

## **WiMAX ytelsesmålinger i skogsterreng**

Jan Erik Voldhaug, Jostein Sander og Lars Erling Bråten

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

20.august 2008

FFI-rapport 2008/01554

1088

P: ISBN 978-82-464-1405-8

E: ISBN 978-82-464-1406-5

## **Emneord**

Mobile telekommunikasjonssystemer

Nettverksbasert Forsvar

Mobil bredbåndsaksess

WiMAX

## **Godkjent av**

Vivianne Jodalen

Prosjektleder

Vidar S. Andersen

Avdelingssjef

## Sammendrag

Det er et behov for økende overføringskapasitet til brukere av trådløse kommunikasjonssystemer, også i Forsvarets taktiske avdelinger. Dette behovet kan trolig til en viss grad dekkes ved bruk av nye sivile mobile bredbåndssystemer. Denne rapporten ser på hvordan slike systemer kan brukes i Forsvaret med et spesielt fokus på IEEE 802.16 (WiMAX) og særlig IEEE 802.16-2004 (stasjonær WiMAX) og IEEE 802.16e-2005 (mobil WiMAX).

Rapporten presenterer resultater fra felttester på WiMAX utstyr utført i Regionfelt Østlandet, høsten 2007. Målinger ble utført med utstyr kjøpt inn av Hærens transformasjons- og doktrinekommando (TRADOK), finansiert gjennom *Concept, Development, and Experimentation* (CD&E) midler fra Fellesoperativt hovedkvarter (FOHK). Resultater fra målingene viser at man enkelt kan få overføringshastigheter på flere Megabit per sekund over avstander på flere kilometer, men indikerer samtidig en sterk avhengighet mellom terreng, vegetasjon og ytelse.

## English summary

The need for information flow within and between different units and platforms in the Norwegian Defence is expected to increase substantially over the next few years. To meet this demand, new wireless communication systems with higher data transmission capacities will be required, not least in tactical units. A number of civilian standard based mobile broadband technologies have emerged over the last few years that may, at least partially, help solve this challenge. This report investigates the usability for mobile broadband systems in the Norwegian Defence with a particular focus on the IEEE standards 802.16-2004 and 802.16e-2005, fixed WiMAX and mobile WiMAX, respectively.

The report presents results from WiMAX field trials conducted in Hedmark, Norway during the autumn of 2007. Measurements were performed on a 2.3 GHz WiMAX setup acquired by the Norwegian Army. The results from the measurements show that a throughput of several Megabits per second can be achieved even at distances of several kilometers. Results also indicate a strong dependency between terrain, vegetation and network performance.

## Innhold

	<b>Forord</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>9</b>
1.1	Målsetting, bakgrunn og CD&E	9
1.2	Oppbygging av rapporten	9
<b>2</b>	<b>IEEE 802.16 WiMAX</b>	<b>10</b>
2.1	Standardisering	10
2.1.1	Stasjonær WiMAX	11
2.1.2	Mobil WiMAX	11
2.2	Alternative standarder for mobil bredbåndsaksess	12
2.2.1	UMTS High Speed Packet Access	12
2.2.2	CDMA-systemer og ICE	12
2.2.3	GSM / GPRS / EDGE	13
2.2.4	WiFi-systemer og taktisk bredbånds WLAN (WM / SR600)	13
2.2.5	IEEE802.22	14
2.2.6	DVB-RCT	14
<b>3</b>	<b>Felttester Regionfelt Østlandet</b>	<b>14</b>
3.1	Utstyr	15
3.1.1	Basestasjon	15
3.1.2	Brukerterminaler	18
3.1.3	Antenner	19
3.2	Gjennomføring av målingene	21
3.2.1	Målemetoder	22
3.2.2	Testplattformer	23
3.2.3	Øvelsesområde	26
3.3	Resultater	28
3.3.1	Throughput	28
3.3.2	Signalstyrke RSSI	31
3.3.3	Terminalantenner	36
3.3.4	Adaptiv modulasjon og koding	38
3.3.5	Non-line-of-sight (NLOS) ytelse	41
3.3.6	Målinger med enkeltmannsplattform	41
<b>4</b>	<b>Oppsummering / videre arbeid</b>	<b>42</b>
	<b>Referanser</b>	<b>43</b>



## Forord

Denne rapporten er en ugradert versjon av FFI rapport 2008/00087 laget for distribusjon utenfor Forsvaret, og inneholder de delene av 2008/00087 som omhandler gjennomførte ytelsesmålinger.

Målingene presentert i denne rapporten ble muliggjort gjennom den felles innsatsen til FFI, TRADOK/LMO/Utvikling & Eksperimentering ved Kapt Juland og Fenr Ugelstad, FLO/IKT ved Ingeborg Thomasrud, Tor Svartveit og Kapt Lian. Jan Arve Hansen og Hildur Karlsdottir, studenter ved FIH, deltok også i testene. Nextgentel ved Ingvar Henne ga tillatelse til bruk av deres frekvenser til denne aktiviteten.





# 1 Innledning

Forsvaret har vært og er fortsatt i en prosess med grunnleggende endringer. Fra å være et omfattende invasjonforsvar, bygges nå Forsvaret for å kunne håndtere asymmetriske trusler (internasjonal terrorisme), sikre overvåkning og situasjonsbevissthet samt forebygge og håndtere sikkerhetspolitisk krisesituasjoner i våre nærområder, og ha evne til å delta i internasjonale operasjoner [1]. Som en følge av endringer i struktur og operasjonsmønstre for Forsvaret sammen med teknologiske framskritt og utvikling av nye kommunikasjonsstandarder, vil det komme nye behov for kommunikasjonsløsninger fra Forsvarets avdelinger. Det antas at det vil komme et behov for økt båndbredde og bredbånd også i Forsvarets taktiske avdelinger. Et slik behov kan trolig i stor grad løses ved hjelp av eksisterende og framtidig sivil teknologi. Dette kan være gunstig, ikke minst sett fra et økonomisk perspektiv, da egen utvikling gjennom forvarsindustrien potensielt er svært kostbart. Dette arbeidet fokuserer på WiMAX, og tar for seg feltmålinger av 2.3 GHz WiMAX utstyr utført i 2007.

## 1.1 Målsetting, bakgrunn og CD&E

Feltemålingene som er utført av FFI inngikk som en del av et CD&E-arbeid på mobil WiMAX i Forsvaret. CD&E-arbeidet ble initiert og styrt av Hærens transformasjon- og doktrinekommando (TRADOK) sitt kamplaboratorium (TRADOK/LMO/Utvikling & Eksperimentering). I tillegg til FFI bidro også FLO/IKT, Sambandsseksjonen ved Hærens våpenskole og studenter fra Forsvarets ingeniørhøgskole (FIH).

Bakgrunnen for dette arbeidet var at man ønsket å se på hvilket WiMAX utstyr som er tilgjengelig på markedet og hvorvidt denne typen utstyr egner seg for bruk i Hærens taktiske avdelinger. Man ønsket særlig å måle hvilke overføringsrater man kan oppnå med et slikt system, og hvordan terreng og vegetasjon påvirker systemets ytelse.

I forkant av målekampanjen hadde FFI sammen med TRADOK/Utvikling & Eksperimentering og FLO/IKT kontakt med Telenor R&I, som tidligere har gjort målinger på lignende utstyr fra samme leverandør. Telenor delte erfaringer og resultater fra sine målinger. FLO/IKT har også tidligere gjort noe testing av stasjonært WiMAX-utstyr i 3,5 GHz båndet.

## 1.2 Oppbygging av rapporten

Kapittel 2 gir en beskrivelse av WiMAX og plasserer den i forhold til andre standarder for trådløs bredbåndsaksess. Det gis en oversikt både over teknologien som ligger i IEEE 802.16-2004 og 802.16e-2005 og standardiseringen som er gjort. I kapittel 3 beskrives gjennomføringen av feltemålingene samt resultater fra disse. Det gis i tillegg detaljer om utstyret som er brukt i forbindelse med målingene.

## 2 IEEE 802.16 WiMAX

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) er en standardbasert teknologi for trådløs bredbåndsaksess, laget som et alternativ til trådbundne kabel- og DSL-systemer. WiMAX er definert for aggregerte datarater opp til 75 Mbit/s og i følge WiMAX Forum kan 40 Mbit/s forventes ved celleradier opp mot 10 km [2]. For mobile deployeringer forventer WiMAX Forum hastigheter opp mot 15 Mbit/s med celleradier på 3 kilometer. Dette er tall for totalkapasitet som deles mellom brukerne. Denne rapporten tar ikke sikte på å gi fullstendige detaljer om WiMAX. Vi velger i stedet å henwise til andre kilder hvor dette er gjort tildels meget grundig [3], [4], [5], [6] og [7]. I denne rapporten presenteres en oversikt over de viktigste elementene i teknologien sett i sammenheng med andre mobil bredbånd standarder. Det er fokus på IEEE 802.16-2004 og 802.16e-2005 og de to definerte systemprofilene stasjonær og mobil WiMAX fra WiMAX Forum.

WiMAX bruker adaptiv modulasjon og koding (AMC) og kan dermed tilpasse seg ulike omgivelser og avstander. Om en brukerterminal eller CPE (*customer premises equipment*) befinner seg i område med gunstige dekningsforhold kan en høyordens modulasjonsform som for eksempel *quadrature amplitude modulation* (QAM) 64 velges. Gjennom i stedet å velge en mer robust modulasjonsform og kraftigere feilkorrigerende koding kan rekkevidde og feilrobusthet økes til prisen av lavere overføringshastigheter. I tillegg til QAM 64 benyttes modulasjonsformene QAM 16, *quadrature phase shift keying* (QPSK) og *binary phase shift keying* (BPSK). Automatisk effekt kontroll (ATPC) benyttes i opplink fra brukerterminal til basestasjon, og bidrar til å optimalisere linkytelsen gjennom å dynamisk endre utsendt effekt fra CPE'ene.

IEEE 802.16d åpner både for punkt-til-multipunkt (PMP) og multipunkt-til-multipunkt (MP-MP), men 802.16e-2005 og eksisterende sertifiseringsprofiler støtter foreløpig kun PMP. Basestasjonen i et slikt WiMAX stjernenett styrer både ressurstildelingen (tidsluker) for ned- og opplink samtidig som den kan tildele ulike brukere forskjellige tjenesteprofiler og dermed muliggjør ulik tjenestekvalitet (QoS). WiMAX støtter AES kryptering og tilbyr fleksibel autentiseringsarkitektur ved EAP (*Extensible Authentication Protocol*).

### 2.1 Standardisering

Arbeidet med IEEE 802.16 startet på slutten av 90-tallet, og den første 802.16 standarden ble ferdigstilt i desember 2001. Denne definerte radiogrensesnitt for punkt-til-multipunkt trådløst bredbåndssystem i frekvensområdet 10-66 GHz. Senere fulgte en serie tillegg til standarden før IEEE 802.16-2004 i 2004 erstattet tidligere versjoner av IEEE 802.16. I desember 2005 ble et vedlegg til IEEE 802.16-2004 ferdigstilt og godkjent. Dette er kjent som IEEE 802.16e-2005 og her inngår blant annet støtte for mobilitet.

Interoperabiliteten til produkter basert på IEEE 802.16 standarden sertifiseres av WiMAX Forum. WiMAX Forum har definert to systemprofiler; stasjonær (fixed) og mobil (mobile) WiMAX. Mens stasjonær WiMAX er basert på OFDM (orthogonal frequency division multiplexing)

radiogrensesnitt som definert i IEEE 802.16-2004, er mobil WiMAX basert på S-OFDMA (scalable orthogonal frequency division multiple access) som definert i IEEE 802.16e-2005. Sertifiseringen er en pågående prosess og under hver av systemprofilene er det definert et antall sertifiseringsprofiler. De viktigste egenskapene og forskjellene mellom de to systemprofilene er presentert under.

### 2.1.1 Stasjonær WiMAX

Stasjonær WiMAX definerer både punkt-til-punkt og punkt-til-multipunkt nett og brukes primært til bredbåndsaksess til boliger og foretak som et alternativ til kablet aksess, men kan også for eksempel brukes som matenett for WiFi aksesspunkter.

Det fysiske laget i stasjonær WiMAX er basert på OFDM, som gir god spektral effektivitet og er robust mot flerveisutbredelse. OFDM er et *multi carrier modulation* (MCM) konsept, der en høyrate datastrøm deles opp i et antall parallelle datastrømmer med lavere rate. Hver enkelt strøm moduleres på separate ortogonale bærebølger. Om man deler datastrømmen i  $n$  parallelle datastrømmer, vil hver datastrøm få en rate som er  $1/n$  av den originale strømmen og symbollengden vil øke med en faktor  $n$ . Ved å gjøre symbollengden vesentlig lengre enn kanalens forsinkelsesspredning (delay spread) reduserer man intersymbolinterferens (ISI) fra ekkoer / flerveisutbredelse. I OFDM ligger bærebølgene svært tett, og den er dermed spektraleffektiv. I stasjonær WiMAX brukes 256 bærebølger og *fast Fourier transform* (FFT)-basert OFDM, hvorav 192 brukes til dataoverføring.

For stasjonær WiMAX finnes det sertifiseringsprofiler i 3.5 GHz båndet både for frekvensdelt dupleks (FDD), hvor ulike frekvenser brukes for ned- og opplink, og tidsdelt dupleks (TDD), hvor trafikk fra og til basen sendes til ulike tider på samme frekvens. Kanalbredden er enten 3.5 eller 7 MHz. I tillegg finnes en sertifiseringsprofil i 5,8 GHz båndet for TDD og 10 MHz kanalbåndbredde.

### 2.1.2 Mobil WiMAX

I mobil WiMAX muliggjøres nomadisk og mobilt bredbånd. Nomadisk bredbåndsaksess kan oppnås ved at enheter gjøres flyttbare og at brukerne dermed kan ta dem med seg og koble seg til der de måtte ønske. Et mobilt bredbånd vil i tillegg tillate sømløs handover mellom basestasjoner og sektorer samt bevegelser opp til og med kjøretøyshastigheter.

Det fysiske laget i mobil WiMAX er basert på S-OFDMA. I motsetning til i stasjonær WiMAX hvor FFT lengden holdes konstant på 256, kan den her variere fra 128 til 2048 punkter. Ved å variere FFT lengden i takt med endringer i tilgjengelig båndbredde kan man holde avstanden mellom bærebølgene, og dermed symbollengden, konstant. Ved bruk av OFDMA gjøres ressurstildeling både ved hjelp av tids- og frekvensdelt multipleksing gjennom at ulike brukere potensielt tildeles et ulikt antall OFDM bærebølger. Gjennom å tildele brukerterminaler kun en delmengde av bærerne (subkanalisering) kan man øke en terminals rekkevidde og / eller batterilevetid. Mobil WiMAX tillater subkanalisering både på ned- og opplink, mens stasjonær WiMAX kun tillater en begrenset variant av subkanalisering på opplink.

Så langt finnes kun sertifiseringsprofiler for TDD mobil WiMAX-systemer. Profilene er definert for kanalbåndbredder 3,5, 5, 7, 8,75 og 10 MHz og inkluderer frekvensbånd fra 2.3 GHz til 3.8 GHz. Ytterligere sertifiseringsprofiler, som definerer flere frekvensbånd og kanalbredder, vil trolig komme til i løpet av kort tid. I Sør Korea er mobil WiMAX kjent som WiBro. WiBro benytter kanaler på 8.75 MHz og er, som mobil WiMAX, basert på 802.16e-2005. Funksjonaliteten i WiBro tilsvarer det som er definert i mobil WiMAX systemprofilen. WiBro utstyr har vært tilgjengelig i flere år og er et første eksempel på mobil WiMAX som er tatt i kommersiell bruk i stor skala.

## 2.2 Alternative standarder for mobil bredbåndsaksess

### 2.2.1 UMTS High Speed Packet Access

*Universal Mobile Telecommunication System* eller UMTS er et 3. generasjons mobiltelefoni-system der *High-Speed Packet Access* (HSPA) gir større dataoverføringshastighet enn tidligere systemer. HSPA deles i *High-Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) for nedlink og *High-Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) for opplink. UMTS er basert på *Wideband Code Division Multiple Access* (W-CDMA) og er i utgangspunktet definert for opplink 1885-2025 MHz og nedlink 2110-2200 MHz med noen regionale forskjeller.

HSDPA er en del av UMTS standarden fra versjon 5 og nyere. Ytelsen varierer avhengig av modulasjon og koding. QPSK gir opp til 1,8 Mbit/s, mens QAM 16 gir opp til 3.6 Mbit/s. HSDPA støtter opp til 14,4 Mbit/s [8]. HSUPA er opplink i UMTS systemet og kom i UMTS versjon 6 fra 3GPP. HSUPA er definert i flere versjoner med overføringshastigheter fra 0,73 Mbit/s (*Category 1*) til 11,5 Mbit/s (*Category 7*). Selv om ytelsen til HSUPA er mindre enn ytelsen til HSDPA vil innføringen av HSUPA ofte ha stor betydning for systemkapasiteten fordi en god returkanal senker retransmisjonstiden og bedre støtter applikasjoner med behov for en mer symmetrisk overføringskapasitet. En god returkanal gir også bedre muligheter for å justere transmisjonsraten etter kanalkvaliteten [9]. Videre utvikling av UMTS (*Long term evolution*) inkluderer blant annet multipel input multipel output (MIMO) teknologi for ytterligere økning av kapasitet.

### 2.2.2 CDMA-systemer og ICE

Det finnes to mobil bredbåndsteknologier basert på *Code Division Multiple Access* (CDMA) . Den ene er UMTS (med teknisk betegnelse WCDMA), se 2.2.1, som bruker HSPA for å realisere mobil bredbåndsaksess med høy overføringshastighet. Den andre teknologien kalles CDMA2000 og benytter *Evolution-Data Optimized* (EV-DO) som teknologi for mobil bredbåndsoverføring [10].

Nordisk Mobiltelefon Norway AS har fått tildelt 2 frekvensbånd på 4,5 MHz (453-457,5 MHz og 463-467,5 MHz) i Skandinavia og tilbyr tjenesten ICE mobilt bredbånd basert på CDMA2000 [11]. Ved å legge systemet på en så lav frekvens som 450 MHz oppnås potensielt lang rekkevidde og dermed mulighet for færre og større celler enn for konkurrerende systemer som opererer i

høyere frekvensbånd. Den lave frekvensen som benyttes, i forhold til for eksempel UMTS, gir typisk god dekning i tynt befolkede områder. Den lange rekkevidden gjør det imidlertid tilsvarende vanskelig å øke nettets kapasitet med å fortette basestasjonene i byområder. ICE vil fra 15. oktober 2008 benytte versjon 1xEV-DO Revisjon A og dermed tilby en maksimal nedlastningshastighet på opptil 3,1 Mbit/s og en opplastningshastighet på opptil 1,8 Mbit/s pr bæreølge. Det er mulig med opptil 12 bæreølger fra en basestasjon (3 stk 120 graders sektorer med 4 bærere i hver). Praktisk throughput for brukere hevdes å være 450-800 kbit/s i nedlink og 300-400 kbit/s andre veien. Gjennomsnittlig forsinkelse skal være under 50 ms. Revisjon B av 1xEV-DO forventes implementert i 2009. Maks nedlastning pr bærer (1,25 MHz) med revisjon B og QAM 64 vil da være 4,9 Mbit/s i motsetning til 3,1 Mbit/s ved revisjon A. Revisjon B kan tilby opptil 14,7 Mbit/s ved nedlasting ved å bruke fire bærere, det vil si totalt 5 MHz, samtidig. En databruker vil da legge beslag på store deler av kapasiteten til basen.

### 2.2.3 GSM / GPRS / EDGE

*General Packet Radio Service* (GPRS) er en dataoverføringstjeneste for GSM brukere. Dataraten varierer fra 56 kbit/s til 114 kbit/s og brukeren betaler typisk for overført datamengde og ikke pr. tidsenhet. GPRS benytter seg av ledige tidsluker mellom bruker og basestasjon. *Enhanced Data rates for GSM Evolution* (EDGE) er en videreutvikling av GPRS for høyere hastigheter [12]. EDGE benytter mer avanserte kodingsteknikker enn GPRS og kan nå et teoretisk maksimum på 473,6 kbit/s for 8 tidsluker dvs 59,2 kbit/s pr tidsluke. Neste skritt opp er EDGE Evolution med opp til 1 Mbit/s.

### 2.2.4 WiFi-systemer og taktisk bredbånds WLAN (WM / SR600)

WiFi er et varemerke eid av WiFi-Alliance [13]. Dette er et konsortium som leverer interoperable produkter basert på IEEE 802.11 standarder. Alle produkter gjennomgår da en sertifisering med hensyn til interoperabilitet og kan brukes både for kontakt med Internett i et område og for direkte forbindelse mellom enkelt-enheter. Det finnes utstyr både i 2,4 GHz båndet (4 ikke overlappende kanaler) og 5 GHz båndet (8 ikke overlappende kanaler). I Europa brukes 2400-2483,5 MHz båndet og maks utstrålt effekt er 100 mW (20dBm) *Equivalent Isotropically Radiated Power* (EIRP). Begrensningen i EIRP kommer av at systemet benytter et industribånd som deles med andre systemer. Forventet rekkevidde for 802.11b og 802.11g er 32 m innendørs og 95 m utendørs med standard antenne. Med frisikt og direktiv antenne kan en oppnå høyere rekkevidder. Om en opererer i lisensierte bånd kan en i tillegg øke utsendt effekt og dermed oppnå rekkevidder på flere kilometer.

*Taclan* er et kommunikasjonssystem fra Kongsberg Defence and Aerospace (KDA) som inkluderer trådløst TCP/IP (maske-) nettverk basert på IEEE 802.11b standarden [14]. Radioene WM600 og SR600 er spesialtilpasset for bruk i 225-400 MHz båndet i stedet for 2400-2483,5 MHz som WiFi opprinnelig var designet for. To enheter kan brukes som en trådløs TCP/IP nettverksbro. Systemet har innebygd Linux server og settes opp vha. et WEB grensesnitt. Bruken av Linux gjør oppgraderingen av rutingprotokoller enklere ved at en kan bygge videre på freeware. WM600 er en kjøretøysenhet for samband mellom kjøretøyer og mellom kjøretøyer og enkeltsoldater utstyrt med SR600. SR er en soldatradio med mindre sendeeffekt for bruk innad i

lag og tropp. WM600 har en forventet rekkevidde på 30 km ved frisikt. Sendereffekten til WM600 kan varieres fra 10 mW til 5W, mens maksimal uteffekt på SR600 er 1 W. Det skal være mulig med tale-kommunikasjon med opp til 5 samtidige talenett med data rater opp til 2500 kbit/s. Både WM600 og SR600 har mulighet for ad-hoc ruting.

### 2.2.5 IEEE802.22

IEEE 802.22 er et standardiseringsarbeid som så på *Wireless Regional Area Network* eller (WRAN). WRAN er en form for kognitiv radio som skal bruke TV kanaler som er ledig i øyeblikket. Det ble forutsatt at man skal kunne bruke VHF/UHF kanaler mellom 54 og 862 MHz. Oppbyggingen skal være et punkt til multipunkt system hvor brukerterminalene rapporterer til basen om ledige kanaler slik at både base og CPE skal ha best mulig oversikt over hvilke kanaler som er ledig i begge ender av forbindelsen. Systemet bruker OFDMA og skal klare 19 Mbit/s på en 6 MHz kanal over en avstand på 30 km [15]. Denne standardiseringsgruppen i IEEE er ikke lenger aktiv.

I tillegg finnes IEEE 802.20 som er *Mobile Broadband Wireless Access* (MBWA). Dette er et standardiseringsarbeid for å ta fram et mobilt bredbåndssystem som skal klare en datarate på over 1 Mbit/s og gå på frekvenser under 3,5 GHz. Arbeidet har hatt en sterk IP-fokus men har så langt gitt få konkrete resultater [16].

### 2.2.6 DVB-RCT

*Digital Video Broadcasting Return Channel Terrestrial* (DVB-RCT) er som navnet tilsier opprinnelig laget for å tilby returkanal for digital kringkasting for dermed å muliggjøre interaktiv TV og Internett. Systemet er spektrumeffektivt og utnytter ledig kapasitet overalt i TV bånd III, IV og V uten å interferere med kringkastingstjenestene. Det er mulig å lage celler med opptil 65 km radius for moderate bitrater. For celler med radius på 3,5 km kan en realisere bitrater på noen megabit per sekund fra bruker til basestasjon. Kanalen deles opp i mange bærere og med alle i bruk kan basestasjonen samle fra 1 Mbit/s til 30 Mbit/s fra DVB-RCT kanalen. Systemet er adaptivt og kan i stor grad automatisk tilpasse seg forskjellig cellestørrelse ved hjelp av forskjellige modulasjonsteknikker, effektkontroll osv. Systemet er spesielt innrettet for å motta litt data fra mange samtidige brukere. Brukerterminalene har en sendereffekt på 1 W eller mindre [17].

## 3 Feltester Regionfelt Østlandet

Målinger på utstyr anskaffet av TRADOK ble gjennomført i Østerdalen over en periode på én uke, høsten 2007. Målingene ble utført i samarbeid med TRADOK/Utvikling & Eksperimentering, FLO/IKT, Sambandsseksjonen ved Hærens våpenskole og elever fra Forsvaret ingeniørhøgskole (FIH).

Delkapittel 3.1 gir en oversikt over utstyret som ble anskaffet og brukt i målingene. I kapittel 3.2 gis detaljer om oppsett av utstyr og praktisk gjennomføring av målinger. Resultater fra målingene presenteres i kapittel 3.3.

### 3.1 Utstyr

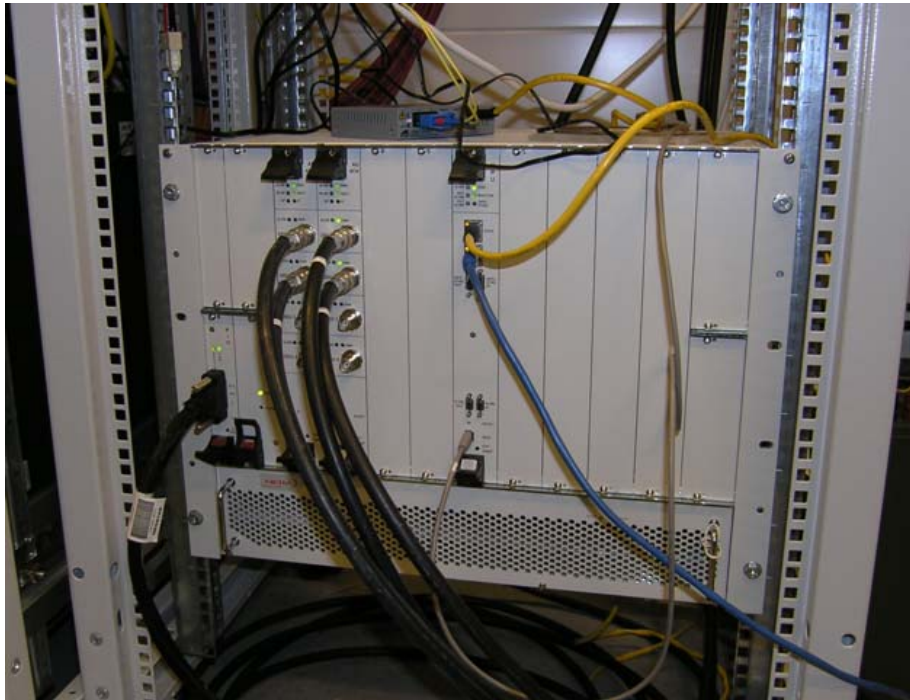
Utstyr til målinger ble anskaffet fra NERA Networks i Bergen. Utstyret er i stor grad produsert av Alvarion og selges fra NERA som WiLink I TDD. Utstyret ble solgt som mobil WiMAX utstyr, selv om det mangler for eksempel støtte for handover. Det fysiske laget er heller ikke basert på SOFDMA, men systemet inneholder en delvis implementering av OFDMA i uplink, og kan defineres som en mellomting mellom stasjonær og mobil WiMAX. I påfølgende delkapitler gis detaljer om henholdsvis basestasjon, brukerterminaler og antenner som er brukt i forbindelse med målingene.

#### 3.1.1 Basestasjon

Basestasjonen som er benyttet er en BreezeMAX TDD basestasjon, produsert av Alvarion [18]. Den består av en innendørsenhet samt en eller flere utendørsenheter og antenner. Innendørs-enheten er basert på compact PCI og kan monteres i 19" utstyrshylle, se Figur 3.1.

Basen er modulær, og har totalt 8 kortplasser. Én av kortplassene er satt av til styringsenheten *Network Processing Unit* (NPU). NPU styrer sentralt nettverk og management. All nyttetraffic av data skjer via Ethernet grensesnittet på dette kortet. Kortet sørger for forbindelse til bakplanet i boksen og dermed til alle tilleggs kortene som trenger forbindelse til andre kort i systemet. Alle sentrale funksjoner som trafikk-klassifisering og synkronisering utføres av NPU.

Syv kortplasser i boksen er satt av til *Access Unit* innendørs enheter (AU-IDU). AU-IDU inneholder medium aksess kontroll (MAC) og modem. Enhetene kontrollerer etablering av forbindelser og administrasjon av båndbredde. Hver AU-IDU kan tilkobles opptil 4 utendørs radioenheter (AU-ODU). Internt i basestasjonen kommuniserer AU-IDU med NPU via bakplanet i boksen. For kommunikasjon mellom AU-IDU og AU-ODU brukes mellomfrekvens (Rx 140 MHz og Tx 240 MHz).



Figur 3.1 BreezeMax TDD modulær basestasjon montert på Tørråsen.

AU-ODU'ene som er brukt kalles også høyeffekts ODU'er. Dette er full duplex *multi-carrier* radioenheter med høy sendeffekt og lavt støytall. ODU har forbindelse til ekstern antenne. Mellom AU-IDU og AU-ODU står også en spesiell *power feeder*. Denne enheten har som oppgave å sørge for transparent overføring av alle signaler mellom AU-IDU og AU-ODU, samtidig som den tilfører likespenning til utendørsenheten for å drive denne. En enhet kan forsyne opptil 4 høyeffekts ODU'er. Ytterligere spesifikasjoner er gitt i Tabell 3.1 og Tabell 3.2. Til dette arbeidet ble det anskaffet 2 AU-IDU og 4 AU-ODU. Konfigurasjon av base kan gjøres via et webgrensesnitt og via Telnet.

Operasjonsmodus	TDD
Kanalbåndbredde	3,5 MHz / 5 MHz
Oppløsning, senterfrekvens	0,125 MHz
Antennetilkobling (AU-ODU)	N-type, 50 Ohm
Frekvenser (AU-ODU)	2300-2360
Maks inngangsnivå ved antenntilkobling, ODU	-60 dBm før metning -8 dBm før ødeleggelse
Utgangseffekt ved antenntilkobling	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 3.1 Tekniske data for base.



Modulasjon & koding	Minimum SNR (dB)	Følsomhet (dBm) @ 3.5 MHz BB	Følsomhet (dBm) @ 5 MHz BB
BPSK 1/2	2.5	-98	-96
QPSK 1/2	5.9	-95	-93
QPSK 3/4	8.6	-92	-89
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 3.2 Følsomhet for base ( $BER 1 \cdot 10^{-6}$ ) for ulike kanalbåndbredder.

Målingene var opprinnelig planlagt gjennomført med to mindre såkalte mikrobaser. På grunn av lang leveringstid ble imidlertid ikke disse brukt i denne runden med målinger. En mikrobasestasjon består av en kompakt innendørsenhet, en mikro IDU, som kun støtter 2 ODU og dermed 2 antenner. Den har 2 separate 100 Mb Ethernet porter for data og administrasjon. Enheten er laget for 19" rack montering og er kun 1 U høy, se Figur 3.2. Den finnes i utgaver for 230 V AC og 48V DC forsyningsspenning.



Figur 3.2 BreezeMax TDD  $\mu$ base.

### 3.1.2 Brukerterminaler

Som brukerterminaler eller CPE ble *WiLink-CPE-ODU-PRO-SE-2.3* brukt. En CPE omtales også ofte som SS (*subscriber station*) i stasjonær WiMAX og MS (*mobile station*) i mobil WiMAX eller som SU (*subscriber unit*). Den består, i likhet med basen, av en innendørsenhet (IDU) og en utendørsenhet (ODU), se Figur 3.3. IDU fungerer som strømforsyning for ODU og tilkoblingspunkt for Ethernet, og finnes både for 220 V AC og 10,5 – 32 V DC. IDU er forbundet med ODU via en kategori 5E kabel, som i tillegg til data overfører 54 V DC-spenning.



Figur 3.3 CPE. Innendørsenhet IDU (høyre) og utendørsenhet ODU (venstre).

CPE'en er basert på Intel's Pro/ Wireless 5116 WiMAX chip, og fås både med intern og ekstern antenne. Varianten som er brukt i målingene (Figur 3.3) har ingen intern antenne, og krever dermed bruk av ekstern antenne. Tabell 3.3 og Tabell 3.4 gir tekniske spesifikasjoner for CPE.

Operasjonsmodus	TDD
Kanalbåndbredde	3,5 MHz / 5 MHz
Oppløsning, senterfrekvens	0,125 MHz
Antennetilkobling (AU-ODU)	N-type, 50 Ohm
Frekvenser (AU-ODU)	2300-2360
Maks inngangsnivå ved antenntilkobling, ODU	-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
	BPSK, QPSK, QAM16, QAM64
FEC	Foldingskoding: 1/2, 2/3,3/4
Effektforbruk (IDU+ODU)	25 W
Effektforbruk (ODU)	16 W

Tabell 3.3 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 3.4 Følsomhet for CPE (BER 1E-6) for ulike kanalbåndbredder.

Enhetene tilbyr, i likhet med basestasjonen et web-grensesnitt og mulighet for Telnet-tilkobling for konfigurering og monitorering av ytelse.

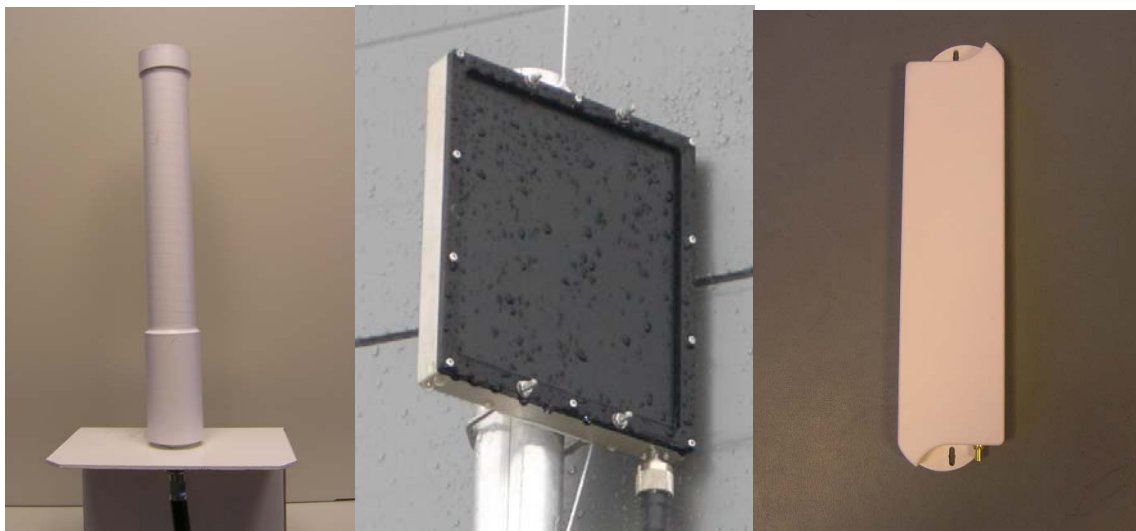
### 3.1.3 Antenner

Som baseantenne ble en vertikal polarisert justerbar sektorantenne benyttet. Sidepanelene på antennen kan justeres for å gi 60, 90, 120 og 160 graders asimut åpningsvinkel. I dette arbeidet ble det valgt et antennediagram for en 90° sektor, noe som gir en antenneforsterkning på 15,5dBi. Dette er en forholdsvis stor antenne, laget for montering på faste installasjoner. Tabell 3.5 presenterer antennens spesifikasjoner.

Frekvensområde	2300 - 2500 MHz
Forsterkning	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 3.5 Spesifikasjoner for sektorantenne.

Tre ulike antenner ble benyttet på CPE. En rundstrålende antenne, en direktiv panelantenne og en direktiv vindusantenne, se Figur 3.4. Alle antennene er relativt små i størrelse. Tabell 3.6 sammenligner spesifikasjoner for de tre antennene.



Figur 3.4 Terminalantenner. Til venstre: rundstrålende (4 dBi). Midt: panelantenne (13 dBi). Høyre: vindusantenne (11,5 dBi).

	Rundstrålende	Panelantenne	Vindusantenne
Frekvensområde	2200 - 2400 MHz	2300 – 2450 MHz	2300 – 2700 MHz
Antenneforsterkning	4 dBi	13 dBi	11,5 dBi
Polarisering	Lineær (vertikal)	Lineær (vertikal)	Lineær (vertikal)
Strålingsbredde	360 ° horisontalt	40 ° horisontalt	70° horisontalt
	40 ° vertikalt	40 ° vertikalt	20° vertikalt
Tilkobling	N-konnektor	N-konnektor	SMA jack

Tabell 3.6 Spesifikasjoner for terminalantenner.

### 3.2 Gjennomføring av målingene

Målingene ble gjennomført i Østerdalen i september 2007. Testnettet bestod av en stasjonær base og et antall brukerterminaler / CPE'er plassert på mobile plattformer. Målingene ble gjort med en makrobase, da mikrobasene, som diskutert tidligere, ikke ble levert i tide til målingene. Basestasjon ble plassert i eksisterende mast på Tørråsen i Regionfelt Østlandet. To sektorer på 90 grader ble satt opp, og antenner ble plassert om lag 12 meter over bakken. Figur 3.5 viser de 4 antennene som ble montert i mast på Tørråsen. Grunnen til at det er 4 antenner er at sektorene ble satt opp med 2. ordens antenndiversitet. Det vil si at hver sektor dekkes av to antenner i stedet for én. Ved mottak benyttes en teknikk kjent som *Maximal-ratio receiver combining* (MRRC) der basen vektet signalene fra de to antennene etter signal-støy-forhold nivå og kombinerer dem i fase. Ved sending kodes signalet ved hjelp av *space-time coding* (STC) og sendes ut på begge antennene. Kanalbandbredden ble satt til 5 MHz.

Antennene på basestasjonen er montert med en vertikal tilt ned på ca 5 grader. Under målingene ble den ene sektoren slått av, slik at det bare var én aktiv sektor med to antenner. De fleste målingene ble gjort med diversitet påslått, men noen målinger ble gjort uten diversitet for å kunne vurdere effekten av diversitet på ytelsen. Ettersom Forsvaret ikke har egne frekvensressurser i aktuelt frekvensområde, ble det inngått avtale med NextGenTel om lån av frekvenser i testperioden. Et bånd på 10 MHz fra 2301 til 2311 MHz ble lånt inn.



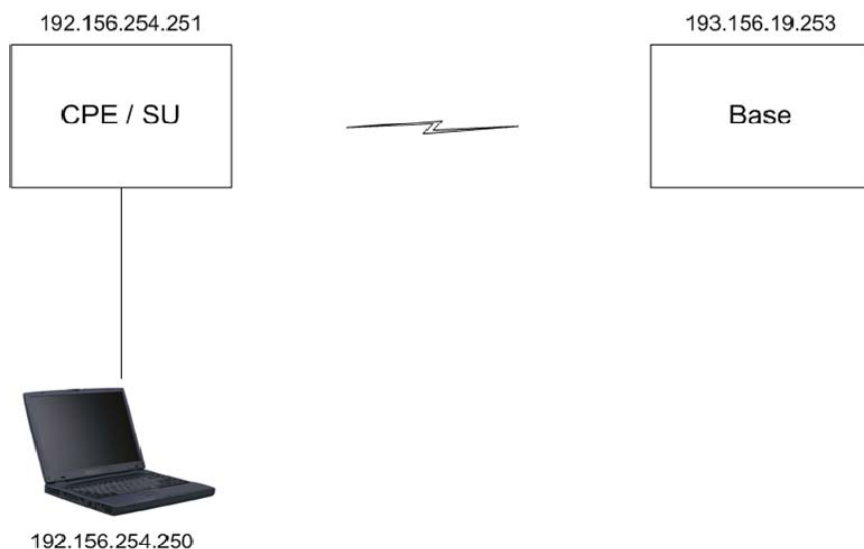
Figur 3.5 Sektorantenner montert i mast på Tørråsen i regionfelt Østlandet.

Målingene som ble foretatt kan deles opp i to hovedtyper. De to målingstypene, logging av kvalitetsindikatorer fra lokal CPE og ytelsesmålinger med kunstig trafikkpåtrykk, beskrives i 3.2.1.

### 3.2.1 Målemetoder

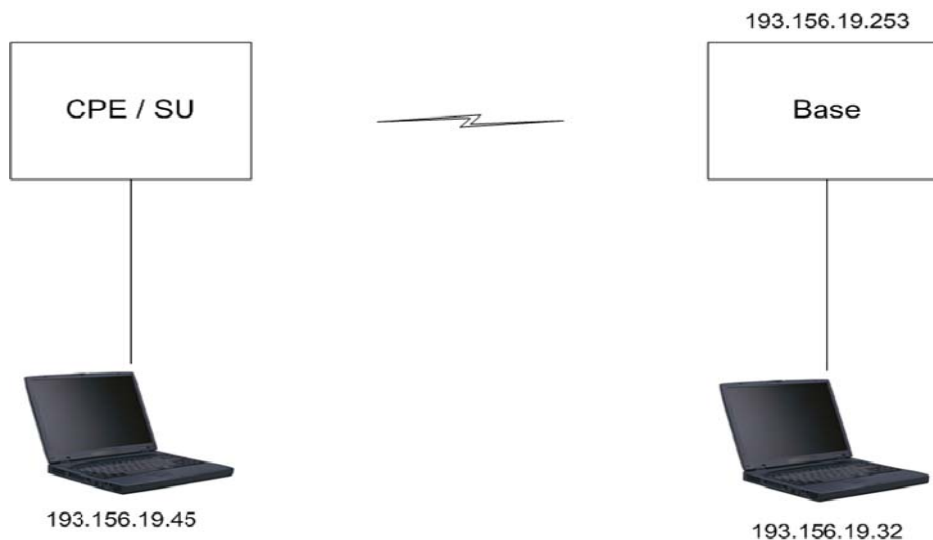
Script skrevet i Python ble brukt for å automatisere målingene. Dette innebar at målinger kunne styres og kjøres i sin helhet fra brukerterminaler plassert i kjøretøy. Scriptene er skrevet i høynivåspråket Python, og er basert på script Telenor R&I tidligere har brukt i sine målinger. Scriptene bruker applikasjonsprotokollen Telnet for å koble seg til CPE og server ved basestasjonen, og dermed starte aktuelle testsript i begge ender. For å kunne entydig koble måleresultater mot korrekt måleposisjon ble GPS mottakere integrert i scriptene, og aktuelle posisjonskoordinater ble lagret sammen med resultater. Målinger ble primært gjort stasjonært i posisjon. Det vil si at CPE (og antenne) ikke beveget seg under målingene.

Gjennom å koble en PC til CPE'ens innendørsenhet, kan en rekke parametre leses ut. Disse parametrene eller kvalitetsindikatorerne inkluderer *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), signal-støy-forhold (SNR) samt modulasjon og koding for nedlasting. For opplasting kan RSSI, SNR, sendereffekt samt modulasjon og koding leses ut. CPE'ene tilbyr både et webgrensesnitt og en mulighet for tilkobling via Telnet som er brukt i dette arbeidet. Figur 3.6 viser en overordnet skisse av dette oppsettet.



Figur 3.6 Blokkdiagram. Logging av kvalitetsindikatorer fra CPE.

De ulike kvalitetsindikatorerne oppdateres i CPE omtrent en gang per sekund og under målingene ble sekvenser á 60 sekunder, det vil si om lag 60 verdier, logget. Ved å legge på et trafikkpåtrykk på nettet kan throughput / overføringshastighet måles. En slik måling forutsetter et oppsett som indikert i Figur 3.7 med en terminal (server) på basesiden av nettet og en terminal (klient) på brukersiden.



Figur 3.7 Blokkdiagram. Måling av throughput.

Standard Linux og Microsoft Windows PC'er ble brukt som henholdsvis server og klient. I dette arbeidet ble ulike trafikktyper brukt. MGEN (*Multi-Generator*)[19] ble brukt til å generere UDP (*User Datagram Protocol*) trafikk mens FTP (*File Transfer Protocol*) filoverføring ble brukt som TCP (*Transmission Control Protocol*) trafikk. MGEN sender pakker med ønsket størrelse og hyppighet fra serveren til klienten. I hver posisjon ble MGEN satt til å sende 750 pakker a 1000 Byte i sekundet, noe som tilsvarer en påtrykt datarate på 6 Mbit/s. Streamingen pågikk i 200 sekunder. Med FTP ble både filnedlasting og filopplasting gjennomført i hver posisjon. Størrelsen på filene ble variert etter antatt tilgjengelig opp- / nedlastingshastighet i hver enkelt posisjon.

Transportprotokollene UDP og TCP er basert på grunnleggende ulike prinsipper. TCP er forbindelsesorientert og inneholder mekanismer for å unngå / håndtere metning i nettet samt sikre pålitelig levering av pakker. TCP brukes til for eksempel epost, www og FTP filoverføring. UDP, derimot, er forbindelsesløs og gir ingen garantier for om pakkene kommer fram eller i hvilken rekkefølge. Det finnes heller ingen mekanismer for å unngå metning. Fordelen med UDP er at den introduserer lite overhead, og den brukes gjerne av sanntidstrafikk som multimediestreaming som heller ønsker lav kompleksitet og forsinkelse enn TCP's pålitelige leveringsmekanismer.

### 3.2.2 Testplattformer

Som diskutert tidligere var basens posisjon konstant for alle målingene. CPE'ene ble derimot flyttet rundt. Det ble benyttet tre ulike testplattformer. Flest målinger ble gjort med hovedplattformen, som vises i Figur 3.8.





*Figur 3.8 Testplattform. Personbil med antenner montert på tak.*

Her var antenner og CPE fastmontert på kjøretøy. Dette muliggjorde svært korte opphold i hver posisjon ettersom ingen deployering var påkrevd. Begge målingstypene (Figur 3.6 og Figur 3.7) ble utført i alle posisjoner, og alle målinger ble gjort med både rundstrålende antenne og direktiv panelantenne (3.1.3). Figur 3.9 viser hvordan antennene var plassert på taket av kjøretøyet.



*Figur 3.9 Antenneplassering på kjøretøy.*



De aller fleste målingene ble foretatt stasjonært i posisjon, selv om denne plattformen også muliggjorde mobile målinger. For å skaffe et større antall datapunkter ble i tillegg en annen kjøretøysplattform tatt i bruk. På dette kjøretøyet var ikke antenner og CPE fastmontert, noe som gjorde at utstyr måtte kobles opp i hver posisjon før målinger kunne starte, se Figur 3.10.



*Figur 3.10 Alternativ testplattform. Antenner er ikke fastmontert på kjøretøy og må settes opp på føtter i hver posisjon.*

I tillegg til en rundstrålende antenne, tilsvarende den som ble brukt på hovedplattformen, ble det på denne plattformen brukt en direktiv vindusantenne, som beskrevet i 3.1.3. For ikke å interferere med målinger på hovedplattformen ble ikke målinger som krever trafikkpåtrykk gjort på denne plattformen. I tillegg til de to kjøretøybaserte plattformene ble også en enkeltmannsvariant konstruert, se Figur 3.11.



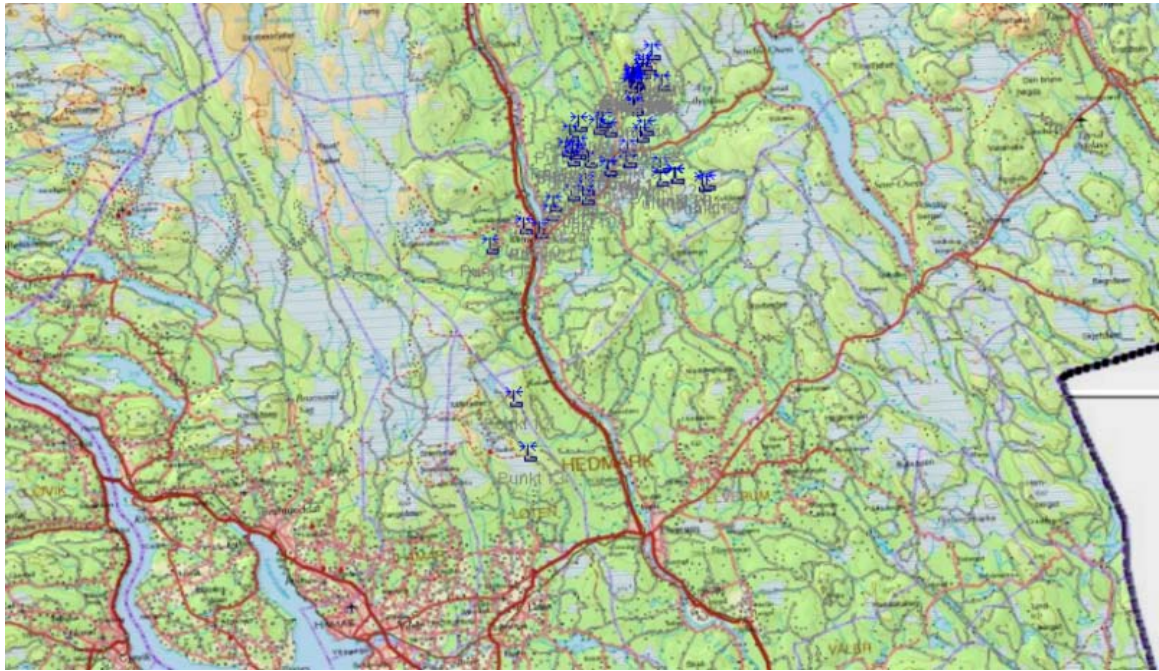
*Figur 3.11 Testplattform - enkeltmann. Strømforsyning, CPE og antenne.*

Denne testplattformen bestod av en batteripakke, som sammen med CPE og antenne ble plassert i en sekk. Hensikten med dette var å frigjøre seg fra kjøretøyene og dermed kunne bevege seg bort fra veiene og inn i skogen. Testene ble gjort 1-2 km fra basen, og bestod i å gå 50-100 meter inn i tett barskog og gjøre målinger der. Disse posisjonene er ikke fullverdige måleposisjoner i den forstand at bare en delmengde av alle testene beskrevet i 3.2.1 ble gjennomført i hvert punkt. Det begrensede antall målinger som ble gjort med denne plattformen skyldes begrenset batterilevetid og begrensninger på tid tilgjengelig for disse målingene. Det vil være aktuelt med flere målinger av denne typen når deployerbare mikrobaser er klare til bruk.

### 3.2.3 Øvelsesområde

Målingene er gjort i Hedmark fylke, hovedsaklig i Åmot kommune. I Figur 3.12 er samtlige målepunkter tegnet inn. Målepunktet som ligger i lengst avstand fra basen ligger 38 km i luftlinje fra basen i Løten kommune.





Figur 3.12 Øvelsesområde. Måleposisjoner er markert med blå symboler.

Alle målingene er gjort med basestasjon plassert på Tørråsen i Regionfelt Østlandet. Under målingene ble det brukt én enkelt 90 graders sektor med diversitet. Antennene ble satt opp til å peke 170 grader, det vil si sørover fra Tørråsen. Figur 3.13 viser et utsnitt fra Figur 3.12. På kartet er basens posisjon indikert sammen med Rena Leir, Rødsmoen øvingsområde og Regionfelt Østlandet.



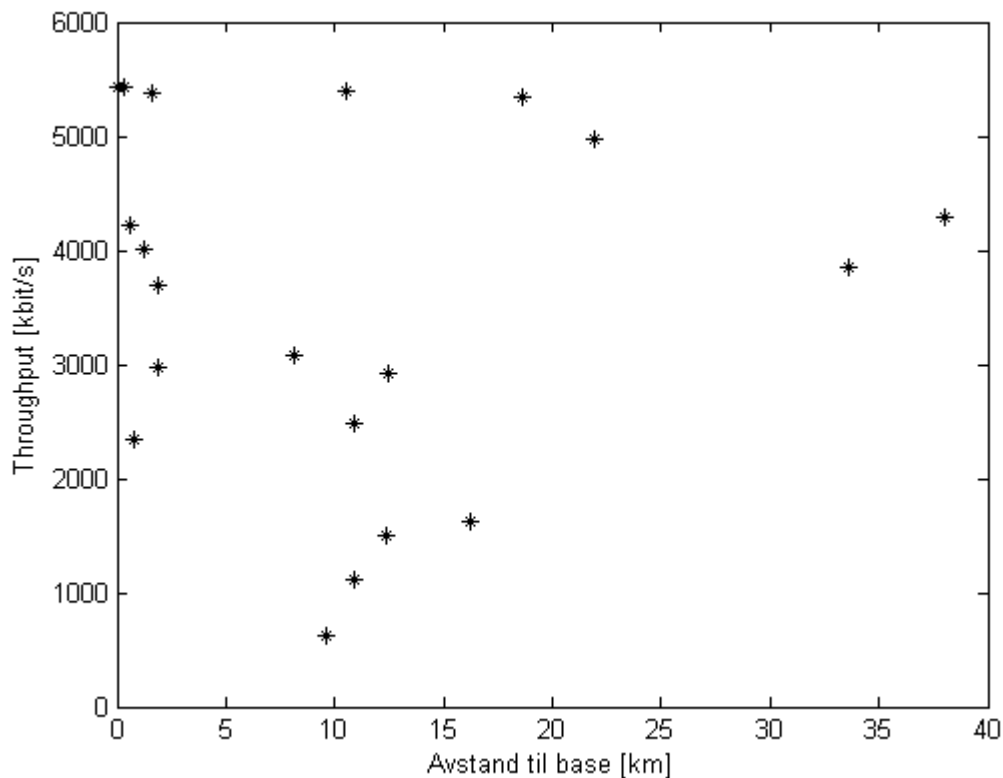
Figur 3.13 Øvelsesområde. Basestasjon plassert på Tørråsen. De fleste måleposisjoner er innenfor eller i nærheten av Regionfelt Østlandet og Rødsmoen.

### 3.3 Resultater

I dette kapittelet presenteres de viktigste resultatene fra utførte målinger. Alle målinger er gjort med 2. ordens antennerdiversitet, hvis ikke annet er oppgitt. Maksimal celleradius er satt til 20 km (defaultverdi), unntatt for målingene som er gjort på 33,6 og 38 km fra basen der den måtte økes for å få kontakt mellom CPE'er og basestasjon. Den ble da satt til 40 km. Dette påvirker ikke basens sendeeffekt, men øker maks tillatte tidsforsinkelse mellom base og CPE.

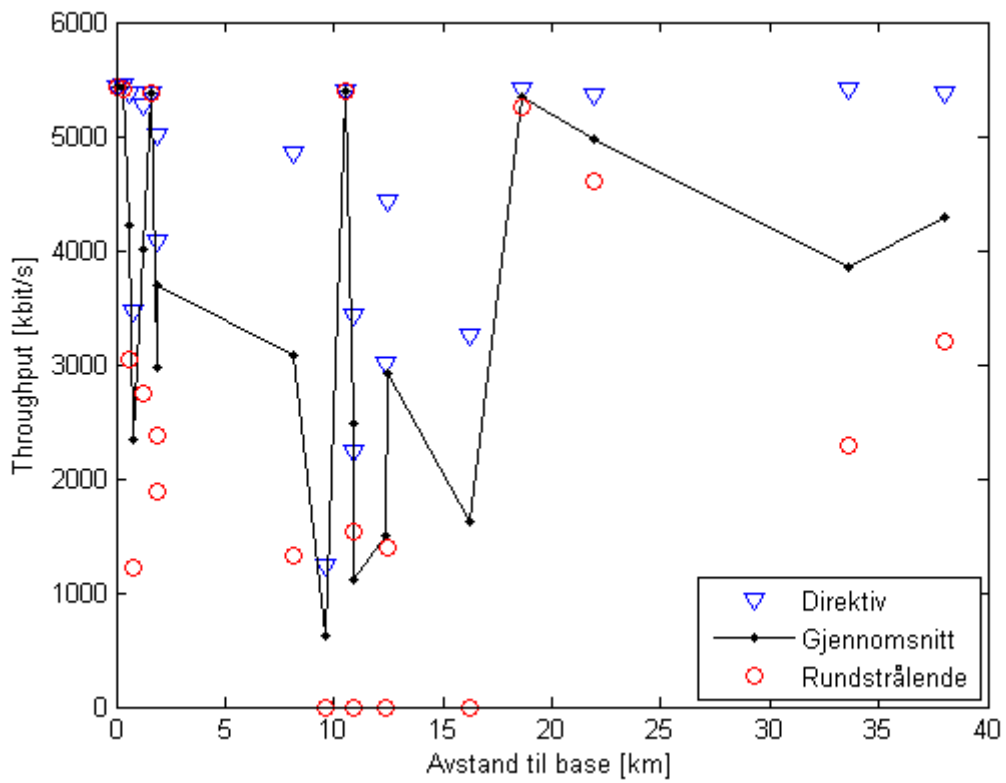
#### 3.3.1 Throughput

Med throughput mener vi her overført datamengde per tidsenhet på applikasjonsnivå. Throughputmålinger ble kun gjort på den primære testplattformen. Figur 3.14 viser gjennomsnittlig nedlastingshastighet for de totalt 20 målepunktene hvor komplette målinger ble gjort, sortert og plassert etter avstand til base. I disse punktene ble det gjort opp- og nedlasting av en fil ved hjelp av FTP og streaming av UDP trafikk fra server til brukerterminal, som beskrevet i 3.2.1.

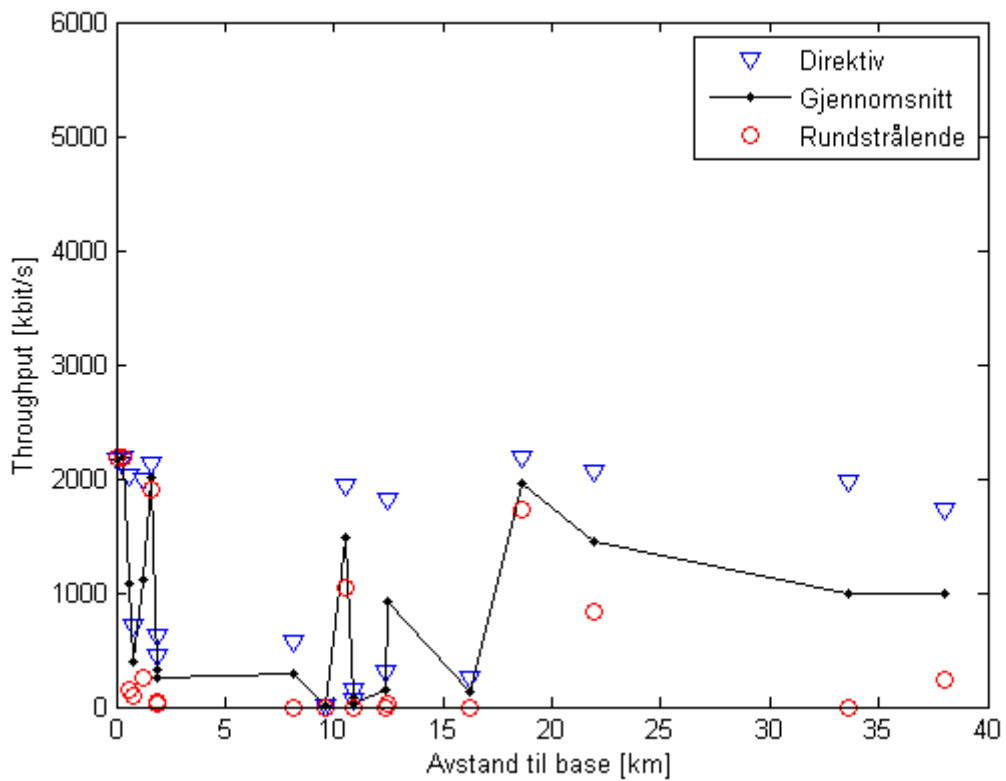


Figur 3.14 Målte nedlastingshastigheter. Viste verdier er midlet over begge antennetyper (rundstrålende og direktiv) og begge trafikktyper (FTP og UDP).

Vi ser at maksimal nedlastingshastighet for dette systemet med gitt oppsett av basestasjon er 5,4 Mbit/s og at hastigheter på over 4 Mbit/s er målt hele 38 km fra basen. Det er ikke mulig å se noen entydig sammenheng mellom overføringshastighet og avstand til base ut av Figur 3.14. I Figur 3.15 og Figur 3.16 presenteres henholdsvis nedlastings- og opplastingsresultatene for de to antennetyperne separat, sammen med gjennomsnittlig verdi. Målepunktene er igjen sortert etter avstand fra base.

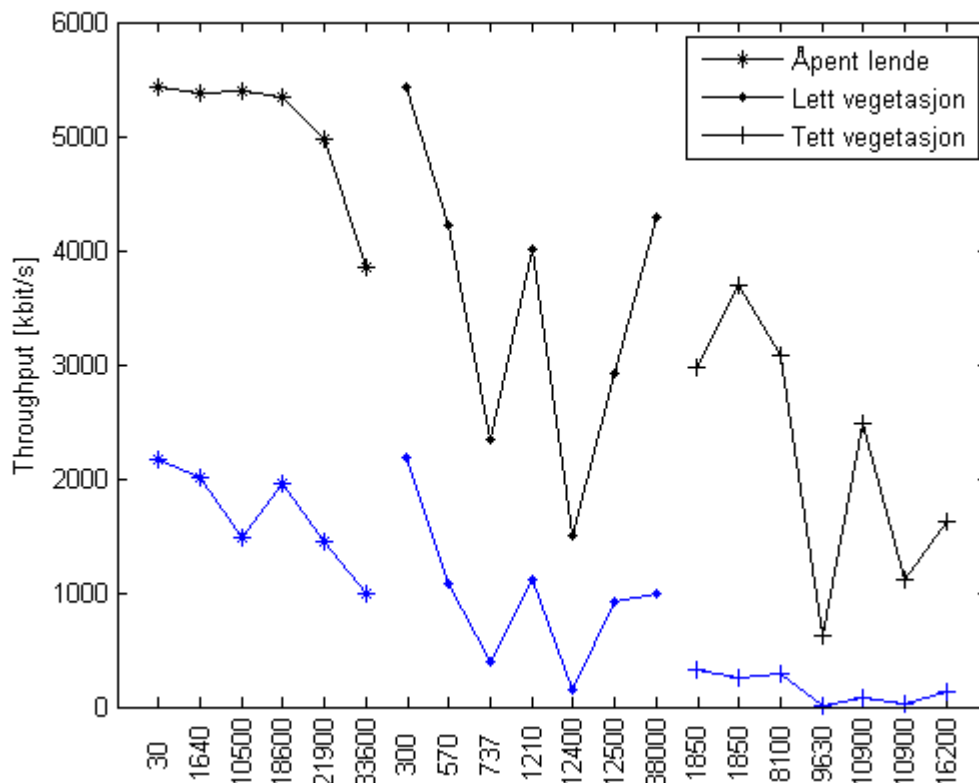


Figur 3.15 Målte nedlastingshastigheter for ulike antenner, samt gjennomsnittlig verdi.



Figur 3.16 Målte opplastingshastigheter for ulike antenner, samt gjennomsnittlig verdi.

Noen punkter i Figur 3.15 og Figur 3.16 viser overføringsrater lik null. Dette er måleposisjoner hvor man kun fikk kontakt med base med direktiv antenne på CPE. Vi ser at ved å velge den direkte antennen oppnås vesentlig høyere rater i mange målepunkter. I snitt gir den direkte antennen om lag 70 % høyere nedlastingshastighet enn den rundstrålende. For opplasting er valget mellom direktiv og rundstrålende antenne valget mellom brukbart og ikke brukbart i flere posisjoner. Mens man med den rundstrålende antennen ikke klarte å få kontakt med basen i det hele tatt, oppnår man i enkelte posisjoner hastigheter på flere hundre kbit/s. I snitt bedres opplastingshastigheten med over 100 % ved bruk av direktiv antenne. En annen interessant observasjon er at dataraten for opplasting, det vil si fra CPE til base, er langt lavere enn for nedlasting. Mens maksimal oppnådd hastighet ned er 5,4 Mbit/s er tilsvarende for opplasting bare 2,2 Mbit/s. I utgangspunktet skulle maks opplastingshastighet vært tilnærmet lik maks nedlastingshastighet, da basen var satt opp til å dele kanalen likt mellom base og CPE. Det ble rettet en rekke forespørsler til leverandør om dette fenomenet, men det lyktes ikke å få noen forklaring innen forsøkene ble avsluttet. Etter avsluttede målinger presenterte leverandør et oppsett av basestasjon som trolig ville gitt tilnærmet symmetrisk kanal.



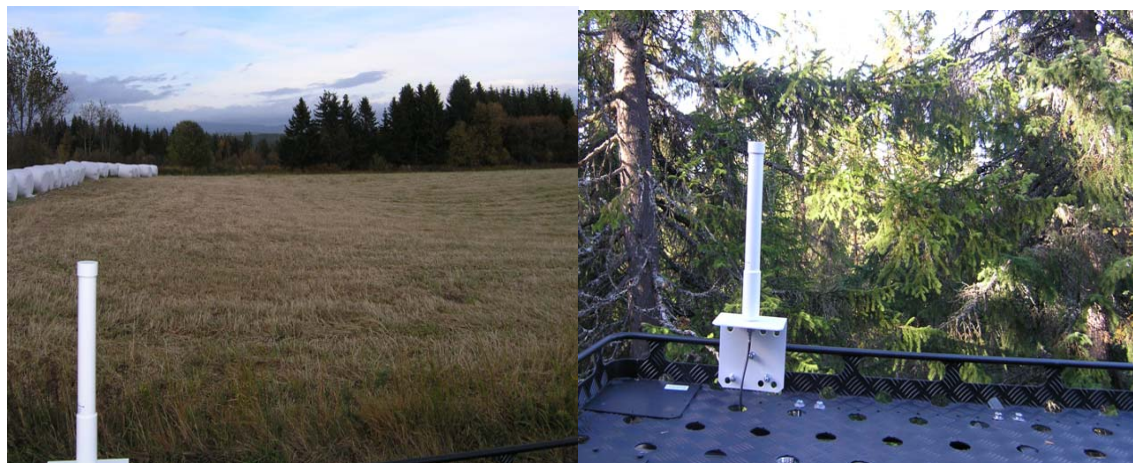
Figur 3.17 Måleposisjoner gruppert etter vegetasjon mot base. Til venstre posisjoner med åpent lende mot base, i midten posisjoner med lett vegetasjon mot base og til høyre posisjoner med tett vegetasjon i retning basestasjon. Figuren viser nedlastingshastigheter (svart) og opplastingshastigheter (blått).

Som tidligere kommentert kan man ikke umiddelbart lese en klar avstandsavhengighet ut av Figur 3.14. Dette tyder på at det er flere faktorer som påvirker systemets ytelse. I Figur 3.17 er



måleposisjonene gruppert etter vegetasjonstetthet. Måleposisjonene er delt i tre ulike kategorier; posisjoner med tett barskog i retning mot basestasjonen, posisjoner med lett skog / vegetasjon og posisjoner med åpent eller tilnærmet åpent lende mot base.

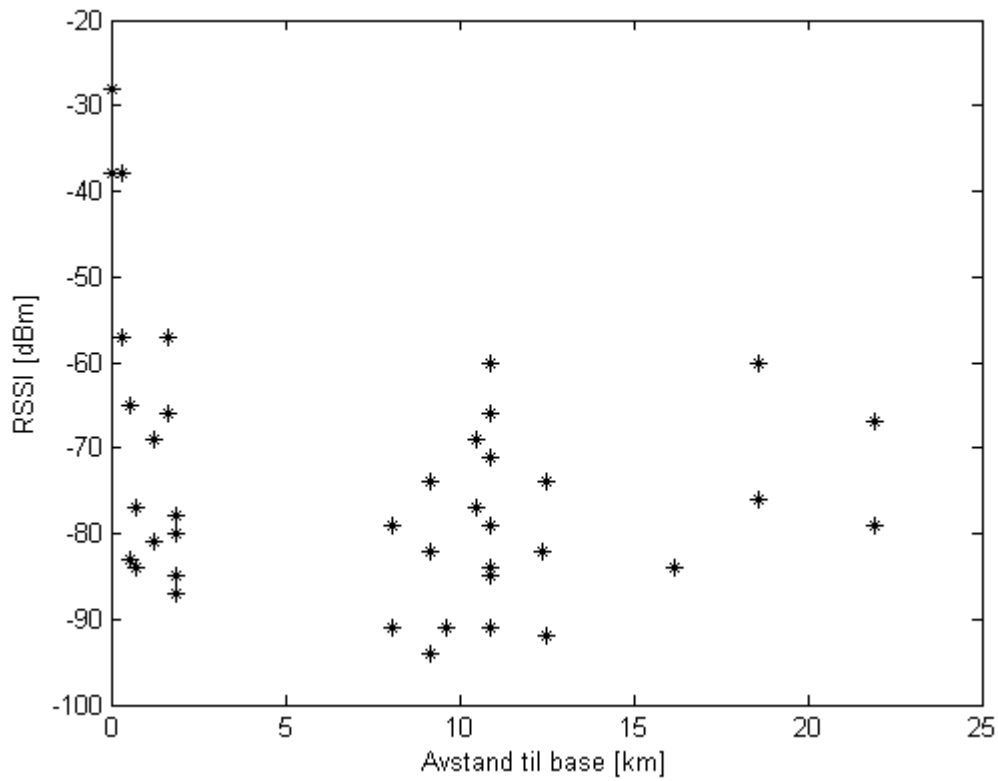
Det er tydelig ut fra Figur 3.17 at systemets ytelse svekkes med økende vegetasjonstetthet. Samtlige posisjoner med åpent lende og optisk fri sikt gir svært gode nedlastingshastigheter. I posisjonene med lett vegetasjon (og tildels posisjonene med tett barskog) er det større variasjoner i ytelsen. Dette skyldes trolig i stor grad at det er variabel ”tykkelse” på vegetasjonsområdet mellom base og CPE mellom de ulike måleposisjonene. Alle målinger er gjort med høytliggende basestasjon, og signalpropagasjonen vil i de fleste tilfeller gå størstedelen av distansen i fritt-rom og kun de siste titallsmeterne gjennom vegetasjon. Klassifisering av vegetasjonen i de ulike måleposisjonene er også til en viss grad subjektiv. Figur 3.18 viser to eksempler på ulike vegetasjonstyper.



*Figur 3.18 Eksempel på ulike vegetasjonstyper. Venstre: Åpent lende mot base, 18,6 km fra base, nedlastingshastighet 5,4 Mbit/s. Høyre: Tett barskog foran antenne, 10,9 km fra base, nedlastingshastighet 900 kbit/s.*

### 3.3.2 Signalstyrke RSSI

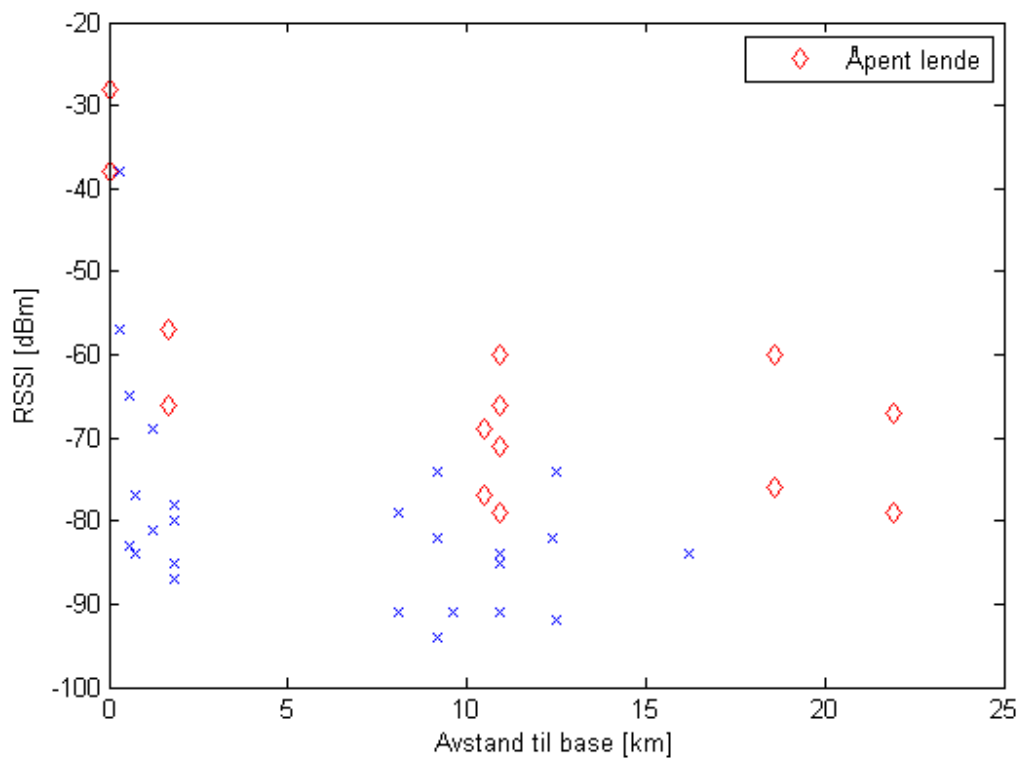
Utstyret (CPE'ene) rapporterte til enhver tid aktuelle RSSI verdier, i dBm, både for ned- og opplink. Figur 3.19 viser mottatt signalstyrke som funksjon av avstand mellom måleposisjon og basestasjon for nedlink. Kun posisjoner hvor det faktisk er registrert signalstyrke på CPE er tatt med.



Figur 3.19 Mottatt signalstyrke (RSSI) som funksjon av avstand til base.

Som diskutert i 3.3.1 er det stor forskjell på ytelsen avhengig av vegetasjon. I Figur 3.20 er måleposisjonene med åpent lende mot base markert i rødt. I hver posisjon er det ett eller to datapunkter, avhengig av om det ble registrert signal på begge antenner eller bare en.





Figur 3.20 Mottatt signalstyrke (RSSI) som funksjon av avstand fra base. Posisjoner med åpent lende mot base er markert i rødt. Øvrige posisjoner (lett og tett vegetasjon) er markert i blått.

Figur 3.20 viser igjen at det er avhengighet mellom vegetasjonstype og ytelse. Videre plukker vi ut kun posisjonene med åpent lende og sammenligner med teoretiske beregninger. Signalnivåer framkommer da av følgende linkbudsjett:

$$P_r = P_t + G_t + L + G_r \quad [\text{dB}] \quad (3.1)$$

Der

- $P_r$  er mottatt signaleffekt (dBm)
- $P_t$  er utsendt signaleffekt (dBm)
- $G_t$  er antenneforsterkning sender (dBi)
- $L$  er kanaltap (dB)
- $G_r$  er antenneforsterkning mottaker (dBi)

For sendediversitet vil utsendt signaleffekt  $P_t$  i praksis dobles da hver antenne har en egen effektførsterker. I tillegg til linkbudsjettet vil vi ved diversitet få et eget diversitetsgain som beskriver forskjellen i kravet til mottatt signal-til-støyforhold ved en gitt bitfeilhyppighet mellom en diversitetsløsning og en løsning uten diversitet.

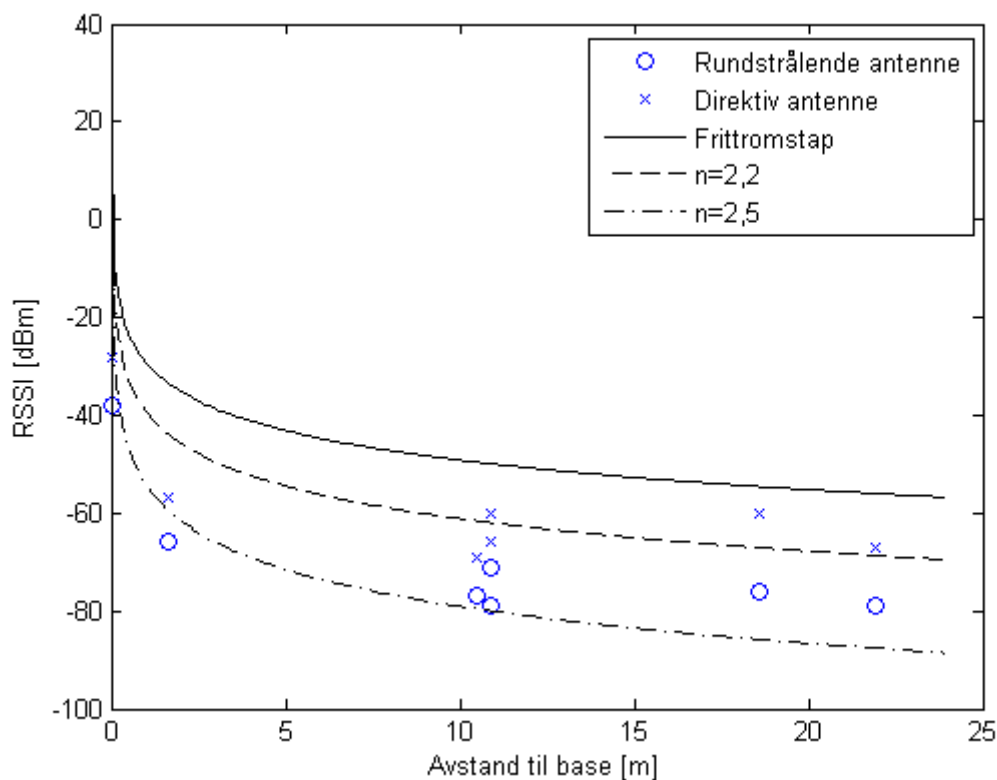
Strekningstapet  $L$  beregnes som  $L = 10 \log_{10}(\lambda/4\pi d)^n$ , hvor  $n=2$  tilsvarer frittromstapet. Dette linkbudsjettet tar i utgangspunktet ikke hensyn til antennerdiversitet på basestasjonen.

I de fleste målingene ble det benyttet to antenner på basen samt Alamouti rom-tid blokk koding av det utsendte signalet. Det faktiske diversitetsgainet avhenger av både bitfeilsannsynligheten, valgt modulasjon og koding samt korrelasjon mellom diversitetskanalene. Teoretiske resultater i [5] indikerer et diversitetsgain i korrelerte kanaler mindre eller lik 2 dB. Det antas at diversitetsgainet kommer i tillegg til dobblingen i utsendt effekt (3 dB). En økning i nedlink RSSI på 1,4 dB er rapportert i [20] basert på feltprøver for 2. ordens polarisasjonsdiversitet.

Mottatt signal i de to antennene kombineres ved hjelp av maksimal forholdskombinering. Det faktiske diversitetsgainet avhenger, som for sendediversitet, av både bitfeilsannsynligheten, valgt modulasjon og koding samt korrelasjon mellom kanalene. Teoretiske resultater rapportert i [5] indikerer en forbedring i mottatt signal-til-støyforhold fra terminalene på minst 3 dB.

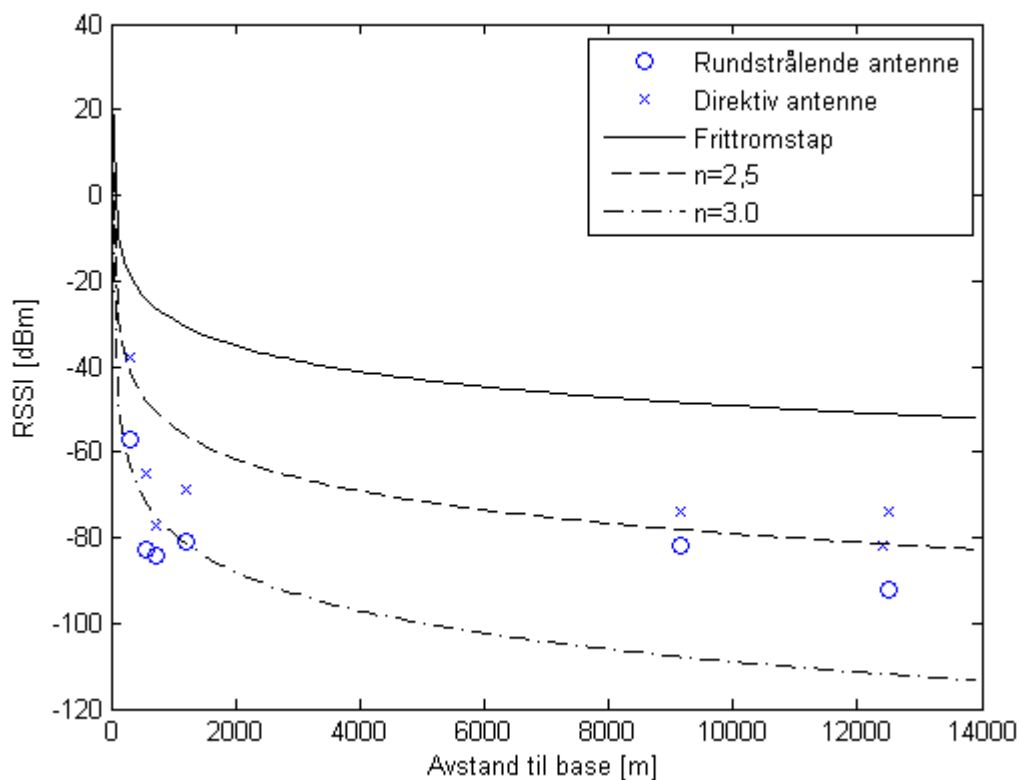
For å undersøke virkningen av diversitet ble målinger utført også uten diversitet, det vil si med kun én antenne på basesiden. På grunn av tidsbegrensninger ble imidlertid slike målinger kun gjennomført i to posisjoner med to ulike antenner. Antallet datapunkter blir dermed for lavt til å konkludere entydig rundt virkningen av diversitet. I målepunktene ble det registrert at bruk av 2. ordens diversitet ga en gjennomsnittlig bedring i mottatt signalstyrke (RSSI) på 6 og 4 dB for henholdsvis ned- og opplasting. Ved å trekke fra økningen i utsendt effekt (3 dB) indikerer disse resultatene et diversitetsgain på henholdsvis 3 og 1 dB for ned- og opplasting, og avviker dermed noe fra [20] og [5]. Basestasjonen benyttet i våre forsøk er trolig lik den som ble benyttet i feltforsøkene rapportert i [20] og rapporterer dermed opplink RSSI kun for den antennen med best RSSI, altså en form for valg diversitet som ikke benyttes av basestasjonen.

I Figur 3.21 vises posisjonene med åpent lende sammen med teoretisk beregnede signalnivåer. Beregningene er gjort med direktiv terminalantenne med effektførsterkere for hver av de to antennene på basestasjonen.



Figur 3.21 Nedlink RSSI som funksjon av avstand for direktiv og rundstrålende terminalantenne, frisikt. Heltrukken linje viser beregnet mottatt effekt ved frittromstap ( $n=2$ ) mens stiplede linjer viser beregnet nedlink signalnivå ved  $n = 2,2$  og  $n = 2,5$ .

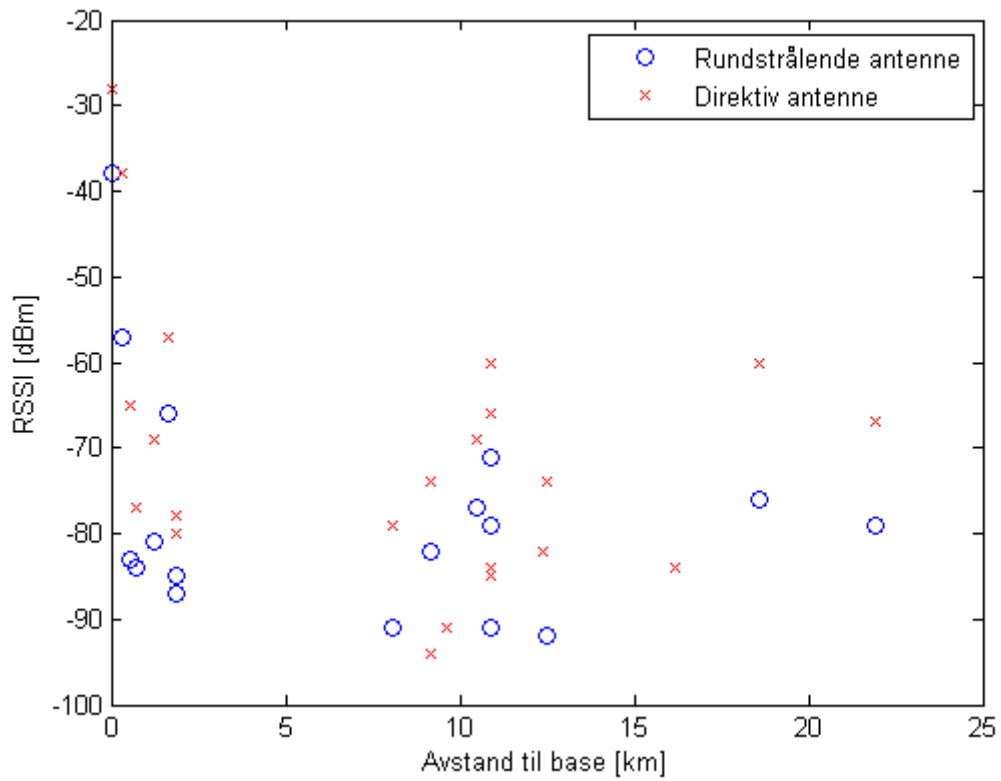
Sammenligningen med de teoretiske kurvene tyder på at en eksponent  $n$  med verdi på omlag 2,5 relativt godt beskriver forventet mottatt RSSI som funksjon av avstand ved frisikt og åpent lende. Tilsvarende viser Figur 3.22 RSSI som funksjon av avstand til base for posisjoner med lett vegetasjon foran CPE som skygger for basestasjonen. I dette tilfellet synes en eksponent  $n$  på omtrent 3 å beskrive forholdene relativt godt.



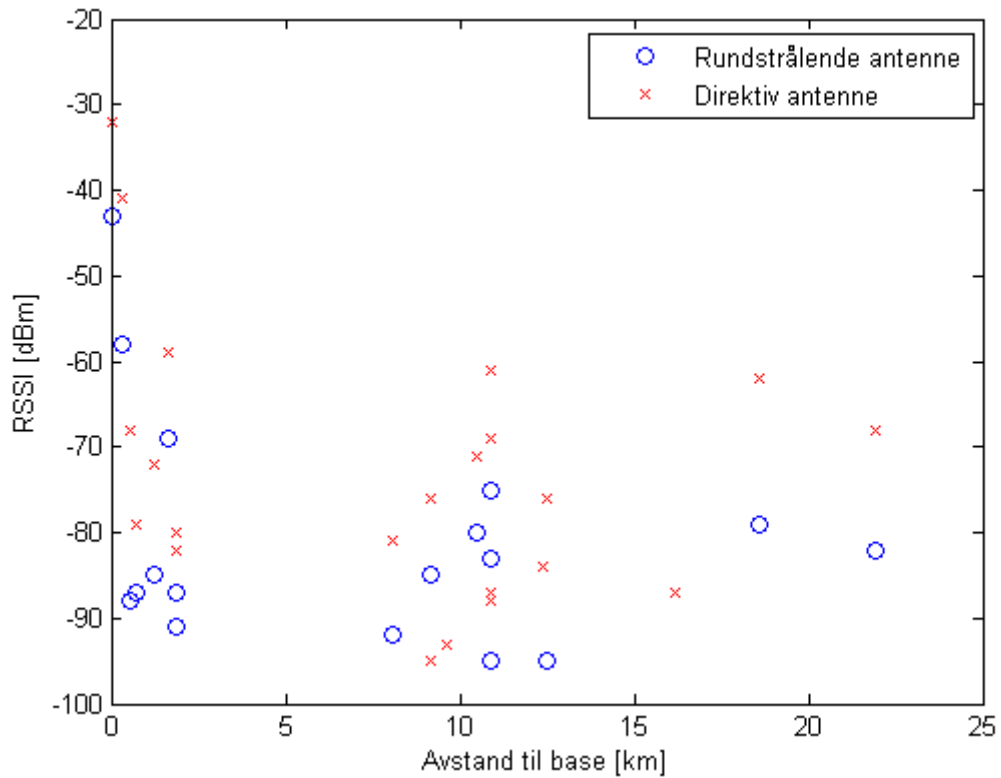
Figur 3.22 Nedlink RSSI som funksjon av avstand for direktiv og rundstrålede terminalantenne, vegetasjon. Heltrukket linje viser beregnet mottatt effekt ved frittromstap mens stiplede linjer viser beregnet nedlink signalnivå ved  $n = 2,5$  og  $3,0$ .

### 3.3.3 Terminalantenner

Som beskrevet i 3.1.3 er det oppgitt en forskjell på 9 dB i terminalantennenes forsterkning. I de måleposisjoner hvor det ble registrert signalstyrke med begge antenneyper var gjennomsnittlig forskjell i registrert signalstyrke 7,4 dB for nedlink og 5 dB for opplink. Variasjonene er imidlertid ganske store fra punkt til punkt, som vist i Figur 3.23 og Figur 3.24. I nedlink vil den rundstrålede antennen i større grad motta flerveiskomponenter fra andre retninger enn basestasjonen, noe som resulterer i konstruktiv interferens fra reflektorer i nærheten av brukerterminalen. Det er derfor rimelig å anta at forskjellen i nedlink antennegain i praksis reduseres noe. Ettersom det i opplink er brukt ATPC er verdiene i Figur 3.24 normalisert ved å addere eventuell differanse mellom uteffekt og maksimal uteffekt. I opplink kan den relativt begrensede RSSI forskjellen for direktiv og rundstrålede antenne muligens skyldes flerveis-utbredelse. Basestasjonen har vide (90 grader) antenner som kan motta terrengrefleksjoner. Direktive antenner på CPE vil i mindre grad sende ut signaler mot mulige reflektorer synlige fra basestasjonen, og være mer avhengig av fri sikt (Fresnel klaring) mellom terminal og basestasjon.



Figur 3.23 Nedlink RSSI for ulike antenner.

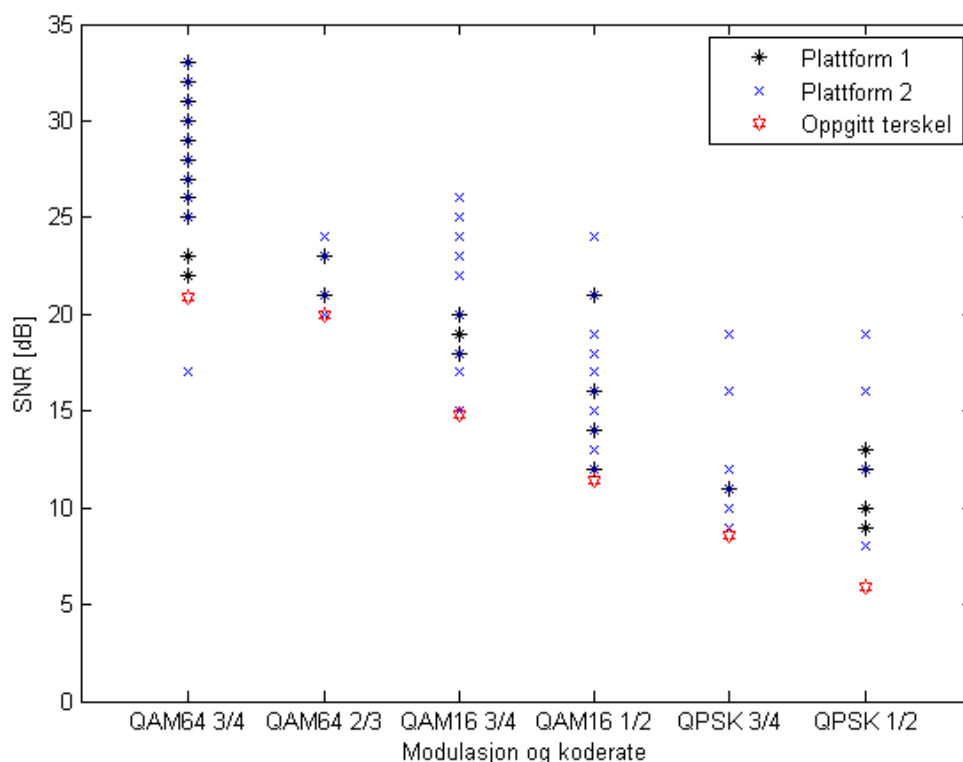


Figur 3.24 Opplink RSSI for ulike antenner.

På den alternative testplattformen ble den samme rundstrålende antennen testet sammen med en direktiv vindusantenne, som beskrevet i 3.1.3. På samme måte som beskrevet over, indikerte disse testene mindre gjennomsnittlig forskjell i mottatt signalstyrke mellom antennene enn oppgitt antennegain. Det ble observert relativt stor variasjon i mottatt RSSI ved forflytning av terminalantenne på noen få meter. I praksis vil dette kunne benyttes av brukeren til å optimalisere forbindelsen.

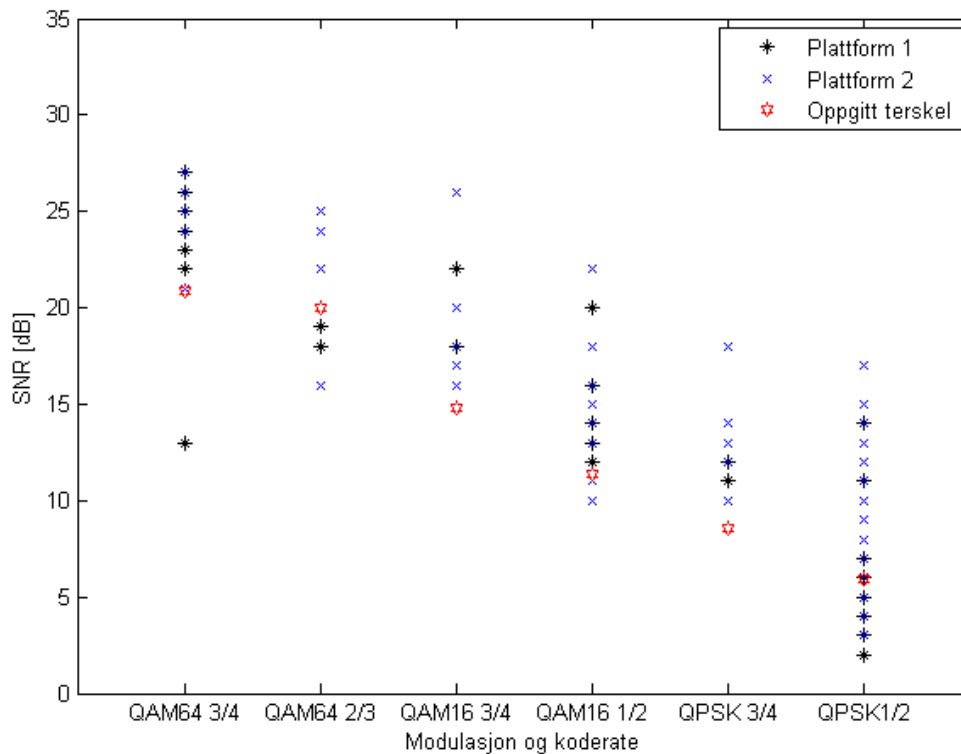
### 3.3.4 Adaptiv modulasjon og koding

Systemet bruker kunnskap om aktuelt signal-støy-forhold samt trafikkhistorie til å velge modulasjon og koderate. Figur 3.25 og Figur 3.26 viser for hvilke signal-støy-forhold de ulike kombinasjonene av modulasjon og koderater ble brukt under målingene, for henholdsvis ned- og opplasting. Figurene viser registrerte verdier samt oppgitte terskelverdier.



Figur 3.25 Registrerte kombinasjoner av modulasjon, koderate og signal-støy-forhold for nedlink Målepunkter fra begge plattformer, samt oppgitte terskelverdier er inkludert.

Registrerte modulasjonsformer og koderater virker å harmonere bra med de oppgitte tersklene. Med unntak av ett datapunkt (outlier) viser Figur 3.25 at man minst må ha det oppgitte signal-støy-forholdet for å oppnå en viss modulasjonsform, men at valget i tillegg avhenger av trafikkhistorie. Detaljer omkring hvordan trafikkhistorien brukes er ikke kjent.

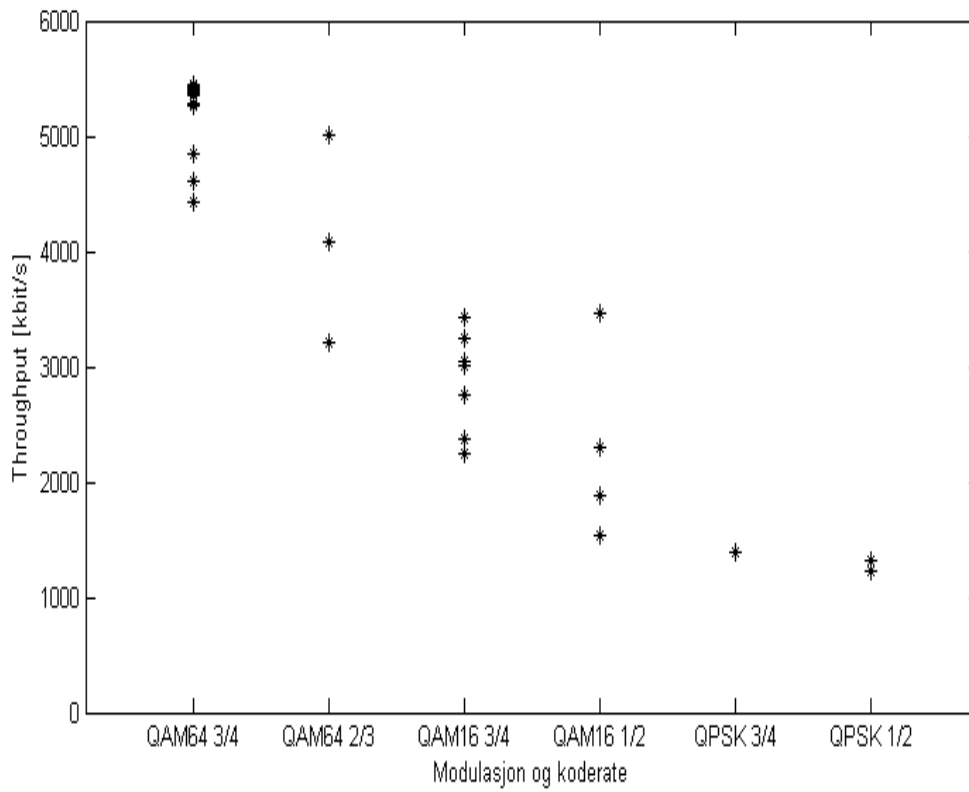


Figur 3.26 Kombinasjoner av modulasjon, koderate og signal-støy-forhold for opplink.

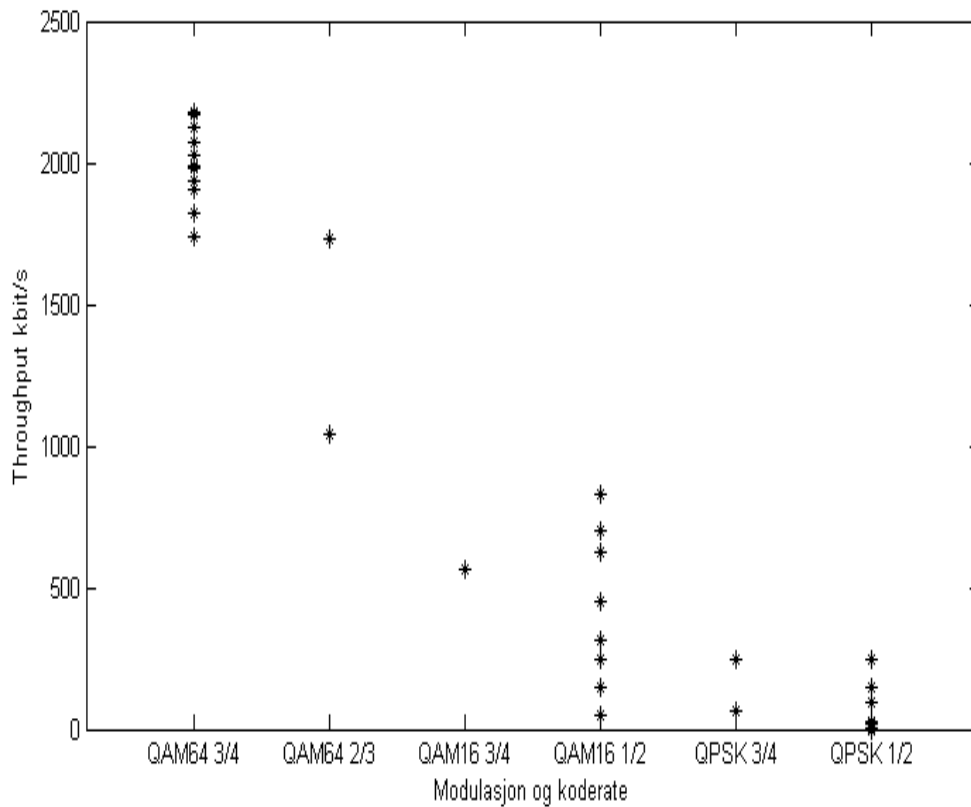
For opplink er det, som vist i Figur 3.26, flere ganger registrert modulasjonsformer med signal-støy-forhold under oppgitt terskelverdi. En grunn til dette kan være unøyaktigheter i rapportering av opplink signal-støy-forhold fra basestasjon til CPE. Alle opplink SNR-verdier er lest ut fra CPE.

For målingene gjort med hovedplattformen har vi også kjennskap til hvilke datarater vi får ved ulike signal-støy-forhold og modulasjonsformer og koderater. Målte hastigheter som funksjon av modulasjon og koderate er presentert for nedlasting og opplasting i henholdsvis Figur 3.27 og Figur 3.28. Verdiene i Figur 3.27 er gjennomsnitt av FTP og UDP målinger. Denne kunnskapen gjør også at vi kan si noe om hvilken datarate vi ville ha fått i målingene med den alternative plattformen, selv om det ikke er gjort throughputmålinger der.

For nedlink viser Figur 3.27 at QAM 64 og QAM 16 er de mest benyttede modulasjonsformene. Med QAM 64 oppnås nedlastingshastigheter på 5,4 Mbit/s mens det er registrert hastigheter opp mot 3,5 Mbit/s med QAM 16. På opplink Figur 3.28 er det ved flere tilfeller registrert overføringshastigheter på over 1 Mbit/s, men dette forutsetter QAM 64.



Figur 3.27 Målte nedlastingshastigheter for ulike modulasjoner og koderater



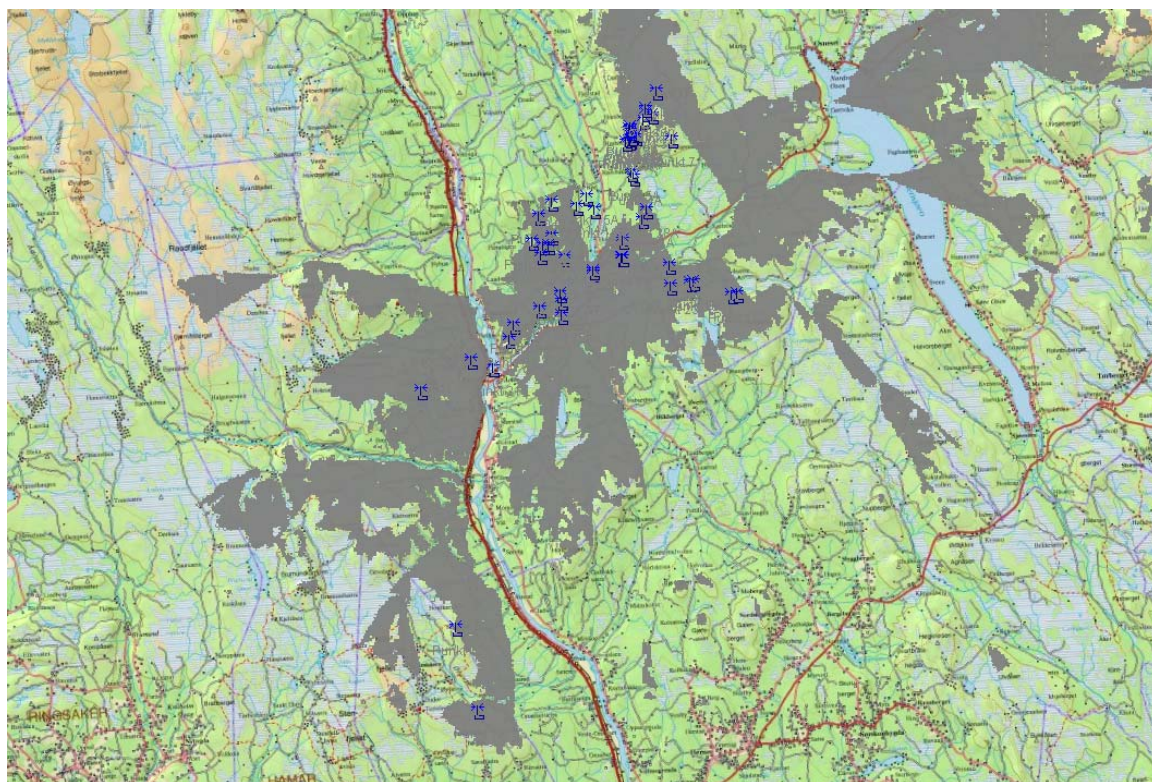
Figur 3.28 Målte opplastingshastigheter for ulike modulasjoner og koderater.



### 3.3.5 Non-line-of-sight (NLOS) ytelse

Målingene er som vist tidligere gjort i Hedmark med basestasjon plassert på Tørråsen i Regionfelt Østlandet. Terrenget i området er kupert med elvedaler og barskogkledde åser. I tillegg til posisjonene som er presentert i denne rapporten ble det i en rekke andre posisjoner ikke registrert signal. Posisjonene der signal ble detektert ser ut til å sammenfalle bra med en optisk frisiktsanalyse, se Figur 3.29.

Frisiktsanalysen er gjort i Teleplan Frequency Management System (FMS) og tar utgangspunkt i basestasjon med antenne plassert 15 meter over bakken på Tørråsen. Det skraverte området på kartet viser områder med optisk frisikt til basestasjonsantennene. Analysen tar ikke hensyn til vegetasjon. Som vist i Figur 3.29 ligger nesten alle posisjoner med registrert signalstyrke innenfor området med optisk frisikt til basestasjon, noe som indikerer at man i dette området er nærmest avhengig av å ikke ha terrenghindringer mellom basestasjon og bruker. De gunstige OFDM egenskapene i forhold til flerveisutbredelse kommer ikke til sin rett i dette området, noe som kan skyldes mangel på reflekterende overflater. Barskogkledde åser reflekterer lite i forhold til for eksempel bygninger eller fjellsider.



Figur 3.29 Optisk frisiktsanalyse fra MARIA / FEFAS. Skravert område indikerer optisk fristikt.

### 3.3.6 Målinger med enkeltmannsplattform

Denne plattformen ble brukt i kun liten utstrekning i dette arbeidet. Resultatene indikerer at WiMAX systemet er brukbart også inne i tett granskog, men at ytelsen reduseres. Type barskog har trolig mye å si for ytelsen. Tørr furuskog vil gi mindre demping enn tett og frodig, våt

granskog. Denne typen målinger vil være mer relevant med mobile baseantenner potensielt plassert under trehøyde, og vil bli gjenopptatt og utført i større skala når deployerbare mikrobaser er klare til bruk.

## 4 Oppsummering / videre arbeid

WiMAX målinger ble gjennomført på 2.3 GHz WiMAX oppsett med basestasjon plassert i mast i Regionfelt Østlandet. Det ble målt overføringshastigheter på 5 Mbit/s opptil 38 km fra base. Resultatene viser at systemet kan fungere godt tross vegetasjonshindringer mellom base og brukerterminal. Tetthet på eventuell vegetasjon og strekningen gjennom vegetasjonen reduserer imidlertid ytelsen. Måleresultatene indikerer at man er avhengig av tilnærmet optisk frisikt fra base til CPE med tanke på terreng for å få kontakt. Måleresultatene viser også viktigheten av antennevalg for ytelsen. I flere posisjoner oppnås kontakt med base kun med direktiv antenne. Dette vil være en utfordring i forbindelse med mobilitet.

Alle målingene som er beskrevet i denne rapporten er gjort med stasjonær makrobase. Det vil videre være interessant å gjøre lignende målinger på mikrobaser. Mikrobasene muliggjør mobile basestasjoner og er dermed mer relevante i forhold til taktiske bruksscenarioer. Det vil være nødvendig å gjøre videre studier med tanke på sikkerhet og sårbarhet. WiMAX utstyr som opererer på lavere frekvenser (under 1 GHz) er av spesiell interesse for Forsvaret da dekningsgraden kan forbedres.

## Referanser

- [1] "Forsvarssjefens forsvarsstudie 2007", Nov.2007.
- [2] WiMAX Forum, <http://www.wimaxforum.org/technology>, Access date: 9-1-2008.
- [3] IEEE, "Std 802.16-2004, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems", 2004.
- [4] IEEE, "Std 802.16e-2005, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems", 2006.
- [5] J. G. Andrews, A. Ghosh, and R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX : Understanding Broadband Wireless Networking*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2007.
- [6] Bo Li, Yang Qin, Chor Ping Low, and Choon Lim Gwee, "A Survey on Mobile WiMAX", *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 12, pp. 70-75, 2007.
- [7] Mobile WiMAX - Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation, <http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/>, Access date: 14-2-2008.
- [8] HSDPA in W-CDMA, [www.umtsworld.com/technology/hsdpa.htm](http://www.umtsworld.com/technology/hsdpa.htm), Access date: 14-2-2008.
- [9] HSUPA to Bring a More Exciting 3G Life, [www.huawei.com/file/download.do?f=496](http://www.huawei.com/file/download.do?f=496).
- [10] CDMA Development Group, <http://www.cdg.org>, Access date: 14-2-2008.
- [11] ICE mobilt bredbånd, [www.ice.no](http://www.ice.no), Access date: 14-2-2008.
- [12] EDGE, <http://www.gsmworld.com/technology/edge/index.shtml>, Access date: 14-2-2008.
- [13] Wi-Fi, <http://wi-fi.org>, Access date: 14-2-2008.
- [14] TacLAN, <http://www.kongsberg.com/eng/kda/kdc/products/taclan>, Access date: 18-2-2008.
- [15] IEEE 802.22, [http://standards.ieee.org/announcements/pr\\_80222.html](http://standards.ieee.org/announcements/pr_80222.html), Access date: 14-2-2008.
- [16] IEEE 802.20, [http://www.ieee802.org/20/P\\_Docs/IEEE%20802.20%20PD-04.pdf](http://www.ieee802.org/20/P_Docs/IEEE%20802.20%20PD-04.pdf), Access date: 18-2-2008.
- [17] DVB-RCT, [http://www.dvb.org/documents/white-papers/WP03%20\(RCT\).pdf](http://www.dvb.org/documents/white-papers/WP03%20(RCT).pdf), Access date: 18-2-2008.
- [18] Alvarion, [www.alvarion.com](http://www.alvarion.com), Access date: 22-2-2008.
- [19] MGEN Multi-Generator, <http://cs.itd.nrl.navy.mil/work/mgen>, Access date: 4-4-0008.
- [20] P. Grønsund, P. Engelstad, A. Moti, and T. Skeie, "Real Life Field Trial over a pre-mobile WiMAX System with 4th Order Diversity", IEEE 7th International Conference on Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking, St.Petersburg, Russia, Sept.3-7, 2007.

## Forkortelser

AES	Advanced encryption standard
AMC	Adaptive modulation and coding
ATPC	Automatic transmit power control
AU	Access unit
BPSK	Binary phase shift keying
BER	Bit error rate
BPSK	Binary phase shift keying
CD&E	Concept, development and experimentation
CDMA	Code division multiple access
CPE	Customer premises equipment
dB	Desibel
dBm	Desibel relativt en milliwatt
EAP	Extensible authentication protocol
EDGE	Enhanced data rates for GSM evolution
EIRP	Equivalent isotropically radiated power
EV-DO	Evolution-data optimized
FDM	Frequency division multiplexing
FFT	Fast Fourier transform
FIH	Forsvarets Ingeniørhøgskole
FLO	Forsvarets logistikkorganisasjon
FTP	File transfer protocol
GPRS	General packet radio service
GPS	Global positioning system
GSM	Global system for mobile communications
HF	High frequency
HSDPA	High-speed downlink packet access
HSPA	High-speed packet access
HSUPA	High-speed uplink packet access
IDU	Indoor unit
ISI	Intersymbolinterferens
LMO	Landmakt og operasjoner
MAC	Media access control
MP-MP	Multipunkt-til-multipunkt
MRRC	Maximal-ratio receiver combining
MS	Mobile station
NPU	Network processing unit
ODU	Outdoor unit
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing
OFDMA	Orthogonal frequency division multiple access
PMP	Punkt-til-multipunkt
PSK	Phase shift keying
QAM	Quadrature amplitude modulation

QoS	Quality of service
QPSK	Quadrature phase shift keying
RSSI	Received signal strength indicator
SNR	Signal to noise ratio / signal-støy-forhold
SOFDMA	Scalable orthogonal frequency division multiple access
SS	Subscriber station
SU	Subscriber unit
TCP	Transmission control protocol
TDD	Time division duplex
TRADOK	Hærens transformasjons- og doktrinekommando.
UDP	User datagram protocol
UHF	Ultra high frequency
UMTS	Universal mobile telecommunications system
VHF	Very high frequency
WCDMA	Wideband code division multiple access
WRAN	Wireless regional area network