

Jouni Mäkinen

Langaton radioverkko kaivokseen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Elektroniikan Koulutusohjelma

Insinöörityö

14.5.2013

Tekijä Otsikko	Jouni Mäkinen Langaton radioverkko kaivokseen
Sivumäärä Aika	50 sivua 14.5.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	elektroniikka
Ohjaajat	tekn. tri, projektipäällikkö Electria Jyrki Louhi tekn. tri, yliopettaja Matti Fischer
<p>Tässä insinööriyössä perehdyttiin Suomen kaivostoimintaan ja erityisesti maanalaisen kaivoksen viestintään. Tässä tapauksessa on syytä tuntea hyvin kiven ja kallioperän sähköiset eli dielektriset ominaisuudet. Radioaaltojen eteneminen maan alla on ongelmallista, joten hyvän ja toimivan viestintäverkon suunnitteleminen on vaikeaa, mutta äärimmäisen tärkeää mm. hätä- ja pelastusoperaatioiden kannalta.</p> <p>Insinööriyössä perehdytään radioaaltojen ominaisuuksiin ja radioaaltojen käyttäytymiseen kaivosolosuhteissa. Kaivosten tavoitteena on saada kaikki kaivoksen toiminnanohjauksen tieto kulkemaan yhdessä tietoverkossa. Tässä työssä nykyiset mittaukset UHF-taajuudella ja UWB- taajuuskaistalla, sekä WLAN:illa on analysoitu. Lisäksi, tarkastellaan, mikä alue sopii parhaiten langattomaan viestintään.</p> <p>Dielektrisyysvakio on tärkeä parametri, koska se määrää sähkömagneettisten aaltojen etenemisnopeuden materiaalin läpi ja heijastuskertoimen rajapinnoilla sekä etenemishäviön. Tässä työssä tarkasteltiin eri kivi- ja mineraalilajien dielektrisyysvakioita sekä taajuuden vaikutusta radioaaltojen etenemiseen kaivosolosuhteissa.</p> <p>Omat mittaukset suoritettiin Ruoholahden ja Hakaniemen metroasemilla n. 25 - 30 metriä maan alla. Tehdyissä mittauksissa havainnointiin miten radiosignaalit käyttäytyvät maanalaisissa tunneleissa niin suoralla (LOS) kuin epäsuoralla (NLOS) yhteydellä. Johtopäätöksistä voidaan todeta, että metroasemien radiosignaalien ominaisuudet vaihtelevat etenkin laitureiden mekaanisten rakenteiden, mutta myös maanalaisten ominaisuuksien johdosta.</p>	
Avainsanat	kaivostoiminta, radioaaltojen ominaisuudet, maanalainen viestintä, kiven ja kallioperän dielektriset ominaisuudet

Author Title	Jouni Mäkinen A Wireless Network for a Mine
Number of Pages Date	50 pages 14 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electronics
Instructors	Jyrki Louhi, Doctor of Technology, Project Manager in Electria Matti Fischer, Doctor of Technology, Principal Lecturer
<p>In this thesis, the Finnish mining operations, and in particular the underground mine communications was studied. As regards underground mine communications, it is very important to understand rock and bedrock's dielectric properties. Radio wave propagation in underground is non-trivial, and therefore, a good and effective communication network will be difficult to design. This, however, is extremely important for example for emergency and rescue operations.</p> <p>In thesis, characteristics of radio waves and their behavior in mining conditions is presented. The aim of mines is to get all mine operations to work together on one communication network. In this work, existing measurements of UHF frequency and UWB frequency bands are analyzed. Also, it is analyzed also WLAN and which area is best suited for wireless communication.</p> <p>Dielectric constant is an important parameter, because it determines the electromagnetic waves propagation velocity through the material and the reflection coefficient at the interfaces as well as the propagation loss. In this work the dielectric constant of different types of stone and mineral species was analyzed as well as the frequency dependence of the radio wave propagation in mining.</p> <p>Own measurements were performed in Ruoholahti and Hakaniemi subway stations about 25 - 30 meters underground. Measurements were carried out by observing how the radio signals behave in the underground tunnels, using line-of-sight (LOS) and non-line-of-sight (NLOS) signal. As a conclusions it can be said that the subway stations' radio signals vary because of platforms mechanical structures, but also due to the underground circumstances.</p>	
Keywords	mining, the characteristics of radio waves, underground communications, dielectric properties of rock and bedrock

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja standardit

Symbolit

1	Johdanto	1
2	Suomen kaivostoiminta	2
2.1	Kaivostoiminta nykyään	2
2.2	Kaivostoiminnan työllistävä vaikutus	3
2.3	Maaperän rikkauksien etsintämenetelmiä	4
2.4	Kaivosprosessi	5
3	Radioaaltojen ominaisuudet	7
3.1	Johdatus radioaaltoihin ja tekniikkaan	7
3.2	Radioaaltojen taajuusalueet	9
3.2.1	RF -aallot	9
3.2.2	Mikroaallot	10
3.2.3	Millimetriaallot	10
3.3	Maxwellin yhtälöt	10
3.4	Radioaaltojen eteneminen	11
3.4.1	Vapaan tilan malli	13
3.4.2	Heijastus maanpinnasta	13
3.4.3	Heijastus tasopinnasta	14
3.4.4	Diffraktio eli taipuminen	14
3.5	Fysikaalinen malli ja Fresnelin vyöhyke	14
3.6	Radioaaltojen vaimeneminen	15
3.7	Vastaanottimen kohina	16
3.8	Lähetyksessä ja vastaanotossa käytettävät antennit	16
4	Maankamaran ominaisuudet	18
4.1	Maapallon rakenne	18
4.2	Suomen kallioperä	19
4.3	Geologiset raaka-aineet	20
4.4	Mineraalit	21
4.5	Teollisuusmineraalit	22

4.6 Maaperän fysikaaliset ominaisuudet	23
4.6.1 Maaperän huokoisuus	23
4.6.2 Tiheys ja raekoko	23
4.7 Sähköiset ominaisuudet	23
4.8 Magneettiset ominaisuudet	26
5 Radioaaltojen eteneminen kaivoksissa	27
5.1 Radioviestintäjärjestelmät	27
5.2 TTE -menetelmä	27
5.3 Kaivoksen sisäiset radioviestintäjärjestelmät	28
5.4 UWB-mittaukset kalkkivikaivoksessa	29
5.5 Langattoman verkon testaukset hiilikaivoksessa	32
6 Kaivosten viestintäratkaisut	34
6.1 Kaivosten ominaisuudet	34
6.2 Viestintälaitteiden ominaisuuksia	35
6.3 Langalliset viestintäjärjestelmät	36
6.4 Langattomat järjestelmät	37
6.5 Virrankantojärjestelmä	38
6.6 Hybridi järjestelmät (Hybrid Systems)	39
6.7 Vuotavat syöttöjärjestelmät	40
6.8 Kuiturunkoverkot	40
6.9 RFID (Radio Frequency Identification) järjestelmät	40
6.10 Tulevaisuuden järjestelmät	41
6.11 Suomen kaivoksissa käytettävät verkkoratkaisut	42
6.11.1 Talvivaaran avolouhoksen viestintäjärjestelmä	42
6.11.2 Outokumpu Oy:n langaton verkko 600 metriä maan alla	42
7 Mittaukset	44
8 Yhteenveto	48
Lähteet	49

Lyhenteet ja standardit

3G	<i>Third Generation</i> ; kolmannen sukupolven matkapuhelin- teknologia
CW	<i>Continuous Wave</i> ; jatkuva aalto
DC	<i>Direct Current</i> ; tasavirta
DMT	<i>Discrete Multitone</i> ; modulointitekniikka
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> ; modulointi tekniikka
FM	<i>Frequency Modulation</i> ; taajuusmodulaatio
GPS	<i>Global Positioning System</i> ; satelliitti paikannusjärjestelmä
IEEE.802.11b	standardi langattomille WLAN- lähiverkoille
IMA	<i>International Mineralogical Association</i> ; kansainvälinen mineralogian yhdistys
IP	<i>Internet Protocol</i> ; internet protokolla
LOS	<i>Line-Of-Sight</i> ; suora näköyhteys
NLOS	<i>Non-Line-Of-Sight</i> ; ei näköyhteyttä
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i> ; DMT- modulointi
PDP	<i>Power Delay Profile</i> ; tehoviiveprofiili
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> ; radiotaajuinen etätunnistus
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i> ; vastaanotetun signaal- in taso
SDR	<i>Software Defined Radio</i> ; ohjelmistoradio

UWB	<i>Ultra WideBand</i> ; erittäin laaja taajuuskaista
VoIP	<i>Voice Over Internet Protocol</i> ; IP –puhe
Wi-Fi	kaupallinen nimi WLAN-tuotteille
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> ; langaton lähiverkko

Symbolit

λ	aallonpituus	[m]
β	etenemiskerroin	[Rad/m]
α	vaimennuskeroin	[Np/m]
μ	permeabiliteetti	[H/m]
μ_r	suhteellinen permeabiliteetti	
λ	pii	$\approx 3,14159$
σ	sähkönjohtavuus	[S/m]
ω	kulmataajuus	[rad/s]
Ω	ohmi	[V/A]
ρ_1	ominaisvastus	[Ω m]
ρ_2	aineen tiheys	[kg/m ³]
ϵ	permittiivisyys	[As/Vm]
ϵ_0	tyhjiön permittiivisyys	[As/Vm]

ϵ_r	aineen suhteellinen permittiivisyys	
ϵ_r'	reaaliosa	
ϵ_r''	imaginääriosia	
A	antennin sieppauspinta-ala	[m ²]
B	magneettivuon tiheys	[Vs/m ²]
c	valonnopeus tyhjiössä	$\approx 2,9979 \cdot 10^8$ m/s
D	sähkövuon tiheys	[As/m ²]
E	sähkökentän voimakkuus	[V/m]
f	taajuus	[Hz]
H	magneettikentän voimakkuus	[A/m]
I	sähkövirta	[A]
J	sähkövirran tiheys	[A/m ²]
k	magneettinen susceptibiliteetti	
m	massa	[kg]
M	aineen magnetoituma	[A/m]
M_i	indusoitu magnetoituma	[A/m]
M_r	remanentti magnetoituma	[A/m]
P	teho	[W]
P_v	vastaanottimen teho	[dBm]

r	etäisyys	[m]
S	tehotiheys	[V ² /Hz]
t	aika	[s]
V	tilavuus	[m ³]

1 Johdanto

Maassamme on noin 50 kaivosta tai louhosta, joista suurin osa on suomalaisten omistuksessa. Suomen kaivoksista ylivoimaisesti suurin louhinnan määrässä on Talvivaara. Tekniikka on kehittynyt ja pienemmätkin pitoisuudet saadaan kivistä tehokkaasti irti. Vanhoja kaivoksia on ryhdytty avaamaan pääosin ulkomaisin voimin. Kaivoksen avaaminen vaatii isot investoinnit, ja tuottoja voi odotella vasta vuosien päästä. Siitä huolimatta, että Suomi on Euroopan suurin kullin ja ainut nikkelin tuottaja, kultakaivosten omistajat eivät joka vuosi suurta voittoa tee. Valmisteilla on kymmenestä viiteentoista uutta kaivosta tai vanhojen laajennuksia, joiden investointien arvo on yhteensä neljä miljardia euroa.

Kaivosten viestintä- ja tiedonsiirtoverkosto koostuu analogisista ja digitaalisista puhejärjestelmistä sekä tietoverkoista. Analogiset puhejärjestelmät lankapuhelimeen saatavat kuulostaa vanhanaikaisilta mutta kaivosolosuhteissa ne ovat vertaansa vailla. Nykyaikaisessa kaivoksessa tiedonsiirtoa voidaan hoitaa myös digitaalisten puhejärjestelmien avulla, joihin liittyy maanpäällinen radioverkko sekä langaton verkko. 3G-verkosto sekä laajakaistayhteydet ovat nykyään saatavilla lähes kaikkialle Suomessa, jolloin ne palvelevat hyvin avolouhosten tarpeita. Maanalaisilla kaivoksilla tilanne on kuitenkin toinen, sillä luja kallio eristää hyvin kaikki ilmassa lähetetyt signaalit, jolloin maanpäällisestä verkosta ei siellä ole hyötyä. Verkon rakentaminen kaivokseen tukiasemien avulla ei ole kuitenkaan taloudellisesti kannattava ratkaisu, vaan maan alle kannattaa esimerkiksi rakentaa WLAN -teknologiaan perustuva verkko, jolla saadaan riittävä kapasiteetti puheelle ja datalle.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia maanalaisen viestintäverkon ominaisuuksia, perehtyä kallioperän sähköisiin ominaisuuksiin ja radioaaltojen etenemiseen kaivosolosuhteissa. Työn yhtenä tavoitteena oli myös selvittää millä taajuusalueella langattomat järjestelmät toimivat parhaiten ja mitä verkkoratkaisuja suositaan nykyään kaivoksissa. Suoritetut mittaukset metrotunneleissa avasivat aihetta lisää ja olivat työn kannalta mielenkiintoisia.

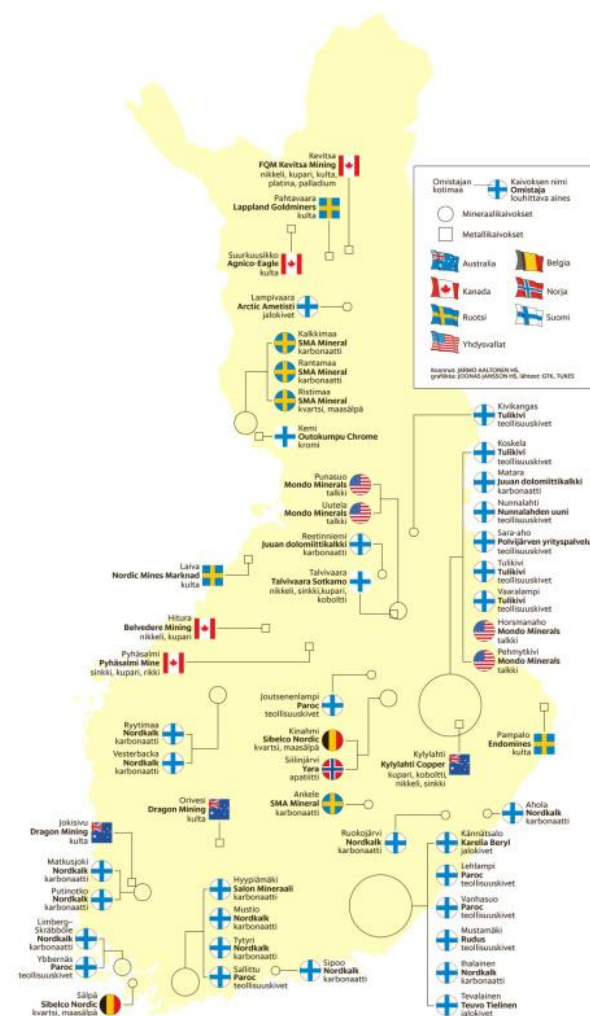
Tämä insinöörityö on tehty Electricalle, joka on Metropolia Ammattikorkeakoulun sovelletun elektroniikan tutkimus- ja kehitysyksikkö. Electrician tutkimus- ja kehitystoiminnan

osaamisen painopiste on erittäin vähävirtaisessa langattomassa elektroniikassa. Heidän kauttaan kehittyä osaavia ammattilaisia teollisuuden eri tarpeisiin.

2 Suomen kaivostoiminta

2.1 Kaivostoiminta nykyään

Vuonna 2012 Suomessa toimii 46 kaivosta, joista 12 on metallikaivosta ja 31 teollisuusmineraalikaivosta tai louhosta. Näiden ohella toimii pienempiä teollisuusmineraalilouhoksia sekä jalokivilouhoksia. Lisäksi monia kaivoshankkeita on jatkuvasti vireillä ympäri maata. Perinteisesti Suomen kaivostoiminta on keskittynyt malmin, nikkelin ja kuparin etsintään. Suomesta voidaan kuitenkin edelleen löytää merkittäviä esiintymiä esim. kultaa, platinametallia, sinkkiä ja muita teollisuusmineraaleja.



Kuva 1. Suomen kaivokset ja niiden omistajien kotimaat [2]

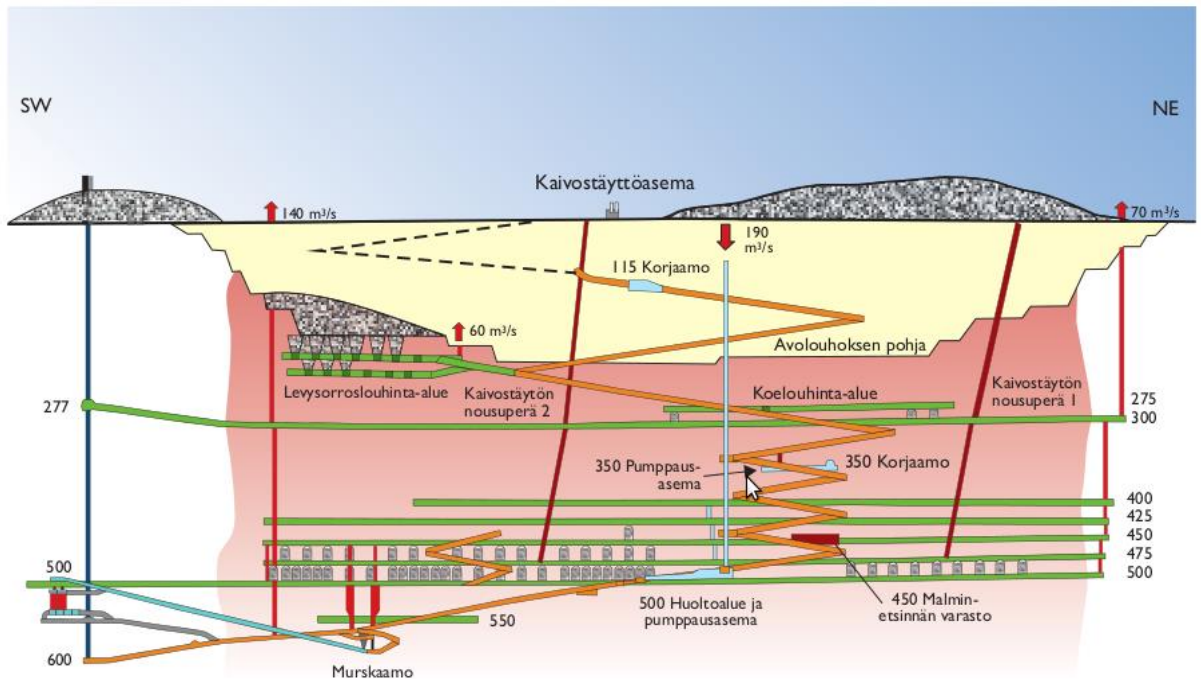
Vuosittain jokaista suomalaista kohti kuluu yli 20 tonnia maankamaran mineraalisia luonnonvaroja. Suomen hyvä toimintaympäristö on lisännyt kiinnostusta malminetsintään. Valtio käyttääkin täällä 30 – 50 miljoonaa euroa etsintöihin, mikä on eniten Euroopassa. Pohjois-Suomen sanotaan olevan yksi maailman viidenneksi rikkaimmasta jalometallien esiintymisalueista, joten sen potentiaali maailmalla on hyvin merkittävä. Suomessa nykyään toimivat kaivosyhtiöt ovat yleensä ruotsalaisten tai kanadalaisten kaivosyhtiöiden tytäryhtiöitä, sillä Suomessa ei ole riittävästi kotimaista kaivosalan rahoitusta. Kuten kuvasta (1) näkyy myös Australialaisilla ja Amerikkalaisilla kaivosyhtiöillä on vahva edustus Suomessa. Yksinomaan suomalaisia yhtiöitä ovat Talvivaaran Kaivososakeyhtiö Oyj sekä Outokumpu Oyj [1, s. 23.]

Kaivosalalla tekniikka automatisoituu koko ajan. Miehitettyjä kaivoskoneita korvataan usein miehittämättömillä laitteilla. Koneet hoitavat hyvin pitkälti nykyään työn, joten työntekijöiden tehtäväksi jää ihanteellisessa tilanteessa vain prosessien valvonta suojaetuissa tiloissa. Suurin osa, n. 70 - 80 %, maailman kaivoslaitteista ja koneista tehdään Suomessa ja Ruotsissa. Suurimmat suomalaiset alan yritykset ovat Metso, Sandvik ja Outotec. Teknisesti jo nyt on mahdollista kehittää ns. älykäs kaivos, missä kaikki työntekijät työskentelevät maan päällä ja robotit operoivat kaivoksessa. Laitteiden kalleuden vuoksi tällaiseen toimintaan ei kuitenkaan ainakaan lähitulevaisuudessa siirrytä.

2.2 Kaivostoiminnan työllistävä vaikutus

Suomessa on ollut 1800-luvulta lähtien toiminnassa ainakin tuhat kaivosta [2, s. 1]. Kaivostoiminta on tärkeää Suomen teollisuudelle, sillä kaivoksista saatavat teollisuusmineraalit ovat välttämättömiä mm. metalli- ja kemianteollisuudelle sekä monille muille toimialoille. Kaivostoiminnalla pystytään luomaan työpaikkoja vaikeille haja-asutusalueille, kuten Lappiin [3, s. 8]. Myös rakennusvaiheessa kaivos on suuri työllistäjä, koska kaivosta perustettaessa tarvitaan suuri määrä rakennusalan ammattilaisia. Kaivannaisteollisuus työllistää Suomessa noin 5 000 ihmistä, joka on lähes kaksi prosenttia koko teollisuudentyöntekijöistä. Kaivannaisteollisuuden vienti on lähes 20 % Suomen kokonaisviennistä. Yhden malmikaivoksen toiminnan kestoksi arvioidaan yleensä 10 vuotta, ja teollisuusmineraalikaivoksilla kesto on huomattavasti enemmän. Suomen nykyisin varmasti kuuluisimman kaivoksen, Talvivaaran, malmivarojen arvioidaan riittävän ainakin 50 vuodeksi [4, s. 8].

Yhden kaivosinvestoinnin kustannusten arvioidaan olevan n. 200 miljoonaa euroa. Siksi investointeja joudutaan tekemään myös kansallisella tasolla; parantamaan mm. liikenneyhteyksiä, rautatieverkkoa, pelastustoimintaa jne. Kaivostoiminnan pitkän tähtäimen tavoitteena on siirtyä huomaamattomaksi maan alle, eli luopua kokonaan avolouhoksista. Haasteena on kuitenkin taloudellisuus, koska avolouhoksissa louhiminen on huomattavasti halvempaa kuin maan alla. Kuvassa (2) esitetään Kemian maanalaisen kaivoksen kaaviokuva, joka esittää kaivoksen eri toimintoja.



Kuva 2. Kaaviokuva Kemian maanalaisesta kaivoksesta [18]

2.3 Maaperän rikkauksien etsintämenetelmiä

Ensimmäisen vaiheen etsintätöitä luonnossa tehdään maanomistajan luvalla tai sellaisilla menetelmillä, jotka eivät vaadi valtausoikeuksia. Kaivoskivennäisiin ja mineraaleihin tarvitaan valtauskirja, jossa osoitetun alueen täytyy olla yhtenäinen, korkeintaan 1 km². Valtaus voidaan myöntää 1 - 5 vuodeksi. Yleisimmin käytettävät malmien ja teollisuusmineraalien etsintämenetelmät voidaan jakaa geologisiin, geofysikaalisiin ja geokemiallisiin menetelmiin sekä kairaukseen ja tulkintoihin. Geologiset menetelmät pohjautuvat kokemuksiin ja tunnettuihin malmiesiintymiin. Tiedetään, että tietyt malmiesiintymät ovat tyypillisimpiä kyseessä olevilla alueilla. Etsinnässä käytetään apuna kallioperäkartoja. Fysikaalisten mittalaitteiden avulla päätellään, miltä kallioperä näyttää

maapeitteen alla. Apuna käytetään mm. sähköisiä ja magneettisia menetelmiä. Mittauksia tehdään maastossa ja ilmasta varta varten suunnitellulla lentokoneella.

Geokemiallisessa malminetsinnässä näytteitä otetaan yleensä iskuporauskalustolla, ja näytteet analysoidaan kemiallisin menetelmin. Syväkairauksessa kalliosta porataan pitkä lieriönmuotoinen näyte. Tavallisesti kairataan noin 100 - 200 metrin syvyisiä reikiä. Syväkairaus tehdään normaalisti vasta kaikkien muiden tutkimusten jälkeen sen kalliin hinnan vuoksi.

2.4 Kaivosprosessi

Kaivosprosessi alkaa louhinnasta, jolloin kalliota porataan, räjäytetään ja lastataan kuljetettavaksi. Louhittu kallio murskataan sopivankokoisiksi kappaleiksi, minkä jälkeen se rikastetaan erilaisia menetelmiä käyttäen. Rikastuksessa esim. malmista erotetaan arvoaineita sisältävät mineraalit arvottomista mineraaleista.

Avolouhinta: Jos esiintymä yltää maanpintaan tai sijaitsee lähellä maanpintaa, louhinta menetelmänä käytetään avolouhintaa. Avolouhinnassa tekniikan takia louhitaan yleensä suuria määriä sivukiveä, sillä louhoksen seinämien turvallisuus on ehtona louhoksen laajentamiseen syvemmälle. Yleensä toiminta alkaa avolouhintana ja vähitellen siirrytään maanalaiseen toimintaan. Näin tuotantoa saadaan samaan aikaan, kun maanalaista kaivosta rakennetaan. Avolouhinta jättää maisemaan suuremmat jäljet kuin maanalainen.

Maanalainen louhinta: Maanalainen louhinta voi tulla halvemmaksi kuin avolouhinta tiettyyn syvyyteen asti. Maanalaisessa kaivoksessa sivukiveä louhitaan mahdollisimman vähän. Sen takia ympäristövaikutukset ovat myös vähäiset. Turvallisuusseikat korostuvat maan alle mentäessä, koska kivimassat ovat hyvin arvaamattomia. Maanalaisessa louhinnassa tyhjät louhokset ja tunnelit on tuettava sortumien estämiseksi, esimerkiksi täyttämällä louhosonkalot sivukivellä ja rikastushiekasta erotetulla ns. kaivostäytteellä. Tunnelit tuetaan esim. tunnelin seinämiin upotetuilla pitkillä pulteilla, betonoinnilla ja rappauksella. Näytteet ja sivukivi kuljetetaan ylös kaivoksesta kuorma-autoilla, vinokuljettimilla tai kaivoshissillä.

Kaivosten turvallisuus on parantunut vuosien myötä huomattavasti ja työolojen parantumisen ansiosta tyypillisimmät kaivostyöntekijöiden ammattitaudit on saatu täysin poistettua maastamme. Työtaturmien määrät ovat alhaisempia kuin muussa teollisuudessa. Kaivokset ovat silti edelleen riskialttiita työpaikkoja, kuten muutkin maanrakennusalan työpaikat.

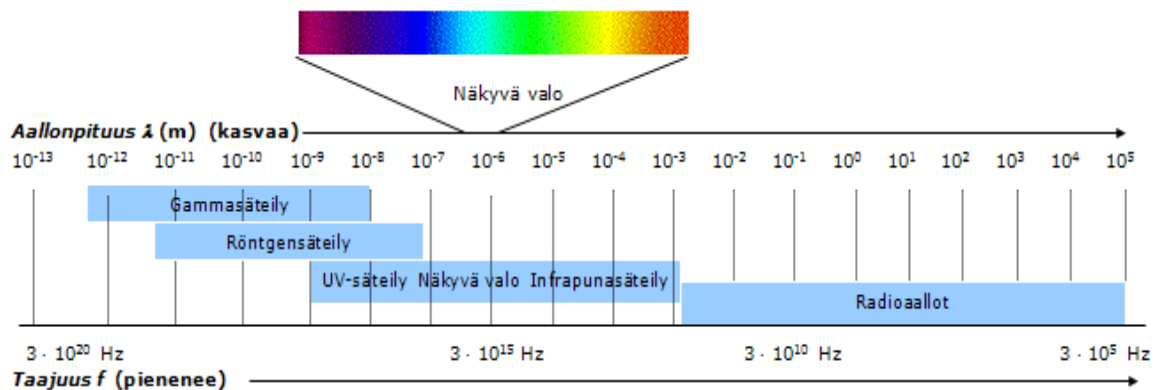
3 Radioaaltojen ominaisuudet

3.1 Johdatus radioaaltoihin ja tekniikkaan

Sähkömagneettinen säteily eli sähkömagneettiset aallot ovat sähkömagneettisen kentän aaltoliikettä. Sähkömagneettiset aallot muodostuvat värähtelevistä sähkö- ja magneettikentistä, niiden aaltoyhtälö voidaan johtaa yleistä sähkömagneettista kenttää kuvaavista Maxwellin yhtälöistä. Tyhjiössä sähkömagneettiset aallot kulkevat taajuudestaan riippumatta valonnopeudella, joka on 299 792 458 m/s. Sähkömagneettinen säteily jaotellaan aallonpituuden mukaan seuraaviin osa-alueisiin: radioaallot, infrapunasäteily, valo, ultraviolettisäteily, röntgensäteily ja gammasäteily. Nämä eri säteilylajit muodostavat sähkömagneettisen spektrin (kuva 3).

Radioaallot ovat taajuusalueen 3 Hz - 300 GHz sähkömagneettista säteilyä ja osa sähkömagneettista spektriä. Radioaallot etenevät tyhjiössä sekä myös taajuudesta riippuen muissa väliaineissa, esim. ilmassa. Radioaaltojen etenemisnopeus riippuu väliaineesta. Radioaalloilla on eri ominaisuuksia mm. aallonpituus, etenemisnopeus, polarisaatio ja taajuus. Radioaalloilla on myös hiukkasluonne ja ne voivat heijastua, taipua ja taittua, niiden aallonpituudet ovat tuhansista kilometreistä millimetrin osiin, eli vastaavat taajuudet ovat hertseistä noin terahertsiin ($T=10^{12}$). Radioaaltojen välityksellä voidaan välittää radio- ja tv-lähetyksiä. Myös tutka, matkapuhelin ja mikroaaltouuni toimivat radioaalloilla.

Infrapunasäteily, näkyvä valo, ultravioletti-, röntgen- ja gammasäteily ovat aallonpituudeltaan radioaaltoja lyhyempiä. Röntgen- ja gammasäteilyn taajuusalueet menevät jonkin verran päällekkäin, koska jako eri alueisiin perustuu osittain myös säteilyn syntymekanismiin [13, s.9.]



Kuva 3. Sähkömagneettisen säteilyn jaottelu [18, s. 9]

Suuri osa ihmisen saamasta tiedosta tulee sähkömagneettisen säteilyn välityksellä. Suoraan aistein voidaan havaita lähinnä vain näkyvän valon alue eli aallonpituudet 0,4 - 0,7 μ m, joille silmän verkkokalvo on herkkä. Muut spektrin osat vaativat omaa tekniikkaansa, jotta säteilyn välittämä tieto voidaan siirtää suoraan aistein havaittavaan muotoon. Sähkömagneettinen aalto muodostuu sähkö- ja magneettikentästä, jotka ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan ja kohtisuorassa myös aallon etenemissuuntaan nähden. Sähkö- ja magneettikentän voimakkuudet muuttuvat ajan ja paikan suhteen sini-
muotoisesti. Kentän suurin arvo eli aallon huippujen korkeus on kentän amplitudi, ja aallon huippujen välinen etäisyys on aallonpituus, joka voidaan laskea kaavalla,

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [1]$$

f on taajuus [Hz].

Taulukko 1. Radioaaltojen taajuusalueet [19, s. 6]

lyhenne	nimi	taajuus	aallonpituus	käyttöesimerkki
VLF	hyvin pitkät aallot	3 - 30 kHz	10 - 100 km	Radionavigointi
LF	pitkät aallot	30 - 300 kHz	1 - 10 km	Pitkän matkan radioyhteydet
MF	keskipitkät aallot	300 - 3000 kHz	100 - 1000 m	Yleisradio
HF	lyhyet aallot	3 - 30 MHz	10 - 100 m	Yleisradio, radioamatöörit
VHF	hyvin lyhyet aallot	30 - 300 MHz	1 - 10 m	Televisio, ularadio
UHF	ultralyhyet aallot eli ula	300 - 3000 MHz	100 - 1000 mm	Radiolinkit, televisio, tutka
SHF	mikroaallot	3 GHz - 30 GHz	10 - 100 mm	Mikroaaltouuni
EHF	erikoislyhyet aallot	30 - 300 GHz	1 - 10 mm	Tutka, radiolinkit

3.2 Radioaaltojen taajuusalueet

Radioaaltojen taajuusalue (taulukko 1) käsittää 3 kHz - 300 GHz:n taajuusalueet, jotka jaetaan eri alueisiin käyttötarkoituksen mukaan. Käyttösuunnitelma perustuu kansainvälisen televiestintäliiton ITU:n (International Telecommunication Union) päätöksiin. Eri aallonpituusalueista käytetään monia eri nimityksiä. Alle 300 MHz:n taajuuksia kutsutaan RF (Radio Frequency) -aalloiksi. Radioaaltoja, joiden taajuus on 1 - 30 GHz, kutsutaan mikroaalloiksi. RF -aaltojen ja mikroaaltojen raja ei ole tarkka, ja usein vain 1 GHz:n yläpuolella oleva osa luetaan mikroaalloiksi. Radiotekniikka (RF-tekniikka) on sähkötekniikan ala, joka käsittelee suurtaajuisia ilmiöitä ja viestintää radioaaltojen avulla.

3.2.1 RF -aallot

VLF (Very Low Frequency) -taajuusalue on 3 - 30 kHz, ja sen radioaallon pituus on 100 - 10 km. Aallot etenevät pääasiassa pinta-aaltona lähes maapallon ympäri ionosfääriin ja maanpinnan välisellä alueella. Aallot etenevät myös jonkin verran merivedessä ja siksi niitä käytetäänkin maa-asemien ja sukellusveneiden välisessä viestinnässä. Tätä aluetta käytetään myös radionavigoinnissa.

LF (Low Frequency) -taajuusalue on 30 - 300 kHz ja sen radioaallon pituus on 10 - 1 km. Aallot etenevät pinta-aaltona ja öisin ionosfäärissä. Eteneminen on mahdollista myös suoraan näköyhteysreitillä pitkin. Aluetta käytetään yleisradiotoiminnassa, radionavigoinnissa ja etätunnistuksessa.

MF (Medium Frequency) -taajuusalue on 300 - 3 000 kHz ja sen radioaallon pituus on 1 000 - 100 m. Aallot etenevät pinta-aaltona ja öisin ionosfäärin etenemisenä. Aluetta käytetään yleisradio- ja radioamatööritoiminnassa sekä radionavigoinnissa.

HF (High Frequency) -taajuusalue on 3 - 30 MHz, ja sen radioaallonpituus on 100 - 10 m. Aallot etenevät ionosfääriin kautta. Pinta-aallot vaimenevat nopeasti. Aluetta käytetään yleisradio- ja radioamatööritoiminnassa sekä meri- ja sotilasradioliikenteessä.

VHF (Very High Frequency) -taajuusalue on 30 - 300 MHz ja radioaallonpituus on 10 - 1 m. Aallot etenevät suoraan sekä heijastumalla rakennuksista ja maan pinnasta. Ilma-kehässä sääolosuhteet vaikuttavat etenemiseen, ja aallot taipuvat hiukan alaspäin.

Tällä taajuusalueella tarvitaan antennien välinen näköyhteys. Aluetta käytetään FM-radiolähetyksissä, langattomissa mikrofoneissa ja kauko-ohjauslaitteissa.

UHF (Ultra High Frequency) -taajuusalue on 300 - 3 000 MHz ja sen radioaallon pituus on 100 - 10 cm. Aallot etenevät suoraviivaisesti ilmakehässä, mutta puusto ja maastoesteet lisäävät vaimennusta. Tällä taajuusalueella tarvitaan myös antennien välinen näköyhteys. Aluetta käytetään yleisradio- ja digitaalisissa TV-lähetyksissä, matkapuhelinverkoissa, mikroaaltouuneissa ja GPS satelliittinavigointijärjestelmissä. UHF-alue on lähes varattu, sillä melkein koko taajuusalue on varattuna ja käytössä eri sovelluksissa ympäri maailmaa.

3.2.2 Mikroaallot

SHF (Super High Frequency) -taajuusalue on 3 - 30 GHz, ja sen radioaallon pituus on 10 - 1 cm. Aallot etenevät suoraviivaisesti ilmakehässä, mutta sääolosuhteet (sadevaimennus), puusto ja maastoesteet lisäävät huomattavasti vaimennusta. Alueella tarvitaan myös antennien välinen näköyhteys. Antenniratkaisuja suunniteltaessa pitää ottaa huomioon aaltojen diffraktio eli taipuminen. Aluetta käytetään tutka- ja radionavigointijärjestelmissä sekä kiinteiden televerkkojen radio- ja satelliittilinkeissä.

3.2.3 Millimetriaallot

EHF (Extremely High Frequency) -taajuusalue on 30 - 300 GHz, ja sen radioaallon pituus on 10 - 1 mm. Eteneminen on suoraviivaista ja yhteydet ovat hyvin lyhyitä. Ilmakehän vaimennus on suurta, ja tämän takia aallot kulkevat ilmakehän vaimennusikkunoissa. Ilmakehässä on neljä kapeaa ikkunaa 34, 94, 142 ja 214 GHz:n taajuuksilla, joissa lyhyen kantaman tiedonsiirtojärjestelmien käyttö on mahdollista. Aluetta käytetään sotilaskäytössä, radiopaikannuksessa, radioastronomiassa ja 60 GHz:n langattomissa lähiverkoissa.

3.3 Maxwellin yhtälöt

Sähkömagnetismin tutkimus kulmineitui James Clerk Maxwellin (1831 - 1879) luomaan Maxwellin yhtälöinä tunnettuun kenttäteoriaan, joka pystyy kuvaamaan kaikki tunnetut

sähkömagneettiset ilmiöt ja niiden väliset vuorovaikutukset. Maxwellin yhtälöt kuvaavat neljää sähkö- ja magnetismin perusominaisuutta, ts.

- 1) miten sähkövaraus tuottaa sähkökentän
- 2) miten magneettisia monopoleja ei ole olemassa
- 3) miten muuttuva magneettikenttä tuottaa sähkökentän
- 4) miten sähkövirta ja muuttuva sähkökenttä tuottavat magneettikentän.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{Gaussin laki sähkökentille} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Gaussin laki magneettikentille} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Faradayn induktiolaki} \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Amperen laki + Maxwellin lisäys.} \quad (5)$$

Yhtälöt (2) ja (3) kuvaavat muuttuvien sähkö- ja magneettikenttien välistä riippuvuutta. Yhtälöstä (2) saadaan selville miten sähkövaraus tuottaa sähkökentän ja yhtälöstä (3) miten magneettisia monopoleja ei ole olemassa. Yhtälöt (4) ja (5) kuvaavat muuttuvien sähkö- ja magneettikenttien välistä riippuvuutta. Yhtälöstä (4) nähdään, että muuttuva magneettikenttä tuottaa sähkökentän. Yhtälössä (5) ilmiö on päinvastainen, jolloin sähkövirta ja muuttuva sähkökenttä tuottavat magneettikentän. Yhtälö (5) kuvaa suljettuna silmukkana kulkevan magneettikentän ja silmukan läpi kulkevan sähkövirran välisen yhteyden. Amperen lain mukaan on helppo laskea magneettikentän voimakkuus symmetrisissä tapauksissa.

3.4 Radioaaltojen eteneminen

Faradayn ja Ampéren lait, kuvaavat sähkö- ja magneettikentän keskinäistä riippuvuutta. Jotta kentät voitaisiin ratkaista, on erikseen johdettava ns. aaltoyhtälö, jossa esiintyy vain yhtä kenttäsuuretta. Aikaharmonisessa tapauksessa aaltoyhtälö yksinkertaistuu ns. Helmholtzin yhtälöksi.

$$\nabla^2 \vec{E} = -\omega^2 \mu \epsilon \vec{E} = -k^2 \vec{E} \quad (6)$$

Vakiota $k = \sqrt{\mu\epsilon}$ kutsutaan aaltoluvuksi. Oletetaan, että sähkökentällä on vain x-komponentti, kenttä ei muutu x:n ja y:n suhteen ja aalto etenee z-suuntaan. Helmholtzin yhtälö yksinkertaistuu muotoon,

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k^2 E_x = 0 \quad (7)$$

yhtälö pysyy muodollisesti samana, siitä saadaan muodostettua tasoallon lauseke,

$$\bar{E}(\bar{r}) = \bar{E}_0 e^{-j\bar{k}\cdot\bar{r}} \quad (8)$$

kunhan $\bar{k} \cdot \bar{k} = \omega^2 \mu \epsilon$ ($\bar{k} \cdot \bar{E}_0 = 0$), tasoallolla on vaihenopeus

$$v = \omega / \beta \quad (9)$$

ja aallonpituus

$$\lambda = 2\pi / \beta. \quad (10)$$

Häviöiden merkittävin vaikutus on, että tasoaalto vaimenee edetessään eksponentiaalisesti. Sillä on sähkö- ja magneettikenttien välillä kulman $\arg \eta$ suuruinen vaihe-ero. β on etenemis- tai vaihekerroin [β] = rad/m ja α on vaimennuskerroin [α] = 1/m = Np/m.

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon' \mu} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{\omega \epsilon''}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} \quad (12)$$

Radioaaltojen etenemiseen vaikuttavat maanpinnalla erityisesti troposfäärin, ionosfäärin ja maaston ominaisuudet. Radioaallot heijastuvat, taipuvat ja taittavat esteistä ja saapuvat vastaanottajalle eri reittejä ja eri voimakkuuksilla. Radioaaltojen lähetys ja vastaanotto tapahtuu antennien avulla. Erityisesti matalilla taajuuksilla pintaa pitkin etenevien aaltojen vaimennus riippuu paljolti maanpinnan sähköisistä ominaisuuksista.

Tärkeimmät radioyhteyksillä käytetyt etenemismekanismit ovat

- suora, näköyhteyttä käyttävä eteneminen eli niin kutsuttu vapaan tilan malli

- heijastukset maan pinnalta ja rakennuksista
- eteneminen ilmakehän sironnan avulla
- eteneminen maanpinta-aaltona
- heijastus tasopinnasta
- diffraktio eli taittumisen ansiosta yhteys saadaan kiinteiden esteiden taakse.

3.4.1 Vapaan tilan malli

Korkeat taajuudet aalloilla eivät etene juurikaan maanpinta- tai ionosfääriaaltona, joten pääasiassa etenemistapana voidaan pitää näköyhteysslinkkiä. Vapaan tilan mallissa kuvitellaan kaikki muut häiritsevät tekijät pois, jolloin radioaalto etenee lähettäjältä vastaanottajalle suoraviivaisesti. Isotrooppisella antennilla teho jakautuu tasaisesti joka suuntaan. Kun lähetin lähettää signaalia teholla P , tehotiheys S etäisyydellä r on

$$S = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (13)$$

Vastaanottoantenni sieppaa tulevasta tehotiheydestä tehon P_v , ja se riippuu antennin sieppauspinta-alasta A . Isotrooppiselle antennille

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (14)$$

Vastaanottimeen saadaan teho, joka on

$$P_v = AS = \frac{\lambda^2}{(4\pi r^2)} P. \quad (15)$$

3.4.2 Heijastus maanpinnasta

Usein näköyhteyssreitillä vastaanottimeen tulee suoraan edenneen aallon lisäksi maanpinnasta tai rakennuksista heijastuneita aaltoja. Tätä kutsutaan monitie-etenemiseksi, siinä maanpinta-aallon vaimennus kasvaa nopeasti taajuuden kasvaessa. Heijastuminen johtuu aaltojen taitumisesta. Ne heijastuvat osuessaan esteeseen, joka on tasainen (suhteessa aallonpituuteen). Tulo- ja heijastuskulmat ovat yhtä suuret. Heijastuneilla aalloilla on myös sama aallonpituus ja etenemisnopeus kuin tulevilla aalloilla.

3.4.3 Heijastus tasopinnasta

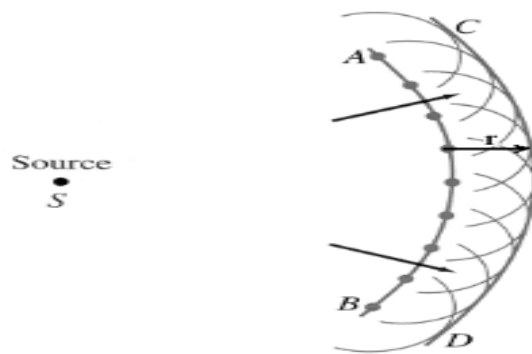
Vastaanottimeen tuleva signaali voi koostua suoraan kulkevasta aallosta sekä useista heijastuneista aalloista. Esim. rakennusten seinistä tulevat heijastukset vaikuttavat oleellisesti kentän arvoon. Saapuva lähde heijastuu tasosta samassa kulmassa kuin se on siihen saapunut. Osa säteestä kuitenkin läpäisee rajapinnan ja taittuu kyseiseen väliaineeseen. Tämä tapahtuma riippuu aineiden sähköisistä ominaisuuksista, tulokulmasta ja säteen polarisaatioasteesta tason pintaan nähden. Kaivosolosuhteissa aalto heijastuu seinistä ja katoista kaivoskäytävillä ja tunneleissa. Pinnat ovat rosoisia ja karkeita, joten sillä on vaimentava vaikutus heijastukseen.

3.4.4 Diffraktio eli taipuminen

Diffraktiolla tarkoitetaan aaltorintaman taipumista esimerkiksi esteen taakse. Koska aaltorintama voidaan Huygensin periaatteen mukaisesti ajatella pistelähteiden summaksi, pistelähteet säteilevät uuden rintaman esteen taakse, ts. säteily taittuu. Taittuneen säteilyn voimakkuus määritellään diffraktiokertoimen D avulla. Se kertoo diffraktion aiheuttaman säteilyn kenttävoimakkuuden suhteessa tulevaan säteilyyn. Diffraktiokertoimeen vaikuttaa esteen materiaali ja muoto sekä säteilyn tulo- ja taittumiskulma.

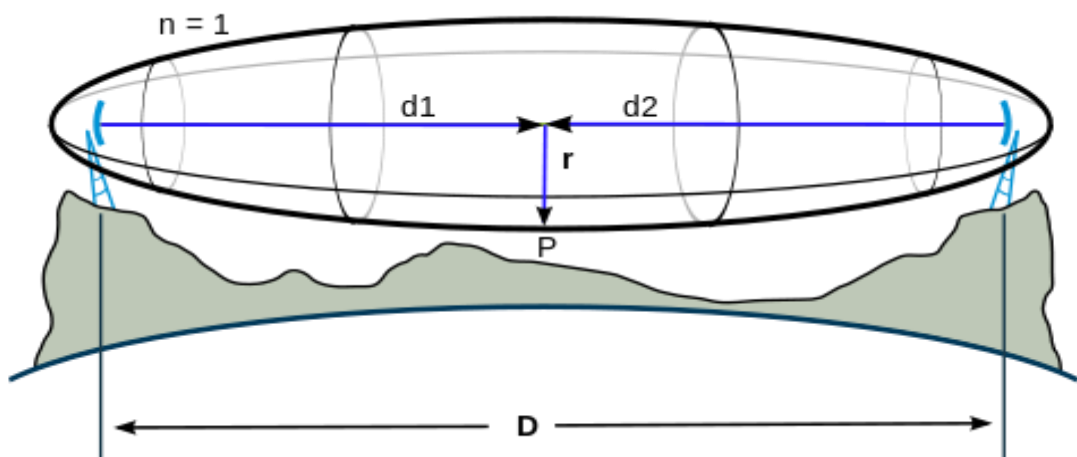
3.5 Fysikaalinen malli ja Fresnelin vyöhyke

Radiosignaali kohtaa edetessään monenlaisia esteitä. Fysikaalisilla malleilla pyritään selittämään radioaallon eteneminen tarkasti fysiikan lakeja noudattaen. Radioaallon etenemisessä ei voida käyttää pelkästään sädeteoriam, jonka mukaan aalto etenee suoraviivaisesti säteittäin lähettimestä toiseen. Sädeteorian mukaan taittumista eli diffraktiota ei tapahtuisi, eivätkä radioyhteyden läheisyydessä olevat esteet vaikuttaisi signaalin voimakkuuteen. Paljon todenmukaisempi kuva radioaallon etenemisestä saadaan käyttämällä aaltoliikeopissa tunnettua Huygensin periaatetta (kuva 4). Sen mukaan säteilyn todellinen lähde voidaan korvata mielivaltaisella pinnalle asetetulla ekvivalenttilähteellä. Näin voidaan ajatella jokaisen aaltorintaman pisteen toimivan uuden aallon lähtökohtana. Toisin sanoen jokaisen aaltorintaman piste on uuden aaltoliikkeen lähde, josta aallot leviävät kaikkiin suuntiin aallon etenemisnopeudella [15, s. 27 - 28]. Tämän avulla voidaan johtaa muun muassa taittumis- ja heijastumislait.



Kuva 4. Uuden aaltorintaman muodostuminen Huygensin periaatteen mukaisesti [16. s, 189]

Huygensin periaatteesta voidaan laskennallisesti todeta radiolinkin ympärillä oleva primaarinen tehonkuljetusalue, jota myöten valtaosa lähetystehoista kulkee. Tätä aluetta kutsutaan Fresnelin vyöhykkeeksi (kuva 5). Alue on pyörähdysellipsoidi, jonka kautta kulkevan heijastuksen vaihe-ero on π :n verran suurempi kuin suoraan edenneen säteeseen.



Kuva 5. Esimerkki Fresnelin vyöhykkeestä [17, s. 34]

3.6 Radioaaltojen vaimeneminen

Radiotekniikan sovelluksissa aallot ovat usein sinimuotoisia ja lineaarisesti polarisoituneita. Ympyräpolarisaatiota käytetään myös paljon. Kun yhdistetään kaksi yhtä voimakasta lineaarisesti polarisoitunutta aaltoa, esimerkiksi vaakapolarisoitunut ja pystypolarisoitunut aalto, joiden välillä on 90° vaihe-ero, saadaan ympäräpolarisoitunut aalto. Ympäräpolarisoituneen aallon sähkökentän voimakkuus pysyy samana, mutta kentän

suunta kääntyy jatkuvasti. Korkeataajuiset radiosignaalit, kuten langattoman lähiverkon käyttämä taajuus 2,4 GHz, vaimenee voimakkaasti mm. kaivosolosuhteissa paksuihin kiviseiniin, toisin kuin matalataajuiset radiosignaalit. Radioaalto vaimenee sitä enemmän, mitä suuremmalle taajuudelle mennään. Esteetön yhteys lähettimen ja vastaanottimen välillä takaa paremman toimivuuden ja kuuluvuuden, koska jokainen yksittäinen este voi aiheuttaa katkoja yhteyksissä.

3.7 Vastaanottimen kohina

Radioyhteyttä suunniteltaessa ei riitä, että päästään tiettyyn signaalitasoon, kun pyritään hyvään ja toimivaan vastaanottoon. On vaadittava lisäksi, että signaali erottuu tarpeeksi hyvin kohinasta. Luonnossa esiintyvä häiriökenttä sekä vastaanottimessa syntyvä kohina aiheuttavat yhdessä kohinasignaalin, joka kilpailee vastaanotettavan signaalin kanssa. Kohina voidaan jakaa lähteensä perusteella seuraavasti:

- vastaanottimessa syntyvä kohina
- ilmakehästä ja maasta syntyvä lämpökohina
- salamapurkausten aiheuttamat häiriöt
- avaruudesta tuleva kohina
- sähkölaitteiden aiheuttama kohina.

3.8 Lähetyksessä ja vastaanotossa käytettävät antennit

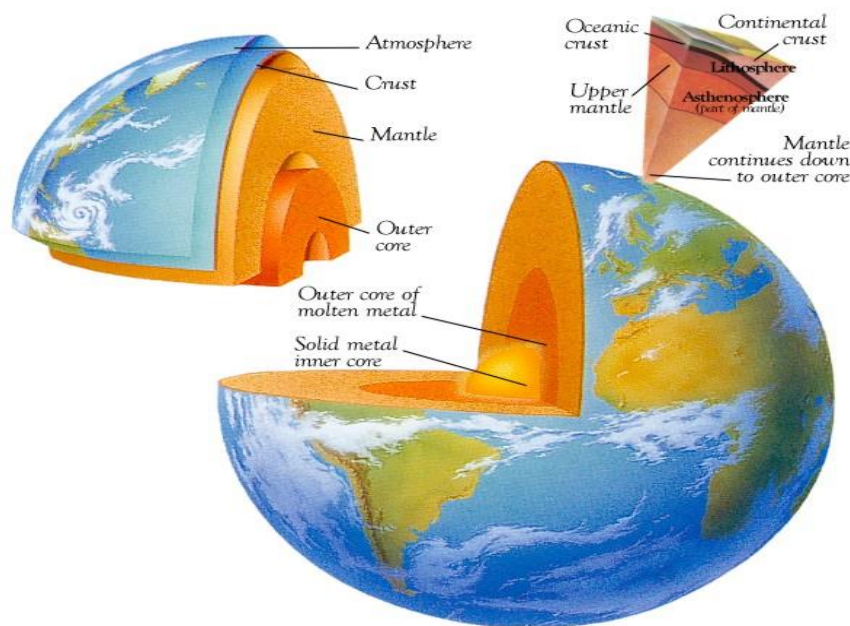
Antenneilla lähetetään ja vastaanotetaan radioaaltoja. Langattomassa lähiverkossa antennin tehtävänä on siirtää dataa ilmateitse lähettimeltä vastaanottimelle mahdollisimman tehokkaasti. Antenneja tarvitaan lähes kaikissa radiotekniikan sovelluksissa. Lähetysantennin tehtävänä on säteillä lähettimen muodostama signaali sähkömagneettisena aaltona ulos antennilta, ja vastaanottoantennin tehtävänä on siepata mahdollisimman suuri teho vastaanotettavasta radioaallostasta. Lähetysantennin toiminta perustuu sähkömagneettisen säteilyn tuottamiseen virran avulla. Kun antennijohteen pinnalle tuotetaan vaihtovirtaa, se aiheuttaa johteen pinnalla varauksia, joiden nopeus vaihtelee. Vastaanottoantenni toimii päinvastoin, eli kun antennijohteen pintaan osuu sähkömagneettista säteilyä, aiheuttaa se johteen pinnalle sähkövirtaa, joka kuljettaa signaalitehon antennin siirtojohdon kautta vastaanottiin.

Radiotaajuuksien voimakas kasvu asettaa antennille yhä tiukempia vaatimuksia. Antenneista halutaan entistä pienempiä, ja niiden tulisi kattaa useampia käyttötarkoituksia. Monesti yhden antennin tulisi toimia useammalla eri taajuusalueella. Antennien rakenne vaihtelee suuresti riippuen taajuudesta ja käyttötarkoituksesta. Nyrkkisääntönä voidaan yleensä pitää sitä, että mitä suurempi taajuus on, niin sitä pienempi on antennin fyysinen koko.

4 Maankamaran ominaisuudet

4.1 Maapallon rakenne

Maapallo alkoi muodostua noin 4,7 miljardia vuotta sitten kasaantumalla kivimeteoriittien kaltaisesta aineksesta. Jatkuva meteoriittipommitus toi huomattavia määriä kineettistä energiaa, joka vapautui lämpönä. Tämä lämpö sulatti kiviaineksen ja sen mukana tulleet metalliset rakeet alkoivat painovoiman vaikutuksesta järjestäytyä kerroksittain.



Kuva 6. Maapallon kuorikerrokset [21]

Maapallo rakentuu kolmesta samankeskeisestä kehästä (kuva 6), jotka ovat toisistaan selvästi erottuvia. Kehien väliset rajat pystytään määrittämään seismografisin menetelmin esim. maanjäristysaaltojen nopeuden muutoksena. Maapallon kiinteä kuori eli litosfääri vaihtelee paksuudeltaan 32:sta 64 kilometriin. Se on muodostunut kolmesta pääkerroksesta. Lähinnä maanpintaa on maan kuori, joka ulottuu enimmillään 50 kilometriä alaspäin. Merien kohdalla maan kuoren paksuus on kuitenkin vain 10 kilometriä. Kuoren alla olevan keskimmäisen vyöhykkeen eli vaipan paksuus on noin 2 900 km. Vaipan ainesosia ei tarkalleen tiedetä, mutta sen arvellaan olevan pääosin kovaa, kiinteää ainetta. Sydän puolestaan ulottuu noin 3 500 km vaipasta maan keskuksiin.

Maa on elävä planeetta, jonka sisällä tapahtuu koko ajan muutoksia. Nämä muutokset aiheuttavat erinäisiä maan pinnallakin havaittavia ilmiöitä, kuten tulivuorenpurkauksia, maanjäristyksiä ja mannerlaattojen hitaita liikkumisia. Niin sydämellä, vaipalla kuin kuorellakin on omat fysikaaliset piirteensä. Sydämessä on korkein paine ja todennäköisesti myös korkein lämpötila. Maan sisäinen koostumus on meille elintärkeä. Planeetalla on jatkuvan radioaktiivisen hajoamisen ansiosta sula rauta-nikkeli-ydin, joka saa aikaan voimakkaan magneettikentän. Magneettikenttä suojaa elämää vaaralliselta säteilyltä sekä auringosta tulevalta suurenergiseltä hiukkaspommitukselta. Lähellä napa-alueita hiukkaspommitus voidaan nähdä paljain silmin öiseen aikaan värikkäinä revontulina.

Kivi on jatkuvassa muutoksessa. Se rapautuu, kuluu eroosion voimasta ja kiertää uudelleen kiveksi. Maanpinnalla olevat kivet kuluvat sedimenteiksi. Jäätiköt, joet ja tuulet kuljettavat niitä ja ne kerrostuvat erilaisina sedimentteinä maalle, järviin ja jokien suistoihin. Lopulta ne joutuvat merenpohjaan, missä miljoonien vuosien kuluessa sedimentit tiivistyvät ja kovettuvat sedimenttikiviksi. Kuoren kivisula kiteytyy maan alla syväkiveksi. Kova kuumuus ja paine syvällä Maan uumenissa muuttaa sedimenttikivet ja syväkivet metamorfisiksi kiviksi. Maankuoren laattaliikunnot nostavat syväkiviä ja metamorfisia kiviä takaisin maanpinnalle, missä ne jälleen rapautuvat.

Yleisnimitys Maan pintaosalle on maankamara, joka koostuu kiinteästä kallioperästä ja sen rapautumistuotteista, maalajeista. Kallioperä on Suomessa useimmiten maaperän eli erilaisten maalajien peitossa. Kallioperä puolestaan muodostuu kivilajeista. Kivilajit koostuvat yhdestä tai useammasta mineraalista. Maalajit ovat joko mineraali- ja kivilajisyntyisiä tai eloperäisiä. Edelliset koostuvat kivilajeista ja mineraaleista, jotka ovat irronneet kallioperästä fysikaalisten ja kemiallisten voimien seurauksena ja särkyneet lohkariksi ja kiviksi tai jauhautuneet hiekaksi, hiesuksi tai saveksi. Eloperäiset maalajit, kuten turve, multa ja lieju, ovat kasvien tai eläinten jäännöksiä. Maalajipeite on Suomessa enimmäkseen verraten ohut, sillä sen yleinen paksuus on vain 3 - 4 metriä. Tyypillisesti maannoksessa on multaa mutta siinä voi myös olla savea, kiveä, hiekkaa ja maatuivia kasvien osia. Maannoksen paksuus on tavallisesti 1 - 2 metriä.

4.2 Suomen kallioperä

Kallioperä on maapallon kiinteä kuori, joka koostuu erilaisista kivilajeista. Suomen kallioperä on Euroopan mantereeseen vanhinta osaa. Noin kolmannes kallioperästämme on yli 2,5 miljardia vuotta vanhaa. Suomen kallioperä on myös todettu olevan koko Euroo-

pan unionin paksuinta. Uusimpien tulosten mukaan allamme on paikoitellen jopa 230 kilometriä kiinteässä olomuodossa olevaa kiviainesta. Suomessa kallioperä on näkyvissä verraten harvoissa paikoissa, sillä vain noin kolme prosenttia maankamarastamme on avokalliota. Eri aikoina yli miljardin vuoden kuluessa syntyneet graniitit ja sen koostumusta lähentelevät gneissit muodostavat ylivoimaisesti suurimman osan maamme kallioperän pinta-alasta. Loput pinta-alastamme eli noin 97 % on irtomaalajien tai vesistöjen peitossa. Suomen kallioperä on muodostunut vähitellen, pala kerrallaan ja aina uuden palan muodostuessa on Suomi sijainnut eri paikassa. On pystytty todistamaan, että Suomi on historiansa aikana seilannut jopa eteläisellä pallonpuoliskolla [5, s. 34.]

Kivilajit ovat syntyneet joko 1) jähmettymällä sulasta kiviaineksesta eli magmasta, 2) kovettumalla kerrostumista, sedimenteistä tai 3) kiteytymällä uudelleen poimuvuoriston syväosissa kohonneen paineen ja lämpötilan olosuhteissa. Näistä yksikin vaihe saattoi viedä jo miljoonia vuosia. Syntytapansa mukaan kivet luokitellaankin magmakiviin (jähmettymäkivet), sedimenttikiviin (kerrostumakivet) ja metamorfisiin (uudelleen kiteytyneisiin) kiviin. Maapallon kivet ovat täynnä arvokkaita piilossa olevia aarteita. Niitä ovat jalokivet ja jalometallit sekä elintärkeät hivenaineet, kuten rauta ja hiili.

Kivet ovat usein piilossa rakennusten, kasvien, veden tai jään alla, mutta tosiasiasa kivi peittää koko maapallon pinnan. Useimmat kivet, geologisesti kivilajit, koostuvat vain muutamista mineraaleista. Puhdas hiekkakivi sisältää vain kvartssia, joka on maapallon yleisin mineraali. Graniitti taas koostuu pääasiassa kvartsista, maasälvistä ja kiilteistä.

4.3 Geologiset raaka-aineet

Maapallo jakaantuu siis kemiallisen koostumuksena mukaan kuoreen, vaippaan ja sisimpänä olevaan ytimeen. Maankuoren kahdeksan yleisintä alkuainetta ovat (painoprosentteina ilmaistuina) happi 48 %, pii 28 %, alumiini 8 %, rauta 5 %, kalsium 4 %, natrium 2 %, magnesium 2 % ja kalium 2 %. Kaikkia muita alkuaineita maankuoressa on yhteensä vain vajaat 2 %. Maanpinnan tuntumassa tapahtuvien geologisten tapahtumasarjojen ja niihin liittyvien fysikaalis-kemiallisten prosessien lopputuloksena syntyy kerrostumia, joita kutsutan sedimenteiksi. Kussakin kerrostumisympäristössä on niille luonteenomaisia sedimenttejä, jotka samalla siis ovat todisteita ja jälkiä niiden synnyn aikana vallinneista olosuhteista. Geologiset raaka-aineet ovat uusiutumattomia, tai hi-

taasti uusiutuvia, jolloin hyödynnetään niiden varastoa. Käyttö kuluttaa luonnonvaraa, ja sen seurauksena syntyy jätettä. Raaka-aineen uusiokäyttö eli kierrätys vähentää raaka-ainevaraston käyttöä ja lisää uusiutumattomien luonnonvarojen käyttöikä.

4.4 Mineraalit

Monet arkipäivän asiat ja esineet on valmistettu maaperän raaka-aineista. Kivellä tarkoitetaan tässä yhteydessä kvartsi- ja maasälpä-nimisiä mineraaleja. Mineraalit puolestaan ovat luonnon tapahtumissa syntyneitä kiteisiä aineita. Yksittäisiä mineraalilajeja on tuhansia, mutta niistä vain muutama kymmenen on yleisesti käytettyjä. Sekä kvartsi, että maasälpä kuuluvat kaikkein yleisimpiin mineraaleihin. Pieneenkin asiaan tai esineeseen mineraaleja pitää kaivaa monesta eri kaivoksesta. Esimerkiksi tavallisen hehkulampun raaka-aineet on kaivettava vähintään viidestä eri kaivoksesta tai louhoksesta, vaikka painoa sillä on vain muutamia kymmeniä grammoja. Tietokone on jo paljon monimutkaisempi laite, sen rakentamiseksi tarvitaankin jo reilusti yli kolmeakymmentä mineraalipitoista raaka-ainetta.

Mineraalit esiintyvät luonnossa alkuaineina tai niiden yhdisteinä. Ne voidaan luokitella kemiallisen ryhmän ja mineraaliryhmän mukaan. Kivet ovat taas laajoja massoja, jotka muodostavat maankuoren. Kivi saattaa koostua vain yhdestä mineraalista kuten kvartsiitti, dolomiitti tai kalkkikivi. Jotkut kivet eivät muodostu lainkaan mineraaleista, vaan ne ovat lasia. Suurin osa kivistä sisältää useita mineraaleja, tai ne ovat muodostuneet vanhemmista kivistä, joissa näitä mineraaleja on ollut. Mineraaleilla on tietty kemiallinen koostumus ja monia mineraaleja käytetään kemiallisten aineiden lähteinä. Suurin osa mineraaleista on vaarattomia, mutta muutamat niistä sisältävät myrkyllisiä aineita.

Kivilajit näyttävät luonnossa ja kuvissa samanlaisilta. Kuitenkin mineraalit vaihtelevat luonnossa suuresti kooltaan ja muodoltaan. Mineraaleilla on tunnusomaiset kidemuotonsa, värinsä ja melko pysyvät fysikaaliset ominaisuutensa, joita voidaan tutkia. Kun kaikki ominaisuudet kootaan yhteen, useat mineraalit on mahdollista tunnistaa luonnon näytteistä. Joitakin mineraaleja on ammattilaistenkin vaikea erottaa toisistaan. Tarkat määritykset tehdään laboratorioissa kemiallisten analyysien, mikroskooppien sekä röntgenografisten laitteiden avulla ja muiden tarkoitukseen sopivien erikoislaitteiden avulla [6, s. 9]. Mineraalien maailma on monilukuinen ja kirjava. IMA (International Mineralogical Association), joka tutkii ja nimeää kaikki luonnosta löytyneet uudet mineraalit, tuntee yli 4 000 mineraalilajia. Näistä vain noin sataa voidaan pitää jokseenkin yleis-

sinä, noin viittäkymmentä satunnaisesti esiintyvänä ja loput ovat harvinaisia tai erittäin harvinaisia [7, s. 80.]

4.5 Teollisuusmineraalit

Yleisemmin Suomessa käytettyjä teollisuusmineraaleja ovat talkki, karbonaatit, maasälvät ja kvartsi. Kvartsi on maailman yleisin mineraalilaji, piin oksidi. Sitä esiintyy monen muotoisena ja vielä useamman värisenä. Talkkia käytetään paperin täytteenä tekemään paperista pehmeää, huokoista ja läpikuultamatonta. Kalsiitti eli kalsiumkarbonaatti on sementin perusaine. Muita tarvittavia raaka-aineita ovat kvartsi ja savimineraalit. Kvartsin yhtä fysikaalista ominaisuutta, pietsosähköisyyttä käytetään hyväksi kelloissa, joissa kvartsikide värähtelee hyvin vakaalla taajuudella ja pitää kellot ajassa. Maasälvät ovat maankuoren yleisin mineraaliryhmä. Niitä on kuoresta noin 60 %. Maasälpä käytetään mm. lasin ja keraamisten tuotteiden sekä mineraalivillan valmistukseen [8, s.48.]

Ihmiskunta on käyttänyt kiveä jo satoja tuhansia, ellei peräti miljoonia vuosia. Aluksi siitä valmistettiin työkaluja, kuten veitsiä tai kirveen teriä. Vanhimmat kiviset rakennelmat olivat tulisijoja, hautaröykkiöitä tai asuinsijan rajaavia kivikehiä. Vaikeasti työstettävänä kivi on aina ollut kohtalaisen kallista, ja siksi sitä on käytetty melko vähän kotitalouksissa. Tosin kotien sisustuksen yksityiskohtina, takkoina, pöytälevyinä ja pienesineinä, kivi on saavuttanut suuren suosion. Nykyään graniitit ovat suosittuja rakennuskiiviä, ja niillä on verhottu monet merkittävät julkiset rakennukset esimerkiksi Helsingin rautatieasema, eduskuntatalo ja Suomen Kansallismuseo.

4.6 Maaperän fysikaaliset ominaisuudet

4.6.1 Maaperän huokoisuus

Maaperän huokoisuus tarkoittaa maaperässä olevien maanrakeiden välissä olevan ilman määrää. Eli väliaineeseen jäävää tyhjää tilaa, joka voi korvaantua esimerkiksi vedellä. Se voi myös olla yksittäinen rako tai onkalo kivessä ja mineraalissa. Maa-aineksen huokoisuus pitoisuus riippuu raekoosta yhdessä rakeiden tiivistyneisyyden, muodon ja järjestyneisyyden kanssa. Raekoolla ei ole yksinään vaikutusta huokoisuuteen: tasarakeisessa maalajissa samanmuotoiset, mutta eri suuret rakeet saman lailla järjestäytyneenä tuottavat yhtä suuren huokoisuuden. Suomessa eri maalajien luokittelun pohjana käytetään Albert Atterbergin 1900-luvun alussa kehittämää raekokoluokitusta. Hienorakeiset maalajit (savi) ovat yleensä huokoisempia kuin karkearakeiset maalajit (hiekkä ja sora). Karkearakeisissa maalajeissa yksittäisten huokosten keskikoko on suurempi. Mitä enemmän on siis savea maaperässä, sitä huokoisempaa maa-aines on.

4.6.2 Tiheys ja raekoko

Tiheydellä tarkoitetaan kappaleen massan suhdetta sen tilavuuteen. Kiven tiheyteen vaikuttavat myös lämpötila ja paine. Kivilajien tiheyteen vaikuttavat myös tietyt geologiset ilmiöt. Kovettuminen kasvattaa tiheyttä, kun taas rapautuminen vähentää sitä. Kivilajin raekoko ilmaistaan keskimääräisenä tai vallitsevana raekokona. Suomen kivilajit ovat yleisimmin keskirakeisia (\varnothing 1 - 5 mm). Mineraalirakeiden muoto vaikuttaa mm. siihen, kuinka lujasti kivilajin rakeet liittyvät toisiinsa. Epämääräisen muotoiset rakeet ja sekaisin olevat säälöiset ja kuituiset rakeet aikaansaavat lujemman rakenteen kuin samat mineraalit pyöreäköinä ja sileäpintaisina.

4.7 Sähköiset ominaisuudet

Sähkönjohtavuutta eli konduktiivisuutta kuvataan symbolilla σ [A/Vm eli S/m] ja se kuvaa varausten kykyä liikkua väliaineessa paikasta toiseen sähkökentän E [V/m] vaikutuksesta. Sen perusyksikkö on $1/(\Omega \cdot m)$, jonka johdannaisyksikkö on S/m, siemensä/metri. Liikkuvat varaukset muodostavat sähkövirran I [A], jonka suuruus pinta-

alayksikköä kohti on sähkövirran tiheys J [A/m^2]. Näiden yhteys ilmaistaan Ohmin lain mukaan.

$$J = \sigma E \quad (16)$$

Kivilajien sähkönjohtavuuden erot johtuvat pääasiassa kivilajin huokoisuudesta, kosteudesta, elektrolyyttipitoisuudesta ja mineralogisista ominaisuuksista. Etenkin malmineraalien runsaus lisää oleellisesti kivilajin sähkönjohtavuutta. Maaperän aineet luokitellaan neljään luokkaan varauksen kuljettajien perusteella. Metallisiin johteisiin ja puolijohteisiin, missä varauksen kuljettajina toimivat elektronit, sekä kiinteisiin eli kiteisiin liuoksiin ja nesteliuoksiin eli elektrolyytteihin, jossa varauksen kuljettajina toimivat ionit. Kivilajien ja kallioperän johtavuuteen vaikuttavat vesipitoisuus, huokoisuus, liuskeisuus, lämpötila, paine, johtavien alueiden määrä, sekä rakenne. Tärkein tekijä näistä on rakenne eli kiven koostumus sekä rakenteessa olevat vaihtelut vapaan veden määrässä. Veden sähkönjohtavuus riippuu monesta eri tekijästä mm. lämpötilasta tai veteen liuenneiden suolojen määrästä. Kuiva maaperä johtaa huonosti sähköä, sillä huokosia täyttävä ilma toimii tehokkaana eristeenä.

Kivien sähkönjohtavuuteen vaikuttavat mm. kivien sisältämät johdemineraalit ja se, missä muodossa johdemineraalit kivessä sijaitsevat, eli ovatko ne satunnaisesti piroitteisena vai laajempina yhtenäisinä rakenteina. Huokos- ja halkeamatiloissa esiintyvä vesi voi muodostaa kiven kanssa liuoksia, jotka parantavat kiven sähkönjohtavuutta. Sähkönjohtavuuden vaikutus sähkömagneettisten mittausten tuloksiin on suurin. Luonnossa esiintyviksi hyviksi johteiksi luokitellaan mm. grafiitti, magnetiitti sekä merivesi. Kohtalaisiksi johteiksi luokitellaan, esim. savi, savikivi ja serpentiniitti.

Permittiivisyys on suure, joka kuvaa, miten väliaine vaikuttaa siihen kohdistuvaan sähkökenttään. Väliaineen permittiivisyys voidaan laskea yhtälöllä

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 (\varepsilon_r' - \varepsilon_r'') \quad (17)$$

jossa ε_r on suhteellinen permittiivisyys, jota kutsutaan myös dielektriseksi vakioksi. ε_r' on sen reaalisosa ja ε_r'' on sen imaginaarisosa. ε_0 on tyhjiön permittiivisyys. Permeabiliteetti μ on myös väliaineen ominaisuus ja se voidaan laskea kaavalla

$$\mu = \mu_0 \mu_r = \mu_0 (\mu_r' - j\mu_r'') \quad (18)$$

Väliaine on homogeenista, jos sen ominaisuudet ovat vakiot eli paikasta riippumattomat. Isotrooppinen väliaine on ominaisuuksiltaan kaikkiin suuntiin samanlainen. Lineaarisen väliaineen ominaisuudet eivät riipu kentänvoimakkuudesta. Dielektrisyysvakio ϵ_r ja suhteellinen permeabiliteetti μ_r ovat aineen rakenteesta riippuvia vakioita. Yleisessä häviöllisessä tapauksessa ϵ_r ja μ_r ovat kompleksilukuja. Dielektrinen vakio on tärkeä parametri, koska se määrää sähkömagneettisen aallon etenemisnopeuden aineessa sekä heijastuskertoimen eri aineiden rajapinnoissa. Etenemis- ja vaimennuskertoimien avulla ja Helmholtzin yhtälöä käyttäen voidaan laskea kompleksinen etenemiskerroin

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon}} \quad (19)$$

Taulukossa (2) on esitetty tiettyjen aineiden sähkönjohtavuuden ja suhteellisen permittiivisyyden arvoja.

Taulukko 2. Eri aineiden suhteellisen permittiivisyyden ja sähkönjohtavuuden ominaisarvoja. [14, s. 5]

materiaali	Suhteellinen permittiivisyys	sähkönjohtavuus 10^{-3} [S/m]
ilma	1	0
metalli	1 – 2	10^9
jää	3 – 4	1
routa	3 – 6	0,1 – 10
betoni	4 – 6	1 – 100
kallio	4 – 10	0,1 – 10
tierakenteet	5 – 10	0,02 – 20
savi	4 – 16	0,2 – 50
hiekkä	4 – 25	1 – 7
siltti	9 – 23	1 – 10
moreeni	9 – 25	0,1 – 10
turve	50 – 78	1 – 2
vesi	80 – 81	0,1 – 3

4.8 Magneettiset ominaisuudet

Magneettisten ominaisuuksien perusteella aineet luokitellaan kolmeen luokkaan: diamagneettisiin, paramagneettisiin ja ferromagneettisiin. Ferromagneettiset aineet ovat tärkeimpiä tekniikassa käytettäviä magneettimateriaaleja. Diamagneettiset aineet magnetoituvat ulkoiseen kenttään nähden vastakkaiseen suuntaan ts. susceptibiliteetti on negatiivinen ja itseisarvoltaan pieni. Paramagneettisilla aineilla magneettinen dipolimomentti suuntautuu kohden indusoituvaa kenttää. Ulkoisen kentän poistuttua paramagneettisuus häviää ja dipolimomentit suuntautuvat satunnaisesti.

Ferromagnetismi on taas tiettyjen aineiden kiderakenteen ominaisuus. Siinä uloimpien elektronien magneettiset momentit ovat asettuneet samansuuntaisiksi pienissä alkeisalueissa ja niillä on pieni magnetoituma ilman ulkoista kenttääkin. Lämpötilan kasvaessa yli aineen Curie-pisteen (lämpötila, jossa ferromagneettinen aine muuttuu paramagneettiseksi) magneettisten momenttien suunnat sekoittuvat uudelleen ja ferromagnetismi häviää. Paikallisia magneettikentän vaihteluita aiheuttavat maaperän magneettiset ominaisuudet, jotka ovat susceptibiliteetti (\mathbf{k}) ja remanentti magnetoituma (\mathbf{M}_r). Susceptibiliteetti on suure, joka kuvaa kappaleen kykyä magnetoitua ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta kaavan,

$$\mathbf{M} = k \mathbf{H} \quad (20)$$

mukaan, missä \mathbf{M} = magnetoituma [A/m], k = susceptibiliteetti [SI], \mathbf{H} = magnetoivan kentän voimakkuus [A/m]. Aineen magnetoituma \mathbf{M} [A/m] mineraaleissa ja kivissä koostuu ulkoiseen kenttään verrannollisesta osasta eli indusoituneesta magnetoitumasta \mathbf{M}_i ja pysyvistä eli remanentista magnetoitumasta \mathbf{M}_r . Remanentti magnetoituma on kiven pysyvä magnetoituma, joka on vain ferromagneettisia mineraaleja sisältävän kiven ominaisuus. Suure, joka kuvaa aineen herkkyyttä magnetoitua ulkoisen kentän vaikutuksesta on magneettinen susceptibiliteetti. Ulkoisen kentän ollessa heikko käytetään kaavaa.

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_r + \mathbf{M}_i = \mathbf{M}_r + k\mathbf{H} \quad (21)$$

Kivilajien susceptibiliteettiin vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat magneettipitoisuus, rae-koko ja lämpötila. Kivilajin susceptibiliteetti voidaan laskea lausekkeella $k = 0.35 \cdot V$, jossa V on magnetiitin tilavuusprosentti. Lauseke on voimassa magnetiitin tilavuusosuuteen 25 prosenttiin asti.

5 Radioaaltojen eteneminen kaivoksissa

5.1 Radioviestintäjärjestelmät

Tunnelit ovat hyvin mutkikkaita, ja niiden seinämien katot on tuettu pilareilla tai erillisillä tukipylväillä. Seinät muodostuvat karkeista ja rosoisista pinnoista. Kaikki nämä poikkeukselliset ominaisuudet vaikuttavat radiosignaalien käyttäytymiseen kaivoksessa. Radioviestintäjärjestelmien tulisi toteuttaa ainakin seuraavat päämäärät I) toimia saumatomasti ja samalla suojata ja pelastaa työntekijöitä maanalaisissa olosuhteissa II) kattaa se alue, jossa työskennellään, jotta työntekijöihin voidaan pitää yhteyttä ja seurata heitä III) helpottaa henkilökunnan paikantamista ja varoittaa ennalta ongelmista kaivoksen sisällä.

Radioviestintäjärjestelmät voidaan jakaa seuraavaan neljään pääosaan:

1. maanläpiviestintä (*Through-the-Earth Communication System*)
2. kaivoksen sisäiset radioviestintäjärjestelmät (*In-Mine Radio Communications*)
3. langattomat järjestelmät (*Wireless Networks*)
4. ultralaajakaistaiset järjestelmät (*UWB Systems*).

5.2 TTE -menetelmä

Maanläpiviestintä (Through-the-Earth) on enimmäkseen hätä- ja pelastuskäyttöön suunniteltu viestintäratkaisu. Jos kaivoksessa tapahtuu onnettomuus, työntekijät jäävät usein loukkuun kaivoksen sisään. Pelastusryhmä on sijoitettu kaivoksen ulkopuolelle. Kun halutaan järjestää nopea ja toimiva pelastusoperaatio, pelastajien on tiedettävä tarkasti, missä loukkuun jääneet työntekijät sijaitsevat. Jäljittämiseen käytetään ns. maanläpi-viestintää. Ensimmäiset onnistuneet testit suoritettiin hieman toisen maailmansodan jälkeen käyttämällä kuutta erittäin pientä lähetintä ja vastaanotinta sekä yhtä monikanavaista vahvistinta. Järjestelmä toteutettiin syvällä kivihiilikaivoksessa käyttäen sähkömagneettisen spektrin 900 - 2 900 Hz:n aluetta. Tällä alueella järjestelmä toimi hyvin, ja aallot tunkeutuivat hyvin kallion läpi. Samalla huomattiin, että aallot etenevät kallioperässä paremmin, jos siihen on sekoittunut metallisia materiaaleja.

Käyttämällä yhtäjaksoista radiosignaalia erilaisilla vaihe-eroilla, pystyttiin määrittämään paremmin henkilöiden sijaintitarkkuutta. Kaiken kaikkiaan ensimmäisissä testeissä todettiin, että radioaaltojen läpäisyominaisuudet kaivoksissa ovat täysin erilaiset riippuen siitä, onko kyseessä hiili tai vaikkapa kuparikaivos. Sen mukaan vaihtelevat myös tunkeutumisominaisuudet sekä johtokyky.

5.3 Kaivoksen sisäiset radioviestintäjärjestelmät

a) Aallon luonnollinen etenemisnopeus kaivoksissa

Kaivoksen muoto, seinien rakenne, erilaiset esteet kaivoksissa kuten tukipilarit, koneet yms. vaikuttavat radioaaltojen läpäisykykyyn. Mallintamalla aallon luonnollista etenemistä kaivoksessa voidaan perehtyä tarkemmin seikkoihin, jotka vaikuttavat radioaallon etenemiseen. Radioyhteyksiä mallinnetaan kahdella eri tavalla I) Teoreettisella mallinnuksella ja II) Empiirisellä eli kokemuseräisellä mallintamisella. Ensimmäinen näistä toteutetaan modaalisella lähestymistavalla tai säteenseurantamenetelmällä. Modaalinen tapa on haastava sen matemaattisen lähestymistavan takia. Se perustuu Helmholtzin yhtälöihin. Koska kaivoskäytävien muodot eivät ole tasaisia eivätkä symmetrisiä, niiden teoreettinen mallintaminen on todella vaikeata. Empiirinen mallintaminen perustuu laajoihin kenttämittauksiin. Kerätty tieto arvioidaan, jotta voidaan luoda tilastollinen mallintaminen juuri kyseisestä ympäristöstä ja ominaisuuksia. Tämä tapa on antanut tutkijoille mahdollisuuksia luonnehtia paremmin maanalaisen kaivoksen radioetenemiskanavia.

b) Aallon etenemisnopeusmittaukset kaivoksissa

Ensimmäisiä kokeellisia radioaallon etenemismittauksia suoritettiin vuonna 1963. Aluksi oltiin tekemisissä matalien taajuuksien aaltojen kanssa ja tutkittiin taajuuksien, etenemisestäisyyksien ja kohinatason vaikutuksia radiosignaaleihin. Jo silloin oli pyrkimyksiä yhdistää sisäisiä radioviestintäjärjestelmiä ja maanläpiviestintäjärjestelmiä keskenään, jotta saataisiin kattava tietoliikennejärjestelmä maanalaiseen louhintaan, niin hätä- kuin päivittäiskäyttöön sekä kaivoksen ympäristön seurantaan. Lisäksi suoritettiin useita parannuksia jo voimassa oleviin viestintäjärjestelmiin ja -menetelmiin. Tekniikan kehittyessä lisääntynyt kantama, tehokkaampi kaistanleveyden käyttö ja pienentynyt virrankulutus olivat tärkeimmät kriteerit, joita tutkimuksilta vaadittiin.

Radiosignaalien kantavuus paranee huomattavasti, kun johtavia aineita, esimerkiksi metalleja, esiintyy lähellä. Tämän vuoksi tutkimuksia suoritettiin, kun haluttiin selvittää kantavuuden parantuvuutta hyödyntämällä eri metallisia materiaaleja kaivoksissa. Näissä tutkimuksissa havaittiin, että kantavuutta voitiin tehostaa MF -taajuuksilla johtavien aineiden läsnäollessa. Vaimennuksen määrä riippuu suuresti johtavien aineiden sijainnista kaivoskäytävillä, niiden määrästä sekä esimerkiksi kaapeleiden ja kaivosputkien arkkitehtuurista.

Ensimmäisiä kaivosmittauksia suoritettiin pienissä kaivoshuoneissa useilla eri siirtotaajuuksilla käyttäen 200-, 415- ja 1 000 MHz:n taajuuksia. Mittauksia suoritettiin eri esteiden kuten pylväiden ja pilareiden esiintyessä, jotta saataisiin todenmukainen kuva vallitsevista olosuhteista. Koska yhä kasvava tarve suurille datanopeus-sovelluksille oli voimistumassa, tutkimukset liittyivät yhä enemmän UHF-taajuuksien viestintään. Niitä on tutkittu runsaasti kahden viime vuosikymmenen aikana. Esimerkiksi on raportoitu, että radiosignaalit 900 MHz:llä voivat levittyä laajalle alueelle kaliumkarbonaattikaivoksessa pienillä häviöillä sekä vähäisellä monitie-etenemisen aiheuttamalla häiriöllä.

Nämä ja muut tutkimukset ovat osoittaneet, että UHF-viestintää voidaan käyttää, kun halutaan tehokas tapa toimivaan ääniviestintään, tarkkailuun, sovellusten valvontaan ja pakatun digitaalisen videokuvan lähettämiseen. Jos datanopeutta halutaan edelleen nostaa, pitää ottaa käyttöön antenniryhmiä, joilla kaistanleveyttä saadaan nostettua vieläkin suuremmaksi. Viime aikoina, suprajohdettavien laitteiden käyttöönottoa on lisätty LF -taajuuksilla. Esimerkiksi, korkean lämpötilan suprajohdettavaa vastaanotinta on käytetty maanalaisilla alueilla äänen siirtoon. Järjestelmä käyttää hyväkseen matalaa taajuutta (esim. 4 000 Hz) äänen kuljettamiseen. Nämä taajuudet voivat läpäistä tyypillisesti kiveä ja kallioperää useita satoja metrejä kohtalaisilla tehotasoilla. Tulevaisuudessa tutkimuksia pitää tehdä kaareissa ja yhdensuuntaisissa tunneleissa ja kaivoskäytävillä, missä on pilareita, tolppia yms. esteitä suoralla ja epäsuoralla näköyhteydellä, jotta saadaan kokonaisvaltainen kuva kaivosten erilaisista oloista.

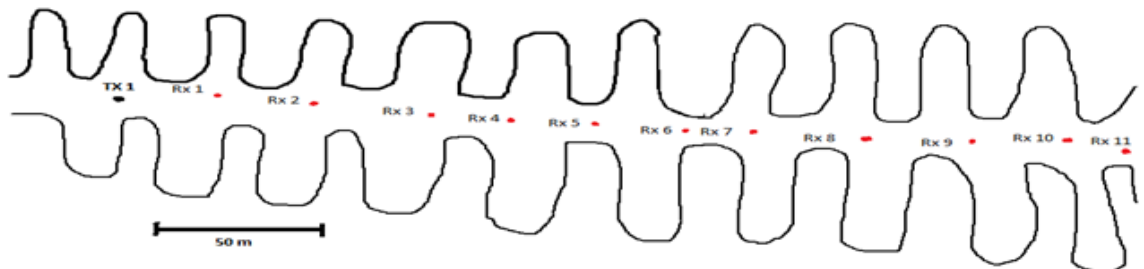
5.4 UWB-mittaukset kalkkikivikaivoksessa

Maanalaisessa kaivoksessa langattomat järjestelmät käyttävät entistä enemmän hyödyksi UWB-taajuuskaistaa. Niiden avulla on mahdollista parantaa vasteaikaa etenkin hätätilanteissa tarjoamalla nopeaa ja luotettavaa viestintää sekä tarkkuutta paikannuk-

seen. Tähän mennessä tehdyt UWB-mittaukset ovat keskittyneet rakennusten sisällä tapahtuneisiin etenemismittauksiin. Näiden seurauksena on vain vähän tietoa UWB-taajuuksien ominaisuuksista maanalaisissa kaivoksissa. Kaivoskäytävillä onnettomuuksien sattuessa vasteaika on tärkein tekijä langattomilla yhteyksillä. Vasteajan parantaminen hätätilanteissa on tällä hetkellä tärkein yksittäinen ongelmakohta, johon puututaan kaivosten turvallisuutta parannettaessa.

UWB-laitteet käyttävät erittäin suurta kaistanleveyttä ja toimivat ultralyhyillä, pulsseilla. Nämä ultra-lyhyet pulssit mahdollistavat huomattavasti paremman aikaresoluution kuin perinteiset järjestelmät, jolloin ne soveltuvat myös hyvin tutka- ja eri tunnistussovelluksille. Seuraavat mittaukset on suoritettu Kimballtonin kalkkikivikaivoksessa Lounais-Virginiassa Yhdysvalloissa. Mittaukset sisältävät vaimennusmittaukset suorassa kaivostunnelissa sekä vaimennus ja paikalliset häipymismittaukset suuressa pilarinlouhinta yksikössä. Lisäksi tutkitaan häipymistä ja vaimennusta, monitie-etenemisen aiheuttamaa viivejakautumista ja keskimääräistä lisäviivettä.

Mittaukset:

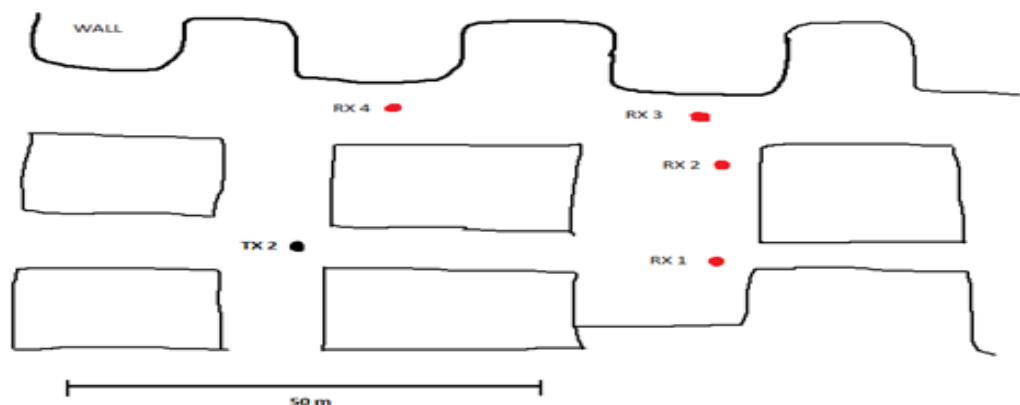


Kuva 7. Lähettimen ja vastaanottimien sijainnit mittausalueella, kokonaisetaisyys n. 300 metriä [18]

Kaksi lähetintä ja 15 vastaanotinta sijoitettiin kahteen eri kerrokseen kalkkikivikaivokseen. Mittauspaikat valittiin niin, että niiden haluttiin edustavan kahdenlaisia etenemisolosuhteita kaivoksessa. Ensimmäinen lähetin sijoitettiin pitkän käytävän päähän, jotta suora näköyhteys (tai lähes suora näköyhteys) pystyttiin saavuttamaan. Toinen lähetin sijoitettiin yhden tukipilarin viereen kulman taakse, jotta saataisiin joko suora (LOS) tai epäsuora (NLOS) yhteys koko alueella. Mittauksissa käytettiin ns. liikkuvaa laajakais-taista kanavaluotainta mittaamaan laajakais-tan tehoviiveprofileja. Kanavaluotain toimii 450 MHz taajuudella. Keskitäajuus oli asetettu mittauksissa 3 GHz:iin, ja vastaanotti-

men ulostuloteho oli asetettu 11 dBm ensimmäisessä pisteessä, ja toisessa pisteessä 34 dBm. Lähetin ja vastaanotin käyttävät suuntaamatonta kaksoiskartioantennia 6 dBi vahvistuksella. Lähettimen antenni oli asetettu 2,97 metrin korkeuteen, ja vastaanottimen 1,07 metrin korkeuteen. Katon korkeus lähettimen päässä oli n. 7,6 metriä kun taas vastaanottimen kohdalla katon korkeus oli n. 15,8 metriä. Kannettavaa tietokonetta käytettiin nauhoittamaan kanavan impulssivasteita ja erillistä ohjelmaa analyysien jälkikäsitteilyyn, sen avulla voitiin luoda tehoviiveprofiilit (PDP). Koko järjestelmän vahvistus ja etenemisvaimennus pystyttiin laskemaan huolellisten kalibrointimittausten jälkeen.

Yhdentoista vastaanottimen paikka sijoitettiin lähetin-vastaanotin periaatteella 19 - 308 metrin etäisyyksille kuva (7). Jokaiselle vastaanottimen sijainnille mitattiin laajakaistatehoviiveprofiili, vastaanottotaajuudeksi asetettiin 3 GHz. Vertaillakseen laajakaistaista ja kapeakaistaista vastaanotettua tehoa, toiseksi mittauspaikaksi valittiin NLOS yhteys, kuten alla olevasta kuvasta (8) näkyy.



Kuva 8. Toisen mittauspaikan lähettimen ja vastaanotinten sijoittelu [18]

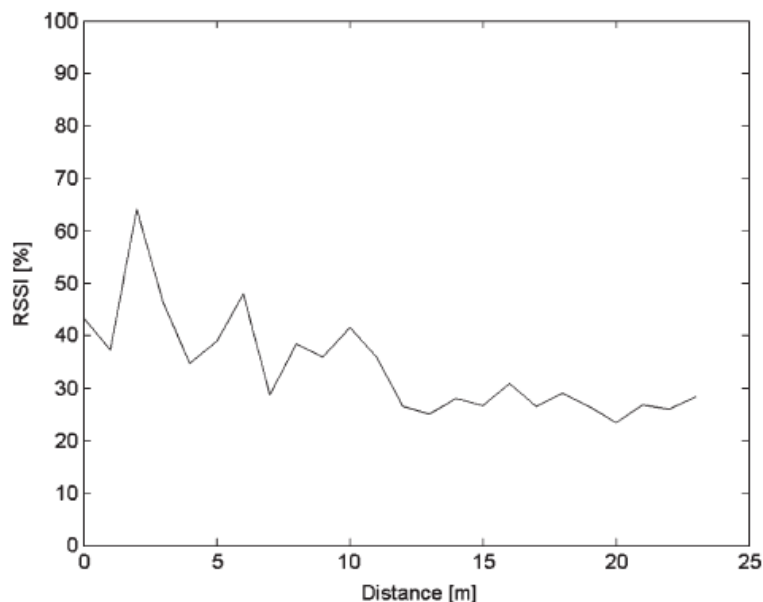
Tulokset:

Alustavat tulokset osoittivat, että pitkillä tunnelikäytävillä signaalit kohtaavat enemmän aaltoputkivaikutusta, kuin vapaan tilan etenemistä. Lisäksi todettiin, että UWB-signaalit kohtaa merkittävästi pienempää häipymistä verrattuna jatkuvan aallon signaaleihin (CW). UWB signaaliin perustuvat viestintä/paikannuslaitteet ennakoivat vähemmän häipymiä joka tarkoittaa sitä, että ne tarjoavat paremman kattavuuden ja pienemmän signaalin katkeamisen samalla lähetetyllä teholla.

5.5 Langattoman verkon testaukset hiilikaivoksessa

Wlan -tekniikkaa käytetään louhittavan seinämän automaatiojärjestelmään. Se hyödyn-
 tää DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) lähetyksen menetelmää 2,4 GHz:n taajuus-
 alueella. Tällainen modulointitekniikka soveltuu erittäin hyvin maanalaiseen ympäris-
 töön, jossa on paljon metallipintoja. Menetelmällä on myös tiettyä luontaista vastustus-
 kykyä monitiehäiriöön. Pääasiallinen tapa testata Wlan -yhteyttä on käyttää hyväksi
 laitteen mittaamia RSSI arvoja (vastaanotetun signaalin voimakkuuden ilmaisin). Toi-
 nen mitattava parametri on yhteyden signaalin laatu. Seuraavat mittaukset on suoritettu
 South Bulgan hiilikaivoksessa Australiassa. Kaivoksen verkkoinfrastruktuuri käyttää
 valokuitua ja kaapeliluokka viiden kuparikaapelia tarjotakse yhteyden maanpinnasta
 louhittavaan kohtaan. Etäisyys voi olla jopa kolmesta viiteen kilometriä.

Mittauksessa haluttiin tutkia, kuinka pitkälle viestintä voitaisiin ylläpitää langattomilla
 laitteilla kaivoskäytävällä. Mittaus suoritettiin kaivoskäytävän toisesta päästä kävele-
 mällä kaivoksesta maanpinnalle. Kuvasta (9) voidaan havaita, että yhteys katkeaa n.
 23 metrin kohdalla.



Kuva 9. Keskimääräinen signaalin voimakkuus kävellessä kaivoskäytävää maan alta ulos, LOS yhteydellä.

Monitie-etenememisen aiheuttamaa häiriötä syntyy maan alla herkästi. Wi-fi järjestelmille onkin syytä käyttää diversiteettiantennia, jotta sitä voidaan lieventää. Alueellisella vaihtelulla voi olla merkittäviä eroja kahden antennin välillä. Uusimmat järjestelmät kaivoksissa käyttävät OFDM -koodausmuotoa (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). Kehittynein järjestelmä vaihtaa OFDM -koodausmuodon takaisin DSSS -järjestelmään, kun yhteyden laatu laskee alle tietyn pisteen, jossa suurempia datanopeuksia ei voida enää jatkaa (20 Mb/s ja ylöspäin) [23, s. 111 - 117.]

6 Kaivosten viestintäratkaisut

Maanalainen kaivostoiminta on yksi maailman vanhimpia ja perinteisimpiä ammatteja. Kaivostyöt suoritetaan vaarallisessa ympäristössä. Yleisimpiä vaaroja ovat ajoneuvojen onnettomuudet, kattojen ja seinämien sortumiset, tulipalot, myrkylliset kaasut ja porattaessa syntyvät vedenpurkaukset. Yksikin onnettomuus voi johtaa kaivosmiesten kuolemaan tai vakavaan vammautumiseen. Koska onnettomuudet tapahtuvat maan alla, avunsaaminen hätätilanteissa kestää kauan. Äärimmäisistä olosuhteista huolimatta on kaivosten tärkein päämäärä kuitenkin tehokkuus ja tuottavuus, joita jatkuvasti ylläpidetään kaivostoiminnan aikana.

Kommunikointi on hyvin tärkeä kaivostoiminnan jokaisessa vaiheessa. Päivittäisissä operaatioissa kiviaineksen keräämisen ja kuljettamisen avuksi tarvitaan hyvää viestintäverkkoa. Elintärkeäksi hyvä viestintäverkko osoittautuu silloin, kun kaivoksessa tapahtuu jokin häiriö tai onnettomuus. Tiedonkulku, yhteistyö työntekijöiden välillä ja henkilöiden paikallistaminen on kaivoksissa yleensä toteutettu hätäviestinnän avulla. Vaarallisimpia onnettomuuksia ovat hiilikaivoksissa tapahtuvat kaasuräjähdykset. Kiinassa kuolee tuhansia ihmisiä vuodessa näihin onnettomuuksiin.

6.1 Kaivosten ominaisuudet

Kaivokset ovat erittäin kosteita tiloja, joissa kosteusprosentti voi olla jopa 90 %. Syövyttävä vesi, pöly, myrkylliset kaasut, kuten metaani ja hiilidioksidi, tekevät kaivoksesta vaikean työpaikan tehdä töitä. Mitä syvemmälle mennään sitä suuremmaksi kasvaa kallioperässä vallitseva paine, joka vaikeuttaa toimintaa ja lisää louhitun kallioperän tukemisen tarvetta. Kaivosten olot ovat dynaamisia eli jatkuvasti muuttuvia. Kun kiviainesta tuodaan maan alta ylös, kaivos laajenee. Sen johdosta tarvitaan alati tehokasta tietoliikenneinfrastruktuuria. Radioyhteyden pitää olla täysin katkeamaton, joten alati laajeneva kaivos luo viestintäverkoille erittäin kovan haasteen.

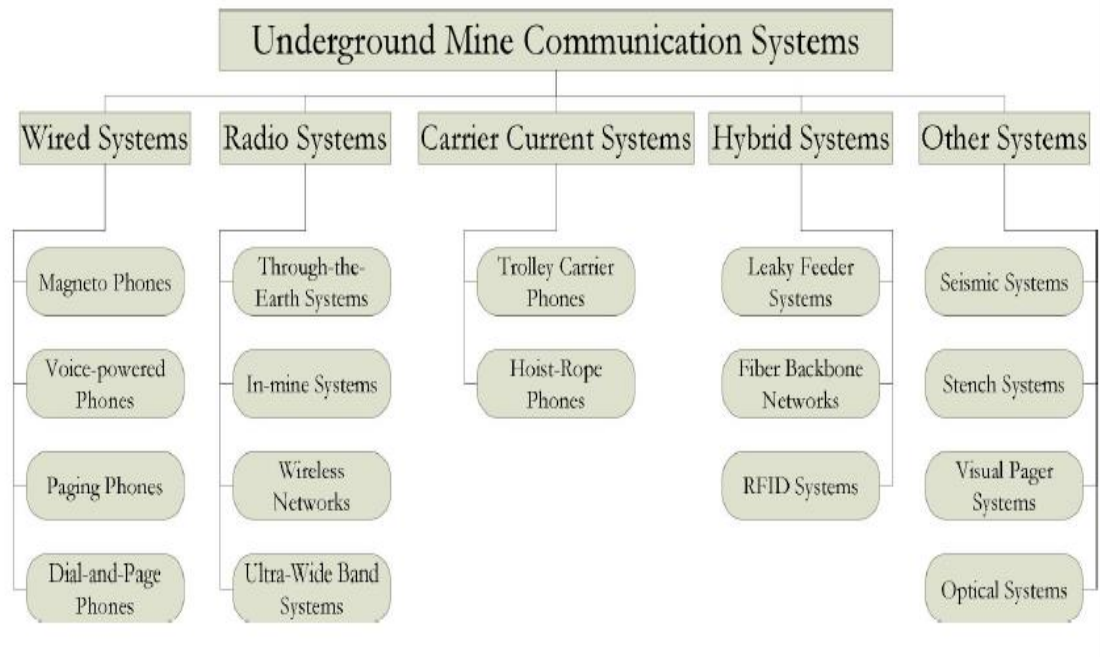
Kaivokset ovat radiosignaaleille haastava ympäristö. Muutokset radiotien etenemisessä ja radiosignaalin käyttäytymisessä ovat alttiita vaihteluille kaivosympäristössä. Koska eri kivilajien sähkömagneettiset ominaisuudet, kuten dielektrisyys ja johtavuus, vaihtelevat eri kivilajeilla, pitää se ottaa huomioon suunniteltaessa radioverkkoa maan alle. Toimiva radioverkko parantaa tiedonkulkua ja vähentää sekaannuksia sekä edistää

tavoitteiden saavuttamista. Hätäavun saanti ja tuottavuus ovat kaivoksissa viestinnän tärkeimpiä tavoitteita. Tuottavuus riippuu, siitä kuinka hyvin kaivoksen eri yksiköitä ohjataan ja johdetaan. Jatkuva työntekijöiden ja koneiden seuranta voidaan toteuttaa ja koordinoita asianmukaisesti hyvän viestintäverkon avulla [9, s.125.]

6.2 Viestintälaitteiden ominaisuuksia

Onnettomuuden kohdatessa työntekijät pitäisi saada evakuoitua mahdollisimman nopeasti. Kaivoksissa se on vaikeata ja joskus jopa mahdotonta, koska sortumat aiheuttavat tukoksia etenemiskäytävillä. On erityisen tärkeää, että viestijärjestelmät ovat ehjiä ja toimivat 100 %:n varmuudella myös onnettomuustilanteissa. Laitteet rikkoutuvat helpommin maanalaisessa ympäristössä, jos ne ovat suunniteltuja normaaliin ympäristöön. Maan alla vallitsevat rankemmat ja vaativammat olot. Varsinkin herkäät elektroniikkalaitteet ylikuumenevat ja oikosulkuja syntyy. Kaivoksissa on suuret lämpötilaerot ja ilmassa runsaasti pölyä. Sen takia sähkö- ja elektroniikka laitteissa käytetäänkin runsaasti eristystä.

Viestintälaitteet on suunniteltu pieniksi ja kevyiksi tilantarpeen ja helpon liikuteltavuuden vuoksi. Suositaan iskunkestäviä, lujatekoisia elektroniikkalaitteita, joissa on pitkä akkukestoisuus. Ei ole olemassa vain yhtä järjestelmää, joka toteuttaisi kaikki kaivosten viestintäjärjestelmään liittyvät vaatimukset. Kaivoksen sisällä viestintäverkon pitää kattaa koko kaivoksen käytäväverkosto. Seinämien sortumisten johdosta yhteys voi katketa tai signaali olla hyvin heikko. Toimivaan viestintäverkkoon tarvitaan sekä kaivoksen sisällä toimiva järjestelmä että kaivoksesta maanpinnalle toimiva järjestelmä. Tässä työssä perehdytään molempiin järjestelmiin erikseen. Seuraava kuva (10) esittää käytössä olevia, ja jo historiaan jääneitä maanalaisen kaivoksen viestintäjärjestelmiä.



Kuva 10. Kaivosten viestintäjärjestelmät [9, s.127].

6.3 Langalliset viestintäjärjestelmät

1) Yhteinen puhelinlinjajärjestelmä

Tällä yhteisellä puhelinlinjajärjestelmällä pystytään tuottamaan selektiivinen kutsu yhdeltä asemalta toiselle. Pääperiaatteena on, että siirto jokaisesta yksittäisestä risteyskohdasta voidaan vastaanottaa kaikista muista yksittäisistä risteyskohdista, sillä linja on kaikille yhteinen. Jokaisessa risteyskohdassa ei tarvita akkua käytettäväksi pitkäksi aikaa paitsi silloin, kun kutsutaan toista asemaa erikseen yksityisesti.

2) Magneettopuhelimet

Magneettopuhelimet olivat ensimmäisiä järjestelmiä, joita kaivoksissa alettiin käyttää. Magneettopuhelin koostuu lähettimestä, vastaanottimesta, kytkimestä, akusta ja magneetosta, joka toimii käsikäyttöisenä generaattorina. Ajatuksena oli tuottaa sen suuruisen virta, että se saa kellon soimaan yksityisellä linjalla. Kun oikea asema kaivoksessa vastaanotti puhelun, keskustelu voitiin suorittaa akun antamalla teholla. Kaivoksen laajentuessa magneettopuhelimet piti jakaa pienempiin alueisiin, koska signaaliteho ei riittänyt kattamaan koko aluetta samaan aikaan.

3) Äänikäyttöiset puhelimet

Äänikäyttöinen puhelinjärjestelmä käyttää tekniikka, jossa ääni muunnetaan sähköiseksi signaaliksi sähkömekaanisilla muuntimilla. Toisin kuin magneettopuhelimet, äänikäyttöiset puhelimet eivät tarvitse erillistä virtalähdettä toimiakseen. Tämä tekee niistä erittäin käytännöllisiä hätätilanteissa, joissa virta saattaa olla katkennut koko kaivokselta. Heikkoutena voidaan pitää, sitä että äänikäyttöisillä puhelimilla on lyhyt kantama.

4) Henkilöhakupuhelimet

Henkilöhakupuhelimet toimivat yhteisellä puhelinlinjaperiaatteella ja ne ovat kautta aikain olleet suosituin kommunikaatiojärjestelmä kaivoksissa. Jokainen yksittäinen laite sisältää oman akun ja se syöttää audiovahvistinta, joka vahvistaa audiosignaalia kaiuttimessa. Verrattuna magneettopuhelimiin, henkilöhakupuhelimet eivät edellytä erityistä koodausta jäljittääkseen henkilöitä. Kaiuttimissa on erittäin korkea äänenlaatu, ja meluisissa kaivoksissa se on hyvin tärkeä ominaisuus. Henkilöhakupuhelimet ovat luotettavia, helppoja asentaa ja ylläpitää. Heikkoutena on, että niillä ei voi samanaikaisesti pitää auki kuin yhtä linjaa kerrallaan.

6.4 Langattomat järjestelmät

Käytetyin järjestelmä on WLAN (Wireless Local Area Network) ja toiseksi käytetyin niin kutsuttu Ad-Hoc tilapäisverkko. Molempia verkkoratkaisuja käytetään kaivoksissa radioviestintäjärjestelmiin. WLAN on vakiintunut tavallisissa ympäristöissä kaivoksen hyväksi ja toimivaksi viestintäverkoksi. Standardin IEEE 802.11b-mukaiset järjestelmät testattiin tavallisissa kenttätutkimuksissa kaivosympäristössä ja niissä todettiin, että kantama voi olla n. 450 metriä suorassa tunnelissa. Ac-Hoc-verkoissa kantama on vielä hieman parempi. Samanlaisissa kenttätutkimuksissa niiden kantamaksi mitattiin n. 550 m suorissa tunneleissa käyttäen kehittyneempää standardia 802.15.4 taajuudella 900 MHz.

Tutkimukset osoittivat, että kaivostunnelien haarautumien kohdalla tarvittiin toistimia, koska eteneminen heikkeni suuresti, jos ei ollut suoraa näköyhteyttä lähettimen ja vastaanottimen välillä. Sähkövirran saanti näille tunnelien risteysalueille oli tärkeä käsiteltävä näkökohta ennen kuin järjestelmää voitiin todellisuudessa käyttää. Järjestelmän heikkoutena oli solmukohtien virransaannin rajoitettu aika sekä ruuhka viimeisessä

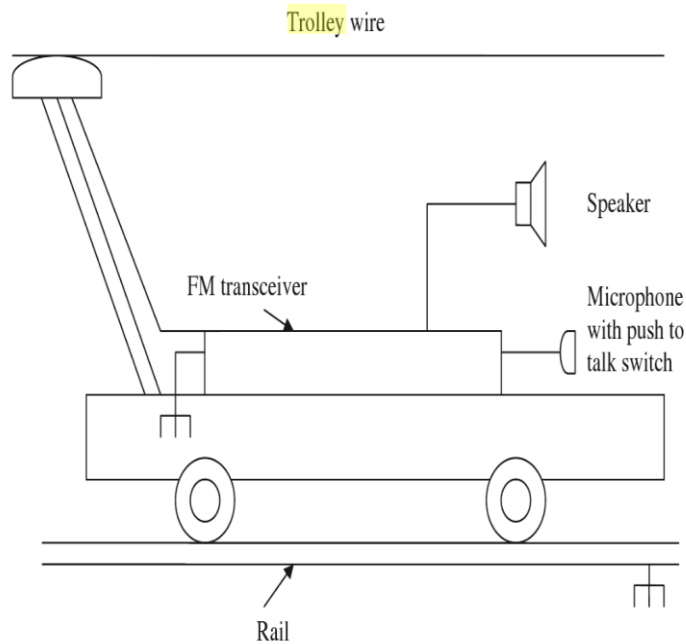
solmukohdassa, koska koko tietoliikenne keräytyi siihen. Tukos viimeisessä kohdassa rajoitti koko yhteenlaskettua siirtonopeutta [9, s.132.]

6.5 Virrankantojärjestelmä

Kun kaivoksessa on jo olemassa johdotusinfrastruktuuri esim. vaihtovirta/tasavirtavoimalinjat, nostoköydet, puhelinlinjakiskot, vesiputket, ilmanvaihtokanavat tai jokin muu johdotus, niitä on helppo käyttää hyödyksi. Nämä virrankantojärjestelmät käyttävät hyväksi tätä infrastruktuuria. Tämän kaltaisia viestintäjärjestelmiä pidetään kaikkein luotettavimpina tietoliikennejärjestelminä monissa tapauksissa. Verrattuna puhelinpiireihin virrankantojärjestelmillä on parempi mekaaninen kestävyys ja parempi eristys. Seinämien tai katon romahdettua näillä järjestelmillä on kyky korjautua nopeasti. On olemassa kaksi erilaista virrankantojärjestelmää:

1) Vaunupuhelinjärjestelmä (Trolley Carrier Phone)

Tämän tyyppisiä järjestelmiä käytetään edelleen kaivosten tavaraliikenteessä. Ne operoivat 60 - 140 kHz taajuudella ja käyttävät taajuusmoduloitua kapeaa kaistaa. Puhelinjärjestelmä käyttää hyväkseen vaunun yllä kulkevaa kaapelia lähetettävän datan siirtoon. Lähetin ja vastaanotin on kytketty liitinkondensaattorin avulla vaunun yllä kulkevaan rautavaijeriin (kuva 11). Järjestelmä sisältää tehölähdeyksikön, joka muuntaa kaapelia pitkin tulevan suurjännitteen pienemmäksi ja sopivammaksi puhelinpiireille. Yksikkö sisältää myös akun, jota tarvitaan sähkökatkoksen yllättäessä. Se käyttää hyväkseen pikayhteyttä (Push-to-talk, Release-to-listen), joka nopeuttaa toimintaa. Induktiivinen kytkentä näissä puhelimissa takaa paremman kantaman ja kuuluvuuden.



Kuva 11. Vaunupuhelin järjestelmän toimintaperiaate [14, s. 8]

2) Nostoköysi Puhelin (Hoist Rope Phone)

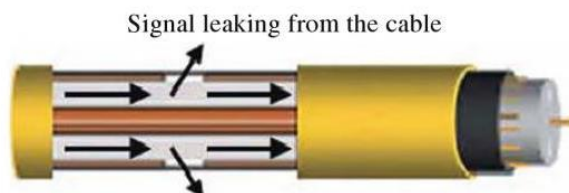
Tällaista järjestelmää käytetään kommunikointiin eri kerrosten välillä. Järjestelmä koostuu kahdesta signaalikytkimestä ja kahdesta vastaanottimesta. Järjestelmä on helppo panna käytäntöön ja sillä on luja mekaaninen kestävyys. Toisaalta se on erittäin riippuvainen kantoaallon taajuudesta.

6.6 Hybridi järjestelmät (Hybrid Systems)

Langallisen järjestelmän suurin haaste on, että se on erittäin haavoittuvainen fyysisille vaurioille karuissa olosuhteissa maan alla. Haittana on myös käyttäjien liikkuvuuden rajoitus. Langallinen verkko vaatii hyvin kattavaa infrastruktuuria. Suhteessa langattomiin järjestelmiin niiden hyvänä puolena voidaan kuitenkin pitää parempaa kuuluvuutta ja suurempia siirtonopeuksia. Sen takia on hyvä tutkia myös langattomien ja langallisten järjestelmien yhdistämistä.

6.7 Vuotavat syöttöjärjestelmät

Vuotavan syöttöjärjestelmän kaapeli (kuva 12) on suunniteltu ns. vuotamaan signaalia, mikä mahdollistaa lähetyksen siirron. Kaapeli voi olla joko kaksoisydinkaapelia tai koaksiaalikaapelia. Kaapelit säteilevät koko matkaltaan. Tämä järjestelmä kasvattaa etenemisaluetta, koska vaimennusaste koko kaapelin läpi on pienempi kuin vapaan alueen eteneminen kaivoksessa. Järjestelmä tarvitsee toimiakseen rivivahvistimet ja vastaanottimet kompensoidakseen signaalin menetystä. Etäisyys liikkuvan radioyhteyden ja kaapelin välillä voi olla yli 30 metriä tavallisessa kaivosympäristössä. Testit ovat myös osoittaneet, että näköyhteyksillä on päästy jopa 90 metrin kantamiin. Vuotavilla syöttöjärjestelmillä on etuja, mutta haittana on, että sortumien sattuessa yhteys menee poikki. Lisäksi kaivosten laajentuessa ne tarvitsevat infrastruktuurissa uusia asennuksia, jotta kattavuus säilyy.



Kuva 12. Lämpileikkaus vuotavan syöttöjärjestelmän kaapelista [14, s.10]

6.8 Kuiturunkoverkot

Kuiturunkoverkko on hyvin samankaltainen vuotavan syöttöverkon kanssa, mutta sen siirtokapasiteetti on suurempi. Verkko voidaan toteuttaa niin, että se tarjoaa langatonta palvelua käyttäjille. Self healing eli itsekorjautuvuus -tekniikkaa voidaan soveltaa kuiturunkoverkoissa. Idea perustuu siihen, että signaalin virtausta voidaan kääntää kaapelin perällä, jos kaapeli vahingoittuu. Tämä itsekorjautuvuustekniikka tekee verkosta entistä vakaamman ja suojelee vaurioituneita kaapeleita (kuva 12).

6.9 RFID (Radio Frequency Identification) järjestelmät

RFID-järjestelmiä käytetään laajasti monissa kaupallisissa sovelluksissa. Koska sijaintitieto on erityisen tärkeää hätätilanteissa kaivoksissa, on hyvin luontevaa käyttää RFID-järjestelmää. Jokainen kaivosmies kantaa pienitehoista yksilöityä radiolaitetta, tagia

mukanaan. Tagin avulla ollaan yhteydessä kiinteisiin lähettämiin. Sijaintitieto kaivosmiehestä poimitaan seuraamalla yhteyttä tagin ja kiinteän lähettimen välillä. RFID-järjestelmän kyvyt rajoittuvat siihen, että sillä pystytään seuraamaan vain henkilön viimeistä sijaintia, mutta muuta tietoa ei voida saada. Lisäksi on olemassa esim. kaivosten valvontaan soveltuvia RFID-järjestelmiä. Tagien, eli pienten radiolähettimien teho-vaatimukset ovat yksi heikkous tässä tekniikassa. Joissain tapauksissa tagit toimivat radiotaajuuden voimalla, joka tuotetaan kiinteän lähettimen avulla. Tämä edellyttää suuritehoista lähetintä, mikä rajoittaa viestintää tagin ja lähettimen välillä.

6.10 Tulevaisuuden järjestelmät

Vaikkakin maanalaisilla viestintäverkoilla on pitkä historia, onnettomuuden sattuessa ei ole vielä löytetty täysin luotettavaa menetelmää yhteydenpitoon. Jokaisella edellä esitetyllä järjestelmällä on omat ongelmansa. Siksi ei voida todeta, että vain yhdellä menetelmällä pystyttäisiin ratkaisemaan kaikki ongelmat samanaikaisesti. Langattomat järjestelmät ovat tulevaisuuden ratkaisuja. Niillä on monia hyviä ominaisuuksia, kuten helppo asennettavuus, vakaampi toiminta ongelmatilanteissa sekä liikutettavuus. Tulevaisuuden järjestelmistä voisi mainita Software-Defined Radion (SDR), joka voi toimia millä tahansa taajuudella ja se pystyy käsittelemään erityyppisiä kommunikaatiosignaaleja.

Vielä parempi järjestelmä on tulevaisuudessa ehkä kognitiivinen, tiedollinen radio (Cognitive Radio). Radio tarkkailee ympäristöään ja reagoi heti, jos muutoksia tapahtuu. Sillä on erinomainen kyky sopeutua muuttuviin oloihin. Kognitiivinen radio auttaa vähentämään tehoa lähettimen ja vastaanottimen välillä mukauttamalla lähetysparametreja. Idea perustuu siihen, että sen vastaanotin tunnistaa automaattisesti saatavilla olevat kanavat langattomista taajuuksista ja muuttaa lähettämiseen tai vastaanottamiseen tarvittavia parametreja. Etuna on siis, että se automaattisesti tunnistaa ja hyödyntää käyttämättömät taajuudet. Lisäksi se on yhteensopiva eri verkon standardien kanssa ja optimoi käytettävissä olevan radiotaajuuden spektrin minimoiden muille käyttäjille koituvia häiriöitä [9, s. 125 - 137.]

6.11 Suomen kaivoksissa käytettävät verkkoratkaisut

6.11.1 Talvivaaran avolouhoksen viestintäjärjestelmä

Talvivaarassa käytetään UHF-radioverkkoteknologiaa, koska se on toimintavarma laajallakin alueella. Käytössä on kolme UHF-kanavaa, joiden välityksellä huolehditaan esim. malminkäsittelystä, ajoneuvoliikenteestä sekä pelastustoiminnasta. Tämän lisäksi verkossa on *simplex*-kanavia, missä sekä lähetin että vastaanotin toimivat yhdellä tai samalla taajuudella. Yhteensä käytössä on 60 käsipuhelinta ja 15 ajoneuvopuhelinta. Verkon tukiasema on sijoitettu korkeaan radiomastoon. Tukiaseman laitteisto on sijoitettu maston juuressa olevaan lukittuun laitetilaan. Tukiasema on suunnattu alueelle niin hyvin, että se takaa kaikissa tilanteissa riittävän kuuluvuuden. Tämä viestiverkko on liitetty viranomaisverkkoon (Virve) tehdasalueen valvomoon sijoitetulla erillisellä laitteistolla, jolla analoginen koodi muutetaan digitaaliseksi [10, s.20].

6.11.2 Outokumpu Oy:n langaton verkko 600 metriä maan alla

Suomalainen Outokumpu Oy on edelläkävijä koko maailmassa langattoman verkon käytössä kaivosympäristössä. Vuonna 2008 Outokummun Kemin kaivokseen valmistui vanhan radiopuhelinpohjaisen järjestelmän rinnalle langatonta IP -puheratkaisua käyttävä VoIP – WLAN-verkko. Se hyödyntää koko tunneliverkostossa Ethernet-tekniikkaa sekä maan alla että päällä. VoIP -tekniikan etuina pidetään, että koko kaivoksen toiminnanohjaus saadaan kulkemaan yhdessä tietoverkossa. Se tarvitsee toimiakseen vain yhden päätelaitteen, jonka kautta kulkee puhe ja toiminnan ohjaukseen tarvittava lähetys ja vastaanotto. Tätä ratkaisua on helppo laajentaa myös kaivoksen laajentues- sa tulevaisuudessa. Verkko koostuu 150 IP puhelimesta, ja 160 tukiasemasta.

Puhelimet toimivat samalla tavoin kuin kämmenmikrot, ja niitä voidaan hyödyntää puheliikenteen lisäksi myös tiedon keräämisessä. Menetelmällä hallitaan myös kaivoksen kulunvalvontaa, porakoneiden toimintaa, työohjeiden jakamista ja henkilöstön puhelinluettelo. Louhinnan suunnittelu on myös parantunut, koska porarin, panostajan ja porakoneen välillä pystytään välittämään tieto reaaliaikaisesti. Tämä lisää turvallisuutta koko kaivoksessa. IP -puhelinten avulla saadaan tietoa työntekijöiden ja työkoneiden sijainneista kaivoskäytävillä. Kaivos laajenee jatkuvasti ja VoIP-verkko sen mukana. Tulevaisuuden ratkaisuksi on suunniteltu IP-pohjaisen videokuvan käyttöä eri proses-

seissa, joista työntekijöillä olisi mahdollisuus saada henkilökohtaisilla näytöillä, live-kuvaa eri työvaiheista [11, s.1 - 2.]

7 Mittaukset

Mittauksia suoritettiin maan alla kahdella eri metroasemalla, Ruoholahden ja Hakaniemen asemilla. Ruoholahti on tällä hetkellä metron läntisin asema, ja pääteasema kunnes länsimetro valmistuu. Ruoholahden asema on 15 metriä merenpinnan alla ja syvyyttä maan pinnalle on noin 30 metriä. Hakaniemi on taas 21 metriä merenpinnan alapuolella ja noin 23 metriä maan pinnalta.

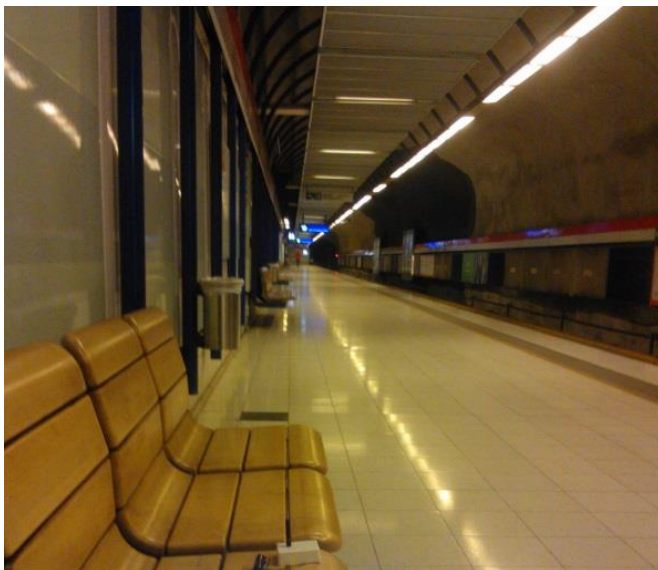
Laitteisto:

Käytössä oli lähetin (Beacon), joka lähettää omaa ID numeroa vastaanottimelle (Mobile-tag). Mobile-tag ottaa ID numeron vastaan ja lähettää sen Access Pointtiin (AP). AP on yhdistetty kannettavaan tietokoneeseen. Tietokoneelta voidaan lukea Termite ohjelman avulla lähettimen antama arvo, eli

1. lähetin lähettää ID numeroa vastaanottimelle
2. access point (AP) vastaanottaa lähetetyn tiedon
3. hex- desimaali arvot luetaan termite ohjelmasta
4. lasketaan oikea dBm arvo hex-arvoista.

Kyseessä on com-15 porttia käyttävä lähetin-vastaanotin yksikkö, joka toimii 115 200 baudilla. Se antaa signaalin ns. purskeina ja lähettää purskepaketin aina kuuden tavun paketteina. RSSI-arvo kertoo tiedon sijainnista, kyseessä on ns. raakaluku dBm arvona.

Ensimmäiseksi lähetin testattiin koulun sähkölaboratoriossa. Lähetin lähettää 1 sekunnin välein purskeita, jotka kestävät 4 millisekuntia. Suurtaajuusoskillaattorilla pystyimme mittaamaan purskeen antaman siniaallon ruudulle.



Kuva 13. Ruoholahden metroaseman laiturin, LOS yhteys

Ensimmäinen mittaus suoritettiin suoralla näköyhteydellä metrolaiturin toisesta päästä, toiseen päähän (kuva 13). Ruoholahden laiturin on n. 110 metriä pitkä. Signaali ei kata koko aluetta, 85 metrin kohdalla yhteys katkeaa.

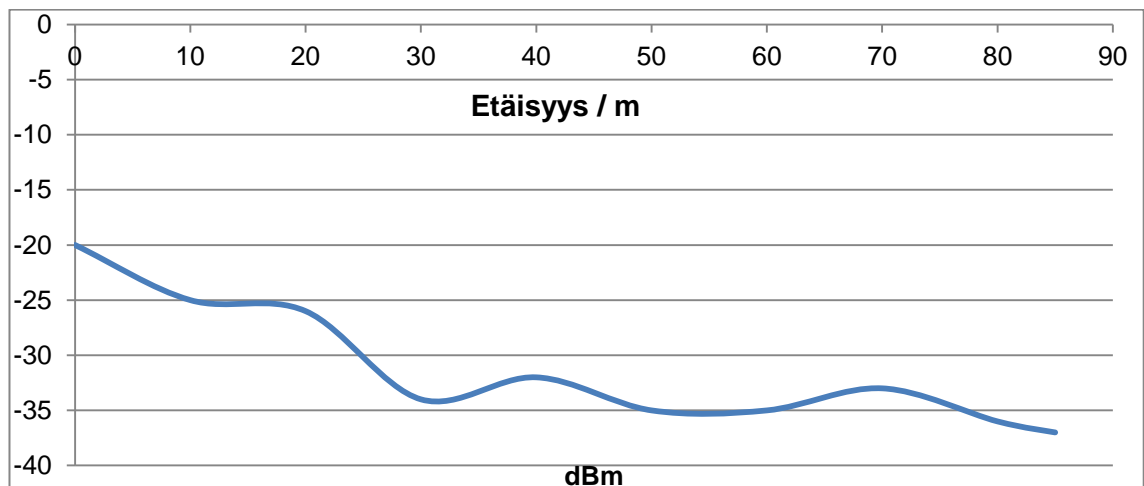
Toinen mittaus suoritetaan epäsuoralla näköyhteydellä. Metrolaiturin puolella välissä on suuaukko ja kulku toiselle laiturille. Lähtien viedään n. 50 metrin päähän ja kävelään 2 metriä kulman taakse. Yhteys lakkaa lähes saman tien, kun näköyhteys katkeaa. Todetaan, että noin 1,5 metrin päässä kulman takana signaali häviää. Huomataan, että laitteilla ei oikeastaan pysty mittaamaan NLOS signaaleja.



Kuva 14. Ruoholahden aseman liukuportaat

Viimeinen mittaus Ruoholahdessa suoritettiin niin, että lähetintä viedään liukuportaissa maan alta ulos ja tutkitaan, riittääkö lähettimessä kantama koko matkan (kuva 14). Matkaa ylös on pystysuoraan noin 30 metriä, ja suora näköyhteys on koko matkan ajan. Kantamaa mitattiin n. 10 metrin välein. Signaali yltää maanpinnalle asti. Tulokset ovat esillä taulukossa (4).

Taulukko 4. Mittaustulokset Ruoholahti, liukuportaat LOS





Kuva 15. Hakaniemen metroaseman mittauspaikka

Hakaniemen aseman mittaus suoritettiin ylätasanteelta, jossa haluttiin mitata signaali toisella puolella olevalle ylätasanteelle. Matkaa kertyy n. 110 metriä. Mittaukset eivät onnistuneet samalla tavalla kuin Ruoholahden asemalla. Jo noin 35 metrin päässä signaali hävisi lähettimen ja vastaanottimen välillä. Asema on täynnä rautapalkkeja, teräskiskoja ja muita metallisia rakenteita, jotka häiritsevät radio-aallon etenemistä. Yhteys katkeaa jo n. 35 metrin kohdalla.

8 Yhteenveto

Suomen kaivosteollisuuden liikevaihto on noin 1,5 miljardia euroa. Metallimalmikaivosten kannattavuudesta kertova käyttöprosentti on nyt lievästi plussalla, joten kaivosteollisuus on elpymään päin maassamme. Kaivosala on erittäin suhdanneherkkä, jonka takia kaivosalan toimijoita on maailmalla melko vähän ja ne ovat isoja.

Suomalaiset kaivokset ovat edelläkävijöitä langattomien järjestelmien käytössä kaivoksissa. Kaivosten viestintäjärjestelmät siirtyvät pikkuhiljaa langattomiksi maanalaisissa kaivoksissa, avolouhoksissa suositaan edelleen maanpäällistä radioverkkoa. UWB -taajuuskaistalla suoritettujen radioaallon etenemismittaukset ovat olleet lupaavia ja niihin perustuvia järjestelmiä käytetäänkin yhä enemmän kaivosten viestintämenetelminä.

VoIP -tekniikan avulla tehdyt tiedonsiirtojärjestelmät lisääntyvät kaivoksissa. Myös erilaiset vapaata kaistaa käyttävät lyhyen kantaman radiotekniikat ottavat jalansijaa maanalaisissa tiedonsiirtojärjestelmissä. Langattomien tekniikoiden avulla on pystytty ja tulevaisuudessa pystytään vielä enemmän parantamaan sekä tiedonsiirron määrää että laatua. Langattomilla järjestelmillä ja henkilöpaikannuksella voidaan nykyään eniten vaikuttaa kaivosten turvallisuuteen.

Tässä työssä tehdyt mittaukset eivät antaneet koko kuvaa radioaallon etenemisestä maanalaisessa tunnelissa. Laitteisto, jolla mittaukset tehtiin, eivät olleet täysin soveltuvia etäisyysmittauksiin. Varsinkin Hakaniemen metroaseman mekaaniset rakenteet häiritsivät signaalia, joten täysin luotettavaa tietoa ei laitteistolla saatu. Signaali katkesi lähes saman tien, kun suoranäkyhyteys katkesi. Mittaukset kuitenkin antoivat osiittaa siitä, miten radioaallot toimivat maanalaisissa olosuhteissa.

Lähteet

- 1 Rissanen Tiina. Suomen kaivostoiminnan toimialakatsaus 2010. (WWW-dokumentti.) <http://www3.tokem.fi/kirjasto/tiedostot/Rissanen_B_8_2011.pdf>. Luettu 11.11.2012.
- 2 Puustinen, Kauko. Suomen suurimmat kaivokset. (WWW-dokumentti.) <<http://www.geologinenseura.fi/geologi-lehti/5-2010/puustinen.pdf>>. Luettu 22.12.2012.
- 3 Väisänen, Siru. Kaivostoiminnasta Suomen uusi valtti. (WWW-dokumentti.) <<http://www.rakennustieto.fi/lehdet/rakennustaito/index/lehti/61LJAwAma.html>> 6/2011. Luettu 11.11.2012.
- 4 Pieni radiopuhelin suurilla pyörillä. (WWW-dokumentti.) Viestimaa Oy, Talvivaara. <http://viestimaa.fi/fi/referenssit/talvivaara/>. Luettu 12.12.2012.
- 5 Salonen, Veli-Pekka. 2006. Käytännön maaperä geologia. 2. painos. Turun Yliopisto.
- 6 Jones, Adrian. 2006. Kivet. WSOY, Hong Kong.
- 7 Taipale, Kalle. 2010. Kivet ja mineraalit Suomen luonnossa. Otava, Keuruu.
- 8 Lehtinen, Nurmi, Rämö. 1998. 3000 vuosi-miljoonaa Suomen kallioperää. Suomen geologinen seura. Gummerus, Jyväskylä.
- 9 Yarkan, Güzelgöz, Arslan, Murphy. 2009. (WWW-dokumentti.) Underground Mine Communications: A Survey. <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=5208737&contentType=Journals+%26+Magazines>>. Luettu 28.01.2013
- 10 Anttila, Sanna. 2008. (WWW-julkaisu.) Talvivaaran kaivoksen sisäinen pelastussuunnitelma. <http://www.talvivaara.com/files/talvivaara/muut%20liitteet/Lupamaaraysten_tarkistus_-_Liite_10_Sisainen_pelastussuunnitelma.pdf>. Luettu 2.2.2013
- 11 600 metriä maan alla Cison avulla. 2008. (WWW-julkaisu.) http://www.cisco.com/web/FI/assets/docs/2008_Cisco_Outokumpu_Kemin_kaivos_taitettu_FINAL.pdf>. Luettu 2.3.2013
- 12 Peltoniemi, M. 1998. Aerogeofysikaaliset menetelmät. Teknillinen korkeakoulu, opetusjulkaisu, 269s.

- 13 Räsänen, Lehto. 2011. Radiotekniikan perusteet. Otatieto, 13. painos. Helsinki.
- 14 Bandyopadhyay L.K., Chaulya, S. K. 2010. Wireless communication in underground mines: RFID-Based Sensor Networking. Springer, London.
- 15 Lindell Ismo, Radioaaltojen eteneminen. 1996. Otatieto, 4. tarkistettu painos. Helsinki.
- 16 Giancoli, D. C. 1998. Physics, Principles with applications, 5th edition.

- 17 Porras Jari, Langaton tietoliikenne. (WWW-dokumentti.) Lappeenranta university of technology. <<http://www2.it.lut.fi/kurssit/08-09/CT30A2600/luennot/CT30A2600%20luento4%20etenemismallit.pdf>>.

- 18 Volos, Anderson, Headley, Buehrer. 2007. (WWW-dokumentti.) Preliminary UWB Measurements in an Underground Limestone Mine. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4411626. Luettu 21.4.2013.

- 19 Hargrave, Ralston, Hainsworth. 2007. (WWW-dokumentti.) Optimizing Wireless LAN for Longwall Coal Mine Automation. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4077195. Luettu 2.5.2013

