

4.2 Mätningar från Brudaremossenmasten

I detta avsnitt presenteras resultat för effektmätningar i Delsjöområdet mot Brudaremossenmasten den 20 april 2026. Utöver detta presenteras effekten då antennerna var vertikalt inställda samt en statistisk analys.

4.2.1 Dämpning av TV-signaler genom skog

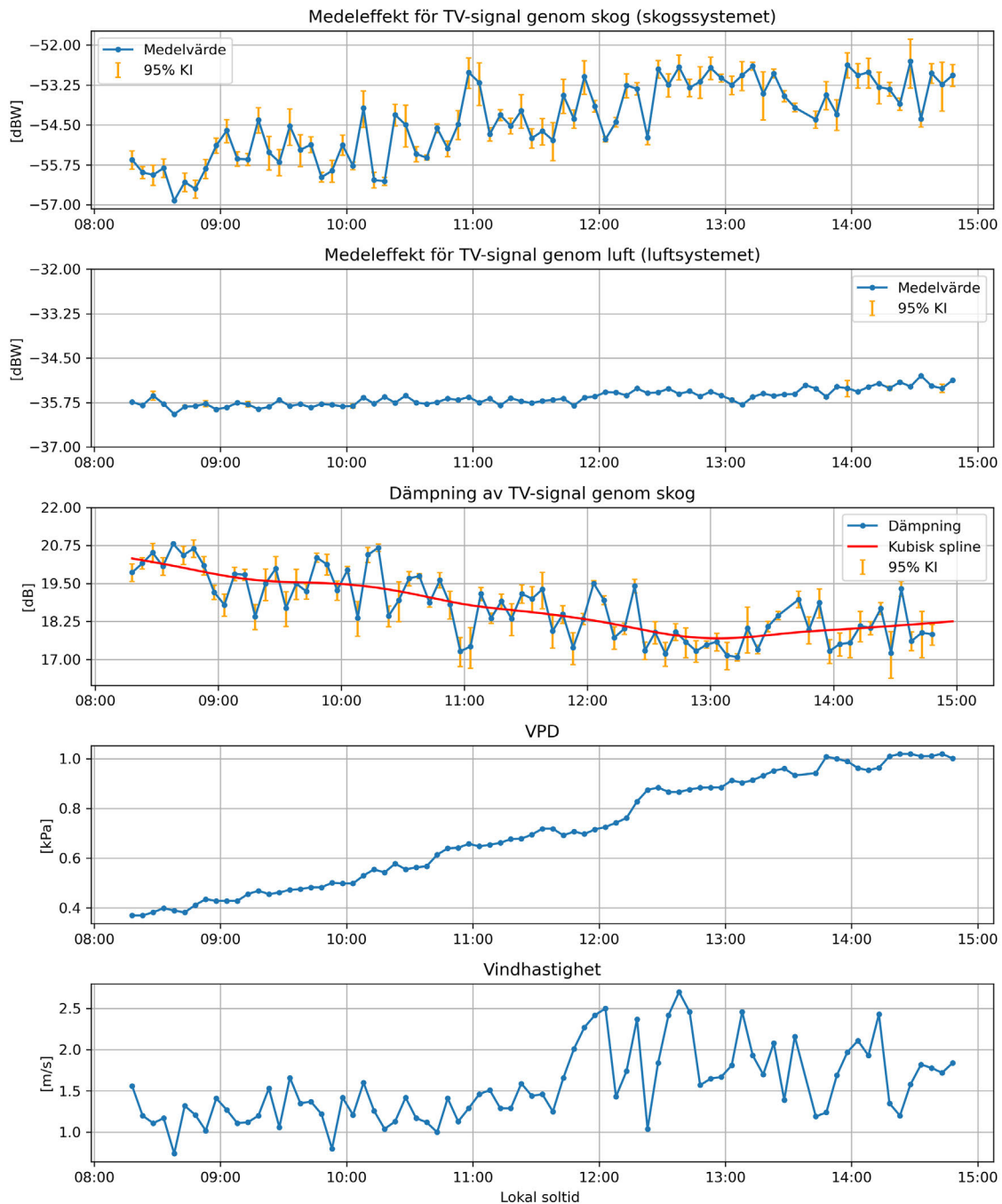
Samtliga grafer i detta avsnitt presenterar mätdata där båda mätsystemens antenner innehar horisontell positionering. Figur 4.5 visar tidsserier för det uppmätta medelvärdet av signalstyrkan både för systemet med fri sikt till TV-masten och systemet där signalen propagerar genom skog. Vidare presenteras den beräknade dämpningen där även en kubisk spline inkluderats för att tydliggöra utvecklingen över tid. Till respektive mätpunkt redovisas även ett 95-procentigt KI. Slutligen presenteras meteorologiska parametrar i form av VPD och vindhastighet.

De två översta figurerna i figur 4.5 illustrerar det beräknade medelvärdet av signalstyrkan vid den aktuella frekvensen 546 MHz för skogssystemet (signal dämpad genom skog) och luftsystemet (fri sikt till masten). Beräkningarna gjordes enligt ekvation 2.2 och omvandlades sedan till dBW utifrån ekvation 3.6. Ett tydligt resultat är att signalstyrkan är högre vid fri sikt till masten till skillnad mot där signalen propagerar genom vegetation. Detta är i linje med teorin om att vegetationen dämpar signalen, framförallt till följd av spridning men även absorption.

För skogssystemet syns en tydlig ökning i signalstyrka under dagen från cirka -55,6 dBW till -52,95 dBW, vilket motsvarar en ökning på ca 2,65 dBW. Även luftsystemet uppvisar en ökning i signalstyrka, denna är betydligt mindre än ökningen hos skogssystemet och uppskattas till 0,65 dBW.

En observation som görs är att medelvärdet varierar mer för den uppmätta signalstyrkan i skogen jämfört med signalstyrkan för luftsystemet där signalstyrkan är mer stabil. Orsaken till de större variationerna i uppmätt medeleffekt hos skogssystemet kan bero på rörelse i vegetationen till följd av vind. Det 95-procentiga KI är generellt större för skogssystemet än för luftsystemet, vilket indikerar större osäkerheter i mätningarna på signaleffekt för signalutbredningen genom vegetation. Samtidigt är KI små i jämförelse med den observerade ökningen av signalstyrka under dagen. Detta tyder på att den observerade ökningen av signalstyrka representerar en faktisk förändring snarare än variationer till följd av mätosäkerheter.

4. Resultat



Figur 4.5: Tidsserier för det uppmätta medelvärdet av signalstyrkan för systemet med fri sikt till TV-masten samt för systemet där signalen propagerar genom skog, tillsammans med beräknad dämpning. Felstaplarna representerar ett 95-procentigt KI. Den röda kurvan visar en kubisk spline för dämpningen och används för att förtydliga förändringar över tid. Nederst presenteras meteorologiska parametrar i form av vindhastighet och VPD. Samtliga mätningar är utförda med horisontell polarisering hos mätsystemens antenner.

Den tredje grafen i figur 4.5 visar dämpningen genom vegetation beräknat från ekvation 3.7. Grafen visar att dämpningen minskar under dagen, från cirka 19,85 dB till en dämpning på ca 17,85 dB. Detta innebär en ungefärlig förändring i dämpning på 2,0 dB. KI för den beräknade dämpningen är samma som KI för mätningarna vid skogssystemet, då dessa dominerar mätosäkerheten. Den observerade förändringen i dämpning är större än de 95-procentiga KI för samtliga mätpunkter och indikerar därför att variationen i dämpningen kan förklaras utifrån andra parametrar än mätosäkerheter.

Dämpningsminskningen syns även sammanfalla med en successivt ökande VPD som presenteras i fjärde grafen i figur 4.5. Enligt teorin är högre VPD kopplat till ökad transpiration och förändrad vattenstatus i vegetationen. Fram mot kl. 13.00 (lokal soltid) verkar dämpningen stabiliseras. Detta överensstämmer med teorin i avsnitt 2.2 där trädets vattenstatus är som lägst under mitten av dagen. En möjlig förklaring är att träden fungerar som en vattenbuffert. Trädets vattenreserver utnyttjas under förmiddagen i takt med att transpirationen ökar. Eftersom att vattenupptaget genom rotsystemet och transporten genom träden sker långsamt och med en viss fördröjning, kan vattenförlusterna under början av dagen överstiga tillförseln, vilket leder till minskat vatteninnehåll i trädet. För att reglera sin egen vattenförlust kan träden dessutom minska klyvöppningarnas öppningsgrad, vilket medför minskad transpiration trots fortsatt högt VPD. Sammantaget tyder detta på att trädets vatteninnehåll är som lägst under mitten av dagen och därefter återhämtas, vilket är en möjlig förklaring till den observerade trenden i dämpningen.

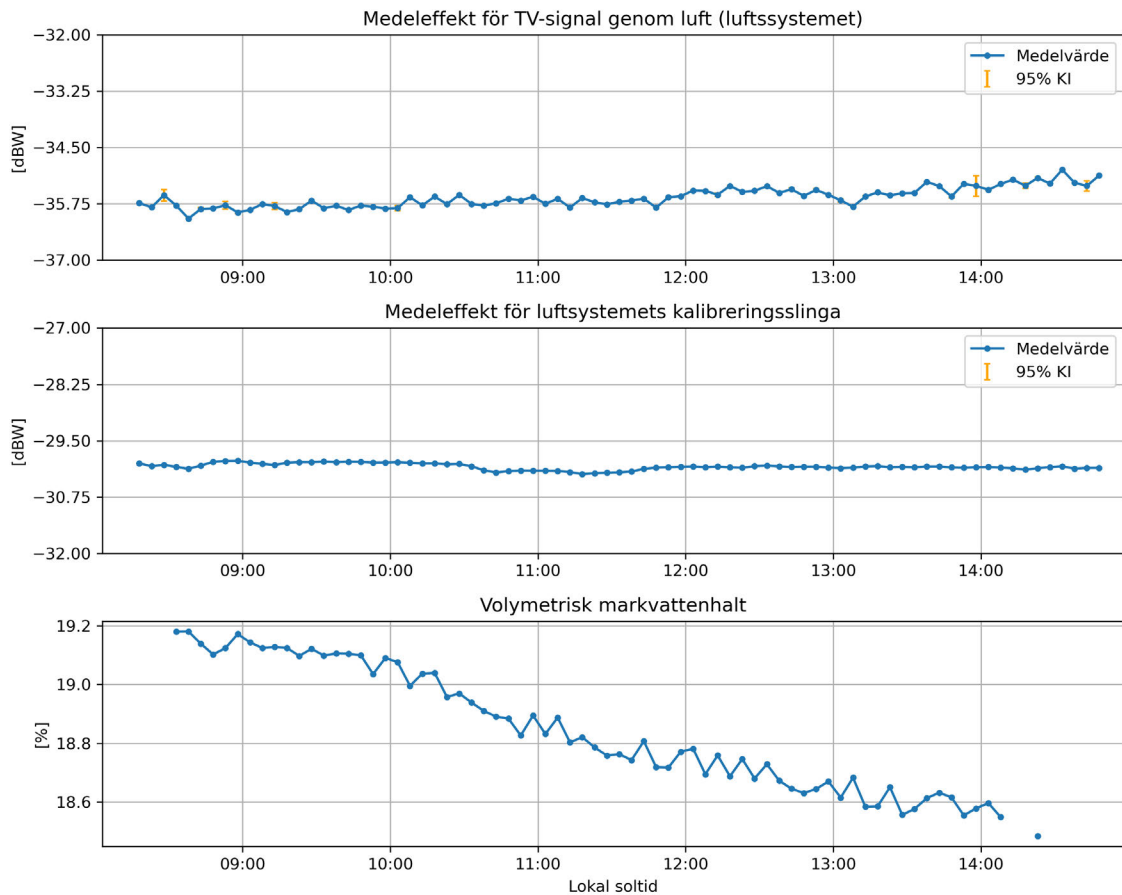
Vinden varierar under dagen utan något tydligt samband med de andra variablerna. Variationerna i vindhastighet är mindre under början av tidsserien medan större variationer observeras senare under dagen. Det finns en antydning till att den lägsta dämpningen som observeras inträffar efter en period med högre vindhastighet. Någon tydlig korrelation kan dock inte dras mellan vindhastighet och dämpning eller dess mätosäkerhet (KI).

4.2.2 Tidsseriemätningar från luftsysteem

För en mer detaljerad analys av den insamlade tidsserien från luftsysteem (fri sikt till masten) visar figur 4.6 medelvärdet av den uppmätta signalstyrkan, effekten från kalibrerings slingan samt tillhörande felstaplar i form av 95-procentiga KI. Vidare presenteras den uppmätta volymetriska markvattenhalten vid mätplatsen.

I den första grafen syns den beräknade mottagna effekten med tillhörande KI. Grafen visar en ökning av signalstyrka på ca 0,65 dBW. KI var genomgående små för samtliga mätpunkter vilket indikerar låg mätosäkerhet. Detta tyder på att mätssystemet var stabilt under mätperioden samt att ökningen i signalstyrka inte kan förklaras av osäkerheter i mätvärdena.

4. Resultat



Figur 4.6: Tidsserier för det uppmätta medelvärdet av signalstyrkan vid fri sikt till masten samt uppmätt effekt för kalibrerings slingan för luftsystemet med tillhörande 95-procentiga KI. Dessutom presenteras den volymetriska markvattenhalten vid mätplatsen som beräknades enligt ekvationen 3.1. Grafen saknar datapunkter i början och i slutet av mätningen. Anledningen till detta har inte undersökts.

Mätvärdena från kalibrerings slingan som syns i andra grafen i figur 4.6 visar inte på någon tydlig trend och är stabil under dagen. Detta indikerar att mätningen inte påverkades av instrumentdrift eller fel från SDR:en och var stabil över hela mätserien.

Graf 3 i figur 4.6 visar en tydlig minskning av markfuktighet under dagen. Detta kan vara till följd av ökande transpiration från intilliggande träd och avdunstning från marken under dagen. Det saknas datapunkter i början och i slutet av mätningen, anledningen till detta har inte undersökts. Observera att markfuktighetssensorn har stor mätosäkerhet på grund av att den ej är installerad enligt manualen och bör tolkas med försiktighet.

Utöver den uppmätta effekten från TV-sändaren beräknades även den teoretiska effekten enligt Friis transmissionsformel, se ekvation 2.8. Den förväntade mottagna effekten på avståndet 1563 m beräknades till 0,2614 mW vilket är ungefär $-35,83$ dBW. Detta stämmer väl överens med det uppmätta medelvärdet för luftsystemet, se översta grafen i figur 4.6. Det indikerar att mätsystemet gett goda resultat samt att Friis modell stämmer bra under rådande förhållanden och antaganden om sändaren.

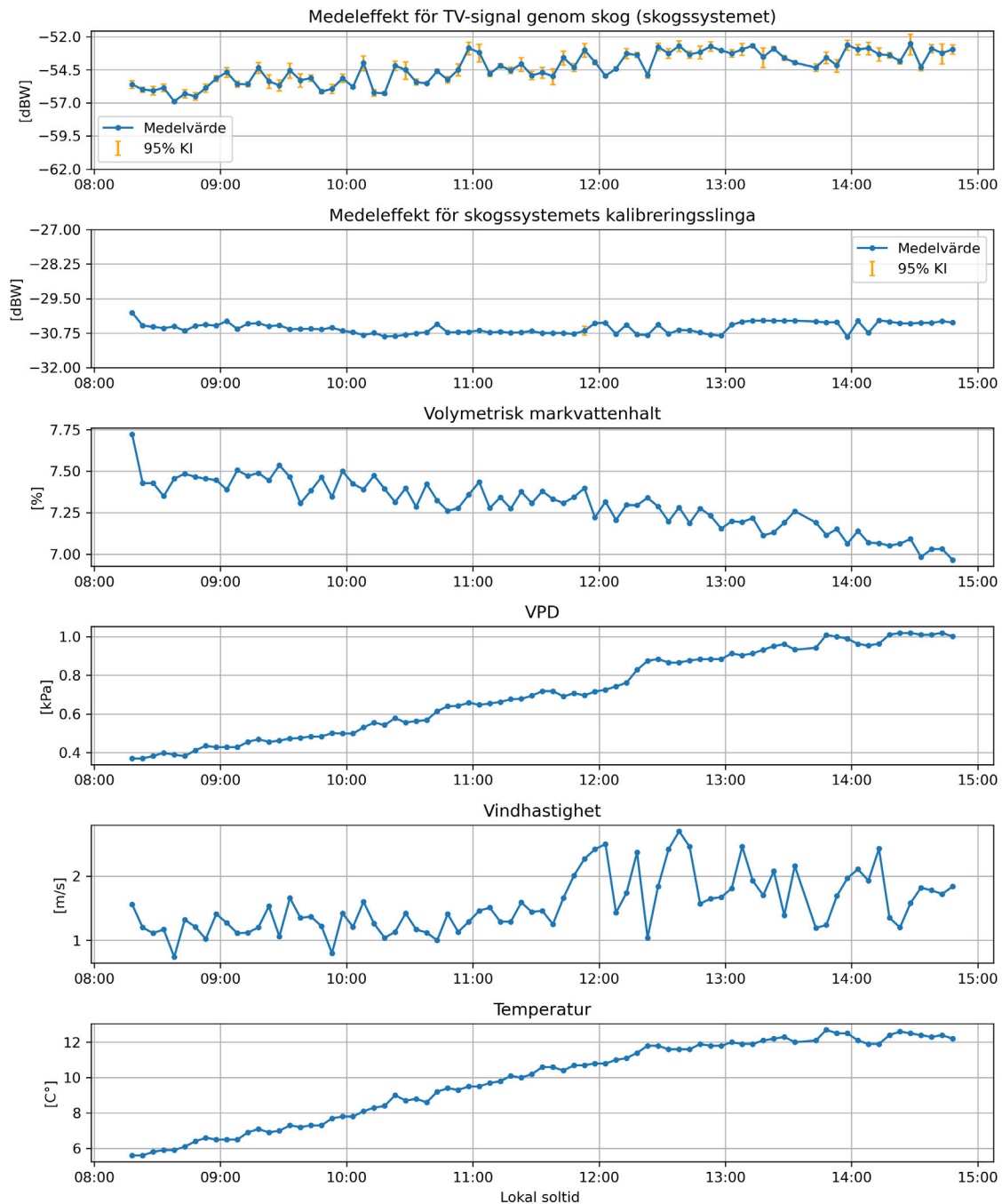
4.2.3 Tidsseriemätningar från skogssystemet

För en mer detaljerad analys av den insamlade tidsserien från skogssystemet (signal dämpad av skogen) visar figur 4.7 medelvärdet av den uppmätta signalstyrkan, effekten från kalibreringsslingan samt tillhörande felstaplar i form av 95-procentiga KI. Vidare presenteras den volymetriska markvattenhalten vid mätplatsen samt meteorologiska parametrar i form av VPD, vindhastighet och temperatur.

Den översta grafen visar samma resultat som den översta grafen i figur 4.5. För kalibreringsslingan observeras ingen tydlig trend eller variation. KI visar även att osäkerheterna för kalibreringsslingan är försumbara. Detta stärker trovärdigheten för de beräknade värdena för effekt och dämpning (figur 4.5) och indikerar att de observerade förändringarna i skogsdämpad effekt (översta grafen i figur 4.7) beror på utomstående parametrar och inte på felaktigheter eller osäkerheter i mätsystemet.

Utifrån graf 3, 4 och 6 i figur 4.7 observeras även en tydlig minskning av volymetrisk markfuktighet under dagen samt en tydlig ökning av VPD och temperatur. Detta sammanfaller med den observerade minskningen i dämpning, och är i linje med teorin och förändrad vattenstatus i vegetationen. Enligt teorin kan högre temperatur och VPD leda till ökad transpiration. Samtidigt kan en lägre markfuktighet minska trädens vattenupptag genom rötterna, då en låg vattenhalt binds hårdare i marken och skapar motstånd för vattenupptag. Det är dock oklart i vilken utsträckning den observerade minskningen av markvattenhalt utgjorde en begränsning för trädens vattenupptag och transpiration under den aktuella mätperioden. Det finns även en osäkerhet i den volymetriska markvattenhaltens tillförlitlighet på grund av att markfuktighetssensorn ej är placerad helt enligt manualen.

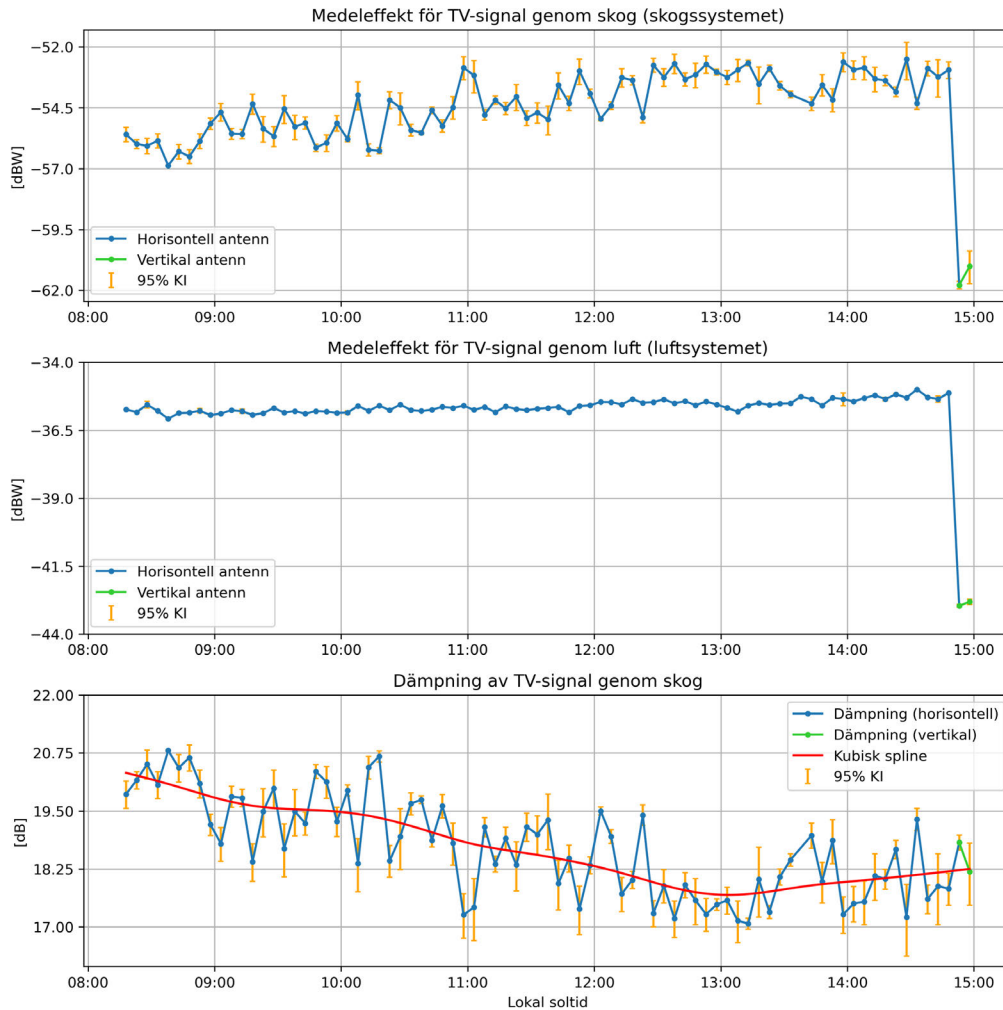
4. Resultat



Figur 4.7: Tidsserier för det uppmätta medelvärdet av signalstyrka vid propagering genom skog samt uppmätt effekt för kalibreringsringan till skogssystemet med tillhörande 95-procentiga KI. Dessutom presenteras den volymetriska markvattenhalten vid mätplatsen, beräknad enligt ekvation 3.1 samt de meteorologiska parametrarna VPD, beräknad enligt ekvation 3.4, vindhastighet och temperatur.

4.2.4 Polariseringens inverkan på dämpning

Figur 4.8 visar medelvärdet av signalstyrkan för luftsystemet och skogssystemet för samtliga mätpunkter under dagen, där de två sista mätpunkterna erhöles då antennerna på båda mätplatser var vertikalt polariserade. Dessutom presenteras den beräknade dämpningen för samtliga mätpunkter.



Figur 4.8: Tidsserier för det uppmätta medelvärdet av signalstyrkan för luftsystemet och skogssystemet med horisontell (blå) och vertikal (grön) polarisation samt tillhörande 95-procentiga KI. De två sista punkterna är utförda med vertikal polarisation hos mottagarantennen. Den beräknade dämpningen presenteras även för att illustrera polarisationsändringens effekt på dämpning.

För båda mätsystemen observeras en tydlig minskning i effekt då polarisationsriktningen på mottagarantennen ändrades till vertikal. Detta indikerar att den inkommande signalen är horisontellt polariserad, vilket även antogs på förhand. Skillnaden beror därav på att sändare och mottagare inte har samma polarisation (se avsnitt 2.1).

Den observerade skillnaden mellan horisontell och vertikal polarisation för skogssystemet var cirka 8,85 dB medan den för luftsystemet var cirka 7,8 dB. Detta skiljer sig från det förväntade resultatet, där depolarisation genom vegetation potentiellt skulle minska polarisationsskillnaden (se avsnitt 2.3). Det noteras att den uppmätta effekten vid vertikal polarisering för luftsystemet är högre än den uppmätta effekten för horisontell polarisering för skogssystemet. Detta kan bero på att sändaren inte är helt horisontellt polariserad samt att även luftsystemet påverkas av flervägsutbredning och depolarisation. Skillnaden mellan de uppmätta effekterna är dock relativt liten och visade sig inte ha nämnvärd påverkan på dämpningen (se den sista grafen i figur 4.8). Det ska dock noteras att endast ett begränsat antal mätpunkter erhöles för vertikal polarisation och gör det svårt att dra säkra slutsatser.

4.2.5 Statistisk inblick i mätdata

I detta avsnitt ges en statistisk inblick i den mätdata som ligger till grund för resultaten som presenteras i avsnitt 4.2.1 och 4.2.4. Mätdata undersöks både utifrån den glidande medeleffekten och fördelningen av I/Q-data inom enskilda mättillfällen.

Variationer över sekunder

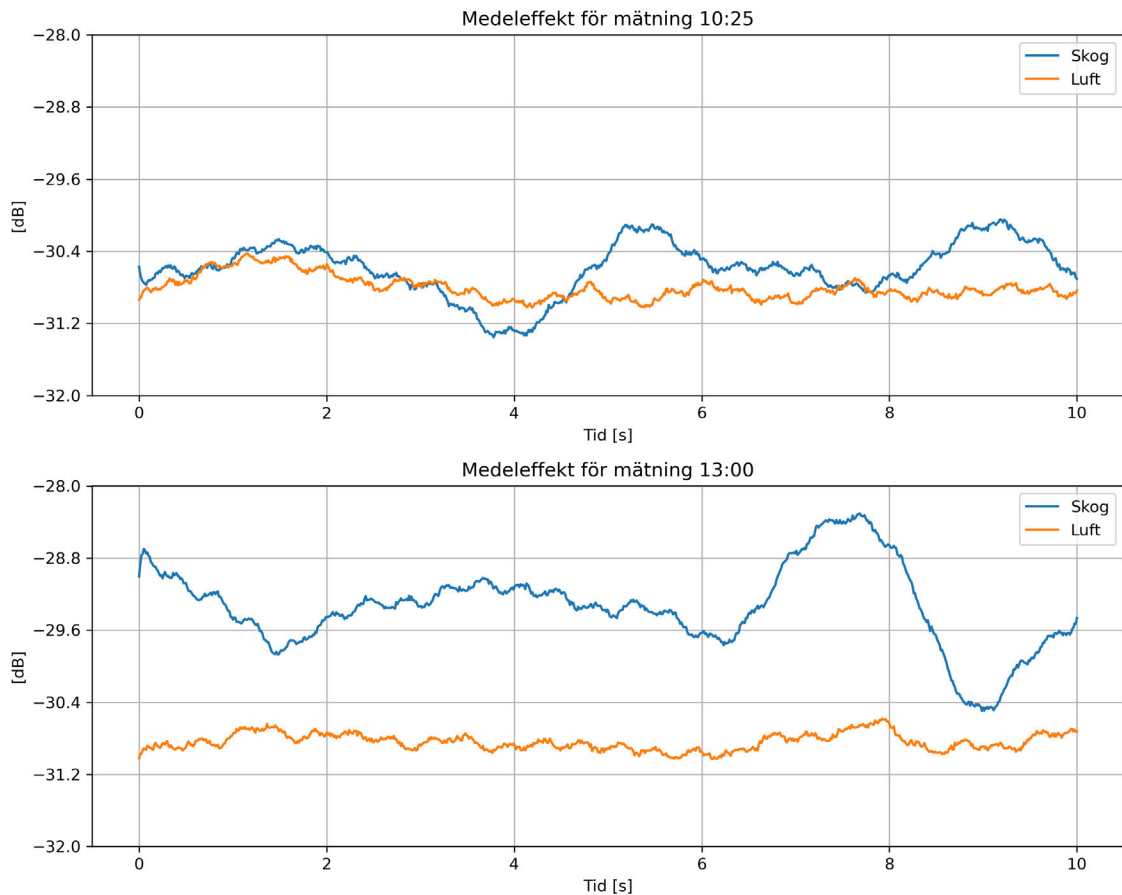
Samtliga datapunkt i de mätserier som visas i figurerna från avsnitt 4.2.1 och 4.2.4 utgörs av en tio sekunders lång mätning med 80 miljoner I/Q-sampel vardera. För att visualisera de längre variationer som dominerar mätosäkerheten visas i figur 4.9 ett glidande blockmedelvärde på 100 000 sampel i varje block för två mätningar på 10 sekunder.

I figur 4.9 noteras att variationerna för den mottagna effekten är betydligt större för skogssystemet än för luftsystemet. Skogssystemet uppvisar variationer på upp till 1-2 dB medan luftsystemet är relativt stabilt. Detta gäller för både mättillfället kl. 10.25 och kl. 13.00 lokal tid. Den markanta skillnaden i variation beror troligtvis på att luftsystemet har en direkt siktlinje till TV-sändaren som är relativt stabil medan skogssystemet påverkas av skogen. Längre variationer på sekundnivå kan tyda på att den uppmätta signalen i skogssystemet påverkas av flervägsutbredning och rörelser i omgivningen, till exempel träd som rör sig i vinden. Detta beskrivs i avsnitt 2.1.5.

Att variationen av medeleffekten är betydligt större för skogssystemet än luftsystemet förklarar varför det 95-procentiga konfidensintervallet i figur 4.5 är större för skogssystemet och stödjer antagandet om att mätosäkerheten i den beräknade dämpningen domineras av mätosäkerheten i skogssystemet.

Det bör även noteras att mätningarna tycks uppvisa en viss samvariation mellan effektvärdena för skogs- och luftsystemet i figur 4.9. För mätningen vid kl. 10.25 betar sig skog och luft relativt lika från 0 till ca 3 sekunder. Detsamma gäller för mätningen kl. 13.00 från ca 6 till 9 sekunder. Särskilt intressant är den lilla oscillation i signalerna med periodtid på ca 0,4 s som kan urskiljas i data från båda mätsystemen.

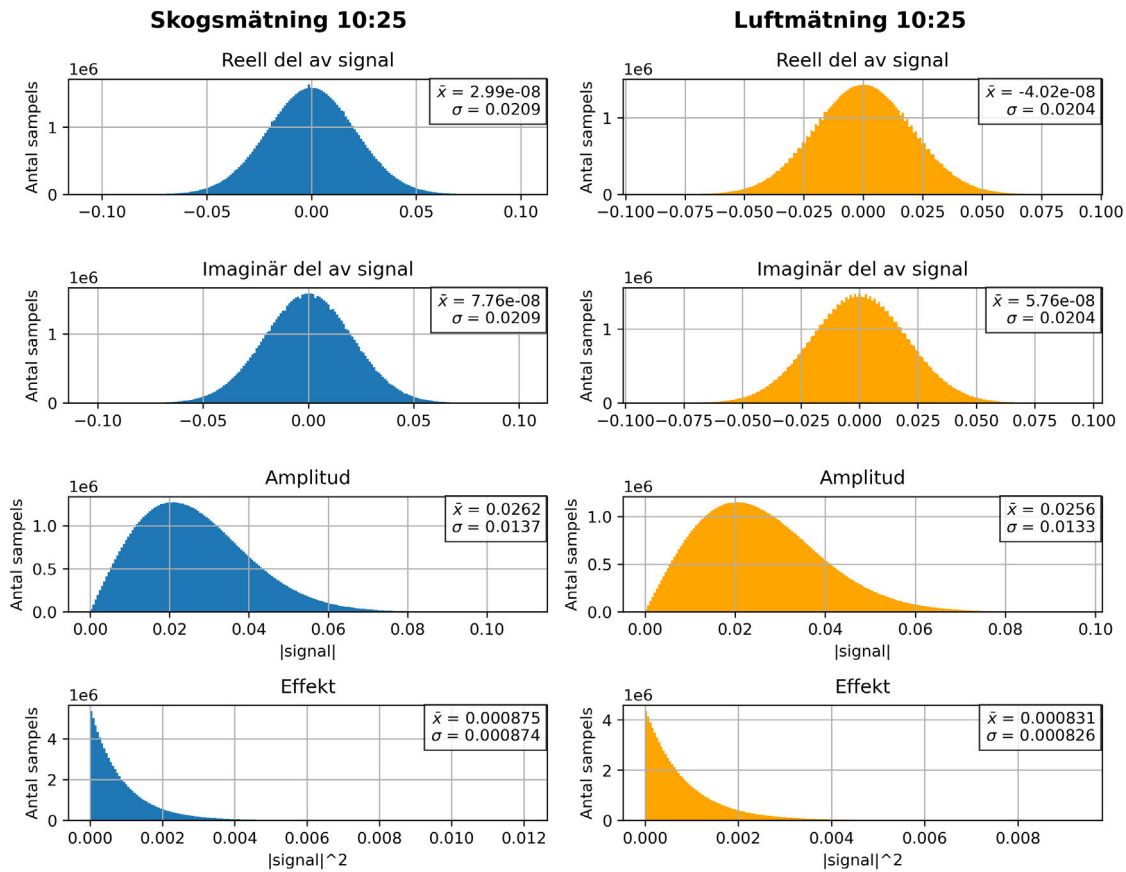
4. Resultat



Figur 4.9: Glidande medeleffekt för de två 10 s mätningarna som utfördes kl. 10.25 respektive kl. 13.00 lokal tid, för skogssystemet (blå) och luftsystemet (orange). Notera att figuren visar effektvärdena i dB utan omskalning med hänsyn till förstärkarinställningar eller dämpare som beskrivs i avsnitt 3.5.2. Detta gjordes för att underlätta visuell jämförelse av tidsserierna.

Variationer från sampel till sampel

Den statistiska fördelningen av I/Q-data inom varje 10 sekunders mättillfälle är av intresse för att granska mätförhållandena för experimentet. Om I/Q-data följer Rayleighfördelning så är den uppmätta signalen mycket slumpmässig på korta tidsintervaller och har stora variationer. Under korta tidsskalor ($\ll 1$ s) kan I/Q-sampel antas vara okorrelerade med varandra på grund av att OFDM kan approximeras som vitt brus. Standardavvikelsen för medeleffekten på kort tidsskala, skalas då med $1/\sqrt{N}$ och dessa variationer kan således antas vara försumbara. Figur 4.10 visar de statistiska fördelningarna för I- och Q-komponenterna i I/Q-data från mätningen kl. 10.25 lokal tid, omfattande 80 miljoner I/Q-sampel. Notera att figuren visar fördelningarna utan omskalning med hänsyn till förstärkarinställningar eller dämpare som beskrivs i avsnitt 3.5.2. Detta gjordes för att underlätta visuell jämförelse av fördelningarna.



Figur 4.10: Notera att figuren visar ett histogram med 200 delintervall utan omskalning med hänsyn till förstärkarinställningar eller dämpare som beskrivs i avsnitt 3.5.2. Detta gjordes för att underlätta visuell jämförelse av fördelningarna. Det framgår att de reella och imaginära komponenterna för I/Q-data båda följer normalfördelningar, centrerade kring 0 och med samma standardavvikelse. Detta gäller både för skogssystemet (blå) och luftsystemet (orange), om än med olika skalor. Figuren visar även att amplituden följer en Rayleighfördelning och att effekten följer en exponentialfördelning, vilket återigen gäller för både skogs- och luftsystemet.

Det framgår tydligt av fördelningarna i översta grafen i figur 4.10 att båda komponenterna i I/Q-data är normalfördelade med medelvärde kring 0 och med samma standardavvikelse mellan komponenterna, vilket starkt indikerar att denna I/Q-data följer Rayleighfördelning som beskrivs i teoriavsnitt 2.1.3 och 2.1.5. Observationen gäller för både skogs- och luftsystemet. Rayleighfördelningen av signalernas amplitud och effektens exponentialfördelning stämmer väl överens med förhållandet $\sigma_{exp} = 2\sigma_I^2 = 2\sigma_Q^2$ i avsnitt 2.1.4. Notera att figur 4.10 endast visar den statistiska fördelningen av I/Q-data för en av 78 datapunkter i de mätserier som visas i figurerna i avsnitt 4.2.1. Den statistiska fördelningen av samtliga 78 mätpunkter över hela mätserien undersöktes och visade sig vara konsekvent.

5

Diskussion

5.1 BorealScat-2

Från analysen av data från Svartberget framgår hur olika variabler hänger ihop. Många av variablerna, inte minst dämpning, påverkas av nederbörd. De stora topparna i dämpning som noteras vid nederbörd beror troligen på att blöta träd reflekterar mer av vågorna, vilket ökar dämpningen. I princip alla variabler uppvisar ett dygnsperiodiskt beteende. Detta beteende fungerar som en referensram för vad som kan förväntas från mätningen av TV-signaler från Brudaremossenmasten. Av särskild vikt är sambandet mellan stamvattenhalten och dämpningen. Det noteras däremot att variablerna för en specifik dag inte nödvändigtvis behöver hänga ihop lika tydligt och att stora dagliga variationer försvinner i visualiseringen av ett genomsnittligt dygn. Den genomsnittliga dämpningsförändringen för BorealScat-2 var knappt 0,7 dB, för mätningen vid Brudaremossenmasten noterades en skillnad på 2 dB. Detta kan bero på skillnader i vegetationen vid mätplatserna, som typ av skog och dess täthet. Det kan också bero på olika geometrier, som infallsvinklar till mätsystemen.

Som tidigare nämnt använder radartornet ett frekvensband på 582 - 630 MHz och TV-signaler från Brudaremossenmasten ett frekvensband på 542 - 550 MHz. Dataanalysen från BorealScat-2 visar att man bör kunna använda TV-signaler för att relatera variationer i dämpning till variationer i faktiskt vatteninnehåll i träden. Det svåra blir snarare kvantifiering. Vid vilken dämpning bör träden anses som vattenstressade och finns det mönster i dämpningen som kan användas för att avgöra om träd är vattenstressade? För att svara på detta behövs fler studier på olika platser med annan vegetation och fler studier under torra perioder.

5.2 Brudaremossenmasten

Av resultatet framgår att den RF-signal som färdas genom vegetation uppvisar en tydlig dämpning under dagen jämfört med signalen med fri sikt till masten. Detta framgår av att den uppmätta och beräknade effekten för signalen genom vegetation är betydligt lägre än för signalen med fri sikt.

Utöver skillnaden i uppmätt effekt mellan mätsystemet är det tydligt att dämpningen minskar under mätserien. Det observeras då den beräknade skillnaden mellan effekten för signalen vid fri sikt i jämförelse med effekten för signalen genom vegetation minskar. Minskningen sammanfaller med förändringen av flertalet väderparametrar samtidigt som konfidensintervallet inte visar på några större mätosäkerheter.

Att dämpningen minskar under mätserien skulle kunna förklaras av att vegetationens vattenstatus förändras under dagen. VPD driver transpiration samtidigt som markfuktigheten blir lägre, vilket indikerar att trädens vatteninnehåll minskar. Detta påverkar dämpningen då en högre vattenhalt i större utsträckning absorberar signalens energi samt orsakar spridning. Det ska dock noteras att sambandet mellan markfuktighet och vegetationens vattenstatus inte nödvändigtvis är enkelriktad. En lägre markfuktighet kan påverka vegetationens vattenupptag samtidigt som vegetationens vattenupptag även påverkar markfuktigheten.

Vindhastigheten kan påverka signalens dämpning. Vind kan orsaka rörelse i vegetationen, exempelvis att grenar rör sig in eller ur siktlinjen. Det kan även påverka signalens utbredningsriktning och spridning vilket kan ge upphov till variationer i den uppmätta effekten. Detta skulle kunna vara en förklaring till de större variationerna mellan mätpunkter som observerades i skogsmätningen jämfört med luftmätningen. Vind kan även påverka transpirationen genom att vind förflyttar fuktig luft från bladen och därmed öka transpirationen. Utifrån resultatet är det svårt att se en tydlig korrelation mellan ökad vindhastighet, transpiration och dämpning. En möjlig förklaring är att transpirationens påverkan på trädets vatteninnehåll och därmed på dämpningen sker på en längre tidsskala som gör det svårt att se en tydlig korrelation.

Ett intressant resultat var att dämpningen nådde sin lägsta nivå kl. 13.00 (lokal soltid) trots fortsatt hög VPD. Detta skulle kunna innebära att vegetationens transpiration minskat, genom att minska klyvöppningarnas öppningsgrad, för att reglera sin egen vattenstatus. Detta stämmer väl överens med teorin. Det skulle även kunna innebära att vegetationen vid tidpunkten har som lägst vattenstatus, som där börjat återhämta sig till följd av vattenupptag från rotsystemet.

Ett annat intressant resultat var att även effekten för signalen med fri sikt till masten uppvisade en ökande effekt under dagen. Detta samtidigt som VPD ökar. Vid längre våglängder som användes i detta projekt (55 cm) påverkas inte signalen av luftfuktighet. Den observerade skillnaden skulle istället kunna bero på förändringar i TV-mastens utsända signalstyrka under dygnet. Det ska noteras att skillnaden är relativt liten och att det är svårt att dra några säkra slutsatser. I relation till variationerna i medeleffekt vid skogsmätningarna är ökningen för luftsystemet liten och kan därför betraktas som försumbar.

Utöver den varierande signalstyrkan för luftsystemet upptäcktes det även att den teoretiskt beräknade effekten (Friis transmission) väldigt väl överensstämmer med den uppmätta effekten. Detta är särskilt intressant då det tyder på en välfungerande mätuppsättning som inte påverkas starkt av externa parametrar samt att antagandet

om en perfekt rundstrålande TV-antenn är rimligt. Detta i kombination med de relativt små konfidensintervallen stärker tillförlitligheten hos mätuppsättningen och resultaten.

Resultatet för förändringar i polarisationsriktning visar en tydlig minskning i uppmätt effekt för både luftsystemet och skogssystemet. Detta var förväntat då den inkommande polarisationsriktningen på förhand antogs vara horisontell. Resultaten visade dock även att skillnaden mellan horisontell och vertikal polarisation var något större för skogsmätningarna än för luftmätningarna, vilket går emot det förväntade resultatet. Enligt teorin förväntades depolarisation genom vegetationen leda till en mindre skillnad hos skogssystemet jämfört med luftsystemet eftersom att vegetation kan ge upphov till korspolariserade komponenter. Signalutbredningen skedde horisontellt genom vegetation som i stor utsträckning domineras av vegetation som i huvudsak är vertikal, såsom trädstammar. Signalens våglängd var längre än bredden hos de enskilda träden som till följd av detta borde släppa igenom mer vertikal polarisation. Vidare analys kring dessa samband är dock utanför arbetets omfattning. Det finns scenarion där de korspolariserade komponenterna kan bli lika stora som de sampolariserade. Detta är dock främst sant för högre frekvenser och djup vegetation. Det är därför möjligt att, vid de lägre frekvenser som användes och vid ett relativt litet vegetationsdjup fick inte signalen de korspolariserade komponenterna som förväntades. Det ska noteras att skillnaden mellan de uppmätta effekterna är relativt liten och att det begränsade antalet mätpunkter gör det svårt att dra några säkra slutsatser. För att dra vidare slutsatser om hur dämpning genom skog beror på polarisation krävs fler mätpunkter.

Sammanfattningsvis är det möjligt att med signaler från TV-masten Brudaremosen på frekvensen 546 MHz upptäcka hur dämpningen förändras under dagen vid propagering genom vegetation. Det är även möjligt att relatera denna förändring i dämpning till förändring i VPD, temperatur och till viss del även markfuktighet, vilket tyder på att vegetationens vattenstatus påverkar signalens utbredning. Särskilt intressant är att resultatet i stor utsträckning återspeglade det förväntade utfallet utifrån teori samt att dämpningsförändringen i stort överensstämmer med radardata från BorealScat-2.

5.3 Mätsekvens och statistisk fördelning

Utifrån dämpningsförändringen i resultatet och den statistiska inblicken kan det konstateras att mätsekvensen hade tillräcklig tidsupplösning för att upptäcka dämpningsvariationer över dagen, men att varje enskild mätning var för kort för att ge ett stabilt medelvärde för skogssystemet.

Tidsintervallet på fem minuter mellan mätningar gav en tillräcklig tidsupplösning för att detektera den långsamma förändringen i dämpning under dagen. Resultatet visar på en dämpningsförändring på omkring 2 dB över cirka 4 timmar och 40 minuter. Denna förändring sker alltså på en betydligt längre tidsskala än intervallet mellan mätningarna. De stora variationerna mellan datapunkterna för dämpningen beror

antagligen inte på tidsintervallet mellan mätningarna, utan snarare på de längre variationerna vid varje mättillfälle.

Antagandet att varje mättillfälle på 10 sekunder kan beskrivas som en svagt stationär process är därför ofullständigt, eftersom variationerna mellan datapunkterna i dämpningen är betydligt större än mätosäkerheten för varje datapunkt. Detta i kombination med variationerna i den glidande medeleffekten som observerades för skogssystemet indikerar att mättiden för varje mättillfälle var för kort för att jämna ut dessa variationer. För framtida fältmätningar bör därför mättiden per mättillfälle förlängas för att kompensera för dessa längre variationer som skulle kunna bero på antingen fädning eller mängden vegetation signalen passerar på grund av blåst som orsakar rörelser i skogen.

Det observerades även viss samvariation mellan skogs- och luftsystemet, där den återkommande oscillationen med en periodtid på ca 0,4 sekunder är anmärkningsvärd. Eftersom oscillationen är konsekvent och återkommande i flera mätningar beror den sannolikt på den gemensamma signalkällan, det vill säga TV-sändaren. Dess påverkan på den beräknade medeleffekten antas vara begränsad, eftersom medelvärdet av en sinusvåg går mot noll över ett stort antal perioder. Framtida mätningar skulle kunna anpassas så att mättiden omfattar ett helt antal perioder, vilket ytterligare skulle minska oscillationens inverkan.

På mycket kort tidsskala har TV-signalen samplats med en samplingsfrekvens och bandbredd som är tillräckligt hög för att uppnå en godtagbar mätosäkerhet. Eftersom dess I/Q-data följer Rayleighfördelning kan signalen antas domineras av slumpmässiga variationer på korta tidsintervall ($\ll 1$ s). Under antagandet om okorrelerade sampel minskar mätosäkerheten proportionellt mot $1/\sqrt{N}$, vilket i kombination med den höga samplingsfrekvensen gör att mätosäkerheten på kort tidsskala blir i stort sett försumbar jämfört med variationer på längre tidsskala. Samplingsfrekvens skulle därför i kommande fältmätningar kunna sänkas, med fördel att underlätta datahantering, utan att påverka mätosäkerheten negativt.

5.4 Felkällor

Efter genomförd mätning diskuterades eventuella felkällor som har risk att påverka resultatet. Vid repetition eller vidare utveckling av projektet bör man ta hänsyn till följande felkällor.

Eftersom information om sändarantennens strålningsmönster inte finns tillgänglig saknas vetskap om dess antennförstärkning. Trots att informationen från Post- och telestyrelsen säger att antennen är rundstrålande kan det inte antas att effekten är symmetrisk. Detta kan påverka storleken på den mottagna effekten till antennerna eftersom de är positionerade på olika avstånd och höjd vilket ger olika vinklar mot sändarantennen.

Terrängen framför mätantennerna skiljer sig åt, vilket kan påverka signalens spridning. Framför luftsystemet fanns en brant sluttning vilket gjorde att signalen inte kunde studsas mot marken och sedan upp till antenn i lika stor uträkning som för skogssystemet med en plattare yta framför sig, se figur 3.13, 3.14 och avsnitt 2.3. I framtida experiment kan det vara viktigt att ta hänsyn till varierande sluttning på marken framför antennen.

Enligt manualen för markfuktighetssensorn bör ett hål grävas, markfuktighetssensorn stoppas in i marken för att sedan täckas igen. I utförda mätningar har markfuktighetssensorn placerats direkt i marken vid ytan vilket kan leda till luftspalter och sämre vattenflöde runt markfuktighetssensorn vilket skapar en osäkerhet i resultatet.

Väderstationen är placerad i skogen nere bland träden vilket gör att vindmätningarna inte representerar vindstyrkan uppe i trädkronorna. För att vidare undersöka korrelationen mellan blåst och mottagen effekt skulle en bättre lösning för placering av väderstationen utformas.

5.5 Vidare studier

Resultatet indikerar att det går att tolka vattenstress i ett skogsstycke med hjälp av TV-signaler. För att få en mer konsekvent analys bör experimentet upprepas under fler varierande förhållanden. Experimentet bör genomföras på fler platser och med fördel mot andra TV-master. De andra platserna kan ha olika avstånd till masten, annan typ av skogsvegetation eller annorlunda terräng. Genom att studera detta får man bättre inblick kring vilka parametrar som påverkar dämpningen vilket skapar förutsättningar att hitta de bästa tillämpningarna av systemet.

Utöver detta bör man försöka genomföra mätning under en längre period. Eftersom denna mätning endast genomfördes under en och samma dag går det ej att dra någon slutsats om skogen faktiskt är vattenstressad då det saknas referensvärde för torka för det studerade skogsstycket. För att lyckas med detta bör man genomföra mätningar under en längre period och studera hur dämpningen eventuellt korrelerar med annan data som tillåter detektion av vattenstressen i skog. Det kan exempelvis vara data från satelliter eller mer invasiva metoder.

Ett förslag baserat på ovanstående idéer är att placera mätsystemet i skogsstycken nära Svartberget. Givet att det finns en lämplig mätplats med stamvatteninnehållssensorer och TV-mast i närheten skapas förutsättningar att studera hur mätsystemet förhåller sig till mätmetoder vid Svartbergets försökspark samtidigt som man undersöker mätsystemets funktion på en annan plats.

Resultatet i avsnitt 4.2.4 indikerar svagt att man även kan uppskatta vattenstress med TV-signal då antennerna är inställda för vertikal polarisation istället för horisontell. Detta gör att vertikalt polariserade antenner eventuellt kan nyttjas i mätsystemet. Genom att använda sig av vertikalpolariserade monopolantennerna finns det

förutsättningar att skapa ett billigare mätsystem då dessa antenner är allmänt billigare. Monopolantenner har dessutom samma förstärkning i alla azimutriktningar vilket gör att antennen inte behöver riktas in mot masten.

5.6 Produktifiering

Det breda syftet med projektet är att undersöka om det med befintliga TV-master är möjligt att övervaka torka i skog. För att detta ska vara en möjlighet behöver mätsystemet produktifieras och göras lättillgängligt.

Mätsystemet ses som en prototyp för att undersöka om det går att se skillnad i trädens vatteninnehåll över dagen med hjälp av TV-signalen. För att lämna mätutrustningen i skogen över längre tid och se trender i en skogs vattenstressnivåer behöver det skapas en tillförlitlig och lätthanterlig produkt. Funktionsmässigt skulle en färdig produkt detektera hur signalstyrkan förändras över tid men också relatera förändringar till risk för torka och vattenstress.

Prototypen innehåller många dyra komponenter, för att vara skalbar och inom en rimlig prisklass behöver en billigare produkt som är mer anpassad för sitt specifika syfte skapas. Utifrån tidigare diskussion (se avsnitt 5.3) finns möjligheten att använda en mindre samplingsfrekvens och därmed bandbredd. En antenn som är tillverkad för att släppa igenom en kortare bandbredd är billigare jämfört med den som används i prototypen. Utöver detta skulle radion kunna förenklas, istället för att sampla genom en A/D-omvandlare till I/Q-data kan effekten mätas direkt, förslagsvis med en dioddetektor.

Produkten kommer befinna sig i skogen under en längre period vilket gör att den behöver paketeras på ett sätt som gör att känslig elektronik inte påverkas av väder, djur och natur i området. Den behöver dessutom vara energisnål, alternativt generera ström själv från till exempel en solpanel. Kommunikation för att extrahera mätdata som kan visa på potentiell torka är också en viktig del. Det krävs en energieffektiv radiosändare som kan sända över långa distanser. Till produkten bör det också finnas en funktion eller tjänst som hittar potentiella mätplatser i ett område runt TV-masten utifrån trädhöjd och terräng för att underlätta placering av produkten.

6

Slutsats

I projektet undersöktes möjligheten att upptäcka dämpningsvariationer av TV-signaler som propagerar genom skog. Två mätsystem utvecklades som tillsammans med mätningar från ett radartorn användes för att jämföra signalstyrka och observera skillnader i dämpning och vatteninnehåll. Mätningen vid Brudaremossenmasten samt radardata från BorealScat-2 visar att det är möjligt att upptäcka hur dämpningen av TV-signaler genom vegetation förändras på en timvis skala samt att detta går att koppla till förändring av stamvattenhalten i träden. För mätningen vid Brudaremossenmasten observerades dämpningen vara högst under förmiddagen, för att sedan minska successivt och nå sitt lägsta värde under mitten av dagen. Resultatet tyder på att det även är möjligt att relatera förändringen i dämpning till förändringen av olika variabler i den omkringliggande miljön. De variabler som tydligast visade sig sammanfalla med dämpningsminskningen var VPD och temperatur, som tillsammans påverkar vegetationens vattenstatus.

Resultatet indikerar att det finns en möjlighet att upptäcka torra och vattenstresad skog med befintlig infrastruktur. För att metoden i framtiden ska kunna användas för att förebygga torra i skog och dess konsekvenser krävs vidare studier för att relatera dämpningsförändringar till vegetationens vattenstatus. Särskilt viktigt är mätningar över längre perioder och olika skogsområden. Metoden behöver även vidareutvecklas och produktifieras för att utgöra ett mer kostnadseffektivt och autonomt system.

Efterord

Användning av AI

Användningen av AI diskuterades med handledarna i början av projektet. Diskussionen resulterade i att AI kan användas som ett hjälpmedel, exempelvis för att diskutera idéer och programkod, under förutsättning att innehållet granskades och användes i ett lärandesyfte. Genom projektet har AI använts för att hitta och förstå relevanta källor, korrekturläsa skriven text, samt för att underlätta programmering. För att hitta källor kopplade till teorin har Scopus AI och ChatGPT använts, och för att hjälpa till med förståelse av innehållet har Google Gemini och ChatGPT använts, vilka även har används för att korrekturläsa skriven text. Inom programmeringen användes Google Gemini och ChatGPT för att underlätta skapandet av funktioner inom dataanalysen samt för visualiseringen av mätplatser. Användningen av AI har genom arbetet kritiskt granskats för dess rimlighet och använts som ett komplement till arbetet.

Litteratur

- Adafruit Industries. (u.å.). *Adafruit ultimate GPS GNSS with USB (product ID: 4279)* [Adafruit]. Hämtad 24 april 2026, från <https://www.adafruit.com/product/4279>
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna theory: Analysis and design* (3. ed). Wiley-Interscience.
- Blom, G. (1989). *Probability and Statistics: Theory and Applications*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3566-8>
- Bohlin, I. (2025, 8. december). Sommaren - en riskperiod för skogsbrand. Hämtad 10 februari 2025, från <https://www.slu.se/forskning/kunskapsbanken/s/so-mmaren---en-riskperiod-for-skogsbrand/>
- Bonicatto, D. B., Phoenix. (2025 januari). Part 1: A beginner's guide to IQ data and negative frequencies. Hämtad 2 maj 2026, från <https://www.edn.com/part-1-a-beginners-guide-to-the-power-of-iq-data-and-beauty-of-negative-frequencies/>
- Caldeirinha, R. F., & Al-Nuaimi, M. O. (2017). Cross-polarisation discrimination studies of single trees at 20 and 62.4 GHz. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 11(5), 695–704. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0571>
- Campbell Scientific. (2024 augusti). ClimaVue™50 Compact Digital Weather Sensor. Hämtad 23 april 2026, från <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/climavue50.pdf>
- Chauhan, P. D., Gadani, D. H., & Rana, V. A. (2024). Effect of moisture content variation on dielectric properties of various plant leaves at microwave frequencies. *Scientific Reports*, 14(1), 13204. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64266-3>
- Cheng, D. K. (2014). *Field and wave electromagnetics* (Second Edition). Pearson.

- Chrony Project. (2024, 17. april). *chrony – Introduction* [chrony]. Hämtad 11 maj 2026, från <https://chrony-project.org/index.html>
- Daycounter, Inc. (2024). SDI-12 Interface Circuit. Hämtad 16 mars 2026, från <http://www.daycounter.com/Circuits/SDI-12/SDI-12-Interface.phtml>
- de Boor, C. (1978). *A Practical Guide to Splines*. Springer.
- Eckersten, H., Jansson, P.-E., Karlsson, S., Lindroth, A., Persson, B., Perttu, K., Blombäck, K., Karlberg, L., & Persson, G. (1998). *Biogeofysik - en introduktion*. Sveriges lantbruksuniversitet. Hämtad 21 mars 2026, från https://pub.epsilon.slu.se/4892/1/eckersten_h_et_al_100706.pdf
- Ecoflow. (2022, 15. december). Ecoflow River 2 Specifikationer. Hämtad 28 april 2026, från <https://ecoflow.se/products/ecoflow-river-2-max-powerstation>
- Ettus Research. (2025a, 9. juli). E320 Getting Started Guide. I *Knowledge Base*. Hämtad 29 mars 2026, från https://kb.ettus.com/E320_Getting_Started_Guide
- Ettus Research. (2025b, 22. maj). USRP Host Performance Tuning Tips and Tricks. I *Knowledge Base*. Hämtad 29 mars 2026, från https://kb.ettus.com/USRP_Host_Performance_Tuning_Tips_and_Tricks
- Ettus Research. (2026, 13. oktober). General Application Notes. I *USRP Hardware Driver and Device manual* (v. 4.9.0.0). Hämtad 29 mars 2026, från https://uhd.readthedocs.io/en/latest/page_general.html
- Ettus Research. (u.å.). *USRP e320 software defined radio* [Ettus research]. Hämtad 5 april 2026, från <https://www.ettus.com/all-products/usrp-e320/>
- Frenzel, L. E. (2023). *Principles of electronic communication systems* (Fifth edition). McGraw-Hill Education.
- Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*. Cambridge University Press.
- GPSD Project. (2026, 10. maj). *gpsd — a GPS service daemon* [gpsd]. Hämtad 12 maj 2026, från <https://gpsd.io/>
- Greiser, C., Huo, L., Ghaly, M., Brown, I., Metsu, C., Van Meerbeek, K., & Lehmann, P. (2025). Bark beetles as microclimate engineers – thermal characteristics of infested spruce trees at the canopy surface and below the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 375, 110796. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110796>

- Humphrey, V., & Frankenberg, C. (2023). Continuous ground monitoring of vegetation optical depth and water content with GPS signals. *Biogeosciences*, 20(9), 1789–1811. <https://doi.org/10.5194/bg-20-1789-2023>
- Inductiveload. (2008). Full-wave bridge rectifier diagram. Hämtad 1 maj 2026, från <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5027286>
- ITU. (2015). *Nomenclature of the Frequency and Wavelength Bands Used in Telecommunications* (Recommendation Nr ITU-R V.431-8). ITU-R. Hämtad 6 maj 2026, från https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/r-rec-v.431-8-201508-i!!pdf-e.pdf
- ITU. (2018). *Data format definition for exchanging stored I/Q data for the purpose of spectrum monitoring* (Recommendation Nr ITU-R SM.2117-0). ITU-R. Hämtad 28 april 2026, från https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.2117-0-201809-I!!PDF-E.pdf
- ITU. (2021). *Attenuation in vegetation* (Recommendation Nr ITU-R P.833-10). ITU-R. Hämtad 14 april 2026, från https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-10-202109-I!!PDF-E.pdf
- Koverda, P. (2020). The Ultimate Vapor Pressure Deficit (VPD) Guide. Hämtad 3 maj 2026, från <https://pulsegrow.com/blogs/learn/vpd>
- Lantmäteriet. (u.å.). *Swedish reference systems*. Hämtad 24 mars 2026, från <https://www.lantmateriet.se/en/geodata/gps-geodesy-and-swepos/swedish-reference-systems/>
- Le, T. S., Harper, R., & Dell, B. (2023). Application of remote sensing in detecting and monitoring water stress in forests. *Remote Sensing*, 15(13), 3360. <https://doi.org/10.3390/rs15133360>
- Leistner, T., Monteith, A. R., Lopez, J. G., & Ulander, L. M. H. (2026). Estimating stem water content from tower-based l-band tomographic radar using a single-scattering model of a uniform layer: A first in situ experiment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 19, 3477–3487. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3650660>
- Lemmetyinen, J., Ruiz, J. J., Cohen, J., Haapamaa, J., Kontu, A., Pulliainen, J., & Praks, J. (2022). Attenuation of Radar Signal by a Boreal Forest Canopy in Winter. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3187295>
- Li, J. (2024). A Review of the Basic Principles and Methods of Signal Sampling Technology. *Transactions on Computer Science and Intelligent Systems Research*, 8, 146–152. <https://doi.org/10.62051/edadp344>

- Lichtman, M. (2026). IQ Sampling | PySDR: A Guide to SDR and DSP using Python. Hämtad 2 maj 2026, från <https://pysdr.org/content/sampling.html#nyquist-sampling>
- Lindgren, G., Rootzén, H., & Sandsten, M. (2014). *Stationary Stochastic Processes for Scientists and Engineers*. CRC Press.
- Loy, M., & Karingattil, R. (2005). ISM-band and short range device regulatory compliance overview.
- Luo, Z., Deng, Z., Singha, K., Zhang, X., Liu, N., Zhou, Y., He, X., & Guan, H. (2020). Temporal and spatial variation in water content within living tree stems determined by electrical resistivity tomography. *Agricultural and Forest Meteorology*, *291*, 108058. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108058>
- Länsstyrelsen Västra Götaland. (u.å.-a). *Delsjöområdet*. Hämtad 26 april 2026, från <https://www.lansstyrelsen.se/vastra-gotaland/besoksmal/naturreservat/delsjoomradet.html>
- Länsstyrelsen Västra Götaland. (u.å.-b). *Knipeflågsbergen*. Hämtad 26 april 2026, från <https://www.lansstyrelsen.se/vastra-gotaland/besoksmal/naturreservat/knipeflagsbergen.html>
- Matheny, A. M., Bohrer, G., Garrity, S. R., Morin, T. H., Howard, C. J., & Vogel, C. S. (2015). Observations of stem water storage in trees of opposing hydraulic strategies. *Ecosphere*, *6*(9), art165. <https://doi.org/10.1890/ES15-00170.1>
- Meier, R. (2020). pySerial Documentation. Hämtad 30 april 2026, från <https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/#>
- Meng, Y. S., Lee, Y. H., & Ng, B. C. (2009). Study of Propagation Loss Prediction in Forest Environment. *Progress In Electromagnetics Research B*, *17*, 117–133. <https://doi.org/10.2528/PIERB09071901>
- Meter Group. (2025a). TEROS 11/12. Hämtad 23 april 2026, från https://publications.metergroup.com/Manuals/20587_TEROS11-12_Manual_Web.pdf
- Meter Group. (2025b juni). TEROS 11/12 INTEGRATOR GUIDE. Hämtad 23 april 2026, från <https://publications.metergroup.com/Integrator%20Guide/18224%20TEROS%2011-12%20Integrator%20Guide.pdf>
- Monteith, J., & Unsworth, M. (2013). *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere*. Academic Press.

- Naturvårdsverket. (2024, 17. december). Klimatet och skogen. Hämtad 11 februari 2026, från <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-skogen/>
- Olofsson, P., & Andersson, M. (2012). *Probability, statistics, and stochastic processes* (2:a uppl.). Wiley.
- OpenStreetMap. (u.å.). OpenStreetMap [Karta]. Hämtad 26 april 2026, från <https://www.openstreetmap.org/#map=5/62.99/17.64>
- Peden, S., Bradbury, R. C., Lamb, D. W., & Hedley, M. (2021). RF Loss Model for Tree Canopies with Varying Water Content. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 13(6), 83–101. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2021.136006>
- Peichl, M., Nilsson, M., Smith, P., Marklund, P., De Simon, G., Lofvenius, P., Dignam, R., Holst, J., Molder, M., Andersson, T., Kozii, N., Larmanou, E., Linderson, M.-L., & Ottosson-Löfvenius, M. (2024). ETC L2 ARCHIVE from Svartberget, 2019-01-01–2024-09-01. <https://hdl.handle.net/11676/ajj8KUPQYA4MeDyJBWRnRx0S>
- Popov, V. (2019). Cross-polarization effect of radio waves propagation by forest vegetation in wireless communication systems on transport. *Procedia Computer Science*, 149, 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.123>
- Rappaport, T. S. (2009). *Wireless communications: principles and practice* (2. ed., 18. printing). Prentice Hall.
- Raspberry Pi Ltd. (2025 december). Raspberry Pi 4 Model B. Hämtad 29 mars 2026, från <https://pip-assets.raspberrypi.com/categories/545-raspberry-pi-4-model-b/documents/RP-008344-DS-2-raspberry-pi-4-product-brief.pdf?disposition=inline>
- Raspberry Pi Ltd. (2026a, 3. mars). Configure UARTs. Hämtad 12 april 2026, från <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/configuration.html#configure-uarts>
- Raspberry Pi Ltd. (2026b, 14. april). Schematics and mechanical drawings. Hämtad 25 april 2026, från <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html#raspberry-pi-4-model-b>
- Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. (2014). *R&SHL040E Log-Periodic Broadband Antenna Manual* (Manual Nr 4099.8185.02-01). Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. München, Tyskland.

- Rosu, I. (u.å.). Basics of Radio Wave Propagation. Hämtad 26 april 2026, från https://www.qsl.net/va3iul/Antenna/Basics_of_Radio_Wave_Propagation.pdf
- Salas, W., Ranson, J., Rock, B., & Smith, K. (1994). Temporal and spatial variations in dielectric constant and water status of dominant forest species from new england. *Remote Sensing of Environment*, 47(2), 109–119. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90148-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90148-1)
- Schulze, H., & Luders, C. (2005). *Theory and Applications of OFDM and CDMA: Wideband Wireless Communications*. John Wiley & Sons Ltd. Hämtad 13 maj 2026, från <https://eden.dei.uc.pt/~tbohnert/wimax/ofdm-ebook.pdf>
- SDI-12 Support Group. (2023a, 20. februari). SDI-12 A Serial-Digital Interface Standard for Microprocessor-Based Sensors. Hämtad 23 april 2026, från https://www.sdi-12.org/current_specification/SDI-12%20Specification%201.4%20February%202023.pdf
- SDI-12 Support Group. (2023b februari). *SDI-12: A Serial-Digital Interface Standard for Microprocessor-Based Sensors* (Version 1.4). https://www.sdi-12.org/current_specification/SDI-12%20Specification%201.4%20February%202023.pdf
- Skogsindustrierna. (2025, 21. november). Ekonomisk betydelse och väldfärd. Hämtad 11 februari 2026, från <https://www.skogsindustrierna.se/om-skogsindustrin/branschstatistik/ekonomisk-betydelse-och-valfard/>
- Skogsstyrelsen. (u.å.). *Skogsstyrelsens nedladdningstjänst*. Hämtad 24 mars 2026, från https://geodpags.skogsstyrelsen.se/geodataport/feeds/Tradhojd_omdrev2.xml
- SLU. (u.å.). *Sök digitala kartor och geodata / slu.se*. Hämtad 24 mars 2026, från <https://www.slu.se/bibliotek/soka--lana/soka/sok-digitala-kartor-och-geodata/>
- Sullivan, R. J. (2004). *Radar Foundations for Imaging and Advanced Concepts*. Sci-Tech Publishing. Hämtad 12 maj 2026, från <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRFIAC003/radar-foundations-imaging/radar-foundations-imaging>
- Tong, D. (2015). Electromagnetism. Hämtad 30 mars 2026, från <https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/em/em.pdf>
- Trabelsi, S. (2015). I *Dielectric Properties of Agricultural Materials and their Applications* (s. xiii–xiv). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802305-1.00021-X>

- Truckle, T. (2008). Antenna Radiation Pattern. Hämtad 25 april 2026, från https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Antenna_Radiation_Pattern.png
- Ulander, L. M. H., Monteith, A. R., Persson, H. J., & Fransson, J. E. S. (2024). Borealscat-2: Backscatter Measurements of Forest Water Dynamics [ISSN: 2153-7003]. *IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2332–2335. <https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10642923>
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2019). *University Physics with Modern Physics* (15. utg.). Pearson.

A

Bilagor

A.1 GitLab-projekt med kod och data

Programkod, mätplan, CAD-filer och utdrag av data finns tillgängligt på GitLab efter begäran via mejl till någon av författarna. Länk till projektet är <https://git.chalmers.se/carlher/upptacka-torka-skog-tvsignal>.

Data för den kompletta mätserien finns inte tillgängligt för hämtning på grund av dess storlek. Begäran av data kan göras via mejl till någon av författarna. Tre mätningar från båda mätsystemen finns tillgängligt som exempel i GitLab-projektet.

A.2 Komponenttabell

I tabell A.1 presenteras de komponenter som har använts för båda mätsystem tillsammans med produktnamn.

Tabell A.1: Komponenter som används för samtliga mätsystem med motsvarande produktnamn.

Produkt	Antal	Produktnamn
Datalogger	2	Raspberry Pi 4B, 4 GB
Väderstation	1	Campbell Scientific ClimaVue 50
Antenn	2	Rohde & Schwarz HL040E
SDR	2	Ettus Research E320
Markfuktighetssensor	2	Meter Group Teros 11
GPS	2	Adafruit Ultimate GPS GNSS with USB
SFP-adapter	2	Finisar FCLF8522P2BTL SFP
Koaxialkabel (kalibreringsslinga)	2	HUBER+SUHNER ST18/SMAm/mSMA/24in
Antennkabel	2	HUBER+SUHNER ST18/Nm/mSMA/48in
Batteri	2	Ecoflow River 2 Max
Hårddisk	2	Verbatim 53071 Store 'n Go 1 TB
10 dB dämpare	2	Pasternack PE7602-10
20 dB dämpare	2	Mini-Circuits BW-S20W2+

A.3 Fördjupning SDR

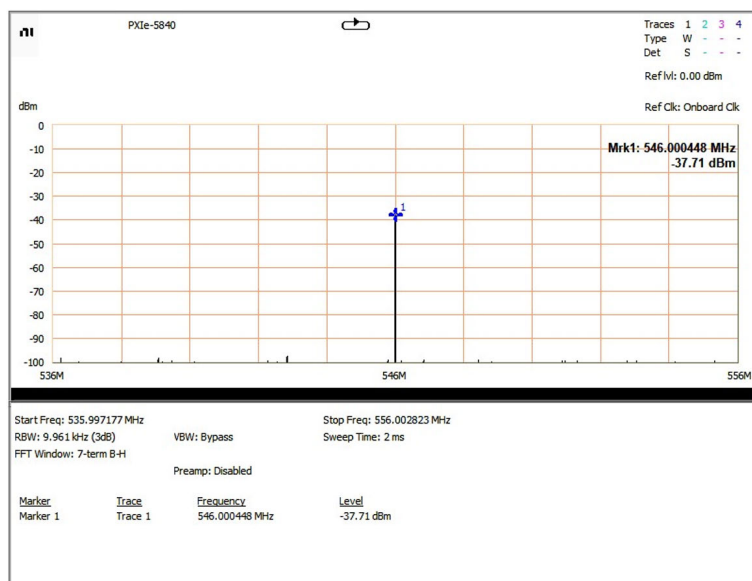
Nedanstående avsnitt beskriver uteffekt-mätning av SDR:erna, utvärdering av overflows och test av förstärkarinställningar.

A.3.1 Uteffekt-mätning av SDR

Som en del av utformningen av kalibreringsslingan undersöktes hur stor skillnad i uteffekt som SDR:erna uppvisade vid olika förstärkarinställningar. Resultaten redovisas i tabell A.2. Mätningarna utfördes med en PXIe-5840 Vector Signal Transceiver och tillhörande testrapporter genererades. Ett exempel på en testrapport för en SDR visas i figur A.1 nedan.

Tabell A.2: Uppmätt skillnad i uteffekt mellan SDR:erna vid 30 respektive 40 dB förstärkarinställning. Skillnaderna uppmättes till 0,22 respektive 0,27 dBm, vilket kan betrakta som en liten avvikelser.

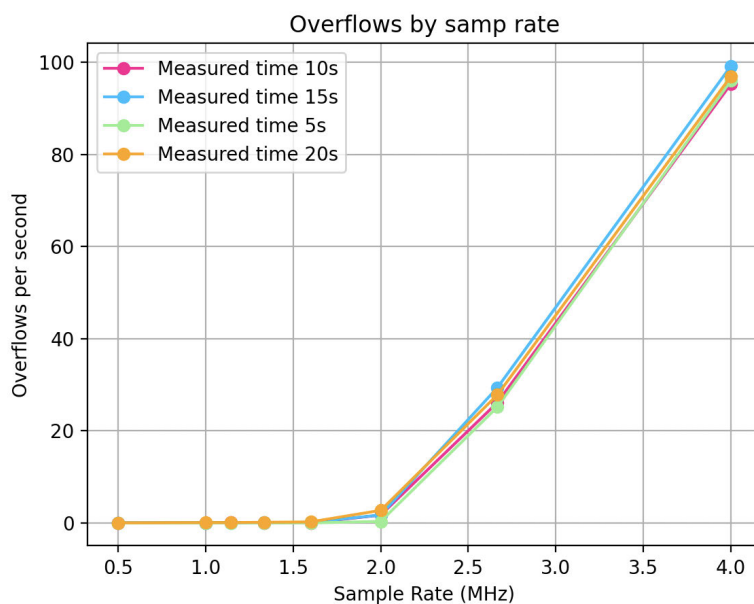
Förstärkning (dB)	Δ Uteffekt (dBm)
30	0,22
40	0,27



Figur A.1: Visar ett frekvensspektrum samt en testrapport genererad av PXIe-5840 Vector Signal Transceiver vid mätning av uteffekten för SDR:en (ID 20) vid 30 dB förstärkningsinställning. Notera den maximala uteffekten på -37,71 dBm. Ytterligare tester genomfördes för båda SDR:erna vid 30 och 40 dB förstärkarinställningar.

A.3.2 Utvärdering av antal overflows vid autonom drift av SDR

SDR:en har ett inbyggt ARM-chip som eventuellt skulle kunna nyttjas för att genomföra mätningar utan extern dator. En mätning kräver dock en viss samplingstakt som ställer krav på chippets prestanda. Detta behöver utvärderas. Om prestandan är otillräcklig kommer *overflows* (tappade sampel) att ske. För att testa gränserna för ARM-chippet på SDR:en har flera testmätningar genomförts för att studera hur antalet overflows per sekund ökar när samplingsfrekvensen (tillsammans med justering av bandbredden enligt Nyquist kriteriet) ökar. Utöver detta har även olika tidsförlopp för en mätning studerats. Detta beskrivs i figur A.2.



Figur A.2: Graf över antal overflows vid olika mätintervall och för olika samplingsfrekvenser

Bilden över visar att antalet overflows ökade framförallt till följd av en ökad samplingsfrekvens. Hur lång tid mätningen pågick visade sig inte ha en nämnvärd påverkan på antal overflows. Resultatet pekar på att autonom drift på SDR:en verkar vara otillräcklig då det är för långt ifrån den bandbredd som DVB-T/T2 uppvisar vid testmätning (7,6 MHz).

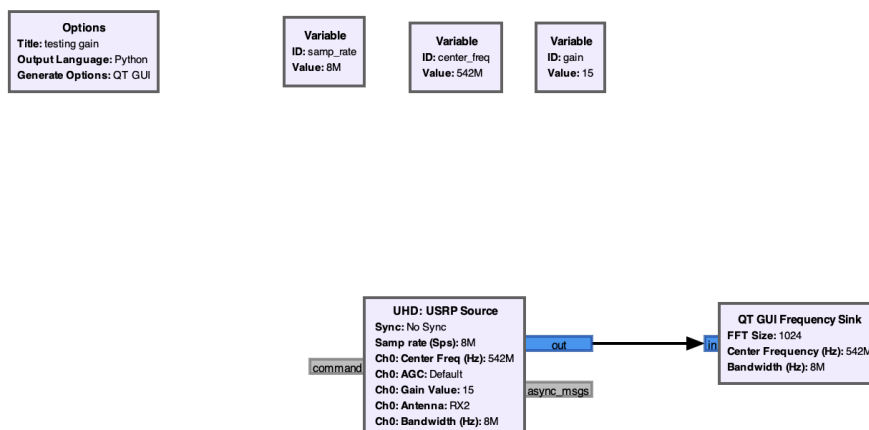
Utöver att testa olika samplingsfrekvenser testades även autonom drift med ett script genererat i det mer prestandaeffektiva språket C++. Prestandavinsten av att använda C++ istället för Python visade sig dock ändå vara för svag för att motivera autonom drift.

Under dessa testmätningar övervakades CPU-prestanda, RAM-kapacitet och skrivhastigheten till filsystemet. Under mätning över 2 MHz i samplingsfrekvens visade sig dessa prestanda parametrar regelbundet överstiga sina maximala tröskelvärden (100 %) vilket indikerar att ARM-chippet inte har tillräckligt hög prestanda. Utifrån ovanstående försök antogs det att prestandan för ARM-chippet på SDR:en inte höll för den samplingsfrekvensen som behövdes och metoden att köra autonomt på SDR:en övergavs.

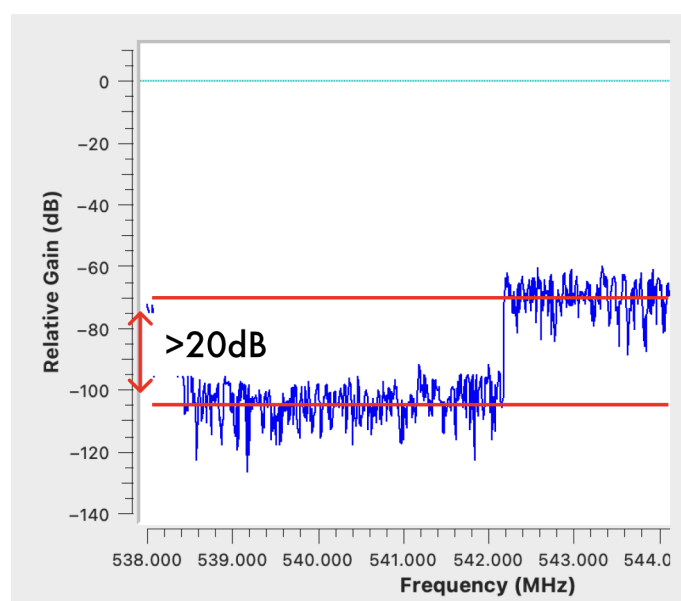
A.3.3 Test av förstärkarinställning

Skillnad mellan mottagen signalstyrka och brusgolvet bestämdes på plats till minst 20 dB för båda mätsystemen. I GNU Radio skapades ett blockdiagram där inkommen signal visualiserades som ett frekvensspektrum (se figur A.3). Centerfrekvensen för testet är förskjutet till 542 MHz för att brusgolvet och signalstyrkan ska visualiseras på samma gång. På plats i skogen kördes scriptet live och olika vär-

den på förstärkningen testades tills skillnaden översteg 20 dB (se figur A.4), Vilket motsvarar en faktor 100 i effekt mellan signal och brus. Eftersom skogssystemets signal dämpas genom skogen krävde den en högre förstärkning jämfört med luftsystemet.



Figur A.3: Blockschemat som används för att hitta en godtagbar förstärkning till SDR:en. Blocken i överkant är variabler som bestämmer värdet för samplingsfrekvens, centerfrekvens och antennförstärkning. I två ihopkopplade blocken undertill tar USRP Source emot sampel från SDR:en, och GUI Frequency Sink visar visuellt hur stor effekten i dB är för frekvenserna inom vald bandbredd (samma värde som samplingsfrekvensen, se A.3.3).



Figur A.4: Graf över ett frekvensspektrum med förskjuten centerfrekvens till 542 MHz. Inställningen för förstärkning ska ha ett värde så att skillnaden mellan signalen, övre röda linjen, och brusgolvet, undre röda linjen överstiger 20 dB.

A.4 Fördjupning Raspberry Pi

I denna bilaga presenteras väsentliga detaljer kring konfiguration och skripten associerade med Raspberry Pi:n.

A.4.1 Inställningar på Raspberry Pi

Raspberry Pi:n behöver konfigureras enligt vissa inställningar. Syftet och beskrivningen av dessa inställningar beskrivs i följande lista:

- **Skärmspeglning över WiFi:** Raspberry Pi:n behöver kunna styras från en laptop eller mobiltelefon för att aktivera mätsystemen och för att kunna kontrollera att mätdata lagras korrekt. Därav aktiveras VNC och SSH på Raspberry Pi:n. Aktivering görs via kommandot `raspi-config`. För att skärmspeglning ska ske trådlöst krävs WiFi-nätverk i skogen. Därav konfigureras Raspberry Pi:n till att aktivera WiFi-hotspot när inget annat WiFi-nätverk hittas.
- **Konfiguration av kabelanslutet nätverk:** Då Raspberry Pi:n ansluter till SDR:en via SFP+ anslutning krävs det att särskilda parametrar för nätverkskonfiguration ställs in. Dessa görs enligt specifikationerna från Ettus för anslutningar med gigabit hastigheter (Ettus Research, 2025a).
- **Minimera risk för overflows:** När mätningar genomförs får inga oförutsedda avbrott uppstå i dataflödet mellan antenn och Raspberry Pi. När avbrott sker bildas overflows vilket innebär att datapunkter förloras (Ettus Research, 2026). För att minimera risken för overflows omvandlas 1 GB av enkortsdatorns RAM-minne till att agera som en del av filsystemet (RAM-disk). Risken för overflows minimeras eftersom RAM-minnet har mycket högre skrivhastigheter än övriga hårddiskar i filsystemet. Då RAM-minnet är volatilt måste utdata som har sparats flyttas över till en annan del av filsystemet efter mätning.

För att ytterligare minska risken för overflows expanderas dessutom samtliga nätverksbuffrar vilket tillåter ett stabilare dataflöde till RAM-disken i enlighet med Ettus rekommendationer (Ettus Research, 2025b).

- **Konfiguration av GPS-tidssynk:** Raspberry Pi:n uppdaterar sin tid endast när den har åtkomst till World Wide Web vilket inte är fallet under mätning i skogen. För att enkortsdatorn ska kunna uppdatera sin tid så ansluts en GPS som hämtar nuvarande tid från satelliter. Detta gör även att båda mätsystemen har en lägre tidsdifferens i jämförelse med tidsynkronisering via World Wide Web. Hur denna konfiguration genomförs beskrivs i avsnitt A.5. Detta behöver Raspberry Pi:n konfigureras för.
- **Konfiguration av cronjob:** Operativ systemet (Raspberry Pi OS, Trixie) installerat på Raspberry Pi:n använder sig av cronjob för att automatiskt köra kommandon vid specifika tillfällen i tid. Genom att skapa ett cronjob kan provtagning genomföras för båda mätsystem samtidigt. Cronjob aktiveras

genom att lägga till kommandon till crontab-filen. Genom att redigera crontab kan man göra att skriptet som startar provtagning (`cronrpi_tee.sh`) startar enligt ett konstant tidsintervall.

- **Konfiguration av seriell kommunikation:** För att kommunicera med vädersensorerna behöver inställningar angående seriell kommunikation konfigureras. Aktivering av Serial port i `raspi_config` tillåter oss använda seriella kommunikationsprotokoll via GPIO-stiften

Raspberry Pi 4 har två microchip som möjliggör seriell kommunikation. Som standard väljs mini-UART chippet. Mini-UART är beroende på klockfrekvensen på CPU:n vilket kan orsaka kommunikationsfel vid anslutning till vädersensorerna. Därav väljs det andra microchippet (PL011) för seriell kommunikation (Raspberry Pi Ltd, 2026a).

A.4.2 Skript på Raspberry Pi

I detta avsnitt beskrivs de olika skripten som körs på Raspberry Pi:n för att genomföra mätning. De skript som tillsammans genomför en fullständig mätning beskrivs i följande lista:

- **config.sh:** En fil som enbart innehåller variabel definitioner som exempelvis filsökvägar till skript och adresser till vädersensorer. Variabeln `activate` är en boolesk variabel vars syfte är att stoppa alla skript som startas av cronjob om variabeln är satt till `False`.
- **measurement_script.py:** Python-skript genererat av GNU Radio. Lagrar I/Q-data som mäts av SDR och ansluten antenn.
- **loopback_script.py:** Python-skript genererat av GNU Radio. Lagrar I/Q-data som sänds från SDR genom koaxialkabel tillbaka till SDR. Syftet med detta skript är att lagra data som motsvarar brus orsakat av koaxialkabel och SDR.
- **measure_sdi12.py:** Python-skript som begär uppmätt data från anslutna vädersensorer.
- **cronrpi.sh:** Kontrollerar lagring på hårddisk, Kör `measurement_script.py`, kör `loopback_script.py`, kör `measure_sdi12.py`, Flyttar data från RAM-disk till ansluten hårddisk direkt efter mätning, uppdaterar `measurements.csv`. Skriptet importerar filen `config.sh` för att hämta variabler som adresser till vädersensorer och filsökväg till extern hårddisk.
- **cronrpi_tee.sh:** Anropas automatiskt av cronjob enligt ett bestämt intervall, se avsnitt 3.3. Skriptet startar `cronrpi.sh` men sparar också ner all utmatning i terminalen till en fil med hjälp av shell kommandot `tee`. `cronrpi_tee.sh` agerar alltså som en wrapper till `cronrpi.sh`. Skriptet importerar filen `config.sh`. Skriptet körs endast då variabeln `activate` ur `config.sh` är satt till `True`.

Skripten beskrivna i detta avsnitt finns tillgänglig för nedladdning i avsnitt A.1.

När cronjob startar `cronrpi_tee.sh` kommer mätningen genomföras enligt följande sekvens:

1. Importera alla variabler från `config.sh`.
2. Kontrollera att variabeln `activate` är satt till `True`, annars avbryt skriptet.
3. Spara all terminalutdata (`stdout` och `stderr`) från `cronrpi.sh` med hjälp av `tee`
4. Kontrollera att det finns tillräckligt med lagringsutrymme på hårddisk.
5. Skapa en mapp som döps efter nuvarande tid (UTC +2) på den externa hårddisken. Mappen skapas i en annan mapp som har döpts efter dagens datum.
6. Genomför mätning av TV-signal via antenn med hjälp av mätskript genererat av GNU Radio (`measurement_script.py`), se avsnitt 3.3. Utdata lagras först på ramdisken för att sedan flyttas till mappen som skapades i steg 5.
7. Flytta utdata från mätning av TV-signal till mappen som skapades i steg 5.
8. Genomför mätning av brus via kalibreringsslinga med hjälp av mätskript genererat av GNU Radio (`loopback_script.py`), se avsnitt 3.3. Utdata lagras först på ramdisken för att sedan flyttas till mappen som skapades i steg 5.
9. Begär data från vädersensorer via skriptet `measure_sdi12.py`. Utdata lagras först på ramdisken för att sedan flyttas till mappen som skapades i steg 5.
10. Kontrollera att ramdisken är tom.

Efter att en mätning har genomförts kommer data lagras enligt en specifik filstruktur på den externa hårddisken. Denna kommer exempelvis se ut som i figur A.5.

```

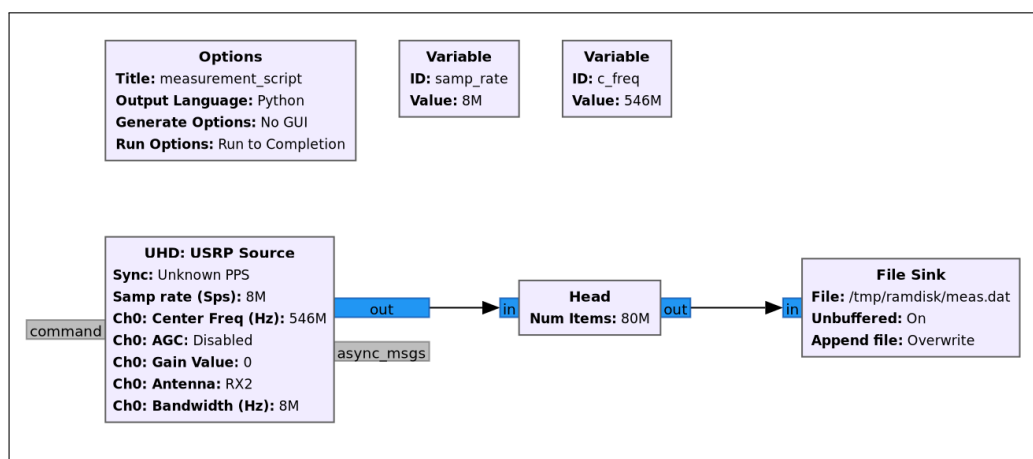
FORESTDRIIVE ..... Namn på hårddisk
├── 2026_04_20 ..... Mätdatum
│   ├── 100001 ..... Tid för mätning, i detta fall kl 10:00:01
│   │   ├── m_forest.dat ..... Data från mätning av TV-signal
│   │   ├── lb_forest.dat ..... Data från loopback
│   │   ├── sdi12_teros.dat ..... Data från markfuktighetssensor
│   │   ├── sdi12_climavue.dat ..... Data från väderstation
│   │   └── term_out.txt ..... Kopia av output från terminal
│   ├── 095501 ..... Tid för mätning, i detta fall kl 09:55:01
│   └── 095001 ..... Tid för mätning, i detta fall kl 09:50:01
│   └── ...

```

Figur A.5: Exempel för ett genererat katalogträd (directory tree) över filsystemet på hårddisken för skogssystemet. I exemplet sker mätningarna den 20 april 2026 och den senaste mätning påbörjades klockan 10:00:01.

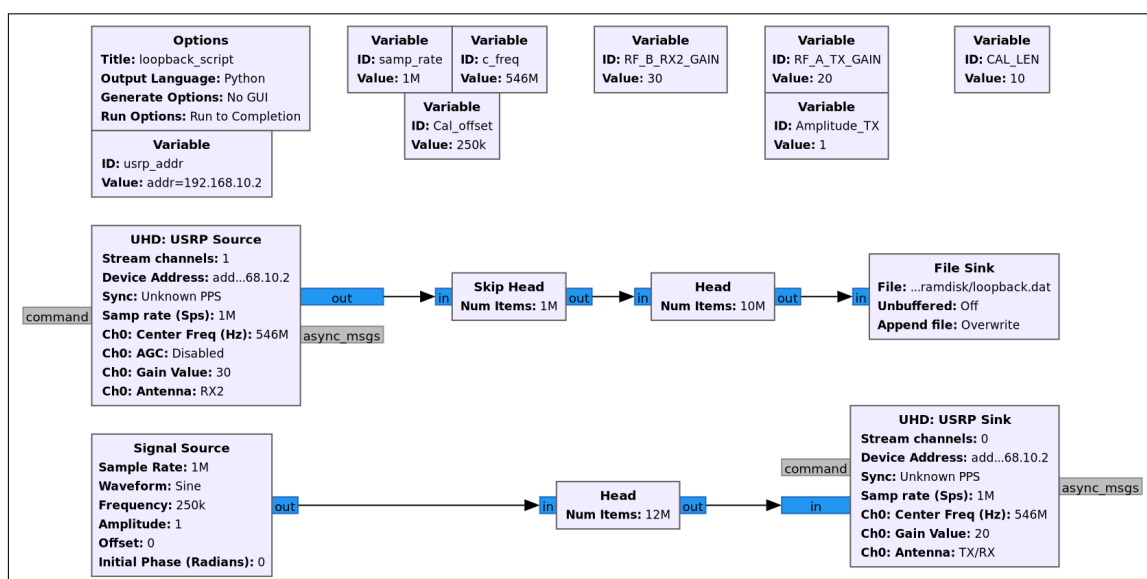
A.4.3 GNU Radio skript

För att mäta TV-signalen från Brudaremossenmasten utformades ett mätskript i programvaran GNU Radio (se figur A.6), vilket exporterades och kördes som Python-kod på en Raspberry Pi. Centerfrekvensen sattes till 546 MHz och samplingsfrekvensen till 8 MHz för att täcka hela TV-signalens bandbredden. Mätskriptet konfigurerades för att spara 80 miljoner sampel, motsvarande 10 sekunders mättid, till en RAM-disk på Raspberry Pi.



Figur A.6: Flödesschemat för mätskriptet i GNU Radio. Den översta raden innehåller variabler som styr samplingsfrekvens och centerfrekvens. Den nedre raden visar signalkedjan för mottagarkanalerna, där sampel importerar från SDR:en via USRP Source-blocket och sparas till ramdisk med hjälp av File Sink-blocket. Head-blocket begränsar mätningen till 80 miljoner sampel vilket motsvarar 10 sekunder.

Ett mätskript skapades även för att mäta brus genom kalibreringsslingan (se figur A.7). Genom kalibreringsslingan sändes en komplex sinusvåg med en frekvens på 546 MHz för att efterlikna TV-signalen från Brudaremossenmasten. Sändarkanalens förstärkning sattes till 20 dB och mottagarkanalens förstärkning till 30 dB för att uppnå ett adekvat signal till brusförhållande (SNR) på ca 60 dB utan att överbelasta SDR-en. En frekvensförskjutning om 250 kHz mellan sändar- och mottagarkanal infördes för att undvika att mottagarkanalerna mäter läckage från sändarkanalerna. Samplingsfrekvensen sattes till 1 MHz vilket överstiger Nyquist-kriteriet för bandbredden på 250 kHz men med fördelen att mindre datamängd genereras jämfört med mätskriptet. En fördröjning på 1 sekund infördes mellan påslag/avslag av sändarkanalerna och mottagarkanalerna för att undvika att eventuella transienter samplas. Mättiden för kalibreringsskriptet sattes till 10 sekunder för att matcha mätskriptet.



Figur A.7: Flödesschemat för kalibreringsskriptet i GNU radio. Den översta raden innehåller variabler som styr samplingsfrekvens, centerfrekvens, frekvensförskjutning, förstärkning och mättiden. Den mellersta raden visar signalkedjan för mottagarkanalerna där sampel importeras från SDR:en via USRP Source-blocket och lagras i ramdisk med hjälp av File Sink-blocket. De första en miljon sampel som läses in kasseras med Skip Head-blocket varefter Head-blocket släpper igenom 10 miljoner sampel som sparas i minnet. Den understa raden visar signalkedjan för sändarkanalerna, där signalen genereras av Signal Source-blocket och skickas till SDR:en via USRP Sink-blocket. Antalet sampel som skickas till SDR:en överstiger det antal som läses av från SDR:en, vilket görs för att undvika att sampla eventuella transienter.

A.5 GPS-mottagare och tidssynkronisering

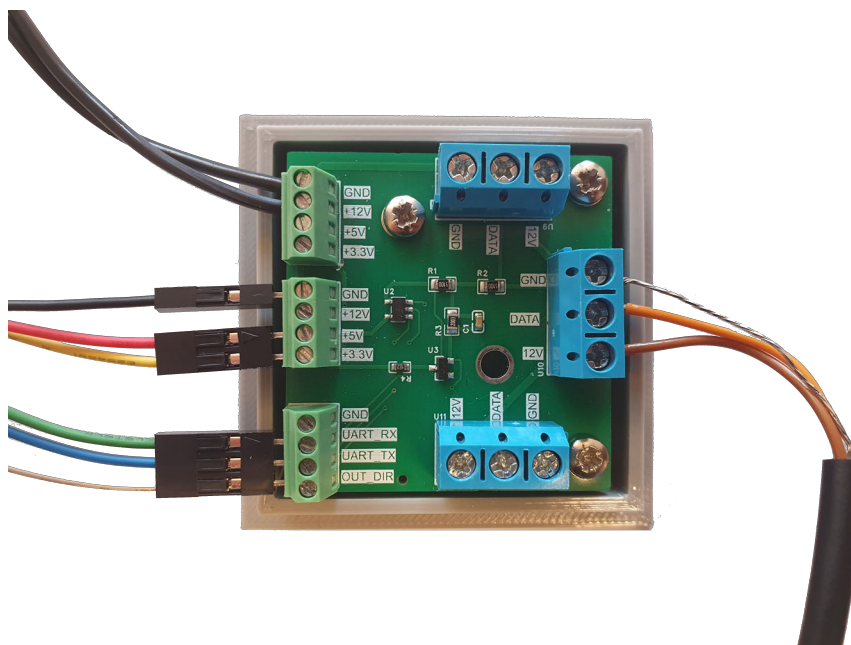
För att synkronisera mätserierna mellan de två mätplatserna använde vardera mät-system en GPS-mottagare (Adafruit Ultimate GPS GNSS with USB), tillsammans med mjukvarupaketet gpsd och Chrony, vilka kördes som bakgrundsprocesser på Raspberry Pi. GPS-mottagaren tar emot signaler med tidsinformation från satelliter

och uppdateras en gång per sekund. Dessa signaler används för att beräkna mottagarens tid, position och hastighet, vilka överförs till Raspberry Pi i form av NMEA 0183-meddelanden (Adafruit Industries, u.å.). Mjukvarupaketet `gpsd` används för att sortera, läsa av och tillgängliggöra data från dessa meddelanden (GPSD Project, 2026). Tidsinformationen hämtas därefter av mjukvarupaketet `Chrony`, som uppdaterar systemtiden på Raspberry Pi enligt standarden Coordinated Universal Time (UTC) (Chrony Project, 2024). Eftersom operativsystemet på Raspberry Pi är konfigurerad för svensk tidzon, presenteras tiden som lokal sommartid (UTC+2) i användargränssnittet och i mätdata.

A.6 SDI-12 adapter

Både Teros 11 och ClimaVue 50 kommunicerar enligt SDI-12 protokollet. Protokollet är en standard som beskriver hur kommunikation mellan vädersensorer och datorer kan genomföras. Detta görs med hjälp av seriella dataflöden formaterade enligt ASCII-standard. På detta vis kan datorn anropa särskilda kommandon som begär ut särskild data från sensorerna. För att hämta de ovan parametrarna angivna i underavsnitt 3.1.3 sänds kommandot 'R0!' för markfuktighetssensorerna och 'R7!' för väderstationen (Campbell Scientific, 2024; Meter Group, 2025b). Dessa kommandon kodas enligt ASCII-formatet och sänds som en binär signal till sensorn. Sensorn bifogar sedan dess respons till kommandot i slutet av signalen.

Raspberry Pi:n har dessvärre inte direkt stöd att kommunicera med SDI-12 sensorerna på grund av vissa tekniska begränsningar. Därav har en adapter utvecklats av handledaren för att kunna möjliggöra kommunikationen mellan Raspberry Pi och vädersensorerna, se figur A.8. Adaptern placeras mellan anslutningarna till Raspberry Pi:n och vädersensorerna.

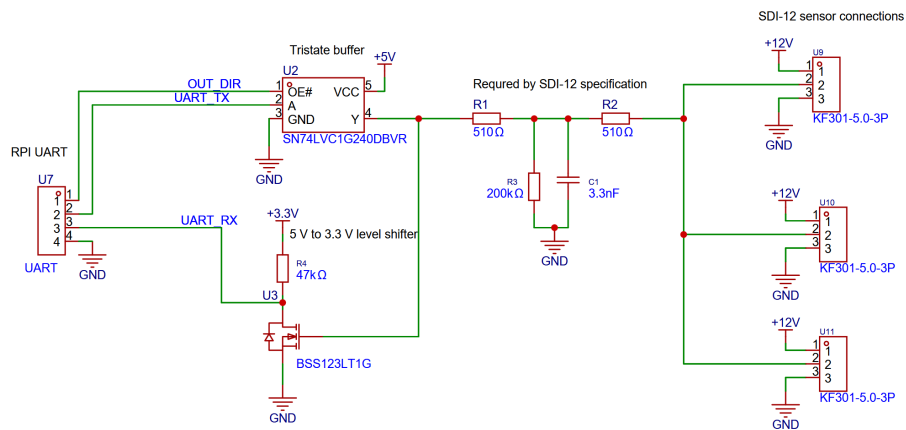


Figur A.8: Adapter för kommunikation över SDI-12 med markfuktighetssensor, Raspberry Pi och strömförsörjning ansluten.

För att möjliggöra kommunikation behöver kretskortet i adaptern uppfylla följande krav:

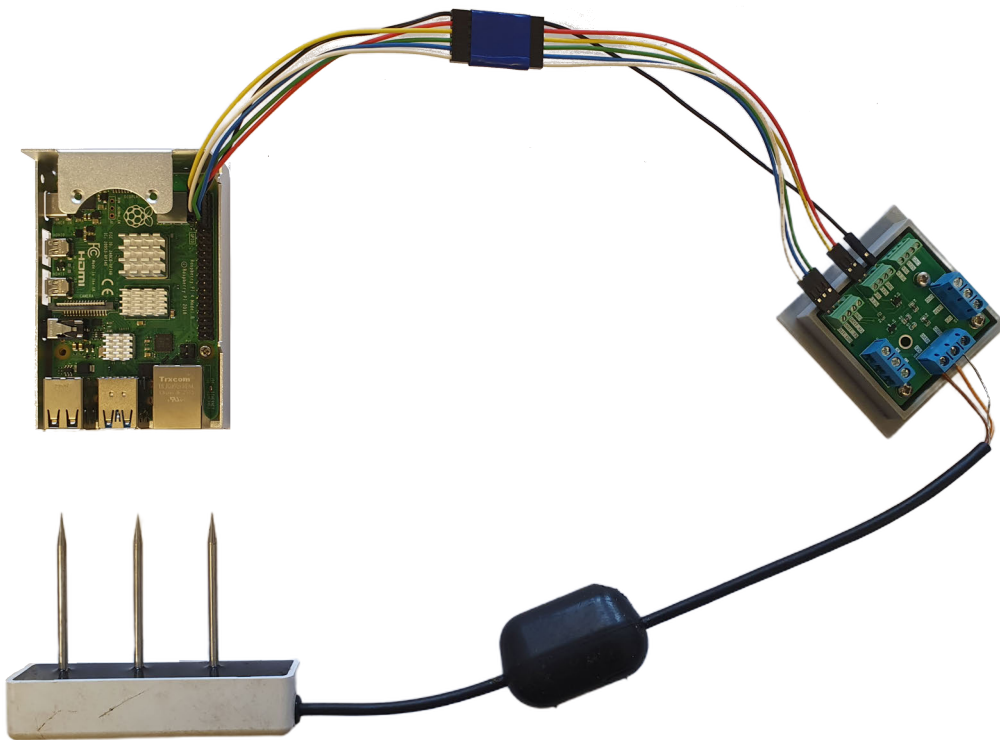
- Skifta spänningen innan anslutning till Raspberry Pi så att den maximala spänningen vid anslutning till Raspberry Pi är vid 3,3 V men cirka 5 V i de övriga delarna av kretsen (SDI-12 Support Group, 2023a, s. 3).
- Anpassa impedansen (för likspänning) innan datalinjen enligt specifikation av SDI Support Group. (SDI-12 Support Group, 2023a, s. 3)
- Försörja sensorer med ström- och jord.
- Bryta anslutningen mellan UART_TX på Raspberry Pi:n och kretsen när ingen signal sänds från Raspberry Pi:n vilket tillåter sensorerna sända på samma tråd. Styrspänningen till brytaren benämner vi OUT_DIR och ansluts till en annan GPIO-anslutning på Raspberry Pi:n.

Med dessa funktioner kunde kopplingschemat i figur A.9 designas och sedan beställas från kretskorttillverkare.



Figur A.9: Kopplingsschema för SDI-12 konverteraren. Kopplingsschemat är en modifierad version av kretsen av Daycounter, Inc. (2024)

Den beställda PCB:en ansluts till Raspberry Pi:n enligt figur A.10 och tabell A.3:



Figur A.10: Kabelkoppling mellan Raspberry Pi, SDI-12 adapter och Teros 11.

Raspberry Pi Board Pin	SDI-12
1	+3 V
4	+5 V
6	GND
7	OUT_DIR
8	UART_TX
10	UART_RX

Tabell A.3: Beskrivning över vilka GPIO-stift på RPi:n som ansluts till SDI-12 adaptorn enligt numreringen på Raspberry Pi:ns kopplingsschema (Raspberry Pi Ltd, 2026b). Utöver dessa anslutningar ansluts även strömförsörjning och jord från ett externt batteri till SDI-12 adaptorns +12V och GND anslutningar.

Med adaptorn korrekt anslutet mellan vädersensor och Raspberry Pi kan Raspberry Pi:n styra vädersensorn. Detta görs med Python-skriptet `measure_sdi12.py`. När skriptet begär och lagrar data från en av sensorerna genomför skriptet följande:

- Kodar kommandot som ska sändas till ASCII-formatering.
- Hanterar att kommandot sänds med korrekt timing och break-signal enligt SDI-12 protokollet (SDI-12 Support Group, 2023a, s. 34).
- Avkodar responsen.
- Lagrar den avkodade responsen i en fil vid namn `sdi_teros11.dat` eller `sdi_climavue50.dat` beroende på vilken sensor som har givit responsen.

Skriptet importerar biblioteket `PySerial` som ger stöd för kommunikation via UART via GPIO-anslutningarna, inställning av korrekt formatering av byte sekvenser och sändning av break signal (Meier, 2020; SDI-12 Support Group, 2023a). En av bibliotekets inbyggda funktioner (`Serial.send_break()`) funkar dessvärre inte med SDI-12 protokollet då funktionen inte kan sända en tillräckligt kort break-signal. Därav implementerar `measure_sdi12.py` en annan metod för att skapa en break-signal. Koden för skriptet finns bifogat i avsnitt A.1.

Python-skriptet `measure_sdi12.py` anropas i slutet av `cronrpi.sh` vilket innebär att data från sensorerna lagras direkt efter mätning av TV-signal.

A.7 3D-utskrivningar

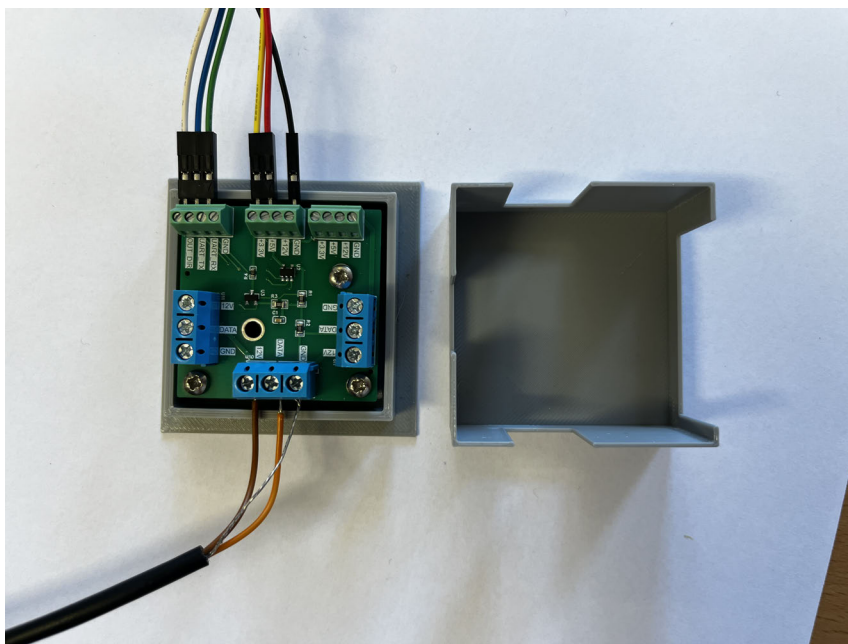
Två stycken komponenter har printats ut. En telefonhållare som monterats på antennstativet för att mäta vinklarna till TV-masten (se figur A.11 och figur A.12). Samt en hållare till SDI-12 kretsen, för att skydda dess komponenter och göra den mer användarvänlig (se figur A.13). Autodesk Fusion har använts för att skapa 3D-modellerna och *Prusa MK4S 3D Printer* användes för att skriva ut. Hållaren till telefonen är tillverkad i plasten PLA och hållaren till kretsen i PETG.



Figur A.11: Telefonhållare placerad under antenn för att mäta vinklar mot TV-masten och antennen.



Figur A.12: Telefonhållare med telefon placerad under antenn för att mäta vinklar mot TV-masten och antennen. Appen som används heter phyphox.



Figur A.13: Hållare och skal till SDI 12 kretsen skapad för att underlätta användning och skydda dess komponenter.

STL-filer för de 3D-printade objekten finns tillgängliga i ett GitLab projekt: <https://git.chalmers.se/carlher/upptacka-torka-skog-tvsignal>.

A.8 Beräkning av vinklar samt sträckor

Hör följer en detaljerad förklaring om hur vinklar och sträckor beräknats. Från SLU:s nedladdningstjänst GET hämtades rasterdata från Lantmäteriet över markhöjd (*Höjddata, Grid 2+ 2019 CLIP*), och från Skogsstyrelsen hämtades data av trädhöjd (*sksTradhojd14*) för Västra Götaland som sedan klipptes för att passa området i omgivningen av Brudaremossenmasten (Skogsstyrelsen, u.å.; SLU, u.å.). All data som laddades ner består av 2x2 m stora pixlar samt tillhörande datapunkt för att representera höjden av mark respektive träd. Koden består av tre huvudsakliga delar, den första konverterar en position från koordinatsystemet WGS 84 till SWEREF-99, det nationella positionssystemet i Sverige, vilket även rasterdata består av (Lantmäteriet, u.å.). Del två beräknar den horisontella vinkeln till antennen i TV-masten samt kompassvinkeln från geografisk nord. Den tredje delen av koden behandlar hur lång sträcka signalen färdas genom luften samt genom träd innan den når mottagarantennen. För att visualisera detta har tvärsnitt i signalriktningen genererats för de två mätplatserna (se figurer 3.13 och 3.14).

INSTITUTIONEN FÖR MILJÖ- OCH ENERGIVETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige

www.chalmers.se



CHALMERS