

Elias Larsen

# LIIKUTELTAVIEN MURSKAINTEN JA SEULOJEN VÄLISEN RADIOVIESTINNÄN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Yrjö Majanne  
Tammikuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Elias Larsen: Liikuteltavien murskainten ja seulojen välisen radioviestinnän arviointi  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden kandidaatin tutkinto-ohjelma  
Tammikuu 2024

---

Radiotekniikka on kehittynyt merkittävästi 1950-luvulta lähtien. Tämä kehitys on mahdollistanut yhä lyhyempien tiedonsiirtomatkojen toteuttamisen langattomasti. Langaton tiedonsiirto on keskeisessä osassa nykyisissä automaatiojärjestelmissä. Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on arvioida langattomaan tiedonsiirron luotettavuutta kivenmurskausteollisuudessa. Työssä selvitetään mitkä tekijät vaikuttavat radioviestinnän luotettavuuteen ja kuinka luotettavuutta voidaan parantaa kustannustehokkaasti. Työssä käytetyt aineistot koostuivat kirjoista ja vertaisarvioituista artikkeleista, joita haettiin Andor-hakupalvelusta ja Scopus-tietokannasta. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena.

Kivenmurskainten ja seulojen välinen lukitusjärjestelmä on turva-automaatiojärjestelmä, joka mahdollistaa turvallisen ja tehokkaan sorantuotannon, ja on siten keskeinen osa sorantuotantoa. Lukitusjärjestelmässä käytettävän langattoman tiedonsiirron suurin haaste on tiedonsiirron luotettavuus. Tässä työssä käsitellään kolmea tärkeää luotettavuuteen vaikuttavaa tekijää, jotka ovat protokolla, radiolähettimen komponentit ja ulkoiset häiriötekijät. Työssä käsitellään luotettavuuteen vaikuttavien tekijöiden teoriaa ja esitetään suunnitteluehdotuksia järjestelmän suunnittelijan näkökulmasta.

Tässä työssä päätellään, että protokollavalinta voidaan tehdä kahden vaihtoehdon väliltä, jotka ovat ZigBee ja Bluetooth. Tämän kirjallisuuskatsauksen perusteella ZigBee-protokolla osoittautui paremmaksi vaihtoehdoksi. Työn perusteella radiolähettimien keskeisimmät luotettavuuteen vaikuttavat komponentit ovat oskillaattori, tehonvahvistin ja antenni. Jokaisen komponentin kohdalla pohditaan kustannustehokkuuteen vaikuttavia suunnitteluvaihtoehtoja. Kyseisille komponenteille esitetään täsmälliset valintaohjeet yhteenvedossa. Tämän kirjallisuuskatsauksen perusteella merkittävimmät ulkoiset häiriötekijät ovat ilmakehästä aiheutuvat häiriöt, muusta radioliikenteestä aiheutuvat sähkömagneettiset häiriöt ja rakenteellisten esteiden aiheuttamat häiriöt. Sähkömagneettiset häiriöt ja rakenteelliset häiriöt vaikuttavat merkittävästi radioviestinnän luotettavuuteen. Ilmakehän vaikutukset osoittautuivat pieneksi. Yhteenvedossa esitetään myös toimintaohjeita näitä häiriötekijöitä varten, jotta niiden vaikutukset voidaan minimoida.

Avainsanat: Kivenmurskaus, langaton automaatio, radiolähetin, radioaaltojen eteneminen.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Työn tausta .....	1
1.2 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset .....	2
1.3 Tutkimusmetodi.....	2
1.4 Työn rakenne .....	3
2. TOIMINTAYMPÄRISTÖ.....	4
2.1 Liikuteltavat murskaimet ja seulat.....	4
2.2 Turva-automaatio .....	5
2.3 Lukitusjärjestelmä .....	5
3. RADIOVIESTINNÄN LUOTETTAVUUS .....	7
3.1 Protokolla.....	7
3.2 Radiolähetin.....	8
3.2.1 Oskillaattori.....	9
3.2.2 Tehonvahvistin.....	10
3.2.3 Antenni .....	11
3.3 Ulkoiset Vaikutukset Radioviestintään.....	12
3.3.1 Ilmakehä .....	12
3.3.2 Sähkömagneettinen häiriö .....	13
3.3.3 Rakenteellinen häiriö .....	14
4. RADIOVIESTINNÄN SUUNNITTELU .....	16
4.1 Protokollan valinta.....	16
4.2 Sisäisten komponenttien valinta.....	18
4.2.1 Oskillaattorin valinta.....	18
4.2.2 Tehonvahvistimen valinta.....	19
4.2.3 Antennin valinta .....	20
4.3 Ulkoisten häiriöiden hallinta.....	20
4.3.1 Ilmakehän vaikutusten hallinta .....	20
4.3.2 Sähkömagneettisten häiriöiden hallinta.....	21
4.3.3 Rakenteellisten häiriöiden hallinta.....	21
5. YHTEENVETO.....	23
LÄHTEET.....	25

# 1. JOHDANTO

Tässä luvussa perehdytään työn taustaan, tutkimuskysymyksiin, tutkimusmetodiin ja työn rakenteeseen. Alaluvuissa esitellään tarkemmin tutkimuskysymykset ja avataan sitä, miten kirjallisuuskatsaus on suoritettu.

## 1.1 Työn tausta

Radiotekniikka on kehittynyt merkittävästi 1950-luvulta lähtien. Tämän kehityksen seurauksen yhä lyhyempiä tiedonsiirtomatkoja on pystytty toteuttamaan langattomasti radiolähettimien avulla. (Manning 2009, s.1)

1990-luvulta lähtien lyhyen matkan langaton viestintä on yleistynyt merkittävästi (Caro 2014, s.1). Nykyisin langaton tiedonsiirto ei ole enää vain varavaihtoehto, vaan uusi yleinen tapa tiedonsiirtoon, jota ennen tehtiin kaapeleiden avulla (Afifi et al. 2007, s. 1–2). Langattomat järjestelmät ovat yleistyneet, koska komponentit ovat kehittyneet ja digitaalinen modulaatio mahdollistaa yhä luotettavampaa radioviestintää (Bensky 2004, s.2). Tämän kehityksen myötä myös automaatiojärjestelmien tiedonsiirto pyritään toteuttamaan usein langattomasti, etenkin koneiden välillä, jotka liikkuvat, koska langattomalla tiedonsiirrolla voidaan vähentää kaapeleista aiheutuvia hankaluuksia.

Nykyajan radioviestinnästä hyvänä esimerkkinä toimii erilaiset Bluetooth-laitteet. Tämä radioliikenne on korvannut jo suuren osan ihmisten arkipäiväisestä langallisesta tiedonsiirrosta. Radiolähettimeä on ruvettu hyödyntämään yhä useammilla aloilla kuten myös teollisuudessa sekä työmailla. Vaikka radioviestintä helpottaa toimintaa työmaa-alueilla, ei langaton tiedonsiirto ole yhtä luotettavaa kuin langallinen. Koska langaton radioviestintä kuitenkin yleistyy, on syytä pohtia ja analysoida sen luotettavuutta. (Baronti et al. 2007)

Vaikka kehitys kohti langatonta automaatiota on alkanut jo 1990-luvulta, on aihe silti ajankohtainen ja lyhyen matkan radioviestintää tutkitaan edelleen ja tutkijat pyrkivät löytämään yhä parempia ratkaisuja radioviestinnän toteuttamiseen. Artikkelissa Bellalta et al. (2016) pohditaan lyhyen matkan radioliikenteen tulevaisuutta ja siinä todetaankin olevan alalla vielä paljon tehtävää, jotta luotettavaa radioviestintää voidaan hyödyntää elämän joka osa-alueella.

## 1.2 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena on koostaa tutkielma, joka tarjoaa suunnitteluohjeita radioviestinnän luotettavuuden parantamiseksi sekä häiriöiden minimoimiseksi murskainten ja seulojen välisessä viestinnässä. Työn tarkoituksena ei ole luoda täydellistä listausta kaikesta radioliikenteestä, vaan tämä työ on rajattu käsittelemään lyhyen matkan radioviestintää langattoman automaatiojärjestelmän suunnittelijan näkökulmasta. Lukitusjärjestelmä on esimerkki automaatiojärjestelmästä, joka on toteutettu ennen langallisesti ja sen takia langattomaan järjestelmään siirtyminen vaatii radioviestinnän luotettavuuden arviointia. Koska pohjatyö automaatiojärjestelmän toiminnalle on jo tehty, on suurin haaste toteuttaa langaton tiedonsiirto luotettavasti. Tarkoitus on vastata kirjallisuuden perusteella näihin tutkimuskysymyksiin:

- Mitkä tekijät vaikuttavat radioviestinnän luotettavuuteen?
- Miten luotettavuutta parannetaan kustannustehokkaasti?

Radioviestintään liittyy paljon asioita. Radioviestintä voi perustua moneen erilaiseen protokollaan, radiolähetimet koostuvat monista eri komponenteista ja radioaaltojen etenemiseen vaikuttaa myös paljon eri tekijöitä. Tämän takia tämä työ on rajattu käsittelemään tärkeimpiä luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Tarkoitus on löytää tärkeimmät tekijät, jotka liittyvät luotettavuuteen niin radiolähetinten sisäisiä komponenteista kuin myös ulkoisista tekijöistä. Toisen tutkimuskysymyksen näkökulma on myös rajattu koskemaan tärkeimpiä luotettavuuteen vaikuttavia suunnitteluvaihtoehtoja.

## 1.3 Tutkimusmetodi

Tämä kandidaatintyö toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Tutkimuksen aineistona käytettiin pääosin vertaisarvioituja artikkeleita ja kirjoja. Tiedon hankintaan hyödynnettiin Tampereen yliopiston kirjaston hakupalvelua Andoria sekä Scopus-tietokantaa, sillä nämä palvelut tarjosivat monipuolisimman valikoiman tiedonhakuun.

Tärkeimmät hakusanat tiedonhaussa olivat "rf", "WPAN", "propagation", "design" ja "reliability". Tiedon hankinnassa käytettiin hakupäiväkirjaa, joka toimi systemaattisena työkaluna tiedon keräämisessä. Taulukkoon 1 on dokumentoi käytetyt hakulausekkeet ja niiden hakuosumat molemmissa palveluissa.

**Taulukko 1: Hakuosumataulukko.**

Hakulauseke	Andor:	Scopus:
rf OR "radio*" AND design AND reliability AND components	2492	1157
Wireless AND "IEEE 802.11" AND protocol AND industri*	442	150
radio* AND propagation and interference	1370	5590

Aineiston riittävyyden varmistamiseksi lähteiden katsottiin olevan ajantasaisia vuodesta 1950 alkaen. Vaikka radiolähetinten tekniset ominaisuudet ovat kehittyneet vuosituhannen alun jälkeen, nämä lähteet ovat edelleen olennaisia tämän tutkielman kontekstissa. Suurin osa työssä käytetyistä lähteistä on 1990-luvun jälkeen tehtyjä julkaisuja.

Helmenkalastusmenetelmä on hyvä apuväline systemaattisessa tiedon haussa, joka auttaa tuntemaan lisää hakusanoja ja termistöä, sekä auttaa uusien lähteiden löytämistä (Schlosser et al. 2006). Tässä tutkimuksessa hyödynnettiin kyseistä menetelmää. Tutkielman kannalta tärkeimmät lähteet olivat Dobkin (2011), Olexa (2004) ja Aitchison & Free (2022), joiden avulla löytyi useita radiolähetinten suunnitteluun ja luotettavuuteen liittyviä teoksia.

## 1.4 Työn rakenne

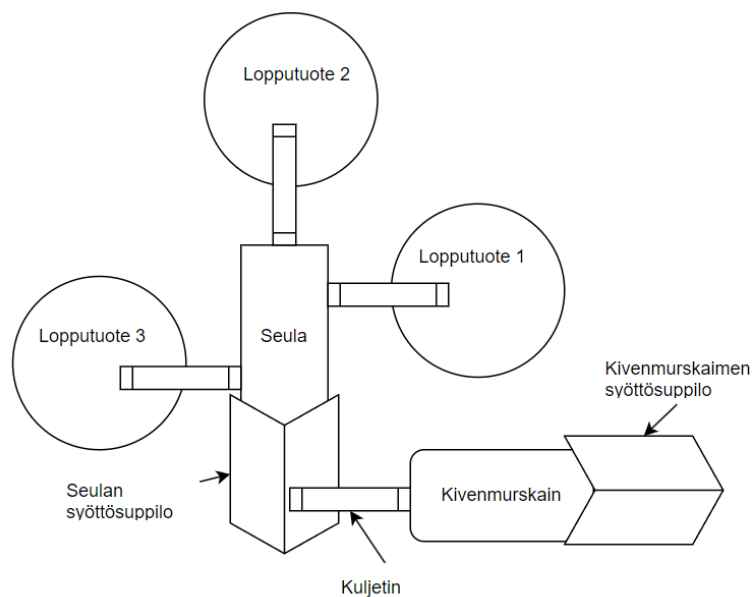
Luvussa 2 perehdytään yksityiskotisemmin kivenmurskauksen toimintaympäristöön ja esitellään työn keskiössä oleva langaton automaatiojärjestelmä. Tämä tutkielma tarkastelee radiolähetinten protokoolaa, sisäisiä komponentteja ja radiaviestintään vaikuttavia ulkoisia häiriötekijöitä yksityiskohtaisemmin 3. luvussa. Sen luvun alaluvuissa esitellään tärkeimmät protokollat, ne osat, jotka ovat luotettavuuden kannalta keskeisimpiä ja ulkoiset häiriölähteet. Luku 4 käsittelee miten luvussa 3 esitettyihin löytöihin voidaan vaikuttaa kustannustehokkaasti. Luvussa 5 esitteellään työn päätelmät.

## 2. TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Tässä luvussa perehdytään tarkemmin kivenmurskauksen ja sorantuotannon toimintaympäristöön sekä perehdytään tarkemmin turva-automaatioon. Lopuksi esitellään tämän työn keskiössä oleva lukitusjärjestelmä.

### 2.1 Liikuteltavat murskaimet ja seulat

Soran tuotannossa liikuteltavia kivenmurskaimia ja seuloja käytetään usein junamuodostelmassa, kuten kuvassa 2.1 on esitetty. Tämä tarkoittaa, että työkoneet asetetaan peräkkäin muodostaen jonon, jossa jokainen kone siirtää käsittelemäänsä murskaa kuljettimien avulla suoraan seuraavan koneen syöttösuppilon. Jotta tämä junajärjestelmä toimisi tehokkaasti ja turvallisesti, työkoneiden on pystyttävä jakamaan tietoa keskenään. Tässä tiedonsiirrossa jonossa edellä oleva työkone kuuntelee heti seuraavana olevan työkoneen tilaa. Toisena oleva kuuntelee kolmatta ja niin edelleen, aina riippuen koneiden määrästä. Tämä tiedonvälitys ei ainoastaan mahdollista nopeampaa reagointia mahdollisiin ongelmiin, vaan myös kasvattaa koko tuotannon tehokkuutta. Vikatilanteessa muiden työkoneiden on hetkellisesti pystyttävä pysäyttämään tuotantonsa, jotta vältetään tilanne, jossa työkoneet hautautuisivat kivimurskan alle.



**Kuva 2.1:** Kahden koneen junamuodostelma soran tuotannossa. Murskain syöttää kiveä seulalle, joka seuloa kiven eri kokoisiksi lopputuotekasoiksi.

Automaatiojärjestelmien väliseen tiedonsiirtoon voidaan käyttää joko langatonta tai langallista yhteyttä. Langallinen järjestelmä on yksinkertainen ja ennustettava, koska se siirtää informaatiota pelkästään virran ja jännitteen avulla kahden paikan välillä (Dobkin 2011 s.1). Kuitenkin työmaalla, jossa työkoneita liikutellaan usein, langallinen järjestelmä ei aina ole käytännöllisin vaihtoehto. Jos koneiden välinen tiedonsiirto toteutettaisiin langallisesti, johdot pitäisi aina irrottaa työkoneista ennen työkoneiden siirtämistä. Tämä on johtanut siihen, että langattomia järjestelmiä pyritään hyödyntämään enemmän. Vaikka langattomat järjestelmät ovat yleistyneet, niiden tiedonsiirron luotettavuus ei ole vielä samalla tasolla kuin langallisten järjestelmien tiedonsiirron luotettavuus (Bellalta et al. 2016; Baronti et al. 2007).

## 2.2 Turva-automaatio

Lukitusjärjestelmä on esimerkki turva-automaatiojärjestelmästä. Turva-automaatiojärjestelmä on koneen omasta automaatiojärjestelmästä erillinen järjestelmä. Sen tehtävä on suojata ihmis- ja materiaalivahingoilta. Kun turva-automaatio havaitsee häiriön, se ohittaa työkoneen oman automaatiojärjestelmän ja saattaa koneen turvalliseen tilaan. Turva-automaation luotettava toiminta on erittäin tärkeää. (Tukes 2021, s.2) Lukitusjärjestelmä on siis automaatiopyramidissa korkeammalla kuin työkoneen oma automaatiojärjestelmä. Automaatiopyramidilla tarkoitetaan automaatiojärjestelmien hierarkiaa, eli tärkeysjärjestystä (Körner et al. 2019). Turva-automaatiojärjestelmä on ylempänä tässä hierarkiassa, kuin työkoneen oma automaatiojärjestelmä, koska sillä on kyky ottaa työkoneen oma automaatiojärjestelmä haltuun. Turva-automaatio ei siis osallistu koneen normaaliin toimintaa, vaan ainoastaan antaa ohjaukomentoja vikatilán sattuessa.

## 2.3 Lukitusjärjestelmä

Junamuodostelmassa koneiden välisestä radioviestinnästä vastaa lukitusjärjestelmä. Se on yksi esimerkki tämänpäiväisestä turva-automaatiojärjestelmästä, jossa tiedonsiirto on ennen tapahtunut kaapeleiden avulla, mutta nykyisin tiedonsiirto halutaan toteuttaa langattomasti radiolähetinten avulla. Jotta asiakkaat vaihtaisivat langallisen lukitusjärjestelmän langattoman, on sen oltava myös kustannustehokas vaihtoehto.

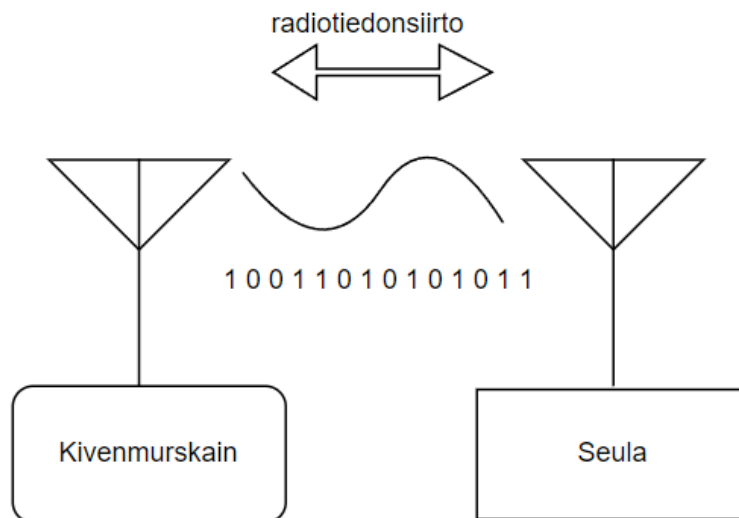
Kivenmurskauksessa käytettävä tyypillinen lukitusjärjestelmä välittää kahden työkoneen välillä kahta parametria, jotka ovat moottorin kierrosluku ja työkoneen syöttöprosenttia.



Murskaimet ja seulat toimivat hydraulisesti, mutta voima tätä hydraulikkaa varten tehdään työkoneen moottorilla, siksi moottorin kierrosluku on tärkeä parametri. Se välittää tiedon siitä mikä on koneen voimantuottokyky kyseisellä hetkellä. Syöttöprosentti-parametri välittää tietoa siitä kuinka paljon kiviainetta työkone käsittelee tietyllä ajanhetkellä.

Näiden parametrien avulla lukitusjärjestelmä pystyy välittämään jännitteen avulla binäärisen sisäänmenoarvon työkoneen automaatiojärjestelmälle. Molemmille parametreille on asetettu suojarajat. Jos parametrien arvot laskevat suojarajan alapuolelle, lukitusjärjestelmä lähettää toiselle työkoneelle signaalin. Tämä signaali voi johtaa joko murskaimen tai seulalaitteen pysäyttämiseen tai koko työkoneen sammuttamiseen, riippuen siitä, miten järjestelmän suunnittelija on määrittänyt koneiden toiminnan vikatilanteessa.

Langallisessa lukitusjärjestelmässä signaalit siirtyvät sähkövirran avulla kaapelia pitkin (Manning 2009, s.1). Langattomassa järjestelmässä tieto siirtyy sinimäisten radioaaltojen avulla. Radioaaltoa moduloidaan, jotta sen välittämä energia vaihtelee, jolloin vastaanotin pystyy tulkitsemaan tiedonsiirtoa binäärisesti. (Olexa 2004, s. 44) Kuvassa 2.2 kuvataan radioviestinnän sinimäisyttä sekä sen binäärisyyttä.



**Kuva 2.2:** Kivenmurskaimen ja seulan välinen radioviestintä.

## 3. RADIOVIESTINNÄN LUOTETTAVUUS

Tämän luvun alaluvussa 3.1 esitellään radioliikenteen protokollaa. Alaluvussa 3.2 perehdytään keskeisiin komponentteihin, jotka muodostavat radiolähettimen perustan. Alaluvussa 3.3 esitellään ulkoisia tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa merkittävästi signaalin etenemiseen. Näiden tekijöiden ymmärtäminen on tärkeää radioviestinnän suunnittelussa, erityisesti kun tavoitteena on taata häiriötön ja luotettava tiedonsiirto eri työmaaolosuhteissa.

### 3.1 Protokolla

Lukitusjärjestelmä toimii lyhyen kantaman alueella, joten radioviestintä voidaan toteuttaa joko langattomassa lähiverkossa tai langattomassa likiverkossa. Ero näiden välillä liittyy siihen, kuinka monta järjestelmää on kytkettynä kyseiseen verkkoon. (Afifi et al. 2007, s.1). Koska lukitusjärjestelmä vaikuttaa vain kahden työkoneen välillä, luokitellaan koneet olemaan langattomassa likiverkossa, eli WPAN:ssa (eng. *Wireless personal area network*). Taajuus 2,4 GHz on vakiintunut standardi lyhyen matkan lähiverkoissa, kuten myös likiverkoissa. Tämä johtuu siitä, että tätä taajuutta on käytetty vuosikymmeniä, minkä ansiosta sitä varten on valmiina useita komponentteja ja protokollia. (Bellalta et al. 2016; Bensky 2004, s.313–331).

Likiverkon radioviestintä on binääristä tiedonsiirtoa, eli radioviestinnässä välitetään joko arvoa 0 tai 1. Tämä binäärisyys saadaan aikaan moduloimalla lähettyä sinimäistä aaltoa, esimerkiksi muuttamalla aallon taajuutta. Vastaanotin pystyy havaitsemaan pienen taajuuseron ja tulkitsemaan signaalia binäärisesti. (Olexa 2004, s. 44) Lyhyen matkan viestinnässä modulaatio voi tapahtua myös vaihesiirron avulla. Modulaatiotapa määräytyy kuitenkin valitun protokollan perusteella. (Krouk & Semenov 2011, s.20–21)

Kaikki 2,4 GHz taajuusalueella toimiva verkkoradioviestintä perustuu IEEE 802 -protokollaperheeseen (Caro 2014, s.1). Erot protokollien välillä tämän protokollaperheen sisällä liittyvät niiden tarjoamaan tiedonsiirtonopeuteen. Kivenmurskauksessa käytettävä lukitusjärjestelmä välittää vain kahta parametriä, joten suurta tiedonsiirtonopeutta ei tarvita ja on järkevää priorisoida tiedonsiirron luotettavuutta.

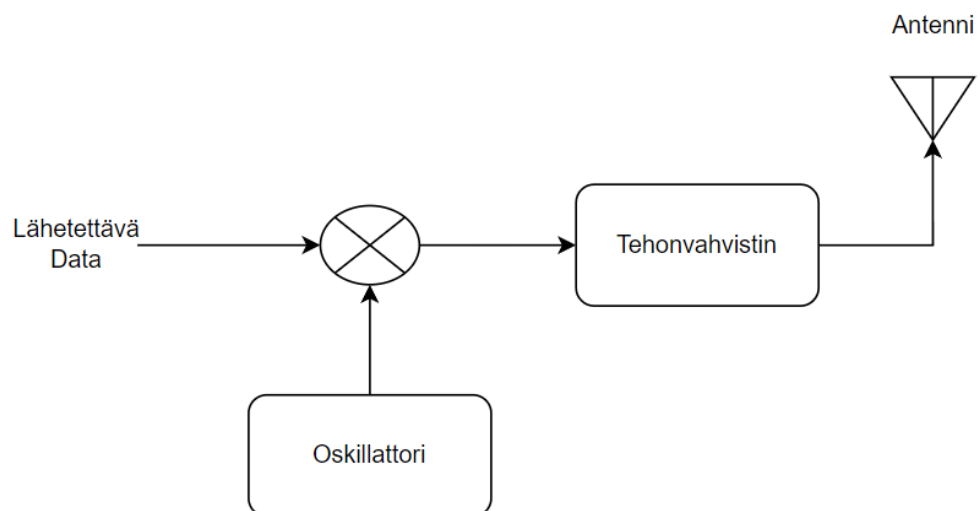
Likiverkon totuttamiseen kaksi suosittua protokollavaihtoehtoa ovat ZigBee ja Bluetooth. Ne ovat suosittuja niiden luotettavuuden ja kustannustehokkuuden takia. (Bensky 2004, s.313–331)

Muodostettua radioverkkoa varten on useita työkaluja, joilla voi tulkita radioviestintää ja lukea mitä informaatiota liikkuu milläkin protokollan tasolla. Nämä protokollan pakettianalysaattorit (eng. *packet analyzer*) ovat keskeisessä radiolähetinten luotettavuuden arvioinnissa. (Lv 2012; Tennina et al. 2016)

Langattomassa digitaalisesti moduloidussa radioviestinnässä merkittävä ominaisuus on taajuushyppely, joka mahdollistaa häiriöttömän viestinnän. Taajuushyppely tarkoittaa signaalin taajuuden satunnaista muuttamista. Tämä muutos on yleensä hyvin pieni, usein vain 1 MHz, mikä on suhteellisen vähäinen verrattuna käytettävän 2,4 GHz, taajuusalueeseen. Erilaisia muutettuja pieniä taajuuksia kutsutaan kanavapaikoiksi. 2,4 GHz radiotaajuusalueella, jonka suositeltu laajuus on 2,4–2,483 GHz, valitaan, mitä kanavia käytetään. Tämä valinta riippuu käytetystä protokollasta. Nämä kanavapaikat ovat kansainvälisesti tunnistettuja ja niitä kuvataan kokonaisluvuilla. Taajuushyppely auttaa vähentämään häiriöitä ja parantaa viestinnän luotettavuutta. (Elahi & Gschwender, 2009; EverythingRF 2022)

### 3.2 Radiolähetin

Radiolähettimen perusrakenteessa on useita keskeisiä fyysisiä komponentteja, joiden optimaalinen suunnittelu ja toiminta ovat ratkaisevassa asemassa luotettavan lähetyksen varmistamisessa. Tärkeimmät radiolähettimen komponentit ovat Oskillaattori, tehonvahvistin ja antenni, kuten kuvassa 3.1 on esitetty. Koska lukitusjärjestelmä vaatii tarkan signaalin, on radiolähettimen komponenttien tarkastelu tärkeää, jotta binäärinen aalto saadaan tuotettua.



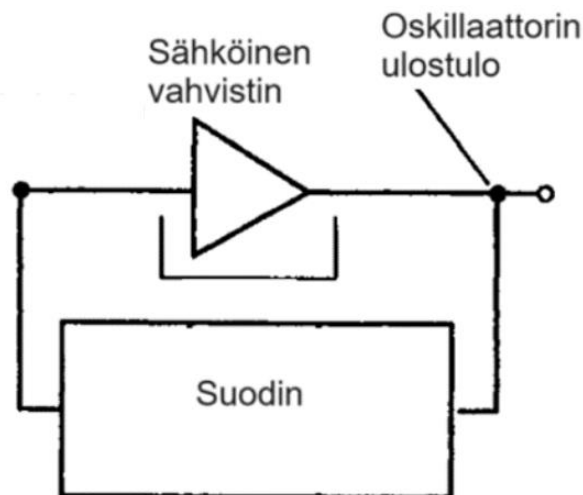
**Kuva 3.1:** Kaavio radiolähettimen tärkeimmistä komponenteista (mukaillen Bensky 2004, s. 5).

### 3.2.1 Oskillaattori

Oskillaattori on tärkeä komponentti radiolähtetimestä, joka tuottaa ja ylläpitää tarkan signaalin taajuuden muutamalla tasajännitellä radiotaajuudeksi (Odyniec 2002, s.1; Farzane 2020). Tarkkaan ylläpidetty taajuus on tärkeää binäärisen tiedonsiirron kannalta, ja oskillaattorin on pystyttävä ylläpitämään taajuutta luotettavasti. (Farzane 2020)

Yleisin oskillaattorimalli on takaisinkytketty oskillaattori. On olemassa muitakin vaihtoehtoja, mutta niitä käytetään vain harvoissa erityistä tarkkuutta vaativissa applikaatioissa (Aitchison & Free 2022) Takaisinkytketty oskillaattori on sähköpiiri, joka koostuu sähköisestä vahvistimesta ja suotimesta. Sähköinen vahvistin on tavallisesti transistori, joka on kytketty takaisinkytkentäpiiriin. Tässä piirissä vahvistimen lähtösignaali palautetaan takaisin sen sisääntuloon taajuusselektiivisen suotimen kautta. (Gottlieb 1997, s.111–112; Carr 2002)

Kun transistorin avulla tuodaan virtaa oskillaattoriin, alkaa se oskilloimaan. Kun tätä signaalia suodatetaan ja vahvistetaan, muodostuu oskillaattorin ulostuloon sinimäinen aalto. (Gottlieb 1997, s.113–114) Kuvassa 3.2 esitellään takaisinkytketyn oskillaattorin kaavakuva.



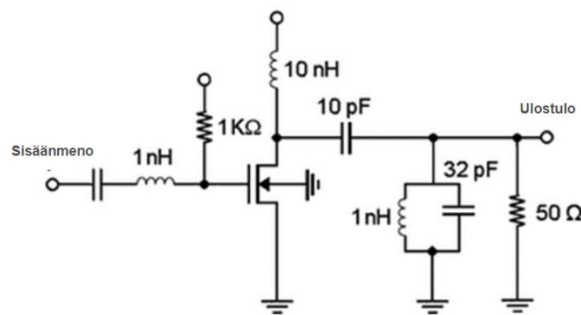
**Kuva 3.2:** Takaisinkytketty oskillaattori (mukaan Gottlieb 1997, s.112).

Transistorin käyttö oskillaattorissa on vakiintunut, joten komponenttisuunnittelija voi vaikuttaa oskillaattorin toimintaa muuttamalla taajuusselektiivistä suodinta. Suodin

voidaan toteuttaa sähköisten komponenttien, kuten kondensaattorin avulla. Vaihtoehtoisesti suodin voidaan myös toteuttaa pietsosähköisen kiteen avulla, joka on yleensä kvartsia. (Cerde 2014, s.124–137; Carr 2002)

### 3.2.2 Tehonvahvistin

Tehonvahvistin on yksi tärkeimmistä komponenteista radiolähtetimestä, koska sen tehokkuus ja luotettavuus vaikuttavat merkittävästi koko radiolähtetimen tehokkuuteen ja luotettavuuteen (Mohammadi & Ghannouchi 2012, s.77). Tehokkuus tarkoittaa käytetyn kokonaistehon ja ulostulevan signaalin tehon suhdetta (Olexa 2004, s.34). Tehonvahvistin on sähköpiiri, joka kasvattaa signaalin tehoa piiriin tulevan tasajännitteen avulla, ennen kuin signaali lähetetään antennilla, jotta signaali saavuttaa vastaanottimen riittävän etäisyyden päässä (Love & Ajluni 2009; Olexa 2004, s.34). Kuvassa 3.3. esitellään tavanomainen tehonvahvistin.



**Kuva 3.3:** Tavanomainen lineaarisen tehonvahvistimen sähköpiiri (mukaillen Yuan 2016, s.20).

Tehonvahvistimen tärkeä parametri on vahvistuksen lineaarisuus (Mohammadi & Ghannouchi 2012, s.77). Tehonvahvistimet voidaan luokitella joko lineaarisiksi tai epälineaariksi. Lineaarinen vahvistus säilyttää parhaiten signaalin muodon, mutta tämä tapahtuu usein tehokkuuden kustannuksella. Kun taas epälineaarinen vahvistus vääristää signaalin muotoa, mutta samalla parantaa signaalin tehoa. (Love & Ajluni 2009; Farzane 2020)

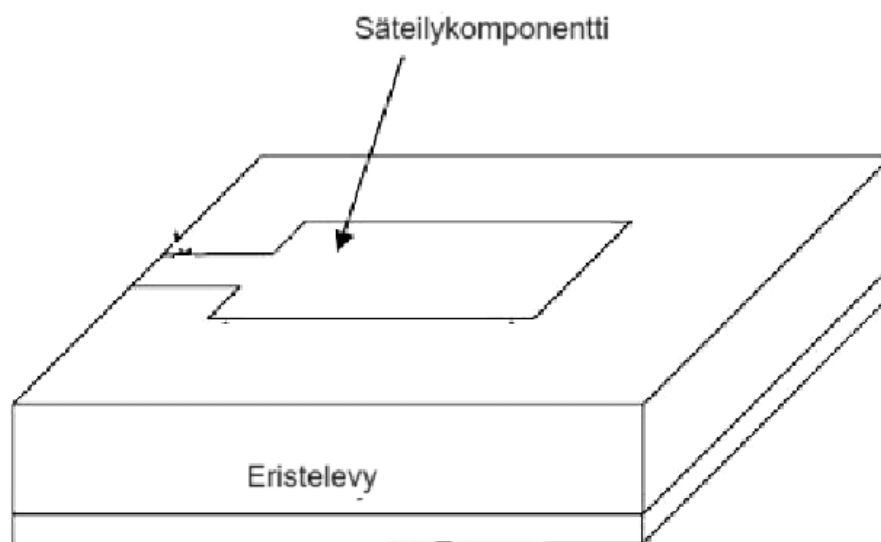
Tehonvahvistimia voidaan myös luokitella A, B ja C kategorioihin, riippuen vahvistimen johtokulmasta (eng. *conduction angle*) (Yuan 2016, s.19). Luokassa A johtokulman suuruus on  $2\pi$ , luokassa B johtokulman suuruus on  $\pi$  ja luokassa C johtokulman suuruus on alle  $\pi$  (Love & Ajluni 2009). Johtokulma tehovahvistimissa viittaa syöttösignaalin syklin osuuteen, jonka aikana tehonvahvistin johtaa tai sallii virran

kulkea. Toisin sanoen se edustaa aikajaksoa, jonka ajan aktiivinen laite on toiminnassa ja johtaa virtaa. Tehonvahvistimen hyötysuhde heikkenee suuremmalla johtokulmalla, mutta samalla se säilyttää signaalin muodon paremmin (Love & Ajluni 2009).

### 3.2.3 Antenni

Antenni muuntaa radiolähettimen tuottamaa sähköenergiaa keskitetyksi sähkömagneettiseksi aaltopinnaksi sekä muuntaa vastaanottamansa säteilyä takaisin jännitteeksi ja sähkövirraksi (Manning 2009, s. 175). Antenni on siis radiolähettimen komponentti, joka vuorovaikuttaa ympäristön kanssa. Sen takia antenni on tärkeä komponentti radiolähetinten luotettavuuden arvioinnissa.

Lukitusjärjestelmässä, kuten muussa lyhyen matkan radioviestinnässä, joka tapahtuu 2,4 GHz taajuusalueella, on suositeltua käyttää pinta-aaltorakenteen antennia, sen yksinkertaisuuden ja kustannustehokkuuden takia (Mutiara et al. 2011). Pinta-aaltorakenteen antennit muodostavat sähkömagneettisia aaltoja eristelevyn pinnalla. Tämän levyn päällä on säteilykomponentti, jonka säteilyä eristetty levy vahvistaa. Levyn on oltava eristetty, jotta säteily ei karkaa levyn pinnalta. (Reddy & Alex 2012) Se, kuinka paljon levy eristää, määrittää antennin luotettavuuden. Eristelevyn eristävyyttä voidaan kasvattaa muuttamalla levyn materiaalia tai kasvattaa levyn paksuutta. (Nascimento 2011, s. 4) Kuvassa 3.4 esitellään yksinkertaistettu kuva pinta-aaltorakenteen antennista.



**Kuva 3.4:** Pinta-aaltorakenteen antenni (mukaillen Mutiara et al. 2011).

### 3.3 Ulkoiset Vaikutukset Radioviestintään

Vaikka radiolähettimien fyysiset komponentit muodostavat perustan radioviestinnän toiminnalle, on tärkeää tiedostaa myös ulkoisten vaikutusten merkitys radioviestinnän luotettavuuteen. Ympäristötekijät, kuten ilmakehän vaikutukset, sähkömagneettiset häiriöt ja rakenteelliset esteet, voivat kaikki vaikuttaa radioviestinnän luotettavuuteen.

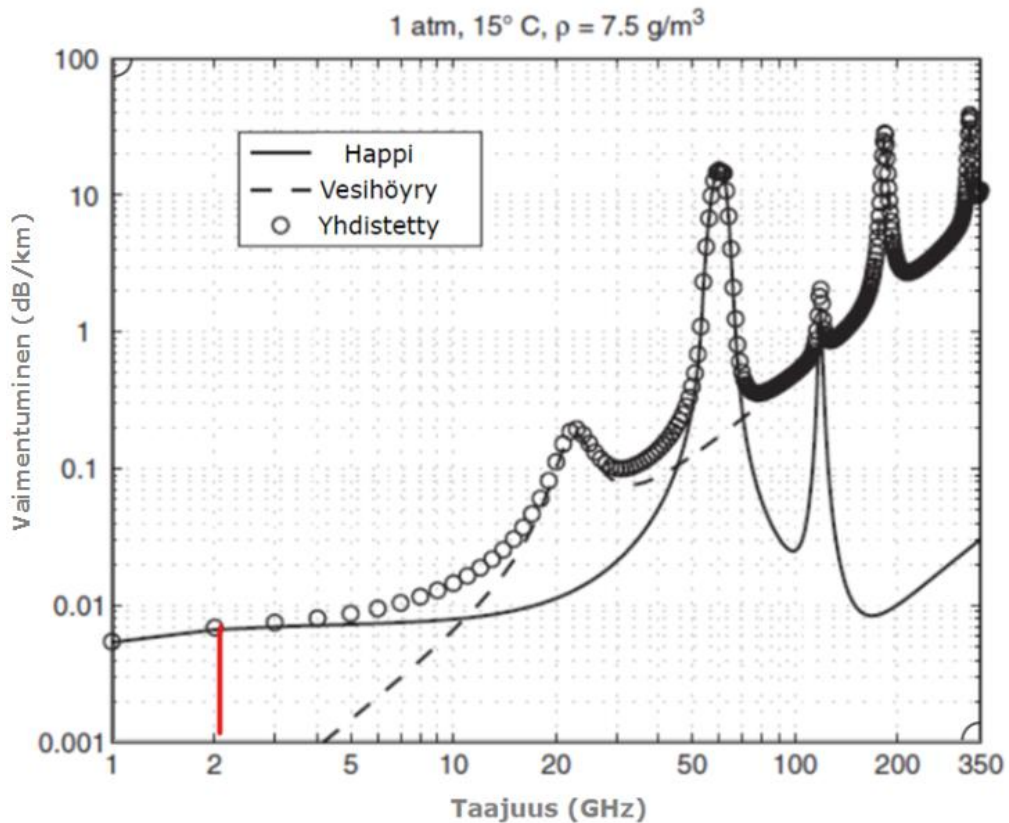
#### 3.3.1 Ilmakehä

Merkittävä häiriö radioviestinnälle on vapaan tilan häviö. Vapaan tilan häviö johtuu signaalienergian leviämisestä suuremmille alueille lähteen etääntyessä. (ITU 2008, s.4; Volakis 2019) Vapaan tilan häviö voidaan laskea ITU:n (2008, s. 4) käsikirjassa olevalla kaavalla (1):

$$L = 32,4 + 20 \log(f) + 20 \log(d), \quad (1)$$

Jossa  $L$  on vapaan tilan häviö,  $f$  on aallon taajuus ja  $d$  on tiedonsiirron etäisyys. Kun kaavaan sijoitetaan lukitusjärjestelmän arvot, eli  $d$  on 5 m ja  $f$  on 2,4 GHz, saadaan vapaan häviön suuruudeksi 54 dB.

Vapaan tilan häviön lisäksi ilmakehän kaasut, kuten happi ja vesihöyry, vaimentavat korkea taajuuksissa radioaaltoja, koska kaasujen molekyylit resonoivat kyseisellä taajuusalueella (Volakis 2019). Lukitusjärjestelmän taajuusalueella, eli 2,4 GHz, vaimentuminen tavanomaisissa ilmasto-olosuhteissa 0,008 dB/Km kuten Volakis (2019) kirjassaan esittää. Kuvassa 3.5. on esitetty radioaallon vaimentuminen eri taajuuksilla.



**Kuva 3.5:** Radioaallon vaimentuminen merenpinnan tasolla. Suoralla pystyviivalla on merkitty lukitusjärjestelmän taajuusalue (mukaillen Volakis 2019).

Etäisyydet koneiden välillä on n. 5 m, eli ilmakehän kaasut eivät vaikuta merkittävästi radiolähetinten luotettavuuteen. Lukitusjärjestelmää suunniteltaessa ei siis tarvitse huomioida ilmakehän vaikutusta, muuten kuin huomioimalla vapaan tilan häviö. Kosteudelta ja pölyltä ja on kuitenkin suojauduttava, koska ne vaikuttavat negatiivisesti radiolähetinten komponenttien luotettavuuteen.

### 3.3.2 Sähkömagneettinen häiriö

Työmaalla voi olla käytössä useita radiolähettimiä, jotka toimivat samalla taajuusalueella. Tästä seuraa usein sähkömagneettisia häiriöitä, joita tulee huomioida radioliikenteen suunnittelussa. Sähkömagneettinen häiriö voi johtua monista eri syistä. Kirjassaan Wyatt ja Gruber (2015, s.4–9) esittelevät radiolähettimien luotettavuuden kannalta tärkeimmät häiriötyypit:

- Taajuushäiriöt: Jos useat radiolähettimet käyttävät samaa tai lähekkäisiä taajuusalueita, ne voivat aiheuttaa taajuushäiriöitä toisilleen. Tämä voi johtaa



signaalin heikkenemiseen, tietojen menetykseen tai kokonaan häiriintyneeseen viestintään.

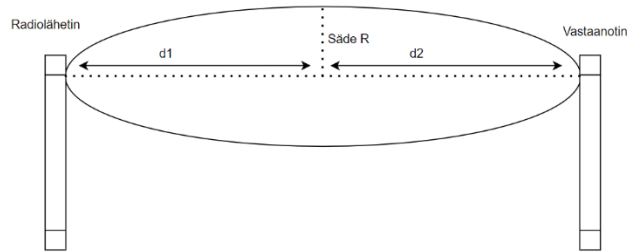
- Ylikuormitus: Liiallinen radioliikenne samalla taajuusalueella voi aiheuttaa ylikuormitusta, mikä voi hidastaa tai häiritä tärkeää viestintää, kuten lukitusjärjestelmän toimintaa. Ylikuormitus voi vaikuttaa signaalin laatuun ja reagointi-aikaan.
- Kanavahäiriöt: Jos käytössä oleva radiotaajuusalue on jaettu useisiin kanaviin, eri lähetimet voivat silti aiheuttaa häiriöitä toisilleen, jos niiden käyttämät kanavat ovat liian lähellä toisiaan.

Häiriön suuruuden määrittämisessä käytetään termiä  $C/N$  (eng. *carrier-to-noise-ratio*). Tämä tarkoittaa lähetetyn signaalin tehon ja muun radioviestinnän tehon suhdetta. Kaikki yllä luetellut häiriötyypit voidaan summata  $C/N$ -suhteen nimittäjä termiin, eli muun radioviestinnän tehoon ja määrittää kuinka paljon häiriötä ympäristöstä syntyy (Elbert 2016, s.56–57). Luotettavuuden kannalta lyhyen matkan radiotiedonsiirron hyväksyttävä alarajan  $C/N$ -suhde on lähteitten mukaan n. 16–20 dB, koska tällöin yhteys radiolähtimen ja vastaanottimen välillä on toimiva (Cisco 2023; Elbert 2016, s.57–60). Ciscon ehdottamaa riittävää  $C/N$ -suhdetta, eli 20 dB, voidaan pitää luotettavampana alarajana, heidän vuosikymmenten ajan kerrytetyn radiolähtimiin liittyvän kokemuksen perusteella.

### 3.3.3 Rakenteellinen häiriö

Fyysiset esteet, kuten seinät, rakennukset ja maastonmuodot, voivat heikentää signaalin kulkua ja aiheuttaa heikkoa yhteyttä (Olexa 2004, s.69–71). Radiolähtinjärjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon nämä esteet, jotta voidaan taata luotettava tiedonsiirto.

Radioaallon etenemisen arvioinnissa käytetään termiä Fresnel-alue (eng. *Fresnel zone*). Tämä alue on ellipsin muotoinen komiolotteinen alue, jonka sisällä olevat rakenteelliset esteet vaikuttavat radioviestinnän luotettavuuteen. Kuvassa 3.6 havainnollistetaan Fresnel-alue. Fresnel-alueen säteeseen  $R$  vaikuttaa lähetetyn radiosignaalin aallonpituus ja välimatka radioviestinnän välillä. (Friesen 2021, s.50; Olexa 2004, s.69–71)



**Kuva 3.6:** Fresnel-alue (mukaillen Friesen 2021, s.50).

Fresnel-alueen säde voidaan laskea Friesen (2021, s.52) esittelemällä kaavalla (2):

$$R = \left\{ \frac{c}{f} \left[ \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right] \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

Jossa  $R$  on Fresnel-alueen säde,  $f$  on taajuus,  $d_1$  ja  $d_2$  ovat etäisyydet laskettavan säteen suhteen, kuten kuvassa 3.6 on esitetty. Kun kaavaan sijoitetaan lukitusjärjestelmän arvot, eli etäisyys  $d_1$  ja  $d_2$  ovat molemmat 2,5 m ja taajuus  $f$  on 2,4 GHz, saadaan Fresnel-alueen säde suurimmillaan olevan n. 0,40 m.

Fresnel-alueen ollessa ellipsinmuotoinen, rakenteiden sijoittaminen lähemmäs radiolähetintä on mahdollista, kun taas keskellä aluetta on vähemmän vapaata tilaa, johtuen siellä suuremmasta Fresnel-alueeseen säteestä. Metallirakenteet, kuten taulukossa 3 havaitaan, voivat haitata radioliikennettä. Koska liikuteltavat murskaimet ja seulat sisältävät runsaasti metallia, radiolähetinten tarkempi sijoittaminen vaatii harkintaa.

**Taulukko 3:** Yleisten rakennusmateriaalien tavanomaiset vaimentumisominaisuudet desibeleinä ilmoitettuna (mukaillen Olexa 2004, s.75).

Metalliovi:	6–10 dB.
Betoniseinä:	6–15 dB.
Kipsilevy:	3–5 dB.
Ikkuna:	3 dB.

## 4. RADIOVIESTINNÄN SUUNNITTELU

Tässä luvussa esitellään ratkaisuja edellisessä luvussa löydettyihin luotettavuus näkökulmiin. Alaluvussa 4.1 perehdytään protokollavalintaan. Alaluvussa 4.2 esitellään komponentteihin vaikuttavat valintaratkaisut, jotka muodostavat luotettavan radiolähettimen perustan. Luvussa 4.3 esitellään ratkaisuja, jotka voivat parantaa signaalin etenemisen luotettavuutta.

### 4.1 Protokollan valinta

Zigbee- ja Bluetooth -protokollat eroavat toisistaan monella tapaa, mutta suurin ero on niiden tiedonsiirron nopeus. Bluetooth on huomattavasti yleisempi protokolla, joten sen käyttäminen automaatiojärjestelmissä on haastavaa, muista Bluetooth-lähtetimestä aiheutuvien häiriöiden takia (Bellalta et al. 2016). Bluetoothin tarjoama suurempi tiedonsiirtonopeus ei ole tarpeellista lukitusjärjestelmässä, jossa välitetään vain kahta parametria. ZigBeen käyttö on näistä vaihtoehdoista suositeltavampaa. Kuten Bensky (2004, s. 330) ja Wang et al. (2007, s.32) esittää, on ZigBee hyvä vaihtoehto langattomiin automaatiojärjestelmiin.

Zigbeeen käyttö on hyvä vaihtoehto lukitusjärjestelmälle, koska lukitusjärjestelmä lähettää ja kuuntelee dataa. Kyseiseen tarkoitukseen ZigBee on hyvä, juuri sen tarjoaman luotettavuuden takia (Baronti et al. 2007). Lukitusjärjestelmä toimii kahden koneen välillä, mutta ZigBeen toinen hyvä ominaisuus, eli sen kyky luoda verkkoyhteyksiä monien radiolähtetimiä välillä, mahdollistaisi tulevaisuudessa myös kaikkien koneiden liittämisen yhteiseen verkkoon. (Baronti et al. 2007)

Bluetooth ja ZigBee käyttävät eri modulaatiotekniikoita. Bluetooth käyttää taajuusmodulaatiota ja ZigBee käyttää vaihesiirtomodulaatiota. Alla olevassa taulukossa 4.1. esitellään Bluetoothin ja ZigBeen eroja lukitusjärjestelmän suunnittelun näkökulmasta.

**Taulukko 4.1:** Bluetoothin ja ZigBeen merkittävimmät erot (Mukailen Bensky 2004, s.324).

	Bluetooth	ZigBee
Tiedonsiirtonopeus:	1 Mb/s.	250 kb/s.
Modulaatio:	Taajuusmodulaatio GFSK (eng. <i>Gaussian frequency shifting key</i> ).	Vaihesiirtomodulaatio BPSK (eng. <i>Binary Phase shift key</i> ).

Bluetoothin yksi haitta on se, että jos Bluetooth-protokollaa käyttää, pitää koko viestintä toteuttaa sen standardin määrittelemällä tavalla, eli järjestelmän suunnittelijalle ei jää mahdollisuuksia vaikuttaa järjestelmän tiedonsiirto-ominaisuuksiin (Bensky 2004, s.315). Se on suuri syy miksi teolliset automaatiojärjestelmät käyttävät usein ZigBeetä kun taas kuluttajahyödykkeet perustuvat usein Bluetooth-protokollaan. Näin ollen lukitusjärjestelmän suunnittelu kannattaa lähteä rakentamaan ZigBee-pohjaisesti. ZigBee-protokolla perustuu IEEE 802.15.4 standardiin (Baronti et al. 2007; Wang et al. 2014, s.32–33).

Kun ZigBee-yhteys on muodostettu, voidaan lukitusjärjestelmän testauksen aikana tarkistaa välitetyn informaation oikeellisuus pakettianalysointilla. Eräs yleinen pakettianalysointilaite on Texas Instrumentsin valmistama SmartRF. Tämä on esimerkki tuotteesta, joka pystyy lukemaan lähetettyjä datapaketteja. SmartRF:ssä, kuten muissa vastaavissa tuotteissa, on intuitiivinen käyttöliittymä, josta näkee, onko välitetty radioviesti oikeaa, ilman, että testaajalla on suurta tietämystä itse ZigBee-protokollasta tai sen toiminnasta. (Lv 2012; Tennina et al. 2016)

Zigbee, kuten useimmat langattomat protokollat, käyttää tarkistussummaa (eng. *checksum*) varmistaakseen viestin eheyden ja vähentääkseen virheiden mahdollisuutta tiedonsiirrossa. ZigBeen tarkistussumma perustuu CRC (eng. *Cyclic Redundancy Check*) menetelmään. (Ahmad et al. 2009) Tällainen tarkistussumma auttaa havaitsemaan mahdollisia tiedonsiirtovirheitä ja varmistamaan, että langattomassa viestinnässä välitetyt signaalit ovat eheitä ja luotettavia. CRC ei kuitenkaan korjaa virheitä, mutta se kykenee havaitsemaan ne. Lukitusjärjestelmän suunnittelijan tulee hyödyntää tarkistussummaa välitetyn signaalin luotettavuuden varmistamiseksi.

Koska ZigBeen käyttämä 2,4 GHz taajuusalue on yleisesti käytössä myös muissa protokollissa, on taajuushyppelyä hyödynnettävä ja valittava järkevät kanavapaikat. ZigBee käyttää 2,4 GHz taajuusalueen kanavapaikkoja 11–26. Wi-Fi on yleinen

protokolla 2,4 GHz taajuusalueella ja sen käyttämiä kanavapaikkoja on vältettävä, jotta lukitusjärjestelmän radioviestintään ei kohdistu häiriöitä. ZigBeen vapaimmat kanavapaikat ovat 15, 20, 25 ja 26, koska näillä kanavapaikoilla ei tapahdu muuta merkittävää radioviestintää. (EverytingRF 2022)

## **4.2 Sisäisten komponenttien valinta**

Lukitusjärjestelmän suunnittelija ei yleensä itse suunnittele radiolähtetimen komponentteja, mutta silti suunnittelijan on oltava tietoinen kustannustehokkaimmista komponenttivaihtoehdoista. Radiolähtetmissä on tehtävä valintoja kustannustehokkuuden ja luotettavuuden välillä. Valinnat luotettavuuden ja kustannustehokkuuden välillä vaativat tarkempaa pohdintaa applikaation mukaan. Lukitusjärjestelmää ajatellen on molemmat asiat tärkeitä, mutta luotettavuutta on priorisoitava.

### **4.2.1 Oskillaattorin valinta**

Kiteiset taajuuspohjaiset suodattimet tunnetaan niiden tarkkuudestaan taajuuden ylläpidossa. Kuitenkin niiden korkeammat valmistus- ja integrointikustannukset voivat olla haaste suurissa tuotantomäärissä (Aitchison & Free 2022). Toisaalta sähkökomponenteista, kuten kondensaattoreista, koostuvat suodattimet ovat kustannustehokkaampia ja tarjoavat laajemman taajuuskattavuuden. Kuitenkin niiden taajuuden epätarkkuus ja herkkyys ulkoisille häiriöille voivat vaikuttaa suorituskykyyn. (Cerde 2014, s.119–137)

Cerde (2014, s.120) esittää kondensaattoripohjaisen suotimen olevan epätarkka pitkille matkoille, mutta sitä käytetään paljon lyhyiden matkojen radioviestintään, kuten esimerkiksi auton langattomissa avaimissa. Koska kondensaattoripohjainen suodin on kustannustehokas ja riittävän hyvä lyhyelle tiedonsiirtoetäisyydelle, on lukitusjärjestelmää suunnitellessa suositeltavaa valita radiolähtetin, jossa oskillaattori on toteutettu kondensaattoripohjaisesti.

Kidepohjaiset suotimet ovat myös hyvä vaihtoehto niiden tuoman luotettavuuden takia. Jos kondensaattoripohjaisella oskillaattorilla ei päästä riittävään luotettavuuteen, yksi tapa lisätä luotettavuutta on muuttaa oskillaattori kidepohjaiseksi. Taulukossa 4.2. esitellään Kidepohjaisen ja kondensaattoripohjaisen suotimen keskeiset edut.

**Taulukko 4.2:** Kidepohjaisen oskillaattorin sekä kondensaattoripohjaisen oskillaattorin tuomat edut.

Suodinmalli	Edut
Kide pohjainen suodin:	Ylläpitää signaalin muodon paremmin, joka takaa luotettavamman tiedonsiirron.
Kondensaattoripohjainen suodin:	Kustannustehokas vaihtoehto lyhyille radioviestintä matkoille.

## 4.2.2 Tehonvahvistimen valinta

Mitä lineaarisempi tehonvahvistin on, sitä luotettavampi sen vahvistama signaali on (Farzane 2020). Koska tehokkuus ei ole merkittävä tekijä lyhyen matkan radioviestinnässä, lineaarinen tehonvahvistin on järkevä ratkaisu. Love ja Ajluni (2009) esittävät, että tehonvahvistinta suunniteltaessa sen lineaarisuus on aina tärkeämpää kuin sen tehokkuus.

Toinen tehovahvistimeen vaikuttava parametri, johtokulma, pitää suunnitellessa ottaa huomioon. Jotta radioviestintä on luotettavaa, on vahvistettavan signaalin muoto tärkeä säilyttää mahdollisimman hyvin. Suuri johtokulma saavutetaan A ja B luokissa, mikä tarkoittaa parhainta kykyä säilyttää signaalin muoto, joten digitaalisessa radioviestinnässä on järkevä suunnitella tehonvahvistin toimimaan näiden luokkien välillä (Love & Ajluni 2009). B-luokan tehonvahvistin pystyy sietämään korkeampia lämpötiloja, joka tarkoittaa luotettavampaa signaalin vahvistusta (Chuanzhao & Yuan 2007). Koska B-luokan tehonvahvistimessa on enemmän komponentteja, tekee se myös siitä kalliimman valmistaa (Yuan 2009). A luokan tehonvahvistin on hieman lineaarisempi, joten se ei saavuta samaa tehokkuutta, kuin luokan B tehonvahvistin (Olexa 2004, s. 35). Taulukossa 4.3 kuvataan A ja B tehonvahvistinten keskeisimmät edut.

**Taulukko 4.3:** Luokan A ja B tehonvahvistimien tuomat edut.

Malli	edut
A-luokka:	Lineaarisempi ja kustannustehokkaampi vaihtoehto.

B-luokka:	Korkeampi lämmönsietokyky, joka parantaa radiolähtetimen luotettavuutta. Luokan B tehovahvistin on myös hieman tehokkaampi kuin luokan A tehovahvistin.
-----------	---

Tehovahvistimen valinta on tärkeä tekijä radiolähtetimen luotettavuudelle. Lineaarisuus ja suuri johtokulma vaikuttavat positiivisesti signaalin laatuun ja luotettavuuteen (Farzane 2020; Love & Ajluni 2009). Lukitusjärjestelmää suunnitellessa on järkevä valita käytettäväksi luokan A tai B lineaarisia tehovahvistimia, jotka molemmat tarjoavat hyvän kompromissin vahvistuksen lineaarisuuden ja tehokkuuden välillä.

### 4.2.3 Antennin valinta

Alan normaalin pinta-aaltorakeena antennin luotettavuuteen voidaan vaikuttaa muuttamalla eristelevyn materiaalia ja paksuutta. Kirjassaan Nascimento (2011, s. 4) esittää, että ero edullisen ja kalliin materiaalin välillä on pieni, kun taas materiaalin paksuuden kasvattaminen lisää huomattavasti enemmän antennin luotettavuutta. Toisaalta lukitusjärjestelmän kaltaisessa radiolähtetäinapplikaatiossa myös systeemin pieni koko on tavoiteltavaa.

Nascimento (2011, s. 4) esittää esimerkin, missä antennissa käytetään alan normaalia ja edullista materiaalia, eli FR-4-epoksia, ja joka on 6,5 mm paksu. Tämä eristelevy saavuttaa 70 % luotettavuuden verrattuna kalliiseen yhtä paksuun keraamiseen materiaaliin. Tämä on hyvä alkupiste, josta lähteä valitsemaan lukitusjärjestelmän pinta-aaltorakenneantennia. Jos viestinnän luotettavuudessa ilmenee ongelmia, on hyvä pohtia eristelevyn paksuntamista. Eristelevyn materiaalia tulee muuttaa vain, jos tila antennia varten on rajallinen.

## 4.3 Ulkoisten häiriöiden hallinta

Lukitusjärjestelmän suunnittelijan tulee huomioida ulkoisten häiriöiden vaikutukset järjestelmää suunniteltaessa. On myös tärkeä tiedostaa, miten ulkoisia häiriöitä voidaan paikallistaa ja ehkäistä mahdollisimman tehokkaasti, jotta komponenttivalintoja voidaan tehdä kustannustehokkaasti.

### 4.3.1 Ilmakehän vaikutusten hallinta

Vaikka ilmakehän vaikutus radioaalloille lyhyen matkan radioliikenteessä on yleisesti vähäinen, kosteuden ja pölyn vaikutukset on minimoitava, sillä ne voivat negatiivisesti

vaikuttaa radiolähetinten luotettavuuteen (Olexa 2004, s.183). Esimerkiksi kivenmurskaimissa ja seuloissa, erilaiset laitteet sijoitetaan usein huoltolaatikkoon. Tällainen suljettu tila tarjoaa suojaa kosteudelta ja pölyltä, mikä edistää radiolähetinten toimintaa, joka puolestaan kasvattaa radioviestinnän luotettavuutta. Säännöllinen tarkastus ja huolto varmistavat, että laitteet säilyvät toimintakunnossa kaikissa olosuhteissa.

### 4.3.2 Sähkömagneettisten häiriöiden hallinta

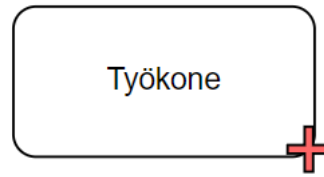
C/N-suhteen ylläpito suositelluissa rajoissa on välttämätöntä, jotta varmistetaan häiriötön viestintä. C/N-suhdetta voidaan mitata edullisilla kädessä pidettävillä radiovastaanottimilla, jotka mittaavat ympäristön radioviestintätehoa (Wyatt & Gruber 2015, s.44–45; Olexa 2004, s. 120–121). Kun suunniteltavan lukitusjärjestelmän radioviestintäteho on tiedossa, voidaan mitata työmaa-alueetta. Jos C/N-suhde pysyy tavoitearvossaan, eli vähintään 20 dB, voidaan todeta radioliikenteen olevan luotettavaa radiohäiriöiden osalta.

Jos tämä ei toteudu, pitää työmaan radioliikennettä suunnitella uudelleen. Yksi tapa on lisätä välimatkaa muihin työmaa-alueen radiolähtimiin. Lukitusjärjestelmää ajatellen, muita radioita ei tulisi olla junamuodostelman välittömässä läheisyydessä. Toisaalta lukitusjärjestelmän suunnittelijan on otettava huomioon, että kaikki työmaa-alueet ovat erilaisia, joten lukitusjärjestelmä on suunniteltava toimimaan tavanomaisissa työmaaolosuhteissa. Tyypillisellä työmaa-alueella käyminen ja testaaminen on tärkeä vaihe lukitusjärjestelmän suunnittelussa, jotta järjestelmä toimii riittävän hyvin eri työmailla.

### 4.3.3 Rakenteellisten häiriöiden hallinta

Vaikka radiolähtimet on suojattava kosteudelta ja liialliselta pölyltä, se miten radiolähtimiä suojataan, on tärkeää pohtia, jotta signaalin etenemisen aikana ei aiheudu häiriöitä (Olexa 2004, s.183). Kun tutkimme Fresnel-alueen päätyjä ja laskemme alueen päissä olevan säteen suuruuden sijoittamalla kaavaan (2) arvon  $d_1$  on 0,25 m ja arvon  $d_2$  on 4,75 m, säteen arvoksi saadaan n. 0,17 m. Koska Fresnel-alueen koko pienenee merkittävästi Fresnel-alueen päissä, on mahdollista sijoittaa antenniä työkoneiden reunoille. Tällöin työkoneiden metallirakenteet eivät häiritse radioviestintää, koska ne ovat Fresnel-alueen ulkopuolella. Antenni tulee siis sijoittaa työkoneen fyysisiin ulkoreunoihin. Paras paikka asettaa antenni, on työkoneen kulmat, kuten kuvassa 4 on esitetty.





**Kuva 4:** Antennin suositeltava paikka työkoneessa.

Vaikka radionviestintään liittyvät muut osat ovat suositeltavaa asettaa huoltolaatikkoon, ei antennia voi sinne sijoittaa, metallista aiheutuvan häiriön takia (Olexa 2004, s.75). Siksi antenni tulee kiinnittää huoltolaatikon ulkopuolelle.

## 5. YHTEENVETO

Lukitusjärjestelmän suunnittelun näkökulmasta protokollavalinta, komponenttien valinta, sekä työmaa-alueen tunteminen ovat avainasemassa radioviestinnän suunnittelussa. Protokollan valinta määrittä paljon radiolähtetimen rakennetta, ja se on tärkeä valita ensin ja huolellisesti, jotta radioviestintä on luotettavaa ja kustannustehokasta. ZigBee-protokolla on järkevä valinta lukitusjärjestelmälle sen tuoman luotettavuuden perusteella. Kun lukitusjärjestelmä on suunniteltu, on suositeltavaa tarkistaa radioviestinnän oikea toiminta pakettianalysaattorilla. Tarkastussummat ovat hyödyllisiä apuvälineitä viestinnän luotettavuuden tarkastamiseksi, ja niitä tulee hyödyntää järjestelmää suunniteltaessa. ZigBeen suositellaan hyödyntämään taajuushyppelyä kanavapaikoilla 15, 20, 25 ja 26, koska näillä kanavilla esiintyy vähäistä muuta radioliikennettä, mikä parantaa viestinnän luotettavuutta.

Kustannustehokkuus saavutetaan tekemällä oikeita kompromisseja komponenttivalinnoissa. Taulukkoon 5.1 on koottu tämän tutkimuksen perusteella kerätyt suositellut komponenttivalinnat.

**Taulukko 5.1:** Radiolähtetimen komponenttisuositukset.

Oskillaattori:	Lineaarinen oskillaattori, joka sisältää kondensaattoripohjaisen taajuusselektiivisen suotimen.
Tehonvahvistin:	Lineaarinen A- tai B-luokan tehonvahvistin.
Antenni:	Pinta-aaltorakenne antenni, jonka eristelevy on FR-4 materiaalia ja jonka paksuus on 6,5 mm.

Työmaa alueella tulee huolehtia radioiden oikeasta sijoittelusta, koska sillä pystymään parantamaan järjestelmän luotettavuutta. Työmaa-alueen häiriölähteet on myös tunnettava. Taulukossa 5.2 on esitelty toimintaohjeet ja suositukset ulkoisten häiriöiden minimoimiseksi.

**Taulukko 5.2:** Ulkoisten häiriöt ja niiltä suojautuminen.

Ilmakehän vaikutukset:	Ei merkittävää vaikutusta radioaaltojen etenemiseen. Radiot tulee suojata pölyltä ja kosteudelta.
Sähkömagneettiset häiriöt:	C/N-suhde tulee olla yli 20 dB.
Rakenteelliset häiriöt:	Radioita ei tule sijoittaa työkoneen keskelle tai sisälle, vaan ulkopinnoille. Radiolähetin tulee sijoittaa koneen huoltolaatikkoon, mutta antenni tulee sijoittaa sen ulkopuolelle.

Työ onnistui hyvin ja kirjallisuuden perusteella pystyttiin vastaamaan työn tutkimuskysymyksiin. Vaikka työ onnistui, on tärkeää tiedostaa tämän työn rajoitukset. Tässä tutkimuksessa perehdyttiin matalan tehon radioprotokolliin, niiden luotettavuuden takia. Radioverkon voi myös toteuttaa korkeampitehoisilla protokollilla ja tätä voisi olla hyvä tutkia jatkotutkimuksissa. Tässä tutkimuksessa ei myöskään perehdytty ääriolosuhteiden vaikutuksiin. Tässä työssä haasteita asetti työn rajaaminen. Jokaisesta yksittäisestä komponentista voisi pohtia erikseen useita eri luotettavuusnäkökulmia kuten myös ulkoisten häiriöiden vaikutuksia voisi tutkia enemmän. Tämän tutkimuksen alussa esitettyyn tavoitteeseen kuitenkin päästiin ja löydettiin tärkeimmät luotettavuuteen vaikuttavat tekijät.

Luotettavuuden osalta tulokset ovat luotettavia, sillä käytetty lähdeaineisto kattoi laajan ajanjakson 1950-luvulta lähtien, ja eri aikakausilta olevat lähetteet olivat asiasisällöltään yhtäläisiä. On kuitenkin tärkeää huomata, että radioviestinnän teknologia kehittyy jatkuvasti, ja uusia luotettavampia komponentteja tutkitaan jatkuvasti lisää. Tämä voi vaikuttaa myös tässä tutkimuksessa esitettyihin suosituksiin ja ohjeistukseen.

Hyvä jatkotutkimuskohde voisi olla laajempi tarkastelu siitä, mihin muualle radioviestintä voisi soveltua langallisen tiedonsiirron korvaajaksi työmaa-alueelle. Tällainen tutkimus voisi sisältää esimerkiksi erilaisten teollisuudenalojen valmiiden langattomien ratkaisuiden implementointia haastavammille työmaa-alueille. Lisäksi hyvä jatkotutkimuskohde voisi olla tutkielma, jossa suunnitellaan kaikille työkoneille yhteinen verkko ja pohditaan sen etuja ja haittoja verrattuna kahden koneen väliseen verkkoon.

# LÄHTEET

Afifi, H., de Santis, C. & Labiod, H. (2007). Wi-Fi™, Bluetooth™, Zigbee™ and WiMax™. Springer, Netherlands. 316 p.

Ahmad, R., Sidek, O. & Mohd, S.K.K. (2009). Development of the CRC block for Zigbee Standard on FPGA. 2009 International Conference for Technical Postgraduates (TECHPOS), 2009, p.1-4, Article 5412047

Aitchison, C. S. & Free, C. E. (2022). RF and microwave circuit design: theory and applications. John Wiley & Sons Inc: Hoboken, New Jersey. 531 p.

Baronti, P., Pillai, P., Chook, V.W.C., Chessa, S., Gotta, A. & Hu, Y.F. (2007). Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. Computer communications. Vol.30(7), pp.1655-1695.

Bellalta, B., Bononi, L., Bruno, R. & Kassler, A. (2016). Next generation IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks: Current status, future directions and open challenges. Computer Communications. Vol.75, pp.1–25.

Bensky, A. (2004). Short-range wireless communication fundamentals of RF system design and application. Newnes, Amsterdam. 385 p.

Caro, D. (2014). Wireless networks for industrial automation.

Carr J. J. (2002). RF components and circuits. Newnes, Boston. 413 p.

Cisco. (2023). Signal-to-Noise Ratio (SNR) and Wireless Signal Strength. Päivitetty 3.10.2023. Saatavissa (viitattu 22.12.2023): [https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi\\_Basics\\_and\\_Best\\_Practices/Signal-to-Noise\\_Ratio\\_\(SNR\)\\_and\\_Wireless\\_Signal\\_Strength](https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Signal-to-Noise_Ratio_(SNR)_and_Wireless_Signal_Strength)

Cerda, R. M. (2014). Understanding quartz crystals and oscillators. Artech House, Massachusetts. 325 p.

Chuanzhao Y. & Yuan, J.S. (2007). Electrical and Temperature Stress Effects on Class-AB Power Amplifier Performances. IEEE transactions on electron devices. Vol.54(6), pp. 1346–1350.

Dobkin, D. (2011). RF Engineering for Wireless Networks: Hardware, Antennas, and Propagation. Elsevier Science, San Diego. 448 p.

Elahi, A. & Gschwender, A. (2009). ZigBee Wireless Sensor and Control Network. Pearson. 288 p.

Elber, B. R. (2016). Radio frequency interference in communications systems. Artech House, Boston. 229 p.

EverythingRF. (2022). Zigbee Frequency Bands. Päivitetty 13.12.2022. Saatavissa (viitattu 5.1.2024): <https://www.everythingrf.com/community/zigbee-frequency-bands>.

Farzaneh, F. (2020). Introduction to wireless communication circuits. River Publishers, Aalborg. 536 p.

Friesen, D. J. (2021). Introduction to Antennas and RF Propagation Analysis. Artech House, Norwood. 213 p.

Gottlieb, I. M. (1997). Practical oscillator handbook. Newnes, Boston. 259 p.

ITU. (2008). Radiowave Propagation Information for Designing Terrestrial Point-to-Point Links. International Telecommunication Union, Geneva. Saatavissa: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-54-2009-OAS-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-54-2009-OAS-PDF-E.pdf)

Krouk, E. & Semenov, S. (2011). Modulation and coding techniques in wireless communications. Wiley, Chichester. 682 p.

Körner, M, Bauer, D., Keller, R., Rösch, M., Schlereth, A., Simon, P., Bauernhansl, T., Fridgen, G. & Reinhart, G. (2019). Extending the Automation Pyramid for Industrial Demand Response. Fraunhofer ePrints.

Love, J. S. & Ajluni, C. J. (2009). RF front-end world class designs. Newnes/Elsevier, Amsterdam. 493 p.

Lv, J. (2012). Design and Implementation of Light Sensor Node Based on ZigBee. Lecture Notes in Electrical Engineering. Vol.210, pp. 809–816.

Manning, T. (2009). Microwave radio transmission design guide. Artech House, Boston. 296 p.

Mohammadi, A., Ghannouchi, F. M. (2012). RF Transceiver Design for MIMO Wireless Communications. Springer Nature, Netherlands. 288 p.

Mutiara, A. B., Refianti, R. & Rachmansyah, R. (2011). Design of microstrip antenna for wireless communication at 2.4 GHz. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. Vol.33(2), pp.184–192.

Nascimento, D. C. (2011). Design of Low-Cost Probe-Fed Microstrip Antennas. IntechOpen.

Odyniec, M. (2002). RF and microwave oscillator design. Artech House, Boston. 414 p.

Olexa, R. (2004). Implementing 802.11, 802.16 and 802.20 wireless networks planning, troubleshooting, and maintenance. Newnes, Boston. 255 p.

Reddy, G. S. & Alex, Z. C. (2012). LS band antenna backed by surface wave structure. Microwave and optical technology letters, Vol.54(7), pp. 1556–1559.

Schlosser, R. W., Wendt, O., Bhavnani, S. & Nail-Chiwetalu, B. (2006). Use of information-seeking strategies for developing systematic reviews and engaging in evidence-based practice: the application of traditional and comprehensive Pearl Growing. A review. International Journal of Language & Communication Disorders, 41(5), pp. 567–582.

Tennina, S., Gaddour, O., Koubâa, A., Royo, F., Alves, M. & Abid, M. (2016). Z-Monitor: A protocol analyzer for IEEE 802.15.4-based low-power wireless networks. Computer networks (Amsterdam, Netherlands: 1999). Vol 95, pp. 77–96.

Tukes. (2021). Turva-automaatio prosessiteollisuudessa. Saatavissa (viitattu 5.11.2023): <https://tukes.fi/turva-automaatio-prosessiteollisuudessa#turva-automaatio-osana-onnettomuuksien-ehkaysya>

Volakis, J. L. (2019). Antenna Engineering Handbook. McGraw-Hill Education, New York. 1424 p.

Wyatt, K. & Gruber, M. (2015). Radio frequency interference pocket guide: RFI characterization, location techniques, tools and remediation methods, with key equations and data. SciTech Publishing, Edison. 89 p.

Wang, C., Jiang, T. & Zhang, Q. (2014). ZigBee network protocols and applications. CRC Press, Boca Raton. 370 p.

Yuan, J. (2016). CMOS RF Circuit Design for Reliability and Variability. Springer, Singapore. 108 p.