Tampereen yliopisto

Tero Uusikartano

LANGATON TIETOLIIKENNE ÄLYKKÄISSÄ AJONEUVOISSA KAIVOSTEOLLISUUDESSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastajat: Toni Björninen ja Jari Kangas
Syyskuu 2025

TIIVISTELMÄ

Tero Uusikartano: Langaton tietoliikenne älykkäissä ajoneuvoissa kaivosteollisuudessa
Wireless communications in intelligent vehicles in mining industry
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Syyskuu 2025

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on esittää älykkäisiin ajoneuvoihin liittyviä langattomia tietoliikennetekniikoita sekä verrata tieliikenteen ja kaivosteollisuuden älykkäitä ajoneuvoja sovelluksien, vaatimusten sekä langattoman tietoliikennetekniikan infrastruktuurin näkökulmista. Opinnäytetyön toinen tavoite on, että sitä voidaan tarvittaessa käyttää lähdemateriaalina porauslaitteiden tai muiden kaivosteollisuuden ajoneuvojen tutkimuksiin. Opinnäytetyön lähtökohtana oli tarve selvittää Sandvikin DI650i-porauslaitteen antenni- ja radiolaitteiston toimintaa. Työssä on käytetty materiaaleja, jotka ovat toimitettu opinnäytteen tekijälle vain työtä varten ja niiden julkaisuun tässä yhteydessä on suostumus.

Opinnäytetyö koostuu työn kannalta olennaisimpien radiotekniikan käsitteiden ja tekniikoiden esittelystä. Näihin kuuluvat radioaallot, taajuus, antennit sekä satelliittipaikannusjärjestelmät. Näiden käsittelyn jälkeen työssä esitetään tieliikenteessä käytettäviä älykkäitä ajoneuvoja koskeva luku, jonka avulla luodaan yleiskuva älykkäistä ajoneuvoista. Yleiskuvan jälkeen esitetään sekä lyhyen kantaman että pitkän kantaman viestintä. Kaivosteollisuudessa on tarve hyödyntää langatonta tietoliikennettä ja tätä tarkastellaan avokaivoksien osalta. Tämän jälkeen tarkastellaan nykyisiä tietoliikenteen toteutuksia avokaivoksissa. Ennen yhteenvetoa esitetään Sandvikin laitteistoa yleisesti ja tutkitaan tarkemmin DI650i-porauslaitetta sen käyttämien antennien osalta.

Kaivosteollisuudessa käytettävien älykkäiden ajoneuvojen välinen kommunikointi perustuu samoihin teknologioihin, kuten V2X-teknologiaan eli ajoneuvosta kaikkeen tapahtuvaan kommunikointiin, kuin tieliikenteessä käytettävien autojen välinen kommunikointi. Tästä syystä eroavaisuudet kaivosteollisuuden ja tieliikenteen älykkäiden ajoneuvojen välillä liittyvät erityisesti toimintaympäristöön sekä eri kokoluokan ajoneuvoihin. Erilaisia haasteita näihin liittyen tulee työstä ilmi. Työstä selviää älykkäiden kaivoslaitteiden kokonaisuus tietoliikennetekniikan kannalta. Esimerkiksi porauslaitteisiin asennettavia järjestelmiä, kuten satelliittipaikannusjärjestelmä, voidaan tarkastella yksittäisinä lohkoina ja antennimoduuleina. Radiotekniikan perusteilla näitä voidaan tarkastella yksittäisinä piiri- ja antennirakenteina. Opinnäytetyössä huomataan kaivosteollisuuden älykkäiden ajoneuvojen olevan sekä taloudellisesti kannattavia investointeja että parantavan kaivosympäristöissä työskentelevien turvallisuutta ja hyvinvointia.

Avainsanat: V2X, Sandvik, kaivosteollisuus, porauslaite

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Opinnäytetyön aiheen sain Sandvikilta. Aihe oli alkuun kandidaatintyöhön liian laaja ja yhdessä kandidaatintyöni ohjaajien Toni Björnisen ja Jari Kankaan kanssa saimme rajattua aiheen kaikille sopivaksi.

Haluan kiittää ohjaajiani Tonia ja Jaria koko pitkän opinnäytetyön kestäneestä tuesta ja ymmärryksestä sekä työn sisältöön liittyvistä keskusteluista ja palautteista. Kiitos myös Sandvikin Tampereen seudun Surface Drills ohjausjärjestelmätiimille. Erityiskiitos puolisolleni (ja koirillemme) opinnäytetyön tekemisen tukemisesta ja kannustamisesta.

Turussa, 19.09.2025

Tero Uusikartano

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO 1
2 RADIOTEKNIIKKA 2
2.1 Radioaallot 2
2.2 Taajuus 5
2.3 Antenni 6
2.4 Satelliittipaikannusjärjestelmät 8
3 RADIOTEKNIIKKA ÄLYKKÄISSÄ AJONEUVOISSA 10
3.1 Ajoneuvojen välinen kommunikointi 10
3.2 Lyhyen kantaman viestintä 12
3.3 Pitkän kantaman viestintä 14
4 RADIOTEKNIIKKA KAIVOSTEOLLISUUDEN ÄLYKKÄISSÄ AJONEUVOISSA 17
4.1 Tietoliikenteen tarve avokaivoksissa 17
4.2 Tietoliikenteen toteutus avokaivoksissa 18
4.3 DI650i porauslaite 21
5 YHTEENVETO 25
LÄHTEET 26

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3GPP	engl. 3rd Generation Partnership Project
4G	engl. 4th generation, neljännen sukupolven mobiiliverkko
5G	engl. 5th generation, viidennen sukupolven mobiiliverkko
CAV	engl. Connected and Autonomous Vehicle
CSMA	engl. Carrier Sense Multiple Access
C-V2X	engl. Cellular Vehicle-to-everything
DSRC	engl. Dedicated Short-range Communications
DTU	engl. Data Transfer Unit
GLONASS	engl. Global Navigation Satellite System
GNSS	engl. Global Navigation Satellite System
GPS	engl. Global Positioning System
GSM	engl. Global System for Mobile Communications
IEEE	engl. Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITS	engl. Intelligent Transport System
LTE	engl. Long-Term Evolution
LTE-A	engl. Advanced Long-Term Evolution
MAC	engl. Medium access control, media access control
OBU	engl. On board unit
OFDM	engl. Orthogonal frequency division multiplexing
OFDMA	engl. Orthogonal Frequency Division Multiple Access
RAN	engl. Radio access network
RF	engl. radio frequency
RLAN	engl. Radio Local Area Network
RRC	engl. Radio receiver
RSU	engl. Roadside unit
UHF	engl. ultra-high frequency
UMTS	engl. Universal Mobile Communication System
V2I	engl. Vehicle-to-infrastructure
V2N	engl. Vehicle-to-network
V2P	engl. Vehicle-to-pedestrian
V2V	engl. Vehicle-to-vehicle
V2X	engl. Vehicle-to-everything
VHF	engl. very high frequency
WAVE	engl. Wireless Access in Vehicular Environments
WLAN	engl. Wireless Local Area Network, langaton lähiverkko

1 JOHDANTO

Radiotekniikalla on nykyään rooli liikenteessä, teollisuudessa sekä kuluttajien keskuudessa. Monet kulkuneuvot hyödyntävät vähintäänkin AM/FM-radiota, mutta myös paikantamiseen ja tiedonsiirtoon ja -keruuseen on tarvetta. Uudet laitteet ja järjestelmät tuovat teollisuuden näkökulmasta hyödyllisiä ominaisuuksia mutta samalla myös haasteita niiden toteuttamiseen. [11]

Radiotekniikkaa hyödynnetään kaivosteollisuudessa paljon, ja sillä saavutetaan esimerkiksi porauslaitteen etäohjaaminen. Porauslaitteissa on useita erilaisia antennijärjestelmiä tiedonkeruuta sekä paikannusta varten. Antennien käyttöön liittyy haasteita erilaisten häiriöiden muodossa ja niiden tutkiminen sekä minimointi ovat keskeisiä asioita antennijärjestelmissä. Suuri osa kommunikaatiosta tapahtuu 2,4 GHz:n eli UHF-alueella. Digitalisointi mahdollistaa kaivosteollisuuden turvallisemman ja tehokkaamman työskentelyn. Kaivosteollisuuden työturvallisuutta saadaan parannettua ja ympäristön vaikutuksia minimoitua etäohjauksen avulla. [11]

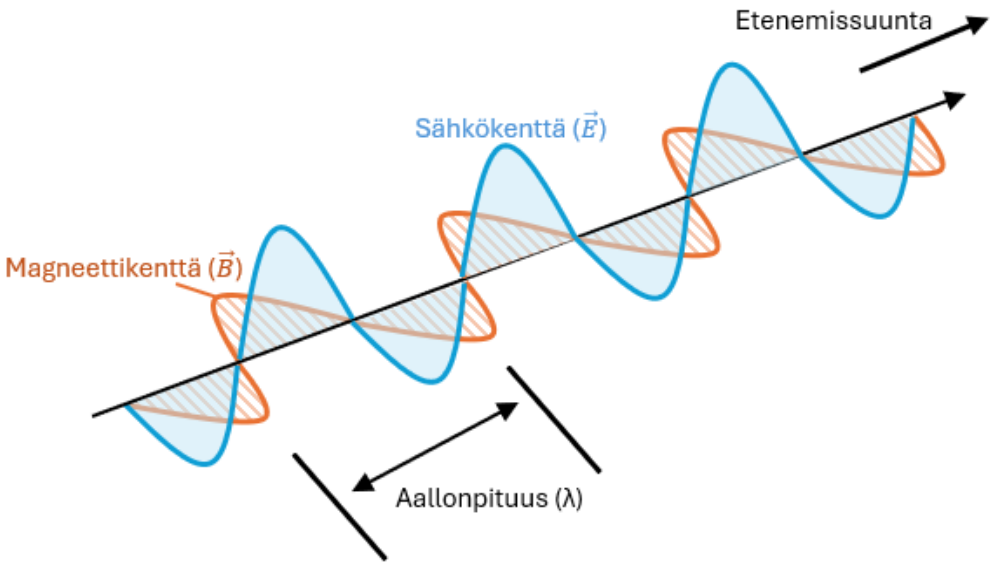
Tässä työssä tutustutaan älykkäiden ajoneuvojen ja osaltaan myös työkoneiden tietoliikenteeseen. Työn tarkoituksena on luoda pohja tarkempaa tutkimusta varten, mikäli porauslaitteen tietoliikenteeseen liittyviä ongelmia halutaan tutkia lisää. Luvussa 2 esitetään radiotekniikan perusteita. Kyseisessä luvussa tuodaan esille radioaaltojen tärkeimpiä ominaisuuksia sekä aaltojen etenemistapoja, taajuuden teoriaa sekä antennien toimintaa ja ominaisuuksia. Satelliittipaikannusjärjestelmien perusasiat esitetään samassa luvussa. Luvussa 3 esitetään älykkäiden ajoneuvojen ominaisuuksia sekä pyritään perustelemaan tietoliikenteen tarvetta tieliikenteessä. Myöhemmin samassa luvussa esitetään lyhyen kantaman viestinnän teknologioita, erilaisia antureita sekä pitkän kantaman viestinnän teknologioita. Luvussa 4 esitetään tietoliikenteen tarvetta kaivosteollisuudessa sekä tietoliikenteen toteutusta ja käytettyjä tekniikoita avokaivoksilla. Samassa luvussa esitetään yhtenä esimerkkinä porauslaite sekä tarkastellaan siinä käytettyjä radioteknisiä komponentteja. Luvussa 5 on yhteenveto työstä.

2 RADIOTEKNIIKKA

Radiotekniikka on keskeisessä roolissa nykypäivää, niin teollisuudessa kuin kuluttajien keskuudessa sekä älykkäissä ajoneuvoissa. Radiotekniikassa hyödynnetään sähkömagneettisia aaltoja radiotaajuuksilla, jotka ovat välillä 30 Hz–300 GHz [6]. Radiotekniikan kehitys on mahdollistanut useat laitteet, kuten radion, television sekä matkapuhelimet. Myös eri paikantamisen ja kommunikaation sovellukset käyttävät radiotekniikkaa.

2.1 Radioaallot

Radioaallot ovat osa sähkömagneettisen säteilyn spektriä. Radioaalto syntyy varaustiheyksien aikavaihtelusta. Sähkömagneettinen aalto on valonnopeudella liikkuvaa, poikittaista aaltoliikettä, ja se muodostuu toisiaan kohtisuorassa olevista sähkö- ja magneettikentästä. [3][5] Kuvassa 1 on nähtävillä aallonpituus λ, sähkö- ja magneettikenttä sekä niiden etenemissuunta.



Kuva 1. Sähkömagneettinen aalto, perustuu [12].

Maxwellin yhtälöistä huomataan sähkö- ja magneettikenttien välinen riippuvuus eikä näin ollen kumpikaan kentistä voi olla olemassa ilman toista kenttää. Maxwellin yhtälöistä osaa on jo käytetty ennen Maxwellin huomioita, kuten kaavaa 1, joka tunnetaan Gaussin lakina. Yhtälö 3 puolestaan on

Faradayn laki ja yhtälö 4 on Ampèren laki Maxwellin lisäyksellä. Nämä yhtälöt ovat esitettyinä differentiaalimuodossa [4][6]

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{3}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}. \tag{4}$$

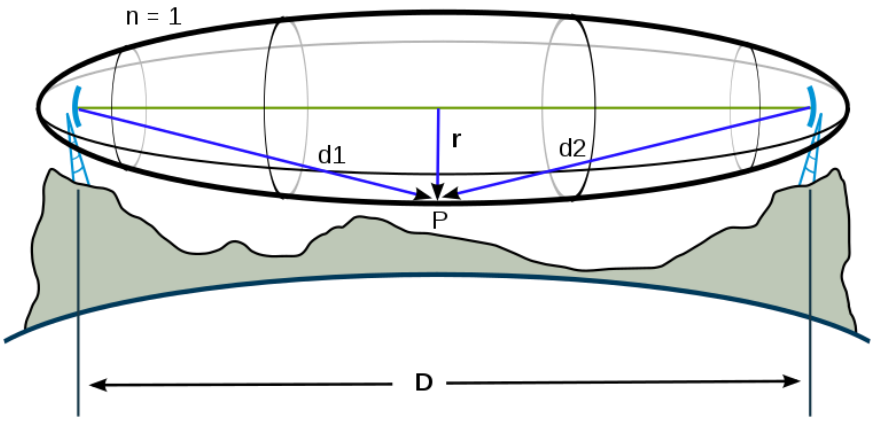
Yhtälöissä $\mathbf{E}$, $\mathbf{D}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{J}$ ja ρ ovat sähkökentän voimakkuus, sähkövuon tiheys, magneettivuon tiheys, magneettikentän voimakkuus, sähkövirran tiheys ja sähköinen varaustiheys.

Radioaaltojen etenemistyyli vaikuttaa kuuluvuuteen sekä toteutettavan laitteiston suunnitteluun. Mikro- ja millimetriaaltojen etenemismekanismeja ovat näköyhteyseteneminen, diffraktio, sironta, heijastuminen sekä monitie-eteneminen [5]. Etenemiseen vaikuttavat troposfäärin, ionosfäärin sekä maaston ominaisuudet [3].

Radioaallot etenevät muun muassa ilmakehässä troposfäärissä sekä ionosfäärissä. Troposfääri ulottuu noin 10 km:iin napojen alueella ja päiväntasaajalla noin 17 km:iin. [3][4] Troposfäärissä aalto kokee sirontaa, vaimenemista sekä kaartumista. Troposfäärissä aallon vaimeneminen johtuu sadepisaroista, sumusta sekä muista ilmakehän ominaisuuksista kuten hapesta ja vesihöyrystä. [3]

Ilmakehän vaikutusten lisäksi aallon etenemiseen vaikuttavat myös maasto, kasvillisuus, ympäröivät rakennukset sekä maanpinnan sähköiset ominaisuudet [3]. Aallon etenemissuunnan kaareutumisen ansiosta radioaallot voivat edetä huomattavasti pidemmälle horisontin taakse verrattuna suoraan kulkevaan aaltoon.

Näköyhteyseteneminen on kahden toisilleen näkyvän pisteen välillä tapahtuvaa kommunikointia. Näköyhteysreitin olisi hyvä mahdollistaa suuri vapaa tila, jotta aallon etenemisen aikana ei tapahtuisi vaimenemista. [4][6] Radionäköyhteydessä otetaan tarkasteluun kuvassa 2 esitetty Fresnelin ellipsoidin ensimmäinen alue. Kuvassa *D* on lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys, *r* on ensimmäisen Fresnelin alueen säde pisteessä *P*. Piste *P* sijaitsee *d1* verran poispäin lähettimestä ja *d2* verran poispäin vastaanottimesta. Fresnelin ellipsoidi on keskeinen osa radionäköyhteysetenemistä. Ensimmäinen ellipsoidi olisi hyvä jättää esteettömäksi, jotta signaaliin kohdistuisi mahdollisimman vähän vaimennusta sekä häiriötä. Tällöin yhteys toimii luotettavimmin. [5]



Kuva 2. Fresnelin ellipsoidi [10].

Diffraktiolla tarkoitetaan aallon muokkautumista esimerkiksi taipumalla näköesteen taakse. Huygensin periaatteen mukaan toissijaiset aallot voivat muodostua esteen taakse. Tämä mahdollistaa aaltojen kulkeutumisen lähettäjältä vastaanottajalle, kun suoraa näköyhteyttä pisteiden välillä ei ole. [4][5][6] Sironta on diffraktion kanssa samankaltainen fysikaalinen ilmiö, joka heijastaa energiaa useaan eri suuntaan [5]. Sironta aiheutuu muun muassa ilmakehän epähomogeenisuuksista ja sironnan avulla on mahdollista saavuttaa pitkiä yhteyksiä VHF-alueen taajuuksilla [4]. Sironta on kuitenkin osa myös monitie-etenemistä, minkä vuoksi sirontaa voidaan hyödyntää myös suuremmilla taajuuksilla lyhyemmillä yhteyksillä.

Radioaallot etenevät myös heijastumisella, jota tapahtuu aallon osuessa laajaan, lähes sileään pintaan. Osa säteilevästä energiasta vaimenee heijastavaan pintaan ja osa heijastuu tulokulmassa poispäin pinnasta. Väliaineet ovat häviöllisiä ja eri materiaalit vaimentavat aaltoja eri voimakkuuksilla. [5][4]

Maanpinta-aallot etenevät maanpinnan läheisyydessä. Matalat taajuudet voivat edetä tuhansia kilometrejä niiden kokeman vähäisen vaimennuksen ansiosta. Näiden aaltojen käyttö on kuitenkin rajoittunut yleensä alle 10 MHz:n taajuuksille eikä näin ollen maanpinta-aaltojen tarkastelu ole työn kannalta merkittävää. [4]

Monitie-eteneminen on yhdistelmä eri etenemismekanismeja. Signaali voi saapua asemalta käyttäjälle monella eri etenemismekanismilla. Usein monitie-etenemisessä jokin mekanismeista on hallitseva. Monitie-etenemisen vuoksi signaalissa syntyy häipymistä, mutta joissain tilanteissa signaali voi saapua kohteeseen vain monitie-etenemisen ansiosta. [4]

2.2 Taajuus

Radiotaajuussäteilyn taajuuksien ajatellaan yleisesti olevan 30 Hz:stä 300 GHz:iin [1]. Taajuusalueiden rajat eroavat kirjallisuudessa toisistaan. Työn kannalta olennaisinta on keskittyä niin sanottuihin mikroaaltoihin, jotka alkavat 1 GHz:stä ja päättyvät 30 GHz:iin. Riippuen siitä mitä lähdettä käytetään, mikroaaltojen voidaan myös ajatella alkavan jo 300 MHz:stä, kuten kuvassa 3 on esitetty. Tämä taajuusalue kuuluu UHF-alueeseen (engl. ultra high frequencies). [3] Taulukossa 1 on radioaaltojen taajuusalueet yleisesti esitetyllä tavalla.

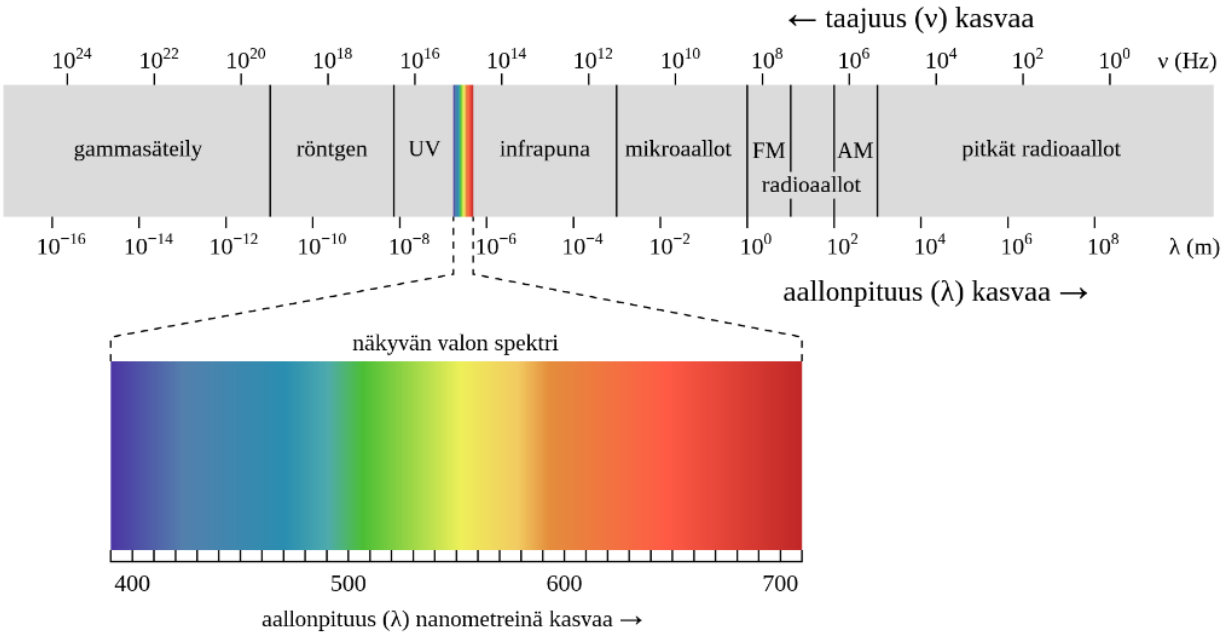
Taajuus kuvaa sitä, kuinka monta kertaa aalto värähtelee sekunnissa ja sen yksikkö on hertsi (1/s). Radioaallon ominaisuuksiin kuuluu sen aallonpituus, joka liittyy taajuuteen seuraavan kaavan mukaan,

$$\lambda = \frac{c}{f}, \tag{5}$$

jossa *c* on valonnopeus, λ on aallonpituus ja f on taajuus [1].

Taulukko 1. Radioaaltojen taajuusalueet, perustuu [1, s.9].

Taajuusalueen nimi ja lyhenne	Taajuusalue	Aallonpituus
Very Low Frequencies (VHF)	3 – 30 kHz	100 km – 10 km
Low Frequencies (LF)	30 – 300 kHz	10 km – 1 km
Medium Frequencies (MF)	300 – 3000 kHz	1 km – 100 m
High Frequencies (HF)	3 – 30 MHz	100 m – 10 m
Very High Frequencies (VHF)	30 – 300 MHz	10 m – 1 m
Ultra High Frequencies (UHF)	300 – 3000 MHz	1 m – 10 cm
Super High Frequencies (SHF)	3 – 30 GHz	10 cm – 1 cm
Extremely High Frequencies (EHF)	30 – 300 GHz	10 mm – 1 mm



Kuva 3. Sähkömagneettisen säteilyn spektri [7].

Taajuudet voidaan myös esitellä osana sähkömagneettisten aaltojen spektriä, kuten kuvassa 3, jossa myös näkyvän valon ominaisuudet tulevat esiin. [3] Monet antennijärjestelmät hyödyntävät tiedonsiirrossa UHF-alueen taajuuksia, minkä vuoksi työssä keskitytään tälle taajuusalueelle.

2.3 Antenni

Antenni on laite, jota käytetään sähkömagneettisten aaltojen (radioaaltojen) lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Lähetysantenni muuntaa sähköisen virran sähkömagneettisiksi aalloiksi ja vastaanottoantenni muuttaa vastaanotetut sähkömagneettiset aallot sähkövirraksi. Antennit ovat keskeisiä komponentteja radiotekniikan sovelluksissa. [4]

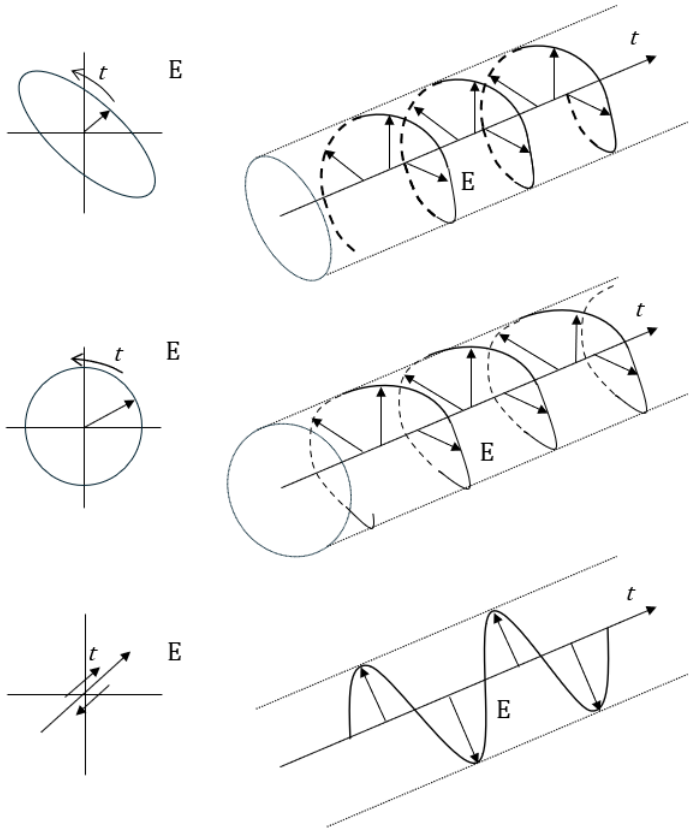
Antennityyppejä on useita erilaisia, joista yleisesti käytettyjä ovat lanka-antennit, kuten dipoli- ja monopoliantennit. Myös muunlaisia lanka-antenneja on olemassa, kuten heliksiantenni. Muita usein käytettyjä antennityyppejä ovat torvi- ja heijastinantennit. [4] Näiden lisäksi on vielä muitakin erilaisia antennityyppejä, jotka työn laajuuden vuoksi on sopivaa jättää esittelemättä. Muita sekä edellä mainittuja antenneja on käsitelty tarkemmin esimerkiksi lähteessä [4].

Antenniryhmät muodostuvat kahdesta tai useammasta erillisestä antennielementistä. Antenniryhmiä muodostetaan, sillä antenniryhmillä voidaan saavuttaa etuja verrattuna yksittäisiin antennielementteihin. Näitä etuja voivat olla esimerkiksi suurempi vahvistus tai parempi suuntakuvio.

[4] Seuraavaksi esitetään antennien keskeisiä ominaisuuksia, joihin myös suuntakuvio ja vahvistus kuuluvat.

Antennien keskeisiä ominaisuuksia ovat sen suuntakuvio, sisäänmenoimpedanssi, polarisaatio ja vahvistus [3]. Polarisaatio kuvaa miten sähkökenttävektorin kuviteltu kärki käyttäytyy yhden värähtelyjakson aikana eli sitä voidaan tarkastella kuvaajana. Sähkömagneettinen aalto voi olla elliptisesti polarisoitunut, lineaarisesti polarisoitunut tai ympyräpolarisoitunut. [4][3]

Vaihe-eron ollessa joko 90 astetta tai -90 astetta ja kun sähkökentän komponentit ovat yhtä suuret, on kyseessä silloin ympyräpolarisaatio. Mikäli vaihe-ero on 0 astetta tai 180 astetta eli sähkökenttä värähtelee vain yhteen suuntaan, niin kyseessä on lineaarinen polarisaatio. Kuvassa 4 on esitettynä edellä mainitut polarisaatiotyypit. Kuvassa ylimpänä on elliptinen polarisaatio, keskellä ympyräpolarisaatio ja alimpana lineaarinen polarisaatio. Ympyrä- ja lineaarinen polarisaatio ovat elliptisen polarisaation erikoistapauksia. [1]



Kuva 4. Sähkömagneettisen aallon polarisaatioita, perustuu [1, s.33].

Säteilykuvio tai suuntakuvio kuvaa antennin tehokkuutta säteillä eri suuntiin tai vastaanottaa eri suunnista. Sama säteilykuvio pätee pääsääntöisesti sekä lähetyksessä että vastaanotossa. [3] Antennien ominaisuudet ovat lähetyksessä ja vastaanotossa samat, kunhan antennit eivät sisällä esimerkiksi vahvistavia komponentteja [4]. Säteilykuviossa on usein selkeästi yksi pääkeila ja

mahdollisia sivukeiloja. Pääkeilaa vastapäätä on usein pääkeilaa huomattavasti pienempi takakeila. [3] Yleisimmin käytetty säteilykuvion esitysmuoto on polaarinen.

Antennin vahvistus kertoo, kuinka voimakkaasti antenni säteilee pääkeilan suuntaan verrattuna tasaisesti kaikkiin suuntiin säteilevään idealisoituun antenniin (isotrooppinen). Pääkeilan suuntaan voimakkaasti säteilevä antenni omaa suuren vahvistuksen. Tällöin pääkeila on kapea. [3] Antennin vahvistus kerrotaan tyypillisesti yksikössä *dBi* eli desibeli verrattuna isotrooppiseen antenniin. Antennin vahvistus desibeleinä on

$$G_{dBi} = 10\log_{10}(G), \tag{7}$$

jossa *G* on antennin vahvistus lineaarisessa muodossa.

2.4 Satelliittipaikannusjärjestelmät

Eri satelliittinavigointijärjestelmät ovat satelliiteista koostuvia järjestelmiä, joissa tukiasemat ovat sijoitettuna satelliitteihin. Sijoittamalla tukiasemat satelliitteihin saadaan muutamalla satelliitilla korvattua huomattavasti suurempi määrä maanpäällisiä tukiasemia. Korkeiden taajuuksien avulla paikannus on tarkempaa kuin maanpäällisillä järjestelmillä. Satelliittinavigoinnin avulla voidaan määrittää käyttäjän paikkatieto kolmiulotteisesti eli saadaan käyttäjän leveysaste, pituusaste sekä korkeus. [4] Maailmanlaajuisesta satelliittipaikannusjärjestelmästä käytetään termiä GNSS (engl. Global Navigation Satellite System) [8].

GPS (engl. Global Positioning System) on yhdysvaltalainen, alun perin sotilaskäyttöön kehitetty satelliittipaikannusjärjestelmä, jonka avulla käyttäjä saa sijainnin, nopeuden ja ajan. GPS-järjestelmä koostuu 24 satelliitista, joista kolme satelliittia on varalla. Satelliitit ovat 26 600 kilometrin etäisyydellä Maan keskipisteestä. [8] Satelliitit lähettävät kahta dataa sisältävää eri signaalia jatkuvasti. Toinen lähetyksistä on L1-kantoaaltotaajuudella ja sen taajuus on 1 575,42 MHz. Toinen on L2-kantoaaltotaajuudella ja sen taajuus on 1 227,6 MHz. Nämä taajuudet ovat tärkeä osa suurimpien virhelähteiden, kuten ionosfäärisen taittumisen, minimointiin. [4][15]

Käyttäjän koordinaatit saadaan luotettavasti mitattua, kun vastaanottimen etäisyys kolmeen satelliittiin tunnetaan. Kellovirhettä eliminoidaan mittaamalla etäisyys neljänteen satelliittiin. [4] Maanpäällinen kontrolli- ja monitorointijärjestelmä sekä vastaanottovälineistö ovat osa GPS-järjestelmää. Kontrollointi paikantaa ja ylläpitää satelliitteja avaruudessa. Kontrolliosa monitoroi satelliittien kuntoa sekä signaalien luotettavuutta ja ylläpitää satelliittien ratatasokonfigurointia. Kontrollisegmentti päivittää edeltävien toimien lisäksi satelliittien useita käyttäjän paikannukselle, nopeudelle sekä ajalle tärkeitä ominaisuuksia, kuten satelliittien paikkatietokirjaa. Käyttäjän laitteisto suorittaa navigoinnin, ajoituksen tai muut toiminnot kuten maanmittauksen. [8]

GLONASS (ven. Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) on venäläinen satelliittipaikannusjärjestelmä, joka kehitettiin GPS:n vastineeksi. Kuten GPS niin myös GLONASS toimii sotilaallisessa sekä yksityisessä käytössä. L-kaistan taajuusnavigointi toimii paikannuksen, navigoinnin sekä ajoituksen toteutuksissa. GLONASS-konstellaatio koostuu 24 aktiivisesta satelliitista sekä kuudesta on-orbit-varasatelliitista. GLONASS-kontrolleri aktivoi 24 soveltuvinta satelliittia ja loput ovat varalla. GLONASS-satelliitit kiertävät Maata 19100 kilometrin korkeudella. L1- ja L2-kantoaaltotaajuudet ovat 1602 MHz ja 1245,5625 MHz sekä L3-kantoaaltotaajuus 1202,025 MHz. [8]

GNSS koostuu eri satelliittinavigointijärjestelmistä (engl. Satellite Navigation, SATNAV). Näitä järjestelmiä ovat kiinalainen BDS (BeiDou Navigation Satellite System), eurooppalainen Galileo, intialainen NavIC (Navigation with Indian constellation), japanilainen QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) sekä edellä mainitut GPS ja GLONASS. [8] Työn kannalta olennaisimmat järjestelmät ovat GPS ja GLONASS, sillä ne ovat käytetyimmät paikannusjärjestelmät GNSS-järjestelmissä. Muita järjestelmiä ei tarkemmin esitetä tässä työssä sen vuoksi.

3 RADIOTEKNIIKKA ÄLYKKÄISSÄ AJONEUVOISSA

Tieliikenne aiheuttaa edelleen suuren määrän vuosittaisista kuolemaan johtaneista onnettomuuksista maailmanlaajuisesti, vaikka vuosien aikana tieliikenneturvallisuutta on parannettu eri keinoin. Turvavöiden, lukkiutumattomien jarrujen sekä tiesuunnittelun lisäksi tietoliikenne voi auttaa ehkäisemään tieliikennekuolemia. Älyliikenne voi olla ratkaisu moniin muihin ongelmiin tieliikennekuolemien lisäksi. Älyliikenteen avulla tieliikennettä on mahdollista sujuvoittaa huomattavasti, sillä ruuhkista ja onnettomuuksista sekä huonoista ajokeleistä ilmoitetaan jokaiselle verkkoon liitetylle ajoneuvolle (engl. Connected and Autonomous Vehicle, CAV). Älyliikenteen avulla muu muassa polttoainekustannuksista voidaan säästää ja samalla matkojen kesto lyhenee hyvän suunnittelun avulla. Varsinkin raskaiden ajoneuvojen kohdalla letka-ajo on hyödyllistä. Rahtiliikenteen reitit on mahdollista suunnitella etukäteen informaation avulla. Eri tekniikoiden avulla voidaan saavuttaa muitakin hyötyjä, joista mainitaan eri tekniikoiden käsittelyn yhteydessä. Älykkäästä tieliikennejärjestelmästä voidaan käyttää myös lyhennettä ITS (engl. Intelligent Transport System).

3.1 Ajoneuvojen välinen kommunikointi

Englanninkielinen termi Vehicle-to-everything (V2X) on vakiintunut termi ajoneuvojen viestintätekniikalle. V2X-tekniikalla tarkoitetaan ajoneuvosta kaikkeen tapahtuvaa kommunikointia. V2X-tekniikka on ajoneuvojen tietoliikenteen kannalta tärkein tekniikka, sillä sen avulla ajoneuvot voivat kommunikoida erilaisten verkkoon liitettyjen laitteiden kanssa. V2X lisää tieturvallisuutta, liikenteen sujuvuutta sekä parantaa yleisesti tieliikennejärjestelmiä. V2X-kommunikointiin kuuluvat ajoneuvosta ajoneuvoon tapahtuva viestintä (engl. Vehicle-to-Vehicle V2V), ajoneuvon sekä infrastruktuurin välinen viestintä (engl. Vehicle-to-infrastucture, V2I), ajoneuvon ja tietoverkon välinen viestintä (engl. Vehicle-to-Network, V2N) sekä ajoneuvon ja jalankulkijoiden välinen viestintä (engl. Vehicle-to-pedestrian, V2P). [21] Ajoneuvosta kaikkeen kommunikointia toteutetaan kahdella eri tavalla: langattoman lähiverkon sekä mobiiliverkon avulla.

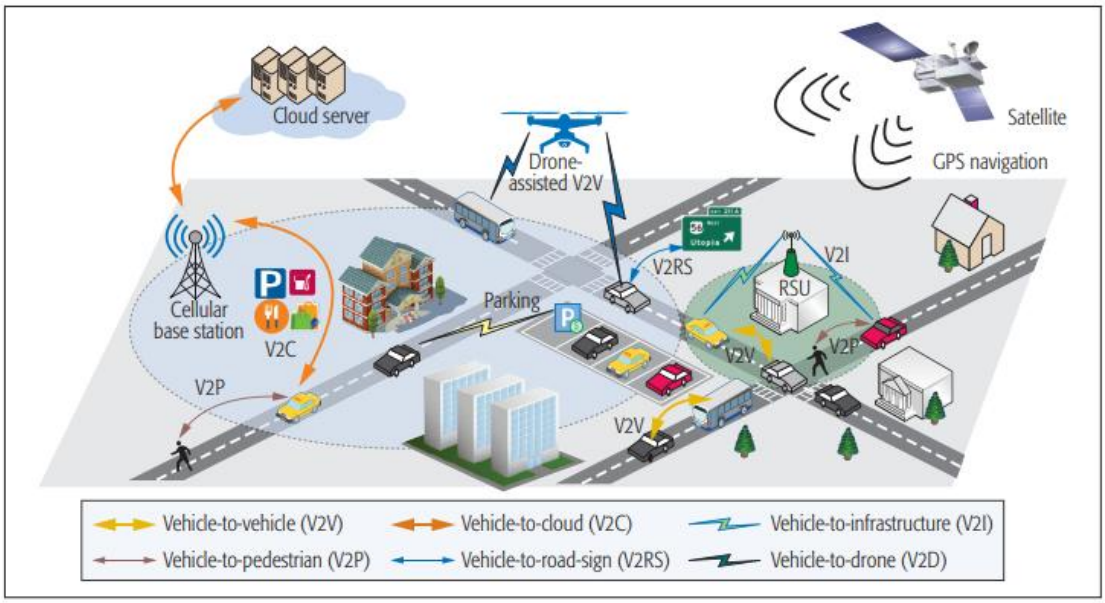
V2V-tekniikka (Vehicle-to-vehicle) tarkoittaa ajoneuvosta ajoneuvoon tapahtuu kommunikointia. Ajoneuvoissa on erilaisia sensoreita, kuten tutkia ja kameroita, joiden avulla ajoneuvot voivat jakaa keskenään tietoa. Tiedonjaolla voidaan saavuttaa turvallisempi ympäristö, sillä ajoneuvot saavat reaaliaikaista tietoa muiden ajoneuvojen sijainnista, ruuhkista, mahdollisista vaaratilanteista sekä muista liikenteen tilanteista. V2V-tekniikan uskotaan ehkäisevän merkittävän määrän

tieliikennekuolemia. [21] V2V on hyödyllinen varsinkin näköyhteysetenemisen katvealueilla, sillä eri kommunikointimenetelmien avulla tietoa voidaan yhä jakaa luotettavasti esteistä riippumatta.

V2I-tekniikka (Vehicle-to-infrastucture) mahdollistaa ajoneuvojen ja tienvarsien infrastruktuurin välisen kommunikoinnin. Tienvarsien infrastruktuuriin kuuluvat esimerkiksi liikennevalot sekä tiekyltit. Näistä tienvarsiyksiköistä käytetään lyhennettä RSU (engl. Roadside Unit). V2I-kommunikoinnin avulla voidaan jakaa tietoa tien kunnosta, ajokelistä sekä muista tiedoista, joiden avulla liikenteen sujuvuutta sekä turvallisuutta voidaan parantaa. Myös tietullien toiminta voidaan sujuvoittaa hyödyntällä V2I-tekniikkaa. [21]

V2N (vehicle-to-network) on ajoneuvojen sekä keskitetyn verkon (centralized network) välistä kommunikointia. Sen avulla ajoneuvot saavat tietoa säätilasta, liikenteen tilasta sekä muista tarpeellisista tiedoista, jotka vaikuttavat ajoturvallisuuteen. [21]

V2P (vehicle-to-pedestrian) on ajoneuvojen ja jalankulkijoiden välistä kommunikointia, jonka avulla ajoneuvot voivat tunnistaa sekä tarpeen tullen kommunikoida V2X-laitetta käyttävien jalankulkijoiden kanssa. Erityisesti kaupunkialueilla on tärkeää huomata jalankulkijoiden sijainti. [21]



Kuva 5. Älyliikenne kaupunkialueella [19].

Kuvassa 5 on esitettynä ajoneuvojen tietoliikenteen kannalta olennaisimpia asioita. Kuvasta huomataan miten eri V2X-tekniikat ovat vuorovaikutuksessa kaupunkiympäristön kanssa. Muitakin V2X-tekniikkaan kuuluvia käsitteitä on olemassa, mutta yllä esitetyt ovat keskeisimmät tekniikat.

3.2 Lyhyen kantaman viestintä

WLAN (engl. Wireless Local Area Network) on langaton lähialueen verkko, jonka yhteydessä puhutaan eri WLAN- tai Wi-Fi-standardeista. WLAN-tekniikkaa määrittää standardiperhe IEEE 802.11 (engl. Institute of Electrical and Electronics Engineering). Langaton verkko mahdollistaa käyttäjän liikkumisen esteettä paikasta toiseen, joka ei kiinteässä verkossa käytettävien verkkokaapelien vuoksi ole aina mahdollista. Langattoman verkon asentaminen on nopeampaa sekä verkon muutoksien tekeminen joustavampaa verrattuna langallisiin verkkoihin. WLAN:in avulla voidaan kattaa laajoja alueita, kuten yksittäisiä rakennuksia tai kokonaisia yliopistokampuksia. Langattomaan verkkoon voidaan liittää laitteita infrapunaa tai radioaaltoja hyödyntäen. Pääosa verkoista perustuu radioaaltoihin ja niistä puhuttaessa käytetään lyhennettä RLAN (engl. Radio Local Area network). [4] Tässä työssä WLAN:sta puhuttaessa tarkoitetaan radioaaltoihin perustuvia verkkoja eikä perehdytä infrapunaan perustuviin verkkoihin.

Ajoneuvojen muodostaman verkon ympäristö vaati erilaisuutensa vuoksi oman lisäyksensä perinteiseen lähiverkkostandardiin IEEE 802.11. Tarvetta varten aloitettiin uuden standardin kehittäminen ja syntyi standardi IEEE 802.11p. Standardi määrittää fyysisen kerroksen sekä MAC-kerroksen (engl. medium access control, media access control). [22]

DSRC (engl. Dedicated Short-range Communications) on langaton teknologia, joka mahdollistaa ajoneuvojen kommunikoinnin toisten ajoneuvojen ja infrastruktuurin välillä. DSRC toimii 5,9 GHz:n taajuuskaistalla, joka on useassa maassa allokoitu ITS-toteutuksille. [18] Ajoneuvot kommunikoivat OBU:jen (engl. Onboard unit), niin sanottujen ajoneuvoyksiköiden eli ajoneuvoon asennettujen laitteiden, ja tienvarsiyksikköjen sekä jalankulkijoiden laitteiden kesken [28]. DSRC:n fyysinen kerros ja MAC-kerros pohjautuvat 802.11p-standardiin. DSRC käyttää OFDM-pohjaista fyysistä kerrosta (engl. Orthogonal Frequency Division Multiplexing), jonka kaistanleveys on 10 MHz. Se on puolet WLAN:ssa käytettävästä, jonka ansiosta symbolinkesto tuplaantuu. [20] Käytetty MAC-protokolla on CSMA/CA (engl. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) [21]. DSRC:n suorituskyky on riittävä tilanteissa, joissa suurin sallittu päästä-päähän viive on noin 100 millisekuntia. Muita IEEE 802.11p:lle asetettuja vaatimuksia ovat 200 km/h:n suhteellisen nopeuden tukeminen sekä jopa 1000 metrin kommunikointietäisyyden takaaminen. [20] IEEE 802.11p:n avulla tiedonsiirtonopeuden huippu on 27 Mb/s [27].

WAVE (engl. wireless access in vehicular environment) käyttää pohjanaan standardiperhettä IEEE 802.11, sillä tekniikka on todettu vakaaksi. Eri valmistajien ajoneuvojen ja tienvarsi-infrastruktuurin välisen kommunikoinin yhteensopivuuden varmistaminen vaatii vakaata ja luotettavaa standardia. Teknologia koostuu IEEE 802.11p:n lisäksi standardista IEEE 1609. Eri IEEE 1609-standardit määrittävät protokollapinon muut kerrokset. ETSI (engl. European Telecommunications Standards Institute) vastaa Euroopassa standardoinnista ja standardina on ITS-G5, joka käyttää 5 GHz:n

taajuuskaistaa. ETSI ITS-G5 käyttää myös IEEE 802.11p:tä määrittelemään OSI-mallin alimmat kerrokset, MAC-kerroksen ja fyysisen kerroksen. ITS-G5 käyttää ETSI:n omaa standardia ylemmille protokollakerroksille. [22] WAVE ja ITS-G5 ovat toisiaan vastaavia teknologioita, WAVE yhdysvaltalainen ja ITS-G5 eurooppalainen.

Ajoneuvojen kommunikoinnissa käytetään erilaisia antureita, kuten lidar-anturia eli valotutka-anturia (engl. Light Detection and Ranging), tutkia sekä kameroita, joiden keräämää tietoa välitetään V2X-ympäristössä. Jokainen anturi tuo eri tietoja esille ja jokaisella anturilla on omat rajoitteensa. Tämän vuoksi antureista on hyvä muodostaa kokonaisuuksia. Valotutkan toiminta perustuu anturista lähetettävään laservaloon. Esteistä ja esineistä heijastuneen valon perusteella voidaan muun muassa mitata etäisyyksiä ja niiden avulla voidaan muodostaa tarkka kolmiulotteinen malli ympäristöstä. Valotutkan heikkouksia ovat sen suuri kustannus, lyhyt käyttökantama (noin 140 metriin asti) sekä joidenkin materiaalien heikko valon heijastaminen. Tutkat ovat valotutkia edullisempia. Tutkat toimivat lähettämällä radioaaltoja, jotka heijastuvat eri esineistä ja esteistä takaisin. Heijastuneen aallon perusteella voidaan mitata etäisyyksiä. Tutkan heikkoutena on kuitenkin metallisten esineiden ja paikallaan olevien esineiden tunnistamisen heikentyminen verrattuna muihin antureihin. Tutkan etuna on sen varma toiminta myös huonoissa sääolosuhteissa. Infrapuna-antureilla jalankulkijoiden sekä pyöräilijöiden tunnistus sujuu jopa pimeässä. Ultraääniantureilla voidaan tarkasti paikantaa lähellä olevia kohteita ja tämä on hyödyllistä esimerkiksi pysäköinnissä. Kamerajärjestelmillä voidaan kerätä paljon tietoa laajalta alueelta, mutta kamerapohjaisten järjestelmien algoritmeilla ei voida tarkastella tietoa yhtä tarkasti kuin ihmissilmin. Muuttuvat ympäristötekijät vaikeuttavat entisestään kameroiden tunnistuskykyä. Siksi onkin tärkeää, että eri antureita sijoitetaan ympäri ajoneuvoja siten, että tietyn ryhmän anturin heikko toiminta jossain tilanteessa ei heikennä kokonaisuuden toimintaa. Anturien integrointi toisten anturien kanssa auttaa luomaan tarkemman havaintokyvyn ympäristöstä kuin mitä yksittäisellä anturilla on mahdollista luoda. [25]

Ajoneuvoissa käytetään myös ajoneuvoihin asennettuja GPS-järjestelmää. GPS:n avulla ajoneuvon sijainnin tarkkuus voi kuitenkin ideaalisissakin tilanteissa näyttää sijainnin jopa metrien päähän todellisesta. Tämän vuoksi ajoneuvoissa voidaan käyttää INS-järjestelmää (engl. Inertial Navigation System), eli inertiaalipaikannusjärjestelmää, joka koostuu ajoneuvoon asennetuista antureista. Näitä antureita ovat muun muassa kiihtyvyysmittarit ja gyroskoopit. INS-järjestelmän avulla laitteen paikannus toimii luotettavammin kuin pelkkää GPS-paikannusta käyttäen. INS-järjestelmä tarvitsee kuitenkin GPS-signaaleja, sillä jo kymmenen sekunnin kuluttua GPS-signaalin kadottamisesta myös INS-järjestelmän paikannusvirhe nousee noin metriin. [25]

Ajoneuvoissa käytetään siis paljon erilaisia antureita ja tämän vuoksi ajoneuvojen anturijärjestelmistä tulee helposti monimutkaisia sekä hintavia. Erilaisia sensoreita hyödyntämällä voidaan mitata ja tarkkailla monia eri muuttujia, jolloin älykkäät ajoneuvot voivat toteuttaa

toimintaansa varmemmin ja tehokkaammin. Ajoneuvojen varustelua suunniteltaessa on pidettävä mielessä anturien tuomat hyödyt sekä kustannukset.

3.3 Pitkän kantaman viestintä

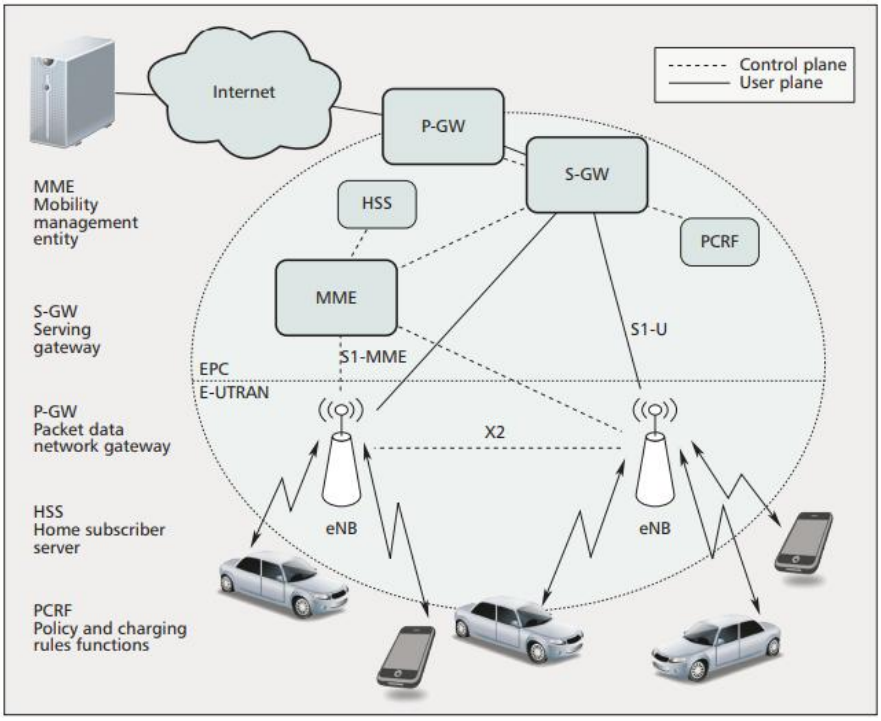
Ajoneuvojen tietoliikenteen toteutuksen yhtenä haasteena on ajoneuvojen suuri nopeus. Ajoneuvojen olisi hyvä yhdistää tukiasemiin portaattomasti ja viiveettä. Mobiiliverkkojen integrointi ajoneuvojen verkkoon on tämän vaatimuksen vuoksi tärkeä osa kokonaisuutta.

LTE (Long Term Evolution) on 3GPP:n suunnittelema mobiiliverkkotekniikka ja viralliselta nimeltään 3GPP Long Term Evolution. Aikaisin versio LTE:stä ei kuulu 4G-teknologiaan vaan se kehitettiin jo 3G:n aikana UMTS-systeemin (engl. Universal Mobile Communication System) pohjalta. UMTS puolestaan kehittyi GSM:n (engl. Global System for Mobile Communications) pohjalta. LTE ei täyttänyt 4G-teknologialle asetettuja vaatimuksia lataus- ja lähetysnopeuksien suhteen, joten sen seuraajaksi kehitettiin LTE-Advanced. LTE-Advanced on taaksepäin yhteensopiva LTE:n kanssa. [9] LTE:n taajuusalueet Suomessa ovat 450 MHz, 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2000 MHz sekä 2600 MHz [26]. Yleisesti puhekielessä käytetään termejä 4G, LTE sekä LTE-Advanced sekaisin ja yksinkertaistuksen vuoksi tässä työssä käytetään termiä LTE, joka nyt kattaa edellä mainitun. LTE:n tiedonsiirtonopeudet alalinkin suuntaan eli latausnopeus on jopa 300 Mb/s ja ylälinkin suuntaan eli käyttäjältä verkkoon, ns. lähetysnopeus, jopa 75 Mb/s. LTE-A:n tapauksessa latausnopeus voi olla jopa 1 Gb/s. [14]

Alalinkin (downlink) suuntaan LTE hyödyntää OFDMA-tekniikkaa (engl. Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Mikäli virtavahvistimia ei käytettäisi tukiasemissa, signaali vuotaisi vierekkäisille taajuusalueille. Tästä aiheutuisi muiden vastaanottolaitteiden häiriintymistä, joka ei ole toivottu asia. Virtavahvistimien hintaan vaikuttaa se, että ne on suunniteltu LTE:n alalinkin tukiasemaan, jotta vältyttäisiin signaalin vuotamiselta viereisille taajuusalueille. Tämä aiheuttaisi häiriöitä vastaanottimissa. OFDMA-tekniikan avulla käytettävissä oleva taajuuskaista jaetaan vierekkäisiin apukantoaaltoihin (sub-carrier), jotta tietoa voidaan jakaa tehokkaasti. OFDMA:n avulla voidaan jakaa useampi kantoaalto yhdelle asiakaslaitteelle kerrallaan. Kun lähetetyn tiedon määrä pysyy samana, niin jokaisen apukantoaallon tiedonsiirtonopeus pienenee, jonka ansiosta symbolikesto pitenee ja tämän takia virheiden määrä pienenee. OFDMA ei sovellu käytettäväksi LTE:n ylälinkin (uplink) suuntaan, sillä ylälinkin mobiililähettimen tulee olla edullinen eikä täten niissä voida hyödyntää kalliita virtavahvistimia, joita käytetään tukiaseman lähettimissä. Ylälinkin suuntaan LTE käyttää SC-FDMA-tekniikkaa (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Myös SC-FDMA:n avulla voidaan jakaa taajuuskaista vierekkäisiin apukantoaaltoihin, mutta näistä vain yksi

aalto jaetaan yhdelle asiakaslaitteelle. SC-FDMA:n avulla lähetyksen teho voidaan pitää alhaisena. [9]

LTE-verkon rakenne korkealla tasolla koostuu kolmesta pääkomponentista. Käyttäjälaitteesta (UE, engl. user equipment), E-UTRAN:sta (engl. evolved UMTS terrestrial radio access network) sekä EPC:stä (engl. evolved packet core). EPC kommunikoi ulkopuolisen verkon, kuten internetin, kanssa. E-UTRAN kommunikoi päätelaitteelta tulevan informaation tukiaseman eNB (engl. evolved Node B) kautta EPC-arkitehtuurin rajapintaan sekä muiden eNB-tukiasemien kanssa. EPC:n kautta luodaan yhteys internetiin. EPC koostuu pääkomponenteista MME (engl. mobility management entity), S-QW (engl. serving gateway) ja P-GW [engl. packet data network (PDN) gateway]. eNB-tukiasemat yhdistävät käyttäjälaitteet mobiiliverkkoon. Tukiasemat kommunikoivat sekä alalinkin että ylälinkin kanssa. [9] Kuvassa 6 on LTE-verkon arkkitehtuuri, josta huomataan että päätelaite voi olla puhelimen lisäksi ajoneuvo.



Kuva 6. LTE-verkon arkkitehtuuri [14].

C-V2X (engl. Cellular Vehicle-to-everything) on 3GPP:n Rel. 14 -julkaisussa määritetty teknologia jolla tarkoitetaan ajoneuvosta kaikkeen tapahtuvaa kommunikointia hyödyntämällä mobiiliverkkoja. C-V2X hyödyntää sekä LTE-verkkoa että 5G-verkkoa kommunikoinnissa, joten käyttäjä voi hyödyntää jo olemassa olevaa mobiiliverkon infrastruktuuria hyödyksi ITS-sovelluksissa. Vaikka terminä C-V2X kattaa kummankin verkon käytön, viitataan termillä C-V2X useimmiten pelkkää LTE:tä hyödyntävään tekniikkaan. Puolestaan NR V2X (engl. New Radio Vehicle-to-Everything) viittaa aina 5G-verkkoa hyödyntävään tekniikkaan ja näillä tarkennuksilla tässä työssä käytetään tätä

karkeaa erottelua puhuttaessa kummastakin ajoneuvosta kaikkeen mobiiliverkon kautta tapahtuvaa kommunikointia. [20]

C-V2X käyttää kahta eri radiorajapintaa. LTE-Uu-rajapinnassa viestintä toteutetaan eNB-tukiaseman ja käyttäjälaitteen välillä ilmarajapintaa käyttäen. Uu-rajapintaa käyttävät laitteet lähettävät ylälinkin suuntaan viestin tukiasemalle, jonka jälkeen viesti välitetään tukiasemalta vastaanottavalle käyttäjälaitteelle alalinkin suuntaan. Uu-rajapinnan avulla voidaan hyödyntää mobiiliverkon ydintä, jonka ansiosta pidemmät kommunikointietäisyydet ovat mahdollisia. Myös suuremmat tiedonsiirtonopeudet onnistuvat Uu-rajapinnan kautta. Toinen käytettävä radiorajapinta on PC5. Lähetettävä paketti koostuu PC5-rajapinnassa sekä lähetettävästä datakomponentista että sivulinkin hallintatiedosta (SCI, engl. sidelink control information). PC5-rajapinnassa käytetään sivulinkkikanavaa, jonka avulla suorat V2X-yhteydet toteutetaan. Käytännössä tämä tarkoittaa kahden V2X-laitteen välistä kommunikointia keskenään. Tällöin kommunikointi onnistuu ilman, että jokaisen lähetettävän ja vastaanotettavan paketin täytyy kulkea eNB-tukiaseman kautta. PC5-rajapinnan käyttö onnistuu siis myös ilman tukiasemaa, mikäli sellaista ei kantaman sisällä ole. PC5:n voidaan ajatella olevan C-V2X:n sisällä lyhyen kantaman viestintää ja Uu:n pitkän kantaman viestintää. [20]

NR V2X sekä 802.11bd ovat uusia, kehitteillä olevia teknologioita. Uuden 802.11bd-standardin suunnittelun tavoitteena on parantaa suorituskykyä 802.11p:hen verrattuna merkittävästi. 802.11bd on taaksepäin yhteensopiva 802.11p:n kanssa. Aiemmin mainittu NR V2X tarkoittaa siis 5G:tä hyödyntävää teknologiaa mutta se ei kuitenkaan ole taaksepäin yhteensopiva LTE:tä hyödyntävän C-V2X:n kanssa. Tämän vuoksi jossain vaiheessa tulevaisuutta uudet ajoneuvot tullaan varustelemaan kumpaakin teknologiaa tukevilla komponenteilla, millä pyritään takaamaan kummankin teknologian samanaikainen käyttö ja yhteensopivuus. [20] Mikäli alkuvaiheessa NR V2X -teknologiaa tukevien komponenttien tultua markkinoille käytettäisiin vain niitä komponentteja uusissa ajoneuvoissa, olisi kattavuus puuttellista ja ajoneuvojen toimintakyky selkeästi heikompi kuin molempia teknologioita tukevia komponentteja käyttäessä. Tämä johtuisi siitä, ettei infrastruktuuri olisi levinnyt riittävästi kattamaan myös 5G-yhteyksiä. Työn kannalta ne eivät vielä kuitenkaan ole tärkeässä roolissa eikä niiden laajempi esittely ole tarpeen.

4 RADIOTEKNIIKKA KAIVOSTEOLLISUUDEN ÄLYKKÄISSÄ AJONEUVOISSA

4.1 Tietoliikenteen tarve avokaivoksissa

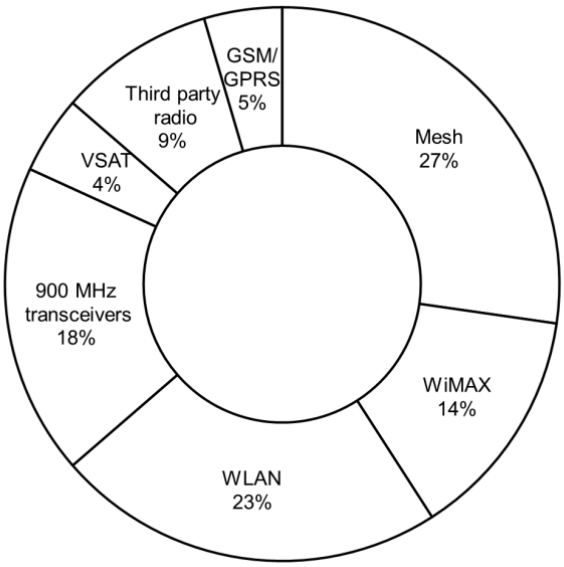
Tietoliikenteen mahdollistamat autonomisuus ja etäohjattavuus ovat kaivosteollisuudessa merkittäviä etuja. Kaikki kaivostyön vaiheet jouduttiin ennen toteuttamaan siten, että ihmiset operoivat laitteita fyysisesti paikan päällä, mikä aiheuttaa erilaisia riskejä. Kaivosteollisuuden historian aikana kaivosten vaaralliset ympäristöt ovat vaatineet tuhansia ihmishenkiä, mikä on lisännyt halua panostaa turvallisuuteen [16]. Tässä työssä kaivosteollisuudessa käytettävistä porauslaitteista, kuten Sandvikin esimerkkilaitteesta, puhutaan jatkossa yksinkertaisesti porauslaitteina ja oletetaan niiden viittaavaan kaivosteollisuudessa käytettyihin porauslaitteisiin.

Kaivoksien turvallisuuteen vaikuttavat useat eri tekijät. Kaivosympäristön huonokuntoiset ja epätasaiset tiet voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa laitteiden pyörähdyksiä, sillä maasto on karua ja irtonaista, mikä raskaan ja toistuvan liikenteen takia lisää riskiä onnettomuuksille. Kaivoslaitteet ovat äänekkäitä, jolloin työntekijöiden kuulovauriot ovat mahdollisia. Eri kaivokset keskittyvät eri materiaalien keräämiseen ja ympäristölle haitallisten materiaalien kerääminen on riskitekijä sekä ympäristölle että kaivostyöläisille kuin myös kuljetustien käyttäjille. Kaivoksilla liikkuu samanaikaisesti useita raskaita ajoneuvoja, minkä vuoksi on jatkuvasti riski eri laitteiden törmäyksille. Ajoneuvojen väliset kolarit ovat riski jo selvällä näkyvyydellä, mutta kaivoksien ympäristö lisää riskiä entisestään. Kaivosten tiet ovat usein myös ahtaita sekä hankalissa paikoissa. Tämän vuoksi kaivoksilla voi olla huono näkyvyys, joka pahenee entisestään ympäristön suuren pöly- ja mutamäärän vuoksi. [17] Kaivoksissa voi myös syttyä tulipaloja, jotka ovat varsinkin maanalaisissa kaivoksissa erittäin vaarallisia. Sähköpalot ovat yleisimpiä tulipalojen syitä kaivoksissa.

Tietoliikennejärjestelmien ja tietoverkkojen soveltaminen kaivosteollisuuteen on turvallisuuden ja tehokkuuden kannalta välttämätöntä. Näiden järjestelmien avulla on mahdollista vähentää työntekijöiden läsnäoloa kaivosympäristöissä, mikä johtaa suoraan siitä syntyvien kulujen vähenemiseen sekä edellä mainittujen riskien minimointiin. Anturien avulla voidaan tarkkailla monia asioita ja yhtenä esimerkkinä siitä toimii polttoainehyötysuhteen seuraaminen. Seuraamalla polttoainehyötysuhdetta ja tarpeen mukaan huoltamalla laitetta laitteen käyttöikä pitenee. Anturien avulla voidaan seurata muitakin asioita, jotka vaikuttavat muun muassa laitteen käyttöikään sekä laitteistovikojen ja huoltoaikojen ennaltaehkäisevään vähentämiseen. [16][11]

4.2 Tietoliikenteen toteutus avokaivoksissa

Luvussa 3. esiteltiin yleisesti ajoneuvojen tietoliikennettä sekä siihen liittyviä teknologioita. Ne eivät ole sidottuja vain henkilöautoihin sekä julkiseen liikenteeseen, sillä näille teknologioille on myös käyttöä teollisuudessa. Kaivosteollisuus hyötyy älykkäiden ajoneuvojen toteutuksista sekä tietoliikenteestä, kuten luvussa 4.1 on esitetty sekä pohjustettu sen tarvetta.



Kuva 7. Langattoman infrastruktuurin teknologioiden jakauma avokaivoksilla [24].

Tietoverkkoinfrastruktuuria on jo olemassa eri avokaivoksilla ja sen rakenne on usein samanlainen avokaivoksesta riippumatta. Avokaivoksilla hyödynnetään WLAN- ja mesh-teknologiaa, joka vahvistaa WLAN:in kantamaa, sekä 900 MHz:n teknologioita. WiMAX (engl. Worldwide Interoperability for Microwave Access) on myös yleisesti käytetty teknologia. Ei-kriittiseen tiedonsiirtoon käytetään useilla kaivoksilla myös GSM-tekniikkaa. Satelliittipaikannusta hyödynnetään myös ei-kriittisissä tilanteissa sekä tilanteessa, jossa kaivoksen ja etäohjaustukikohdan etäisyydet ovat suuret. Tästä syystä satelliittipaikannusjärjestelmät ovat yhdistettynä muihin ratkaisuihin. [23][24] Kuvassa 7 on esitettynä langattoman infrastruktuurin teknologioiden jakauma avokaivoksilla, josta huomataan neljän teknologian olevan selkeästi muita käytetympi.

WLAN:in avulla kaivoksilla on toteutettu dataintensiivisiä sovelluksia kuten voice over IP (VoIP) sekä kameravalvontaa. Useita WLAN-verkon liityntäpisteitä (access points) asennetaan yhdelle

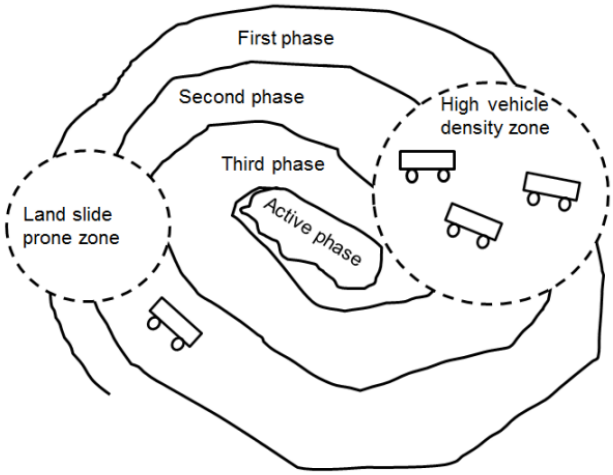
kaivokselle. Verkon liityntäpisteiden avulla voidaan kytkeä useampi laite samaan langattomaan verkkoon, mikäli laite on riittävän etäisyyden sisällä liityntäpisteestä. Mesh-teknologian avulla WLAN-yhteys on mahdollista laajentaa kattavammalle alueelle, sillä yksin WLAN-tekniikka onnistuu kattamaan vain suppean osan laajasta kaivosympäristöstä. [23] Mesh-verkot soveltuvat hyvin avokaivosten kaltaiseen jatkuvasti muuttuvaan ympäristöön, jossa on tarvetta konfiguroida verkon solmukohdat. Mesh-verkko on helposti skaalattavissa. Mesh-verkko on hyvä teknologia varsinkin niissä tapauksissa, kun näköyhteyseteneminen ei ole mahdollista. [24] 900 MHz:n viestintä ei sovellu laajan kantaman tarpeisiin vaan paremmin ainoastaan pienen tiedonsiirtonopeuden sovelluksiin ja vaatii toimiakseen esteettömän näkölinjakulkeutumisen. [24] WiMax:n avulla voidaan mesh-teknologian tapaan kattaa laajoja alueita ja WiMAX:a käytetään samoihin sovelluksiin kuin mesh- ja WLAN-teknologioita. Näihin kuuluvat muun muassa kaivosajoneuvojen nopeuksien seuranta, törmäyksenestojärjestelmä, tuotannon seuranta, kameravalvonta sekä VoIP. [24]

Kaivoksien langatonta infrastruktuuria suunniteltaessa tulee ottaa huomioon monta asiaa. Alueen topologia sekä infran skaalautuvuus tulee ottaa huomioon, sillä kaivosalueet laajenevat jatkuvasti, jolloin verkon infrastruktuurin tulee olla joustava ja helposti muokattavissa ja skaalattavissa. Kaivosten jatkuvan ja vuosia kestävän laajenemisen vuoksi tulee kiinnittää huomiota eri aktiivisten alueiden samanaikaiseen kattamiseen. Ottamalla tämän seikan huomioon suunnittelussa, etäasema kykenee valvomaan eri alueiden samanaikaista toimintaa. Langattoman liikenteen infrastruktuuri voi olla hybridimallinen ja toimia paikallisesti sekä toteuttaa myös pitkän kantaman viestinnän. [24] Kaivoksien ympäristö on epävakaa ja riski kaivoksen penkkojen (bench) rakenteellisiin muutoksiin on suuri. Tämä tulee ottaa huomioon infrastruktuuria suunniteltaessa, sillä vikatilanteessa infran kaatuminen voi kaataa verkon toiminnan. [24]

Kuvassa 8 on esitettynä avokaivoksen eri vaiheet, josta huomataan kaivoksen jatkuvasti laajenevan ja vaihtavan muotoaan siirryttäessä uuteen vaiheeseen. Avokaivoksen ensimmäinen vaihe (First phase) tarkoittaa kartoituksen, suunnittelun ja valmistelujen jälkeen tapahtuvaa kaivostoimintaa. Vaiheet etenevät alas kohti aktiivista vaihetta (Active phase) spiraalimaisesti samalla toimintaperiaatteella. Porauslaitteet poraavat reikiä maahan ja räjäytysainetta laitetaan reikiin ja räjäytetään, jonka jälkeen maa-aines kuljetetaan jatkokäsittelyyn. Työvaiheen lopussa nämä kohdat tasoitetaan ja näin syntyy penkkoja, joita pitkin eri ajoneuvot ajavat joko kaivokseen alaspäin tai kaivoksesta pois ylöspäin. Kaivoksen jotkin alueet voivat olla tiheästi liikennöityjä, jolloin voi syntyä näistä ajoneuvoista koostuva tiheä kohta (High vehicle density zone). Kuvaan on merkitty myös epävakaa alue, joka voi olla altis esimerkiksi maanvyörymille (Land slide prone zone).

Kuvassa 8 on työn kannalta avokaivoksen mielenkiintoisin osa. Avokaivokset ovat kuitenkin osa suurempaa kokonaisuutta ja ajoneuvojen kannalta on hyvä tuoda esille siirtymiä eri toiminta-alueiden välillä. Avokaivoksen ja etäohjaustukikohdan välinen etäisyys voi olla jopa 10 kilometriä.

Myös kuorman tyhjennykseen ja käsittelyyn tarkoitetut alueet voivat sijaita 10 kilometrin päässä avokaivoksesta. [24]



Kuva 8. Eri toimintavaiheet avokaivoksilla [24].

Älykkäiden kaivosteollisuuden ajoneuvojen käyttö perinteisten kaivosajoneuvojen sijaan voi vähentää kaivoksen kokonaiskustannuksia. Parreiran väitöskirjan [29] mukaan taloudellinen säästö voi olla merkittävä. Parreira toteutti väitöskirjassaan tutkimuksen simuloinnilla käyttäen olemassa olevan avokaivoksen tietoja ja mittauksia. Tutkimus rajattiin maansiirtoajoneuvoihin ja kaivoksen, Lucyn, kahdeksaan eri tieosuuteen, joita maansiirtoajoneuvot kulkevat. Simulaation perusteella voitiin määrittää renkaiden kuluma, polttoaineen kulutus, yhteen sykliin kulunut aika sekä syklien määrä päivää ja ajoneuvoa kohden, eri syistä johtuvat odotusajat, siirtoajoon käytetty aika sekä päivän tuotanto tonneissa mitattuna. Simulaatiossa käytettiin myös vuoronvaihtoon, taukoihin, suunnittelemattomiin sekä suunniteltuihin huoltoihin käytettyä aikaa. Tutkimuksesta selviää, että autonomisten ajoneuvojen käyttö vähentää renkaiden kulumaa, polttoaineen kulutusta ja on taloudellisesti kannattavampi vaihtoehto kuin manuaalinen ajoneuvo. Taloudelliset säästöt tulevat kulutuksen vähenemisen lisäksi myös ajoneuvojen huoltoon ja ylläpitoon liittyvien kustannusten vähenemisenä. [29] Tutkimus ei kattanut koko kaivosta, mutta vastaavia tutkimuksia olisi hyödyllistä toteuttaa eri kaivoksiin sekä eri laitteisiin kuten porauslaitteisiin.

Tässä esimerkissä käytetty kaivosteollisuuden ajoneuvo poikkeaa toiminnaltaan huomattavasti porauslaitteista. Kuitenkin tämän esimerkin pohjalta voidaan luotettavasti ennustaa säästöjen siirtyvän myös porauslaitteisiin. Renkaiden ja polttoaineen kulumisen lisäksi esimerkiksi porauslaitteiden erilaiset porauspäiden terät sekä porapuomit kestäisivät kulutusta pidempään kuin perinteisillä porauslaitteilla, joissa ei ole älykkäitä ominaisuuksia.

4.3 DI650i porauslaite

Sandvik tarjoaa erilaisia laitteita, palveluja sekä teknisiä ratkaisuja kaivosteollisuuden lisäksi myös urakointi- ja infrateollisuuteen. Työn osalta tässä esitetään tärkeimmät eli kaivostoiminnan ja kiven louhinnan kalustoa. Laitteita on moneen käyttökohteeseen, joita on listattu Sandvikin kotisivuilla [30]. Näihin kuuluvat lastaus ja kuljetus, tunnelinteko, jyrsintä, murskaus ja seulonta, louhinta, kallioporaus, rikotus ja purku. Työssä suurimman huomion toistaiseksi ovat saaneet maansiirtoajoneuvot eli dumpperit, joita myös Sandvik valmistaa. Muita kaivos- ja urakointiteollisuuden laitetuotantoon kuuluvia ryhmiä ovat poraus- ja pultituslaitteet, maanalaiset lastauskoneet, kallioporakalusto ja porakoneet sekä mekaanisen rouhinnan laitteet. [30]

Kuvat 9 ja 10. DI650i porauslaite [31].

Leopard™ DI650i on dieselkäyttöinen maanpäällinen uppovasaraporauslaite, jossa on mahdollistettu skaalautuva automaatio sekä älykkäät ominaisuudet. Laitteessa on kallistettava ja liikuteltava kiinteä puomi, turvallinen ja hiljainen iCab-ohjaamo sekä muita hyödyllisiä ominaisuuksia. [13][30] Kuvissa 9 ja 10 ovat yleiskuvat DI650i-laitteesta, josta nähdään myös ohjaamon sijainti suhteessa muuhun laitteeseen. Porauslaitteen antennien ominaisuuksia on kerätty taulukkoon 2. Joidenkin antennien polarisaatiota ei mainita datalehdissä. Taulukkoon 3 on kerätty esimerkkejä DI650i-porauslaitteen hyödyntämistä kommunikointiteknologioista, jotka käyttävät laitteeseen asennettuja antenneja.

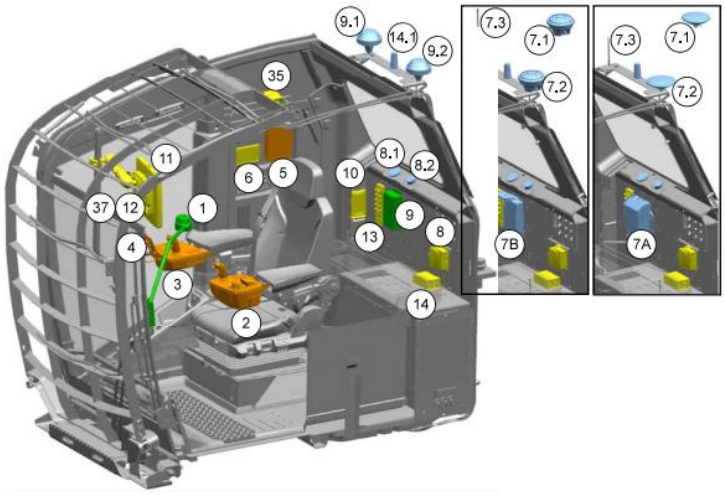
Taulukko 2. Porauslaitteen antennien ominaisuuksia. [32][33][34][35][36][37][38][39].

Antenni	**Käyttökohde ja taajuus**	**Polarisaatio**	**Antennityyppi**	**Huippuvahvistus (dBi)**	**Maksimi syöttöteho (W)**
2J7426M Iridium	1610-1626 MHz ja 2,4 GHz	RHCP	Ground plane dependent	3,8	10
Blaupunkt Club T48 DAB	AM 525-1705 kHz; FM 87.5-108 MHz; Band III 174-240 MHz	-	Rod	-	-
Trimble GA830	GNSS Useita taajuuksia	-	-	-	-
Satel Gainflex 435-470	435-470 MHz	vertikaalinen	Ympärisäteilevä puoliaalto, ground plane	4	-
Plantec K60ZAM	GSM 850/900/1800/1900 MHz	-	Mikroliuska (planar combination)	1 (900 MHz); 3 (1800 MHz); 4 (2100 MHz); 25(GPS)	10
Plantec K98LLVR	GSM 850/900/1800/1900 MHz + UMTS	-	Mikroliuska (planar combination)	-9 (700 MHz); 0 (800 MHz); 3 (900 ja 1800 MHz); 1 (2100 MHz/UMTS); 2 (2600 MHz)	10
Moxa WDB ANM 0502	2.4-2.5 GHz, 2.1-5.9 GHz	Lineaarinen	ympärisäteilevä	5 (2.4 GHz); 2 (5 GHz)	2
MobileMark RM3-2400	2.4-2.5 GHz	-	Ground plane independent, ympärisäteilevä	5	10

Taulukko 3. Porauslaitteen antenneja käyttävät kommunikointiteknologiat [2].

Teknologia	antennien lukumäärä ohjaamon läheisyydessä
WLAN	1
LTE	1
GNSS (GPS/GLONASS)	3
AM/FM	1
GSM	2
Bluetooth	1

Sandvikin porauslaite DI650i hyödyntää useaa eri kommunikointiteknologiaa laitteessa käytettävien antennien ja antennikokonaisuuksien avulla. Laite käyttää GPS-pohjaista navigointia ja tiedonkeruuta. Tutkittava versio laitteen antennikonfiguraatiosta on kuvan 11 vaihtoehdon 7B mukainen eli laite käyttää Trimble GNSS -yksikköä (Trimble GNSS Unit). Osa antenneista muodostaa kokonaisuuksia keskenään, kuten Trimble GNNS -yksikkö, joka koostuu kahdesta GPS/GLONASS- sekä yhdestä UHF-taajuusantennista (Kuvassa 11 vaihtoehdon 7B antennit 7.1, 7.2 ja 7.3). Datansiirtoyksikkö (DTU, engl. Data transfer unit) koostuu yhdestä GPS-antennista ja yhdestä 4G/LTE-antennista (kuvassa 11 antennit 8.1 ja 8.2). WLAN-kommunikointiyksikkö koostuu yhdestä 2,4 GHz:n antennista (kuvassa 11 antenni 14.1) ja radiovastaanotin (RRC, engl. Radio receiver) kahdesta 2,4 GHz:n antennista. Radiovastaanotin on sijoitettu ohjaamon läheisyyteen, ohjaamon taakse. [2]



Kuva 11. DI650i:n ohjaamo, siniset komponentit antenneja [2].

5 YHTEENVETO

Tietoliikenteen hyödyntäminen älyliikenteessä sekä kaivosteollisuudessa tuo kumpaankin ympäristöön paljon yhteneviä hyötyjä. Kummassakin ympäristössä hyödynnetään samoja teknologioita sekä osin samoja laitteita, kuten antenneja ja antureita. Kaivosteollisuus kuitenkin eroaa merkittävästi julkisesta tieliikenteestä: kaivosalueilla ajonopeudet ovat matalammat, ajoneuvot ovat raskaampia sekä näkyvyys on haasteellisempaa pölyn ja mudan vuoksi. Kaivosajoneuvoja on useaan eri tarkoitukseen ja jokaisella ajoneuvolla on omat ominaisuutensa, jotka poikkeavat toisistaan. Esimerkkejä ovat maansiirtoajoneuvon suorittama kippaus ja porauslaitteen porapäällä suoritettava reikien poraus. Tieliikenteessä toiminnot liittyvät pääosiin ajoradalla ajamiseen. Näiden mekaanisten toimintojen eroavaisuuksien vuoksi kaivosajoneuvojen vaatimukset tietoliikenteen kannalta poikkeavat tieliikenteen ajoneuvoista muun muassa tiedonsiirtonopeuden ja viiveen osilta.

Älykkäät kaivosajoneuvot sekä langattoman tietoliikenneverkon infrastruktuuri kaivosalueilla poikkeavat vaatimuksiltaan tieliikenteestä. Kaivosalueilla siirryttäessä kohti älykkäistä ajoneuvoista muodostuvia laitteistokokonaisuuksia tulee päätöksenteossa ottaa huomioon kaivosteollisuudelle ominaisia muuttujia. Taloudellisten laskelmien laatiminen Parreiran väitöskirjan [29] tapaan on yksi esimerkki, jolla voidaan arvioida taloudellista kannattavuutta perinteisten ja älykkäiden kaivosajoneuvojen investoinnin välillä. Tämän lisäksi pitää tietenkin ottaa huomioon työturvallisuuteen, ympäristöön sekä porattavaan maaperään liittyviä sekä monia muita yksityiskohtaisia asioita. Yhteenvetona voi todeta, että älykkäät kaivosajoneuvot yleistyvät ja kaivosalueiden toiminta muuttuu kohti etäohjattavuutta ja automaatiota.

LÄHTEET

[1] Hubregt J. Visser, Antenna theory and applications, John Wiley & Sons Ltd, 2012

[2] DI650i Operator's Manual, ei-julkinen dokumentti, käytetty työnantajan luvalla.

[3] Arto Lehto, Radioaaltojen maailma, Tammer-Paino, 2006

[4] A. Räisänen & A. Lehto, Radiotekniikan perusteet, 13. painos, Hakapaino Oy, 2011

[5] Harvey Lehpamer, Microwave transmission networks (2nd Edition), McGraw-Hill Professional Publishing, 2010

[6] Christopher Coleman, An introduction to radio frequency engineering, Cambridge University Press, 2012

[7] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrumrevised.png#/media/File:EM_spectrum_fi.svg g, (lainattu 25.3.2023)

[8] E. Kaplan & C. Hegarty, Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third Edition, Artech House, 2017

[9] Christopher Cox, An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications, Hoboken: WILEY, 2012

[10] https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=fresnel+ellipsoid&title=Special:MediaSearch&go=Go&type=image, (lainattu 23.3.2023)

[11] CURWB Deployment for Autonomous Operations in open-pit mining, Cisco Systems Inc., 2022, saatavissa (viitattu 2.4.2023): https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Verticals/Industrial_Automation/IA_Verticals/Mining/Mining2_0-CVD/IA-Mining-DG.pdf

[12] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_waves.png (lainattu 25.3.2023)

[13] Jari Läntinen, Sandvik evolves Leopard™ DI650i to support fully autonomous blathole drilling, 2021, saatavissa, (viitattu 2.4.2023): https://www.rocktechnology.sandvik/en/campaigns/leopard-di650i/

[14] G. Araniti et al, LTE for vehicular networking: a survey, IEEE Communications Magazine (Volume: 51, Issue: 5), 2013, pp. 148–157, saatavissa: https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/6515060

[15] B. Hofmann-Wellenhof et al., GNSS- Global Navigation Satellite Systems GPS, Glonass, Galileo, and more, Vienna : Springer Vienna : Imprint : Springer, 2008

[16] Alessandro Tomasi, Reliable communication in mine environments for autonomous vehicles, 2016, saatavissa: http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1078420/FULLTEXT01.pdf

[17] Diptesh V. Kadam, Prioritizing Road Safety in Mines, Cyient, 2023, saatavissa (viitattu 07.10.2024): https://www.cyient.com/blog/prioritizing-road-safety-in-mines

[18] Ronald K. Jurgen, V2V/V2I communications for improved road safety and efficiency, SAE International, Warrendale, Pennsylvania : SAE International, 2012

[19] S. Zhang et al, Vehicular communication networks in the automated driving era, IEEE Communications Magazine (Volume: 56, Issue: 9), 2018, pp.26–32 https://ieeexplore.ieee.org/document/8466351

[20] G. Naik et al, IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications, IEEE Access 7, 2019, pp. 70169–70184, saatavissa: https://ieeexplore.ieee.org/document/8723326

[21] M. Mueck & I. Karls, Networking vehicles to everything: evolving automotive solutions, De G Press, 2018

[22] R. A. Uzcategui et al, WAVE: A Tutorial, IEEE Communications Magazine (Volume: 47, Issue: 5), 2009, pp. 126–133, saatavissa: https://ieeexplore.ieee.org/document/4939288

[23] S. Vellingiri, Energy efficient wireless infrastructure solution for open pit mine, IEEE, 2013 ICACCI, 2013, saatavissa: https://ieeexplore.ieee.org/document/6637395

[24] S. Vellingiri et al, Communication architecture for Remote Monitoring and Diagnostics in Open Pit Mine, IEEE, 2013 ICACCI, 2013, saatavissa: https://ieeexplore.ieee.org/document/6648073

[25] Scott Brundrett, Industry analysis of autonomous mine haul truck commercialization, 2014, saatavissa: https://summit.sfu.ca/item/14425

[26] Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat, Traficom, saatavissa (viitattu 06.07.2025): https://www.traficom.fi/fi/viestinta/radioluvat-ja-taajuudet/taajuuksien-suunnittelu-ja-kaytto/matkaviestinverkkojen-taajuudet

[27] S. Zeadally et al., Vehicular Communications for ITS: Standarization and Challenges, IEEE Communications Standards Magazine (Volume: 4, Issue: 1), 2020, pp. 11–17, saatavissa: https://ieeexplore.ieee.org/document/9088324

[28] K. Kiela et al, Review of V2X–IoT Standards and Framefworks for ITS Applications, Applied Sciences, 2020, saatavissa (viitattu 27.08.2025): https://www.mdpi.com/2076-3417/10/12/4314

[29] Juliana Parreira, An interactice simulation model to compare an autonomous haulage truck system with a manually-operated system, väitöskirja, University of British Columbia, 2013, saatavissa (viitattu 31.08.2025): https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0074111

[30] Kaivostoiminnan ja kiven louhinnan laitteet ja kalusto, Sandvik, saatavissa (viitattu 09.09.2025): https://www.home.sandvik/fi/offerings/tuotteet-ja-palvelut/kaivostoiminnan-ja-kiven-louhinnan-laitteet-ja-kalusto/

[31] Leopard™ DI650i, Sandvik, saatavissa (viitattu 09.09.2025): https://www.mining.sandvik/fi/products/laitteet/maanp%C3%A4%C3%A4lliset-porauslaitteet/leopard-di650i/

[32] 2J7426 Iridium datalehti, ei-julkinen dokumentti, käytetty työnantajan luvalla.

[33] Blaupunkt Club T48 DAB datalehti, ei-julkinen dokumentti, käytetty työnantajan luvalla.

[34] Trimble GA830 GNSS Antenna, Trimble, 2019, saatavissa (viitattu 18.03.2024): https://terrisgps.com/wp-content/uploads/2023/09/trimble-ga830-datasheet.pdf

[35] Satel GainFlex 435-470 datalehti, ei-julkinen dokumentti, käytetty työnantajan luvalla.

[36] Plantec K60ZAM datalehti, ei-julkinen dokumentti, käytetty työnantajan luvalla.

[37] Plantec K98LLVR datalehti, ei-julkinen dokumentti, käytetty työnantajan luvalla.

[38] Moxa ANT-WDB-ANM-0502 Series, Moxa, 2020, saatavissa (viitattu 18.03.2024): https://cdn-cms-frontdoor-dfc8ebanh6bkb3hs.a02.azurefd.net/getmedia/9390e2b1-898c-486e-a342-739f4b5cbd4d/moxa-ant-wdb-anm-0502-series-datasheet-v1.1.pdf

[39] Surface Mount & Mag-Mount 2.4 GHz & Wideband, MobileMark, 2018, saatavissa (viitattu 18.03.2024): https://www.mobilemark.com/wp-admin/admin-ajax.php?juwpfisadmin=false&action=wpfd&task=file.download&wpfd_category_id=2032&wpfd_file_id=7276&token=c6b9466756e160d6cfe06b2de4a79021&preview=1