

# **MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU**

## **SOTILASSOVELLUKSISSA KÄYTETTÄVÄT VAIMENEMISMALLIT VHF-TAAJUUSALUEELLA**

Kandidaatintutkielma

Kadettialikersantti  
Simo Mikkonen

Kadettikurssi 99  
Maasotalinja

Maaliskuu 2015

## MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Kadettikurssi 99	Linja Johtamisjärjestelmäopintosuunta
Tekijä Kadettialikersantti Simo Mikkonen	
Tutkielman nimi <b>SOTILASSOVELLUKSISSA KÄYTETTÄVÄT VAIMENEMISMALLIT VHF-TAAJUUSALUEELLA</b>	
Oppiaine, johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika Maaliskuu 2015	Tekstisivuja 25 Liitesivuja 14
<b>TIIVISTELMÄ</b> <p>Radioaalloilla on rajallinen kantama. Tämän kantaman rajallisuus johtuu radioaaltojen vaimenemisesta yhteysvälillä etäisyyden ja esteiden vaikutuksesta. VHF-taajuusalueella (30–300 MHz) radioaaltojen eteneminen tapahtuu pääosin näköyhteysreittiä, minkä vuoksi niiden vaimenemista pystytään ennustamaan tyydyttävällä tarkkuudella. Vaimenemisen ennustamiseen on käytössä kehittyneitä ohjelmistosovelluksia, kuten ranskalainen HTZ re -ohjelmisto, mutta yleisluontoinen työväline karkeaan mallintamiseen puuttuu.</p> <p>Tutkielmassa selvitetään kirjallisuuskatsauksen avulla mitkä ulkoiset tekijät vaikuttavat VHF-vastaanottimelle saapuvan signaalin voimakkuuteen, esitellään radioaaltojen etenemiseen liittyviä peruskäsitteitä sekä kuvataan esimerkki mahdollisuudesta yksinkertaisella tavalla mallintaa yhteysväli maastokartan perusteella. Tutkielmassa esitetään valikoitu määrä sotilassovelluksissa käytettyjä yleisimpiä vaimenemismalleja kuten vapaan tilan eteneminen, kahden säteen eteneminen sekä esteiden vaimennuksen ennustamiseen käytettävä veitsenterämalli. Lisäksi esitetään yleisimpiä yhteysvälin kokonaisvaimenemisen ennustamiseen käytettyjä laskentametoodeja kuten Kansainvälisen televiestintäliiton (ITU) diffraktiomalli ja HTZ Warfare -ohjelmistoon varta vasten luotu ns. Fresnelin metodi.</p> <p>Tutkielmassa kuvataan matemaattisen mallinnuksen ja kolmen laskuesimerkin avulla, kuinka vertailuun valikoidut kokonaisvaimenemisen ennustamismetodit tuottavat toisistaan poikkeavia arvioita sekä selvitetään, mistä nämä erot johtuvat. Laskuesimerkkien tulosten perusteella havaittiin eri laskentametodien tuottavan suuresti toisistaan poikkeavia ennusteita. Tämä johtuu muun muassa mallien erilaisista painotuksista antennien korkeuden huomioimisessa sekä erilaisesta tavasta käsitellä yhteysvälin esteitä. Samassa yhteydessä havaittiin, että mikään vertailuissa malleista ei itsessään ota huomioon taajuuden nostamisen aiheuttamaa kasvuston vaimennuksen kasvamista.</p> <p>Kirjallisuuskatsauksen perusteella ITU:n suositusasiakirjoilla on vakiintunut asema vaimenemisen mallintamisessa ja niitä hyödyntäessään käyttäjällä on tukenaan laajan tiedeyhteisön vertaisarvioitu tutkimus. Myös HTZ Warfare -ohjelmiston Fresnelin metodin on yksittäisissä Suomessa suoritetuissa mittaustutkimuksissa havaittu tuottavan hyviä tuloksia.</p> <p>Kokonaisuudessaan tutkielmassa havaittiin, että yksi malli ei sovellu kaikkeen. Tämän vuoksi mallinnusta suorittavan on syytä tuntea erilaisten mallien toimintaperiaatteet ja niistä aiheutuvat mahdolliset rajoitteet. Ymmärryksen lisäämisen ohella yksinkertaisten mallien tunteminen mahdollistaa niiden soveltamisen toimintaolosuhteissa, joissa varsinaisia mallinnusohjelmistoja ei jostain syystä ole käytettävissä. Työn ohessa esitetty taulukkolaskentapohja ohjaa käyttäjänsä ja mahdollistaa yksinkertaisten vaimenemismallien avulla laskemisen maastokartan tarjoamilla pohjatiedoilla. Taulukkolaskentasovellus sisältyy tutkielman CD-ROM-julkaisuun.</p>	
<b>AVAINSANAT</b> Very high frequency, VHF, mallintaminen, radiotekniikka	

# SOTILASSOVELLUKSISSA KÄYTETTÄVÄT VAIMENEMISMALLIT VHF-TAAJUUSALUEELLA

## SISÄLLYS

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
1.1	TUTKIMUSKYSYMYS JA RAJAUKSET .....	1
1.2	AIKAISEMPI TUTKIMUS AIHEESTA .....	3
1.3	TUTKIMUSMENETELMÄT .....	3
1.4	TÄRKEIMMÄT LÄHTEET JA LÄHDEKRITIIKKI.....	3
<b>2</b>	<b>RADIOTIE</b> .....	<b>4</b>
2.1	RADIAALLON ETENEMINEN JA VHF-TAAJUUSALUE .....	4
2.2	VHF-RADIOAALLON ETENEMISEN KUVAAMINEN .....	6
<b>3</b>	<b>VAIMENEMISMALLIT</b> .....	<b>9</b>
3.1	YKSITTÄISET VAIMENEMISTEKIJÄT .....	9
3.2	USEAMMAN ESTEEN MALLINTAMINEN - RAKENNELMAT .....	11
3.3	YHTEYSVÄLIN KOKONAISVAIMENNUS .....	13
<b>4</b>	<b>VAIMENNUSMALLIEN VERTAILU</b> .....	<b>18</b>
4.1	TAAJUUDEN VAIKUTUS VAIMENEMISEEN .....	18
4.2	ETÄISYYDEN VAIKUTUS VAIMENEMISEEN .....	19
4.3	MAASTOESTEIDEN VAIKUTUS .....	20
4.4	KOKONAISMALLIEN VERTAILU LASKUESIMERKKIEN AVULLA .....	20
<b>5</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>24</b>

LÄHTEET

LIITTEET

# SOTILASSOVELLUKSISSA KÄYTETTÄVÄT VAIMENEMISMALLIT VHF-TAAJUUSALUEELLA

## 1 JOHDANTO

Radioaalloilla on rajallinen kantama, mikä näkyy tavalliselle radion käyttäjälle riittävän kauas siirryttäessä kuuluvuuden heikkenemisenä ja lopulta yhteyden katkeamisena. Sotilasympäristössä suunniteltaessa viestijärjestelmien tai elektronisen sodankäynnin joukkojen ryhmitystä ja toimintaa tarvitaan tätä vaimenemista ennustavia malleja [1, s. 123].

Sotilaskäytössä VHF-taajuusalueella toimii paljon kenttäradioista ja ilmailuradioista muodostuvia taktisia viestijärjestelmiä. Tämän taajuusalueen järjestelmillä saavutetaan hyvä kompromissi liikkuvien käyttäjien kannalta. Tällaisia vaatimuksia ovat esimerkiksi koko, paino, kantama ja toiminta-aika. [2, s. 15; 3, s. 108]

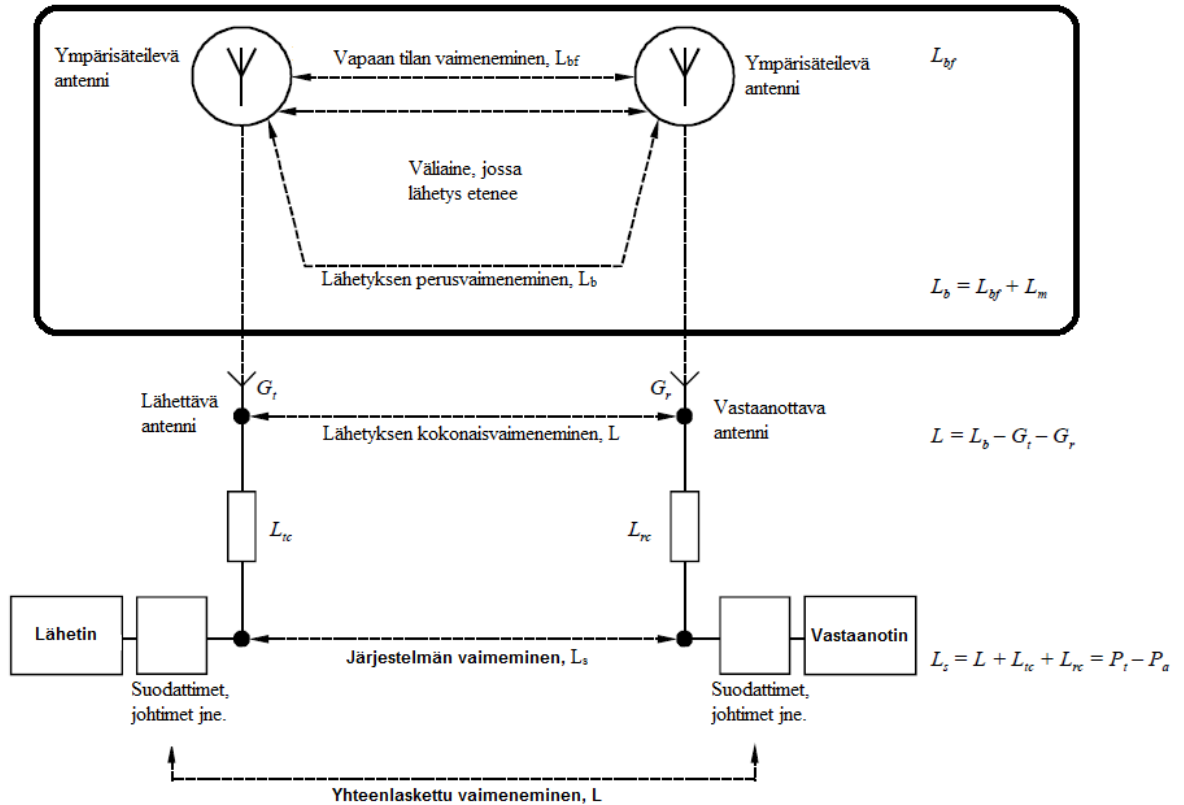
Tutkimusten tuloksena ei ole syntynyt yksiselitteistä konsensusta siitä, mitä vaimenemismallia radiosignaalien mallintamiseen tulisi käyttää. Tietyissä tilanteissa tarkka, mutta hidas malli voi sopia käyttäjän vaatimukseen huonommin kuin epätarkempia, mutta nopeampia tuloksia tuottava laskentamalli. Toisaalta tarkinkin malli voi tuottaa todelliseen ympäristöön verrattuna hyvin poikkeavia tuloksia. [4, s. 65] Sodankäynnin yhteydessä toiminnan tempo asettaa vaatimuksia analyysiin käytettävälle ajalle ja tämän vuoksi yksinkertaistetut mallit ovat suosittuja. [1, s. 123]

### 1.1 Tutkimuskysymys ja rajaukset

Tutkimuksen pääkysymys on: mitä VHF-taajuusalueen vaimenemismalleja käytetään sotilassovelluksissa ja minkälaisia eroja mallit tuottavat?

Tutkimuksen pääkysymystä on jäsennelty alakysymyksillä:

- Mitkä ulkoiset tekijät vaikuttavat VHF-vastaanottimelle saapuvan signaalin voimakkuuteen?
- Mitkä ovat yleisesti käytettyjä vaimenemismalleja siviili- ja sotilassovelluksissa VHF-taajuusalueella ja mihin ne perustuvat?
- Miten erilaiset mallinnustilanteet vaikuttavat mallien tuottamiin laskennallisiin tuloksiin ja mistä ne johtuvat?



Kuva 1. Lähteyksen vaimenemiseen liittyvät käsitteet ja tutkimuksen rajaus [5, s. 2]

Etenemisvaimenemismallit arvioivat lähettävän ja vastaanottavan antennin välillä tapahtuvaa vaimenemista. Tämä on kuvassa 1 lähteyksen perusvaimeneminen,  $L_b$  (englanniksi basic attenuation). Tämän vuoksi tässä tutkielmassa ei käsitellä lähettävän ja vastaanottavan laitteiston ominaisuuksista johtuvia signaalihäviöitä tai ympäristön aiheuttamia muutoksia järjestelmän itsensä toimintaan, kuten esimerkiksi sateen vaikutusta antennin ominaisuuksiin.

Vastaanottimelle saapuva teho muodostuu kokonaisuudesta:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L \quad (1)$$

, missä  $P_r$  = vastaanottimelle saapuva teho [dBm],  $P_t$  = lähettimen lähettämä teho [dBm],  $G_t$  = lähettimen antennivahvistus [dB],  $G_r$  = vastaanottimen antennivahvistus [dB],  $L$  = yhteenlaskettu vaimeneminen [dB]. [1, s. 122] Tässä tutkimuksessa esitetään ja arvioidaan erilaisia laskennallisia tapoja ennustaa  $L$ :n arvoa.

Tutkimuksessa sotilassovelluksilla tarkoitetaan sotilaallisessa kirjallisuudessa ja tutkimuksissa käytettyjä malleja. Lisäksi sivutaan näitä malleja soveltavia ohjelmistoja.

## 1.2 Aikaisempi tutkimus aiheesta

Radioaaltojen etenemistä ja vaimenemista sekä sen mallintamista on tutkittu paljon. Tutkimusalue kuuluu vahvasti kaikkien langattomaan tiedonsiirtoon keskittyvien yritysten ja organisaatioiden intresseihin. Sotilasviestintä ei tällä alueella eroa mitenkään siviilimaailmasta, koska luonnontieteellinen viitekehys on kaikille sama. Yritysmailman painopiste nykytutkimuksessa on tyypillisesti VHF-aluetta korkeammissa taajuusalueissa, joita käytetään esimerkiksi mobiililaitteiden ja langattomien lähiverkkojen tiedonsiirrossa. Tutkimukset keskittyvät yleensä rakennetun alueen vaimenemisen mallintamiseen [6, 7]. Yleinen trendi on myös esitellä tutkimuksessa uusi itse kehitelty malli, joka tietyllä alueella suoritetuissa mittauksissa on tuottanut parempia tuloksia kuin jokin yleisesti tunnettu ja käytetty malli [8, 9].

## 1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksessa käytettävät menetelmät ovat kirjallisuuskatsaus ja matemaattinen mallinnus. Aiheen kirjallisuutta tutkimalla vastataan tutkimuksen kahteen ensimmäiseen alakysymykseen. Kolmanteen alakysymykseen vastataan mallintamalla matemaattisesti erilaisia skenaarioita etenemismallien avulla.

## 1.4 Tärkeimmät lähteet ja lähdekritiikki

Lähteinä on käytetty David Adamyn elektronista sodankäyntiä käsittelevän EW 100 -sarjan kirjoja, Jyri Kosolan ja Tero Solanteen Digitaalinen taistelukenttä -kirjaa sekä Jyri Kosolan ja Janne Jokisen Elektroninen sodankäynti osa 1 – taistelun viides dimensio. Lisäksi joidenkin mallien lähteenä on käytetty radiotekniikan oppikirjoja kuten John Seyboldin Introduction to RF Propagation sekä J.D. Parsonsin The Mobile Radio Propagation Channel. Tutkimuksessa on käytetty pelkästään julkisia lähteitä, mutta painopiste on pyritty luomaan elektronista sodankäyntiä koskevaan kirjallisuuteen sotilaallisen näkökulman säilyttämiseksi. Perusteiden ja käsitteiden lähteenä on käytetty Kansainvälisen televiestintäliiton (International Telecommunications Union, ITU) suositusasiakirjoja. Tutkimuksessa käsitellään joidenkin lähteiden osalta niiden esitysten monitulkintaisuutta ja pyritään käytännössä soveltamalla arvioimaan tarkoitettua merkitystä.

## 2 RADIOTIE

### 2.1 Radiaallon eteneminen ja VHF-taajuusalue

Radioaallot ovat sähkömagneettista säteilyä, joka etenee tyhjiössä valonnopeudella. Väliaine hidastaa sähkömagneettisen aallon etenemistä, mutta alailmakehässä tämä hidastuminen ei ole merkittävää. [2, s. 41–42] Very-high frequency (VHF) -taajuusalue käsittää taajuuskaistan 30 MHz ja 300 MHz välillä. Vastaavat aallonpituudet näille taajuuksille ovat karkeasti 10 m ja 1,0 m. Käytettävät antennit ovat VHF-alueella suhteellisen pienikokoisia ja ulottuvat tavallisesti useamman aallonpituuden mitan korkeudelle maasta [4, s. 6].

VHF-alueella normaalisti ainoa luotettavasti ennakoitava signaalin eteneminen tapahtuu näköyhteysreittiä (line-of-sight) [2, s. 63; 4, s. 6]. Maan ilmakehän taitekerroin muuttuu korkeuden funktiona, mikä aiheuttaa signaalin taipumisen maanpintaa kohti. Tämän vuoksi aalto ei etene näköyhteysreittiä täysin suoraviivaisesti ja radiohorisontti on geometrinen horisonttia kauempana. Radiohorisontti on näköyhteysreittiä etenevän signaaliaallon suurin teoreettinen kantama. Pythagoraan lauseen kautta johdettuna radiohorisontti lähetinantennille ja vastaanotinantennille määrittyy:

$$d \approx 4,12 (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad (2)$$

, missä  $d$  = suurin mahdollinen yhteysetäisyys [km],  $h_t$  = lähetysantennin korkeus [m],  $h_r$  = vastaanotinantennin korkeus [m]. Kaavan vakio on laskettu maapallonsäteellä 6370 km ja aallon taittuminen on otettu huomioon kertomalla säde arvolla  $4/3$ . Efektiivinen maapallon säde on tällöin 8500 km. Tämä on yleisesti käytetty toimintatapa. [2, s. 75–76; 10, s. 3]

Kun mallinnetaan näköyhteysreittiä etenevää signaaliaaltoa, pelkästään ns. ensimmäisen fresnelin vyöhykkeen alueella olevat kohteet aiheuttavat vaimennusta. 1. fresnelin vyöhyke on sellainen alue, jonka sisällä esimerkiksi esteestä heijastuvien aaltojen vaihe muuttuu ja nämä eri vaiheissa vastaanottimelle saapuvat aallot vaimentavat toisiaan. Tämän alueen säde yhteysvälin puolivälissä saadaan laskemalla:

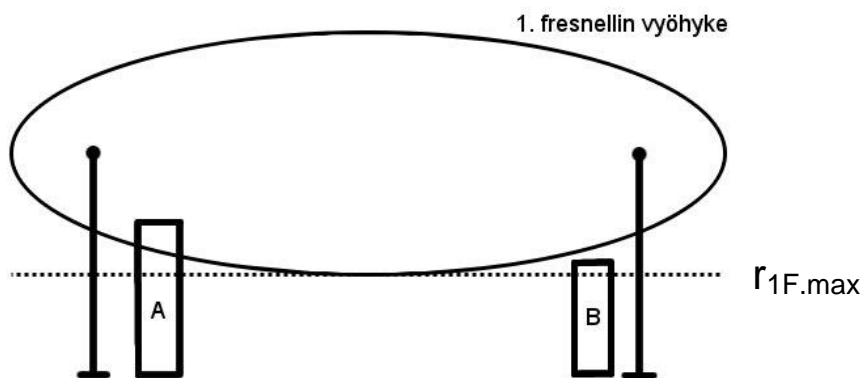
$$r_{1F.max} = 274 \sqrt{\frac{d}{f}} \quad (3)$$

, missä  $r_{1F.max}$  = 1. fresnelin vyöhykkeen säde [m],  $d$  = yhteysväli [km],  $f$  = signaalin taajuus [MHz]. Yhteysvälin puolivälissä fresnelin vyöhykkeet ovat leveimmillään. Mikäli yhteysvä-

lillä on este, joka peittäisi ensimmäisen vyöhykkeen sen leveimmällä osalla, voidaan vyöhykkeen säde esteen kohdalla laskea seuraavalla tavalla:

$$r_{1F} = 548 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f(d_1 + d_2)}} \quad (4)$$

, missä  $r_{1F}$  = 1. fresnelin vyöhykkeen säde [m],  $d_1$  = lähtetimen ja esteen välinen etäisyys [km],  $d_2$  = esteen ja vastaanottimen välinen etäisyys [km],  $f$  = signaalin taajuus [MHz]. [2, s. 77–78] Yleensä esitetään, että ensimmäisen fresnelin vyöhykkeen ollessa vapaa esteistä, signaali-aalto etenee pääasiassa näköyhteysreitillä ja tulee käyttää siihen perustuvaa etenemismallia. Jos fresnelin vyöhykkeellä on esteitä kuten mäkiä tai rakennuksia, tulee käyttää jotakin mallia radioaallon diffraktoitumisen ja siroamisen huomiointiin. [2, s. 78; 11, s. 2] Kuvassa 2 molemmat esteet peittäisivät 1. fresnelin vyöhykkeen sen leveimmällä kohdalla, mutta kuvassa vain este A peittää vyöhykkeen. Maanpinnassa käytettävien VHF-kenttäradioiden tapauksessa 1. fresnelin vyöhyke on käytännössä aina peittynyt, koska radioiden käyttämät antennit ovat niin lyhyitä. Esimerkiksi taajuudella 88MHz ja yhteysvälin ollessa viisi kilometriä 1. fresnelin vyöhyke on leveimmillään säteeltään noin 60m.



Kuva 2. Ensimmäisen fresnelin vyöhykkeen muoto

On olemassa myös malli, jossa hiukan harhaanjohtavasti nimitetään fresnelin vyöhykkeeksi laskennallisesti määritettävää etäisyyttä lähtimestä. EW 103 Communications Electronic Warfare -kirjassa esitetään toimintatapa, jossa vastaanottimen ollessa tämän fresnelin vyöhykkeen sisällä yhteyssuunnassa tulisi käyttää vapaan tilan vaimenemisen mallia. Mikäli vastaanotin on tämän alueen ulkopuolella tulisi puolestaan käyttää kahden säteen etenemismallia lisävaimenemisen huomioon ottamiseksi. Etäisyydellä FZ molemmat mallit tuottavat saman tuloksen. Tämä ”fresnelin etäisyys” saadaan kaavasta:



$$FZ = \frac{h_T h_R f}{24\,000} \quad (5)$$

, missä  $FZ$  = fresnelin etäisyys [km],  $h_T$  = lähetyksantennin korkeus [m],  $h_R$  = vastaanotintennin korkeus [m],  $f$  = signaalin taajuus [MHz]. [1, s. 134-135]

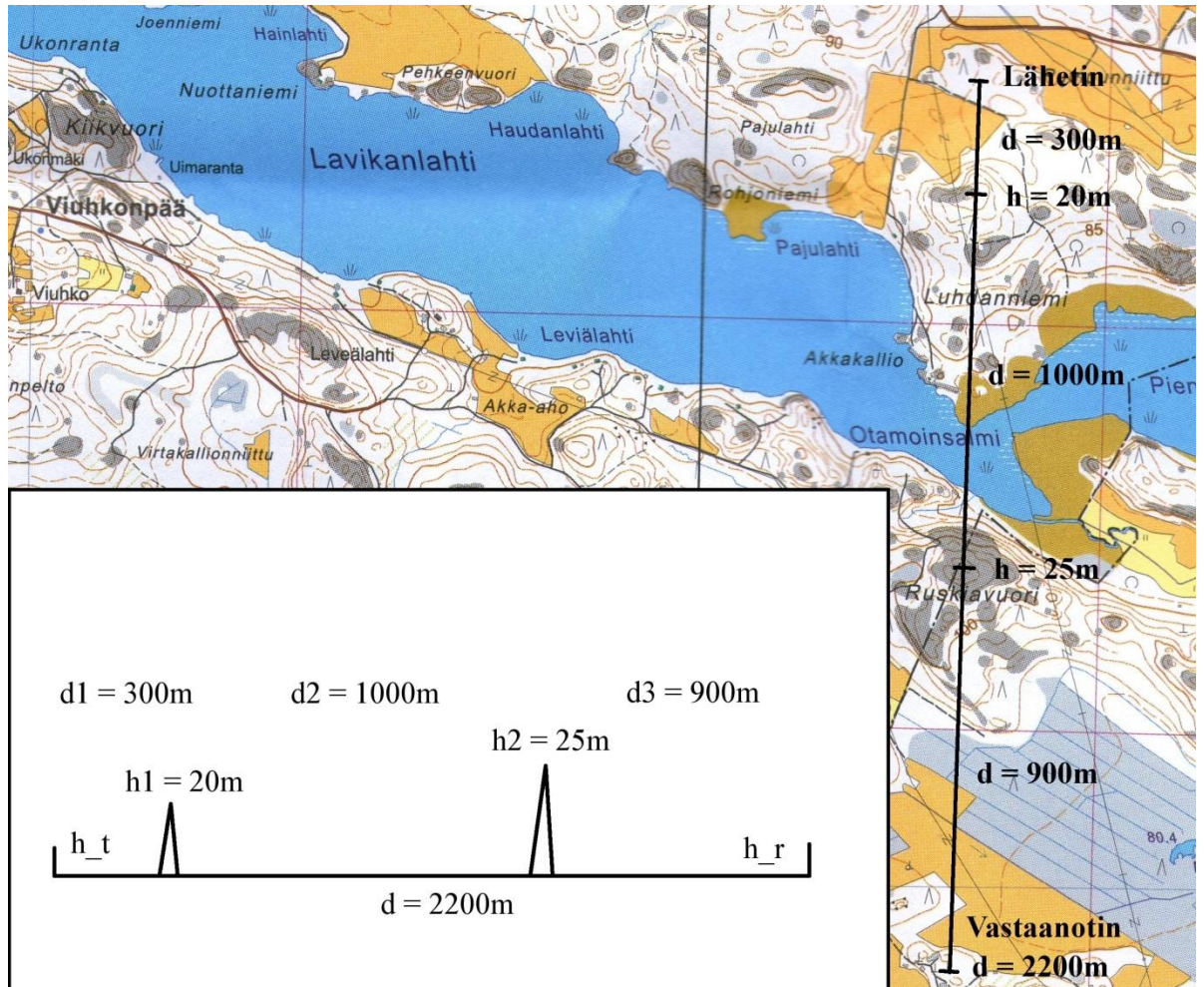
## 2.2 VHF-radioaallon etenemisen kuvaaminen

Yleisesti sähkömagneettisen säteilyn etenemiseen vaikuttavat ilmakehän troposfääriin, ionosfääriin ja maaston ominaisuudet. Näiden vaikutuksesta säteily voi vaimeta, diffraktoitua, heijastua tai sirota. VHF-alueella esteitä sisältävällä yhteysvälillä tärkeimmät ilmiöt, jotka vaikuttavat signaalin voimakkuuteen, ovat tavallinen signaalin leviämisestä johtuva vaimeneminen sekä diffraktoituminen. [2, s. 66]

Maanpinnan muodot ja peitteinen kasvillisuus vaimentavat VHF-signaalia merkittävästi etenkin taajuusalueen yläpäässä. Tämän vuoksi esimerkiksi kenttäradiot toimivat tyypillisesti 30–88 MHz taajuusalueella. [2, s. 63] Sateen, sumun ja lumen vaikutus VHF-signaalin etenemiseen on käytännössä merkityksetön [2, s. 115]. Luvussa 3 ei esitellä laskennallisia tapoja huomioida puuston tai kasvuston vaikutusta signaalin etenemiseen, koska ne vaativat käyttäjältään paljon tietoa mallinnettavasta alueesta ja/tai suuria yleistyksiä edes karkean ennustustarkkuuden saavuttamiseksi.

Etenemisvaimenemista ennustavat mallit voivat perustua puhtaasti teoreettiseen etenemisen mallintamiseen, empiirisiin mittaustuloksiin tai olla näiden kahden yhdistelmiä [4, s. 65]. Hyvän ennustustarkkuuden saavuttavien etenemismallien luominen vaatii kattavia mittausaineistojen keräämistä ja analysointia kyseisen toiminta-alueen maastosta ja kasvustosta. On kyseenalaista onko tällainen työmäärä saatuun hyötyyn nähden tasapainossa. Todellisessa tilanteessa monitie-eteneminen, joka aiheuttaa vastaanottimessa vaihe-eroa ja sitä kautta signaalin heikkenemistä, johtaa siihen, että vaimeneminen voi vaihdella pienelläkin alueella siirryttäessä hyvin voimakkaasti. [4, s. 14] Erityisesti sotilaallisessa toimintaympäristössä olosuhteet ja maasto voivat vaihdella nopeasti, minkä vuoksi yleensä käytetään yksinkertaisia suuntaantavia malleja mediaanivaimenemisen ennustamiseksi [1, s. 123]. Kaikki tässä tutkimuksessa luvussa 3 kuvatut mallit ennustavat tätä mediaanivaimenemista, mikä tarkoittaa että todellisessa tilanteessa puolessa tapauksista vaimeneminen olisi tätä suurempaa ja puolessa tapauksista pienempää.

Kuvassa 3 on esitetty yksi tapa pelkistää maastoprofiili yksinkertaisilla laskuilla käsiteltävään muotoon. Yhteysvälillä sijaitsevista kahdesta mäestä on otettu huomioon niiden korkeus ja etäisyys, joiden perusteella on saatu mitat kahdelle ideaaliselle veitsenteräesteelle. Tällaisen mallinnuksen toteuttaminen vaatii pelkästään maastokartan ja viivaimen. Jäljempänä suoritettavat vaimenemismallien vertailut on myös toteutettu tällaisten yksinkertaistettujen maastoprofiilien avulla.



Kuva 3. Yksinkertainen kartan perusteella hahmoteltu yhteysvälin maastoprofiili (Maastokartta © Maanmittauslaitos, lupa nro 28/MML/10)

Suomessa erilaisten viestijärjestelmiä käsittelevien tutkimusten yhteydessä on käytetty ainakin ranskalaisen ATDI:n HTZ Warfare -ohjelmistoa verkkojen mallintamiseen [12; 13; 14]. Tutkimuksissa on käsitelty vaihtelevalla tarkkuudella mallinnuksen toteutusta. Maanpuolustuskorkeakoululla kandidaatintutkinnon 4A09A/B Johtamisjärjestelmä- ja tiedonsiirtotekniikka -opintojaksolla on ollut käytössä Jouko Vankan laatima elektronisen tiedustelun taulukkolaskentasovellus, jossa käytetään vapaan tilan vaimenemisen sekä Eglin mallia [15]. Topias Laaksonen on kandidaatintutkielmassaan käyttänyt suomalaisessa Radiohäirintäoppaassa esitettyä vaimenemismallia venäläisten häirintäjärjestelmien suorituskyvyn arvioinnissa. Malli

on hyvin yksinkertainen linkkibudjetin laskukaavan mukaelma, jossa on mukana karkeasti määritettävä maastovaimennustekijä. [16] Tätä kyseistä mallia ei tässä tutkimuksessa esitetä.

### 3 VAIMENEMISMALLIT

#### 3.1 Yksittäiset vaimenemistekijät

Kaikki radioaallot etenevät näköyhteysreittiä ja se on myös VHF-alueella tyypillisesti ainut etenemistapa, jolla signaalin mallinnetaan etenevän. Näköyhteysreittiä etenevää radioaaltoa voidaan mallintaa ns. vapaan tilan etenemisellä. **Vapaan tilan eteneminen** (eng. free space propagation tai line-of-sight model) mallintaa nimensä mukaisesti tilannetta, jossa yhteysvä- lillä ei tapahdu heijastumista. Se kuvaa ideaalitulannetta, missä radioaalto vaimenee vapaassa tilassa levitessään tasaisesti ja pallomaisesti ympäristöön. Tämän kaltainen tilanne syntyy rea- alimaailmassa yleensä vain suurilla taajuuksilla ja suurella korkeudella, mutta myös käytet- täessä suuntaavia antenneja. [3, s. 113] Malli toimii usein pohjana, jonka päälle liitetään muita vaimenemismalleja riippuen ympäristöstä ja olosuhteista. Vapaan tilan vaimennus desibeleinä saadaan kaavasta:

$$L = 32,44 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad (6)$$

, missä  $L$  = häviö [dB],  $f$  = taajuus [MHz],  $d$  = etäisyys [km]. [17, s. 2]

Matalammilla taajuuksilla ja matalilla antennilla eteneminen tapahtuu suoran näköyhteysrei- tin lisäksi heijastuksena maan- tai vedenpinnasta. Tähän perustuvaa mallia kutsutaan **kahden säteen etenemiseksi** (eng. two-ray propagation). Tässä mallissa signaalin taajuudella ei ole merkitystä. Vaimennus saadaan kaavalla:

$$L = 120 + 40 \log(d) - 20 \log(h_t) - 20 \log(h_r) \quad (7)$$

, missä  $L$  = häviö [dB],  $d$  = etäisyys [km],  $h_t$  = lähetysantennin korkeus [m],  $h_r$  = vastaan- otinantennin korkeus [m]. [3, s. 114–115] Tästä mallista käytetään joissain yhteyksissä myös nimitystä plane earth -malli [2, s. 109–110; 4, s. 24].

On olemassa erilaisia suosituksia, milloin tulee käyttää kahden säteen etenemisen mallia va- paan tilan etenemisen sijasta. EW 100 -sarjassa kriteerinä käytetään ns. fresnelin etäisyyttä, jonka ylittävissä yhteyksissä käytetään kahden säteen etenemisen mallia [1 s. 134]. Yhdisty- neiden kuningaskuntien JRC-metodissa puolestaan valitaan kahdesta mallista se, joka tuottaa suuremman vaimenemisen [4, s. 55].

Yleisin tapa huomioida näköyhteysreitillä esiintyvä este on ns. **veitsenterämalli** (eng. knife-edge propagation). Ylityksen seurauksena signaaliaalto diffraktoituu, mistä aiheutuu lisävaimenemista vapaantilan vaimenemisen lisäksi. Mallissa este kuvataan äärettömän leveänä tasona, joka rajoittuu korkeusakselilla todellisen esteen korkeudelle. Todellisuudessa esteen geometrinen muoto sekä esteen sivuilta kiertävät reitit vaikuttavat myös signaalin vaimenemiseen. Veitsenterän aiheuttama vaimennus saadaan kaavalla:

$$L = 6.9 + 20 \log \left[ \sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right] \quad (8)$$

[2, s. 78] Kaava pätee, kun  $v > -0,78$ . Huomionarvoista on, että viitatussa Digitaalinen taistelulukenttä -kirjan kaavassa on virhe, kun sitä verrataan ITU:n diffraktiomallinnussuositukseen. [11, s. 19] Yllä olevaan kaavaan tämä virhe on korjattu. Kaava pyrkii mukailemaan ns. fresnelin integraalia, jonka esitys on suhteellisen monimutkainen eikä sitä tässä sen vuoksi esitetä. Yllä esitetty yksinkertaistus mukailee integraalia erittäin hyvin paitsi silloin, kun este on näköyhteysjanan alapuolella. Tällöin vaimennus on kuitenkin voimakkaimmillaan vain 1dB luokkaa ja sen huomioonottamisen mielekkyys kyseenalaista.

Kaavassa esiintyvä  $v$  on ns. fresnelin parametri, joka saadaan laskemalla:

$$v = h \sqrt{\frac{f}{150} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (9)$$

, missä  $f$  = taajuus [MHz],  $h$  = esteen korkeus laskettuna lähettimen ja vastaanottimen antennien yhdistävästä janasta [m],  $d_1$  = lähettimen ja esteen etäisyys [m],  $d_2$  = esteen ja vastaanottimen etäisyys [m]. [2, s. 78]

Veitsenterämallin kaavasta esiintyy myös muotoa, jossa käytetään paloittain määriteltyä funktiota [11, s. 37–39]. Tämä antaa fresnelin parametrin arvoilla  $-0,78$ – $10$  lähes poikkeuksetta saman tuloksen kuin yllä esitetty kaava. Ainoa poikkeama on välillä  $2 < v < 2,4$ , missä paloittain määritelty funktio kasvaa hiukan voimakkaammin ollen äärimmillään kuitenkin vain n. 1dB suurempi. Tämä yhdistettynä yksinkertaisempaan esitysmuotoon puoltaa yllä esitetyn funktion käyttöä.

Mikään este ei reaali maailmassa ole äärettömän kapea veitsenterä ja todellisuudessa esteen tiilavuus aiheuttaa lisävaimennusta. Yksi tapa arvioida lisävaimennusta on mallintaa este sylin-

terinä ITU:n diffraktiosuositusasiakirjan mallin mukaisesti. Mikäli yksittäisen esteen säde on tiedossa, muodostuu diffraktiovaimeneminen seuraavasti:

$$L = L(\text{veitsenterä}) + L(\text{pyöreä este}) \quad (10)$$

Veitsenterän aiheuttama vaimeneminen lasketaan vastaavalla tavalla kuin aiemmin esitettiin, mutta kuvan 4 osoittamalla tavalla veitsenterän korkeus mitataan antennien kautta kulkevien ympyrän tangenttien leikkauspisteestä. Sylinterimäisen esteen aiheuttama lisävaimeneminen saadaan kaavasta:

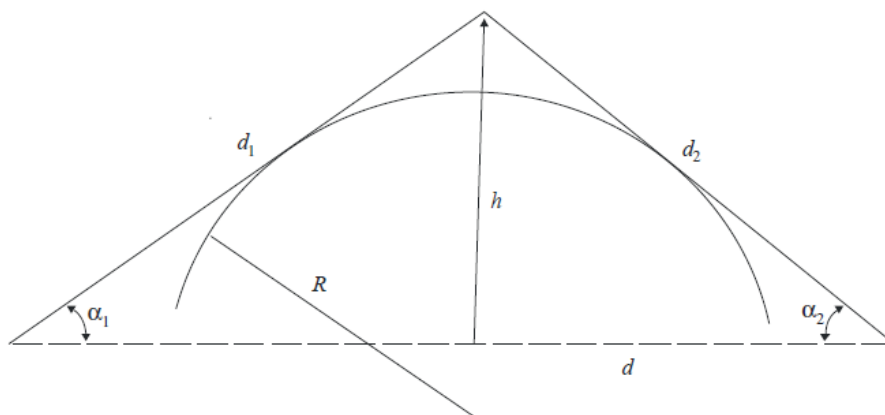
$$L = \begin{cases} 7,2\sqrt{m} - (2 - 12,5n)m + 3,6m^{\frac{3}{2}} - 0,8m^2 & | mn \leq 4 \\ -6 - 20 \log(mn) + 7,2\sqrt{m} - (2 - 17n)m + 3,6m^{\frac{3}{2}} - 0,8m^2 & | mn > 4 \end{cases} \quad (11)$$

Muuttujat  $m$  ja  $n$  määritetään seuraavasti:

$$m = 0,0069R \left[ \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right] : [\pi R f]^{1/3} \quad (12)$$

$$n = 0,0223h[\pi R f]^{2/3} : R \quad (13)$$

, missä  $d_1$  = esteen etäisyys lähetinantennista (mitattuna esteen huippukohdasta) [km],  $d_2$  = esteen etäisyys vastaanotinantennista [km],  $R$  = esteen säde [m],  $f$  = signaalin taajuus [MHz].  
[11, s. 20]

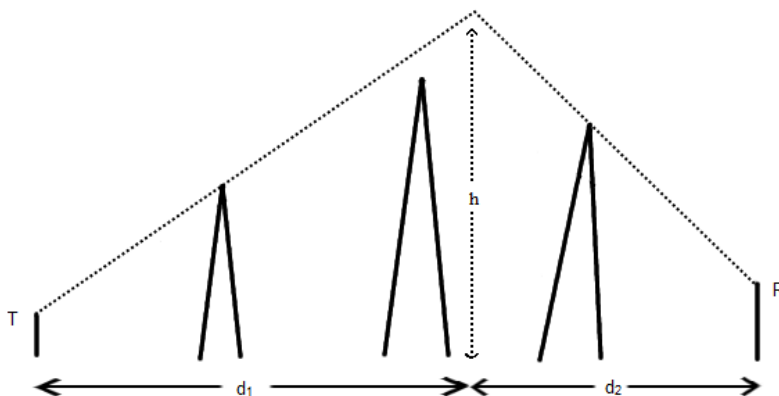


Kuva 4. Sylinterimäisen esteen geometria ITU:n mallin mukaan [11, s. 18]

### 3.2 Useamman esteen mallintaminen - rakennelmat

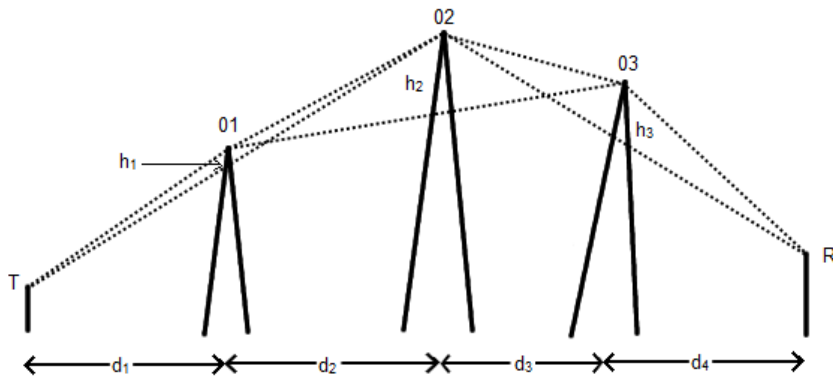
Useamman esteen aiheuttaman vaimennuksen arviointi on matemaattisesti hieman monimutkaista, mutta karkeaan tarkkuuteen päästään veitsenterämallilla, johon käytetään jotakin geometrista rakennelmaa (eng. construction), millä lisäesteet otetaan huomioon. Näitä rakennelmalleja on lukuisia ja tässä esitetään vain yksinkertaisimmat ja yleisimmin käytetyt, joita hyödynnetään jäljempänä esitetyissä kokonaismetodeissa. [4, s. 47]

Yksinkertainen rakennelma on **Bullingtonin ns. vastaava veitsenterä**. Kuten kuvassa 5 on esitetty, siinä piirretään antenneista horisontin muodostavien esteiden kautta janat. Janojen leikkauspistettä käytetään veitsenterän korkeutena. Rakennelma jättää huomiotta paljon horisontin alle jääviä etenemisreittejä. Tämän vuoksi se yleensä aliarvioi diffraktiovaimenemista. [4, s. 47]



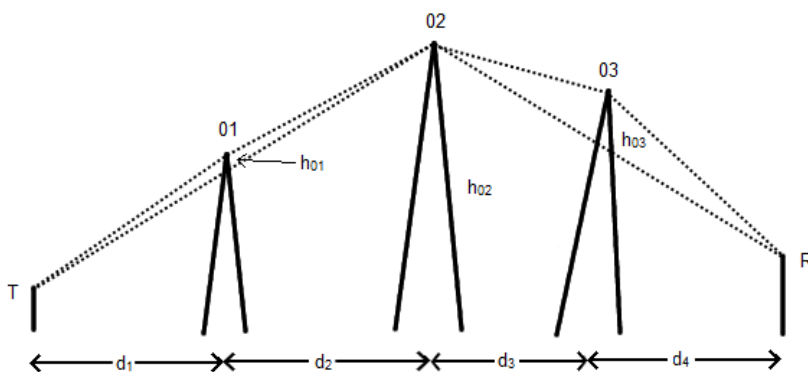
Kuva 5. Bullingtonin rakennelman geometria [4, s. 48]

Toinen tapa käsitellä useampaa veitsenterää on **Epsteinin-Petersonin rakennelma**. Siinä jokaista estettä käsitellään suhteessa seuraavaan esteeseen. Esimerkiksi kuvassa 6 esteen 01 veitsenterän korkeusermi on se osa esteestä, joka jää T-02-janan yläpuolelle. Vaikka esimerkiksi kaikki esteet muodostuvat janojen yläpuolelle, voidaan rakennelmaa käyttämällä myös janan alapuolelle jäävät, mutta silti 1. fresnelin vyöhykettä peittävät esteet ottaa huomioon. Kaikille esteille lasketaan näin veitsenterävaimennukset, jotka lopuksi summataan yhteen. Rakennelman on havaittu tuottavan suuria virheitä kahden esteen ollessa hyvin lähekkäin. [4, s. 48]



Kuva 6. Epsteinin-Petersonin rakennelman geometria [4, s. 48]

Mahdollisesti eniten käytetty geometrinen malli on **Deygoutin rakennelma**. Siinä kaikille yhteysvälin esteille lasketaan itsenäisesti fresnelin parametri. Suurimman fresnelin parametrin este on ns. pääeste. (Kuvassa 7 este 02.) Tälle esteelle lasketaan veitsenterävaimennus normaalisti ikään kuin muita esteitä ei olisi, minkä jälkeen kuvan osoittamalla tavalla lasketaan pääesteen ja antennien muodostamien janojen yläpuolelle jäävien esteiden aiheuttamat veitsenterävaimennukset. Nämä erikseen lasketut vaimennukset summataan lopuksi yhteen. Tälläkin mallilla on tapana yliarvioida vaimennusta kahden esteen ollessa lähekkäin. Deygoutin rakennelma on parhaimmillaan, kun jokin yksittäinen este on selkeästi muita hallitsevampi. [4, s. 50] Alkuperäisessä mallissa vuodelta 1966 laskeminen lopetettiin kahden merkittävimmän esteen jälkeen, mutta Deygout esitti 1994 muutosta, jossa laskenta suoritetaan kaikille yhteysvälin esteille [18, s. 16].



Kuva 7. Deygoutin rakennelman geometria [4, s. 51]

### 3.3 Yhteysvälin kokonaisvaimennus

Tässä alaluvussa esitetään tapoja yhdistää edellisissä alaluvuissa kuvatut vaimenemista ennustavat tekijät tai muutoin laskea koko yhteysvälillä esiintyvä vaimeneminen. Näitä menetelmiä



kutsutaan tässä tutkimuksessa ”metodeiksi”, jotta ero yksittäisiä vaimenemistekijöitä kuvaaviin tekijöihin kuten veitsenterämalliin on selkeämpi.

Yhteysvälin kokonaisvaimennuksen karkeaan ennustamiseen yleisesti käytetty **Egli-malli** on käyttökelpoinen taajuusalueella 30–1000 MHz ja yhteysvälin ollessa 1–80 km. Mallia käytetään tyypillisesti, kun ainakin toinen antenni on verrattain matalalla. Vaimennus määritetään kaavalla:

$$L = \begin{cases} 85,9 + 20 \log_{10}(f) + 40 \log_{10}(d) - 20 \log_{10}(h_T h_R) & , \text{ kun } h_R > 10m \\ 76,3 + 20 \log_{10}(f) + 40 \log_{10}(d) - 20 \log_{10}(h_T) - 10 \log_{10}(h_R) & \text{ muulloin} \end{cases} \quad (14)$$

, missä  $f$  = lähetystaajuus [MHz],  $d$  = etäisyys [km],  $h_T$  = lähetysantennin korkeus [m],  $h_R$  = vastaanotinantennin korkeus [m]. [19, s. 139] Kaavaan on sisäänrakennettu vapaan tilan vaimeneminen suoraan eikä sitä siis summata mihinkään muuhun vaimenemismalliin [20, s. 142]. Egli on empiirinen malli, jonka pohjana suoritetut mittaukset on toteutettu 90–1000MHz taajuusvälillä [11, s. 53].

Egli on hyvin yksinkertainen ja helppokäyttöinen malli, minkä vuoksi sitä käytetään usein ensimmäisenä karkeana työkaluna kaupallisessa verkkosuunnittelussa [20, s. 141]. Luultavasti samoista syistä se nousee esille suomalaisissa sotilasjulkaisuissa mallina, jolla voidaan arvioida ei-näköyhteysreittiä etenevän signaalin vaimenemista. Ulkomaisissa sotilasjulkaisuissa sitä ei yleensä esiinny.

Yhdistyneiden kuningaskuntien Joint Radio Committeeen kehittämä kokonaismetodi (**JRC-metodi**) hyödyntää topografista tietokantaa, johon on kerätty maanpinnan korkeudet puolen kilometrin välein. Metodissa valitaan reitin vaimennuksen määrittämiseen joko vapaan tilan eteneminen tai kahden säteen eteneminen sen mukaan kumpi tuottaa laskennallisesti suuremman vaimenemisen. Se siis perustuu samaan ajatukseen, joka esitettiin luvussa 2.1 EW 103 -kirjan perusteella. Jos 1. fresnelin vyöhyke on vapaa esteistä, voidaan laskeminen lopettaa tähän. [4, s. 55]

$$L = \text{suurempi}(L_{FSL}, L_{2S}) + L_{\text{veitsenterä}} \quad (15)$$

Mikäli fresnelin vyöhykkeellä on esteitä, summataan veitsenterävaimeneminen Epstein-Peterson-rakennelmalla laskettuna aiemmin valittuun etenemismalliin. Jos yhteysvälillä on enemmän kuin kolme estettä, käytetään Bullingtonin rakennelmaa yhdistämään kaikki muut paitsi antennien horisontin määrittävät esteet. Kasvillisuuden tai rakennusten aiheuttamaa

vaimenemista mallissa ei sellaisenaan oteta huomioon. [4, s. 55.] Sotilaallisissa julkaisuissa mallia ei yleensä esiinny, mutta tässä tutkimuksessa se on otettu mukaan vertailuun hiukan erilaisen laskentametodin vuoksi.

**Picquenardin metodissa** vaimeneminen määritetään vapaan tilan etenemisen, diffraktiovaimenemisen ja siroamisen yhdistelmäksi [21, s. 275]. Siroaminen voidaan VHF-taajuuksilla jättää huomiotta [21, s. 296–298]. Diffraktiovaimenemisen yhteydessä Picquenardin voidaan havaita käyttävän Deygoutin rakennelmaa. Siinä ei ole suoraan määritely, että missä vaiheessa esteitä ei oteta enää huomioon tai niitä aletaan yhdistää esimerkiksi Bullingtonin rakennelman tapaan. [21, s. 83; 21, s. 292]. HTZ Warfaren kehittäjän ATDI:n mukaan alkuperäisessä Deygoutin rakennelmassa vuodelta 1966 otettiin kuitenkin huomioon vain kaksi merkittävintä estettä, ja todennäköisesti myös Picquenardin mallissa on tulkittu asia näin [18, s. 16].

Norjan puolustuksen tutkimusinstituutti (Forsvarets forskningsinstitut, FFI) toteutti Puolustusvoimien teknillisen tutkimuslaitoksen (PVTT, nykyisin Puolustusvoimien tutkimuslaitos, PVTL) kanssa yhteistyössä empiirisen koejärjestelyn Norjassa, minkä tuloksena esitettiin suositus ns. picquenard 1.67 -metodista. Siinä merkittävin este määritetään kuten edellä, mutta toiseksi merkittävimmän esteen aiheuttama vaimennus kerrotaan luvulla 0,67. [8, s. 1–3] Viitattua tutkimuksesta ei käy yksiselitteisesti ilmi lasketaanko toiseksi merkittävimmän esteen efektiivinen korkeus itsenäisesti (ikään kuin yhteysvälillä ei olisi muita esteitä) vai pelkästään merkittävimmän esteen ja antennin muodostaman janan yläpuolelta olevalta osalta (kuten Deygoutin rakennelmassa). Luvun neljä vertailussa on käytetty jälkimmäistä tapaa.

Tämän jälkeen 1.67-metodissa otetaan vielä mukaan Okumura-Hata-mallin vastaanotintennin korkeudenkorjausermi:

$$a(h_r) = (1,1 \log(f) - 0,7) h_r - (1,56 \log f - 0,8) \quad (16)$$

, missä  $a(h_r)$  = vaimenemisen korjausermi [dB],  $f$  = signaalin taajuus [MHz],  $h_r$  = vastaanotintennin korkeus [m]. Tämä termi vähennetään vaimenemisen kokonaisuudesta. Muissa lähteissä Okumura-Hata-mallin kuvauksissa korkeuden korjaus otetaan huomioon vain, kun vastaanotintennin korkeus on välillä  $1 \text{ m} \leq h_r \leq 10 \text{ m}$ . Picquenard 1.67:n esittelevässä dokumentissa tästä ei ole kuitenkaan mainintaa. [4, s. 85; 8, s. 5] Luvun 4 vertailussa havaitaan, että yli kymmenen metrin antennikorkeuksilla yhteysvälin vaimennus pienenee laskennalli-

sesti kymmeniä desibelejä ja siksi on syytä käyttää korjaustermiä vain alle 10m antennikorkeuksilla.

Okumura-Hata malli on suunniteltu urbaaniin ympäristöön ja 150–1500 MHz taajuusalueelle, mutta se on kelpuutettu korjaamaan tätä mallia oikeaan suuntaan sen yksinkertaisuuden vuoksi. [8, s. 5.] Okumura-Hata ja sen variaatio COST-Hata ovat hyvin yleisesti käytettyjä malleja, mutta tästä tutkimuksesta ne on jätetty pois, koska niiden taustalla olevia mittauksia ei ole suoritettu lainkaan VHF-kenttäradiotaajuusalueella (30-88MHz).

Picquenard 1.67 -metodin kokonaisuudeksi muodostuu:

$$L = L(\text{vapaa tila}) + L(\text{merkittävin este}) + 0,67 L(2.\text{merkittävin este}) - a(h_R) \quad (17)$$

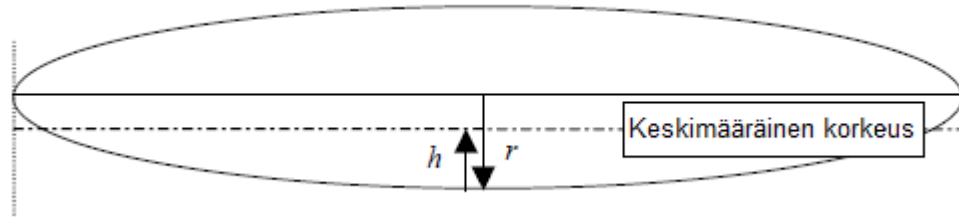
Picquenardin esitys yhteysvälin vaimenemisesta on hyvin vanha, mutta siitä johdettua 1.67-esitystä hyödynnetään Puolustusvoimien käyttämässä Sandis-operaatioanalyysityökalussa elektronisen sodankäynnin simuloinnin osana [22, s. 4].

**ITU P.526** ”Propagation by Diffraction” -suositusasiakirja (on Kansainvälisen televiestintäliiton esitys diffraktiovaimenemisen mallintamiseksi [11, s. 1]. Siinä on lukuisia eri tapoja arvioida vaimenemista riippuen siitä, mitä tietoja yhteysvälistä on saatavilla. Luvun neljä vertailussa ITU P.526 -metodilla viitataan suositusasiakirjan malliin, joka on tarkoitettu yhteysvälin vaimenemisen arviointiin useamman kuin kahden esteen tapauksessa. Vaimeneminen koostuu siinä vapaan tilan vaimenemisesta sekä maastoprofiilin veitsenterävaimenemisesta, joka on yksinkertaistettu Bullingtonin rakennelmaksi. [11]

**Fresnelin metodi** on ATDI-yhtiön oma vaimenemismalli, jota on mahdollista käyttää yhtiön HTZ Warfare -sovelluksessa. ATDI mainostaa mallia ”kaikkein kattavimmaksi” ja suosittaa vahvasti sen käyttöä mallintamiseen. Metodissa käytetään Deygoutin rakennelmaa, jossa otetaan huomioon kaikki yhteysvälin esteet ja riippuen käyttäjän valinnoista voidaan vaimennukseen käyttää karkeaa integrointia (coarse integration), palloaaltoa (spherical wave) ja/tai troposfäärisirontaa (troposcatter). [23, s. 3] Tässä tutkimuksessa esitetty versio hyödyntää pelkästään karkeaa integrointia.

Metodissa vapaan tilan vaimenemisen lisäksi esteet huomioidaan veitsenterämallinnuksella, jonka voidaan valita käyttävän joko Deygoutin tai Bullingtonin rakennelmaa. Luvun neljä vertailussa on käytetty Deygoutin rakennelmaa. Tämän lisäksi ns. radiotien alatievaimenemi-

nen (subpath attenuation) otetaan karkeassa integroinnissa huomioon laskemalla ensin yhteysvälin keskimääräinen korkeus suhteessa 1. fresnelin vyöhykkeen leveimmän kohdan alareunaan (ks. kuva 8). [18, s. 18]



Kuva 8. Karkean integroinnin korkeustermien geometria [18, s. 18]

Tämän korkeuden perusteella voidaan laskea fresnelin parametri  $v$ , kuten aiemmin luvussa 3.1 on esitetty tai yksinkertaisemmin:

$$v = \sqrt{2}h/r \quad (18)$$

Molemmat laskutavat tuottavat jäljempänä suoritettujen laskujen perusteella vähintään kahden desimaalin tarkkuudella saman  $v$ :n arvon. Tämän fresnelin parametrin perusteella lasketaan alatie-etenemisen vaimennus kaavalla, joka muistuttaa paljon veitsenterän vaimennuksen kaavaa, mutta poikkeaa siitä hieman:

$$L_{alatie} = 6,4 + 20\log(v + \sqrt{1 + v^2}) \quad (19)$$

Vaimenemismallin kokonaisuudeksi muodostuu:

$$L = L(\text{vapaa tila}) + L(\text{veitsenterä, Deygout}) + L(\text{alatieen karkea integrointi}) \quad (20)$$

Ohjelmiston dokumentoinnista jää epäselväksi onko tarkoitus laskea koko yhteysvälin diffraktoitumisvaimennus karkealla integroinnilla. [18, s. 17–19] Tässä tutkimuksessa mallia on tulkittu niin, että ns. maanpinnan yläpuolella olevien esteiden vaimennus lasketaan normaalisti veitsenterällä Deygoutin rakennelmaa käyttäen ja näköyhteysjanan alapuolella, mutta 1. fresnelin vyöhykkeen säteen sisällä olevan maaperän vaimennus lasketaan alatievaimennuksella.

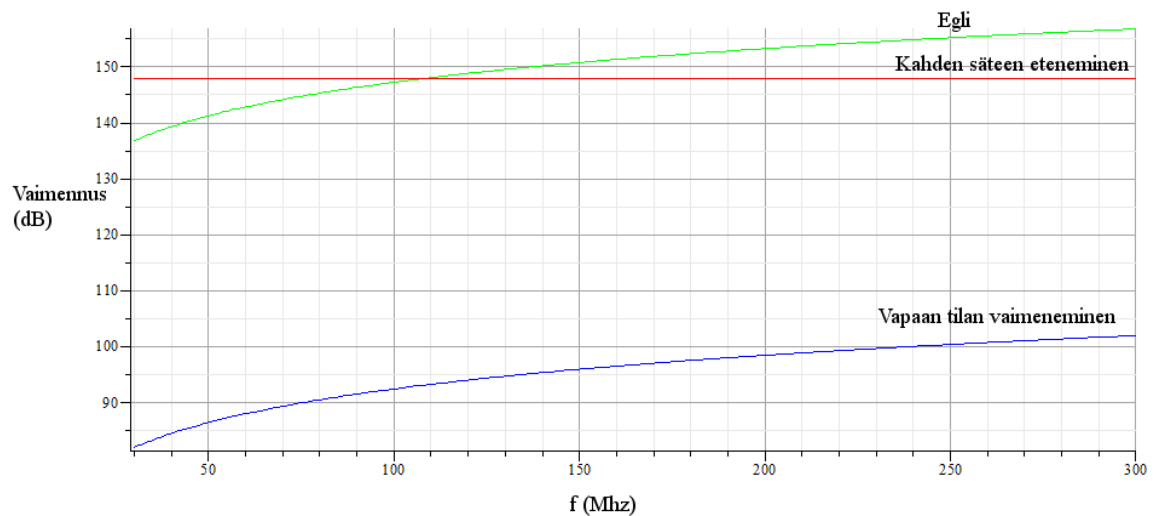
Toni Jantunen havaitsi diplomityössään suorittaessaan vertailuja eri vaimenemismalleilla Fresnelin metodin (ohjelmistossa Fresnel method+) tuottavan lähimmäs todellisia mittaustuloksia päätyviä vaimenemisennusteita [14].

## 4 VAIMENNUSMALLIEN VERTAILU

Yhteenlasketussa vaimenemisessa laskennan suorittaja voi ottaa haluamallaan tavalla huomioon kaikki systeemin vaimenemista aiheuttavat seikat, jotka kokee mielekkääksi mallinnuksen kannalta (ks. kuva 1 sivulla 2). Tämän luvun vertailussa keskitytään tutkimuksessa määritellyllä tavalla vain lähetin- ja vastaanotinantennin välillä tapahtuvaan vaimenemiseen. Seuraavissa alaluvuissa esitetään, miten eri mallien ennustamat vaimenemistulokset muuttuvat eri tilanteissa. Liitteessä 1 on lyhyt tietoisku siitä, miten desibeliyksiköt toimivat lineaarisiin lukuihin verrattuna, jotta taulukoiden lukujen vertailu on ymmärrettävää.

Luvun kuvaajat on laadittu Maple-ohjelmistolla ja laskuesimerkeissä on käytetty hyväksi tekijän laatimaa Excel-taulukkolaskentasovellusta. Liitteessä 3 on esitetty kuvaus sovelluksesta ja sen käytöstä.

### 4.1 Taajuuden vaikutus vaimenemiseen



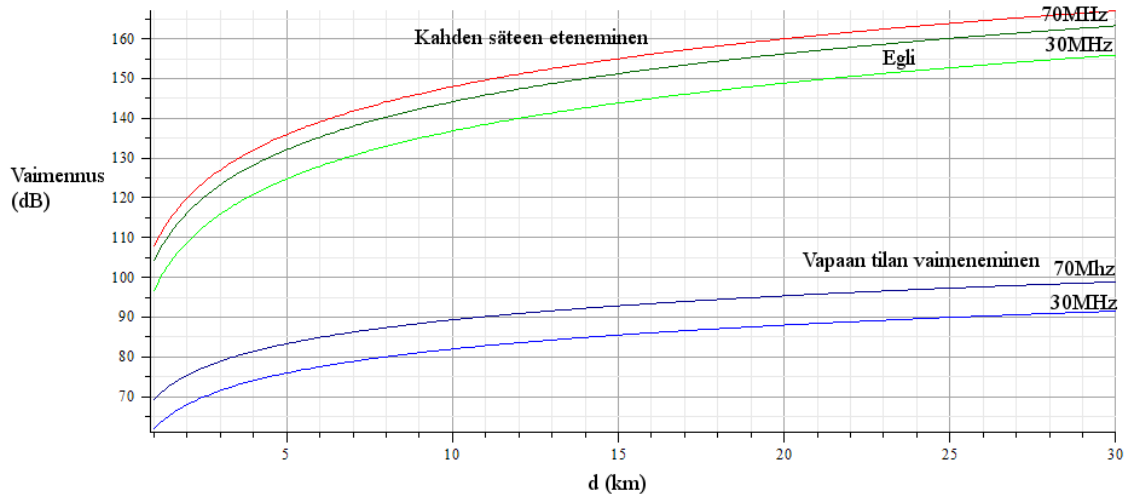
Kuva 9. Etenemisvaimennus taajuuden funktiona, yhteysväli 10km,  $h_t = 2\text{m}$ ,  $h_r = 2\text{m}$

Kuvan 9 perusteella saattaisi johtopäätökseksi todeta, että vaimeneminen vapaan tilan mallin ja Egli-mallin mukaan kasvaisi taajuuden kasvaessa. Todellisuudessa vaimeneminen vapaassa tilassa ei kuitenkaan riipu taajuudesta, mutta antennivahvistuksen määritelmän vuoksi etenemisvaimennuksen malleista pääsääntöisesti löytyy taajuusmuuttuja. Antennivahvistus määritellään:

$$G = \frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2} = \frac{\pi A_{eff} f^2}{22\,500} \quad (21)$$

, missä  $A_{\text{eff}}$  = antennin efektiivinen pinta-ala [ $\text{m}^2$ ],  $\lambda$  = aallonpituus [m],  $f$  = taajuus [MHz]. [2, s. 455] Kaavasta nähdään, että antennivahvistus kasvaa taajuuden kasvaessa eli pienemmällä antennilla saavutetaan suurempi vahvistus ja tämä kompensoi vaimenemismalleissa taajuuden funktiona kasvavan vaimennuksen vaikutuksen. Kahden säteen etenemisen mallissa taajuus ei vaikuta arvioon vaimenemisesta.

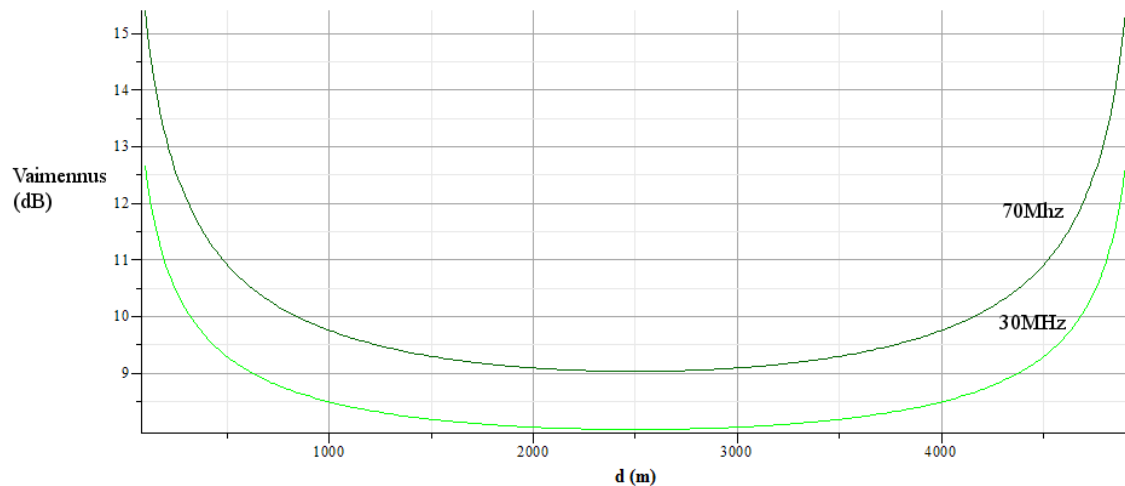
## 4.2 Etäisyyden vaikutus vaimenemiseen



Kuva 10. Vaimeneminen yhteysvälin funktiona,  $h_t = 2\text{m}$ ,  $h_r = 2\text{m}$

Kuvasta 10 nähdään se, että vapaan tilan vaimeneminen ennustaa etäisyyden kaksinkertaistuksessa vaimenemisen nelinkertaistuvan. (70 MHz taajuudella 10 km etäisyydellä vaimennus on n. 90 dB ja 20 km etäisyydellä n. 96 dB.) Egli-mallin kuvaajasta nähdään, että sen avulla vaimenemisen arvioidaan kasvavan huomattavasti voimakkaammin. Etäisyyden kolminkertaistuksessa vaimeneminen kasvaa n. satakertaiseksi. (30 MHz taajuudella 4 km etäisyydellä vaimennus on 120 dB, 12 km etäisyydellä n. 140 dB.) Samoin kuvasta nähdään, että kumpikaan malleista ei arvioi vaimenemisen kasvavan voimakkaammin taajuuden kasvaessa, koska 30 MHz ja 70 MHz kuvaajat nousevat yhtä nopeasti. Näin kuitenkin todellisuudessa esteisessä ympäristössä tapahtuu, koska matalammat taajuudet läpäisevät paremmin kaikkia maastoesteitä [2, s. 154–155]. Näin ollen empiirisiin mittauksiin perustuva Egli-mallikaan ei ota ennusteessaan huomioon kasvillisuuden vaikutusta.

### 4.3 Maastoesteiden vaikutus



Kuva 11. Veitsenterävaimeneminen esteen sijainnin funktiona,  $h_t = 2\text{m}$ ,  $h_r = 2\text{m}$ , esteen korkeus maanpinnasta 20m

Kuvasta 11 nähdään, että yksittäisen esteen vaimennusvaikutus kasvaa voimakkaasti sen sijoittuessa lähelle lähetin- tai vastaanotinantennia. Kuvasta nähdään myös, että toisin kuin vapaassa tilassa, esteen tapauksessa taajuus myös todellisuudessa vaikuttaa esteen vaimennusvaikutukseen. Mitä suurempi taajuus on, sitä enemmän este aiheuttaa vaimennusta. Tästä seuraa, että taajuuden kasvaessa riittävän suureksi (käytännössä yli VHF-alueen siirryttäessä) radioaalto ei enää todellisuudessa diffraktoidu esteiden yli lainkaan, vaan näköyhteysreitti on ainoa signaalin etenemistapa.

Kuten luvussa 3.1 esitettiin, on sylinterimäisen muodon lisävaimennuksen laskenta suhteellisen monimutkainen prosessi eikä se tuota laskennallisesti kovinkaan suurta eroa verrattuna pelkkään veitsenterän kuvaamaan vaimenemiseen. Tämä puoltaa pitäytymistä pelkässä veitsenterämallin käytössä kuvaamaan yksittäisten esteiden aiheuttamaa diffraktiota. Poikkeus tähän ovat esteet, jotka ovat hyvin lähellä vastaanotin- tai lähetinantennia. Sylinterimäinen este, joka yhteysvälin keskivaiheilla aiheuttaa vain muutaman desibelin vaimennuksen veitsenterävaimennuksen lisäksi, voi lähellä antennia tuottaa jopa kymmenien desibelien lisävaimennuksen.

### 4.4 Kokonaismallien vertailu laskuesimerkkien avulla

Alla on vertailu kolmesta erilaisesta esteprofiilista, joille on laskettu mediaanivaimennus viidellä eri vaimenemismallilla. Vertailuarvoksi on laskettu lisäksi vapaan tilan vaimeneminen, joka ei todellisuudessa yhteysvälillä toteudu, koska 1. fresnelin vyöhyke on kaikissa suurelta osin peittynyt.

Laskentamallien perusteet:

- Laskuesimerkki 1:ssä on kolme estettä. Esteiden korkeudet vaihtelevat 20 metristä 45 metriin. Yhteysväli on kuusi kilometriä. Molemmat antennit ovat kahden metrin korkeudella. Taajuus on 50 MHz.
- Laskuesimerkki 2:ssa on sama maastoprofiili kuin laskuesimerkki 1:ssä, mutta sen horisontaali peilikuva. Lähetinantenni on kahden metrin korkeudella ja vastaanotinantenni 24 metrin korkeudella. Taajuus on 60 MHz.
- Laskuesimerkki 3:ssa on neljä estettä. Esteiden korkeudet vaihtelevat edelleen 20 metristä 45 metriin. Yhteysväli on yhdeksän kilometriä. Lähetinantenni on 24 metrin korkeudella ja vastaanotinantenni kolmen metrin korkeudella. Taajuus on 45 MHz.

Laskentaesimerkeissä käytetyt kaavat ja laskujen tarkempi kuvaus on esitetty liitteessä 2.

Taulukko 1. Laskuesimerkkien vaimennustulokset eri malleilla, arvot ovat desibeleinä

	<b>Esimerkki 1</b>	<b>Esimerkki 2</b>	<b>Esimerkki 3</b>
<b>Vapaan tilan vaimeneminen</b>	82,0	83,6	84,6
<b>ITU P.526</b>	94,5	94,5	94,9
<b>JRC-metodi</b>	162,7	134,9	148,6
<b>Fresnel-metodi</b>	123,6	116,9	118,8
<b>Picquenard 1.67</b>	96,0	70,4* / 98,6**	98,7
<b>Egli-metodi</b>	132,4	119,0	115,2

\* Vaimeneminen laskettu Hata-Okumura-mallin korkeudenkorjaustermiä käyttäen.

\*\* Vaimeneminen ilman korkeudenkorjaustermiä.

ITU P.526 -metodin arvoista nähdään, että erilaiset antennien korkeudet tai muut muutokset eivät juuri heilauta mallin tuottamia arvoja. Tämä johtunee siitä, että mallissa käytetty Bullingtonin rakennelma tuottaa jokaisessa esimerkissä hyvin samankaltaisen vastaavan veitsenterän.

Laskuesimerkki 2:sta nähdään, että Picquenard 1.67 -metodissa yli 10 metriä korkean vastaanotinantennin korkeudenkorjaustermi tuottaa liian suurta vähennystä vaimenemiseen. Tällöin lasku tuottaa pienemmän vaimenemisen kuin vapaan tilan vaimennus. Tämä ei ole mahdollista, koska vapaan tilan vaimeneminen kuvaa ideaalitulannetta, jossa yhteysvälillä ei ole lainkaan esteitä. Tästä päätellen on syytä pidättäytyä käyttämään korkeudenkorjaustermiä vain silloin, kun vastaanotinantenni on 1–10 m korkea, kuten lähdeoteoksissa yleensä Okumura-Hata-mallin yhteydessä määritellään. Ilman korkeudenkorjaustermiä laskuesimerkki 2:n tu-



los ja siten kaikkien laskuesimerkkien arvot ovat Picquenard 1.67 -metodilla hyvin lähellä (n. 4 dB:n sisällä) ITU P.526:n tuottamia arvoja.

JRC-metodi tuottaa huomattavasti suurempia vaimennuksia verrattuna muihin tapoihin ja tämä johtuu sen määrittelystä käyttää vapaan tilan etenemisen ja kahden säteen etenemisen vaimennuksista aina suuremman tuloksen tuottavaa mallia. Kaikissa laskuesimerkeissä tämä tapa oli kahden säteen eteneminen. Muissa lähdeoteoksissa yleensä määritellään, että otettaessa huomioon esteitä yhteysvälillä, ei kahden säteen etenemistä tulisi käyttää. Tämä johtuu siitä, että esteisessä tilassa mallin taustalla oleva teoria maan- tai merenpinnan toimimisesta heijastavana tasona ei voi käytännössä toteutua. Tämä yhdistettynä huomattavasti muihin metodeihin verrattuna pessimistisempiin tuloksiin asettaa sen käytön kyseenalaiseksi.

Fresnel-metodi sijoittuu laskuesimerkkien perusteella arvioissaan muiden mallien välimaastoon. Tämän selittää se että mallissa käytetään pelkästään vapaan tilan vaimenemista toisin kuin JRC-metodissa ja se, että malli on ainoa, joka ottaa huomioon ns. alatie-etenemisen eli maankamaran, joka jää fresnelin vyöhykkeen sisäpuolelle. Tämä on ATDI:n dokumentoinnin mukaan otettu malliin mukaan käyttäjien toivomuksesta eli he olivat havainneet käytännön sovelluksissa tai mittauksissa vaimenemista, jota olemassa olevat deterministiset mallit eivät ennustaneet [18, s. 17]. Tämä alatie-eteneminen vaikuttaa myös fysikaalisesti loogiselta mallilta, koska todellisuudessa esimerkiksi maassa käytettävillä VHF-kenttäradioilla lähes puolet 1. fresnelin vyöhykkeestä peittyy jo pelkästään maaperän vaikutuksesta.

Egli-malli on vertailussa ainoa, joka ei ota laskennallisesti huomioon yhteysvälin esteitä. Sen sijaan esimerkkilaskuista nähdään, että antennien korkeudet vaikuttavat mallissa hyvin paljon siihen millaiseksi kokonaisvaimeneminen ennakoidaan. Verrattuna deterministisiin malleihin nähdään, että Egli tuottaa hieman pessimistisiä tuloksia, mutta tämä on tyypillistä tilastollisille malleille, jotka perustuvat todellisiin mittauksiin [4, s. 65].

Verrattaessa laskennan kannalta kolmea tutkimuksessa esitettyä geometrista rakennelmaa useamman esteen vaikutuksen arvioimiseksi huomataan, että vaikka Bullingtonin rakennelma on geometrisesti yksinkertaisin tapa käsitellä useampaa estettä yhteysvälillä, on se yksinkertaisin välinein laskettaessa hitain toteuttaa. Antennien horisonttien leikkauspisteen määrittämiseen vaaditaan suorien yhtälöiden ja yhtälöparin ratkaisua (ks. Liite 2). Deygoutin ja Epsteinin-Petersonin rakennelman veitsenterien määrittäminen onnistuu sujuvasti esimerkiksi taulukkolaskentasovelluksen avustuksella. Tämä yhdistettynä siihen, että Bullingtonin rakennelma jättää huomiotta vastaavan veitsenterän alle jääviä etenemisreittejä aliarvioiden vai-

mennusta, puoltaa kahden muun rakennelman käyttöä. Käyttäjän kannalta Deygoutin rakennelma on puolestaan joustavampi verrattuna Epsteinin-Petersonin rakennelmaan, koska se mahdollistaa juuri niin monen esteen huomioimisen kuin tämä kokee mielekkääksi. Käyttäjän on helppo keskeyttää laskenta jo ensimmäisen esteen jälkeen, mikäli kokee, etteivät muut esteet vaikuta merkittävästi kokonaisvaimennuksen lopputulokseen.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkielmassa on esitetty erilaisia geneerisiä tapoja suorittaa vaimenemisen arviointia kartan esittämän maaston perusteella. Tällöin maastosta luodaan ideaalinen profiilikuvaus, jossa esteet mallinnetaan veitsenterinä. Tämä mahdollistaa valitun vaimenemismallin soveltamisen yhteysvälin vaimennuksen ennustamiseksi. Mitään yksiselitteisesti parasta tapaa mallintaa VHF-radioyhteyden etenemisvaimennus ei ole olemassa. Monitie-eteneminen voi aiheuttaa suuriakin vaihteluja vaimenemisessa suhteellisen pienillä siirtymillä. Tämän vaikutusta on hyvin vaikea ennakoida ilman täydellistä profiilimallia koko yhteysvälin ympäristöstä. Ainoa varma tapa määrittää yhteysvälin vaimennus on suorittaa mittaus juuri kyseisessä ympäristössä. Tämä ei kuitenkaan sovellu toimintamalliksi sotilastoimintaan, jossa on kyettävä tekemään toiminta-analyyskejä rajallisessa ajassa puutteellisin tiedoin.

Kansainvälisen televiestintäliiton (ITU) suositusasiakirjoilla on vakiintunut asema radioyhteyden mallintamisessa. Niitä on täydennetty vuosien saatossa useita kertoja monien tutkijoiden tulosten perusteella. Ne ovat siis vertaisarvioituimpia vaimenemismalleja, mitä käyttäjällä on mahdollisuus hyödyntää. Julkisissa lähteissä on saatavilla yksittäisiä tutkimuksia, joissa on vertailtu muutamaa vaimenemismallia todellisiin mitattuihin tuloksiin, mutta tulokset ovat päättyneet yleensä suosittelemaan toisistaan poikkeavia malleja. Vaikuttaa suorastaan trendiltä, että tutkija vertaa osittain itse kehitettyä mallia johonkin ITU:n malliin ja toteaa, että oma malli on mittausten perusteella parempi. Tällaisiin tutkimuksiin tulisi suhtautua skeptisesti.

Tutkielmassa esitetty tapa mallintaa sylinterimäisen esteen aiheuttamaa lisävaimennusta verrattuna veitsenteräesteeseen todettiin työlääksi määrittää suhteessa sen lisävaikutukseen. Vaikka yksinkertaista mallintamista suorittavalla käyttäjällä olisikin käytössään esimerkiksi liitteessä 3 esitetyn kaltainen taulukkolaskentasovellus, täytyy mallia varten pystyä määrittämään mäen profiili riittävällä tarkkuudella, jotta sylinterille saadaan laskennallinen säde. Tällaisen profiilin määrittäminen pelkän kartan avulla voi olla hyvin haastavaa ja päätyä helposti virheellisiin tuloksiin. Lisäksi sylinterimäisen esteen aiheuttama laskennallinen lisävaimennus verrattuna pelkkään veitsenterään on lähes aina hyvin pieni. Tämän vuoksi tutkimuksessa esitetään, ettei sylinterimäisen esteen lisävaimennusta yleensä kannata mallinnuksessa ottaa huomioon.

Tutkimuksessa Fresnelin metodiksi nimitetty HTZ Warfare -ohjelmiston oma vaimenemismalli on yksittäisissä Suomessa suoritetuissa mittaustutkimuksissa havaittu saavuttavan näissä tutkimuksissa vertailluista malleista parhaita tuloksia. Ohjelmiston kehittänyt ATDI-yhtiö

suosittelee itse tämän vaimenemismallin käyttöä ohjelmistollaan mallintaessa. Tässä tutkielmassa esitetyllä tavalla Fresnelin metodia on suhteellisen helppo käyttää myös yksinkertaisin laskentavälinein.

Tutkimuksessa esitettiin kolme erilaista rakennelmamallia useamman yhteysvälin esteen veitsenterävaimennusten laskemiseksi. Näistä malleista Deygoutin rakennelma esiintyy erilaisissa kokonaismetodeissa selkeästi useammin kuin muut rakennelmamallit. Rakennelman käyttöperiaate, missä jokainen este lasketaan erillisenä, mahdollistaa myös laskennan keskeyttämisen missä tahansa käyttäjän haluamassa vaiheessa toisin kuin Epsteinin-Petersonin rakennelman tapauksessa. Tämän vuoksi se on käyttäjän kannalta joustava rakennelmamalli.

Etenemisvaimenemista on tutkittu pitkään ja nykyisillä tietokonesimulaatioilla kyetään tuottamaan hyvinkin tarkkoja ennusteita sekä pisteestä pisteeseen että pisteestä alueelle toteutettaviin yhteyksiin. Nämä menetelmät soveltuvat hyvin siviilimaailman langattomien tiedonsiirtoverkkojen suunnitteluun, mutta huonosti taistelukentän liikkuviin ja jatkuvasti muuttuviin tilanteisiin. Tämän vuoksi on syytä ymmärtää sitä matematiikkaa, mikä toimii johtamisjärjestelmien ja elektronisen sodankäynnin suunnittelussa ja mallinnuksessa käytettävien karkeiden arviointimenetelmien taustalla. Ymmärryksen lisäämisen ohella yksinkertaisten mallien tunteminen mahdollistaa niiden soveltamisen toimintaolosuhteissa, joissa moderneja työkaluja ei syystä tai toisesta ole käytettävissä.

## LÄHTEET

- [1] Adamy, D. *EW 103 : Communications Electronic Warfare*. Boston: Artech House, 2009. 347 s. ISBN . – 9781596933873. (E-kirja)
- [2] Kosola, J. & Solante, T. *Digitaalinen taistelukenttä : Informaatioajan sotakoneen tekniikka*. 3. painos. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, 2013. 491 s. ISBN 978-951-25-2503-4.
- [3] Adamy, D. *EW 102 : A Second Course in Electronic Warfare*. 1st edition. London: Artech House, 2004. 350 s. ISBN 1-58053-686-7.
- [4] Parsons, J. *The Mobile Radio Propagation Channel*. Second Edition. Chichester: Wiley, 2001. 418 s. ISBN 0-471-98857-X
- [5] International Telecommunications Union. *The Concept of transmission loss for radio links*. Rec. ITU-R P.341-5, 1999.
- [6] Sarkar, T., Ji, Z., Kim, K., Medour, A., Salazar-Palma M. *A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication*. IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 45, Issue 3, June 2003.
- [7] Allsebrook, K., Parsons, J. *Mobile radio propagation in British cities at frequencies in the VHF and UHF bands*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 26, Issue 4, November 1977.
- [8] Walther, Å. *Comparison of measurements with prediction methods for propagation by diffraction at 88 – 108 MHz*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, No. 6, June 2004.
- [9] Lebherz, M., Wiesbeck, W., Krank, W. *A Versatile Wave Propagation Model for the VHF/UHF Range Considering Three-Dimensional Terrain*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 40, No. 10, October 1992.
- [10] International Telecommunications Union. *Definitions of Terms Relating to Propagation in Non-Ionized Media*. Rec. ITU-R P.310-9, 1994.
- [11] International Telecommunications Union. *Propagation by diffraction*. Rec. ITU-R P.526-13, 2013.
- [12] Huurinainen, H. *Liikkuvan tilaajan järjestelmän käyttö yhtymässä*. Pro gradu - tutkielma. 2006. Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos. 69 s.
- [13] Honko, J. *GSM/gprs-järjestelmän häirittevyys*. Kadettitutkielma, 2003. Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos. 47 s.

- [14] Jantunen, T. *LINK 16 -tukiasemasuunnittelu ja radiopeittotarkastelu*. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta, 2013. 107 s.
- [15] Vankka, J. *elsoh\_4A09.xlsx*. PVMoodle, 99. kadettikurssin 4A09A/B-opintojakson työtila. Viitattu 20.8.2014.
- [16] Laaksonen, T. *Venäläisiä häirintäjärjestelmiä VHF-alueella*. Kandidaatin tutkielma. Maanpuolustuskorkeakoulu, sotatekniikan laitos, 2009. 27 s. Turvaluokiteltu (TLL IV) KÄYTTÖ RAJOITETTU.
- [17] International Telecommunications Union. *Calculation of free-space attenuation*. Rec. ITU-R P.525-2, 1994.
- [18] ATDI. *RADIO PROPAGATION IN ICS TELECOM*. HTZ Warfare -ohjelmiston käyttöohjeasiakirja. ICS Telecom on Warfare-ohjelmistoa vastaava siviiliasiakkaille suunnattu ohjelmisto. 2.6.2004.
- [19] Kosola, J. & Jokinen, J. *Elektroninen sodankäynti osa 1 – taistelun viides dimensio*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, (Edita Prima), 2004. 223 s. ISBN 951-25-1554-7.
- [20] Seybold, J. *Introduction to RF Propagation*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2005. 330s. ISBN 978-0-471-65596-1.
- [21] Picquenard, A. *Radio wave propagation*. Lontoo, 1974. 343 s. ISBN 0-333-13312-9.
- [22] Lappi, E., Pajukanta, S., Åsen, W., Norway, K., Sainio, J., Åkesson, B., *The Electronic Warfare Model in Operational Analysis Tool Sandis*. Norwegian Defence Research Establishment, 2008.
- [23] ATDI. *HTZ Warfare<sub>12.++</sub> - Appendices. "Calculation formulae"*. Osa HTZ Warfare 12.xx -ohjelmiston käyttöohjeasiakirjaa.

## LIITTEET

Liite 1: Desibeliyksiköt

Liite 2: Useamman esteen mallinnuksen laskut

Liite 3: Taulukkolaskentasovellus

## DESIBELIYKSIKÖT

Radiotekniikassa on perinteisesti käytetty logaritmista asteikkoa, koska sen käsitteleminen on paljon sujuvampaa verrattuna lineaariseen asteikkoon. Desibeliyksiköt ilmoittavat aina suhteen johonkin ja tämän tutkimuksen yhteydessä ne tarkoittavat poikkeuksetta vastaanottimen antennille saapuvan tehon suhdetta lähettimen antennilta lähtevään tehoon.

$$dB = 10 \log \left( \frac{P_T}{P_R} \right)$$

Joissain luvuissa esiintyvä dBm tarkoittaa vastaavasti suhdetta desibeleinä milliwattiin verrattuna. Se on yleisesti käytetty tehon esitystapa radiotekniikassa.

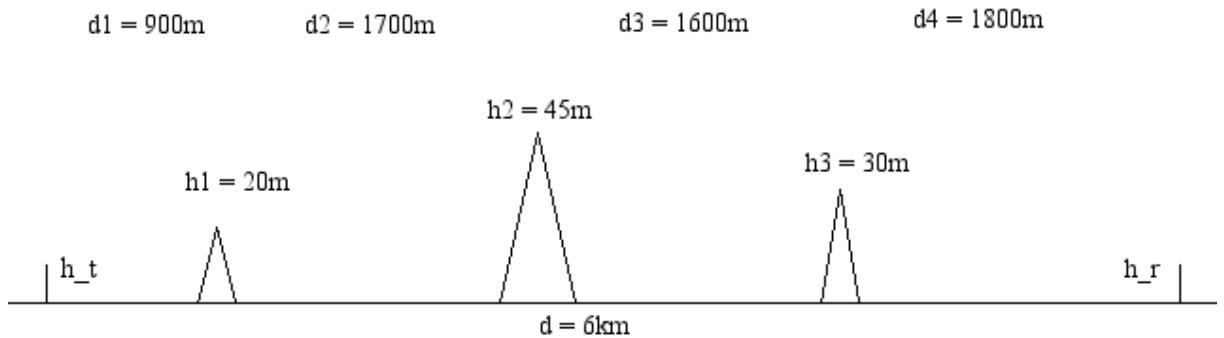
Hyviä perusmuistisääntöjä ovat, että 3dB vahvistus tarkoittaa tehon kaksinkertaistumista, 10dB kymmenkertaistumista, 20dB satakertaistumista ja 30dB tuhatkertaistumista. Vastaavasti 30dB vaimennus tarkoittaa tehon putoamista tuhannesosaan. Tämän tutkimuksen luvussa neljä esiintyneet esimerkkivaimenemiset olivat pääsääntöisesti yli 100dB luokkaa. Se tarkoittaa tehon putoamista kymmenenmiljardisosaan lähetetystä tehosta. Arvo on täysin realistinen.

Desibelit ovat käytännöllisiä radiotekniikassa, koska esimerkiksi linkkibudjetin laskennassa esiintyvät kertolaskut muuntuvat yhteenlaskuksi ja jakolaskut miinuslaskuiksi. Näin niitä voidaan laskea jopa päässä.



## USEAMMAN ESTEEN MALLINNUKSEN LASKUT

## Maastoprofiili 1



Kuva: Maastoprofiili 1

$h_t = 2 \text{ m}$ ,  $h_r = 2 \text{ m}$ ,  $f = 50 \text{ MHz}$ , radiohorisontti  $11,6 \text{ km}$ , 1.fresnelin vyöhykkeen säde yhteysvälin puolivälissä  $= 74 \text{ m}$ .

## ITU P.526

Vapaan tilan vaimeneminen:

$$L(FSL) = 32.4 + 20 \log(50) + 20 \log(6) = 82,0 \text{ (dB)}$$

Nousukulmat laskemalla havaitaan, että lähimmät esteet määrittävät Bullingtonin rakennelman ja ”vastaava veitsenterä” muodostuu johonkin keskimmäisen esteen yläpuolelle.

Lasketaan seuraavaksi lähettimen ja ensimmäisen esteen määrittävän suoran yhtälö:

$$y = \frac{y_{este} - y_t}{x_{este} - x_t} (x - x_t) + y_t$$

$$y(\text{lähetin}) = \frac{20 - 2}{900 - 0} (x - 0) + 2 = \frac{1}{50} x + 2$$

ja sitten vastaanottimen ja sitä lähinnä olevan esteen suoran yhtälö:

$$y(\text{vastaanotin}) = \frac{2 - 30}{6000 - 4200} (x - 4200) + 30 = -\frac{7}{450} x + \frac{286}{3}$$

Lasketaan näiden kahden suoran leikkauspiste suorittamalla erotus yhtälöparista:

$$\begin{cases} y = \frac{1}{50}x + 2 \\ y = -\frac{7}{450}x + \frac{286}{3} \end{cases}$$

---

$$0 = \frac{16}{450}x - \frac{280}{3}$$
$$x = 2625$$
$$\Rightarrow y = \frac{1}{50} * 2625 + 2 = 54,5$$

Näin ollen Bullingtonin vastaava veitsenterä on 2625m etäisyydellä lähettimestä, sen korkeus maanpinnasta on 54,5m ja antennijanaan nähden kaksi metriä pienempi eli 52,5m. Lasketaan ensin fresnelin parametri veitsenterälle:

$$v = h \sqrt{\frac{f}{150} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} = 52,5 \sqrt{\frac{50}{150} \left( \frac{1}{2,625} + \frac{1}{3,375} \right)} \approx 0,788$$

ja tämän jälkeen saadaan veitsenterän aiheuttama vaimennus laskemalla:

$$L = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(0,788 - 0,1)^2 + 1} + 0,788 - 0,1 \right) = 12,5 \text{ (dB)}$$

Yhteenlaskettu vaimeneminen on siis:  $L = 82,0 + 12,5 = 94,5\text{dB}$ .

### JRC-metodi

Lasketaan ensin kokonaismatkan etenemisvaimennus siten, että valitaan vapaan tilan vaimenemisesta ja kahden säteen etenemisestä se kumpi tuottaa suuremman vaimennuksen. Tässä tapauksessa kahden säteen eteneminen tuottaa suuremman tuloksen:

$$L = 120 + 40 \log(6) - 20 \log(2) - 20 \log(2) = 139,1 \text{ (dB)}$$

Määritetään tämän jälkeen Epstein-Peterson-rakennelmaa varten esteiden suhteelliset korkeudet:

Suora lähettimeltä toiselle esteelle on:  $y = \frac{43}{2600}x + 2$  ja tällöin suoran yläpuolelle jää ensimmäisestä esteestä:  $20\text{m} - \left(\frac{43}{2600} * 900 + 2\right) \text{m} = 3,1\text{m}$ .

Ensimmäisen ja kolmannen esteen muodostaman suoran yläpuolelle toisesta esteestä jää 19,8m. Toisen esteen ja vastaanottimen muodostaman suoran yläpuolelle kolmannesta esteestä puolestaan jää 7,8m.

Esteiden korkeuksilla saadut fresnelin parametrien arvot ovat:  $v_1 = 0,074$ ,  $v_2 = 0,399$ ,  $v_3 = 0,154$ .

Lasketaan erikseen veitsenterävaimennus jokaiselle esteelle:

$$L(1. \text{este}) = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(0,074 - 0,1)^2 + 1} + 0,074 - 0,1 \right) = 6,7 \text{ (dB)}$$

$$L(2. \text{este}) = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(0,399 - 0,1)^2 + 1} + 0,399 - 0,1 \right) = 9,5 \text{ (dB)}$$

$$L(3. \text{este}) = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(0,154 - 0,1)^2 + 1} + 0,154 - 0,1 \right) = 7,4 \text{ (dB)}$$

Veitsenterien aiheuttama yhteisvaimennus on siis  $6,7 + 9,5 + 7,4 = 23,6$  (dB). Tämä summaataan aiemmassa yhteydessä laskettuun vapaan tilan vaimenemiseen ja kokonaisvaimennukseksi saadaan tällöin:  $L = 139,1 + 23,6 = 162,7\text{dB}$ .

### **Fresnel-metodi**

Määritetään ensin Deygoutin rakennelman käyttämiseksi yhteysvälin merkittävin este eli se joka saa suurimman fresnelin parametrin arvon. Arvot ovat  $v_1 = 0,38$ ;  $v_2 = 0,65$  ja  $v_3 = 0,45$ . Näin ollen keskimäinen este on yhteysvälin merkittävin. Lasketaan veitsenterävaimennus tälle esteelle:

$$L(2. \text{este}) = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(0,65 - 0,1)^2 + 1} + 0,65 - 0,1 \right) = 11,4 \text{ (dB)}$$

Muiden esteiden vaimennukset ovat samat kuin aiemmin lasketussa JRC-metodissa aiheutuivat 1. ja 3. esteestä. (Ks. luku 3.2) Näin ollen veitsenterävaimennukseksi tulee yhteensä:  $L = 6,7 + 11,4 + 7,4 = 25,5\text{dB}$ .

Määritetään tämän jälkeen alatie-etenemisen vaimennus. 1. fresnelin vyöhykkeen säde on yhteysvälin puolivälissä 74m (r). Koska antennijana on kahden metrin korkeudella, jää maan-

kamaraa 72m vyöhykkeen sisäpuolelle (h). Lasketaan tätä vastaava fresnelin parametri HTZ Warfaren esittämällä kaavalla:

$$v = \frac{\sqrt{2}h}{r}$$

$$v_{alatie} = \frac{\sqrt{2} * 72}{74} = 1,37$$

Tätä saatua fresnelin parametria hyödyntäen lasketaan alatievaimeneminen:

$$L_{alatie} = 6,4 + 20 \log \left( 1,37 + \sqrt{1 + 1,37^2} \right) = 16,1(\text{dB})$$

Lopuksi summataan vapaan tilan vaimeneminen, Deygoutin veitsenterävaimeneminen ja alatie-etenemisen vaimeneminen yhteen:  $L = 82,0 + 25,5 + 16,1 = 123,6\text{dB}$ .

### **Picquenard 1.67**

Fresnelin metodin yhteydessä yhteysvälin keskimmäinen este todettiin merkittävimäksi vaimentajaksi ja sen veitsenterävaimennukseksi saatiin 9,5dB. Toiseksi merkittävin este oli samassa yhteydessä kolmas este ja sen vaimennukseksi saatiin 7,4dB. (Laskettuna esteen korkeudella suhteessa merkittävimmän esteen ja vastaanotinantennin muodostamaan janaan nähden.)

Lasketaan Okumura-Hata-mallin mukainen vastaanotinantennin korkeudenkorjaustermi:

$$a(h_R) = (1,1 \log(f) - 0,7) h_R - (1,56 \log f - 0,8)$$

$$a(2) = (1,1 \log(50) - 0,7) 2 - (1,56 \log 50 - 0,8) = 0,5$$

Lasketaan yhteisvaimennus vapaan tilan vaimenemisen ja näiden esteiden summana siten, että toiseksi merkittävin este kerrotaan 0,67:llä. Vähennetään vaimennuksesta korkeudenkorjaustermi:

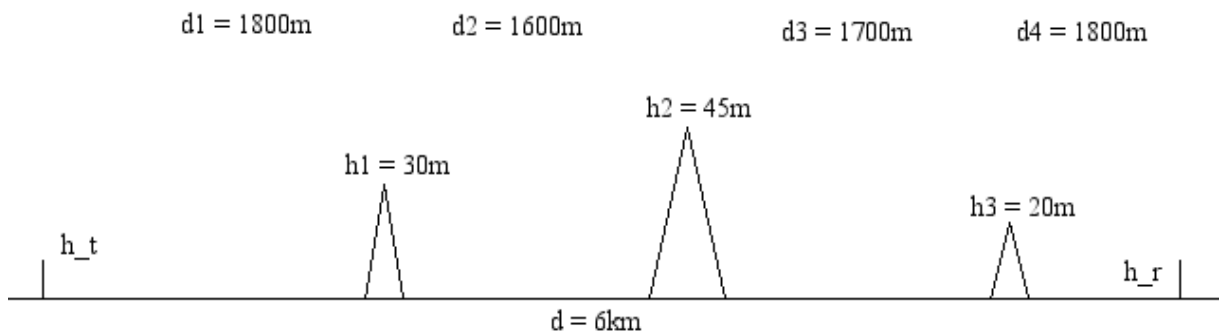
$$L = 82,0 + 9,5 + 0,67 * 7,4 - 0,5 = 96,0\text{dB}$$

**Egli**

Koska vastaanotinantenni on alle 10m korkeudella, lasketaan kokonaisvaimeneminen suoraan kaavalla:

$$L = 76,3 + 20 \log(50) + 40 \log(6) - 20 \log(2) - 10 \log(2) = 132,4\text{dB}$$

## Maastoprofili 2



Kuva: Maastoprofili 2

$h_t = 2 \text{ m}$ ,  $h_r = 24 \text{ m}$ ,  $f = 60 \text{ MHz}$ , radiohorisontti  $25,9 \text{ km}$ , 1.fresnelin vyöhykkeen säde yhteysvälin puolivälissä =  $86 \text{ m}$ .

### ITU P.526

Lasketaan vapaan tilan vaimeneminen:

$$L(FSL) = 32.4 + 20 \log(60) + 20 \log(6) = 83,6 \text{ (dB)}$$

Bullingtonin rakennelman määrittävät suorat ovat lähetinantennin ja  $h_1$ -esteen kautta kulkeva suora ja  $h_2$ -esteen ja vastaanotinantennin kautta kulkeva suora. Lasketaan ensin mainitun suoran yhtälö:

$$y = \frac{30 - 2}{1800 - 0}(x - 0) + 2$$
$$y = \frac{7}{450}x + 2$$

ja toisen suoran yhtälö:

$$y = \frac{24 - 45}{6000 - 3400}(x - 3400) + 45$$
$$y = -\frac{21}{2600}x + \frac{942}{13}$$

Määritetään suorien leikkauspiste yhtälöparin erotuksella:

$$\begin{cases} y = \frac{7}{450}x + 2 \\ y = -\frac{21}{2600}x + \frac{942}{13} \end{cases}$$


---


$$0 = \frac{553}{23\,400}x - \frac{916}{13}$$

$$x = \frac{21\,434\,400}{7189} \approx 2982$$

$$\Rightarrow y = \frac{7}{450} * \frac{21\,434\,400}{7189} + 2 = 48,4$$

Bullingtonin rakennelman vastaava veitsenterä on siis 2982m etäisyydellä lähettimestä ja 48,4m korkea maanpintaan nähden. Tästä saadaan fresnelin parametrin arvoksi  $v = 0,579$ . Veitsenterän vaimennukseksi saadaan:

$$L = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(0,579 - 0,1)^2 + 1} + 0,579 - 0,1 \right) = 10,9 \text{ (dB)}$$

Kokonaisvaimennus on siis:  $L = 83,6 + 10,9 = 94,5\text{dB}$ .

### **JRC-metodi**

Kahden säteen eteneminen tuottaa suuremman vaimennuksen:

$$L = 120 + 40 \log(6) - 20 \log(2) - 20 \log(24) = 117,5 \text{ (dB)}$$

Epstein-Peterson rakennelmalla fresnelin parametreille saatavat arvot ovat:  $v_1 = 0,114$ ;  $v_2 = 0,444$  ja  $v_3 = -0,689$ . Näille lasketut veitsenterävaimennukset ovat 7,0dB, 9,8dB ja 0,6dB. (Huom. kolmas este on janan alapuolella, jolloin fresnelin parametri saa negatiivisen arvon.) Esteiden yhteisvaimennukseksi saadaan siis:

$$L = 7,0 + 9,8 + 0,6 = 17,4\text{dB}$$

Kahden säteen etenemisestä ja estevaimennuksesta saadaan kokonaisvaimennukseksi:  $L = 117,5 + 17,4 = 134,9\text{dB}$

## Fresnel-metodi

Yhteysvälin merkittävin este on keskimäinen este, josta vaimennukseksi muodostuu 10,3dB. JRC-metodin yhteydessä lasketut ensimmäisen ja kolmannen esteen vaimennukset voidaan summata tähän ja esteiden yhteisvaimennukseksi saadaan:  $L = 7,0 + 10,3 + 0,6 = 17,9\text{dB}$ .

Määritetään tämän jälkeen alatie-etenemisen vaimennus. 1. fresnelin vyöhykkeen säde on yhteysvälin puolivälissä 86m (r). Antennien välinen jana on yhteysvälin puolivälissä 11m maanpinnan yläpuolella. Yhteysvälillä nouseva antennijana ja sitä kautta pienentyvä fresnelin vyöhykkeen peittyminen jätetään tässä kohtaa huomiotta. Fresnelin parametriksi alatie-etenemiselle saadaan  $v = 1,233$ . Lasketaan alatie-etenemisen vaimennus:

$$L_{alatie} = 6,4 + 20 \log \left( 1,233 + \sqrt{1 + 1,233^2} \right) = 15,4\text{dB}$$

Tällöin yhteysvälin kokonaisvaimennukseksi saadaan:  $L = 83,6 + 17,9 + 15,4 = 116,9\text{dB}$ .

## Picquenard 1.67

Fresnelin metodin yhteydessä yhteysvälin keskimäinen este todettiin merkittävimäksi vaimentajaksi ja sen veitsenterävaimennukseksi saatiin 10,3dB. Toiseksi merkittävin este oli samassa yhteydessä ensimmäinen este ja sen vaimennukseksi saatiin 7,0dB. (Laskettuna esteen korkeudella suhteessa merkittävimmän esteen ja vastaanotinantennin muodostamaan janaan nähden.) Lasketaan korkeudenkorjaustermi:

$$a(24) = (1,1 \log(60) - 0,7) 24 - (1,56 \log 60 - 0,8) = 28,2$$

Lasketaan yhteisvaimennus vapaan tilan vaimenemisen ja näiden esteiden summana siten, että toiseksi merkittävin este kerrotaan 0,67:llä ja vähennetään korkeudenkorjaustermi:

$$L = 83,6 + 10,3 + 0,67 * 7,0 - 28,2 = 70,4\text{dB}$$

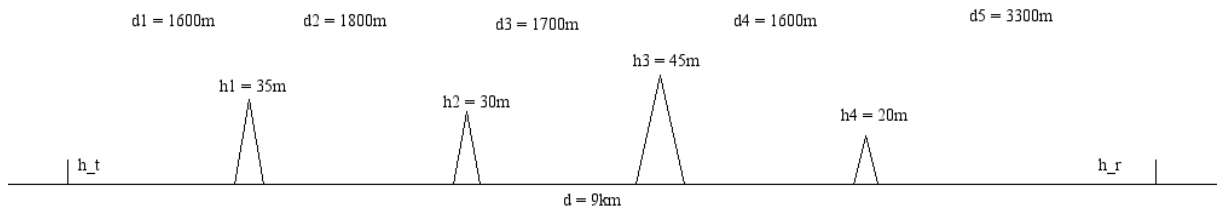
## Egli

Koska vastaanotinantenni on yli 10m korkea, lasketaan kokonaisvaimeneminen kaavalla:

$$L = 85,9 + 20 \log(60) + 40 \log(6) - 20 \log(2 * 24) = 119,0\text{dB}$$



## Kolmas maastoprofiili



Kuva: Maastoprofiili 3

$h_t = 24\text{m}$ ,  $h_r = 3\text{m}$ ,  $f = 45\text{MHz}$ , radiohorisontti  $27\text{km}$ , 1.fresnelin vyöhykkeen säde yhteysvälin puolivälissä =  $119\text{m}$ .

### ITU P.526

Vapaan tilan vaimeneminen yhteysvälillä on:

$$L(FSL) = 32,4 + 20 \log(9) + 20 \log(45) = 84,6\text{dB}$$

Bullingtonin rakennelman määrittävät ensimmäinen ja kolmas este. Määritetään ensimmäisen suoran yhtälö:

$$y = \frac{35 - 24}{1600 - 0} (x - 0) + 24$$

$$y = \frac{11}{1600} x + 24$$

ja toisen suoran yhtälö:

$$y = \frac{3 - 45}{9000 - 4100} (x - 4100) + 45$$

$$y = -\frac{6}{700} x + \frac{561}{7}$$

Määritetään suorien leikkauspiste yhtälöparin erotuksella:

$$\begin{cases} y = \frac{11}{1600}x + 24 \\ y = -\frac{6}{700}x + \frac{561}{7} \end{cases}$$

---

$$0 = \frac{173}{11\,200}x - \frac{393}{7}$$

$$x = \frac{4\,401\,600}{1211} \approx 3635$$

$$\Rightarrow y = \frac{11}{1600} * \frac{4\,401\,600}{1211} + 24 = 49,0$$

Bullingtonin vastaava veitsenterä on siis 3635m etäisyydellä lähetinantennista ja 49,0m korkea. Fresnelin parametri tälle veitsenterälle on  $v = 0,441$  ja vaimennus:

$$L = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(0,441 - 0,1)^2 + 1} + 0,441 - 0,1 \right) = 9,8 \text{ (dB)}$$

Kokonaisvaimennukseksi muodostuu siis:  $L = 84,6 + 9,8 = 94,4\text{dB}$ .

### JRC-metodi

Kahden säteen eteneminen tuottaa suuremman vaimennuksen kuin vapaan tilan vaimeneminen:

$$L = 120 + 40 \log(9) - 20 \log(24) - 20 \log(3) = 121,0 \text{ (dB)}$$

Epstein-Petersonin rakennelmalla saadaan neljän esteen veitsenterävaimennukseksi:  $L = 7,4 + 4,4 + 9,3 + 6,5 = 27,6\text{dB}$ .

Kokonaisvaimennukseksi saadaan siis  $L = 121,0 + 27,6 = 148,6\text{dB}$ .

### Fresnel-metodi

Yhteysvälin merkittävin este on lähettimen lähin este, josta vaimennukseksi muodostuu 9,7dB. Deygoutin rakennelma muodostuu tässä tapauksessa siten, että ensimmäisen esteen lisäksi vain kolmas este lasketaan veitsenteräksi. Sen korkeus verrattuna merkittävimmän esteen ja vastaanottimen janaan on 27m ja sen vaimennukseksi saadaan 9,0dB.

Määritetään tämän jälkeen alatie-etenemisen vaimennus. 1. fresnelin vyöhykkeen säde on yhteysvälin puolivälissä 119m (r). Antennien välinen jana on yhteysvälin puolivälissä 13,5m maanpinnan yläpuolella. Yhteysvälillä laskeva antennijana ja sitä kautta pienentyvä fresnelin vyöhykkeen peittyminen jätetään huomiotta. Fresnelin parametriksi alatie-etenemiselle saadaan  $v = 1,254$ . Lasketaan alatie-etenemisen vaimennus:

$$L_{alatie} = 6,4 + 20 \log \left( 1,254 + \sqrt{1 + 1,254^2} \right) = 15,5 \text{dB}$$

Summaamalla vapaan tilan vaimeneminen, veitsenterien vaimennukset ja alatievaimeneminen yhteysvälin kokonaisvaimennukseksi saadaan:  $L = 84,6 + 9,7 + 9,0 + 15,5 = 118,8 \text{dB}$ .

### **Picquenard 1.67**

Fresnelin metodin yhteydessä yhteysvälin ensimmäinen este todettiin merkittävimäksi vaimentajaksi ja sen veitsenterävaimennukseksi saatiin 9,7dB. Toiseksi merkittävin este oli samassa yhteydessä ensimmäinen este ja sen vaimennukseksi saadaan 9,0dB. (Laskettuna esteen korkeudella suhteessa ensimmäisen esteen ja vastaanotinantennin muodostamaan janaan nähden.) Lasketaan korkeudenkorjaustermi:

$$a(3) = (1,1 \log(45) - 0,7) 3 - (1,56 \log 45 - 0,8) = 1,6 \text{dB}$$

Lasketaan yhteisvaimennus vapaan tilan vaimenemisen ja näiden esteiden summana siten, että toiseksi merkittävin este kerrotaan 0,67:llä ja vähennetään korkeudenkorjaustermi:

$$L = 84,6 + 9,7 + 0,67 * 9,0 - 1,6 = 98,7 \text{dB}$$

### **Egli**

Koska vastaanotinantenni on alle 10m korkeudella, saadaan kokonaisvaimeneminen suoraan kaavalla:

$$L = 76,3 + 20 \log(45) + 40 \log(9) - 20 \log(24) - 10 \log(3) = 115,2 \text{dB}$$

## TAULUKKOLASKENTASOVELLUS

Tekijän laatimaa Excel-taulukkolaskentasovellusta on mahdollista hyödyntää yksinkertaisten vaimenemislaskujen suorittamiseen. Sovellus ohjaa käyttäjänsä ja riittää, että tämä osaa poimia taulukosta haluamansa vaimenemistekijät ja summata ne yhteen. Taulukkosovellus sisältyy tutkielman CD-ROM-versioon.

Taulukkoon syötetään vähintään taajuus, yhteysväli ja antennien korkeudet. Näiden perusteella sovellus laskee A-osassa automaattisesti radiohorisontin, 1. fresnelin vyöhykkeen säteen esteen kohdalla (jos halutaan vyöhykkeen maksimisäde, syötetään jäljemmas soluun C24 esteen etäisyydeksi puolet yhteysvälistä) ja laskee vaimenemisen vapaan tilan etenemisen ja kahden säteen etenemisen perusteella.

Syöttämällä B-osaan esteen etäisyys lähetinantennista, esteen korkeus ja halutessa estettä mallintavan lieriön säde, laskee taulukkosovellus veitsenterämällin mukaisen vaimenemisen sekä lieriön aiheuttaman lisävaimenemisen.

Epsteinin-Petersonin ja Deygoutin rakennelmiin on mahdollista käyttää laskuria siten, että A- ja B-osiin syötetään arvot aina este kerrallaan. Esimerkiksi liitteessä 2 esitettyssä ensimmäisessä laskuesimerkissä Epsteinin-Petersonin rakennelmaa käytettäessä toisen esteen (h2) korkeus ja etäisyys merkitään vastaanotinantennin korkeudeksi ja yhteysvälin etäisyydeksi ja ensimmäisen esteen (h1) arvot normaalisti estearvoihin. Toisen esteen vaimeneminen laskettaisiin syöttämällä ensimmäisen esteen arvot lähetinantennin arvoiksi, esteen h2 arvot veitsenterän arvoiksi ja esteen h3 arvot vastaanotinantennin arvoiksi. Näin jatkettaisiin kunnes kaikki halutut esteet on otettu huomioon.

C-osassa taulukkosovellus laskee suoraan Egli-mallin ennustaman kokonaisvaimenemisen.

Käyttäjän tulee syöttää arvoja vain taulukon mustalla reunustettuihin soluihin, koska kaikki tulokset muodostuvat funktioketjujen kautta näistä arvoista.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	<b>A</b>	<b>PERUSTEET</b>											
2		Taajuus	80	MHz	<b>Syötä arvot tummalla reunustettuina kehtiin. Äl5 tyhjessä mitään sol</b>								
3		Yhteysväli:	5	km									
4		Lähetintennin korkeus	2	m									
5		Vastaanotintennin korkeus	2	m									
6													
7		Radiohorisontti:	11,653	km									
8		1. fresnelin vyöhykkeen sädete esteen kohdalla:	62,781	m									
9		Fresnelin "etäisyys":	0,0133	km									
10													
11		Yhteys "fresnelin etäisyyden" sisällä:	Ei		EW 100 -kirjasarja kehottaa, että mikäli ei olla "fresnelin etäisyyden" sisällä, tulee vaimen-								
12					Samaan lopputulokseen päästään myös valitsemalla aina näistä kahdesta suuremman vaim								
13													
14													
15		<b>Vapaan tilan eteneminen</b>											
16		Vaimennus	84,481	dB									
17													
18		<b>Kahden säteen eteneminen</b>											
19		Vaimennus	135,92	dB									
20													
21													
22		<b>B Yksittäinen este yhteysvälillä (veitsenterämalli + yksittäinen pyöreä este)</b>											
23													
24		Esteen etäisyys lähetintennistä:	1,5	km									
25		Esteen korkeus maanpinnasta:	49	m									
26		Esteen säde:	50	m	Sellaisen lieriön säde, jolla voidaan hyvällä tarkkuudella kuvata yksittäisen pyöreän esteen								
27													
28		Esteen korkeus antennijanaan nähden:	47	m									
29													
30		Fresnelin parametri (v) :	1,0593										
31													
32		<b>Veitsenterän vaimennus</b>											
33		Vaimennus:	14,303	dB									
34													
35													
36		<b>Lieriömäinen este (ITU P.526-mukaan)</b>											
37		m	0,0141		Luvut tarkistamista varten. Funktio laskee automaattisesti vaimennuksen.								
38		n	11,812										
39		m * n	0,1663										
40		Vaimennus (kun m*n <= 4)	2,3203	dB									
41		Vaimennus (kun m*n > 4)	13,22	dB									
42													
43		Lieriömäisen esteen lisävaimennus:	2,3203	dB	Tämä vaimennus summataan veitsenterän aiheuttaman vaimennuksen kanssa. Solun pitäisi								
44													
45													
46		<b>C Egli-malli (kokonaisvaimennus)</b>			Ehdot: yhteysväli 1-80km, taajuus 30-1000MHz								
47													
48		Jos vastaanottimen antenni yli 10m	133,88	dB									
49		muulloin	133,29	dB									
50		Vaimennus:	133,29	dB	Solun pitäisi osata määrittää kumpi arvoista esitetään, mutta tarkistuksen vuoksi kaksi ylc								
51													

Kuvakaappaus taulukkolaskentasovelluksesta