

# **FFI RAPPORT**

## **TERRENGETS PÅVIRKNING AV JORDBØLGEN PÅ HF - måleresultater og analyse**

FARSUND Bodil Hvesser, GRØNNERUD Ove, SANDER Jostein

**FFI/RAPPORT-2004/01135**



**TERRENGETS PÅVIRKNING AV JORDBØLGEN  
PÅ HF - måleresultater og analyse**

FARSUND Bodil Hvesser, GRØNNERUD Ove,  
SANDER Jostein

FFI/RAPPORT-2004/01135

**FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT**  
**Norwegian Defence Research Establishment**  
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge



P O BOX 25  
 NO-2027 KJELLER, NORWAY  
**REPORT DOCUMENTATION PAGE**

**SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE**  
 (when data entered)

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2004/01135 1a) PROJECT REFERENCE FFI-II/822/110	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED 2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	3) NUMBER OF PAGES 76		
4) TITLE TERRENGETS PÅVIRKNING AV JORDBØLGEN PÅ HF - måleresultater og analyse  THE INFLUENCE OF THE TERRAIN AT THE HF GROUND WAVE - measurements and analysis				
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) FARSUND Bodil Hvesser, GRØNNERUD Ove, SANDER Jostein				
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)				
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;">           a) <u>HF-communication</u>            b) <u>ground wave</u>            c) <u>terrain</u>            d) <u>GRWAVE</u>            e) <u>conductivity</u> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;">           IN NORWEGIAN:            a) <u>HF-kommunikasjon</u>            b) <u>jordbølge</u>            c) <u>terreng</u>            d) <u>GRWAVE</u>            e) <u>konduktivitet</u> </td> </tr> </table>			a) <u>HF-communication</u> b) <u>ground wave</u> c) <u>terrain</u> d) <u>GRWAVE</u> e) <u>conductivity</u>	IN NORWEGIAN: a) <u>HF-kommunikasjon</u> b) <u>jordbølge</u> c) <u>terreng</u> d) <u>GRWAVE</u> e) <u>konduktivitet</u>
a) <u>HF-communication</u> b) <u>ground wave</u> c) <u>terrain</u> d) <u>GRWAVE</u> e) <u>conductivity</u>	IN NORWEGIAN: a) <u>HF-kommunikasjon</u> b) <u>jordbølge</u> c) <u>terreng</u> d) <u>GRWAVE</u> e) <u>konduktivitet</u>			
<b>THESAURUS REFERENCE:</b>				
8) ABSTRACT <p>The two categories of HF operations are sky waves and ground waves. The focus in this report has been on ground wave, which consists of the direct wave, reflected wave and surface wave. The International Telecommunication Union (ITU) recommended ground wave prediction model for HF frequencies is GRWAVE. This model predicts the electrical field strength and transmission loss over a curved, homogeneous and smooth earth, and is not suitable for predictions for paths whose electrical properties are inhomogeneous and paths with irregular terrain. While some propagation tools are developed to overcome the problem of inhomogeneous ground there are no commercial tools that consider the topology between the transmitter and receiver other than diffraction.</p> <p>The first phase of measurements included calibration of test equipment and performing noise measurements in different surroundings. We found that especially (fast) trains made quite a lot of noise.</p> <p>In the second phase we measured the field strength over paths where the ground consists of either clay or sand to see if the field strength varies according to the difference in conductivity between the two paths. The terrain was rather flat so that the terrain effects could be neglected, and we saw a difference in field strength between the two paths.</p> <p>In the third phase we have measured the field strength over paths that have different topology. It seems that the terrain near the transmitter and receiver influence the field strength most. A factor called "clearance angle" seems to be relevant here. In the terrain profile between the transmitter and receiver this is the greatest angle at the position of the transmitter/receiver between the horizontal plane and a terrain obstacle.</p>				
9) DATE  2004-03-29	AUTHORIZED BY This page only  Vidar S Andersen	POSITION  Director		



**INNHOLD**

	<b>Side</b>	
1	INNLEDNING	7
2	GENERELL TEORI OM JORDBØLGEN	8
2.1	De elektriske egenskapene til jorda	9
2.1.1	Elektrisk permittivitet og konduktivitet	9
2.1.2	Skinndybde	14
2.2	Diffraksjon og fresnelsoner	15
2.3	GRWAVE	18
3	UTSTYR	19
4	FREKVENSER	20
5	STØYMÅLINGER	20
6	MÅLINGER GJORT PÅ FORSKJELLIGE GRUNNFORHOLD	23
7	SJØ-LAND MÅLINGER	25
8	TERRENGMÅLINGER	29
8.1	Sirkelmålinger	29
8.1.1	Sirkelmåling i Totenåsen	30
8.1.2	Sirkelmåling i Nannestad	31
8.1.3	Sirkelmåling i Bjørkelangen	33
8.1.4	Sirkelmåling i Odalen	35
8.2	Linjemålinger	36
8.2.1	Linjemåling på Romerike	37
8.2.2	Linjemåling i Nannestad	39
8.2.3	Linjemåling i Hurdal	40
8.3	Studentmålinger i Gudbrandsdalen	42
8.3.1	Studentmåling i Øyer	42
8.3.2	Studentmåling i Ringeby	44
8.3.3	Studentmåling i Kvam	46
9	ANALYSE	47
9.1	"Clearance angle"	49
9.2	Regresjonsanalyse	50
9.3	Resultat	51
9.4	Diskusjon	53
10	KONKLUSJON	57
	APPENDIX A	58





## TERRENGETS PÅVIRKNING AV JORDBØLGEN PÅ HF - måleresultater og analyse

### 1 INNLEDNING

På kortholds HF-kommunikasjon er det vanlig å benytte seg av jordbølgen. Vårt mål er å kunne lage en enkel modell for jordbølgeutbredelse som tar hensyn til terrenget.

I FEFAS (Felles Frekvensadministrasjonssystem) blir jordbølgeprediksjonene utført ved hjelp av prediksjonsprogrammet GRWAVE. Dette er ITU (International Telecommunication Union) sin anbefalte prediksjonsmodell for jordbølge, og denne modellen predikerer den elektriske feltstyrken og transmisjonstapet over en rund, homogen og glatt jord, men tar ikke hensyn til inhomogene grunnforhold og varierende og bratt terreng. GRAPPLE derimot er et prediksjonsverktøy under utvikling av QinetiQ i England som tar hensyn til inhomogene grunnforhold, men heller ikke her tas det hensyn til terrenget. Når det gjelder prediksjonsprogrammet WRAP utviklet av AerotechTelub i Sverige, så kan dette ta hensyn til diffraksjon, men ikke som default.

Terrengets påvirkning av jordbølgen er grundig behandlet rent analytisk, men man har ennå ikke kommet frem til en modell som beskriver terrengeffektene tilfredsstillende. Å starte med tilsvarende studier ved FFI kan fort bli tidkrevende og resultatet svært usikkert. Det ble derfor istedet satset på en mer eksperimentell tilnærming til problemstillingen. Generell teori rundt jordbølgen samt en beskrivelse av utstyret og frekvenser som er brukt, er vist i kapittel 2, 3 og 4.

For å bli bedre kjent med utstyret og være sikker på hvordan ulike typer bakgrunnsstøy vil påvirke målingene ble det først utført støymålinger, samt at utstyret ble kalibrert. Dette er beskrevet i kapittel 5.

Deretter ønsket vi å undersøke om det var mulig å måle forskjeller i konduktivitet i bakken. Vi valgte oss derfor ut målestrekk på Romerike hvor grunnen bestod hovedsakelig av leire eller sand. Her er terrenget generelt flatt, slik at vi kunne neglisjere terrengpåvirkningen. Disse målingene er presentert i kapittel 6.

Vi har også utført målinger over sjø, for å undersøke om vi får en økning av signalet fordi konduktiviteten i sjø er betydelig høyere enn den som er i jord. Dette er presentert i kapittel 7. Hensikten var så å sammenligne våre målinger med prediksjoner utført med GRAPPLE. På grunn av lav oppløsning i kartdatabasen som ligger i GRAPPLE ble ikke denne sammenligningen vellykket.

Deretter ble det utført målinger i varierende terreng. Det ble utført to kategorier målinger. I den

ene kategorien målinger stod senderen på samme sted over flere målinger, mens mottakeren ble flyttet med fast avstand fra senderen i en sirkel rundt denne. Disse målingene har vi kalt sirkelmålinger og den faste avstanden ble valgt til å være 15 km. På denne måten kan vi utelukke avstand som en faktor som påvirker målingene våre. Vi har også utført målinger på linje, det vil si at senderen har stått fast på ett sted, mens mottakeren har blitt flyttet i forskjellig avstand vekk fra senderen men i samme retning.

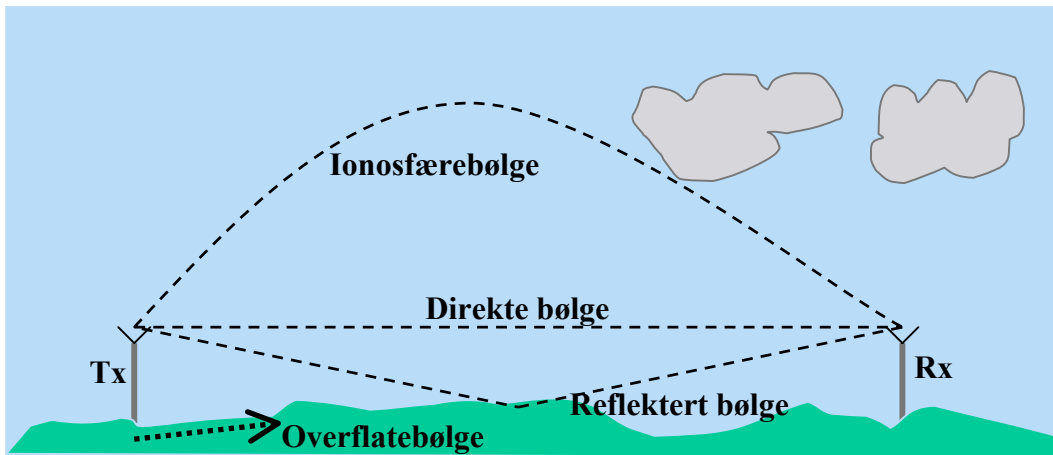
Sirkelmålingene og linjemålingene har vært utført i områdene Hurdal, Romerike, Odalen og Bjørkelangen. I tillegg har vi noen sirkelmålinger fra Gudbrandsdalen hvor avstanden ikke har vært helt fast. Disse har vært utført av studenter fra Hærens Ingeniørhøyskole.

Beskrivelse og analyse av disse målingene er vist i kapittel 8 og 9, mens terrengprofiler av målingene er vist i Appendix A.

## 2 GENERELL TEORI OM JORDBØLGEN

HF-bølgen kan forplante seg enten langs jordoverflaten eller via ionosfæren. Ionosfærebølgen blir stort sett nyttet over store avstander og blir ikke beskrevet nærmere her. Se f.eks. (2) for mer informasjon om ionosfærebølgen.

Jordbølgen består av direkte bølge, reflektert bølge og overflatebølge, se Figur 2.1.



Figur 2.1 Forskjellige propagasjonsveier for HF.

Vanligvis blir direktebølgen og den reflekterte bølgen kalt rombølge. Den reflekterte bølgen vil få et faseskift på  $180^\circ$  i forhold til direktebølgen. Hvis høyden over bakken til sender og mottaker ikke er stor, blir ganglengdeforskjellen liten. På denne måten vil direktebølgen og den reflekterte bølgen kansellere hverandre, og vi står igjen med bare overflatebølgen.

Overflatebølgen oppstår fordi jorden ikke er en perfekt reflektor. Noe av energien blir transmittert ned i bakken, og setter opp en jordstrøm som er forskjellig fra det ideelle tilfellet der

jordoverflaten er en glatt perfekt reflekterende flate. Dette er en vertikal polarisert bølge som forplanter seg langs jordoverflaten og således er avhengig av de elektriske egenskapene til jorda. Den horisontalpolariserte bølgen blir sterkt dempet, slik at den i praksis har liten betydning.

Siden jordoverflaten har endelig konduktivitet vil det oppstå et radielt elektrisk felt ved overflaten. Som et resultat av dette vil det elektriske feltet av bølgen som beveger seg parallelt med overflaten få en helning i propagasjonsretningen. Den radielle komponenten er liten i forhold til den vertikale komponenten. Graden av helning er avhengig av konduktivitet (se avsnitt 2.1.1) og frekvens (3), slik at måling av helningsvinkelen kan bli brukt til å bestemme den lokale konduktiviteten. Sammenhengen er slik at lavere konduktivitet og høyere frekvens vil føre til mer helning.

Ulikt ionosfærebølgen blir overflatebølgen bare utsatt for neglisjerbar dispersjon, slik at bredbåndssignaler i prinsippet kan bli sendt når overflatebølgen er dominerende. Fading inntreffer bare når noe i propagasjonsretningen endres med tiden, slik at jordbølger over land er stabile signaler. Oversjøiske jordbølger kan bli utsatt for sakte fading i forbindelse med tidevannseffekter og endringer i bølgekarakteristikker.

## 2.1 De elektriske egenskapene til jorda

I frekvensområdet 10 kHz – 30 MHz er propagasjon mulig med såkalt jordbølge. Over hvor stor avstand det er mulig å kommunisere ved hjelp av jordbølgen er avhengig av frekvens og de elektriske egenskapene i bakken. I HF-båndet blir jordbølgen stort sett brukt til kommunikasjon over korte avstander (<300 km).

De elektriske egenskapene til bakken kan i hovedsak bli uttrykt ved hjelp av de tre parametrene; magnetisk permeabilitet,  $\mu$ , elektrisk permittivitet,  $\epsilon$ , og konduktivitet,  $\sigma$ .

Den magnetiske permeabiliteten til bakken kan normalt antas å være lik permeabiliteten i vakuum,

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m.} \quad (2.1)$$

Den blir derfor ikke nærmere beskrevet her.

### 2.1.1 Elektrisk permittivitet og konduktivitet

Den elektriske permittiviteten uttrykkes vanligvis som

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (2.2)$$

der

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \quad (2.3)$$

er permittiviteten i vakuum, og  $\epsilon_r$  er den relative permittiviteten. Konduktiviteten angis i S/m, og er et mål på ledningsevnen.

Kurver som viser relativ elektrisk permittivitet,  $\epsilon_r$ , og konduktivitet som funksjon av frekvens for forskjellige typer grunnforhold er vist i Figur 2.2, Figur 2.3 og Figur 2.4. Kurvene dekker stort sett de fleste normale forhold, men i ekstreme tilfeller kan man finne høyere og lavere verdier på relativ permittivitet og konduktivitet enn det som er oppgitt her. For eksempel vil man i fjellpartier i arktiske områder kunne måle konduktiviteten til å kunne være så lav som  $10^{-5}$  S/m for frekvenser under 100 MHz. I motsatt tilfelle vil man i våte fruktbare områder finne konduktiviteter som er høyere enn det kurvene viser. Likeså kan snødekte områder ha verdier for permittivitet som er lavere enn det som er vist for kurve "E" i Figur 2.4.

Den elektriske konduktiviteten til saltvann er høy og avhengig av saltkonsentrasjonen og temperaturen. For frekvenser lavere enn 1 GHz er konduktiviteten gitt ved:

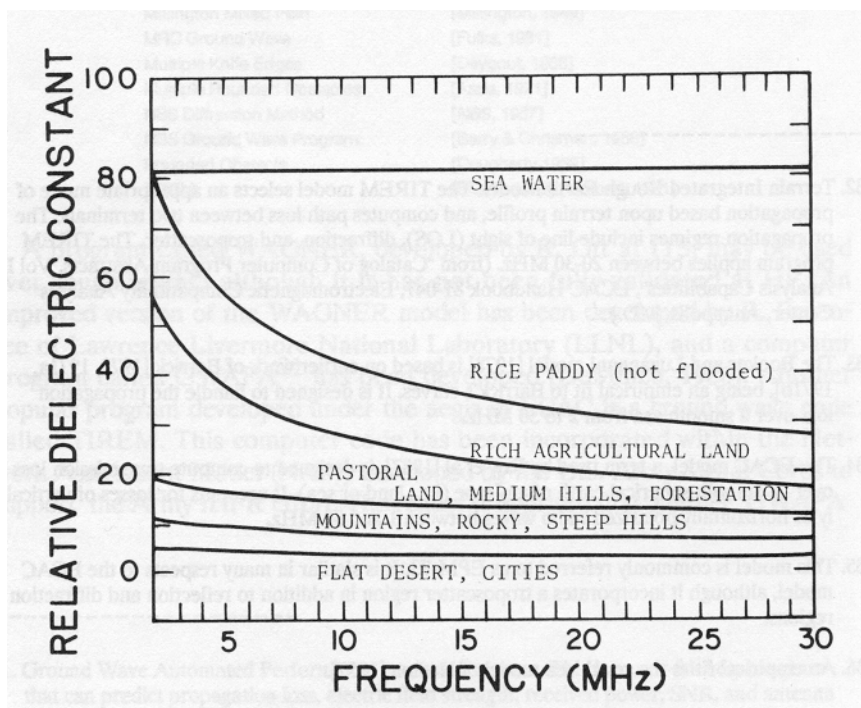
$$\sigma = 0.18 C^{0.93} [1 + 0.02(T - 20)] \quad (2.4)$$

$C$  er saltinnholdet målt i deler per tusen, og  $T$  er temperaturen målt i grader Celsius. Ved  $20^\circ \text{C}$  blir verdien 5 S/m brukt som et gjennomsnitt for hele verden, selv om det har blitt målt verdier mindre enn 1 S/m i det Baltiske hav, og mer enn 6 S/m i Rødehavet. Permittiviteten til saltvann er også avhengig av saltinnhold og temperatur, men som et gjennomsnitt for verdenshavene blir verdien  $\epsilon_r = 80$  brukt ved temperaturen  $20^\circ \text{C}$ .

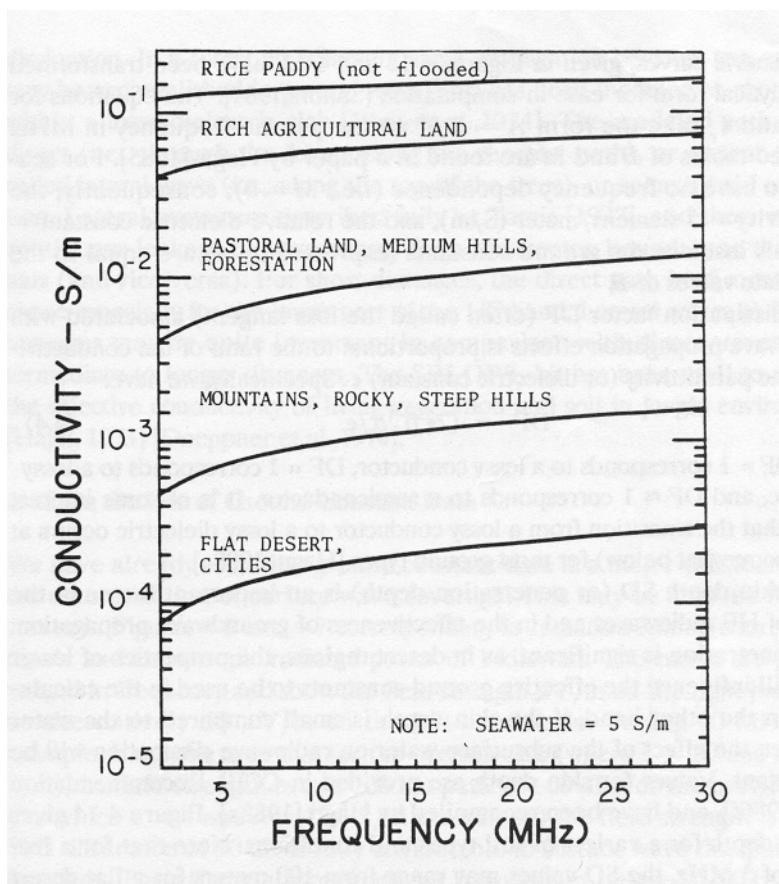
Selv om målinger viser at de elektriske egenskapene varierer for forskjellige typer grunnforhold, viser det seg at den kjemiske sammensetningen til grunnen ikke har så mye å si som jordas evne til å absorbere og binde fuktighet. For eksempel har det vist seg at konduktiviteten til leire kan synke fra  $10^{-2}$  S/m, som den vanligvis har, til  $10^{-4}$  S/m (omtrent som granitt) når den blir tørr. I følge (1) er det antakelig graden av fuktighet som er mest avgjørende for de elektriske egenskapene til jorda. Det ser ut til at fuktigheten i jorda stort sett er konstant gjennom året 1 m under bakkenivå og lavere. Selv om mye nedbør kan øke fuktighetsnivået midlertidig, vil drenering og fordampning fra overflaten raskt redusere nivåene til normale verdier.

Laboratoriemålinger har vist at for lave frekvenser vil konduktiviteten endres med 3% per grad Celsius, mens permittiviteten vil være tilnærmet uforandret (1). Ved frysepunktet synker generelt både permittiviteten og konduktiviteten. Selv om denne forandringen er vesentlig vil temperaturforandringen gjennom året avta med dybden under bakkenivå, slik at temperatureffekter bare er viktig ved høye frekvenser (høyere enn HF) der penetrasjonen er liten, eller der bakken er frossen betydelig langt ned.

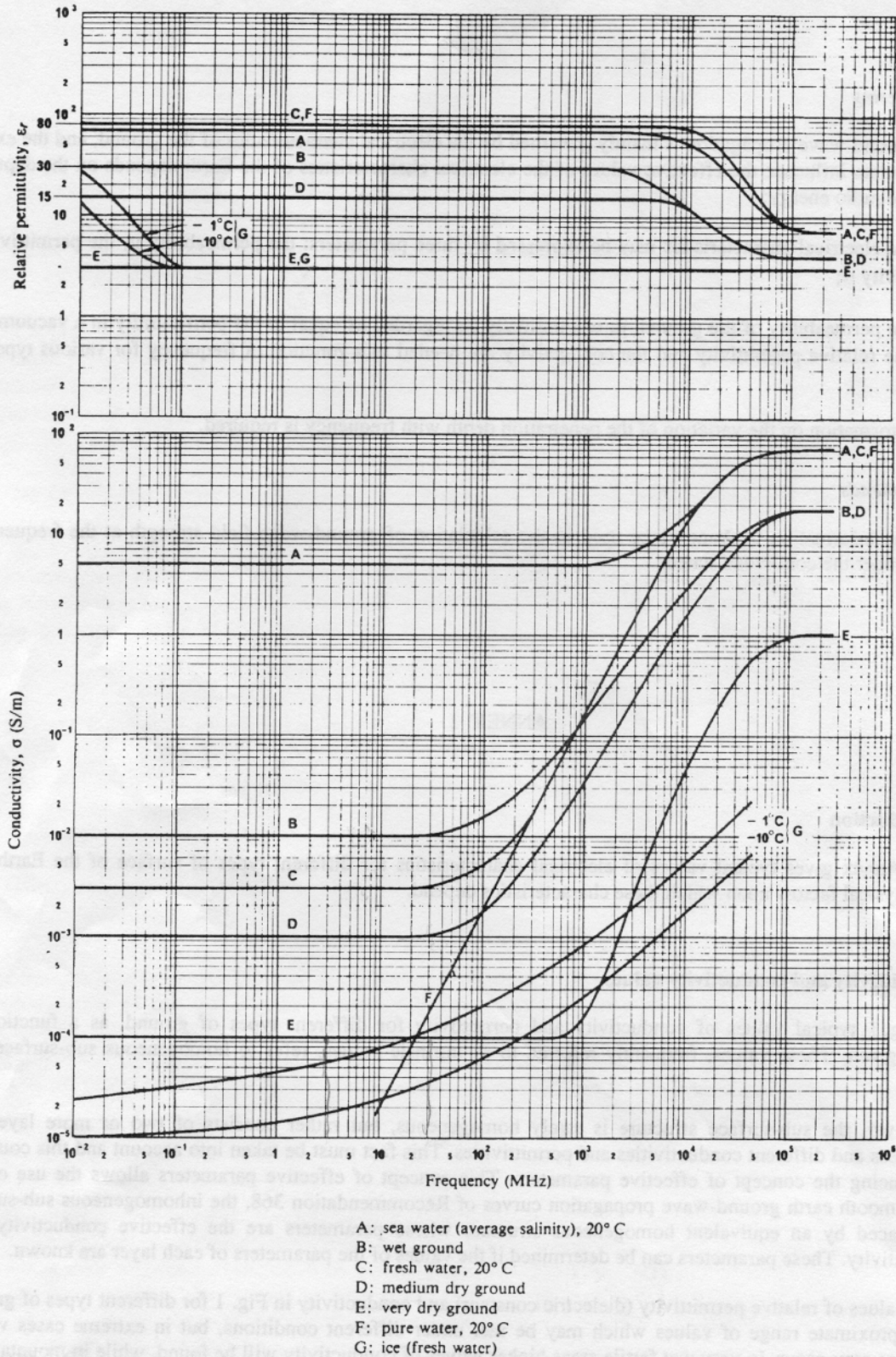
Konduktivetskart for hele verden er å finne i (7), og et slikt kart over Norge er vist i Figur 2.5. En sammenstilling mellom mineraltype og elektriske egenskaper er å finne i (8).



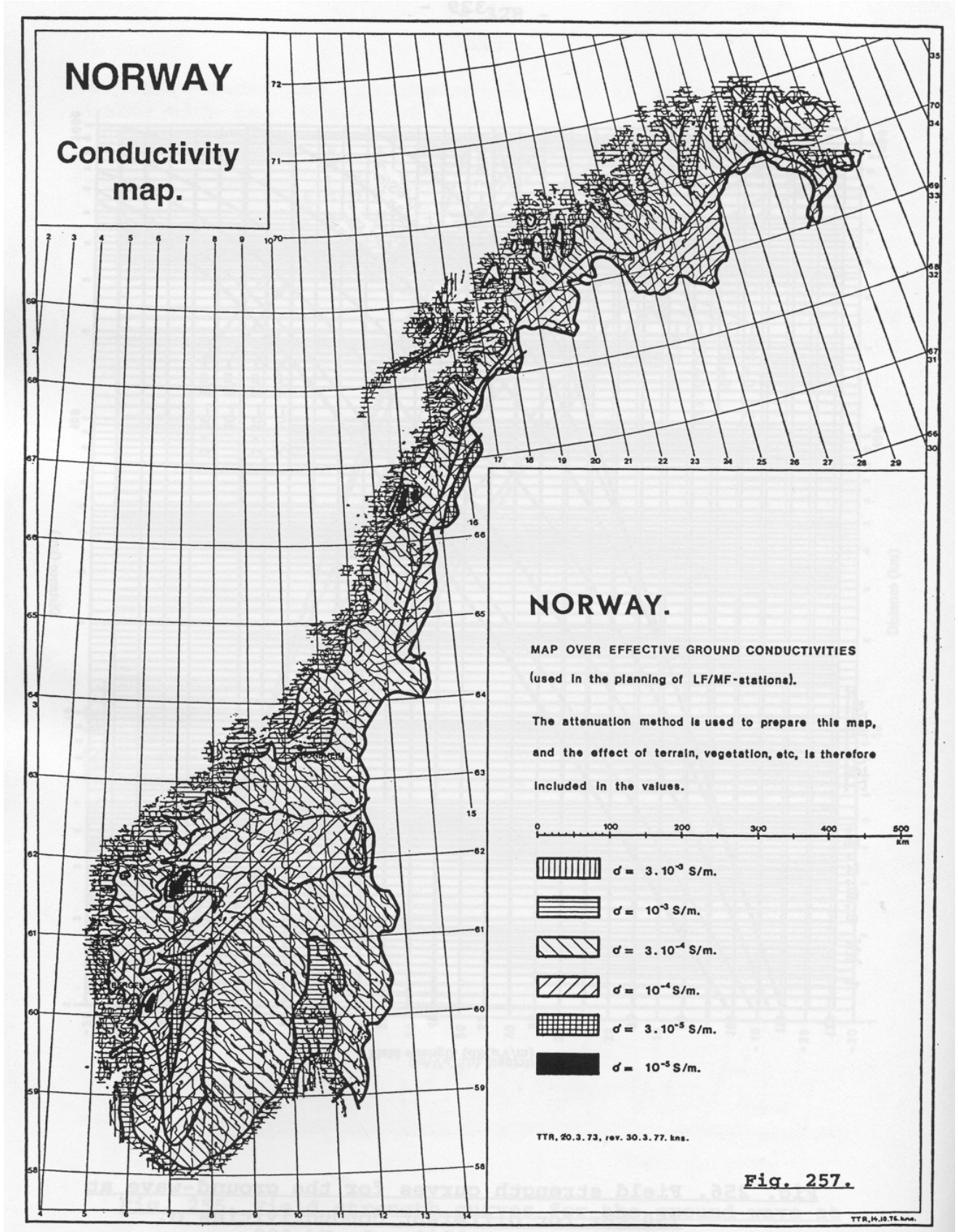
Figur 2.2 Relativ permittivitet som funksjon av frekvens for forskjellige typer grunnforhold (hentet fra (2)).



Figur 2.3 Konduktivitet som funksjon av frekvens for forskjellig typer grunnforhold (hentet fra (2)).



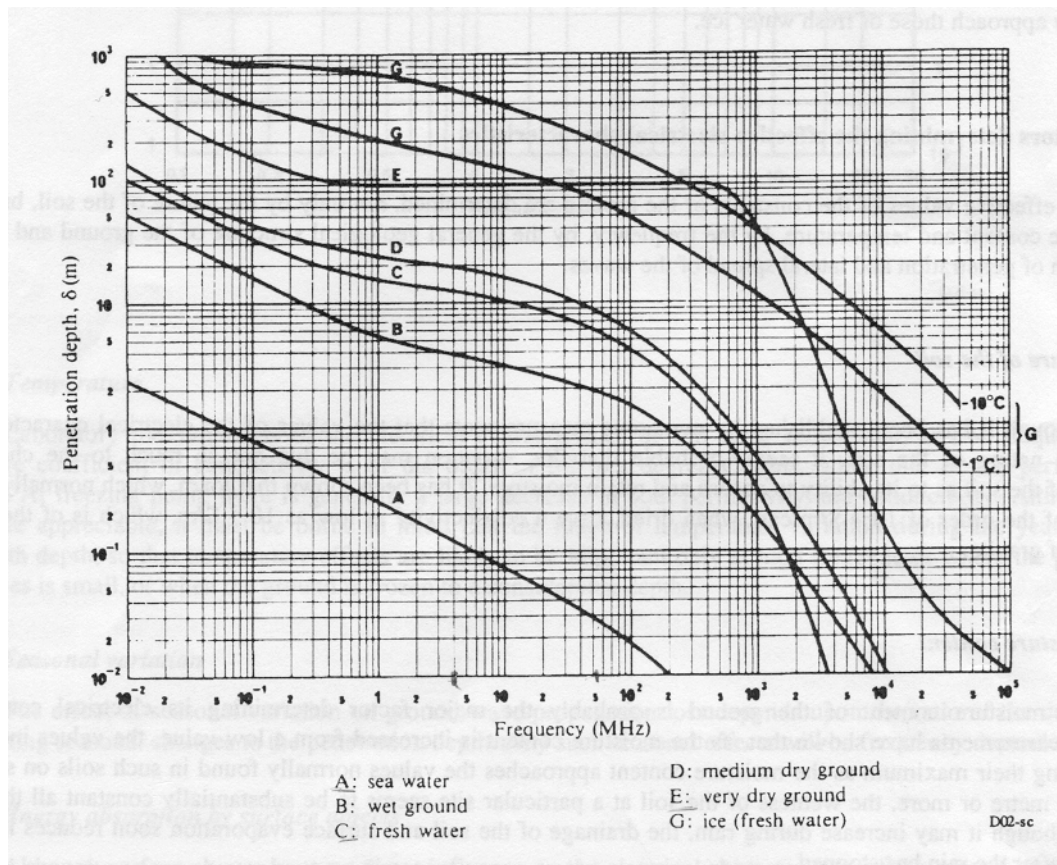
Figur 2.4 Relativ permittivitet og konduktivitet som funksjon av frekvens for forskjellige grunnforhold (hentet fra (1)).



Figur 2.5 Konduktivitetskart over Norge (hentet fra (7))

### 2.1.2 Skinndybde

Bakken består som regel av flere lag med forskjellige elektriske egenskaper, og hvilke av disse som spiller inn på for eksempel konduktiviteten avhenger av hvor dypt den elektromagnetiske energien penetrerer ned i bakken. I denne sammenheng er det vanlig å se på skinndybden som er definert som den dybden hvor den elektromagnetiske energien har blitt dempet til  $1/e$  eller omlag 37% av sin opprinnelige verdi på overflaten. Skinndybden som funksjon av frekvens er vist i Figur 2.6 for forskjellige grunnforhold og vann.



Figur 2.6 Skinndybde som funksjon av frekvens for forskjellige grunnforhold (hentet fra (1)).

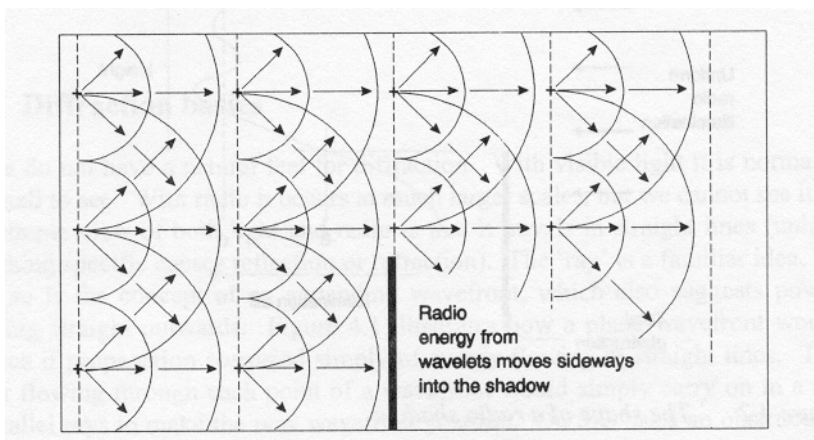
Hvis skinndybden er mindre enn tykkelsen på det øverste laget vil de underliggende lagene ha lite å si, mens hvis skinndybden er mye større enn tykkelsen på topplaget, vil propagasjonen være avhengig av de elektriske egenskapene til den/de underliggende lagene. På HF ser en at skinndybden stort sett er større enn 10m, bortsett fra for saltvann og våt grunn. En ser også at et tynt lag med is, vil ha liten innvirkning på ledningsevnen og permittiviteten fordi skinndybden er så stor at mesteparten av energien bare går gjennom islaget og ned i neste lag.

Radioenergien som når mottakeren, har ikke bare gått direkte fra sender til mottaker, men også via en lang rekke indirekte baner på hver side av den rette direkte banen. Det er derfor nødvendig å ta i betraktning ikke bare de elektriske karakteristikkene langs den rette banen, men også i området rundt. Hvor stort areal som bør tas i betraktning antydes i (1) til å være den første halvbølge fresnelsonen (se avsnitt 2.2 Diffraksjon og fresnelsoner).



## 2.2 Diffraksjon og fresnelsoner

En vanlig forenkling er å anta at transmisjonen mellom sender og mottaker går langs den rette linjen mellom disse. Dette ville imidlertid gi en uendelig energitetthet akkurat langs denne linjen og er derfor umulig, men i praksis går mye av energien her. En tidlig beskrivelse av hva som egentlig skjedde kom fra dansken Christian Huygen (1629-1695). I følge Huygens prinsipp vil hvert punkt på en bølgefront være utgangspunkt for en ny sekundærbølge. Dette gjør at de elektromagnetiske bølgene kan bøye seg rundt hindringer slik Figur 2.7 viser. Den resulterende feltstyrken vil være en superposisjonering av alle sekundære bølger. Betingelsene blir omtrent som for refleksjon, bortsett fra at vi ikke har faseskift i bøyningepunktet. Variasjonen i feltstyrke på grunn av bøyning er derfor bare avhengig av ganglengdeforskjellene til de forskjellige banene som signalet tar.

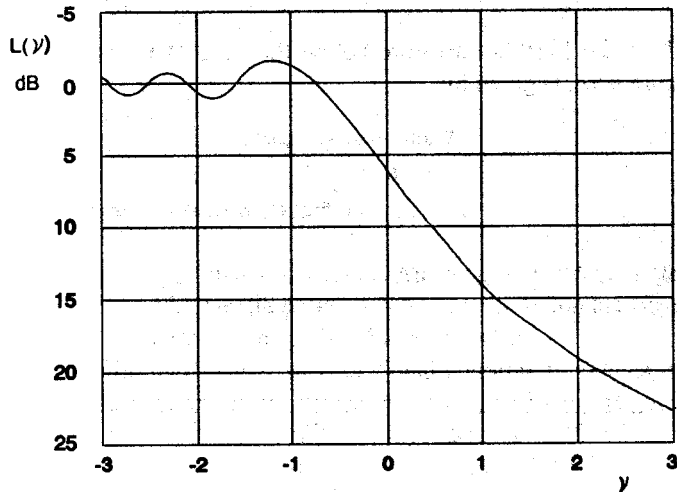


Figur 2.7 Huygens sekundære bølger ("wavelets") bøyes rundt en hindring. (Figuren er hentet fra (3).)

Figur 2.8 viser variasjon av diffraksjonstap som følge av en knivsegg-diffraksjon. Kurven blir kalt Fresnel-Kirchoff-kurven og er plottet mot en variabel  $\nu$  som er definert slik

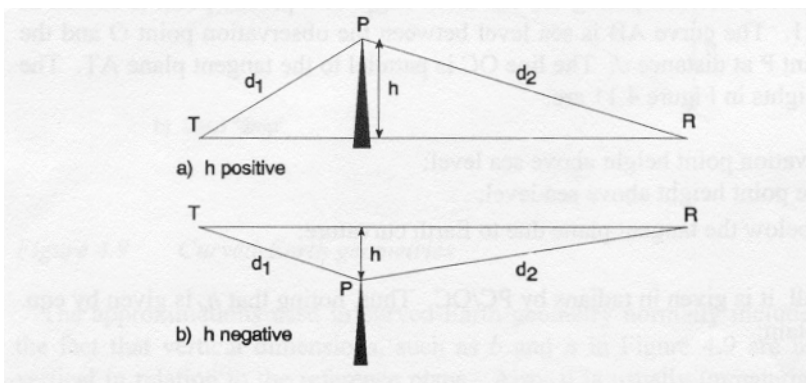
$$\nu = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (2.5)$$

$h$ ,  $d_1$  og  $d_2$  er definert som i Figur 2.9 og oppgis i samme enhet som bølgelengden  $\lambda$ .



Figur 2.8 Fresnel-Kirchoffs knivsegddiffraksjonskurve som viser diffraksjonstapet  $L(v)$  som funksjon av  $v$ .  $v$  er definert i teksten over. Figuren er hentet fra (3).

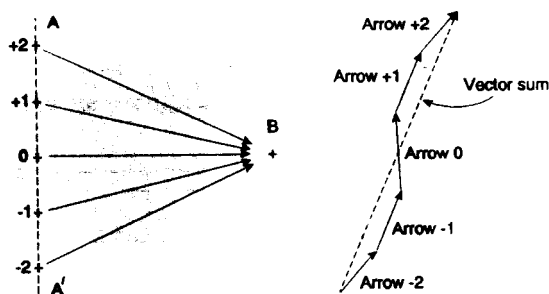
Diffraksjon gjør at elektromagnetiske bølger vil kunne nås også der man ikke har fri sikt, men fører også til stor variasjon i feltstyrken i nærheten av hindringer. Av kurven ser en at man har et diffraksjonstap selv om  $h$  er negativ, og allerede ved  $h = 0$  er tapet på ca 6 dB.



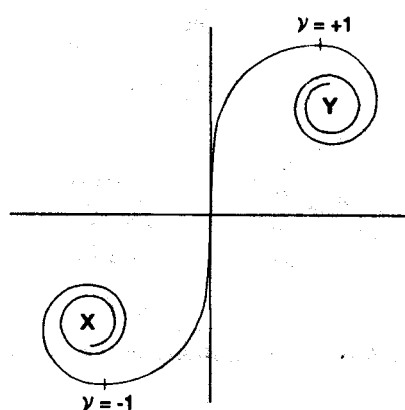
Figur 2.9 Geometrien ved beregning av  $v$ . Figuren er hentet fra (3).

Eksakte beregninger av diffraksjon er komplisert, men en kvalitativ forståelse av hva som skjer kan en få ved å se på en såkalt "Cornu spiral". Figur 2.10 viser en bølgefront som har nådd linjen A-A'. Og vi ønsker å se på det resulterende signalnivået ved punkt B, når en legger sammen bidrag fra et sett av punkter uniformt fordelt langs bølgefronten. Når en adderer de forskjellige bidragene i B må en ta hensyn til både amplitude og fase. Grafisk kan en gjøre dette ved å representere hvert bidrag med en vektor slik som vist i Figur 2.10. Strålen som tar den korteste og mest direkte veien til B gir det vertikale bidraget i midten. Denne er den lengste, og blir kalt "vektor 0". De nærmeste punktene "+1" og "-1" gir henholdsvis bidragene "vektor +1" og "vektor -1". Siden disse har gått lengre og i tillegg har en vinkel i forhold til retningen til gjennomsnittsbølgefronten er de kortere enn "vektor 0". Siden de også har en faseforskjell i forhold til bidraget fra "0", blir dette illustrert ved at bidragene har fått en vinkel mot høyre. Slik kan vi fortsette med bidragene fra "+2" og "-2" osv. Hvis denne prosessen gjøres kontinuerlig, ender vi opp med Cornu spiralen, se Figur 2.11. Den komplette Cornu spiralen som konvergerer

inn mot punktene "X" og "Y" representerer frittromspropagasjon. Resultatfeltet vil i dette tilfelle bli vektoren fra "X" til "Y".



Figur 2.10 Vektoraddisjon av bidrag fra bølgefronten A-A' som når punktet B. Figuren er hentet fra (3).



Figur 2.11 Cornu spiralen. Figuren er hentet fra (3).

Hvis vi tenker oss en hindring som hever seg i Figur 2.10, som i økende grad kutter av bidrag til spiralen, kan vi forklare formen på Fresnel-Kirchoff-knivsegg diffraksjonskurven. Mens hindringen hever seg, vil vektorer samtidig bli fjernet fra den nedre spiralen som starter i "X". Derfor vil den nedre delen av resultatvektoren gå rundt i en økende spiral, mens den øvre enden av vektoren vil være konstant i "Y". Dette vil da gi rippelen i Fresnel-Kirchoff-kurven. I det hindringen når frisisiktlinjen, har vi bare halvparten av den komplette spiralen, og et tap på ca 6 dB i forhold til frittromspropagasjonen. Ved økende skygge vil halen på vektorsummen gå i en spiral rundt "Y" og gi en kontinuerlig økende dempning.

Dette prinsippet vil også gjelde for et reelt diffraksjonstilfelle, selv om geometrien er vanskeligere. Tilfeller der dette vil gjøre seg gjeldende er bak store hindringer som fjell og åser, samt når terminalene står i trange daler, der bredden og dybden på dalen vil spille inn. Cornu-spiralen viser at en radiolinje krever et relativt stort åpent område rundt frisisiktlinjen for at frisisikt-nivået på feltstyrken skal kunne bli mottatt. For å beskrive hvor stort det åpne område er, snakker man ofte om Fresnel-soner. Den 1. Fresnelsonen inneholder alle propagasjonsbaner som gir et tillegg på frisisiktlengden på en halv bølgelengde. Det vil si et faseskift på  $180^\circ$ . Den 2. Fresnelsonen inneholder alle propagasjonsbaner som gir et tillegg på frisisiktlengden på en hel bølgelengde o s v. Disse Fresnelsonene danner tredimensjonale ellipser med sender og mottaker i fokuspunktene.

Ved å se på Cornu-spiralen ser en at hvis det ikke fins hindringer i den 1. Fresnelsonen så vil dette gi et bra signal. I praksis er ofte 0.6 av den 1. Fresnelsonen nok for en punkt til punkt link. Dette tilsvarer  $\nu = -1.1$ .

### 2.3 GRWAVE

GRWAVE er ITU-R sin anbefalte prediksjonsmodell for jordbølge, og denne modellen predikterer den elektriske feltstyrken og transmisjonstapet over en rund, homogen og glatt jord omgitt av en uniform atmosfære med en eksponentiell refraktivitet/høyde profil. Den tar som inputparametre sender- og mottakerhøyde, avstand, polarisasjon, konduktiviteten og permittiviteten til jorda, samt to parametre som karakteriserer den eksponensielle dempningen som skyldes troposfærisk refraktivitet.

GRWAVE er et Fortran-program laget av Rotheram (4). Han beskriver tre metoder eller tilnærminger for å prediktere rombølgen og overflatebølgen. Ingen av metodene er effektive for alle banegeometrier, men ved hjelp av numeriske teknikker, er det mulig å bestemme hvorfor en metode fungerer eller ikke fungerer. Hvis den ikke fungerer går det an å velge en annen tilnærming. De tre tilnærmingene og deres omtrentlige gyldighetsområde er følgende:

- Residue serier (bølgeledermodell): Brukes på de lengste distansene, det vil si bortenfor radiohorisonten for ikke-bakkenære terminaler. For terminaler nær jordens overflate vil metoden gjelde for avstander større enn omtrent  $10 \lambda^{1/3}$  km, hvor  $\lambda$  er bølgelengden i meter.
- Utvidet Sommerfeld flat-jord teori: Nær senderen kan det elektriske feltet nær overflaten gitt av en kilde på overflaten bli beskrevet ved Sommerfelds flat jord- teori. Ettersom avstanden øker korrigeres det for effektiv jordkrumning slik som beskrevet i (11), og det korrigeres for eksponensiell atmosfære. En utvidet Sommerfeld teori kan bli brukt på korte avstander og terminaler med lav høyde. I praksis vil det si avstander mindre enn  $10 \lambda^{1/3}$  km, og høyder lavere enn  $35 \lambda^{2/3}$  m.
- Geometrisk optikk: En optisk tilnærming brukt innenfor radiohorisonten når terminalenes høyde er over det som Sommerfelds utvidete teori kan behandle. Metoden involverer beregning av fase og amplitude av den direkte og bakkereflekterte bølgen spesielt med hensyn på atmosfærisk refraktivitet.

Under forhold hvor to metoder er gyldige, viser resultatene god overensstemmelse.

Sommerfelds flat-jord teori (5) er en matematisk modell. En enklere forklaring finnes i blant annet (3), mens GRWAVE er beskrevet nærmere i (15).

Ved hjelp av GRWAVE har ITU-R produsert en rekke kurver som viser hvordan vertikalt polarisert elektrisk feltstyrke varierer som en funksjon av avstand, jordtype og frekvens (10 kHz - 30 MHz). De har da valgt å bruke følgende gjennomsnittlige globale refraktivitetsmodell:

$$n = 1 + (n_s - 1) \exp(-h/h_s) \quad (2.6)$$

hvor overflater refraktiviteten er  $n_s = 1.000315$  og målestokkhøyden for refraktivitet er  $h_s = 7.35$  km. Kurvene er å finne i (6).

GRWAVE forutsetter en vertikal monopol med effekten 1 kW.

### 3 UTSTYR

Det ble benyttet to militære feltkjøretøyer under målingene. Det ene kjøretøyet var utstyrt med radiosender, mens det andre inneholdt mottakerutstyret. Se Figur 3.1.



*Figur 3.1 Bilde av sender- og mottakerbil med innfelt utstyr.*

Både sender- og mottakerbil bruker en vertikal piskantenne med lengde 6 m. For å få bedre kobling til jord, ble det i senderbilen benyttet en motvekt som ble lagt langs bakken. Dette var en 20 m. lang isolert kobberkabel.

Senderbilen inneholdt en HF-3 stasjon. Antennen ble tunet inn ved hjelp av en antennetuner og sendte ved alle målinger med en effekt på 100 W.

I mottakerbilen ble det brukt en spektrumsanalysator (HP 8562 B) koblet til en PC. Fra antennen gikk signalet inn på en forsterker som forsterket signalet med 25 dB før det gikk inn på spektrumsanalysatoren. PC-en styrte spektrumsanalysatoren og logget signalene v hj a programmet SPACOM. SPACOM er en applikasjon tidligere utviklet ved FFI. Det ble ikke benyttet antennetuning på mottakersiden.

## 4 FREKVENSER

Ved de innledende målingene ble det benyttet 8 frekvenser. Ved noen målinger var det mye støy på enkelte av frekvensene, slik at en erstatningsfrekvens ble benyttet. Se Tabell 4.1.

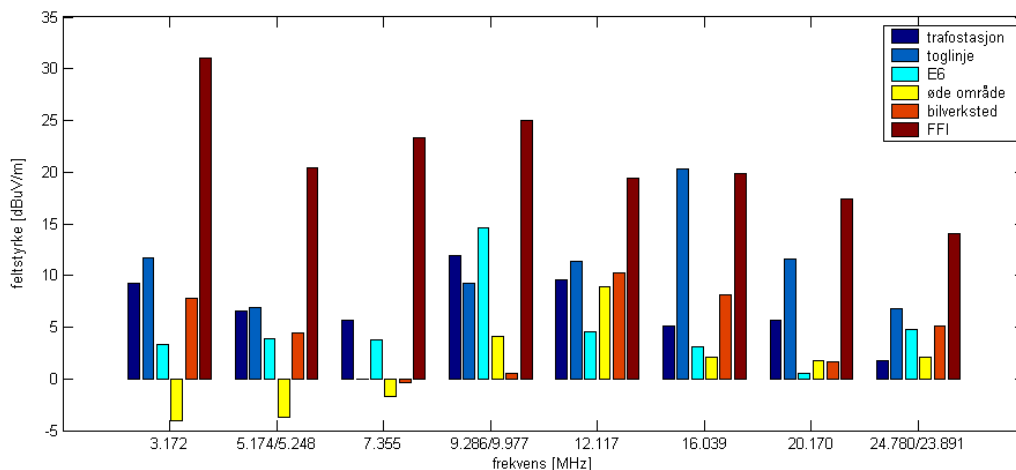
Signalet som ble sendt var et CW-signal med båndbredde 1 kHz. SPACOM lagrer mottatt signal i dBm (effekt). Det er derimot vanlig å presentere målinger av denne typen i dB $\mu$ V/m (feltstyrke). Det ble derfor gjort en kalibreringsmåling med assistanse fra firmaet COMLAB, for å finne en korrigeringsfaktor til våre målinger. Denne korrigeringsfaktoren tar også hensyn til at antennen ikke er like effektiv for alle frekvenser. Korrigeringsfaktorene som ble funnet er vist i Tabell 4.1.

Frekvens [MHz]	Korrigeringsfaktor [dB]	Erstatningsfrekvens [MHz]
3.172	90.9	-
5.248	87.4 <sup>(*)</sup>	5.174
7.355	78.1	-
9.977	76.7 <sup>(*)</sup>	9.286
12.117	83.3	-
16.039	86.5	-
20.170	86.3	-
24.780	84.0	23.981

Tabell 4.1 *Frekvenser benyttet til de innledende målingene, med korrigeringsfaktor. Ved noen frekvenser var det noen ganger mye støy, slik at en erstatningsfrekvens ble benyttet. (<sup>(\*)</sup>Korrigeringsfaktor gjelder for 5.174MHz og 9.286 MHz.)*

## 5 STØYMÅLINGER

For å danne oss et bilde av hva som kunne påvirke målingene våre, og for å bli kjent med utstyret, ble det foretatt støymålinger i forskjellige omgivelser som kunne tenkes å gi støy i HF-båndet. Steder som ble valgt var ved en trafostasjon (Leirsund), toglinje (mellom Lillestrøm og Leirsund), motorvei (E6 ved Skedsmokorset), bilverksted (Motor Forum på Lillestrøm) og kontorområde (utenfor FFI). I tillegg valgte vi et øde område for å se om det var mindre støy her. Se Figur 5.1 som viser gjennomsnittlig feltstyrke på de forskjellige frekvensene. Det ble gjort ca 100 sweep a 6s på hver frekvens, med mindre signalet var veldig stabilt. Da ble det gjort færre sweep.

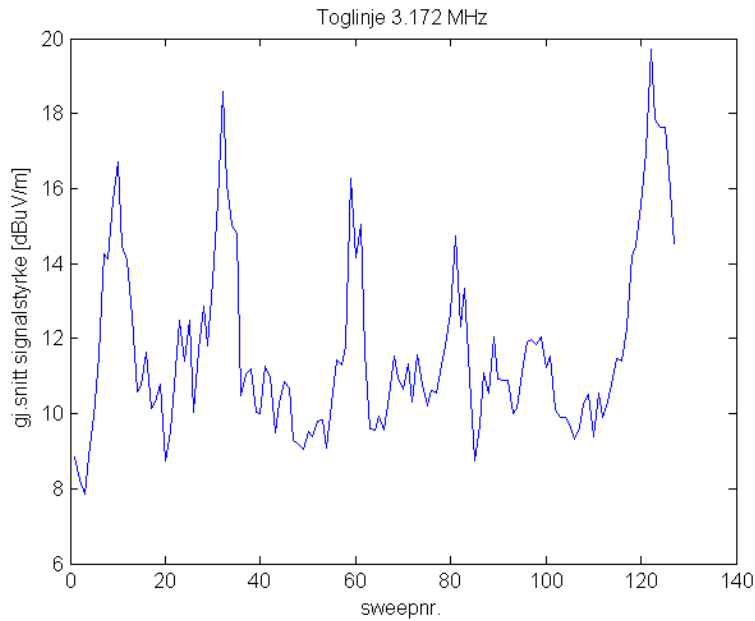


Figur 5.1 Resultat av støymålinger.

Det øde område som ble valgt var noen kilometer inn i skogen bak Asak ved Leirsund. Her var det spesielt lite støy på de laveste frekvensene. Vi prøvde også å måle uten strømaggregat her, fordi vi antok at dette kunne være kilde til noe støy, men vi fant ut at inverteren vi brukte i stedet støyet mer enn aggregatet vårt.

Som figuren viser ble resultatet at det var mye bakgrunnsstøy på FFI, og relativt mye også ved toglinja. Ved toglinja mangler vi målingen ved 7.533 MHz. Her har det skjedd noe galt med logfila, slik at den ikke er lesbar. Vi tror også at målingen ved 16.039 MHz ved toglinja gir et feil inntrykk av støyen ved denne frekvensen. Her er et frekvensbånd i nærheten antakeligvis i bruk, og har da gitt signal på vår frekvens.

Litt uventet ga flytogene veldig mye støy på de laveste frekvensene. Vi kunne derfor se på spektrumsanalyseren at det kom et tog, før vi kunne se det med øynene eller høre det. Figur 5.2 viser et eksempel på en måling ved toglinja, mens Tabell 5.1 viser ved hvilke sweep det passerte tog. Lokaltogene var ikke like tydelige, og fra og med 12 MHz var heller ikke flytogene så tydelige.



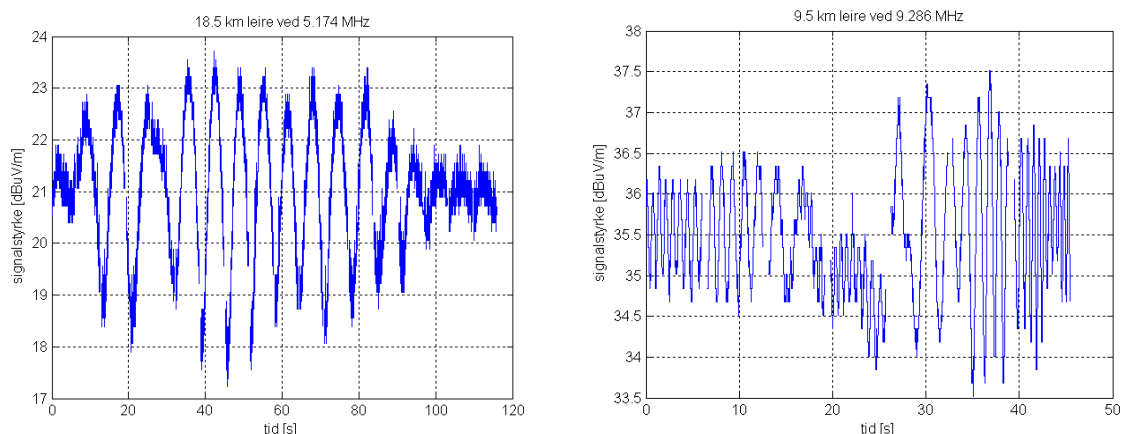
Figur 5.2 Støymåling langs toglinje ved 3.172 MHz. Plottet viser gjennomsnittlig signalstyrke for hvert sweep.

Sweepnr.	Togtype
10	flytog
33	flytog
59	flytog
65	lokaltog
80	lokaltog
123	flytog
125	flytog

Tabell 5.1 Oversikt over togpasseringer under måling av signalstyrke ved toglinje ved 3.172 MHz.

Ved senere målinger da senderen var i bruk, oppdaget vi en annen støykilde som ga oss til dels store svingninger på et ellers stabilt signal. Eksempler på slike svingninger er vist i Figur 5.3. Kilden til disse svingningene må være noe som reflekterer signalet godt, og som er i bevegelse. Vi tror disse svingningene derfor skyldes refleksjoner fra fly, spesielt siden dette særlig oppstod ved målinger på Romerike i nærheten av Gardermoen.

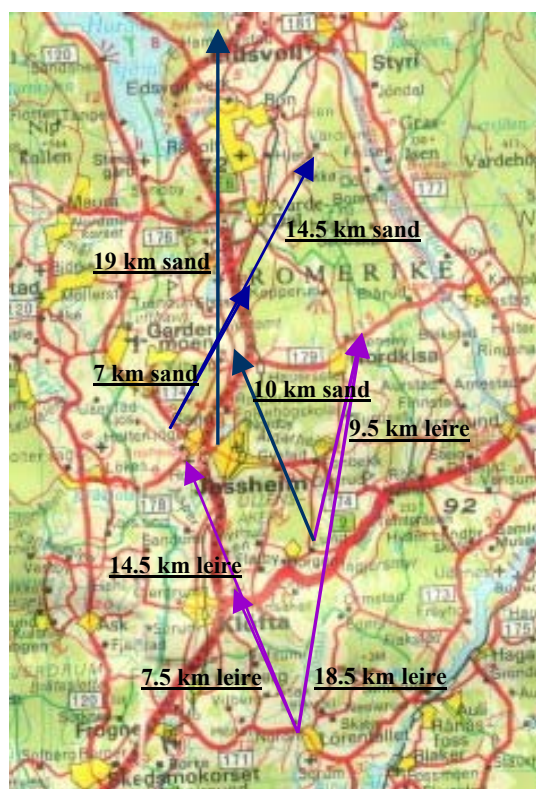




Figur 5.3 Eksempler på svingninger i signalstyrke som antakeligvis skyldes fly. Målingene er gjort på leirgrunn over avstander på hhv 18.5 og 9.5 km.

## 6 MÅLINGER GJORT PÅ FORSKJELLIGE GRUNNFORHOLD

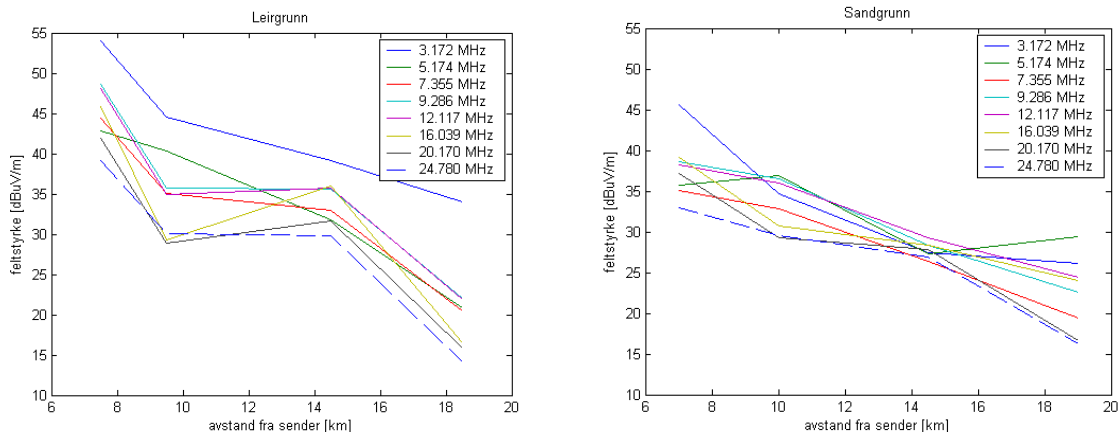
Som innledende målinger for å bli kjent med måleutstyret ble det gjort målinger på leirgrunn og sandgrunn her på Romerike. Hensikten var da å se om vi kunne måle en forskjell på de to grunnforholdene. Hvilke områder som har leirgrunn og hvilke områder som har sandgrunn ble funnet v hj a kvartærgeologisk kart (1:50 000) fra Norges Geologiske undersøkelse (kartblad 1915 I og II).



Figur 6.1 Kartutsnitt som viser hvor de forskjellige målestrekkene ble gjennomført.

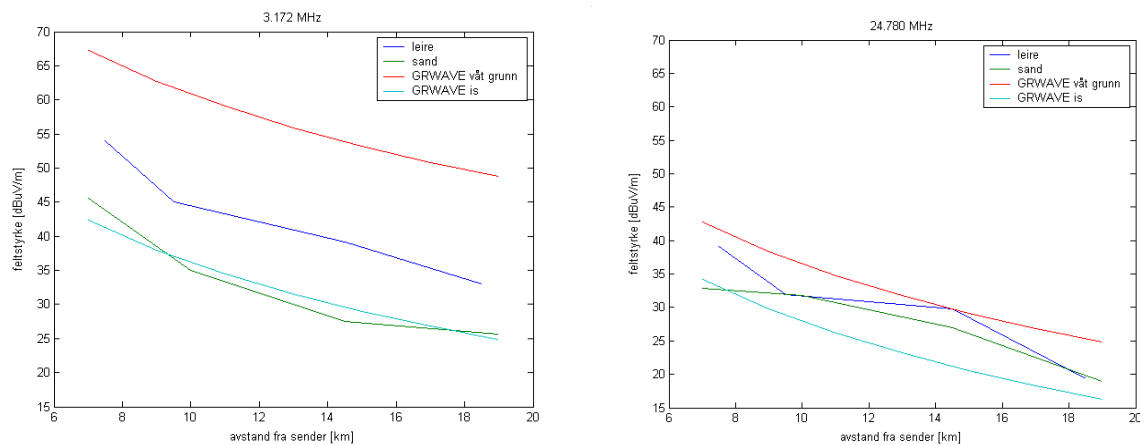
Resultatet av målingene er vist i Figur 6.2. Bortsett fra for 3.172 MHz på leirgrunn er det omtrent samme spredning mellom de forskjellige frekvensene. Målingene på leirgrunn viser

også at det antakelig er bedre forhold på 7.5 og 14.5 km målestrekkene enn det er på 9.5 og 18.5 km målestrekkene. Noe av forklaringen på dette kan være at mottakerbilen stod nede i en ”dal” på de to sistnevnte målingene, mens mottakerbilen var plassert høyere i terrenget ved 7.5 og 14.5 km.



Figur 6.2 Resultat av målinger på leirgrunn og sandgrunn.

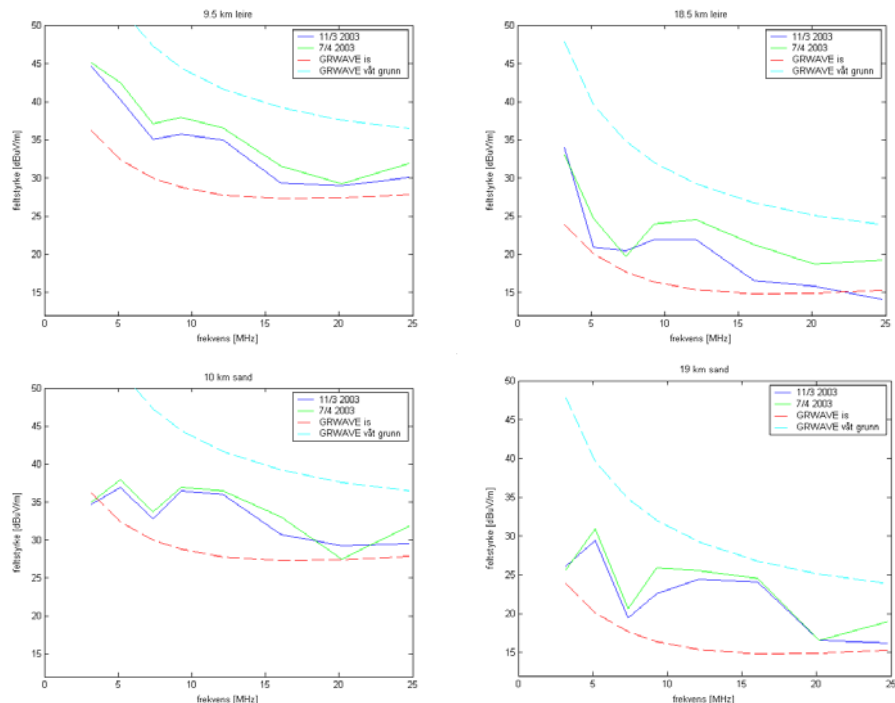
Sammenligning av våre målinger med GRWAVE sine prediksjoner er vist i Figur 6.3 for frekvensene 3.172 MHz og 24.780 MHz. For GRWAVE våt grunn er det brukt relativ permittivitet,  $\epsilon_r = 30$ , og konduktivitet,  $\sigma = 10^{-2} \text{S/m}$ , mens det for GRWAVE is er brukt relativ permittivitet,  $\epsilon_r = 3$ , og konduktivitet,  $\sigma = 10^{-4} \text{S/m}$ . Dette er det samme som for ”veldig tørr grunn”. Målingene er gjort i mars, mens det enda var snø på bakken.



Figur 6.3 Sammenligning av våre målinger samt GRWAVE-prediksjoner for is/veldig tørr grunn og våt grunn for frekvensene 3.172 MHz og 24.780 MHz.

Målingene viser at sandgrunn gir omtrent samme feltstyrke som GRWAVE sine prediksjoner for is/veldig tørr grunn, mens målingene på leire ikke gir samme feltstyrke som GRWAVE sine prediksjoner for våt grunn, spesielt ikke for 3.172 MHz. Det er en gradvis overgang mellom leire og sandjord som går på partikkelstørrelsen. En mellomting mellom leire og sand blir blant annet kalt silt. Det kan hende at leira på Romerike har litt større partikkelstørrelse enn den leira det er referert til i blant annet (1).

Vi gjorde noen av de samme målingene igjen litt seinere på våren, for å teste om telen i bakken hadde hatt noen innflytelse på målingene våre. Resultatet er vist i Figur 6.4. Vi ser at det ikke er stor forskjell på målinger gjort over samme strekning med og uten tele. Telen kan derfor ikke forklare hvorfor våre målinger på tele ikke stemmer overens med GRWAVE sine prediksjoner.



Figur 6.4 Resultat av målinger gjort på samme strekning med og uten tele.

## 7 SJØ-LAND MÅLINGER

Vi ønsket også å undersøke om vi klarte å måle den signalgjenvinningen man vil få, hvis radiobølgene går fra et område med dårlig konduktivitet til et område med mye bedre konduktivitet. Litt upresist kan en si at radiobølgen over land tilpasser seg det store tapet av elektromagnetisk energi assosiert til den lave konduktiviteten i bakken. Det strømmer derfor elektromagnetisk energi nedover i bølgen. Ved overgangen land-sjø, vil konduktiviteten brått øke, og den elektromagnetiske bølgen vil ikke umiddelbart klare å tilpasse seg at tapet av energi mot bakken avtar. Det vil derfor midlertidig bli en opphopning av energi ved overflaten av sjøen. Denne opphopningen av energi blir kalt ”recovery effect”, eller gjenvinningseffekten. For overflatebølger som går fra et område med god konduktivitet til et område med dårligere konduktivitet vil det motsatte skje, den elektromagnetiske bølgen klarer ikke umiddelbart å tilpasse seg at tapet av energi mot bakken øker. På den måte vil en umiddelbart få en ”mangel” på energi ved overflaten, og dette blir kalt ”loss effect”, eller tapseffekten. Gjenvinnings- og tapseffekter er størst rett etter overgangene.

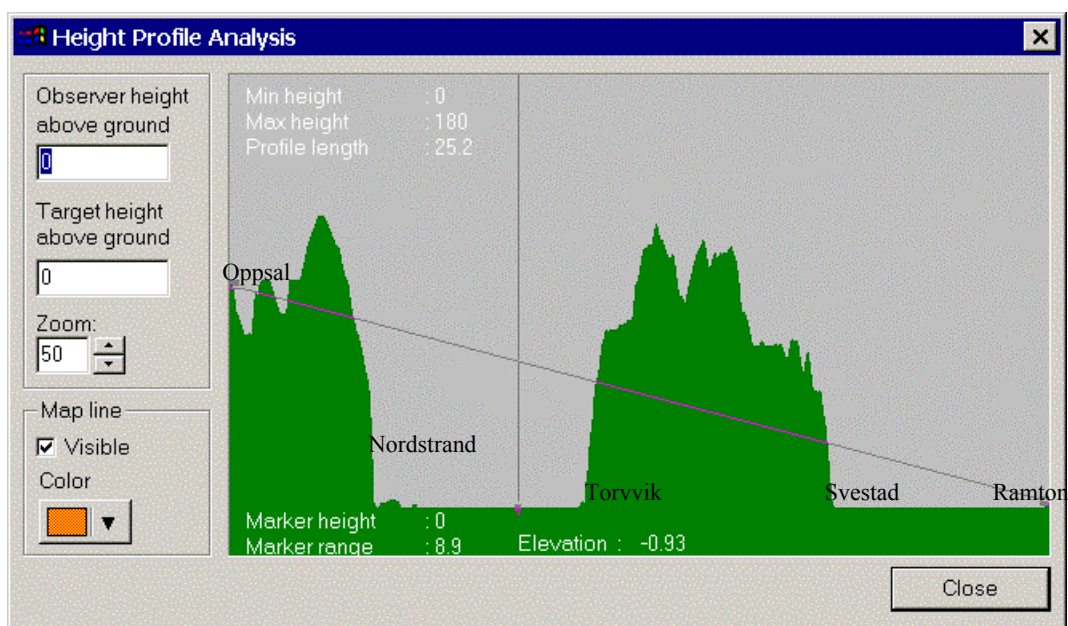
Det ble gjort sjø-land målinger i to områder, en i Indre Oslofjord og en i Fredrikstad-området. Kart over målestrekkene er vist i Figur 7.1 og Figur 7.2.



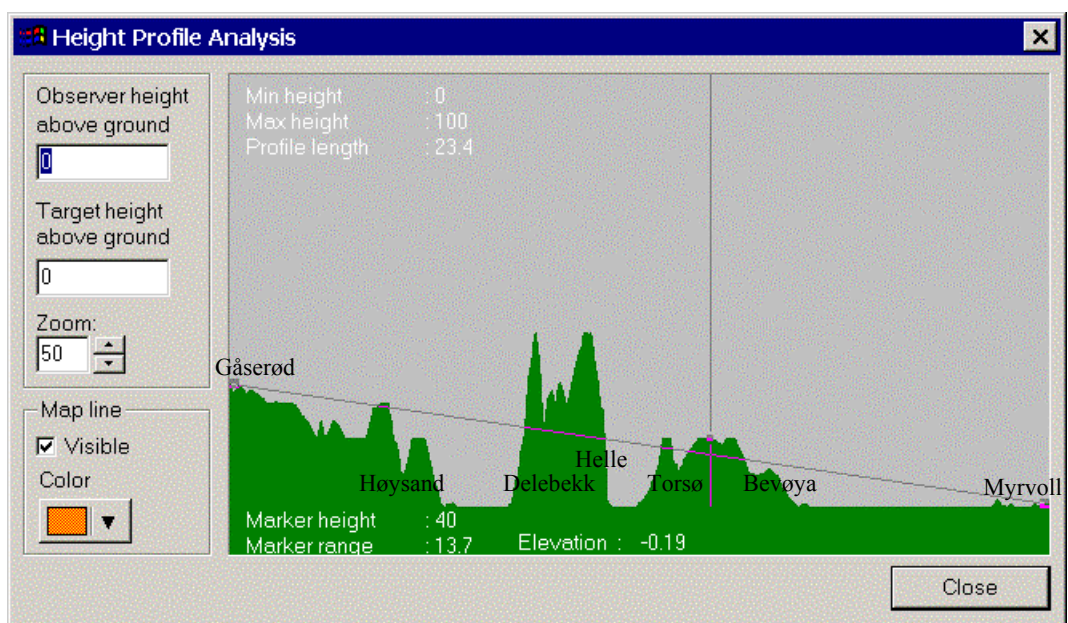
Figur 7.1 Kart over Indre Oslofjord.



Figur 7.2 Kart over Fredrikstad-området.

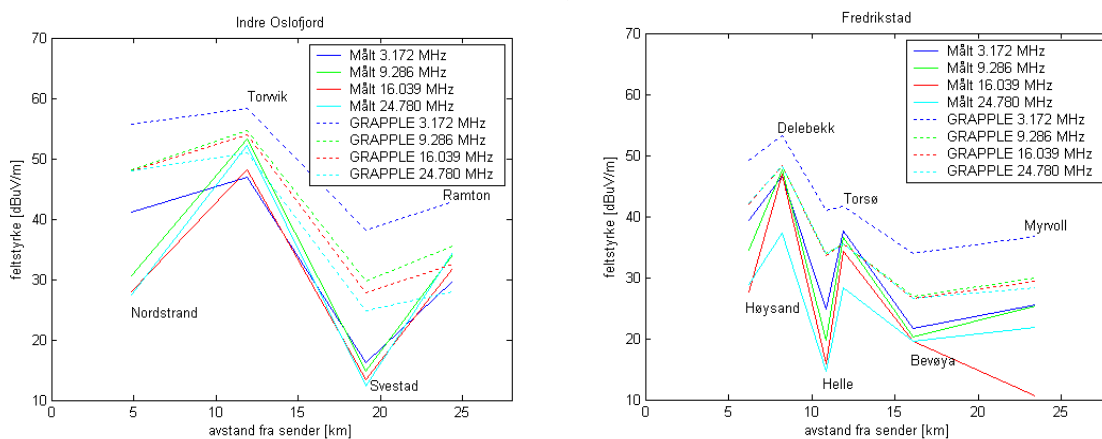


Figur 7.3 Terrenprofil over målestrekket over Indre Oslofjord.



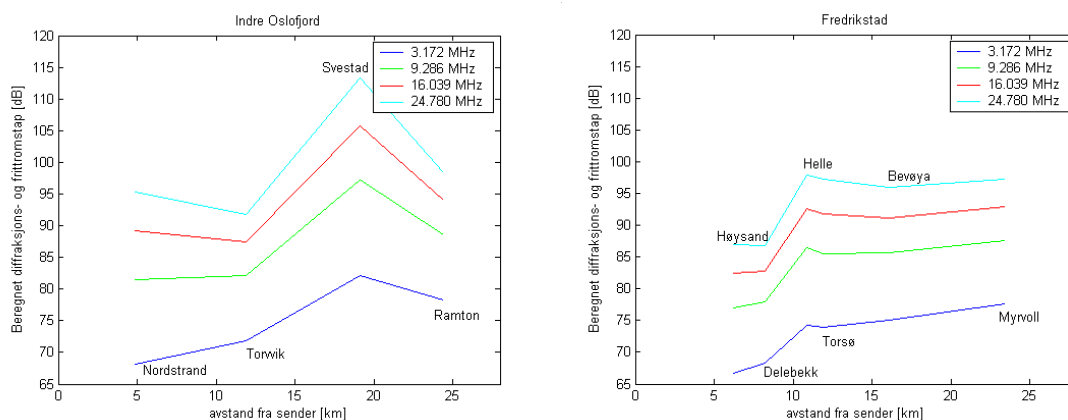
Figur 7.4 Terrenprofil over målestrekket i Fredrikstad-området.

Plottene av prediksjonene til GRAPPLE stemmer dårlig med våre målinger, se Figur 7.5. Noe av årsaken til dette er at konduktivetsdatabasen GRAPPLE benytter har en oppløsning på 500 m. Vi har stått nærmere sjøkanten enn 500 m, slik at mottakerposisjonen ikke alltid ble på land med GRAPPLE. Dette er justert for ved at mottakerposisjonen er ”flyttet” opp på land, men likevel stemmer ikke beregningene. På grunn av ”recovery”- og ”loss”-effekten burde vi ha stått minst 2-3 km fra kystlinjen under målingene, for å unngå de store variasjonene som oppstår med feltstyrken i overgangen sjø-land. Antakelig ville GRAPPLE-prediksjonene da ha stemt bedre.



Figur 7.5 Resultat av målinger gjort over Indre Oslofjord og i Fredrikstad-området, samt resultat av GRAPPLE-prediksjoner.

Som tidligere nevnt har ikke GRAPPLE noen modell for terrenget, og dette kan også være en årsak til at prediksjonene stemmer dårlig. Noe som kan tyde på dette er at prediksjonen over Indre Oslofjord stemmer dårligst, og her var det også brattest. Ved å se på grafene ser en at GRAPPLE heller ikke har så stor variasjon mellom målepunktene som vi har målt. Noe av den store variasjonen kan komme av at det spesielt ved målingene i Indre Oslofjord var veldig bratt terreng. Ved å se på Figur 7.3 og Figur 7.4, ser en at ved mottakerposisjonene Nordstrand og Svestad ble mottakeren stående veldig i skyggen i forhold til senderen. Vi beregnet derfor diffraksjons- og frittromstapet for å se om dette kunne forklare noe av forskjellen. Men, som Figur 7.6 viser, så er ikke variasjonen i dette tapet mellom mottakerposisjonene så stor at dette alene kan forklare forskjellen.



Figur 7.6 Beregnet diffraksjons- og frittromstap for målingene gjort over Indre Oslofjord og i Fredrikstad-området.

I forbindelse med diskusjonen av GRAPPLE er det verdt å nevne at dette prediksjonsverktøyet bruker Millingtons metode (9) når det er overganger mellom forskjellige grunnforhold. Kort fortalt går denne metoden ut på at man beregner feltstyrken ved å dele opp strekningen ved de

forskjellige overgangene, og bruker ITU-kurvene (6) evt. GRWAVE til å beregne feltstyrken for hver enkelt delstrekning. Dette gjøres for begge retninger mellom sender og mottaker, d v s både for tilfellet at signalet går fra sender til mottaker og for tilfellet at signalet går fra mottaker til sender. Deretter beregner man gjennomsnittet mellom disse. Resiprositetsprinsippet blir derfor oppfylt, samtidig som det viser seg at metoden stemmer bra i praksis.

## 8 TERRENGMÅLINGER

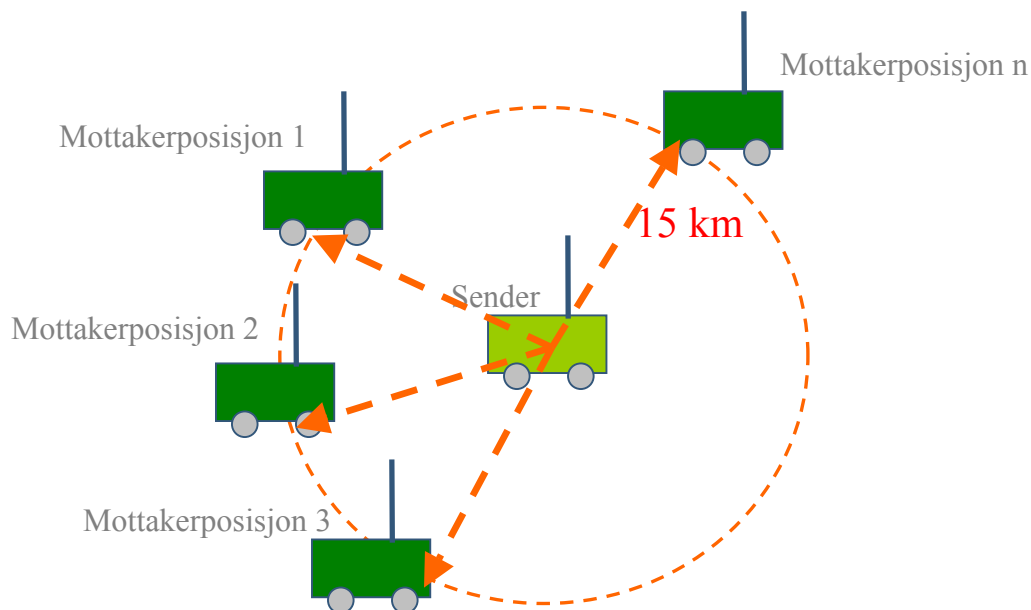
Det ble gjort to forskjellige typer terrengmålinger. Det ene har vi kalt sirkelmålinger, mens det andre har vi kalt linjemålinger.

### 8.1 Sirkelmålinger

Ved sirkelmålingene plasserte vi senderen i sentrum, mens mottakeren ble flyttet rundt i en sirkel rundt senderen. Avstanden til senderen var tilnærmet konstant, og vi valgte den faste avstanden til å være omtrent 15 km. På denne måten ble avstandstapet tilnærmet konstant, og hvis vi i tillegg antok tilnærmet like grunnforhold, ville vi sitte igjen med bare terrengeffekten. Ved at senderen stod fast ville i tillegg forhold tilhørende senderen kunne elimineres for målinger som ble foretatt i samme område. Det ble foretatt sirkelmålinger i fire forskjellige områder. Oversikt over disse er vist i Tabell 8.1.

Område:	Antall målestrekk:	Høydeforskjeller opp til:
Totenåsen	8	680 m.
Nannestad	5	470 m.
Bjørkelangen	7	250 m.
Odalen	8	330 m.

Tabell 8.1 Oversikt over områdene hvor det ble foretatt sirkelmålinger.

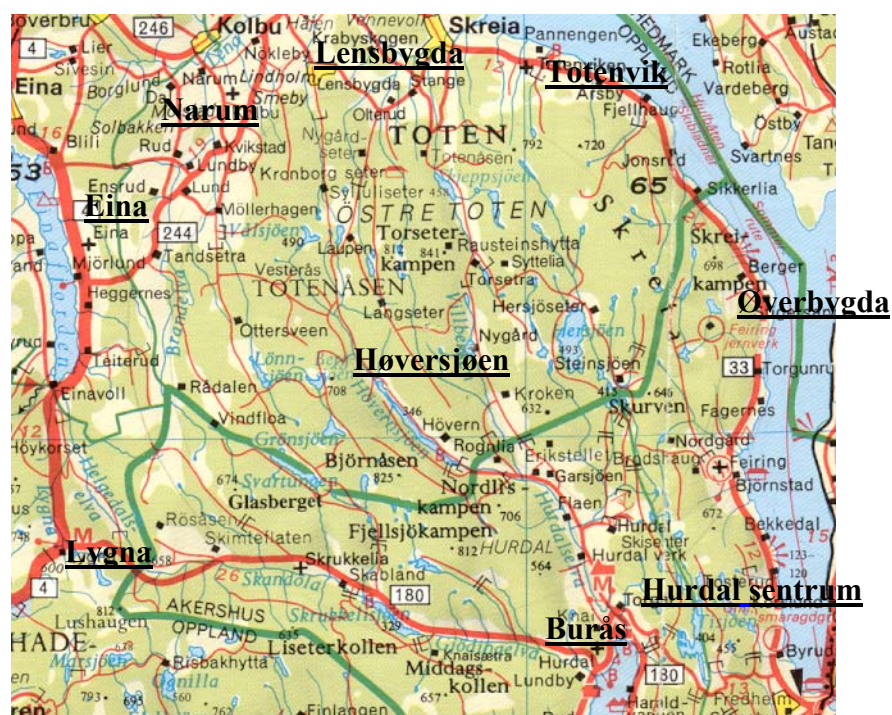


Figur 8.1 Prinsippet for sirkelmålinger

For hver sirkelmåling er det vist en tabell over enkelte data knyttet til hvert målestrekk. Foruten stedsnavn og posisjon angitt i "WGE Military Grid Reference System", vises "Høyde" som angir høyden over havet til sender-/mottakerposisjonen, "Avstand s.-m." som angir avstanden mellom sender og mottaker, "Min. høyde" og "Maks høyde" som angir henholdsvis laveste og høyeste punkt mellom sender og mottaker, mens "Vinkel s.-m.", "Cl. angle sender" og "Cl. angle mottaker" blir beskrevet nærmere i kapittel 9.1.

Terrengprofiler over de forskjellige målestrekkene er funnet ved hjelp av kartdatabasen MARIA (14), og er vist i Appendix A.

### 8.1.1 Sirkelmåling i Totenåsen



Figur 8.2 Kartutsnitt som viser området i Totenåsen hvor det ble foretatt en sirkelmåling. Senderen stod ved Høversjøen.

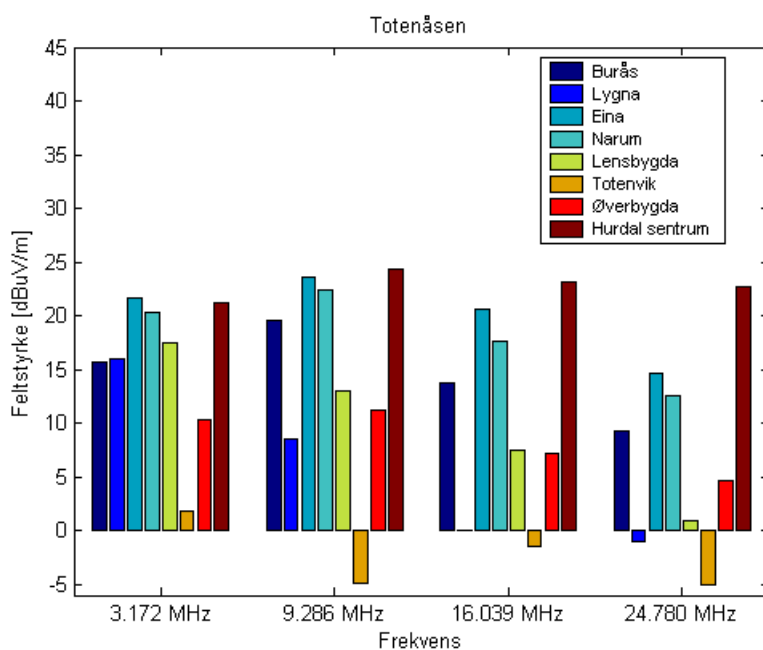
Figur 8.2 viser et kartutsnitt over hvor senderen var plassert ved Høversjøen og hvor de forskjellige mottakerposisjonene var ved målinger i Totenåsen. Tabell 8.2 viser noen data over målestrekkene.



Sted	Posisjon	Høyde [m]	Avstand s.-m. [km]	Min. høyde [m]	Maks. høyde [m]	Vinkel s.-m. [°]	Cl.angle sender [°]	Cl.angle mottaker [°]
Høversjøen	32V 060253 671163	380						
Burås	32V 061225 670007	237	15.1	217	634	-0.5	1.5	7.8
Lygna	32V 059023 670274	622	15.1	380	703	0.9	18.3	2.1
Eina	32V 059002 671940	411	14.7	380	600	0.1	8.2	1.2
Narum	32V 059286 672324	382	15.1	343	517	0.0	3.7	1.0
Lensbygda	32V 059925 672628	275	15.0	275	528	-0.4	12.2	3.8
Totenvik	32V 060943 672548	133	15.4	133	817	-0.9	17.0	6.5
Øverbygda	32V 061873 671440	419	16.4	380	690	0.1	8.4	5.7
Hurdal sentrum	32V 061371 670172	200	14.9	200	701	-0.7	2.1	5.9

Tabell 8.2 Noen data over sirkelmålingene gjort i Totenåsen.

Resultatet av disse målingene er vist i Figur 8.3. Målingene gjort i Totenvik var under støygulvet, og er derfor ikke representative for det mottatte signalet. Utfra terrenprofilene vist i Appendix A ser en at det var svært bratt ved senderen i retning Totenvik og Lygna. Dette kan være grunnen til at den målte feltstyrken var lav her. Ved Eina, Narum og Hurdal sentrum ble det målt høy feltstyrke ved alle frekvensene. Det er også tydelig at variasjonen mellom de forskjellige målestrekkene blir større ved høyere frekvens.



Figur 8.3 Resultat av sirkelmålingene gjort i Totenåsen. Plottet angir gjennomsnittlig feltstyrke ved hver mottakerposisjon.

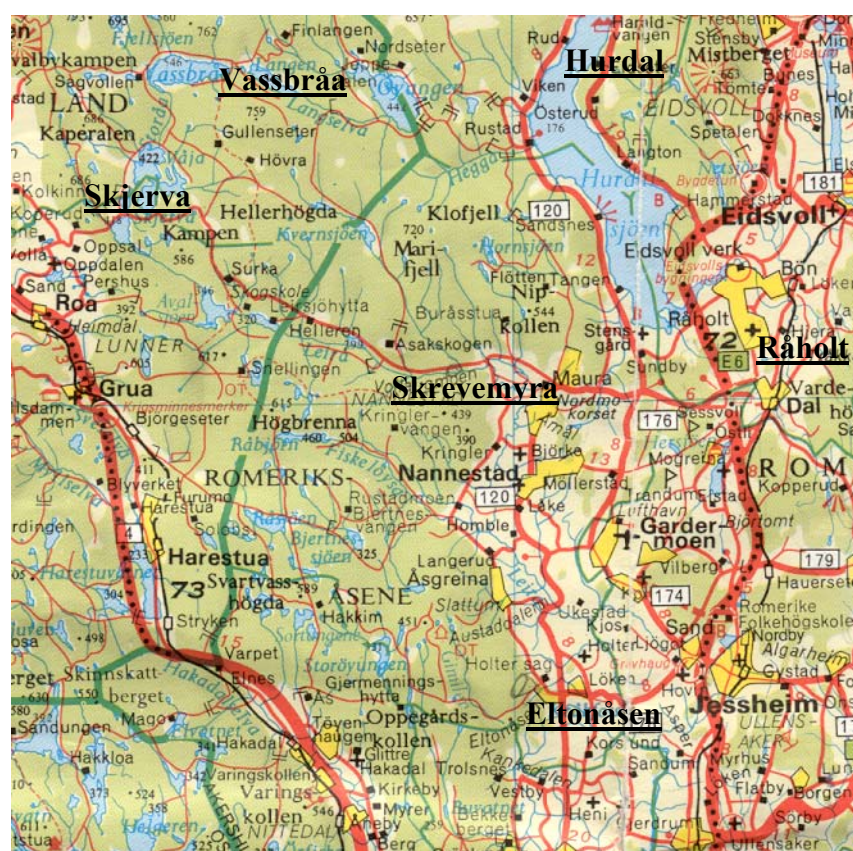
### 8.1.2 Sirkelmåling i Nannestad

Figur 8.4 viser et kartutsnitt over hvor senderen var plassert ved Skrevemyra og hvor de forskjellige mottakerposisjonene var ved målinger i Nannestad. Tabell 8.3 viser noen data over målestrekkene.

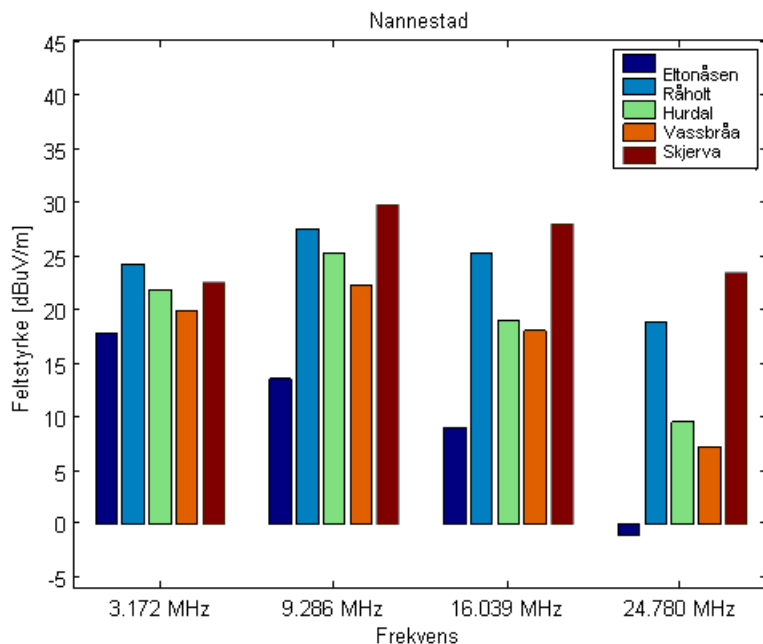
Sted	Posisjon	Høyde [m]	Avstand s.-m. [km]	Min. høyde [m]	Maks. høyde [m]	Vinkel s.-m. [°]	Cl.angle sender [°]	Cl.angle mottaker [°]
Skrevemyra	32V 060556 668175	297						
Eltonåsen	32V 061153 666798	201	15.0	190	460	-0.4	6.6	7.2
Råholt	32V 062056 668414	191	15.1	180	325	-0.4	1.0	3.4
Hurdal	32V 061172 669561	221	15.1	182	649	-0.3	3.7	3.2
Vassbråa	32V 059795 669477	546	15.1	297	692	0.9	2.8	3.1
Skjerva	32V 059258 668899	475	14.8	297	550	0.7	1.4	1.0

Tabell 8.3 Noen data over sirkelmåling gjort i Nannestad.

Resultatet av disse målingene er vist i Figur 8.5. Målingene gjort på Råholt og Skjerva viste høy feltstyrke, mens målingene gjort ved Eltonåsen var spesielt lave. En ser at forskjellen mellom de forskjellige målestrekkene blir større ved høyere frekvens også her.



Figur 8.4 Kartutsnitt som viser området i Nannestad hvor det ble foretatt en sirkelmåling. Senderen stod ved Skrevemyra.



Figur 8.5 Resultat av sirkelmålingene gjort i Nannestad. Plottet angir gjennomsnittlig feltstyrke ved hver mottakerposisjon.

### 8.1.3 Sirkelmåling i Bjørkelangen



Figur 8.6 Kartutsnitt som viser området i Bjørkelangen hvor det ble foretatt en sirkelmåling. Senderen stod ved tettstedet Bjørkelangen.

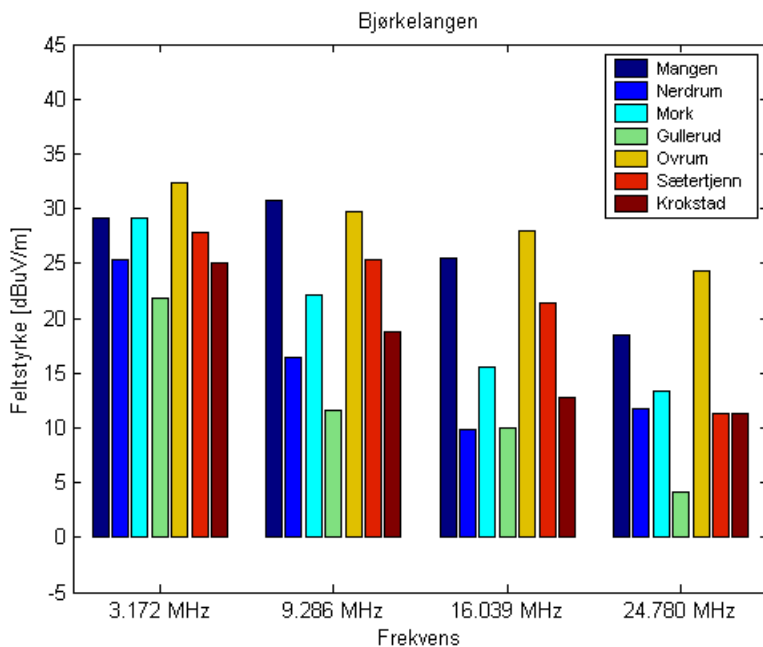
Figur 8.6 viser et kartutsnitt over hvor senderen var plassert ved tettstedet Bjørkelangen og hvor de forskjellige mottakerposisjonene var ved målinger i dette området. Tabell 8.4 viser noen data

over målestrekkene.

Sted	Posisjon	Høyde [m]	Avstand s.-m. [km]	Min. høyde [m]	Maks. høyde [m]	Vinkel s.-m. [°]	Cl.angle sender [°]	Cl.angle mottaker [°]
Bjørkelangen	32V 064328 664184	138						
Mangen	32V 065284 665343	254	15.0	136	381	0.4	2.3	0.8
Nerdrum	32V 063206 665211	160	15.2	136	262	0.1	5.7	2.7
Mork	32V 062974 664846	152	15.0	135	280	0.1	7.4	0.6
Gullerud	32V 062873 663877	227	14.8	138	380	0.3	5.9	2.3
Ovrum	32V 063567 662864	165	15.2	124	228	0.1	1.1	2.1
Sætertjenn	32V 064929 662806	180	15.0	137	290	0.2	1.9	1.2
Krokstad	32V 065832 664329	230	15.1	137	311	0.3	2.2	1.0

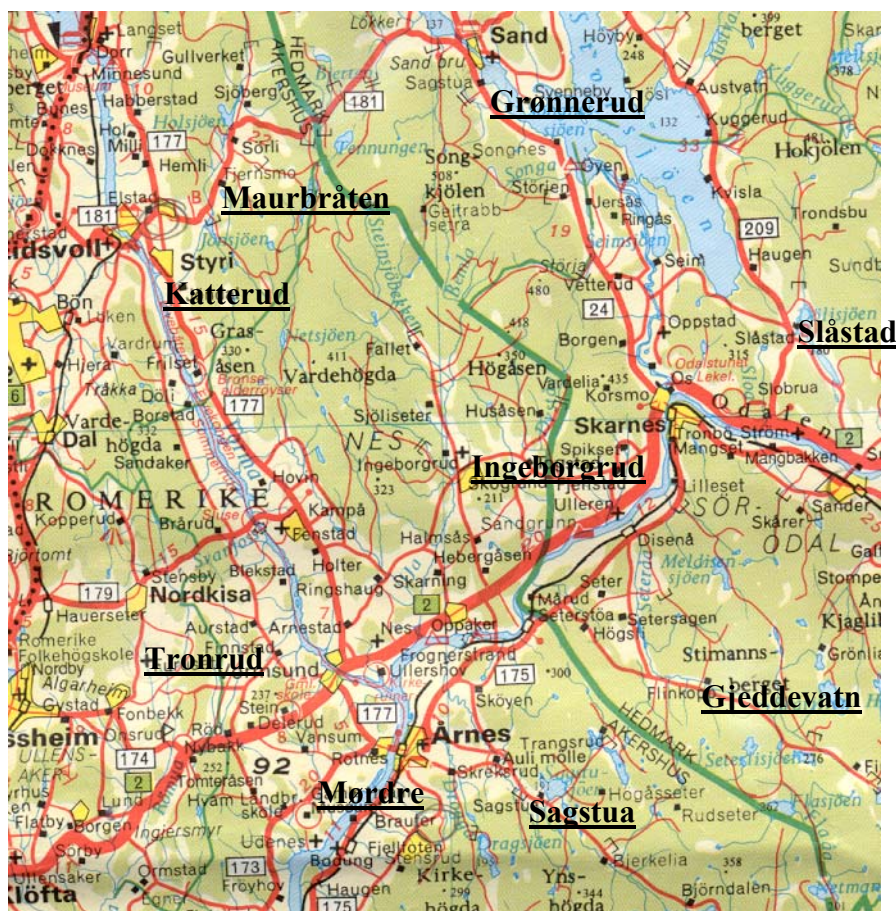
Tabell 8.4 Noen data over sirkelmåling gjort i Bjørkelangen.

Resultatet av disse målingene er vist i Figur 8.7, og her målte vi generelt høy feltstyrke, spesielt ved Mangen og Ovrum, mens Gullerud hadde lavest feltstyrke.



Figur 8.7 Resultat av sirkelmålingene gjort ved Bjørkelangen. Plottet angir gjennomsnittlig feltstyrke ved hver mottakerposisjon.

## 8.1.4 Sirkelmåling i Odalen



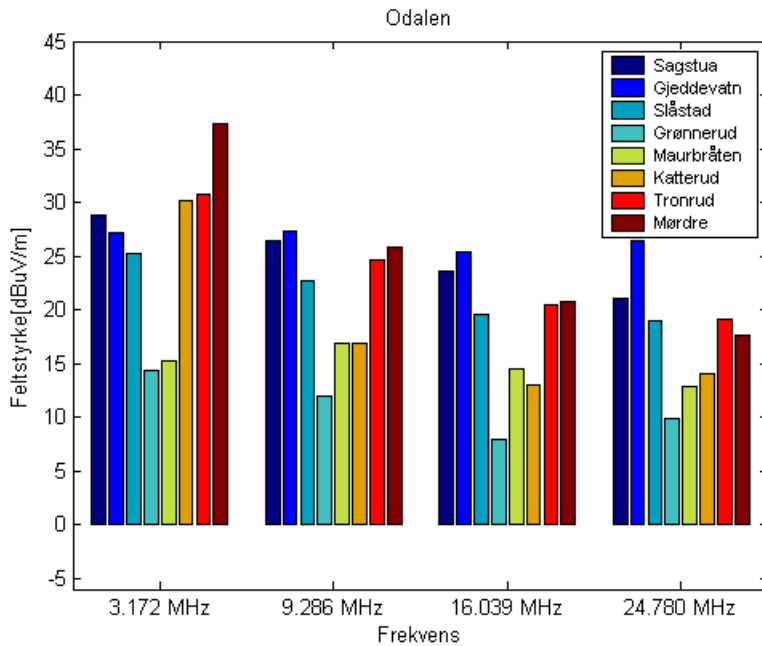
Figur 8.8 Kartutsnitt som viser området i Odalen hvor det ble foretatt en sirkelmåling. Senderen stod ved Ingeborgrud kirke.

Figur 8.8 viser et kartutsnitt over hvor senderen var plassert ved Ingeborgrud og hvor de forskjellige mottakerposisjonene var ved målinger i Odalen. Tabell 8.5 viser noen data over målestrekkene.

Sted	Posisjon	Høyde [m]	Avstand s.-m. [km]	Min. høyde [m]	Maks. høyde [m]	Vinkel s.-m. [°]	Cl.angle sender [°]	Cl.angle mottaker [°]
Ingeborgrud	32V 063933 668016	141						
Sagstua	32V 064275 666548	199	15.0	136	220	0.2	0.8	0.5
Gjeddevatn	32V 065062 667013	200	15.0	138	206	0.2	2.0	0.2
Slåstad	32V 065326 668586	170	15.0	139	205	0.1	1.4	1.7
Grønnerud	32V 064123 669512	134	15.0	134	460	0.0	2.1	5.0
Maurbråten	32V 062882 669104	220	15.1	140	357	0.3	1.8	3.0
Katterud	32V 062660 668844	173	15.1	140	383	0.1	2.2	2.4
Tronrud	32V 062728 667121	160	15.0	133	228	0.1	1.6	1.6
Mørde	32V 063349 666606	140	15.2	132	164	0.0	0.2	2.3

Tabell 8.5 Noen data over sirkelmåling gjort i Odalen.

Resultatet av disse målingene er vist i Figur 8.7, og her målte vi også generelt høy feltstyrke. Bare ved Grønnerud målte vi en relativt lav feltstyrke.



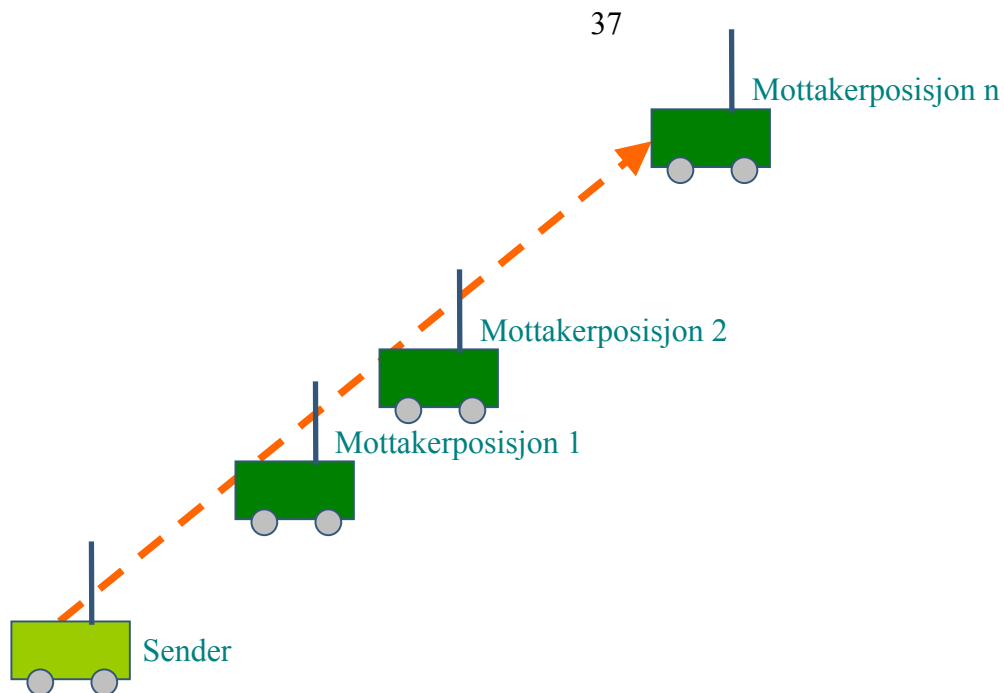
Figur 8.9 Resultat av sirkelmålingene gjort i Odalen. Plottet angir gjennomsnittlig feltstyrke ved hver mottakerposisjon.

## 8.2 Linjemålinger

Det ble også foretatt det vi har kalt ”linjemålinger”. I hvert område hvor dette ble gjort stod senderen stille, mens mottakeren ble flyttet radielt utover. Figur 8.10 viser prinsippet for linjemålingene, mens Tabell 8.6 viser en oversikt over områdene hvor dette ble foretatt. Terrengprofiler over linjemålingene er vist i Appendix A.

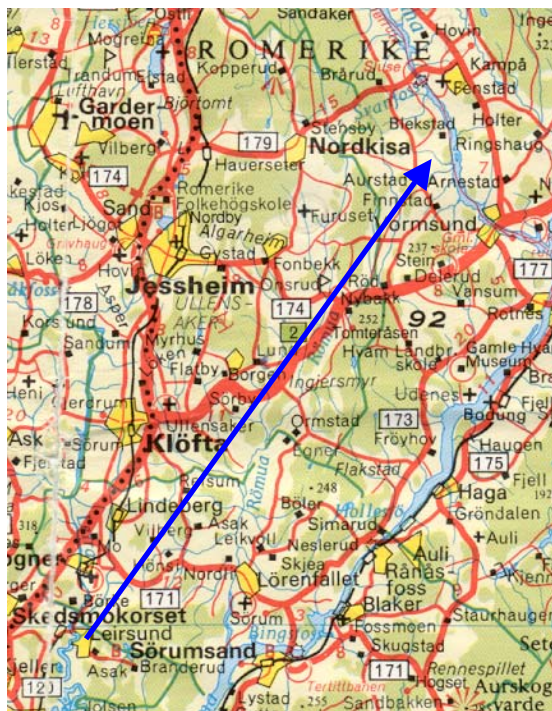
Område:	Antall målestrekk:	Høydeforskjeller opp til:
Romerike	8	80 m.
Nannestad	7	170 m.
Hurdal	7	390 m.

Tabell 8.6 Oversikt over områdene hvor det ble foretatt linjemålinger.



Figur 8.10 Prinsippet for linjemålinger.

## 8.2.1 Linjemåling på Romerike



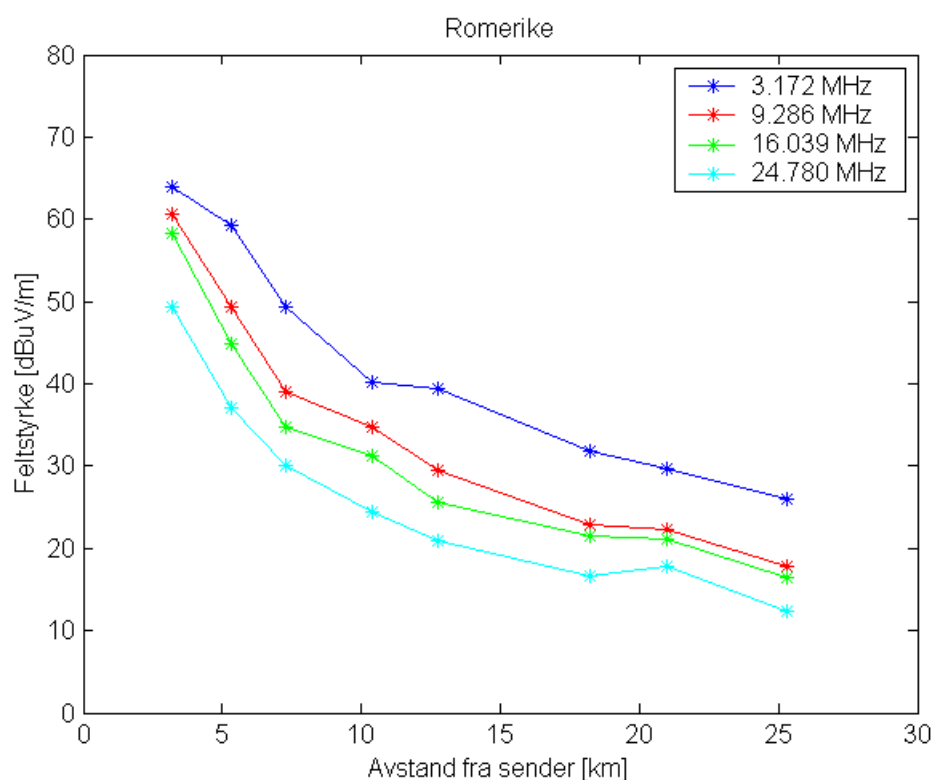
Figur 8.11 Kartutsnitt over linjemåling på Romerike. Langs den blå pila ble det foretatt målinger.

Figur 8.11 viser et kartutsnitt over hvor senderen var plassert ved Leirsund og langs hvilken linje de forskjellige mottakerposisjonene var ved målinger på Romerike. Tabell 8.7 viser noen data over målestrekkene.

Sted	Posisjon	Høyde [m]	Avstand s.-m. [km]	Min. høyde [m]	Maks. høyde [m]	Vinkel s.-m. [°]	Cl.angle sender [°]	Cl.angle mottaker [°]
Leirsund	32V 061693 665301	120						
Yssi	32V 061896 665547	146	3.2	120	147	0.5	2.0	0.4
Vilberg	32V 062015 665718	168	5.3	120	172	0.5	''	0.6
Omdal	32V 062131 665894	158	7.3	120	184	0.3	''	0.6
Stokker	32V 062289 666145	140	10.3	120	199	0.1	''	0.6
Inngjerd	32V 062422 666343	136	12.7	120	200	0.1	''	0.4
Onsrud	32V 062748 666790	160	18.2	120	198	0.1	''	0.1
Østberg	32V 062896 667024	160	21.0	120	200	0.1	''	0.1
Nordby	32V 063144 667381	163	25.3	120	200	0.1	''	0.0

Tabell 8.7 Noen data fra linjemåling gjort på Romerike.

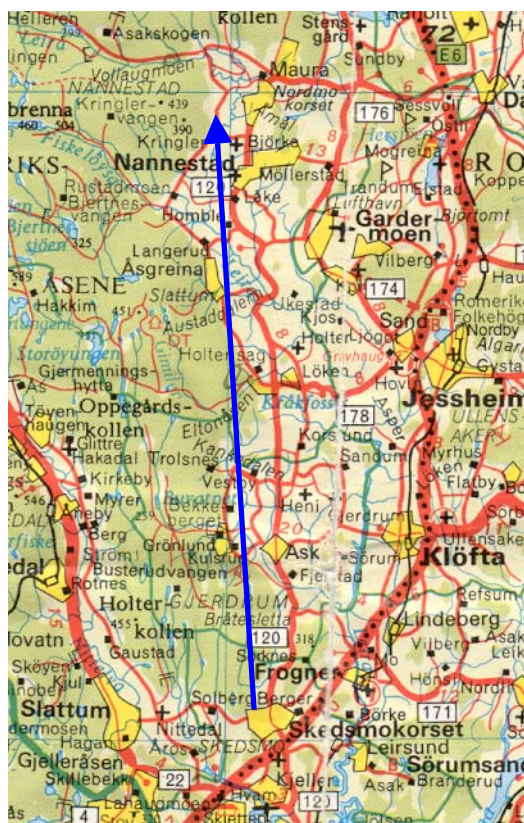
Resultatet av disse målingene er vist i Figur 8.12, og som figuren viser ble det her målt en relativt jevn nedgang i feltstyrke. Dette kan sees i sammenheng med at målingene ble gjort over et relativt flatt område.



Figur 8.12 Resultat av linjemåling på Romerike. Plottet angir gjennomsnittlig feltstyrke ved hver mottakerposisjon.



## 8.2.2 Linjemåling i Nannestad



Figur 8.13 Kartutsnitt over linjemåling i Nannestad. Langs den blå pila ble det foretatt målinger.

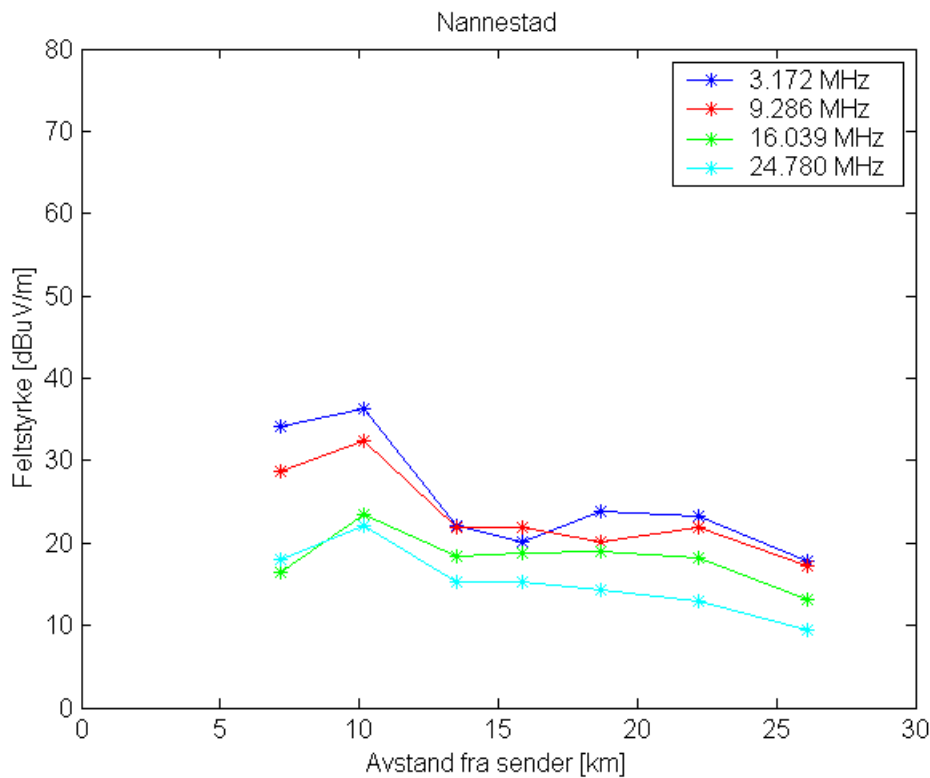
Figur 8.13 viser et kartutsnitt over hvor senderen var plassert ved Tæruddalen og langs hvilken linje de forskjellige mottakerposisjonene var ved målinger i Nannestad. Tabell 8.8 viser noen data over målestrekkene.

Sted	Posisjon	Høyde [m]	Avstand s.-m. [km]	Min. høyde [m]	Maks. høyde [m]	Vinkel s.-m. [°]	Cl.angle sender [°]	Cl.angle mottaker [°]
Tæruddalen	32V 061245 665421	187						
Kulsrud	32V 061171 666112	184	6.9	180	283	0.0	1.1	6.1
Eikeberg	32V 061159 666441	160	10.2	160	261	-0.2	''	1.2
Eltonåsen	32V 061128 666779	200	13.6	160	263	0.1	''	4.0
Ånum	32V 061122 667004	200	15.8	160	257	0.0	''	5.0
Nordby	32V 061089 667295	160	18.8	160	266	-0.1	''	1.7
Nannestad	32V 061028 667629	180	22.1	140	315	0.0	''	1.0
Økri	32V 061017 668036	184	26.2	140	278	0.0	''	0.4

Tabell 8.8 Noen data fra linjemåling gjort i Nannestad.

Resultatet av disse målingene er vist i Figur 8.14. Vi ser at feltstyrken her er lavere enn ved målingene på Romerike, spesielt for de første målingene med kort avstand fra sender. Dette kan sees i sammenheng med at det ved disse målingene var mer kupert terreng. Selv om avstanden øker fra mottakerposisjonen ved Kulsrud til mottakerposisjonen ved Eikeberg, målte vi økende feltstyrke ved alle frekvenser. Dette skyldes antakelig at Kulsrud ligger veldig i skyggen i

forhold til senderen, mens det er mer åpent ved Eikeberg. Diffraksjonstapet er nok derfor større ved Kulsrud. Se terrengprofil i Appendix A.



Figur 8.14 Resultat av linjemåling i Nannestad. Plottet angir gjennomsnittlig feltstyrke ved hver mottakerposisjon.

### 8.2.3 Linjemåling i Hurdal



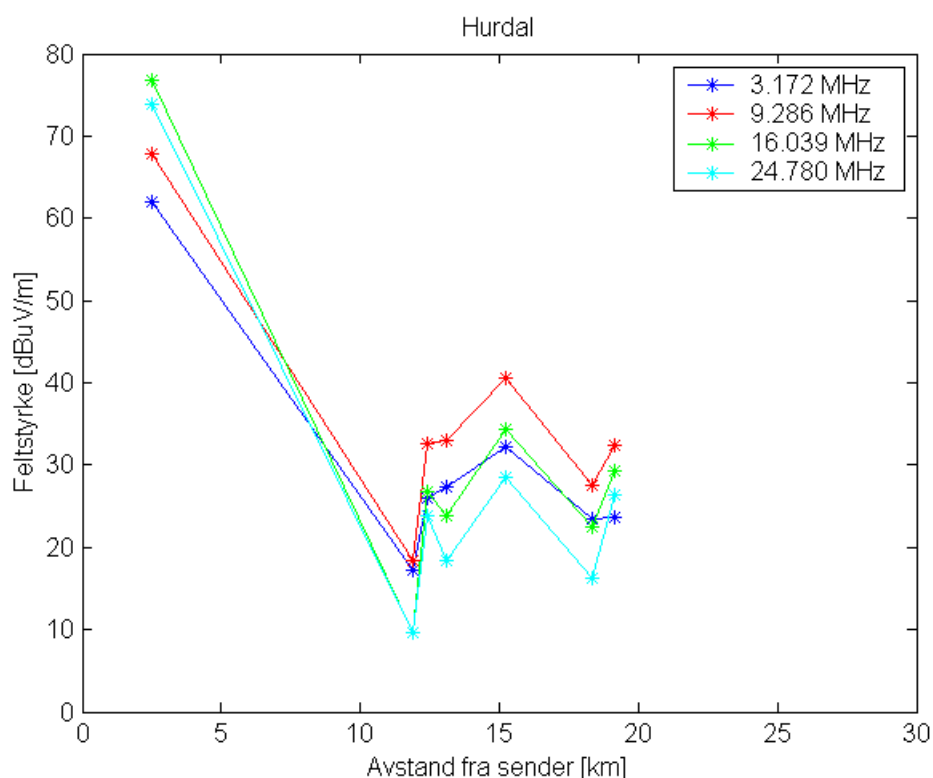
Figur 8.15 Kartutsnitt over linjemåling i Hurdal. Langs den blå pila ble det foretatt målinger.

Figur 8.15 viser et kartutsnitt over hvor senderen var plassert ved Skreihaugen og langs hvilken linje de forskjellige mottakerposisjonene var ved målinger i Hurdal. Tabell 8.9 viser noen data over målestrekkene.

Sted	Posisjon	Høyde [m]	Avstand s.-m. [km]	Min. høyde [m]	Maks. høyde [m]	Vinkel s.-m. [°]	Cl.angle sender [°]	Cl.angle mottaker [°]
Skreihaugen	32V 059488 670145	630						
Skimten	32V 059650 670328	425	2.5	400	630	-4.7	-	-
Gaupåsen	32V 060325 670990	436	11.9	398	740	-0.9	1.2	15.6
Høversjøen	32V 060370 671020	351	12.4	351	742	-1.3	”	13.8
Midtvoll	32V 060383 671099	376	13.1	346	740	-1.1	”	8.9
Anfinnsætra	32V 060542 671258	615	15.3	346	740	-0.1	”	5.9
Garsjøen	32V 060742 671491	502	18.4	346	740	-0.4	”	3.8
Rønningstjern	32V 060795 671556	564	19.2	346	740	-0.2	”	2.0

Tabell 8.9 Noen data over linjemåling gjort i Hurdal.

Resultatet av disse målingene er vist i Figur 8.16. Ved denne linjemålingen varierte feltstyrken mye. Årsaken til dette er nok at vi ved den første målingen hadde frisikt, mens det deretter var veldig kupert terreng. Både ved mottakerposisjonen ved Høversjøen, Anfinnsætra og Rønningstjern målte vi høyere feltstyrke enn ved foregående måling, selv om avstanden økte. Ved å se på terrengprofilen i Appendix A ser en at både ved Anfinnsætra og Rønningstjern er det naturlig å anta at diffraksjonstapet var større ved de foregående målingene ved h h v Midtvoll og Garsjøen, og at dette har gitt en økning i signalet. Når det gjelder Høversjøen derimot er det ikke like lett å finne en forklaring, siden både mottakerposisjonen ved Gaupåsen og ved Høversjøen ligger veldig i skyggen i forhold til senderen ved Skreihaugen. Kanskje kan noe av forklaringen være at mottakerbilen stod ved en bløt myr nede ved vannet ved Høversjøen, og at dette har gitt en signalgjenvinning som beskrevet i kapittel 7.



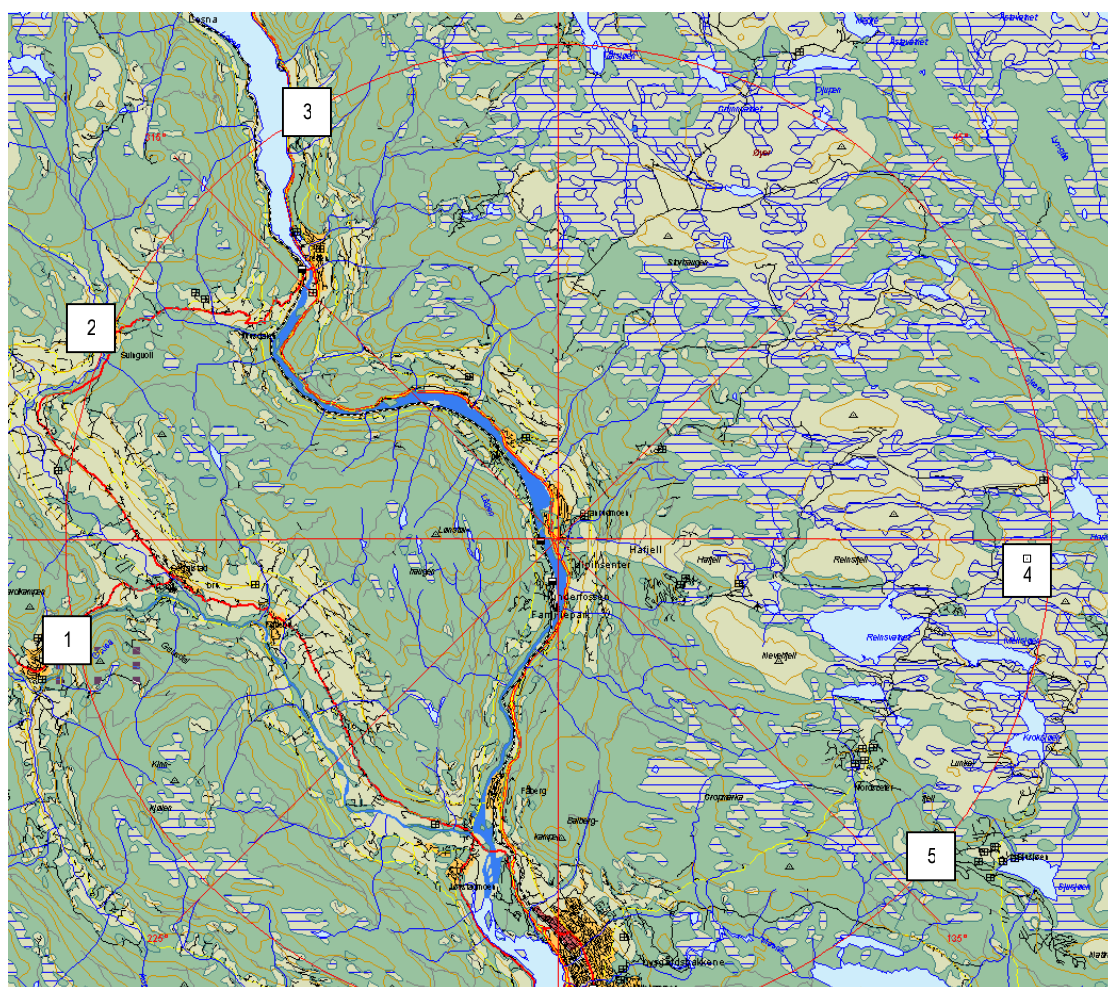
Figur 8.16 Resultat av linjemåling i Hurdal. Plottet angir gjennomsnittlig feltstyrke ved hver mottakerposisjon.

### 8.3 Studentmålinger i Gudbrandsdalen

Vi hadde også noen studenter fra Jørstadmoen som gjorde noen målinger for oss. Utgangspunktet til studentene var å gjøre noen sirkelmålinger i Gudbrandsdalen, men på grunn av få veier som mottakerbilen er avhengig av, ble ikke avstanden tilnærmet konstant og lik 15 km. Det er også en viss usikkerhet knyttet til de eksakte posisjonene som sender- og mottakerbil hadde. I tillegg hadde de problemer med at det i enkelte tilfeller på 9.286 MHz dukket opp støy. Denne opptrådte som en firkantlignende puls. Gjennomsnittsverdien for disse målingene er laget på et manuelt anslag. Likevel er dette interessante målinger gjort i veldig kupert terreng. Kartutsnitt og resultater er hentet fra studentenes hovedprosjektoppgave (10). Terrengprofiler over målingene er vist i Appendix A.

Legg også merke til at skaleringen på y-aksen på resultatplottene er høyere enn for våre målinger.

#### 8.3.1 Studentmåling i Øyer



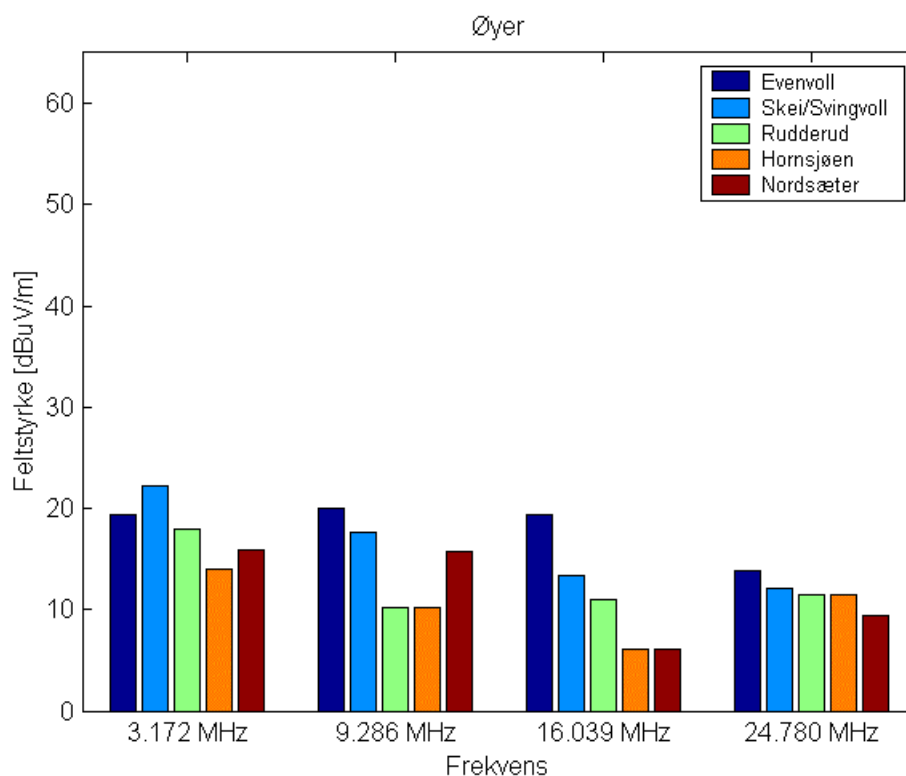
Figur 8.17 Kartutsnitt over studentmålinger gjort i Øyer.

Figur 8.17 viser et kartutsnitt over hvor senderen var plassert ved Øyer og hvor de forskjellige mottakerposisjonene var ved målinger i denne regionen. Tabell 8.10 viser noen data over målestrekkene.

Sted	Posisjon	Høyde [m]	Avstand s.-m. [km]	Min. høyde [m]	Maks. høyde [m]	Vinkel s.-m. [°]	Cl.angle sender [°]	Cl.angle mottaker [°]
Øyer	32V 057763 678993	200						
Evenvoll (1)	32V 05625 6787	390	15.3	172	770	0.6	13.6	2.1
Skei/Svingvoll (2)	32V 05625 6798	540	17.1	172	630	1.1	8.0	0.4
Rudderud (3)	32V 05693 6807	775	19.0	172	877	1.7	4.4	0.6
Hornsjøen (4)	32V 05910 6792	918	13.5	199	1039	3.0	14.1	2.2
Nordsæter (5)	32V 05870 6784	828	11.1	199	1023	3.2	12.8	0.7

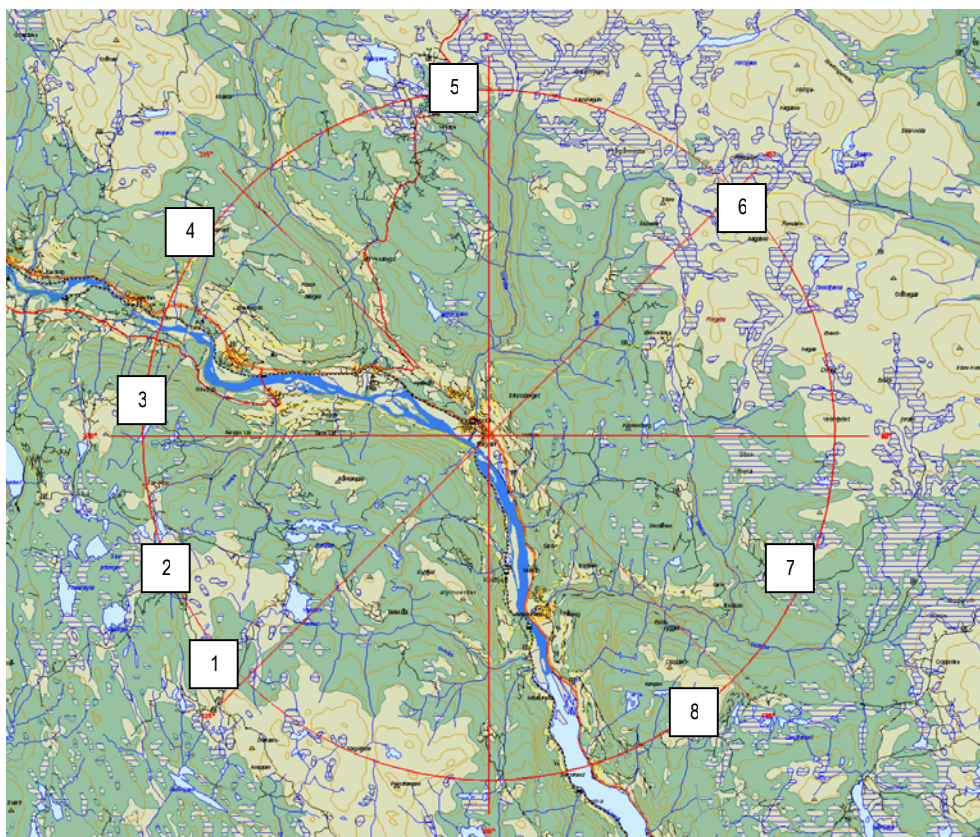
Tabell 8.10 Noen data fra studentmålingene i Øyer. Posisjon på kartet står i parentes.

Gjennomsnittlig feltstyrke er plottet i Figur 8.18. Mottatt feltstyrke var generelt høyest ved Evenvoll og Skei/Svingvoll, mens det var lavest ved Hornsjøen og Nordsæter, på tross av at målestrekkene her var kortest. Dette kan stemme med at terrenget var mer kupert ved de to sistnevnte. Mottatt feltstyrke var også generelt lavere enn hva vi målte ved våre sirkelmålinger, bortsett fra noen målinger i Hurdal. Dette stemmer også med at terrenget var flatere der vi målte.



Figur 8.18 Resultat av studentmålingene i Øyer. Plottet angir gjennomsnittlig feltstyrke ved hver mottakerposisjon.

## 8.3.2 Studentmåling i Ringebru



Figur 8.19 Kartutsnitt over studentmålinger gjort i Ringebru.

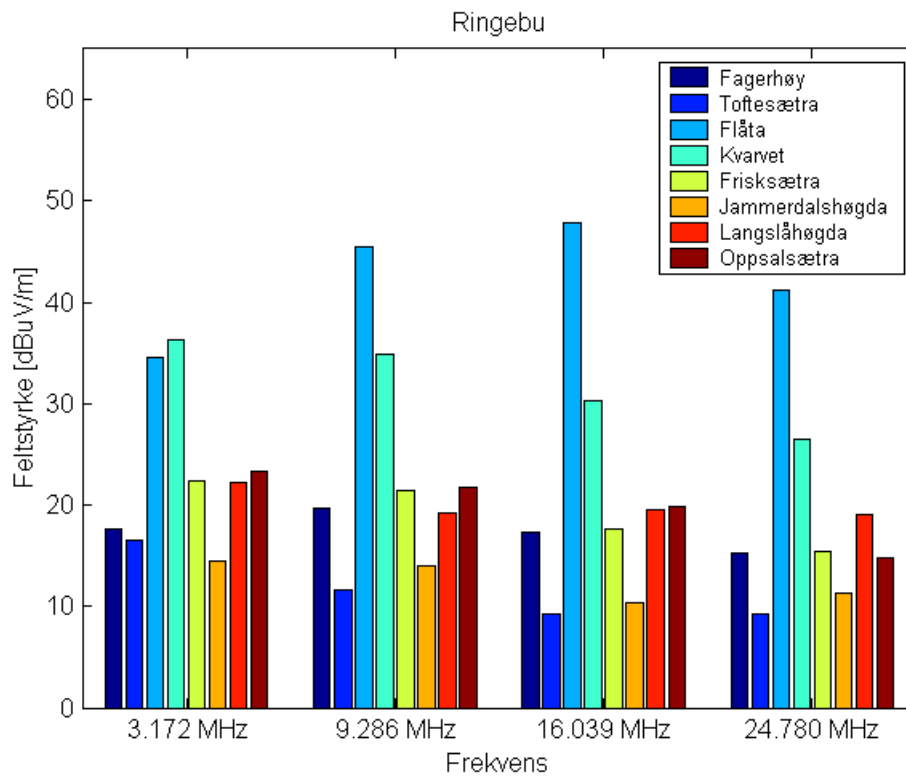
Figur 8.19 viser et kartutsnitt over hvor senderen var plassert i Ringebru og hvor de forskjellige mottakerposisjonene var ved målinger i denne regionen. Tabell 8.11 viser noen data over målestrekene.

Sted	Posisjon	Høyde [m]	Avstand s.-m. [km]	Min. høyde [m]	Maks. høyde [m]	Vinkel s.-m. [°]	Cl.angle sender [°]	Cl.angle mottaker [°]
Ringebru	32V 055987 682201	200						
Fagerhøy (1)	32V 055027 6811	1016	14.6	200	1016	3.1	16.6	-0.3
Toftesætra (2)	32V 054758 681551	937	13.9	200	1095	3.0	13.8	5.9
Flåta (3)	32V 054987 682141	790	10.0	200	790	3.3	6.5	-1.2
Kvarvet (4)	32V 055027 682897	863	11.8	199	941	3.2	4.8	1.7
Frisksætra (5)	32V 055798 68350	880	13.1	200	989	2.9	9.2	2.9
Jammerdalsløgda (6)	32V 057364 683250	1084	17.3	200	1134	2.9	8.6	3.1
Langslåhøgda (7)	32V 057408 681530	869	15.7	200	983	2.4	6.4	1.0
Oppsalsætra (8)	32V 057431 681049	882	18.4	200	941	2.0	4.7	10.9

Tabell 8.11 Noen data fra studentmålingene i Ringebru. Posisjon på kartet står i parentes.

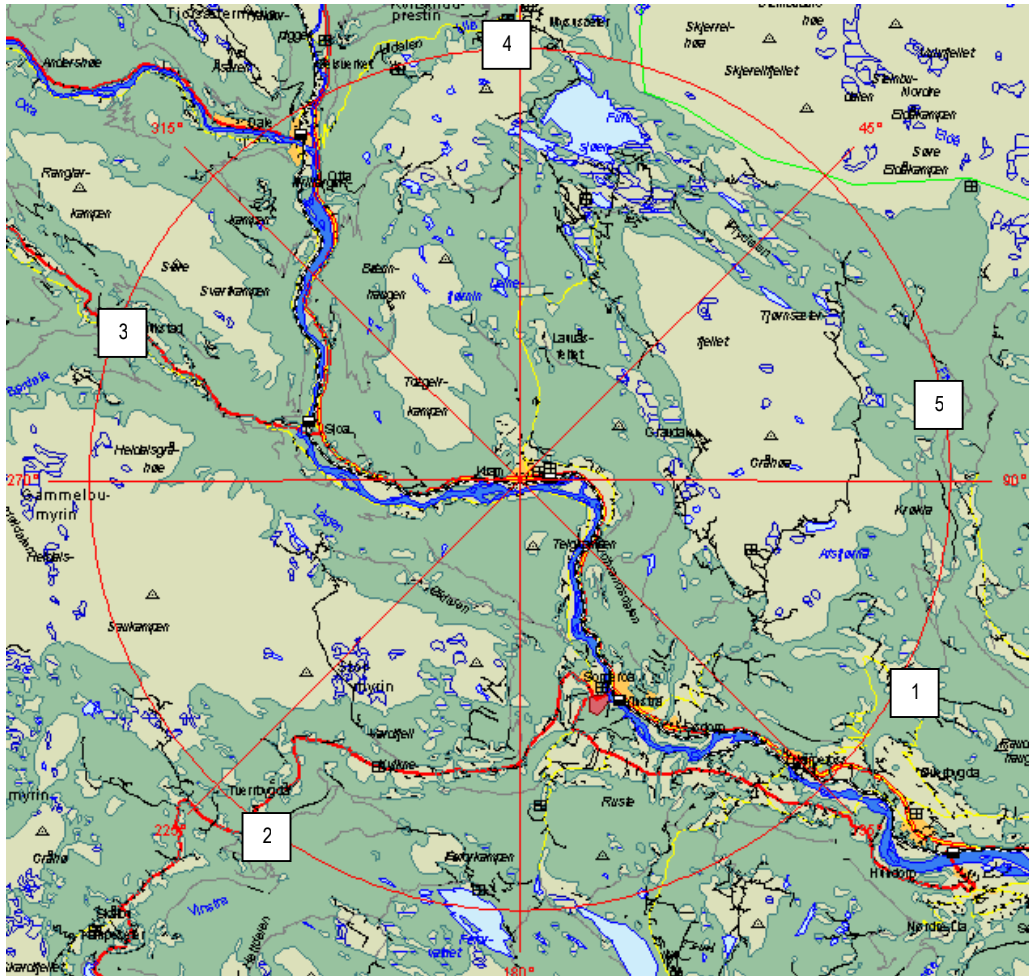
Gjennomsnittlig mottatt feltstyrke er vist i Figur 8.20. De fleste målingene ligger på omtrent samme nivå som målingene gjort ved Øyer, bortsett fra målingene gjort ved Flåta og Kvarvet. I følge Tabell 8.11 var dette svært korte målestrekk, i tillegg til at disse målestrekene tilnærmet fulgte dalen som også inneholdt en elv. Se Figur 8.19. En kan derfor anta at signalet kan ha fulgt

denne banen med både lite terreng og høy konduktivitet.



Figur 8.20 Resultat av studentmålingene i Ringebru. Plottet angir gjennomsnittlig feltstyrke ved hver mottakerposisjon.

### 8.3.3 Studentmåling i Kvam



Figur 8.21 Kartutsnitt over studentmålinger gjort i Kvam.

Figur 8.21 viser et kartutsnitt over hvor senderen var plassert ved Kvam og hvor de forskjellige mottakerposisjonene var ved målinger i denne regionen. Tabell 8.12 viser noen data over målestrekkene.

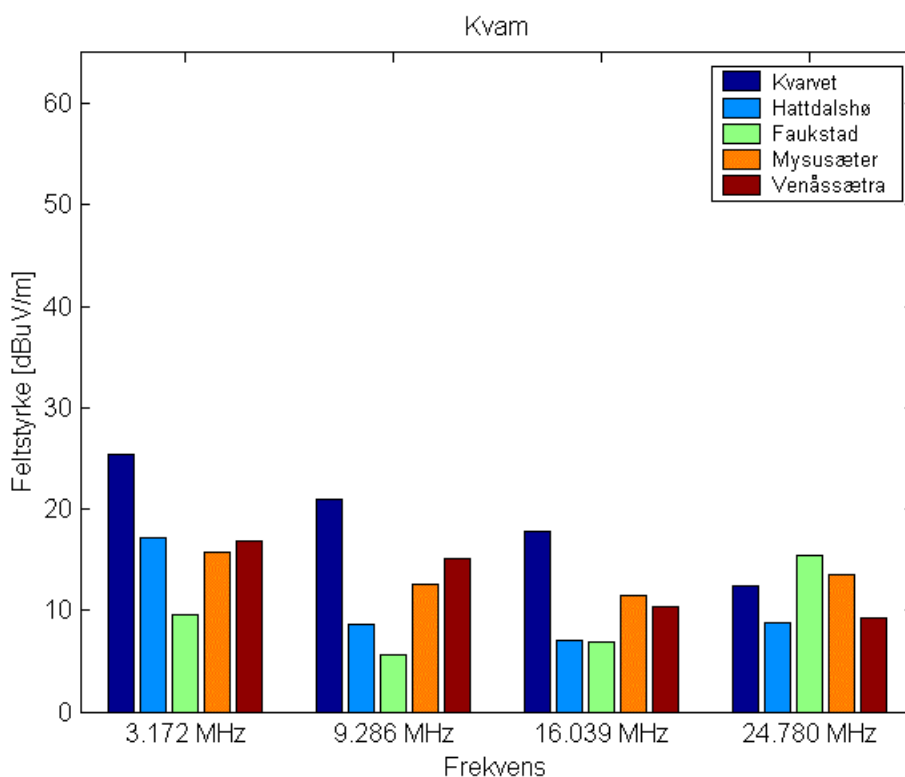
Sted	Posisjon	Høyde [m]	Avstand s.-m. [km]	Min. høyde [m]	Maks. høyde [m]	Vinkel s.-m. [°]	Cl.angle sender [°]	Cl.angle mottaker [°]
Kvam	32V 053610 683715	281						
Kvarvet (1)	32V 055027 682897	860	16.3	260	981	2.0	5.5	1.3
Hattdalshø (2)	32V 052562 682473	774	16.2	260	1180	1.7	8.1	6.4
Faukstad (3)	32V 052324 684159	365	13.6	280	1085	0.3	16.4	11.7
Mysusæter (4)	32V 053619 685327	898	16.1	281	1111	2.1	10.1	5.7
Venæssætra (5)	32V 055184 683643	688	15.7	260	1236	1.4	7.8	8.7

Tabell 8.12 Noen data fra studentmålingene i Kvam. Posisjon på kartet står i parentes.

Resultatet av målingene gjort i Kvam viser at målingene her generelt var lave, bortsett fra målingen gjort ved Kvarvet som var noe høyere enn de andre. Også her kan noe av årsaken være at signalet kan ha fulgt dalen og elven og derfor ikke blitt så mye dempet.



Ved måling på 9.286 og 24.780 MHz ved Hattdalshø var signalet for svakt til å skilles ut i fra støyen.



Figur 8.22 Resultat av studentmålingene i Kvam. Plottet angir gjennomsnittlig feltstyrke ved hver mottakerposisjon.

## 9 ANALYSE

Det er flere faktorer som vil ha innvirkning på målingene våre, blant annet de elektriske egenskapene til bakken, atmosfæriske forhold, terrenget og hvor god kobling vi har til jord på senderstedet.

Bortsett fra enkelte studentmålinger på 9.286 MHz kan vi anta at andre støykilder som tog, fly etc. vil ha hatt minimal innflytelse på måleresultatene. For å ha best mulig kontroll over eventuell støy fra f eks andre radiokilder i området man befinner seg i, ble det ved hver måling foretatt et "sweep" rundt den frekvensen man skulle måle på. Dette ble gjort ved å øke båndbredden til 100 kHz rundt denne frekvensen. ("Sweep-time" var 601 ms.) På denne måten vil man avdekke unormal støy, og detektere om andre sender i samme frekvensområde.

Når det gjelder koblingen til jord ved senderstedet, så ble det lagt ut en kabel som beskrevet i kapittel 3. Denne ble ikke flyttet i retning der mottakerbilen var plassert ved våre sirkelmålinger, men lå fast i en retning under alle målingene. Dette kan ha hatt innvirkning på den mottatte feltstyrken. Selv om den hadde blitt flyttet hadde vi ikke kunnet anta like forhold, fordi

konduktiviteten til jorda rundt bilen i mange tilfeller vil variere mye, fra tørr grusvei til våt myr. Koblingen til jord ville derfor blitt forskjellig om kabelen hadde blitt flyttet. Ved studentmålingene i Gudbrandsdalen ble kabelen derimot flyttet.

I den videre analysen har vi antatt at kobling til jord på senderstedet er lik, og at det ikke har hatt nevneverdig innvirkning at kabelen har ligget fast ved hver sirkelmåling. Videre har vi antatt at atmosfæriske forhold har vært tilnærmet like.

Når vi skal analysere dataene våre har vi derfor tatt utgangspunkt i følgende modell:

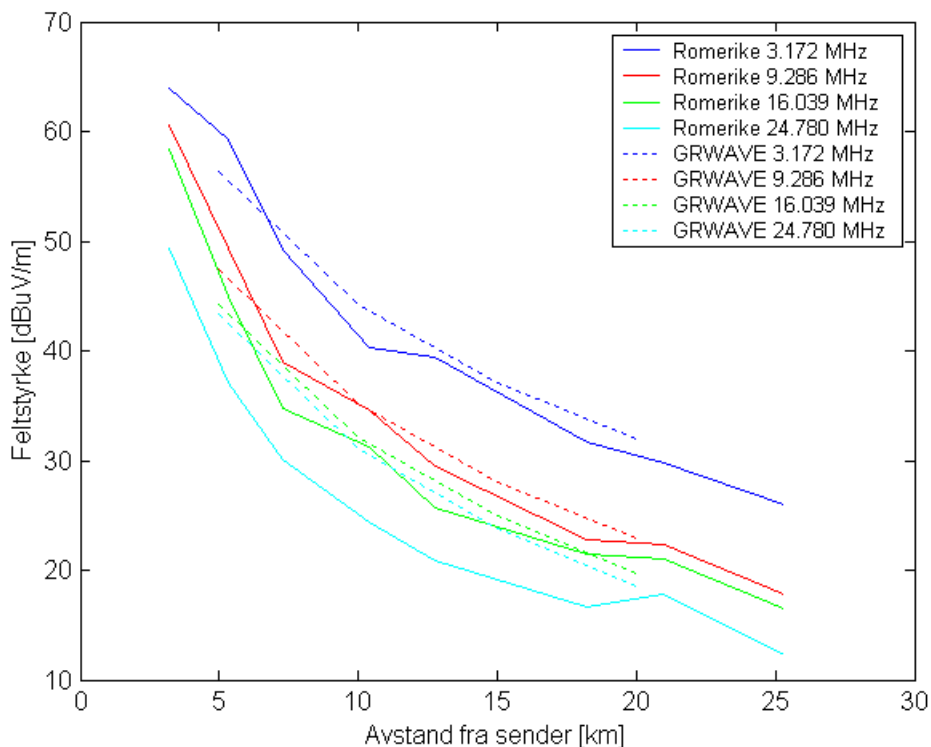
$$\hat{y} = \hat{y}_g(\sigma, \epsilon_r) + \hat{y}_t(\vec{\alpha}) \quad (9.1)$$

Der  $\hat{y}_g$  er en funksjon av grunnforholdene, d v s konduktivitet og relativ permittivitet, mens  $\hat{y}_t$  er en funksjon av terrenget.

En god og etterprøvd modell for  $\hat{y}_g$  er GRWAVE, og det er også denne som blir benyttet i FEFAS. Problemet er imidlertid å finne riktige verdier for konduktiviteten og den relative permittiviteten. Den varierer som tidligere sagt mye med fuktighetsinnholdet i jorda, og som vist i Figur 6.3 vil våt grunn og tørr grunn/is gi en forskjell på rundt 25 dBuV/m ved 3.172 MHz i følge GRWAVE sine prediksjoner med de avstander vi har brukt ved våre målinger. Konduktiviteten og den relative permittiviteten vil også variere mye over hvert enkelt målestrekk, ettersom de går over bergknauser, myrer og vann.

Å anta at konduktiviteten og den relative permittiviteten er omtrent den samme over alle målestrekkene er ingen god antakelse, men det blir vanskelig å gjøre noe annet. I følge (7) er det samme konduktivitet i de områdene av Norge hvor vi har gjort målinger. Konduktiviteten som er angitt i (7) er inkludert terrengpåvirkning, men stemmer ikke så veldig bra med våre målinger, så vi valgte å ta utgangspunkt i linjemålingen vi utførte på Romerike. Her var det veldig flatt terreng, slik at vi antar at  $\hat{y}_t(\tau) = 0$ , d v s ingen terrengpåvirkning. Dette kan vi anta stemmer bra i alle fall på de laveste frekvensene i HF-båndet, siden største høydeforskjell her var på 80 m, noe som er mindre enn bølgelengden for 3.172 MHz.

Vi prøvde deretter å velge konduktivitet og relativ permittivitet i GRWAVE slik at kurvene som GRWAVE ga ut stemte best mulig med våre målinger. Dette fant vi for  $\sigma = 7 \cdot 10^{-4}$  S/m og  $\epsilon_r = 10$ , se Figur 9.1. Kurvene stemmer ikke så bra for 24.780 MHz. Her er våre målinger lavere enn den tilsvarende GRWAVE kurven. Årsaken til dette er antakelig at terrenget ikke kan regnes som flatt ved denne frekvensen, da maksimal høydeforskjell er større enn to bølgelengder.



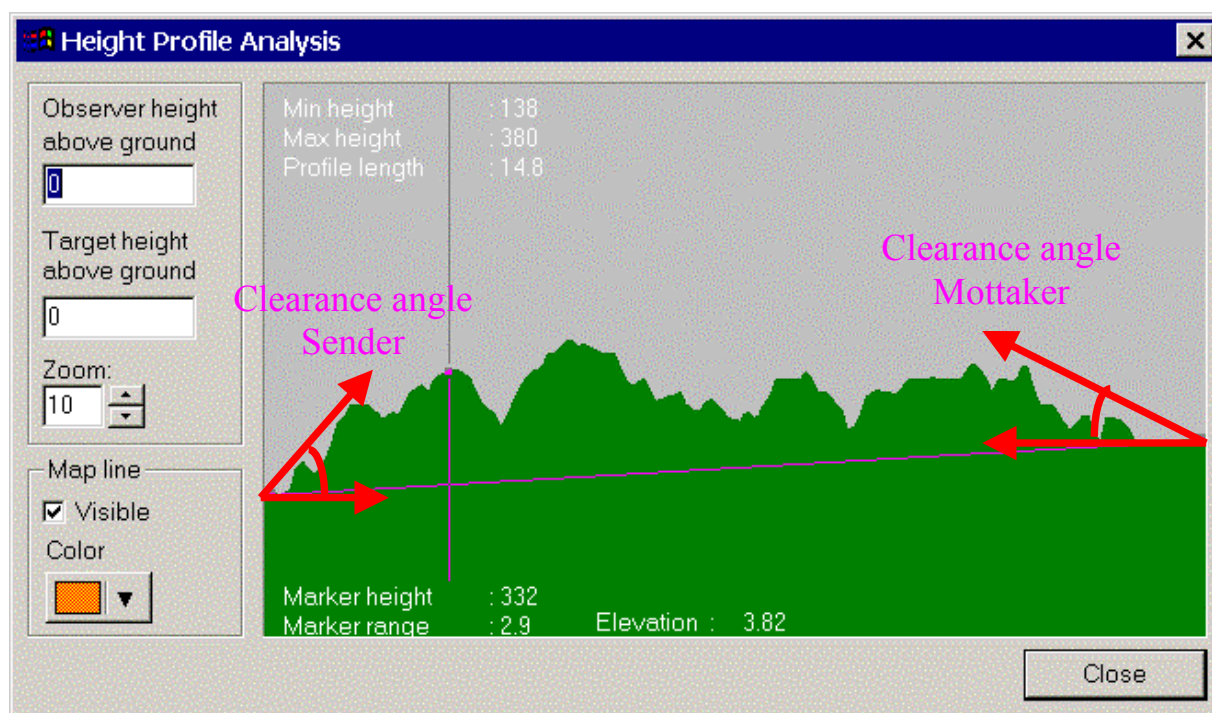
Figur 9.1 Sammenligning mellom linjemåling på Romerike og GRWAVE prediksjoner med  $\sigma = 7 \cdot 10^{-4} \text{ S/m}$  og  $\epsilon_r = 10$ .

## 9.1 "Clearance angle"

Etter å ha utført noen sirkelmålinger fikk vi fort følelsen av at en faktor som påvirket målingene var hvor bratt terrenget var rett i nærheten av sender og mottaker, og ikke om det var en høy topp et sted omtrent midt i mellom. Dette vises godt f eks ved sirkelmålingen gjort i Nannestad. Her er det større høydeforskjell på målestrekket over til Hurdal, enn det er over målestrekket gjort over til Eltonåsen. Likevel målte vi høyere feltstyrke ved Hurdal.

I (12) bruker de noe som de har kalt "receiving terrain clearance factor" som en faktor som påvirker mottatt feltstyrke på VHF. Dette ga oss ideen om at kanskje denne faktoren kunne beskrive noe av det vi så på HF. Vi valgte derfor å undersøke om det vi har kalt "clearance angle", var en faktor som kunne beskrive noe av det vi så på våre målinger.

På terrengprofilen mellom sender og mottaker har vi definert "clearance angle" som vinkelen mellom horisontalplanet og høyeste topp mot horisonten ved sender/mottaker. Se Figur 9.2.



Figur 9.2 Terrenprofil mellom sender og mottaker hvor clearance angle for sender og mottaker er markert.

## 9.2 Regresjonsanalyse

For å finne ut om Clearance angle var en faktor av betydning ble det først foretatt en lineær regresjonsanalyse hvor det ble testet på modellen

$$y_{t,i}(\bar{\alpha}_i) = \beta_0 + \beta_1 \alpha_{s,i} + \beta_2 \alpha_{m,i} + \varepsilon_i, \quad \forall i, \quad (9.2)$$

der responsvariabelen  $y_t$  er feltstyrkeendringen relatert til terrenget. De uavhengige regresjonsvariablene eller prediktorvariablene,  $\alpha_s$  og  $\alpha_m$  er clearance angle ved henholdsvis sender og mottaker, mens  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ , og  $\beta_2$  er parametre vi ønsker å estimere.  $\varepsilon_i$  er residualet, og estimering av parametrene har blitt gjort m h p minimering av  $\sum_{\forall i} \varepsilon_i^2$ .

For å evaluere hvor god modellen vår er, har vi brukt en koeffisient kalt  $R^2$ . Dette er en koeffisient kalt "coefficient of determination" eller "bestemmelseskoeffisienten", og uttrykkes ved:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{\forall i} \varepsilon_i^2}{\sum_{\forall i} (y_i - \bar{y})^2} \quad (9.3)$$

Den uttrykker hvor stor andel av den totale variasjon i  $y_i$ 'ene som blir "forklart" eller kan tilskrives prediktorvariablene  $\alpha_s$  og  $\alpha_m$ .  $R^2 = 1$  hvis den tilpassede kurven går igjennom alle datapunktene, slik at  $\varepsilon_i = 0$  for alle  $i$ . Og omvendt er  $R^2 = 0$ , hvis  $\beta_0 = \bar{y}$  og  $\beta_1 = \beta_2 = 0$ . I dette

tilfellet har prediktorvariablene ingen betydning.

Siden vi i vårt tilfelle vet at vi ikke kan beskrive all variasjon i dataene med clearance angle har vi satt  $R^2 > 0.5$  som en grense for om variabelen er av betydning.

Mer om regresjonsanalyse kan leses i blant annet (13).

### 9.3 Resultat

Resultatet av lineær regresjon utført på sirkelmålingene er vist i Tabell 9.1 under. Resultatet er vist ved bruk av bare våre målinger fra Totenåsen, Nannestad, Bjørkelangen og Odalen og også ved bruk av studentenes målinger i Gudbrandsdalen. Vi ser at det beste resultatet oppnås ved å bruke bare våre målinger, og dette kan komme av at posisjonene og dermed også clearance angle ikke ble helt nøyaktige ved studentenes målinger.

Dataene det er gjort regresjonsanalyse på er  $y_i(\vec{\alpha}) = y - \hat{y}_g(\sigma, \varepsilon_r)$ , med  $\sigma = 7 \cdot 10^{-4}$  S/m og  $\varepsilon_r = 10$ .

	Sirkelmålinger ekskl. Gudbrandsdalen				Sirkelmålinger inkl. Gudbrandsdalen			
Frek. [MHz]	3.172	9.286	16.039	24.780	3.172	9.286	16.039	24.780
$\beta_0$	-2.91	3.26	1.49	-1.44	-4.49	2.58	1.19	-3.08
$\beta_1$	-0.75	-1.11	-1.15	-1.15	-0.83	-0.94	-0.92	-0.68
$\beta_2$	-1.84	-1.37	-1.17	-1.34	-0.85	-0.95	-0.82	-0.66
$R^2$	0.64	0.71	0.69	0.69	0.57	0.56	0.45	0.32

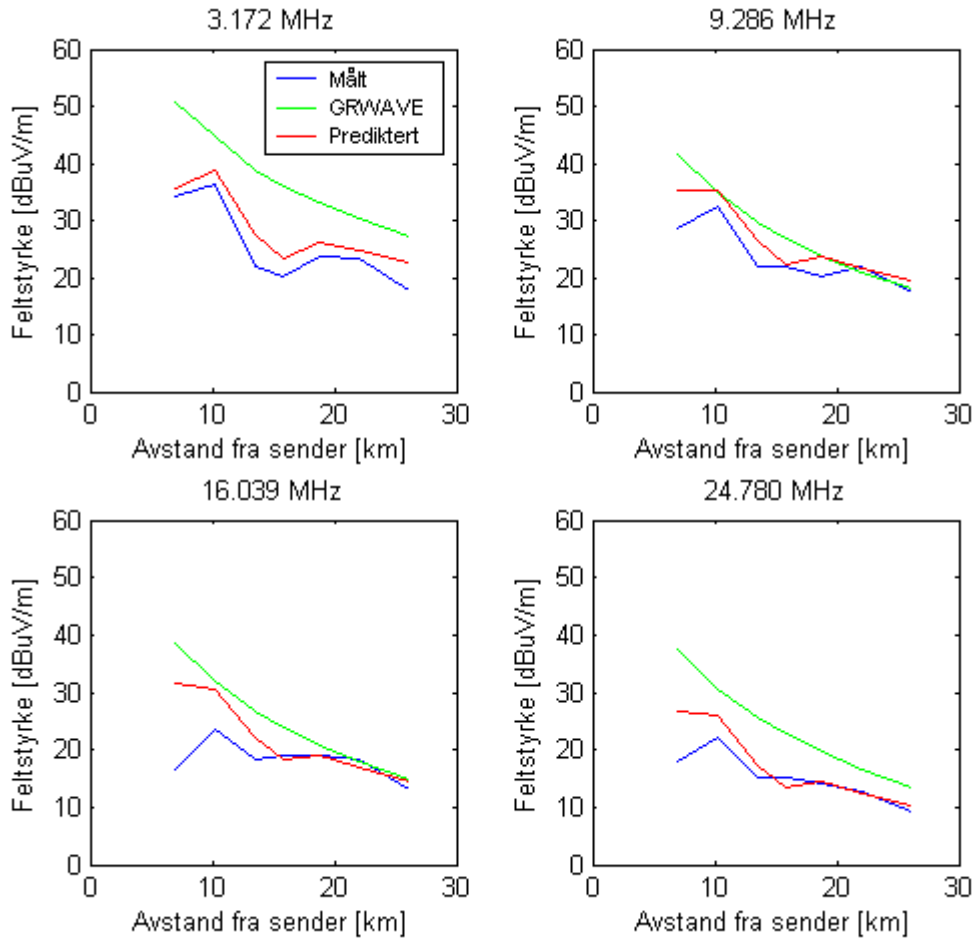
Tabell 9.1 Resultat av lineær regresjon utført på data fra sirkelmålingene med hensyn på clearance angle.

Vi undersøkte også om vinkelen mellom sender og mottaker kunne være signifikant, og utførte regresjonsanalyse med også denne variabelen. Vi fant imidlertid at  $R^2$  ble forbedret svært lite, så hvor stor høydeforskjell det var mellom sender og mottaker var ingen relevant faktor ved våre målinger.

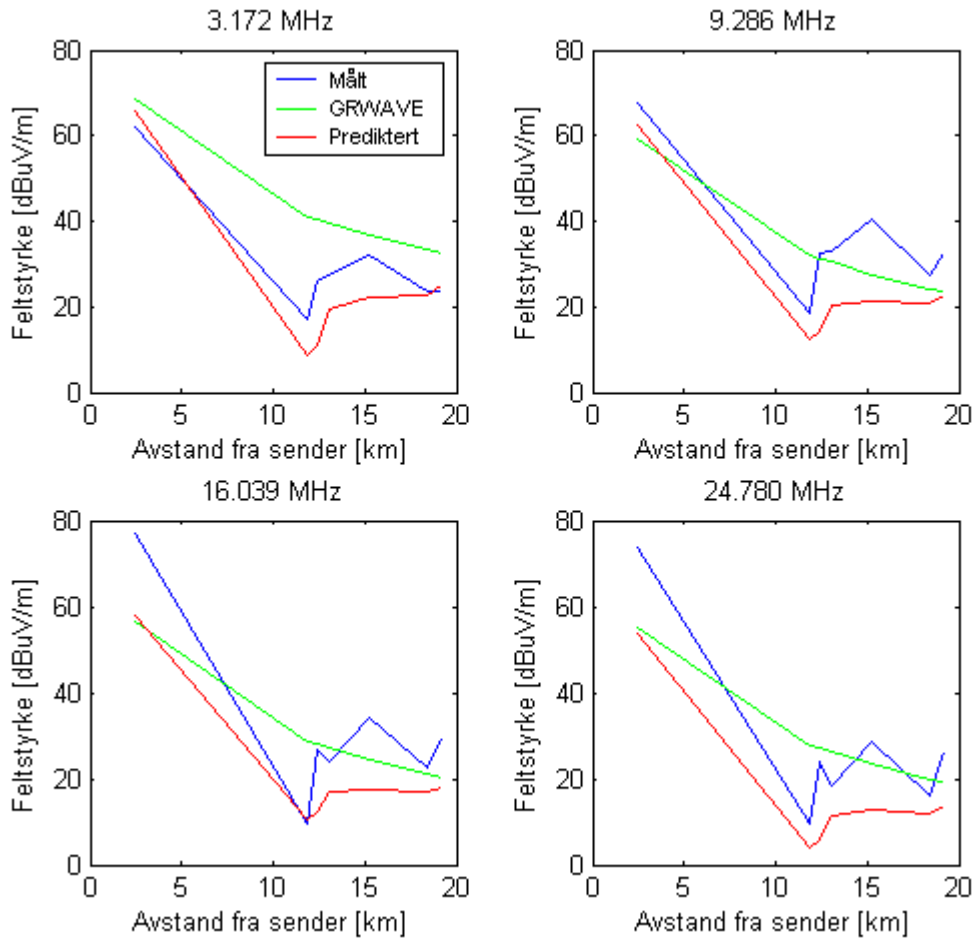
For å teste modellen vi kom fram til med lineær regresjon, sammenlignet vi våre målte verdier fra linjemålingene i Nannestad og Hurdal med de predikterte vi fikk ved å bruke modellen vår. Modellene som da ble brukt var den vi kom fram til ved å bare bruke våre målinger (ekskludert målingene i Gudbrandsdalen), i o m at denne ga best resultat m h p  $R^2$ . Ved denne testen bruker vi altså andre data til å teste modellen, enn det vi bruker til å estimere parametrene i modellen.

Resultatet av testen er vist i Figur 9.3 og Figur 9.4 for h h v linjemålingen utført i Nannestad og i Hurdal, og viser at modellen gir en klar forbedring i forhold til GRWAVE på målingene fra Nannestad. Når det gjelder linjemålingene fra Hurdal er det derimot ingen markant forbedring i forhold til GRWAVE. Selv om dette er et område med svært kupert terreng, viser det seg at målingene ofte viser høyere feltstyrke enn GRWAVE prediksjonene, spesielt på 9.286 MHz og 16.039 MHz. Her må det enten være noe annet enn jordbølgen vi har målt, eller så er

konduktiviteten høyere i Hurdal enn på Romerike. Sistnevnte er imidlertid lite sannsynlig, i o m at det er mye leire på Romerike, og mye fjell i Hurdal, se Figur 2.4. Selv om GRWAVE prediksjonene ofte ligger nærmere de målte verdier enn vår modell her, så følger vår modell kurveformen bedre.



Figur 9.3 Modell testet på data fra linjemåling i Nannestad.



Figur 9.4 Modell testet på data fra linjemåling i Hurdal.

## 9.4 Diskusjon

Slik vi har bygd opp vår modell, se likning (9.1) og likning (9.2), så burde vi fått  $\beta_0 = 0$  i (9.2). Dette fordi terrengpåvirkningen ved  $\alpha_s = \alpha_m = 0$ , d v s flatt terreng, er 0. På grunn av resiprositetsprinsippet burde i tillegg  $\beta_1 = \beta_2$ . Resiprositetsprinsippet sier at vi bør få det samme resultatet om sender og mottaker bytter plass.

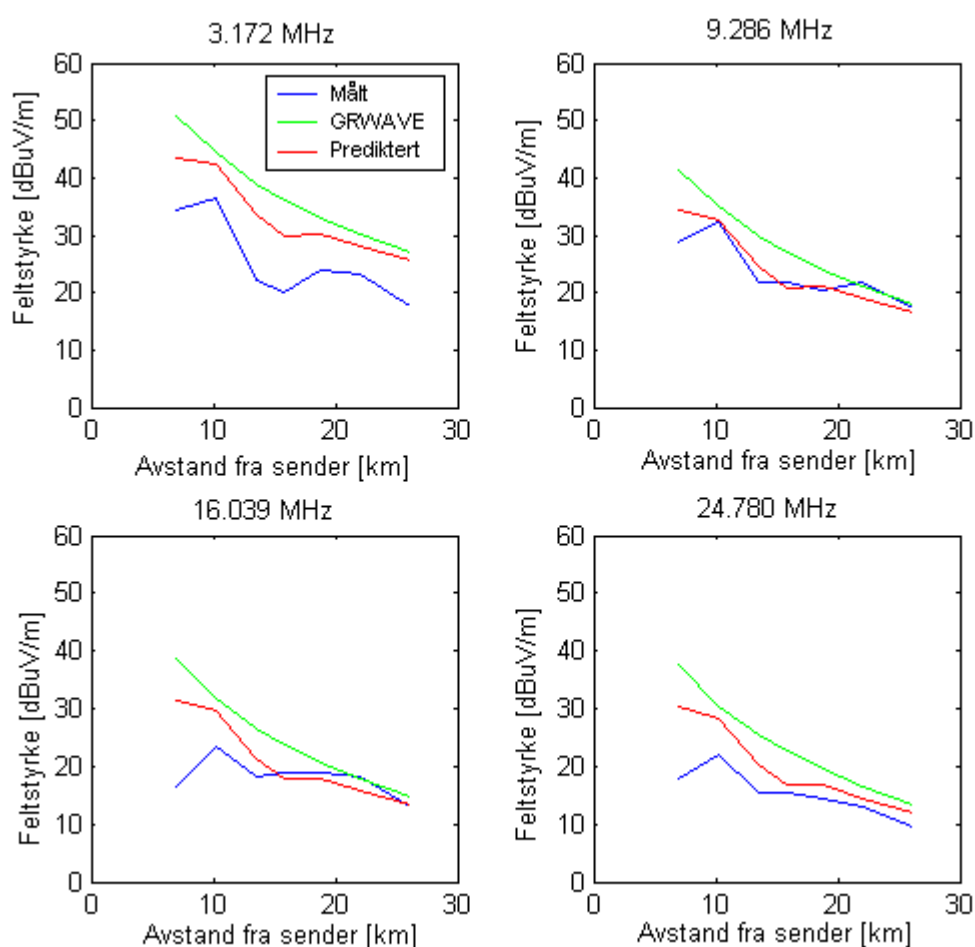
For å teste hvordan disse antakelsene stemmer med våre data, utførte vi samme test på linjemålingene i Nannestad og Hurdal, men nå med  $\beta_0 = 0$ , og  $\beta_1 = \beta_2 = -1$ . Resultatet er vist i Figur 9.5 og Figur 9.6. Fasongen på kurvene har ikke endret seg nevneverdig med denne forenklete modellen, men ”høyden” på kurvene har blitt litt endret. Ved f eks Nannestad på 3.172 MHz har prediksjonen blitt dårligere, mens for Hurdal på 24.780 MHz har prediksjonen blitt bedre. Mye tyder derfor på at antakelsen om at konduktiviteten er den samme ved alle målestrekkene ikke stemmer helt. For å undersøke dette litt nærmere fant vi det totale residuallet (alle frekvenser summert) for hver sirkelmåling:

$$\varepsilon_{i,tot} = \varepsilon_{i,3.172} + \varepsilon_{i,9.286} + \varepsilon_{i,16.039} + \varepsilon_{i,24.780}, \quad \forall i \quad (9.4)$$

Dette er vist i *Tabell 9.2*.

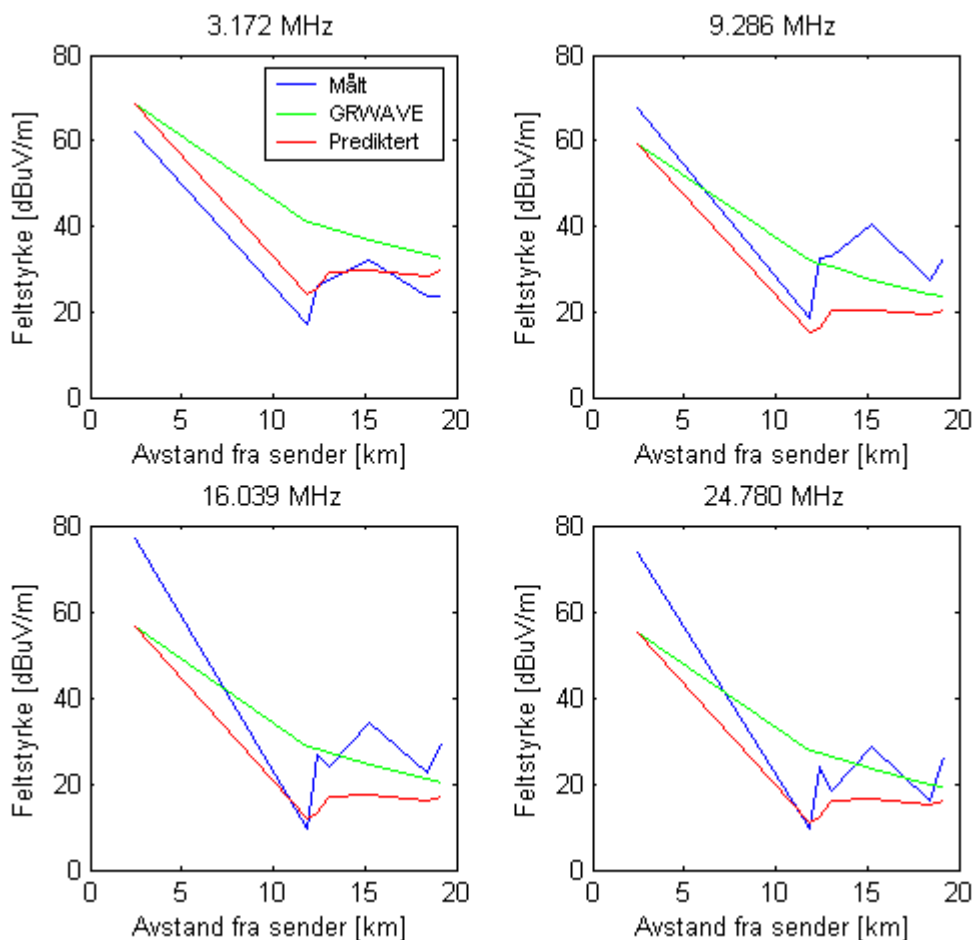
Steder hvor det totale residualet var stort og med positivt fortegn var Hurdal sentrum og Ovrum. Ved å se på kartet ser en at dette er områder hvor signalet kan følge innsjøer og elver mye av veien. Mens på stedene Gullerud, Krokstad, Grønnerud og Maurbråten mottok vi mye lavere signal enn modellen skulle tilsi, d v s det totale residualet var stort, men med negativt fortegn. Dette stemmer med at dette var områder med mye fjell og tørr grunn.

En mulig videre forbedring av modellen vil derfor være å finne metoder for å kunne prediktere de elektriske egenskapene i grunnen basert på enkel kartinformasjon som allerede ligger inne i FEFAS. Dette kan f eks være vann, elver, myrer og fjelltopper.



*Figur 9.5 Forenklet modell testet på data fra linjemåling i Nannestad*



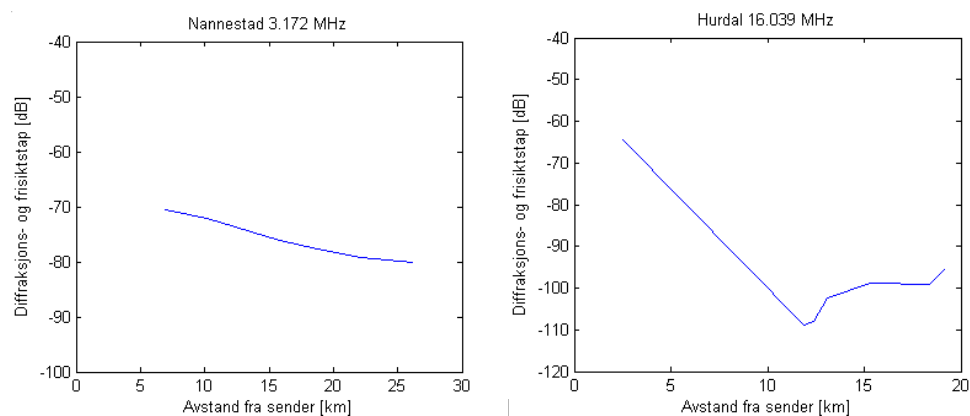


Figur 9.6 Forenklet modell testet på data fra linjemåling i Hurdal.

Det kan være nærliggende å tro at det er diffraksjon vår modell egentlig beskriver, og dermed ikke overflatebølgen. Vi sammenlignet derfor våre målinger og prediksjoner med beregnet diffraksjons-og frisiktstap over de samme målestrekkene. Vi fant da at det noen ganger var god overensstemmelse mellom kurveformen på dette beregnede tapet og våre prediksjoner, mens det noen ganger var dårlig overensstemmelse. Når det var dårlig overensstemmelse stemte vår prediksjon mest med de målte dataene. Et eksempel på en kurveform med dårlig overensstemmelse og en kurveform med god overensstemmelse er vist i Figur 9.7. Det kan se ut som om vår modell ligner mer på diffraksjons-og frisiktstapet ved høye frekvenser og mye terrengvariasjoner. Ved beregninger av diffraksjonstapet ble en knivseggdiffraksjonsmodell brukt.

Sirkelmåling	Mottakerposisjon	Tot. res.
Totenåsen	Burås	3.0
	Lygna	5.6
	Eina	13.2
	Narum	-12.2
	Lensbygda	4.8
	Totenvik	-6.4
	Øverbygda	1.3
	Hurdal sentr.	26.4
Nannestad	Eltonåsen	1.1
	Råholt	13.1
	Hurdal	2.6
	Vassbråa	-10.0
	Skjerva	7.0
Bjørkelangen	Mangen	11.2
	Nerdrum	-3.3
	Mork	7.8
	Gullerud	-22.1
	Ovrum	25.2
	Sætertjenn	-6.1
	Krokstad	-23.2
Odalen	Sagstua	-0.9
	Gjeddevatn	8.9
	Slåstad	-4.4
	Grønnerud	-25.4
	Maurbråten	-21.8
	Katterud	-9.1
	Tronrud	4.5
	Mørdre	9.0

Tabell 9.2 De totale residualene ved regresjonsanalysen på sirkelmålingene.



Figur 9.7 Beregnet diffraksjons- og frisiktstap ved linjemåling i Nannestad for 3.172 MHz og linjemåling i Hurdal for 16.039 MHz.

## 10 KONKLUSJON

Det finnes to hovedkategorier for bølgeforplantning på HF. Dette er ionosfærebølgen og jordbølgen. I denne rapporten har vi konsentrert oss om jordbølgen som består av direktebølgen, reflektert bølge og overflatebølgen. ITU sin anbefalte prediksjonsmodell for jordbølge, GRWAVE, predikerer feltstyrken og transmisjonstapet over en krum, homogen og flat jord, men tar ikke hensyn til irregulær overflate og inhomogene grunnforhold. Mens noen prediksjonsverktøy tar hensyn til inhomogene grunnforhold, er det få som tar hensyn til terrenget. Av de kommersielt tilgjengelige er det bare diffraksjon som blir omhandlet. Vårt mål for arbeidet var derfor å prøve å finne en god og enkel modell for jordbølgeprediksjon som kan brukes i FEFAS i tillegg til GRWAVE, og som tar hensyn til terrenget.

Første fase av målingene omfattet kalibrering av testutstyr og utførelse av støymålinger i forskjellige omgivelser. Dette var for å bli bedre kjent med utstyret og hvordan ulike støykilder kunne påvirke målingene våre. Vi fant at spesielt hurtigtog støyet mye.

I andre fase målte vi feltstyrken over områder hvor grunnen bestod hovedsakelig av leire og over områder hvor grunnen bestod hovedsakelig av sand. Dette var for å se om vi kunne måle noen forskjell i feltstyrke på grunn av forskjell i konduktivitet i de to områdene. Terrenget var relativt flatt, slik at vi så bort fra terrengeffekter, og vi fant at det var en viss forskjell mellom områdene. Vi sammenlignet også resultatet med GRWAVE, og fant at det var god overensstemmelse mellom våre målinger på sandgrunn, og GRWAVE sine prediksjoner for tørr grunn/is, mens målingene på leirgrunn ikke stemte så bra med GRWAVE sine prediksjoner for våt grunn.

I tredje og siste fase gjorde vi feltstyrkemålinger over områder med forskjellig terreng. Vi fant da at terrenget i nærheten av sender og mottaker så ut til å ha størst innflytelse på målingene. Vi fant da at en faktor vi har kalt "clearance angle" hadde betydning. På en terrengprofil mellom sender og mottaker, er dette den største vinkelen mellom en hindring og horisontalplanet ved sender og mottaker.

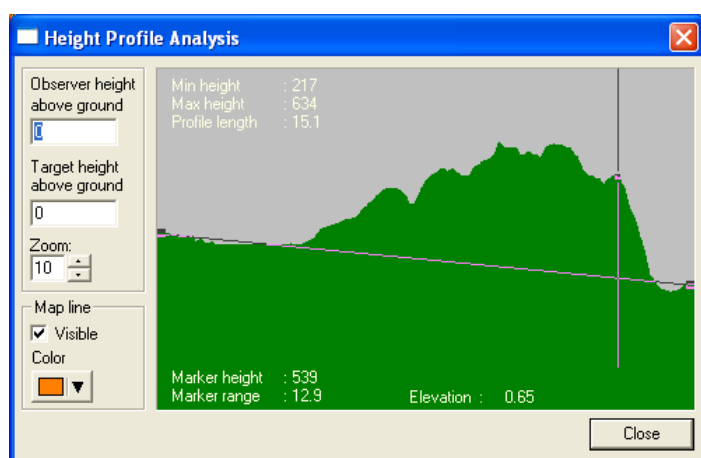
For å forbedre prediksjonene ytterligere tror vi det kan være av betydning å kunne estimere konduktivitetsendringer i bakken bedre. Dette er imidlertid en utfordring fordi konduktivitetsdata ikke ligger inne i FEFAS, og fordi signalet ikke bare går i en rett linje fra sender til mottaker, men kan følge elver og innsjøer som ligger i nærheten.

## APPENDIKS A

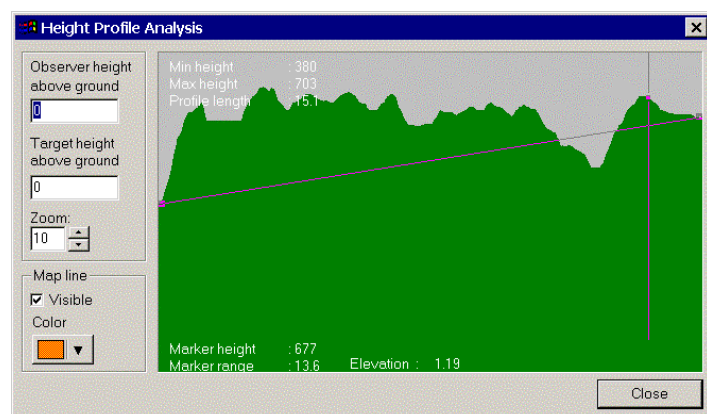
Her er det vist terrengprofiler for sirkelmålingene, linjemålingene og studentmålingene.

### A.1 Sirkelmålinger

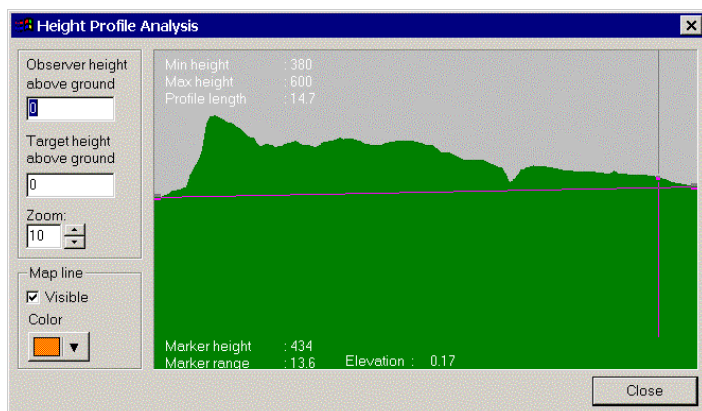
#### A.1.1 Sirkelmåling i Totenåsen



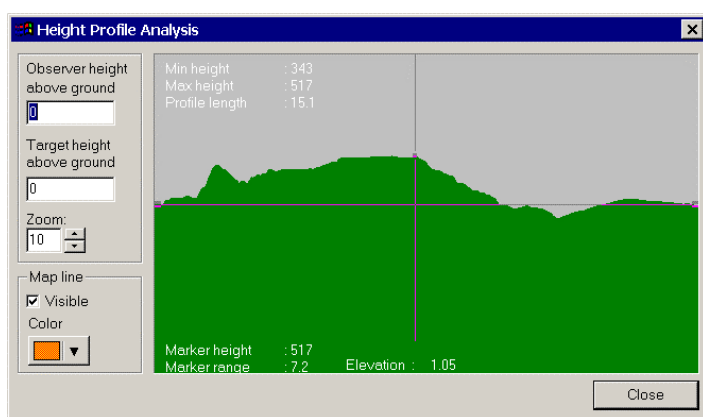
Figur A.1 Mottakerposisjon Burås



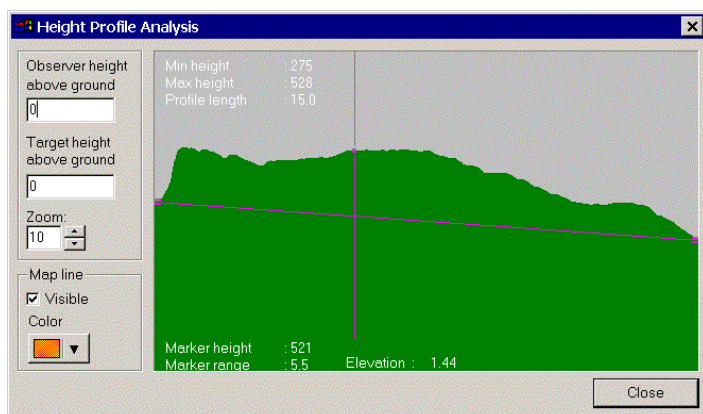
Figur A.2 Mottakerposisjon Lygna



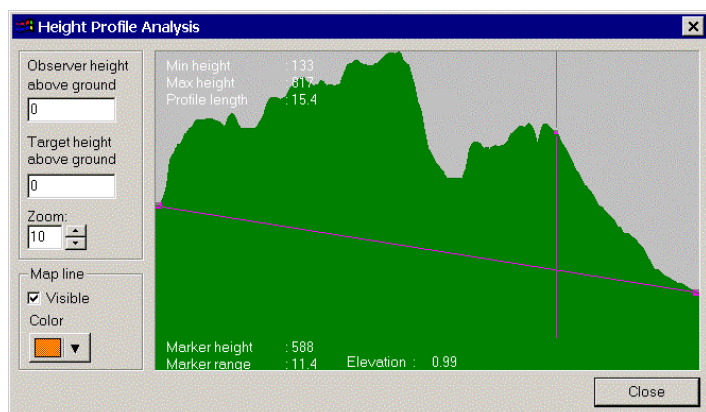
Figur A.3 Mottakerposisjon Eina



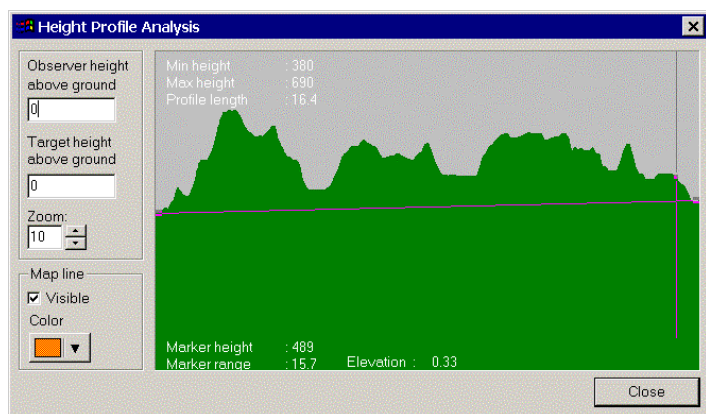
Figur A.4 Mottakerposisjon Narum



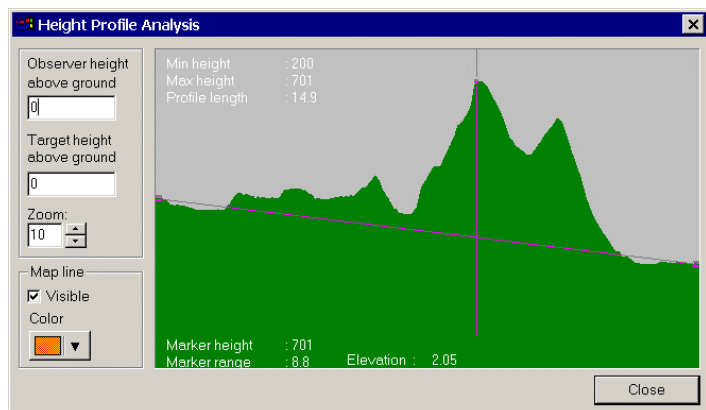
Figur A.5 Mottakerposisjon Lensbygda



Figur A.6 Mottakerposisjon Totenvika.

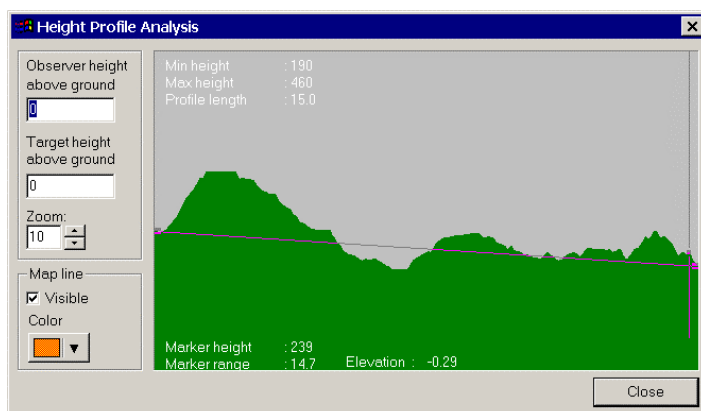


Figur A.7 Mottakerposisjon Øverbygda

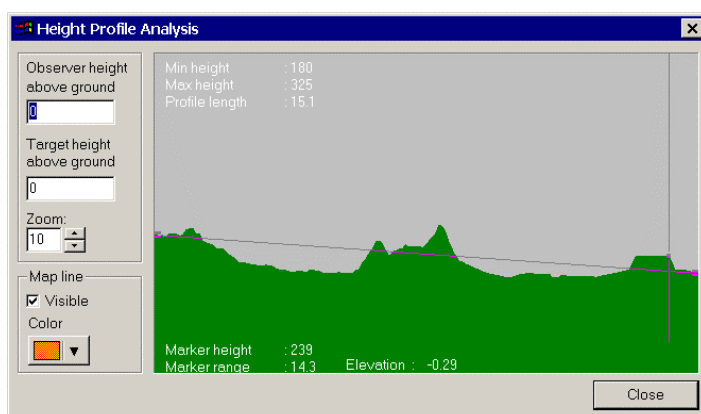


Figur A.8 Mottakerposisjon Hurdal sentrum.

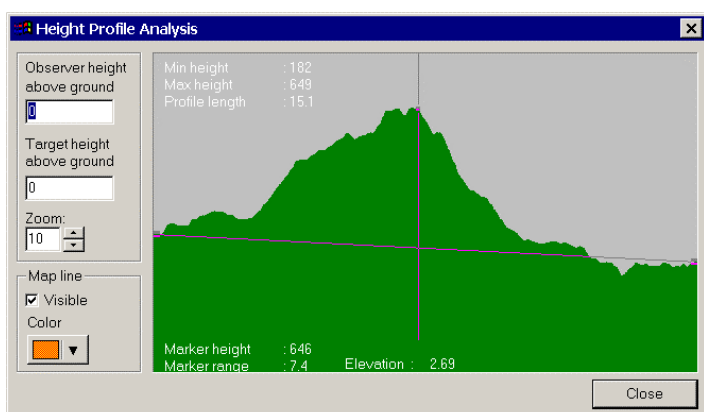
## A.1.2 Sirkelmåling i Nannestad



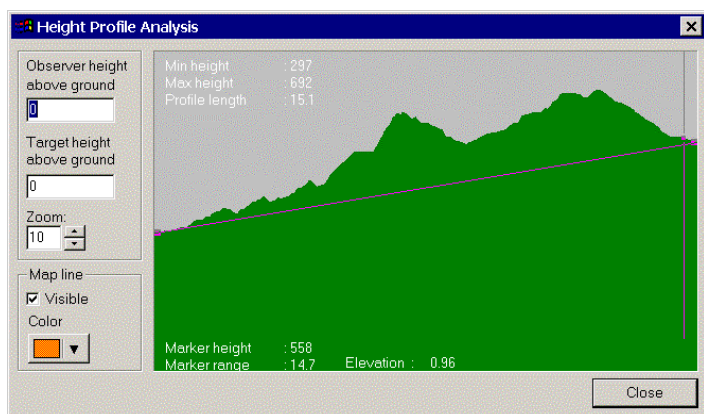
Figur A.9 Mottakerposisjon Eltonåsen.



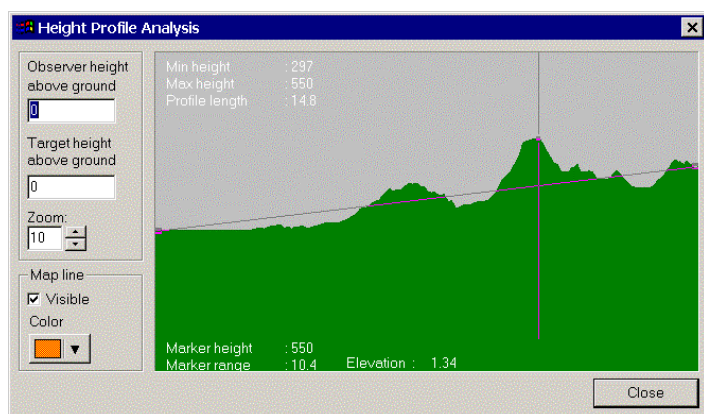
Figur A.10 Mottakerposisjon Råholt.



Figur A.11 Mottakerposisjon Hurdal.



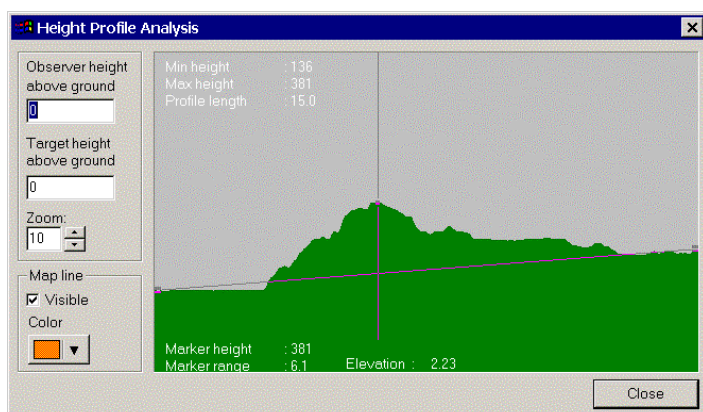
Figur A.12 Mottakerposisjon Vassbråa.



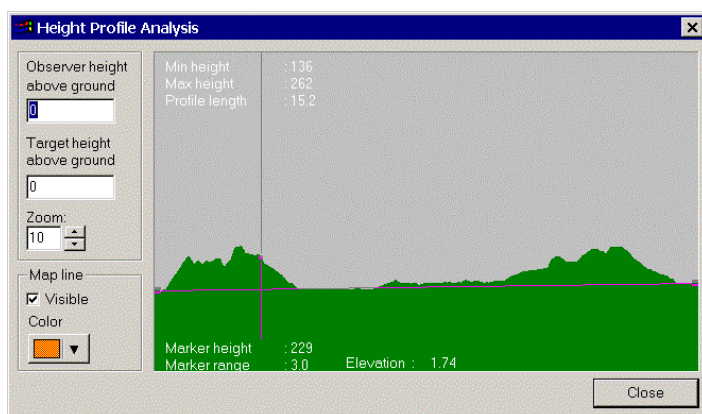
Figur A.13 Mottakerposisjon Skjerva.



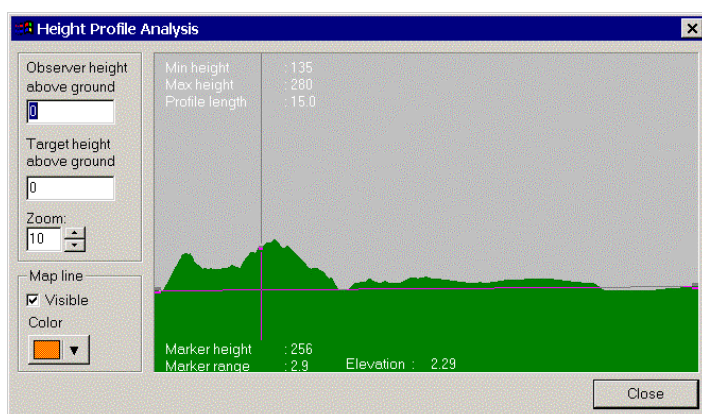
## A.1.3 Sirkelmåling i Bjørkelangen



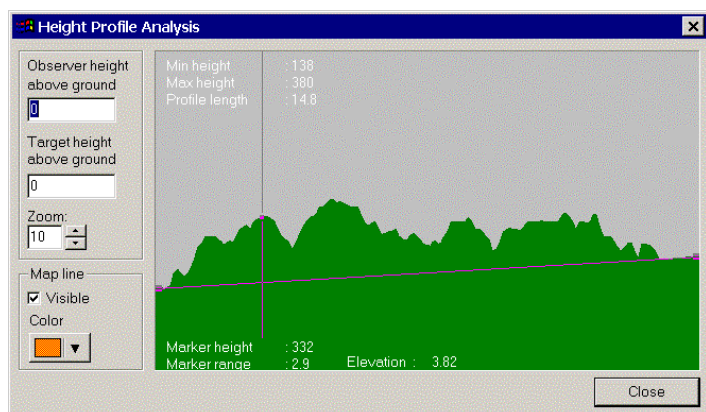
Figur A.14 Mottakerposisjon Mangen.



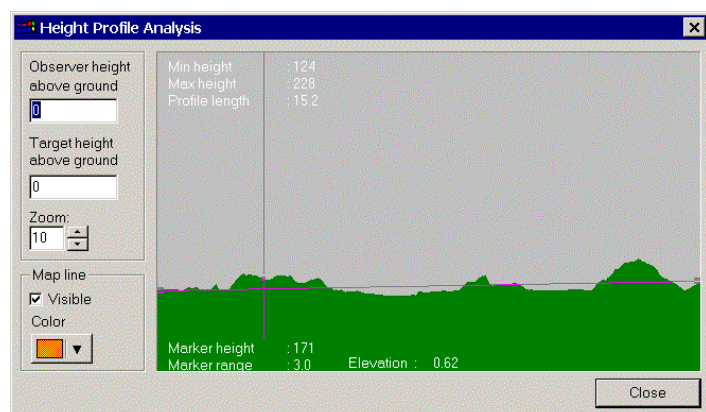
Figur A.15 Mottakerposisjon Nerdrum.



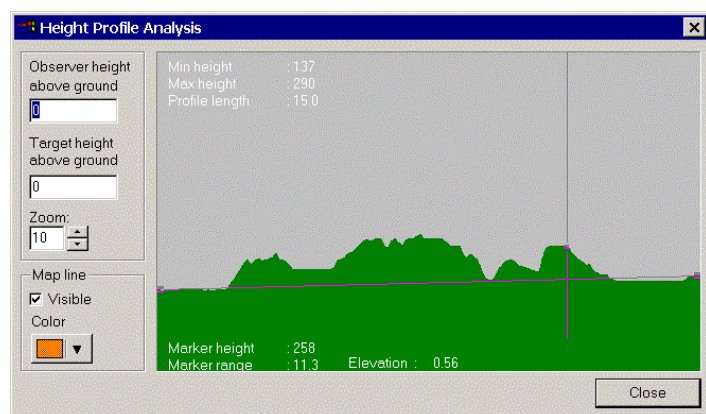
Figur A.16 Mottakerposisjon Mork.



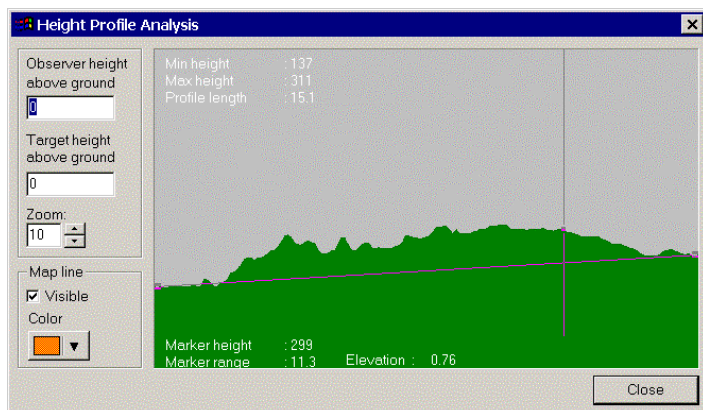
Figur A.17 Mottakerposisjon Gullerud.



Figur A.18 Mottakerposisjon Ovrum.

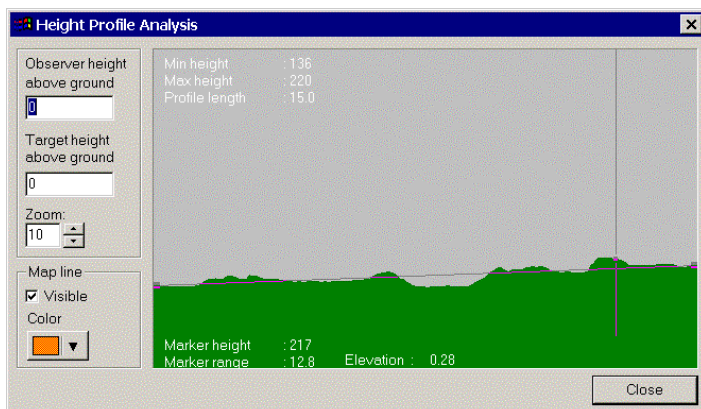


Figur A.19 Mottakerposisjon Sætertjenn.

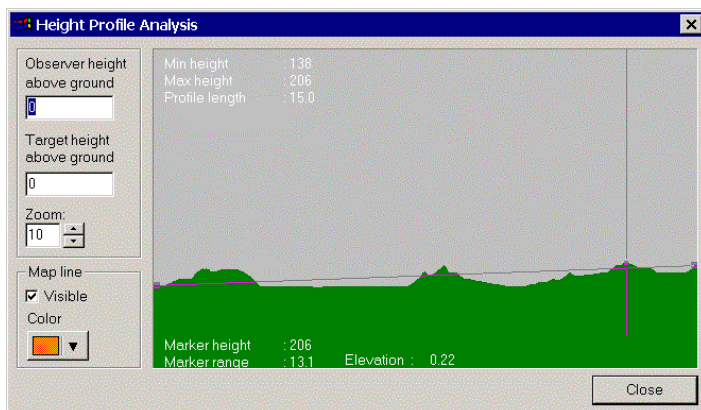


Figur A.20 Mottakerposisjon Krokstad.

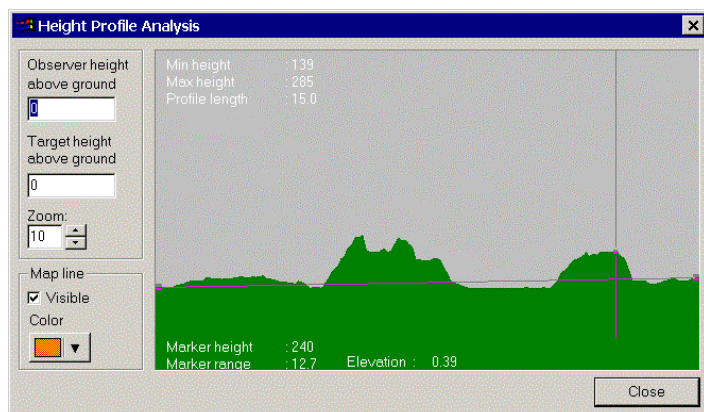
#### A.1.4 Sirkelmåling i Odalen



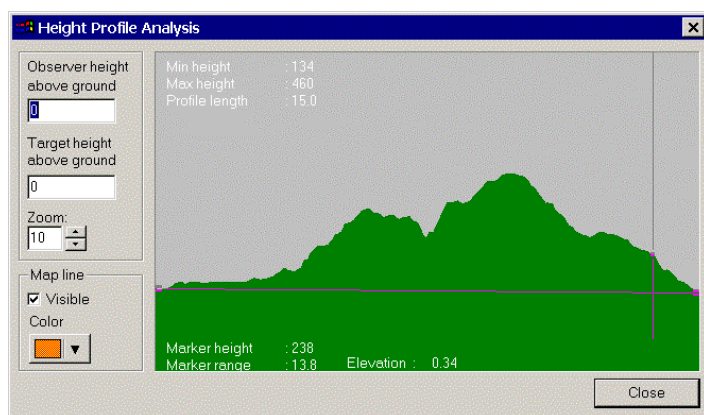
Figur A.21 Mottakerposisjon Sagstua.



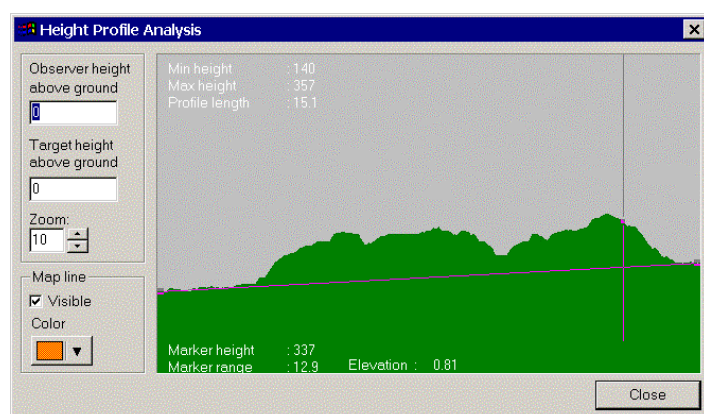
Figur A.22 Mottakerposisjon Gjeddevatn.



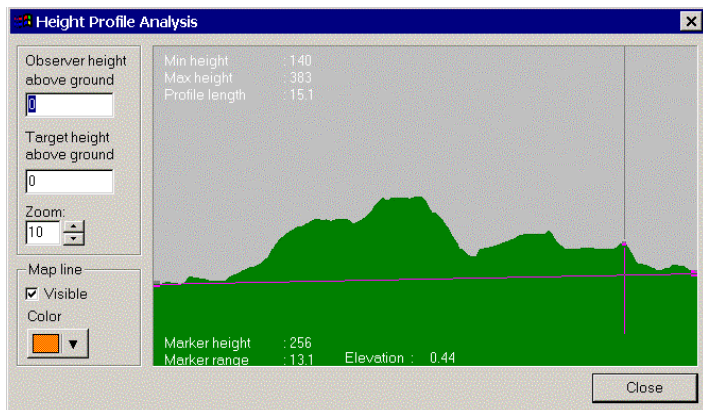
Figur A.23 Mottakerposisjon Slåstad.



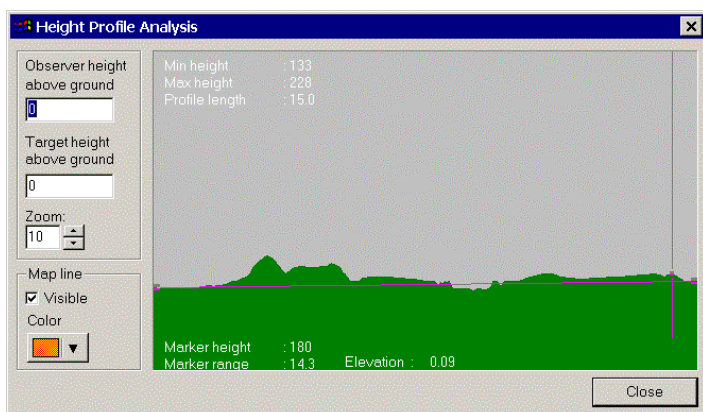
Figur A.24 Mottakerposisjon Grønnerud.



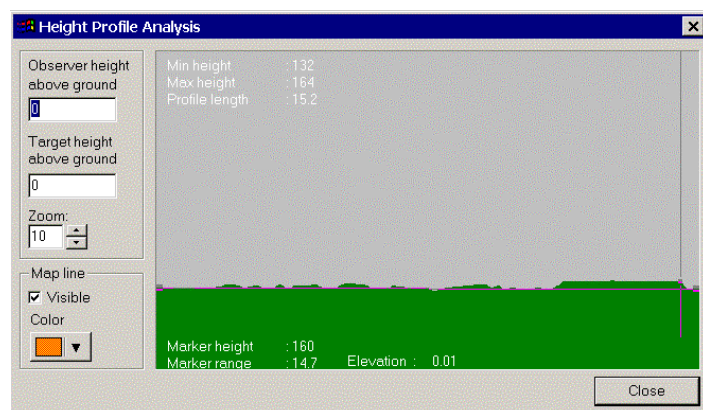
Figur A.25 Mottakerposisjon Maurbråten.



Figur A.26 Mottakerposisjon Katterud.



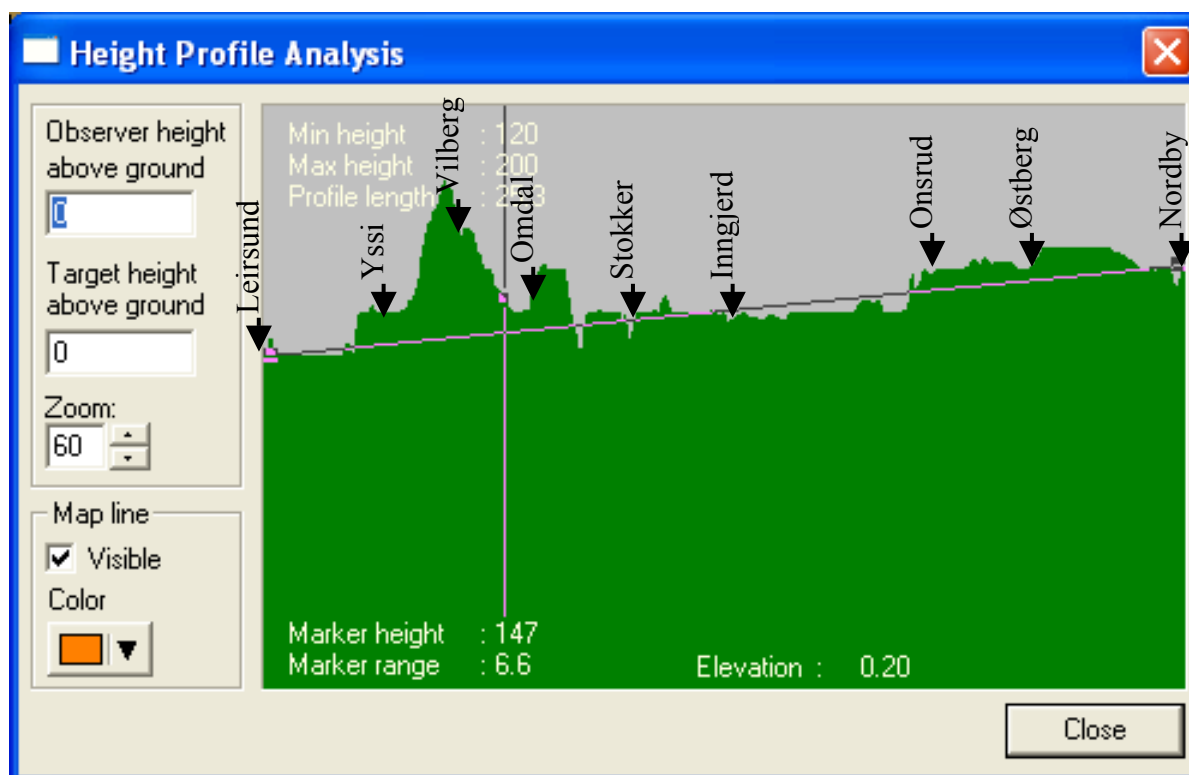
Figur A.27 Mottakerposisjon Tronrud.



Figur A.28 Mottakerposisjon Mørdre.

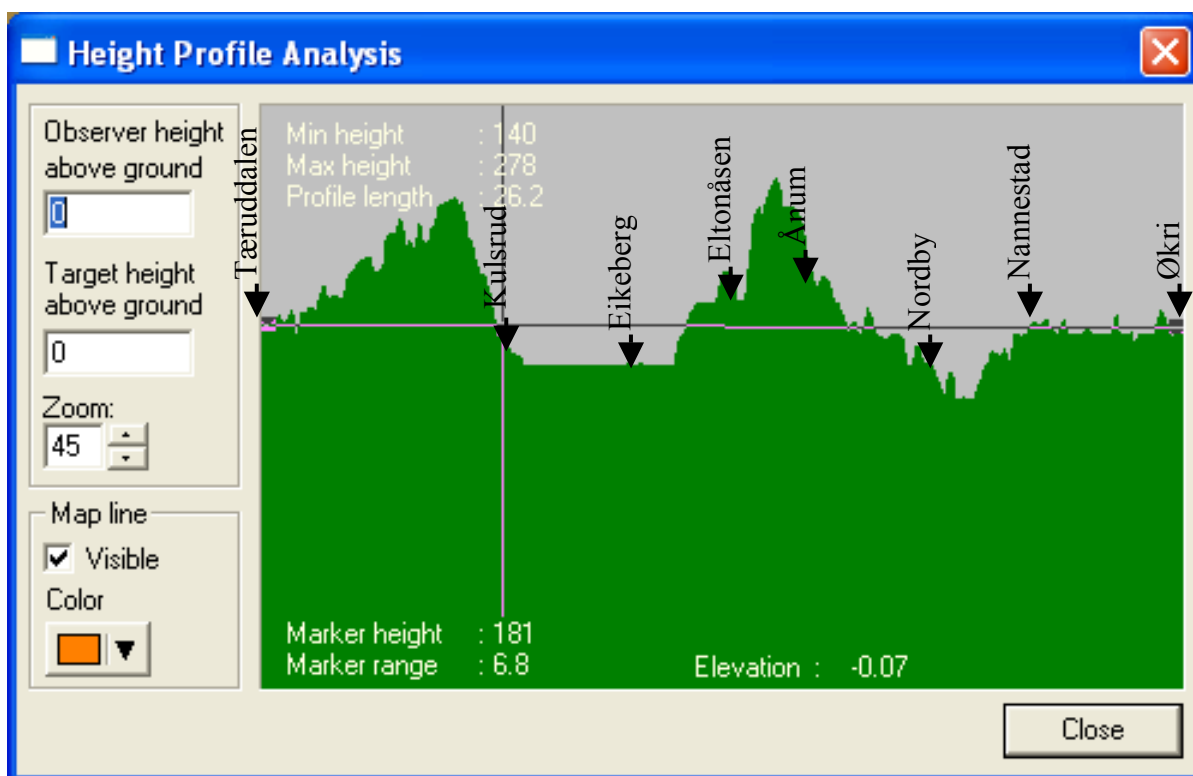
## A.2 Linjemålinger

### A.2.1 Linjemåling på Romerike



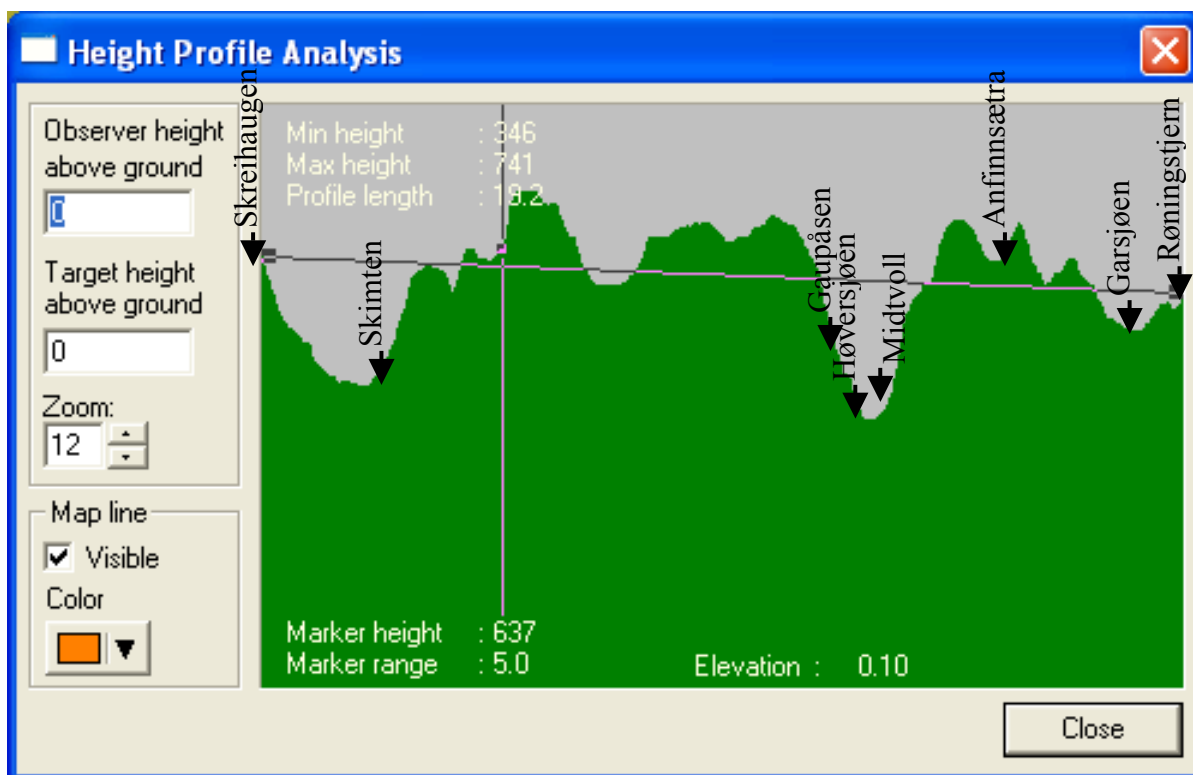
Figur A.29 Linjemåling på Romerike

## A.2.2 Linjemåling i Nannestad



Figur A.30 Linjemåling i Nannstad.

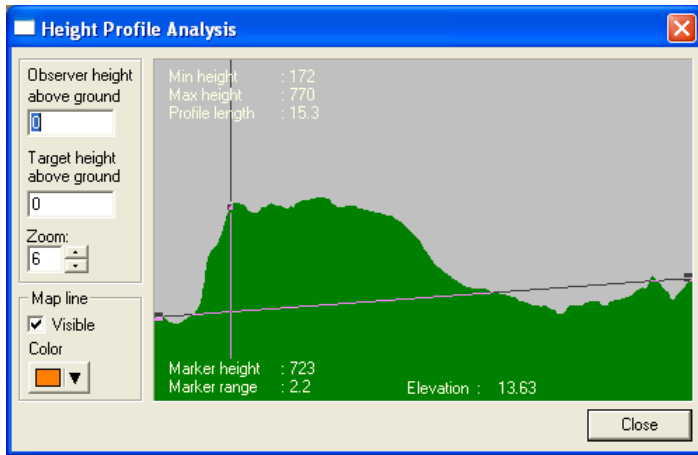
## A.2.3 Linjemåling i Hurdal



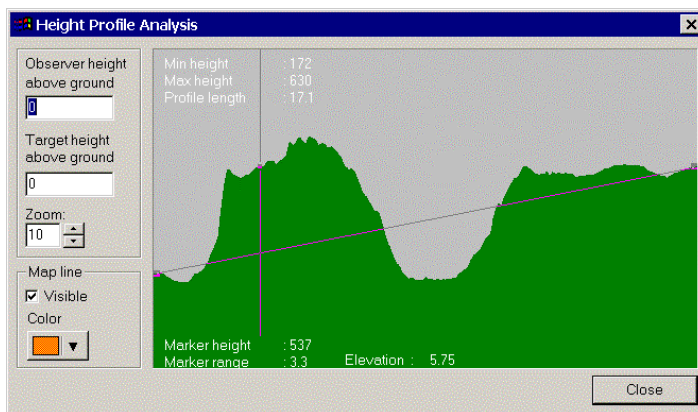
Figur A.31 Linjemåling i Hurdal.

## A.3 Studentmålinger

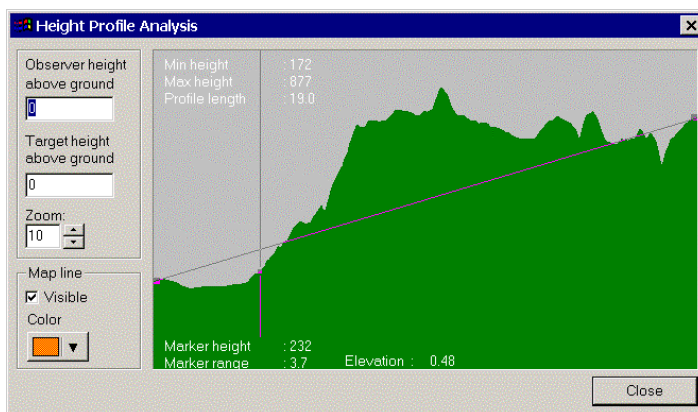
### A.3.1 Studentmåling i Øyer



Figur A.32 Mottakerposisjon Evenvoll

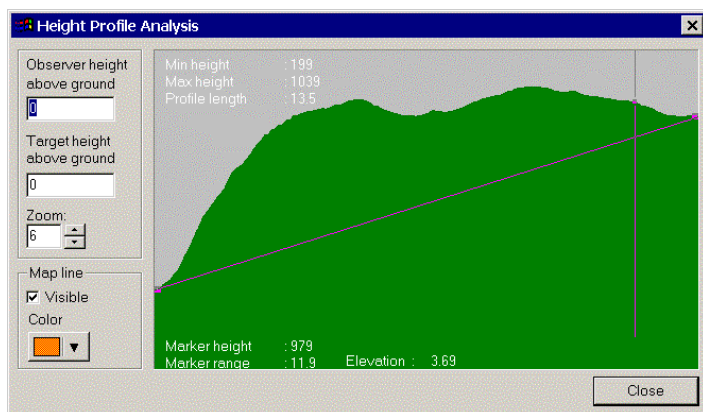


Figur A.33 Mottakerposisjon Skei/Svingvoll.

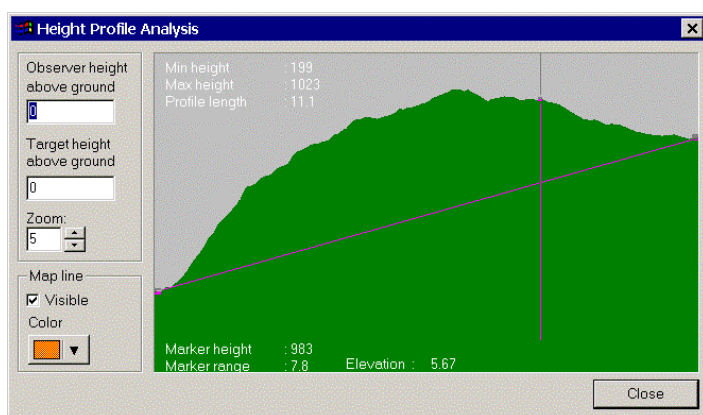


Figur A.34 Mottakerposisjon Rudderud.



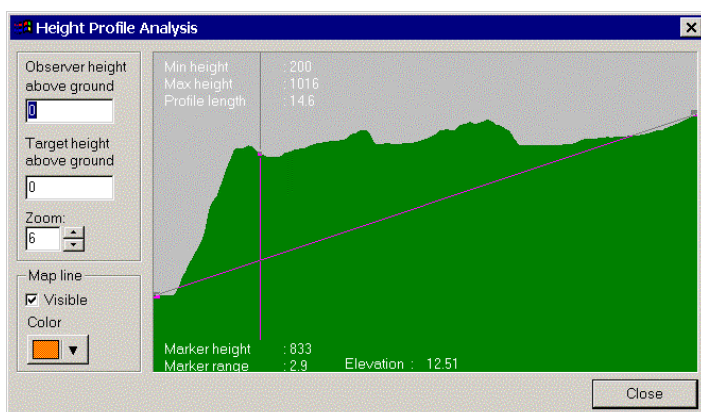


Figur A.35 Mottakerposisjon Hornsjøen.

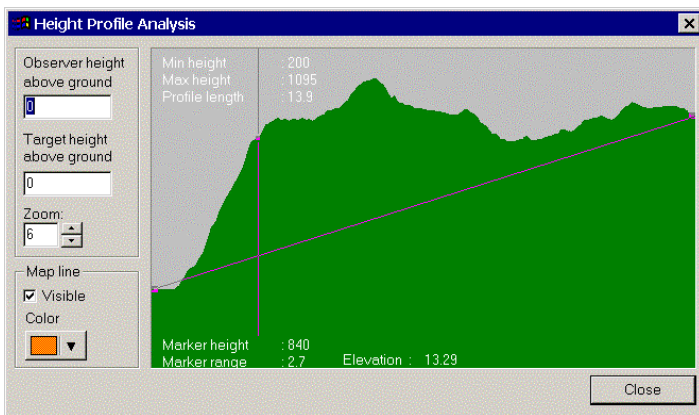


Figur A.36 Mottakerposisjon Nordsæter.

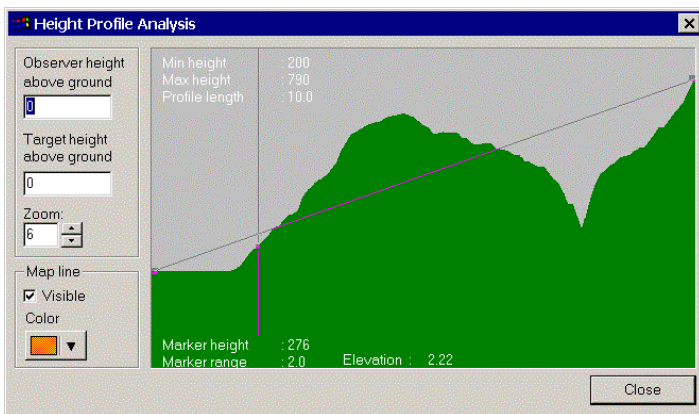
### A.3.2 Studentmåling i Ringebu



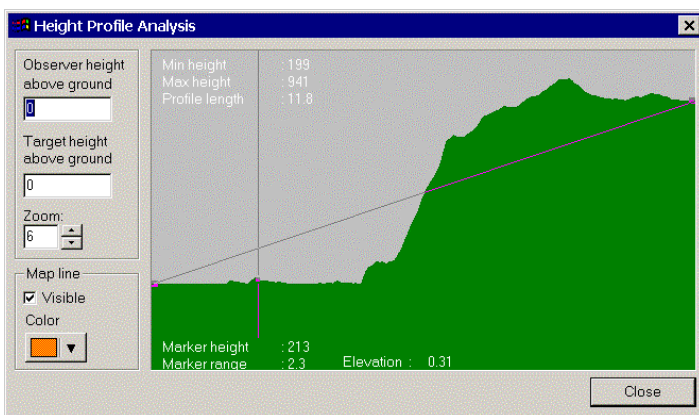
Figur A.37 Mottakerposisjon Fagerhøy.



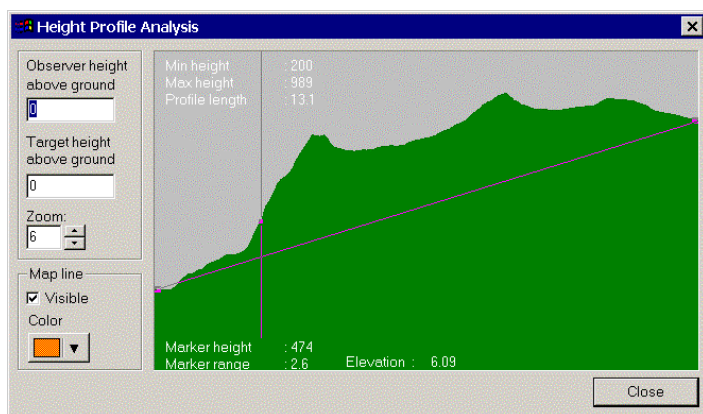
Figur A.38 Mottakerposisjon Toftesætra.



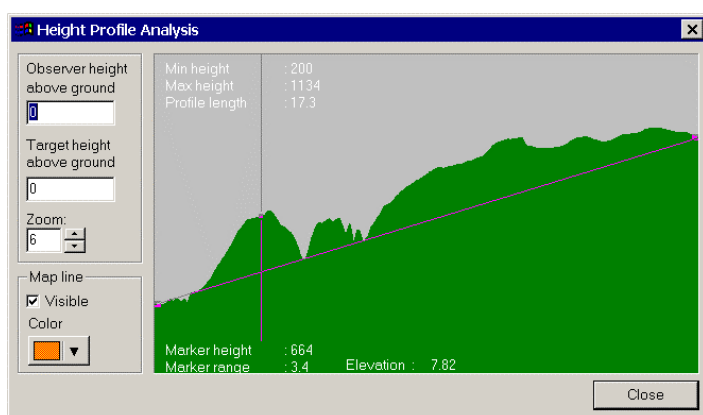
Figur A.39 Mottakerposisjon Flåta



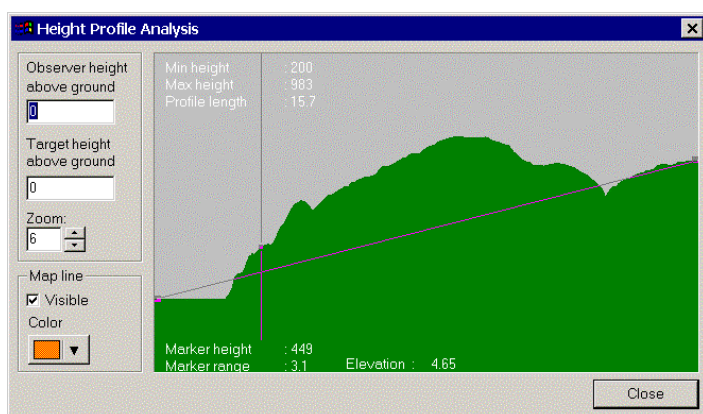
Figur A.40 Mottakerposisjon Kvarvet.



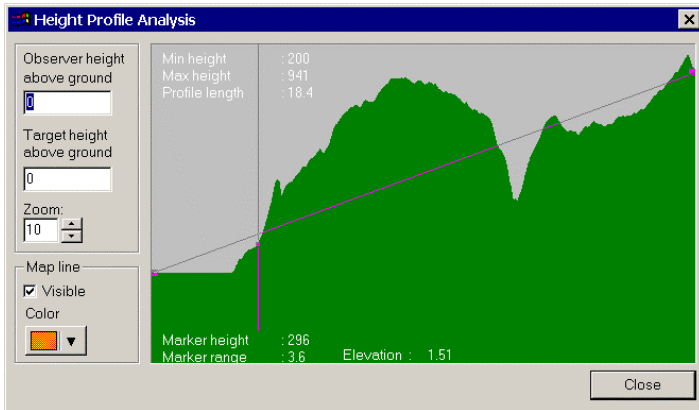
Figur A.41 Mottakerposisjon Frisksætra.



Figur A.42 Mottakerposisjon Jammerdalshøgda.

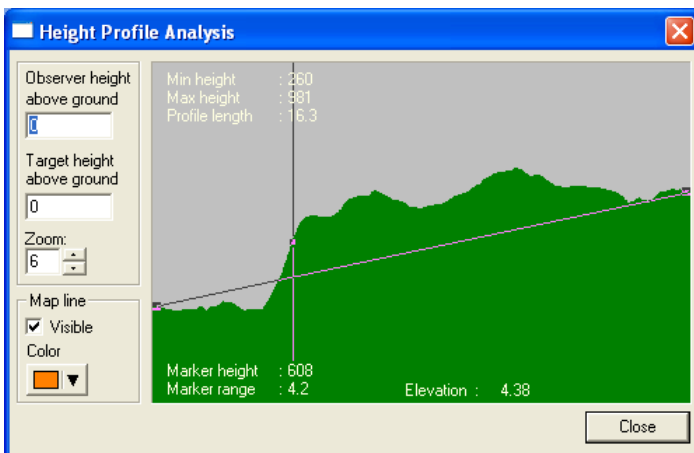


Figur A.43 Mottakerposisjon Langslåhøgda.

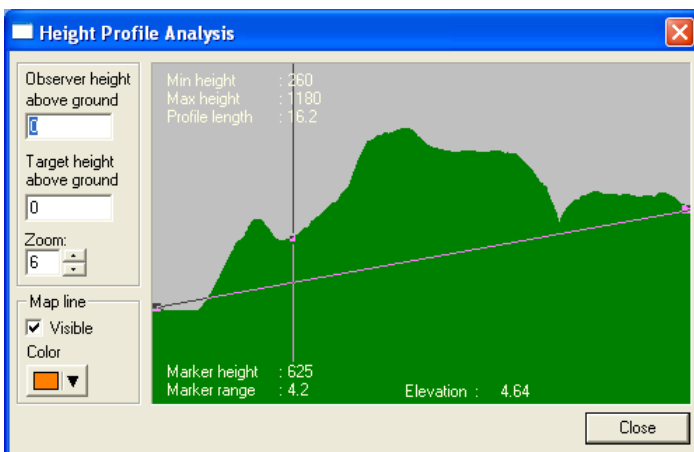


Figur A.44 Mottakerposisjon Oppsalsætra.

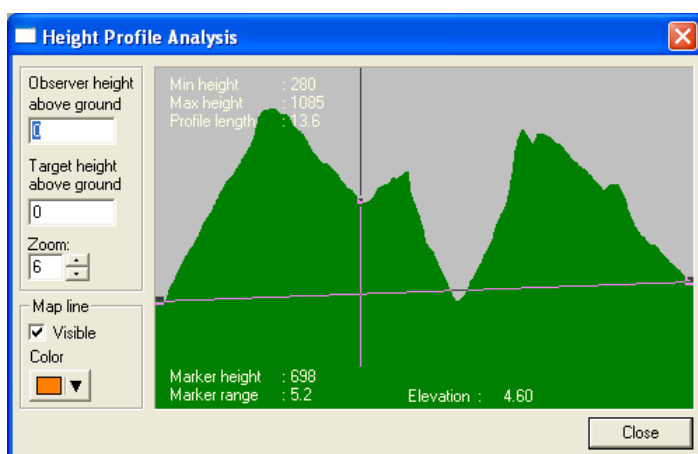
### A.3.3 Studentmåling i Kvam



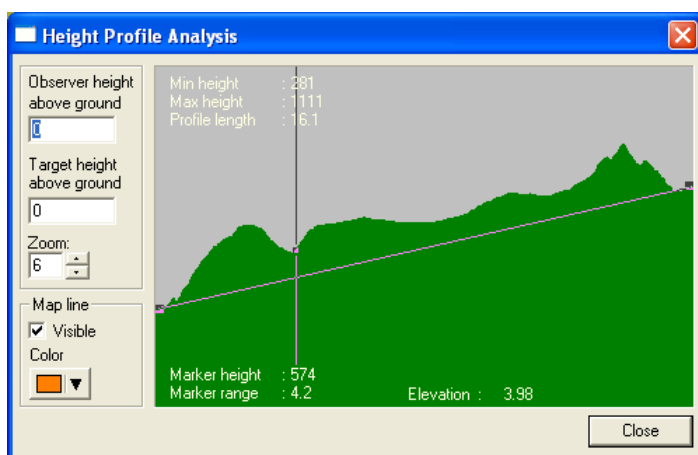
Figur A.45 Mottakerposisjon Kvarvet.



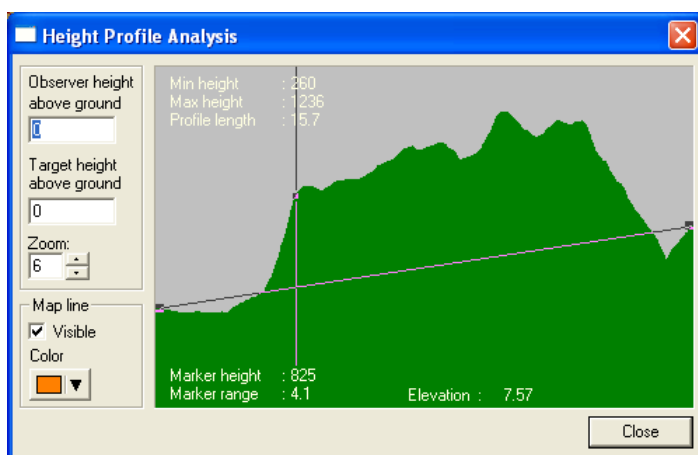
Figur A.46 Mottakerposisjon Hattdalshø.



Figur A.47 Mottakerposisjon Faukstad.



Figur A.48 Mottakerposisjon Mysusæter.



Figur A.49 Mottakerposisjon Venåssætra.

## Litteratur

- (1) ITU-Rec. 527-3, (1978-1982-1990-1992) (): Electrical characteristics of the surface of the earth.
- (2) Goodman, John M. (1992): HF Communications, Science and Technology ( s.192-193) Van Nostrand Reinhold, New York.
- (3) Hall, M.P.M.; Barclay, L.W.; Hewitt, M.T. (1996): Propagation of radiowaves, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- (4) Rotheram, A.S. (1982): Ground-wave propagation, *Marconi Rev.* **45**, 1, 18-48.
- (5) Sommerfeld A. (1909): The propagation of waves in wireless telegraphy, *Ann. Phys.* **28**, 665.
- (6) ITU-Recommendation P.368-7 (1994): Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz.
- (7) ITU-R Recommendation P.832 (1994): World atlas of ground conductivities, .
- (8) ITU-R Report 879-1 (1990): Methods for estimating effective electrical characteristics of the surface of the Earth., .
- (9) Millington, G and Isted, G.A. (1950): Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth. (Part II), *Proceedings of the I.E.E.*, 97, 209-222.
- (10) Lien E. og Lund, T. (2003): Jordbølgeutbredelse på HF i Gudbrandsdalen, Hovedprosjektoppgave 2003, Hærens Ingeniørhøgskole, Jørstadmoen.
- (11) Bremmer, H. (1949): *Terrestrial Radio Waves.* , Elsevier, London, UK.
- (12) Knut Stokke (): Kompendium: "Cables, propagation and antennas".
- (13) Johnson R. A. and Wichern D. W. (1992): *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Prentice Hall International Editions, London.
- (14) Teleplan AS (): MARIA 4.1.7 Map technology.
- (15) CCIR-Report 714-1 [CCIR 1986d] (): Ground-wave propagation in an exponential atmosphere, .