

## **Deployerbar WiMAX 2,3 GHz i skog – propagasjonsmålinger**

Jan Erik Voldhaug, Lars Erling Bråten og Jostein Sander

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

27. november 2009

FFI-rapport 2009/01898

1088

P: ISBN 978-82-464-1684-7

E: ISBN 978-82-464-1685-4

## **Emneord**

Mobile telekommunikasjonssystemer

Mobil bredbåndsaksess

Nettverksbasert forsvar

Taktisk kommunikasjon

Radiobølger - forplantning

## **Godkjent av**

Vivianne Jodalen

Prosjektleder

Vidar S. Andersen

Avdelingssjef

## Sammendrag

Som en følge av innføring av nettverksbasert forsvar, oppstår et behov for utveksling av langt større informasjonsmengder innad i og mellom Forsvarets plattformer og avdelinger enn noen gang tidligere. For å møte dette behovet trengs nye trådløse kommunikasjonssystemer med økt overføringskapasitet.

Rapporten beskriver propagasjonsmålinger utført på et deployerbart 2,3 GHz TDD (tidsdelt duplex) WiMAX oppsett, anskaffet som en del av Hærens *Concept, Development, and Experimentation* (CD&E) aktivitet, høsten 2008. Målingene er gjennomført på Terningmoen ved Elverum og fokuserer på rekkevidde og vegetasjonsdempning. Mens det på basestasjonsiden ble brukt en sektorantenne plassert på mast med justerbar høyde, ble det på brukersiden brukt en rundstrålende antenne plassert på kjøretøy. Mottatt signalstyrke ble registrert i et antall posisjoner. Alle måleresultatene er gjort innen en radius på om lag 700 meter fra basestasjonen og dette indikerer dermed rekkevidden til dette WiMAX-oppsettet. Ved å senke frekvensen vil man kunne oppnå langt bedre rekkevidder.

Kun mindre variasjon i vegetasjonsdempning ble observert mellom de ulike antennehøydene på 3,5, 5,5 og 10,5 meter. Når basestasjonsantennen ble hevet til 14 meter, ble det observert en dempning omlag 5 dB lavere. Skyggedempning i dB følger en normalfordeling rimelig bra. Det høyeste standardavviket (7 dB) ble observert når basestasjonsantennen ble hevet til 14 meter. Dette indikerer at man oppnår en moderat forbedring i mottatt signalstyrke ved å heve basestasjonsantennen.

## English summary

With the transition to Network Enabled Capabilities (NEC) comes the demand for exchange of larger volumes of information both within and between military units and platforms. To address this demand, new wireless communication systems with increased transmission capacities are needed.

This report describes propagation measurements carried out on a 2.3 GHz TDD WiMAX setup, using equipment acquired by the Norwegian Army during the fall of 2008. Measurements were conducted outside the city of Elverum in Hedmark county, in the inland of the South Eastern part of Norway in September of 2008. With a base station sector antenna with adjustable mast height and an omni-directional vehicle antenna at 2 m height, the received signal strength was registered.

The focus of the work was to quantify excess attenuation caused by vegetation. Only small variations in excess attenuation caused by vegetation were observed between the different antenna heights of 3.5, 5.5, and 10.5 meter. With the base station antenna raised to 14 meters, the observed attenuation was about 5 dB lower. Shadow attenuation in dB follows a Gaussian distribution quite well. The largest standard deviation was observed for transmit antenna height of 14 m, where it reached 7 dB. The improvement of elevating the transmit antenna was thus moderate, with somewhat lower average path loss combined with larger signal variance at the highest antenna position. The distance of the measurement results is within approximately 700 m, indicating the range of the current WiMAX setup.

## Innhold

	<b>Forord</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Gjennomføring av tester</b>	<b>8</b>
2.1	Utstyr	8
2.1.1	Basestasjon	8
2.1.2	Brukerterminaler	9
2.1.3	Antenner	11
2.2	Oppsett	13
2.2.1	Øvingsområde	13
2.2.2	Plattformer	14
2.2.3	Målemetode	18
<b>3</b>	<b>Resultater</b>	<b>20</b>
3.1	Tilleggsdempning	20
3.2	Antennehøyde	22
3.3	Skyggedempning	24
3.4	Modellering av strekningsdempning	25
<b>4</b>	<b>Oppsummering</b>	<b>27</b>
	<b>Referanser</b>	<b>28</b>
	<b>Forkortelser</b>	<b>29</b>

## **Forord**

Målingene er gjort i nært samarbeid med TRADOK / Hærens Skole for Taktikk og Operasjoner / Utvikling & Eksperimentering ved Kapt Morten Juland og Lt Christian Ugelstad som et ledd i CD&E aktivitet EP838.

Takk til NextGenTel ved Ingvar Henne som ga tillatelse til bruk av frekvenser.

# 1 Innledning

Som en konsekvens av nye plattformer, sensorer og applikasjoner samt nye operasjonsmønstre oppstår det behov for nye trådløse bærere med vesentlig høyere overføringskapasiteter for data også på taktisk og stridsteknisk nivå. På grunn av stadige teknologiske framskritt og utvikling av nye sivile kommunikasjonsstandarder, er det grunn til å vurdere i hvor stor grad disse behovene vil kunne løses ved hjelp av sivil teknologi.

Et eksempel på en ny sivil teknologi for trådløs bredbåndsaksess er WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). WiMAX er et sett med standardiserte profiler basert på IEEE 802.16. Første utgave av IEEE 802.16 standarden forelå i 2001. I 2004 ble den opprinnelige standarden med tillegg erstattet av 802.16-2004. Senere kom også IEEE 802.16e-2005, som er et vedlegg til IEEE 802.16-2004, som blant annet inkluderer støtte for mobilitet. Systemprofilene stasjonær (*fixed*) og mobil (*mobile*) WiMAX fra WiMAX Forum, er basert på henholdsvis 802.16-2004 og 802.16e-2005.

FFI gjennomførte også i 2007 propagasjonsmålinger på 2,3 GHz WiMAX i samarbeid med TRADOK og FLO/IKT [1], [2]. Disse målingene ble gjort med stasjonær basestasjon på Tørråsen i Regionfelt Østlandet. Målingene som er beskrevet i denne rapporten, derimot, baserer seg på mobil / deployerbar basestasjon plassert på kjøretøy. Mobilstasjon (CPE) er også plassert på kjøretøy med enkel rundstrålende antenne og er, i likhet med basestasjonen, deployert i ulike posisjoner i og rundt Terningmoen skyte- og øvingsfelt. I tillegg til å gi en bedre tilnærming til et realistisk operativt scenario, er hensikten med dette oppsettet å gi et bedre mål av vegetasjonsdemping, ettersom begge antenner er plassert under trehøyden. Antenne på basestasjon er i tillegg plassert på regulerbar mast, noe som muliggjør sammenligning av antennehøydens påvirkning på rekkevidde.

Denne rapporten fokuserer på utførte målinger og resultater. For mer fullstendig presentasjon av IEEE 802.16, WiMAX og benyttet utstyr samt betraktninger rundt mulig bruk av WiMAX i Forsvaret henvises leseren til [1]. Kapittel 2 i denne rapporten presenterer måleoppsett, utstyr og målemetodikk. I kapittel 3 presenteres de viktigste resultatene mens oppsummering og konklusjoner gis i Kapittel 4.

## 2 Gjennomføring av tester

Målinger ble gjennomført i og rundt Terningmoen skyte- og øvingsfelt i september 2008. I tillegg til FFI stilte TRADOK / HSTO / Utvikling & Eksperimentering med personell i forbindelse med gjennomføring av målinger. Hensikten med målingene var å måle propagasjon / vegetasjonsdemping for et 2,3 GHz WiMAX oppsett, samt undersøke påvirkning av antennehøyde på rekkevidde. Videre i dette kapittelet presenteres benyttet utstyr (kapittel 2.1) samt oppsett og målemetoder (kapittel 2.2).

### 2.1 Utstyr

Målinger er gjennomført på WiLink I TDD utstyr anskaffet av TRADOK, fra NERA Networks i Bergen, hovedsaklig i 2007. Det meste er produsert av Alvarion. Det er trolig mest riktig å definere dette utstyret som en mellomting mellom stasjonær og mobil WiMAX i og med at det fysiske laget ikke er basert på SOFDMA, men i stedet inneholder en delvis implementering av OFDMA i opplink.

#### 2.1.1 Basestasjon

Basestasjonen som er brukt er en BreezeMax TDD mikrobaser fra Alvarion [3]. Basen består av én kompakt innendørsenhet (IDU) og maks to utendørsenheter (ODU) og antenner. IDUene inneholder medium aksess kontroll (MAC) og modem, og kontrollerer dermed etablering av forbindelser og administrasjon av båndbredde. IDU og ODU kommuniserer over mellomfrekvens (140 MHz og 240 MHz). Innendørsenheten kan, i likhet med basestasjonen benyttet i 2007 [1], [2], monteres i 19'' utstyrshylle. Den er imidlertid vesentlig mer kompakt, med en høyde på bare 1U, se Figur 2.1.



Figur 2.1 BreezeMax TDD  $\mu$ base.



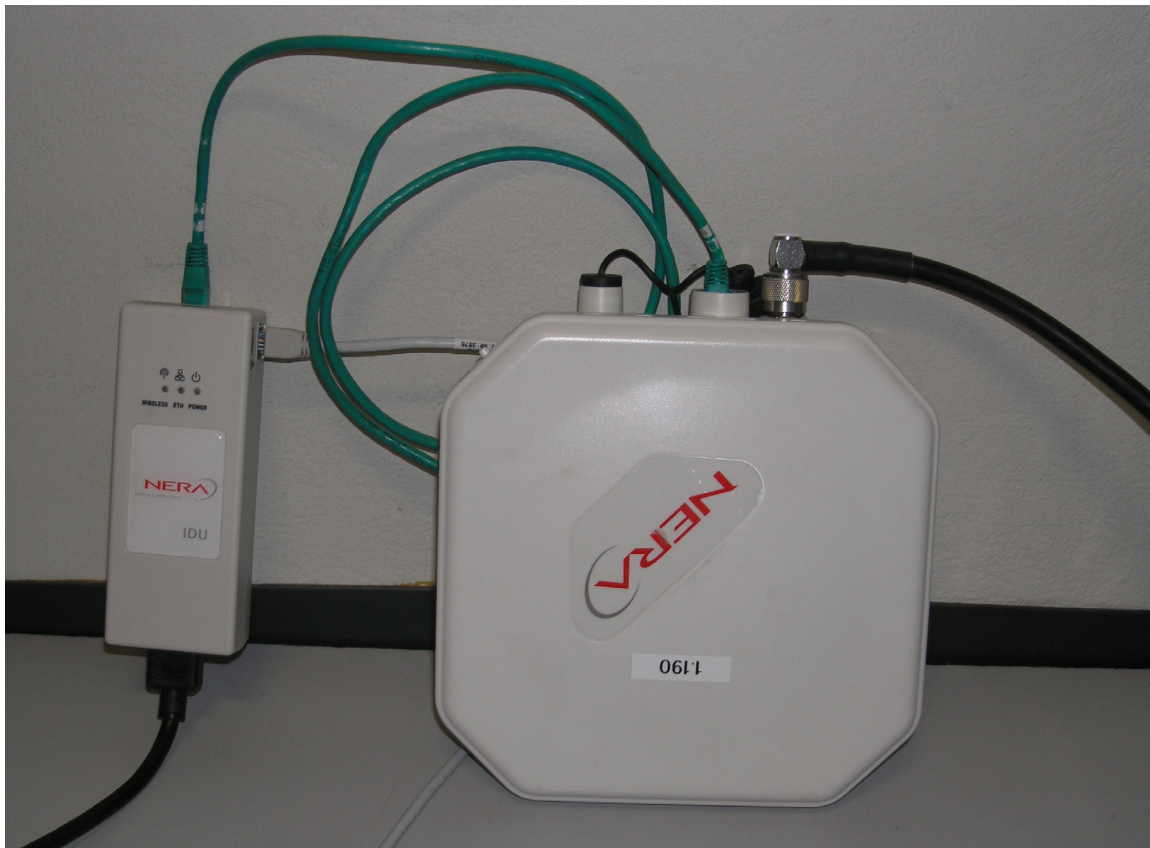
ODU'ene er full duplex *multi-carrier* radioenheter med høy sendeeffekt og lavt støytall. Hver ODU er forbundet med én ekstern antenne. Basestasjonen konfigureres enten via webgrensesnitt eller Telnet, og kan kjøres både på 230 V AC og 38 V DC forsyningsspenning.

Operasjonsmodus	TDD (tidsdelt duplex)
Kanalbåndbredde	3,5 MHz / 5 MHz
Oppløsning, senterfrekvens	0,125 MHz
Antennetilkobling (ODU)	N-type, 50 Ohm
Frekvenser (ODU)	2300 – 2360 MHz
Maks inngangsnivå ved antennetilkobling, ODU	-60 dBm før metning
	-8 dBm før ødeleggelse
Utgangseffekt ved antennetilkobling	36 dBm +/- 1 dB
	Effektkontrollområde: 6 dB, 1 dB trinn
Modulasjon	OFDM, 256 FFT punkter
	BPSK, QPSK, QAM16, QAM64
FEC	Foldingskoding: 1/2, 2/3, 3/4

Tabell 2.1 Tekniske spesifikasjoner for basestasjon.

### 2.1.2 Brukerterminaler

Som brukerterminal eller CPE (*customer premises equipment*) i forsøkene ble WiLink-CPE-ODU-PRO-SE-2.3 benyttet. Denne CPE'en har, på samme måte som basestasjonen, kun deler av funksjonaliteten plassert i innendørsenheten (IDU). I motsetning til basestasjonen er det, imidlertid, alltid kun én utendørsenhet (ODU). Figur 2.2 viser både IDU og ODU.



Figur 2.2 CPE består av én innendørsenhet (venstre) og én utendørsenhet (høyre).

IDU fungerer som strømforsyning for ODU og tilkoblingspunkt for Ethernet, og finnes både for 220 V AC og 10,5 – 32 V DC. ODU'en som ble brukt i målingene har ikke innebygget antenne og krever altså ekstern antenne. På samme måte som på basestasjonen, kan web eller Telnet brukes for konfigurering og monitorering av ytelse. Tabell 2.2 og Tabell 2.3 oppsummerer CPE'ens spesifikasjoner.

Operasjonsmodus	TDD
Kanalbåndbredde	3,5 MHz / 5 MHz
Oppløsning, senterfrekvens	0,125 MHz
Antennetilkobling	N-type, 50 Ohm
Frekvenser	2300 – 2360 MHz
Maks inngangsnivå ved antenntilkobling	-20 dBm før metning -0 dBm før ødeleggelse
Utgangseffekt ved antenntilkobling	19 dBm +/- 1 dB
ATPC dynamisk område	45 dB
Modulasjon	Opplink: OFDMA-16 Nedlink: OFDM
FEC	BPSK, QPSK, QAM16, QAM64 Foldingskoding: 1/2, 2/3, 3/4
Effektforbruk (IDU + ODU)	25 W
Effektforbruk (ODU)	16 W

Tabell 2.2 Tekniske data for CPE.

Modulasjon & koding	Minimum SNR (dB)	Følsomhet (dBm) @ 3,5 MHz BW	Følsomhet (dBm) @ 5 MHz BW
BPSK 1/2	2,5	-98	-96
QPSK 1/2	5,9	-95	-93
QPSK 3/4	8,6	-92	-90
QAM16 1/2	11,4	-89	-87
QAM16 3/4	14,8	-86	-84
QAM64 2/3	20	-81	-79
QAM64 3/4	20,9	-80	-78

Tabell 2.3 Følsomhet for CPE (BER 1E-6) for ulike kanalbåndbredder.

### 2.1.3 Antenner

Som antenne på basestasjonssiden ble en sektorantenne med vertikal polarisasjon benyttet. Antennens åpningsvinkel i horisontalplanet kan justeres ved hjelp av sidepaneler på antennen. Åpningsvinkelen ble satt til 90 grader, noe som gir en antenneforsterkning på 15, 5 dBi. Øvrige spesifikasjoner er oppsummert i Tabell 2.4.

Frekvensområde	2300 – 2500 MHz
Forsterkning ved ulike åpningsvinkler	17,5 dBi @ 60°, 15,5 dBi @ 90° 14,5 dBi @ 120°, 13 dBi @ 160°
Polarisering	Vertikal
Maks effekt	100 W
Strålingsbredde	60, 90, 120 og 160 grader
Tilkobling	N-konnektor

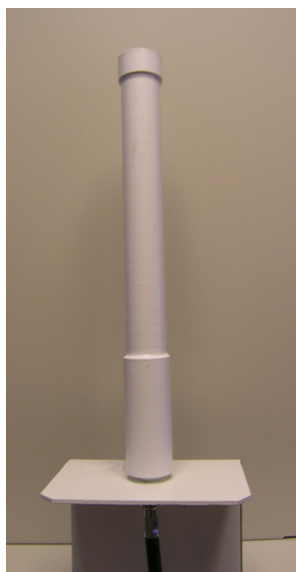
Tabell 2.4 Tekniske data for sektorantenne.

Figur 2.3 viser to sektorantenner montert på bom sammen med tilhørende basestasjonens ODUer.



*Figur 2.3 Sektorantenner. Hver antenne har sin egen ODU.*

På brukersiden ble en enkel rundstrålende antenne benyttet, se Figur 2.4.



*Figur 2.4 Antenne på brukerside. Antennen er bare 34 cm høy og gir 4 dBi forsterkning.*

En kunne oppnådd bedre rekkevidder ved å bruke direkte antenner med høyere antenneforsterkning. Dette ble også vist i tidligere målinger på samme utstyr [1;2]. Denne antennen ble imidlertid valgt da den er rundstrålende i horisontalplanet samt har relativt stor åpningsvinkel vertikalt og dermed er mer relevant for taktiske scenarier med mobilitet. Tekniske data for antennen presenteres i Tabell 2.5.

Frekvensområde	2200 – 2400 MHz
Antenneforsterkning	4 dBi
Polarisering	Lineær (vertikal)
Strålingsbredde	360° horisontalt
	40° vertikalt
Tilkobling	N-konnektor

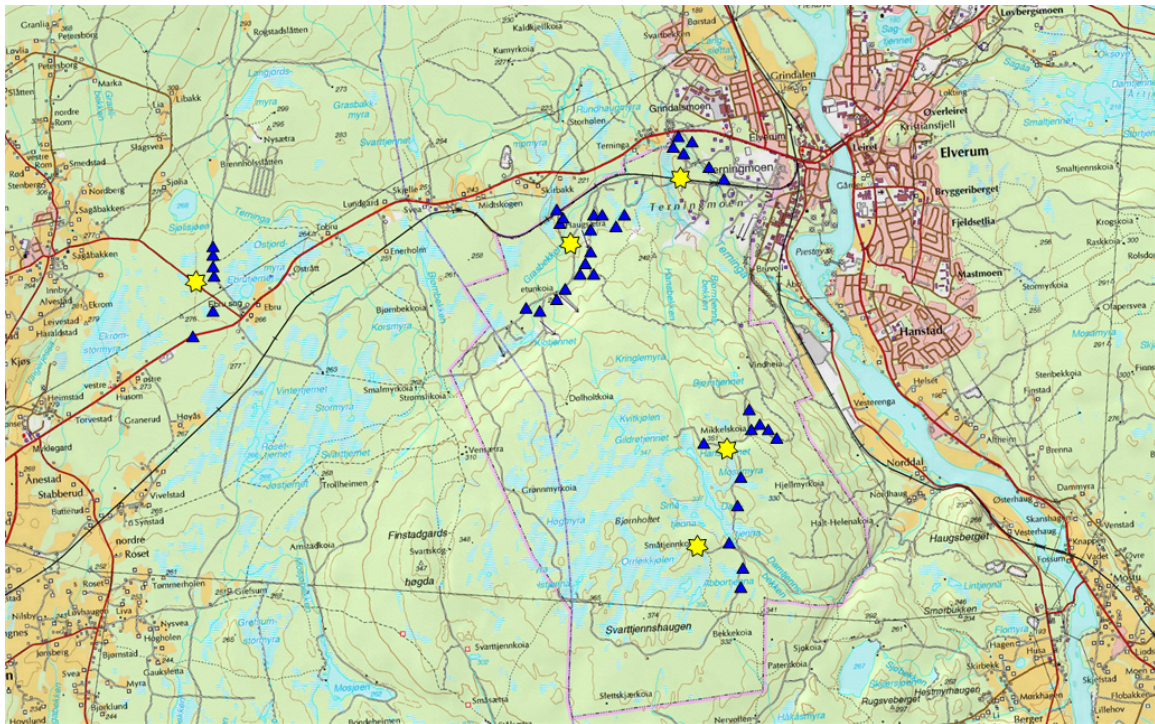
Tabell 2.5 Spesifikasjoner for terminalantenne.

## 2.2 Oppsett

Målingene ble gjennomført i september 2008 ved hjelp av en deployerbar basestasjon samt en mobil brukerterminal plassert på kjøretøy. Målinger ble gjort med 5 MHz kanalbandbredde på senterfrekvens 2303,250 MHz. Det ble inngått avtale med NextGenTel om lån av frekvenser da Forsvaret selv ikke disponerer frekvensressurser i aktuelt frekvensområde. Det var ikke nedbør eller snø på bakken i måleperioden. I dette delkapittelet presenteres øvingsområde, benyttede plattformer samt utførelse av målinger.

### 2.2.1 Øvingsområde

Samtlige målinger ble gjort i Elverum og Løten kommune i Hedmark. Av totalt fem ulike posisjoner hvor basestasjon ble deployert, ligger fire inne i Terningmoen skyte- og øvingsfelt, mens den femte ligger ved Ebru på Løten. Figur 2.5 viser benyttede posisjoner både for basestasjon og brukerterminal.



Figur 2.5 Kart over måleposisjoner. Posisjoner for basestasjon er vist som gule stjerner. Posisjoner for mobilstasjon er vist som blå trekkanter. Til høyre i figur ses Elverum og Glomma.

## 2.2.2 Plattformer

Målingene ble utført ved hjelp av to plattformer; én for basestasjon og én for CPE. Deployerbar WiMAX basestasjon ble realisert ved hjelp av kjøretøy og tilhenger. Dette var i utgangspunktet en standard bilhenger, og dette satte dermed noen begrensninger i forhold til framkommelighet. Figur 2.6 og Figur 2.7 viser basestasjonen deployert i to av posisjonene som ble brukt i målingene.



*Figur 2.6 Deployert basestasjon med aggregat og antenner.*



*Figur 2.7 Deployert basestasjon i barskog.*

Tilhengeren inneholdt blant annet oppvarming og opplegg for strøm. I Figur 2.8 ses basestasjon montert øverst i 19'' utstyrshylle innerst i henger. I tillegg finnes strømforsyning, samt PC for konfigurering.



Figur 2.8 Tilhenger innvendig.

Antenner og ODUer ble plassert på justerbar 15 meters mast. Antennehøyden kunne dermed enkelt varieres mellom 3,5, 5,5, 10,5 og 14 meter, se Figur 2.9 og Figur 2.10.





*Figur 2.9 Antenner plassert på mast.*



*Figur 2.10 Antenner 14 meter over bakken.*

CPE ble plassert på kjøretøy, med antenne fastmontert som vist i Figur 2.11. Alt utstyr ble drevet på 12 V. Dette gjorde at brukeren i kjøretøyet til en hver tid, forutsatt at man var innenfor dekning, var på WiMAX nettet og kunne logge signalstyrke med mer.



*Figur 2.11 Testplattform. Kjøretøy med fastmontert CPE og antenne.*

### 2.2.3 Målemetode

Alle målinger ble kjørt fra CPE-siden. Selv om testplattformen muliggjorde målinger i fart, ble alle målinger foretatt mens kjøretøy sto i ro i posisjon. Dette forenkler registrering av resultater samtidig som man da har mulighet til å samle en tidsrekke i hver posisjon.

Fra PC i kjøretøyet kan man koble seg til CPE'ens innendørsenhet ved hjelp av Telnet og lese ut en rekke kvalitetsindikatorer. Disse inkluderer mottatt signalnivå (RSSI), signal-støy-forhold (SNR), modulasjon og koding, både for ned- og opplink, og oppdateres med en frekvens på om lag 1 per sekund.



Figur 2.12 Testplattform innvendig. PC for logging av nettverksparametere, posisjon mm.

Ved hjelp av enkle script ble avlesing og lagring av kvalitetsparametere samt posisjon automatisert. Sekvenser á 60 sekunder ble logget i hver posisjon. I tillegg ble antennehøyden på basesiden variert mellom 3,5, 5,5, 10,5 og 14 meter for hver enkelt CPE-posisjon. Det vil si at det i hver posisjon ble logget 4 tidssekvenser á 60 sekunder. Enkelte posisjoner ble i tillegg målt med diversitet, og resultatsettet inneholder dermed 8 slike tidssekvenser for noen posisjoner.

Med diversitet menes her 2. ordens antennerdiversitet. Det vil si at man på basestasjonen bruker to antenner i stedet for én for å dekke en sektor. Ved mottak benytter basen da *maximal-ratio receiver combining* (MRCC) der innkommende signaler fra de to antennene vektet i henhold til signal-støy-forhold og kombineres i fase. Ved sending bruker basen *space-time coding* (STC) til å kode utgående signal, som så sendes ut på begge antenner.

### 3 Resultater

De målte verdiene for dempning er sammenlignet med utvalgt modeller for kommunikasjon i skog. Målt nedlink RSSI er konvertert til dempning i henhold til ligning 3.1:

$$A_{meas} = G_r + G_t + P_t - RSSI \quad dB \quad (3.1)$$

der antenneforsterkning på sendersiden,  $G_t$ , er 15.5 dBi, mottakerens antenneforsterkning,  $G_r$ , er 4 dBi, og utsendt effekt,  $P_t$ , er 36 dBm. Vi antar en relativt vanlig modell der strekningsdempningen øker eksponentielt med avstand, med ekstra dempning på grunn av vegetasjon og en skyggedempning som tar høyde for variasjoner i tid og rom, se ligning 3.2.

$$A = A_0(d_0) + \gamma \cdot 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + A_{ev} + S \quad dB \quad (3.2)$$

$A_0$  er dempningen ved avstand  $d_0$ ,  $\gamma$  er strekningsdempningsekspONENT ( $\gamma = 2$  tilsvarer frittromstap),  $A_{ev}$  representerer tilleggsdempning på grunn av vegetasjon og  $S$  representerer skyggedempning i dB.

#### 3.1 Tilleggsdempning

I tillegg til frittromstapet kommer dempning fra vegetasjon samt tap som skyldes refleksjoner og diffraksjon. Dempningen som forårsakes fra propagasjon gjennom et belte med vegetasjon er vanskelig å estimere på grunn av store variasjoner fra sted til sted, og ulikheter mellom ulike typer og størrelser på trær. I tillegg kommer andre faktorer som fuktighet som kan endre refleksjonsegenskapene til løv, nåler og stammer [4;5]. Weissberger utviklet en *modified exponential decay* (MED) modell for tilfeller der mesteparten av signaleffekten passerer gjennom et belte med tørre løvtrær (i motsetning til tilfeller der diffraksjon dominerer) [4]. Weissbergers modell for tilleggsdempning,  $A_{ev}$  (dB), er angitt i ligning 3.3 og illustrert i Figur 3.1 sammen med målte verdier.

$$A_{ev} = \begin{cases} 1.33 f^{0.284} d^{0.588} & 14m \leq d \leq 400m \quad dB \\ 0.45 f^{0.284} d & 0m \leq d < 14m \quad dB \end{cases} \quad (3.3)$$

der frekvensen  $f$  er i GHz.

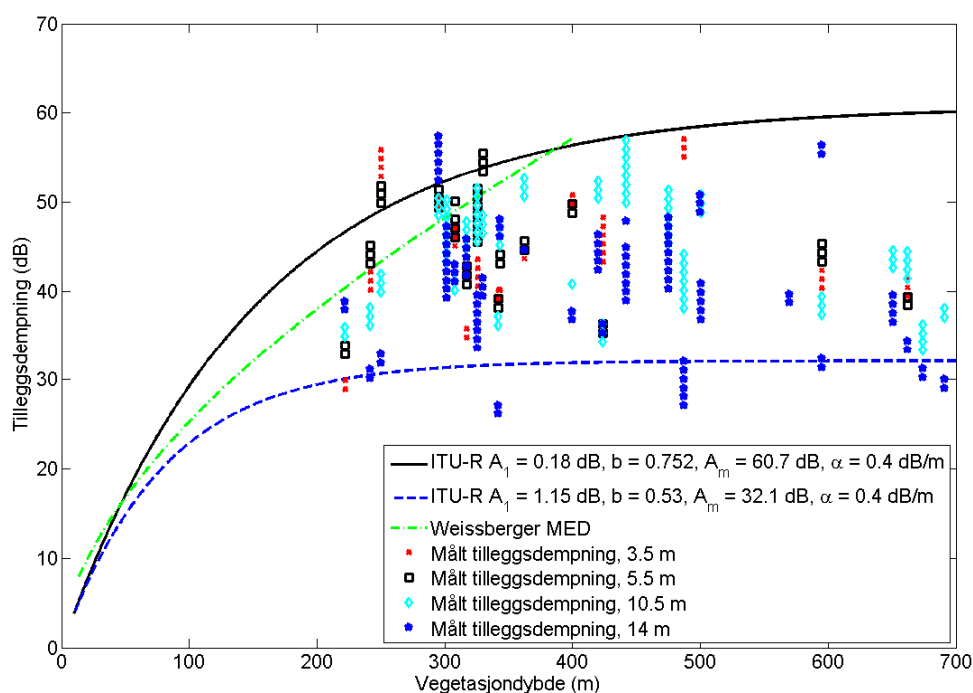
Den estimerte tilleggsdempningen som kommer fra propagasjon gjennom skog med én terminal inne i skogsområdet, basert på ITU-R Rek. 833-6 [6], er gitt av

$$A_{ev} = A_m \left[ 1 - e^{-d\alpha/A_m} \right] \quad dB \quad (3.4)$$

der  $\alpha$  er spesifikk dempning for korte propagasjonsveier gjennom vegetasjon. Her antas spesifikk dempning å være 0,4 dB/m fra Figur 3.1 [6]. Lengden til propagasjonsveien inne i vegetasjon er  $d$  (m) og den maksimale dempningen for én terminal i en gitt vegetasjonstype,  $A_m$  (dB), er gitt av

$$A_m = A_1 f^b \quad (3.5)$$

der  $f$  er i MHz. I det aktuelle måleoppsettet befinner begge terminaler seg inne i vegetasjon, og det er derfor rimelig å vente at målt maksimumsdempning,  $A_m$ , overgår den estimerte verdien. De fleste målte verdier for tilleggsdempning faller innenfor området som indikeres fra ITU-R modellen med parametersett som angitt i Figur 3.1.



Figur 3.1 Dempning som går utover frittromstap, som funksjon av avstand gjennom vegetasjon. Tidsskvenser à 1 minutt (60 datapunkter) er plottet for hver posisjon.

Som vi ser i Figur 3.1 produserer både ITU-R modellen for propagasjon til/fra en terminal i vegetasjon, og Weissbergers MED modell estimater i samme størrelsesorden som de målte verdiene. Den asymptotiske oppførselen til ITU-R modellen virker å samsvare bra med målingene. Lav tetthet og høy andel bartrær kan være grunnen til at den målte dempningen, med begge terminaler inne i vegetasjon, ikke overgår estimatet for bare én terminal i vegetasjon.

Verdien for maksimal dempning i ITU-R modellen,  $A_m$  (dB), er estimert fra målingene ved hjelp av en numerisk rutine som minimaliserer midlere kvadratisk feil mellom målt og modellert tilleggsdempning. Tabell 3.1 viser foreslåtte verdier i ITU-R Rek. P.833-6, estimert fra målinger

gjort i Brasil (tropiske trær i park, median trehøyde omlag 15 meter) og Frankrike sammen med verdier fra målinger gjort som en del av dette arbeidet.

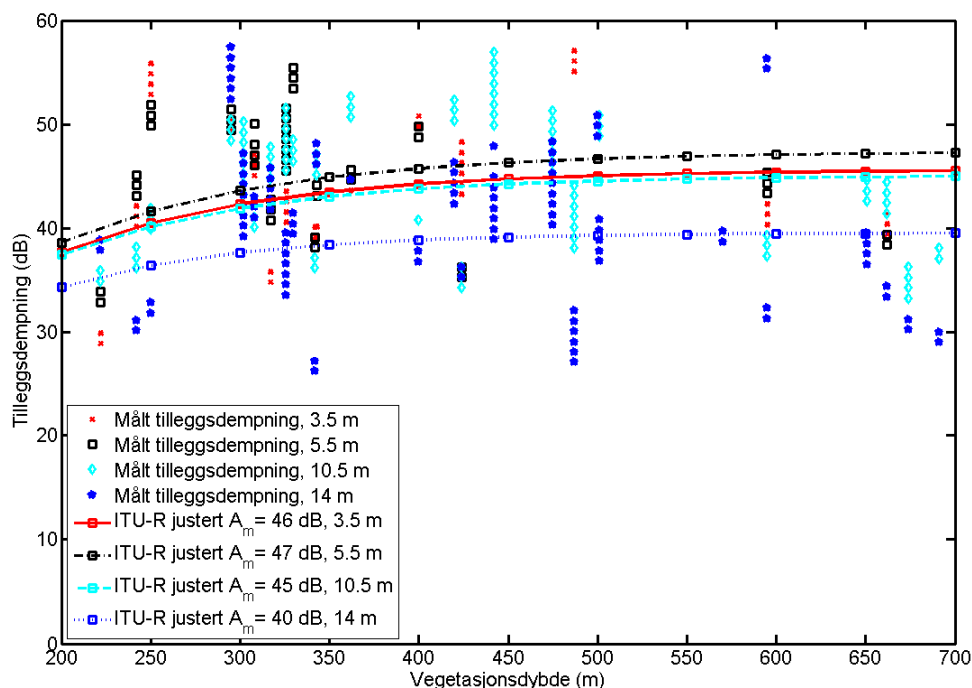
	$A_m$ (dB)
ITU-R Rec. P833-6 ( Brasil)	60.7
ITU-R Rec. P833-6 (Frakrike)	32.1
Optimalisert 3.5 m	45.6
Optimalisert 5.5 m	47.4
Optimalisert 10.5 m	45.1
Optimalisert 14 m	39.6
Optimalisert alle høyder	43.6

Tabell 3.1 Maksimal dempning,  $A_m$  (dB)

Størsteparten av de målte verdier for tilleggsdempning faller mellom de to estimatene fra ITU-R modellen med gitte parametersett.

### 3.2 Antennehøyde

Den maksimale tilleggsdempningen forårsaket av vegetasjon varierer bare moderat mellom de laveste antennehøydene. For de tre laveste antennehøydene er denne konstanten 45-47 dB, mens for den største antennehøyden er den omlag 5 dB lavere. Den målte tilleggsdempningen er plottet sammen med en justert ITU-R modell i Figur 3.2. Maksimaldempningen  $A_m$  er tatt fra Tabell 3.1. For antennehøyde på 14 meter, gikk den første delen av propagasjonsveien over de fleste løvtrærne. I de fleste tilfeller var imidlertid bartrærne høyere enn 14 meter og forstyrret dermed fortsatt hele propagasjonsveien.

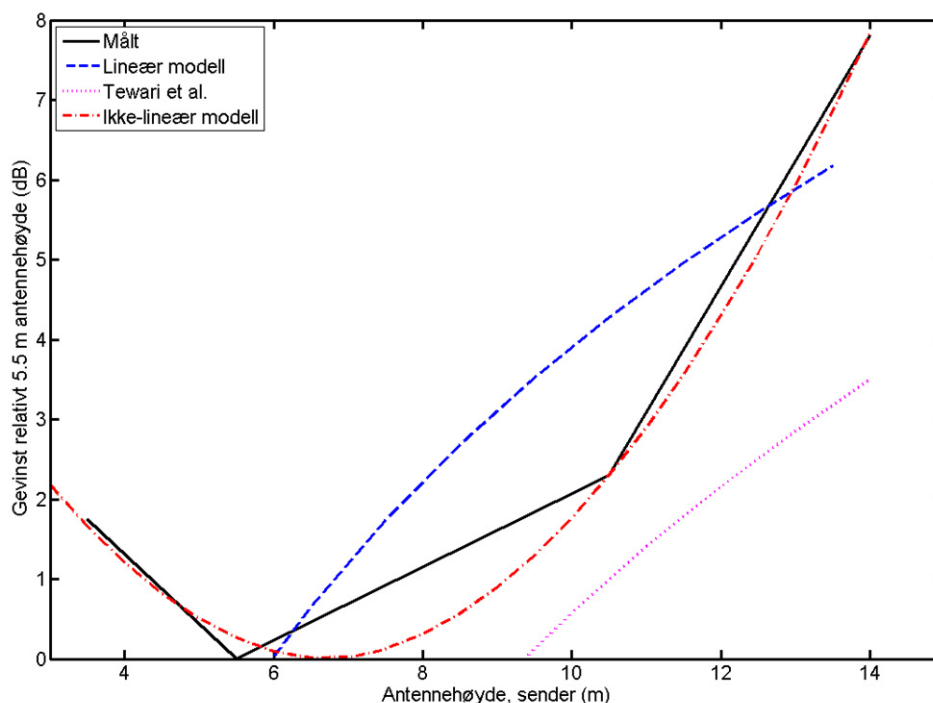


Figur 3.2 Målt og modellert tilleggsdempning, justert maksimal dempning.

Den målte dempningen ved antennehøyder 3,5, 5,5 og 10,5 meter er nesten like. Ved 5,5 meter var antennen typisk i den høyden der trærnes diameter var størst. For flere av posisjonene resulterte dette i at basestasjonsantennen kom svært nær grenene til de nærmeste trærne. Dette kan ha redusert diffraksjonskomponenter rundt det nærmeste treet og dermed økt dempningen i første delen av propagasjonsveien sammenlignet med andre antennehøyder. Ved den laveste antennehøyden kom man derimot under grenene, siden en stor del av vegetasjonen var furuer med bare stammer nederst. Dette kan forklare den noe lavere dempningen som ble registrert for denne høyden. Lignende resultater rapporteres i [4]. Gevinsten ved å øke antennehøyden er i følge [7], basert på en idealisert tostrålemodell, gitt som

$$G_H = a + b \cdot \log_{10}(h_t \cdot h_r) \quad (3.6)$$

der gevinsten er relativ til den minimale antennehøyden på 6 meter. Konstantene  $a$  og  $b$  i modellen ble i [7] estimert fra målinger med frekvenser mellom 50 MHz og 800 MHz. Man fant da  $a = -12 - 4 \log_{10}(f) = -25.5$  og  $b = 20$  med  $f$  i MHz. En lignende regresjonsmodell basert på målingene gjort i dette arbeidet og estimert  $A_m$  ga  $a = -18.7$  og  $b = 17.4$  for høydegevinst relativt antennehøyde på 5,5 meter. Figur 3.3 viser at den målte høydegevinsten for antennehøyder under 5-6 meter ikke fanges opp av de lineære regresjonsmodellene (ligning 3.6). I det aktuelle scenarioet med relativ høy frekvens og korte avstander, kan formen til trærne med bare stammer under grenene være viktigere enn bakkerefleksjoner og  $20 \log_{10}(h_r \cdot h_t)$  avhengigheten i tostrålemodellen.



Figur 3.3 Høydegevinst relativt antennehøyde 5,5 meter med mottakerantennehøyde på 2 meter.

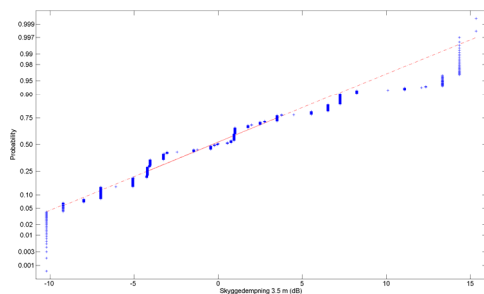
En alternativ formulering av høydegevinsten relativt til 5.5 m, vist som ikke-lineær modell i Figur 3.3, er

$$G_H = c \cdot |h - d|^e \quad (3.7)$$

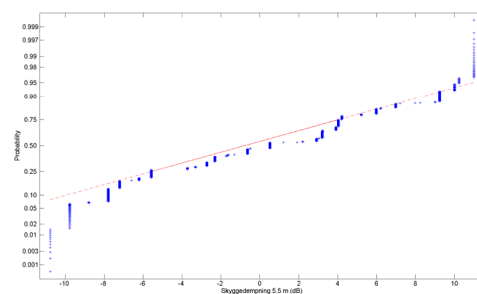
der minimering av midlere kvadratisk feil resulterer i  $c = 0.19$ ,  $d = 6.7$  og  $e = 1.9$ . Videre arbeid er nødvendig for å beskrive og modellere høydegevinst for mer generelle tilfeller.

### 3.3 Skyggedempning

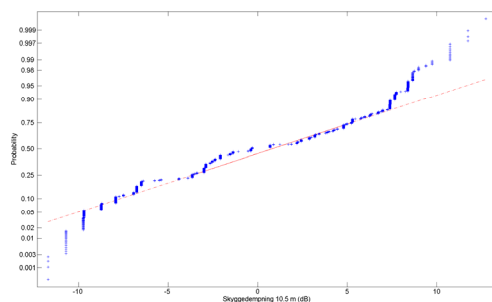
Skyggedempningskomponenten  $S$  i ligning 3.2 midlet over båndbredden på 5 MHz (RSSI basert) ble estimert fra målingene som differansen mellom målt tilleggsdempning og modellert tilleggsdempning vha ITU-R modellen. Maksimaldempningen,  $A_m$ , estimert fra målinger for de ulike antennehøydene i Tabell 3.1 ble benyttet i modellen. Skyggedempningen på en desibelskala forventes å følge en normalfordeling med middelværdi lik null og et standardavvik som kan avhenge av for eksempel antennehøyde, antennevinning og avstander. De kumulative fordelingene for de fire antennehøydene er vist i Figur 3.4, der rette linjer representerer normalfordelinger. Uten å gjennomføre noen hypotesetesting, ser det ut som om skyggedempningen følger normalfordelingene rimelig bra, unntatt i endene av fordelingene. Denne type avvik kan godt skyldes et begrenset antall målepunkter.



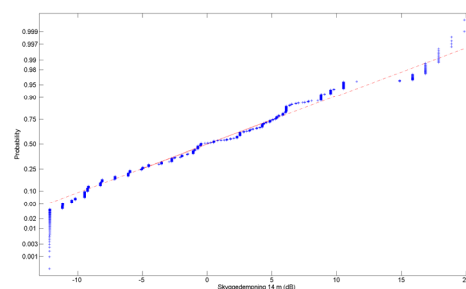
a) Basestasjon, antennehøyde 3,5 m



b) Basestasjon, antennehøyde 5,5 m



c) Basestasjon, antennehøyde 10,5 m



d) Basestasjon, antennehøyde 14 m

Figur 3.4 Normalt kumulativt plot av skyggedempning  $S$  (dB)



Estimerte verdier for middelværdi og standardavvik for  $S$  med 95 prosent konfidensintervall er vist i Tabell 3.2. Variasjonene i standardavvik ser ikke ut til å være signifikant for de tre laveste antennehøydene.

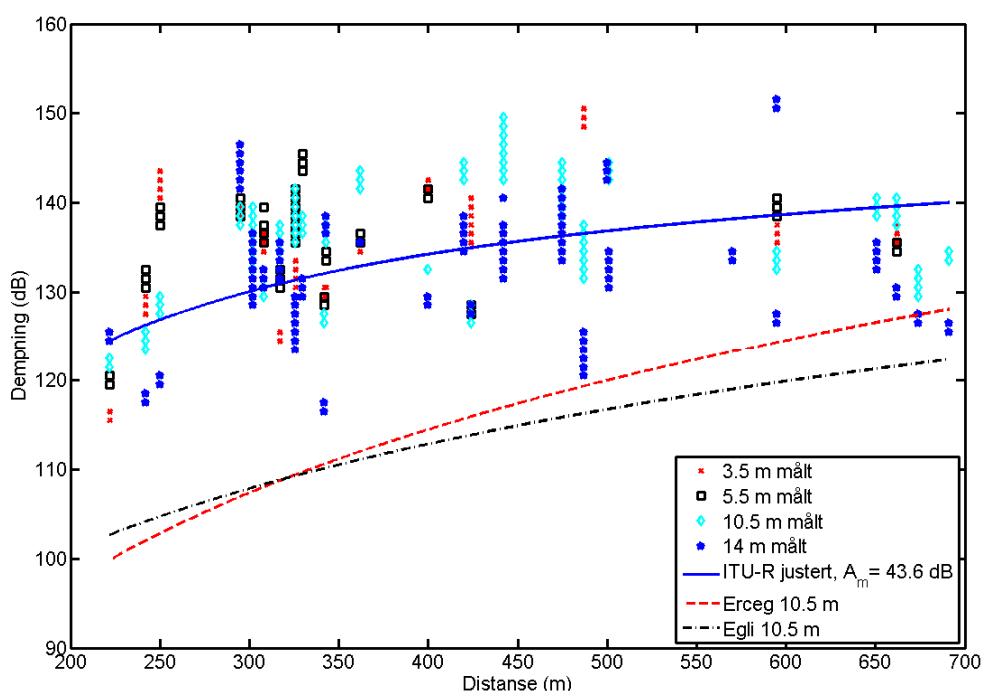
TX ant. høyde	Middel $S$ (dB)	95% konfidensintervall	Std. $S$ (dB)	95% konfidensintervall
3.5 m	0.1	[-0.3, 0.5]	6.2	[5.9, 6.5]
5.5 m	0.3	[-0.1, 0.7]	6.1	[5.8, 6.4]
10.5 m	0.2	[-0.1, 0.5]	5.8	[5.6, 6.0]
14 m	0.2	[-0.2, 0.5]	7.0	[6.7, 7.2]
All	0.2	[0.0, 0.4]	6.3	[6.2, 6.4]

Tabell 3.2 Parametere for eksperimentell dempningsmodell, skyggedempning  $S$

I tilfellet med antennehøyde på 14 m, som tilsvarer den laveste maksimale dempningen i Tabell 3.1, er det estimerte standardavviket størst.

### 3.4 Modellering av strekningsdempning

Den målte strekningsdempningen ble sammenlignet med noen vanlige publiserte modeller, se Figur 3.5. Den første viste modellen er den justerte ITU-R modellen for tilleggsdempning der frittromstapet er lagt til vegetasjonsdempningen.



Figur 3.5 Målt og modellert strekningsdempning

Modellen til Erceg [8] dekker moderat til tett (*moderate-to-heavy*) tretetthet og er inkludert selv om høyden til basestasjonsantennen er utenfor intervallet som dekkes av modellen. I tillegg vises et estimat fra Egli's 'poor soil'-modell [9]. I følge [9] er modellen kun gyldig opp til 1 GHz. Disse

modellene tar ikke eksplisitt hensyn til skogdempning, og de gir dermed et lavere estimat for strekningsdempning enn hva som ble målt i dette arbeidet. En idealisert tostrålemodell med refleksjonskoeffisient -1 er ikke inkludert på grunn av de korte distansene. Det vil si, tostrålemodellen har ikke nådd sin siste økning på 40 dB per dekode og oscillerer rundt frittromstapet. Approksimasjonen av refleksjonskoeffisienten er trolig også noe unøyaktig for vårt tilfelle.

## 4 Oppsummering

Rapporten beskriver propagasjonsmålinger utført på 2,3 GHz TDD WiMAX, høsten 2008. Målingene er gjennomført på Terningmoen ved Elverum og fokuserer på rekkevidde og vegetasjonsdempning. Samtlige målinger er gjort med en deployerbar basestasjon med sektor-antenner på regulerbar mast og brukerterminal og antenne montert på kjøretøy.

Alle måleresultatene er registrert innen en radius på om lag 700 meter fra basestasjonen og dette indikerer dermed rekkevidden til dette WiMAX-oppsettet. Gjennom å senke frekvensen vil man kunne bedre kommunikasjonsrekkevidden betraktelig. Uavhengig av hvilken teknologi som velges, vil en av de største utfordringene med å ta i bruk nye høyhastighets trådløse systemer i Forsvaret være tilgang til frekvensressurser. Det er viktig at Forsvaret tar denne utfordringen på alvor.

Tilleggsdempning forårsaket av vegetasjon er modellert rimelig godt ved hjelp av ITU-R Rek. 833-6. De aller fleste målte verdier faller innenfor de to parametersettene som er gitt i modellen. Maksimal dempning ble estimert fra måleresultatene for å justere ITU-R modellen til lokale forhold og de fire benyttede antennehøydene. Kun moderate variasjoner i vegetasjonsdempning ble observert mellom de ulike antennehøydene på 3,5, 5,5 og 10,5 meter, mens antennehøyde på 14 meter resulterte i en dempning omlag 5 dB lavere. Skyggedempning i dB følger en normalfordeling rimelig bra. Det høyeste standardavviket (7 dB) ble observert når basestasjonsantennen ble hevet til 14 meter. Dette indikerer at man bare oppnår en moderat forbedring i mottatt signalstyrke ved å heve basestasjonsantennen, med en noe lavere midlere strekningsdempning.

## Referanser

- [1] J. E. Voldhaug, J. Sander, and L. E. Bråten, "WiMAX for Forsvaret", FFI rapport 2008/00087 (Begrenset), 2008.
- [2] J. E. Voldhaug, J. Sander, and L. E. Bråten, "WiMAX ytelsesmålinger i skogsterreng", FFI rapport 2008/01554, 2008.
- [3] Alvarion, [www.alvarion.com](http://www.alvarion.com), Access date: 5-6-2009.
- [4] M. A. Weissberger, "An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by trees", Technical report, Department Of Defense, Electromagnetic Compatibility Analysis Center, 1982.
- [5] N. C. e. a. Rogers, "A Generic Model of 1-60 GHz Radio Propagation through Vegetation - Final Report", QINETIQ/KI/COM/CR020196/1.0, 2002.
- [6] ITU-R Rec.P.833-6, "Attenuation in vegetation", Geneva, 2007.
- [7] R. K. Tewari, S. Swarup, and M. Roy, "An empirical result for the height gain in forest medium", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 32, no. 11, pp. 1265-1268, 1984.
- [8] V. Erceg, L. J. Greenstein, S. Y. Tjandra, S. R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A. A. Julius, and R. Bianchi, "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 7, pp. 1205-1211, 1999.
- [9] J. J. Egli, "Radio Propagation above 40 MC over Irregular Terrain", *Proceedings of the IRE*, vol. 45, no. 10, pp. 1383-1391, 1957.

## Forkortelser

ATPC	Automatic Transmit Power Control
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CD&E	Concept, Development and Experimentation
CPE	Customer Premises Equipment
dBi	Decibal Isotropic
FEC	Forward Error Correction
FOH	Forsvarets operative hovedkvarter
HSTO	Hærens skole for taktikk og operasjone
IDU	Indoor Unit
MAC	Media Access Control
MED	Modified Exponential Decay
MRCC	Maximal-Ratio Receiver Combining
ODU	Outdoor Unit
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SNR	Signal to Noise Ratio
SOFDMA	Scalable Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
STC	Space Time Coding
TDD	Time-Division Duplex
TRADOK	Hærens transformasjons og doktrinekommando
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access