



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# LANGATTOMAN VERKON KUORMITUSMITTAUKSET

TEKIJÄ/T: Mikko Pirskanen

|  |                            |
|--|----------------------------|
| Koulutusala<br>Tekniikan ja liikenteen ala   |                            |
| Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma<br>Tietotekniikan koulutusohjelma   |                            |
| Työn tekijä(t)<br>Mikko Pirskanen  |                            |
| Työn nimi<br>Langattoman verkon kuormitusmittaukset  |                            |
| Päiväys<br>27.11.2018  | Sivumäärä/Liitteet<br>30/0 |
| Ohjaaja(t)<br>laboratorioinsinööri Pekka Vedenpää / Savonia-ammattikorkeakoulu   |                            |
| Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t)<br>Savonia-ammattikorkeakoulu  |                            |
| Tiivistelmä<br><p>Opinnäytetyössäni perehdyttiin aluksi langattomien lähiverkkojen teoriaan. Sen lisäksi suoritettiin langattoman verkon kuormituksen mittaustöitä Savonian Opistotien ja Microkadun kampuksilla. Työn lopussa päästiin myös perehtymään WLAN-kontrollerin toimintaan käytännössä.</p> <p>Mittaukset suoritettiin Opistotiellä kuudessa luokahuoneessa, jonne on vaihdettu uudet tukiasemat. Microkadulle on valmistunut uusien opetusmenetelmien tilat, jonne tuli saada suorituskykyinen langaton verkko. Mittauksissa käytettiin Lizard Systemsin Wi-Fi Scanneria. Tulosten perusteella voitiin tehdä tarvittavia muutoksia esimerkiksi tukiasemien kanavasunnitteluun.</p> <p>Lopputuloksena saatiin langattoman verkon kuormituksesta tuloksia, joiden perusteella pystyttiin tekemään tarvittavia muutoksia verkon suorituskyvyn parantamiseksi. Saatiin myös melko kattava teoriapohjainen tietämys langattomien verkkojen toiminnasta.</p> |                            |
| Avainsanat<br>langaton, lähiverkko, WLAN, Lizard Systems, Wi-Fi  |                            |
|  |                            |

|  |                  |                  |      |
|--|------------------|------------------|------|
| Field of Study<br>Technology, Communication and Transport  |                  |                  |      |
| Degree Programme<br>Degree Programme in Information Technology   |                  |                  |      |
| Author(s)<br>Mikko Pirskanen   |                  |                  |      |
| Title of Thesis<br>Measuring Wireless Local Area Network Channel Utilization   |                  |                  |      |
| Date   | 27 November 2018 | Pages/Appendices | 30/0 |
| Supervisor(s)<br>Mr. Pekka Vedenpää, Laboratory Engineer   |                  |                  |      |
| Client Organisation /Partners<br>Savonia University of Applied Sciences  |                  |                  |      |
| <p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to become familiar with the theory behind wireless local area networks (WLANs) and to measure wlan channel utilization on Savonia's Opistotie and Mikrokatu campuses. One objective was also to learn about WLAN controllers in practice.</p> <p>The measurements took place in six classrooms on Opistotie campus and in a premise designed for teaching with new methods on Mikrokatu campus. Measurements were done with Lizard Systems' Wi-Fi Scanner. According to the measurement results, necessary changes could be made for example to the WLAN channel planning.</p> <p>As a result, results from the wireless network channel utilization were obtained, which made it possible to make necessary changes to improve the performance of the network. Also, a comprehensive theoretical knowledge of wireless networks was acquired.</p> |                  |                  |      |
| <p>Keywords<br/>wireless, network, WLAN, Lizard Systems, Wi-Fi</p>   |                  |                  |      |
|  |                  |                  |      |

## ESIPUHE

Haluan kiittää avopuolisoani jatkuvasta tuesta. Lisäksi haluan kiittää ohjaajaani Pekka Vedenpäättä mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta aiheesta sekä hyvästä ohjauksesta työn aikana.

Kuopiossa 27.11.2018

Mikko Pirskanen

## SISÄLTÖ

|   |    |
|---|----|
| TYÖSSÄ KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT.....        | 7  |
| 1 JOHDANTO .....                                | 8  |
| 2 LANGATTOMAT LÄHIVERKOT .....                  | 9  |
| 2.1 Langattomien lähiverkkojen standardit ..... | 9  |
| 2.1.1 802.11b.....                              | 9  |
| 2.1.2 802.11a.....                              | 9  |
| 2.1.3 802.11g.....                              | 9  |
| 2.1.4 802.11n.....                              | 9  |
| 2.1.5 802.11ac .....                            | 10 |
| 3 LANGATTOMIEN LÄHIVERKKOJEN TEKNIIKKAA .....   | 11 |
| 3.1 Siirtotie .....                             | 11 |
| 3.2 Siirtotien varaus.....                      | 11 |
| 3.3 Roaming.....                                | 12 |
| 4 TOPOLOGIAT .....                              | 13 |
| 4.1 IBSS.....                                   | 13 |
| 4.2 BSS.....                                    | 13 |
| 4.3 ESS.....                                    | 14 |
| 5 KANAVAT JA TAAJUUDET .....                    | 15 |
| 5.1 2,4 GHz:n taajuusalueen kanavat.....        | 15 |
| 5.2 5,0 GHz:n taajuusalueen kanavat.....        | 16 |
| 6 TIETOTURVA .....                              | 17 |
| 6.1 Salaus.....                                 | 17 |
| 6.1.1 WEP.....                                  | 17 |
| 6.1.2 WPA.....                                  | 18 |
| 6.1.3 WPA2.....                                 | 18 |
| 6.2 Tietoturvahat.....                          | 19 |
| 6.2.1 Liikenteen tarkkailu .....                | 19 |
| 6.2.2 Luvaton pääsy .....                       | 19 |
| 6.2.3 Välitävetohyökkäykset.....                | 20 |
| 6.2.4 Palvelunestohyökkäykset .....             | 21 |
| 7 VERKKOLAITTEET .....                          | 22 |

|     |                                   |    |
|-----|-----------------------------------|----|
| 7.1 | Reitittimet .....                 | 22 |
| 7.2 | Tukiasemat.....                   | 22 |
| 7.3 | WLAN-kontrollerit.....            | 22 |
| 7.4 | Päätelaitteet .....               | 22 |
| 8   | LIZARD SYSTEMS WI-FI SCANNER..... | 24 |
| 9   | MITTAUKSET .....                  | 25 |
| 9.1 | Microkadun mittaukset .....       | 25 |
| 9.2 | Opistotien mittaukset .....       | 27 |
| 10  | YHTEENVETO.....                   | 29 |
|     | LÄHTEET .....                     | 30 |

## TYÖSSÄ KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT

|            |   |
|------------|---|
| AES        | Advanced Encryption Standard, vahva salausmenetelmä.  |
| ARP        | Address Resolution Protocol, protokolla, jolla selvitetään IP-osoitetta vastaava fyysinen osoite.   |
| BSS        | Basic Service Set, peruspalveluverkko, tukiaseman kattavuusalue.  |
| BSSID      | Basic Service Set Identification, wlan-peruspalveluverkon tunnus.   |
| DCF        | Distributed Coordination Function, määrittelee kuinka asemat kilpailevat siirtotiestä.  |
| DHCP       | Dynamic Host Control Protocol, antaa verkkolaitteille automaattisesti IP-osoitteet määrättyltä väliltä.   |
| DSSS       | Direct Sequence Spread Spectrum, suorasekventointi.   |
| EAP        | Extensible Authentication Protocol, käyttäjien todennusprotokolla.  |
| ESS        | Extended Service Set, useiden tukiasemien muodostama verkko.  |
| FHSS       | Frequency Hopping Spread Spectrum, taajuushyppely.  |
| IBSS       | Independent Basic Service Set, ilman tukiasemia muodostettu verkko.   |
| IEEE       | Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö, joka määrittelee monien alojen keskeiset standardit. |
| IP         | Internet Protocol, reitittää paketteja verkkoon liitettyjen laitteiden välillä.   |
| IP-osoite  | Numeerinen osoite, joka vastaa tiettyä verkkolaiteyhteyttä.   |
| MAC-kerros | Medium Access Control Layer, hallinnoi ja ylläpitää jaetun siirtotien viestintää.   |
| MIMO       | Multiple Input Multiple Output, mahdollistaa lähetyksessä ja vastaanotossa useamman antennin käytön.  |
| Mu-MIMO    | Multiuser-MIMO, datan lähetyksessä usealla antennilla usealle laitteelle.   |
| NAT        | Network Access Translation, protokolla, joka yhdistää viralliset IP-osoitteet sisäverkon yksityisiin osoitteisiin.                              |
| NAV        | Network Allocation Vector, verkonvarausvektori, CSMA/CA:n varausaika.   |
| OFDM       | Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, tiedonsiirto tapahtuu useilla taajuuskanavilla samanaikaisesti.                                     |
| POE        | Power Over Ethernet, sähkönsiirtotekniikka Ethernet-verkon yli.   |
| SSID       | Service Set Identifier, langattoman lähiverkon tunnus.  |
| TKIP       | Temporal Key Integrity Protocol, salausprotokolla.  |
| WEP        | Wired Equivalent Privacy, 802.11:n salaus- ja todennusstandardi.  |
| Wi-Fi      | Wireless Fidelity, langaton lähiverkko.   |
| WPA        | Wi-Fi Protected Access, WEPin päivitys.   |
| WLAN       | Wireless Local Area Network, langaton lähiverkko.   |

## 1 JOHDANTO

Langattomat verkot ovat yleistyneet viimeisen kymmenen vuoden aikana valtavasti johtuen siitä, että ne tarjoavat käyttäjille liikkumisen vapauden sekä helpon yhteyden sovelluksiin ja palveluihin. Yrityksissä työtehoa saadaan kasvatettua, kun resurssit ovat saatavilla eri puolilla yrityksen tiloja eikä työntekoa ole sidottu yhteen pisteeseen. Oppilaitoksissa oppilaat voivat opiskella eri puolilla rakennusta ja suorittaa tenttejä kannettavilla tietokoneilla langattomia verkkoja hyväksikäyttäen.

Langattomia verkkoja voi nykyään käyttää monet eri päätelaitteet, kuten kannettavat tietokoneet, matkapuhelimet ja tabletit. Juuri erilaisten päätelaitteiden yleistyminen on vaikuttanut suuresti langattomien verkkojen kehitykseen. WLAN-yhteyttä suositaankin 3G- ja 4G-verkkojen yli, sillä ne tarjoavat yleensä nopeamman ja luotettavamman suorituskyvyn. Lisäksi esineiden internetin kehittyminen tulee tulevaisuudessa lisäämään langattomien verkkojen kysyntää valtavasti.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on perehtyä langattoman verkon tekniikkaan sekä suorittaa etenkin verkon kuormituksen mittauksia Savonian Microkadun ja Opistotien kampuksilla.

Opinnäytetyössä käydään läpi yleistä teoriaa langattomista verkoista, tutustutaan Savonian kampusten langattomien verkkojen nykytilanteeseen, perehdytään tukiasemien ja WLAN-kontrolloreiden toimintaan sekä suoritetaan verkon kuormitusmittauksia Opistotien ja Microkadun kampuksilla.

## 2 LANGATTOMAT LÄHIVERKOT

Langattomia verkkoja hyväksi käyttäen ihmiset voivat liittyä verkkoon ilman, että päätelaitteen tulee olla fyysisesti yhdistettynä tietoverkkoon. Tämä tarjoaa paljon joustavuutta esimerkiksi työntekoon, kun Internet, sovellukset ja sähköposti ovat käytettävissä melkein missä vain. Langattomissa verkoissa kaksi tietokonelaitetta viestii keskenään. Ne siirtävät keskenään tietoa, joka voi olla sähköpostiviestejä, web-sivuja, videota tai ääntä. Useimmiten se on dataa, kuten sähköpostiviestejä ja tiedostoja. Tieto siirretään radiosignaaleja käyttäen ja siirtotienä toimii ilma. (Geier 2005, 3-4.)

### 2.1 Langattomien lähiverkkojen standardit

IEEE alkoi kehittämään langattomien lähiverkkojen yleistä standardia 802.11 vuonna 1991, mutta se valmistui ja hyväksyttiin vasta kesällä 1997. Standardi määritteli langattoman verkon taajuudeksi 2,4 GHz ja nopeudeksi 1 ja 2 Mbps. Se myös määrittelee kolme tiedon siirtoon käytettävää menetelmää, jotka ovat taajuushyppely (FHSS), suorasekvenssi (DSSS) ja infrapunatekniikat. (Hovatta, Kiviniemi ja Somiska 2005, 11.)

#### 2.1.1 802.11b

IEEE 802.11b julkaistiin vuonna 1999. Standardi tukee enimmillään 11 Mbps siirtonopeutta ja sen siirtotaajuus on 2,4 GHz. Tiedonsiirto tapahtuu DSSS-tekniikkaa käyttäen. (Hovatta ym. 2005, 11.)

#### 2.1.2 802.11a

IEEE 802.11a julkaistiin samaan aikaan, kuin 802.11b. Sen suurin tuettu nopeus on 54 Mbps, siirtotaajuus on 5,0 GHz ja se käyttää OFDM-tekniikkaa (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) tiedonsiirtoon. (Geier 2005, 124.)

#### 2.1.3 802.11g

IEEE 802.11g julkaistiin vuonna 2003. Suurin tuettu nopeus on 54 Mbps ja sen käyttämä siirtotaajuus on 2,4 GHz. Tiedonsiirto tapahtuu OFDM-tekniikkaa käyttäen. (Geier 2005, 127.)

#### 2.1.4 802.11n

IEEE 802.11n julkaistiin vuonna 2009 ja se käyttää OFDM- ja MIMO-tekniikkaa. Siirtotaajuksina käy sekä 2,4 GHz että 5 GHz. Kaistanleveyksistä ovat tuettuna 20 MHz ja 40 MHz. Teoreettinen siirtonopeus voi olla jopa 600 Mbps. (Poole 2018.)

### 2.1.5 802.11ac

IEEE 802.11ac julkaistiin vuonna 2013 ja hyväksyttiin virallisesti tammikuussa 2014. Standardi toimii ainoastaan 5,0 GHz:n taajuusalueella. Kaistanleveyksistä ovat tuettuina 20, 40 ja 80 MHz. Standardi mahdollistaa kanavien yhdistämisen 160 MHz:n kanaviksi. Nopeudet vaihtelevat 433 Mbps – 6.93 Gbps välillä. 802.11ac käyttää hyväkseen Mu-MIMO-tekniikkaa sekä valinnaisena Beamforming-tekniikkaa. Beamforming mahdollistaa signaalin lähettämiseen tiettyyn suuntaan, eikä 180 tai 360 asteen alueelle. (Mitchell 2018; Poole 2018.)

### 3 LANGATTOMIEN LÄHIVERKKOJEN TEKNIIKKAA

#### 3.1 Siirtotie

Langattomat verkot käyttävät siirtotienään ilmaa. Ilma ei kuitenkaan ole ehto signaalin etenemiselle, sillä informaatio kulkee myös tyhjiössä. Langattomia informaatiotaaleja ei voi ihmiskorvalla kuulla, joten niitä voidaan vahvistaa ihmiskorvaa häiritsemättä. Näin voidaan taata pitkätkin kantomatkat. Lähetyksen laatu riippuu ilmatien esteistä, jotka voivat heikentää signaalin voimakkuutta sekä kantavuutta. Esimerkiksi sade, sumu ja savu voivat heikentää signaalia. Kiinteät esteet voivat taas huonontaa suorituskykyä tai estää koko langattoman verkon toiminnan. (Geier 2005, 37-38.)

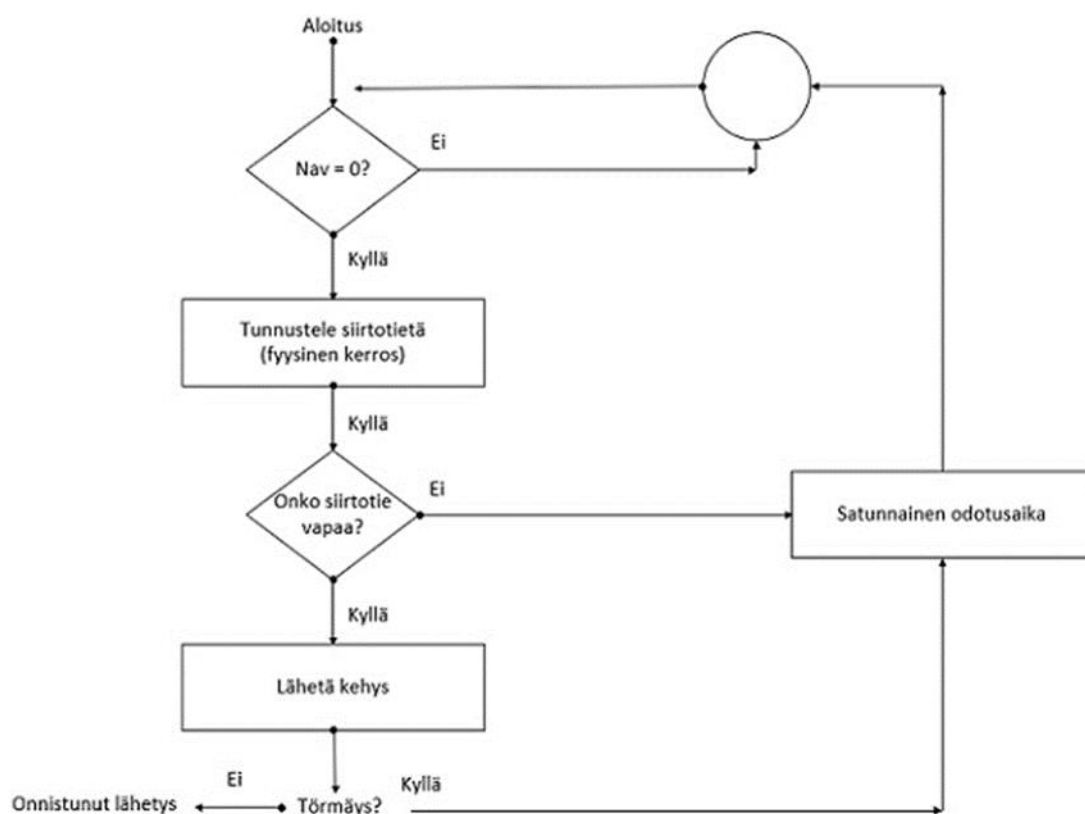
#### 3.2 Siirtotien varaus

802.11 MAC-kerros toimii älynä langattomissa verkoissa. Se hallitsee yhteyksiä radioverkkokorttien ja tukiasemien välillä koordinoimalla siirtotien varausta, sekä ohjaa jotain verkon fyysistä osaa, kuten 802.11a, 802.11b tai 802.11g, suorittamaan tehtäviä. Tehtävät voivat olla siirtotien tunnustelua, sekä kehysten lähetystä ja vastaanottamista.

Aseman on varattava itselleen siirtotie, ennen kuin sen on mahdollista lähettää kehyksiä. DCF on yksi 802.11-standardin määrittelemä varauksen muoto. Se on pakollinen ja perustuu CSMA/CA-protokollaan. DCF:ssä asemat kilpailevat siirtotien varauksesta. Jos toinen asema on jo kerennyt lähettää kehyksensä, muut asemat odottavat kanavan vapautumista.

Jokaisessa asemassa on olemassa NAV-laskuri, joka kertoo, missä ajassa edellinen kehys tulee lähettää. MAC-kerros tarkastaa NAV-arvonsa, jonka on oltava 0, ennen kuin asema voi yrittää lähettää kehyksensä. Ennen kuin asema lähettää kehyksensä, on sen laskettava kehysten lähetykseen tarvittava aika. Tätä vastaava arvo asetetaan kehysotsikon kestokenttään. Asemat tutkivat vastaanottaessaan kehyksiä tätä arvoa ja määrittävät sen avulla oman NAV-arvon. Siirtotie varataan lähettävälle asemalle tällä prosessilla.

DCF:n yksi ominaisuus on satunnainen odotusajastin. Ominaisuus tulee käyttöön, jos asema havaitsee siirtotien olevan varattu. Jos kanava on varattu, asema odottaa satunnaisen ajan, jonka jälkeen kanavan varausta voidaan yrittää uudelleen. Satunnainen aika eliminoi tilanteen, jossa asemat tunnustelevat siirtotietä samanaikaisesti ja havaitsisivat sen olevan vapaana eikä pakettien törmäystä pääse tapahtumaan. (Geier 2005, 118-120.)



KUVA 1. DCF-vuoronvaraus (Pirskanen 2018-09-20)

### 3.3 Roaming

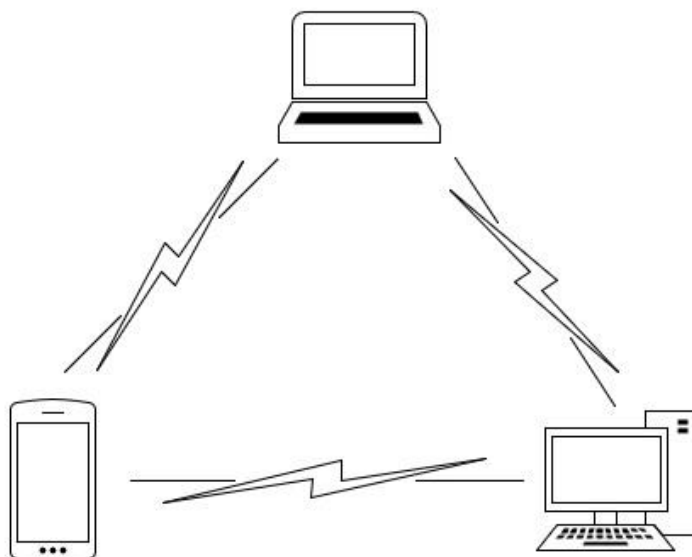
Roaming, eli verkkovierailu, mahdollistaa käyttäjän saumattoman liikkumisen langattoman verkon kattavissa tiloissa. Päätelaitteen verkkokortti kuuntelee jatkuvasti lähistöllä olevia tukiasemia, joilla on sama verkkotunnus. Jos se havaitsee tukiaseman, jonka tarjoama signaali on voimakkaampi, yhdistää se siihen automaattisesti. Roamingin ansiosta käyttäjän ei liikkuaessaan tarvitse kirjautua uudelleen langattomaan verkkoon, kun tukiasema vaihtuu. (Hernandez 2018.)

## 4 TOPOLOGIAT

Langattomissa verkoissa on kolme tapaa yhdistää laitteet toisiinsa. Perusarkkitehtuurista käytetään nimeä BSS. Tämä muodostaa joukon laitteita, jotka pystyvät kommunikoimaan keskenään suosituksen mukaisesti. (Granlund 2007, 294.)

### 4.1 IBSS

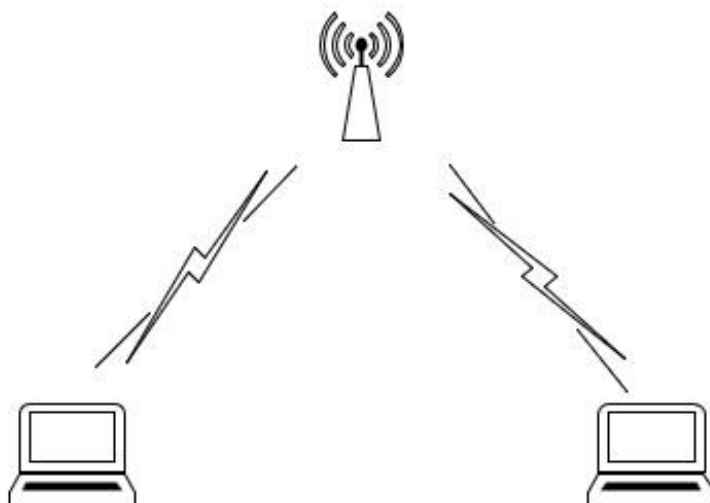
IBSS-verkossa laitteet kommunikoivat langattoman verkon yli keskenään ilman, että niiden muodostama verkko kytkeytyy kiinteään verkkoon. Tällainen ratkaisu ei ole pitkäaikainen, vaan yleensä käytössä esimerkiksi kokous- tai opetustilanteissa. (Granlund 2007, 294-295.)



KUVA 2. IBSS-topologia (Pirskanen 2018-09-19)

### 4.2 BSS

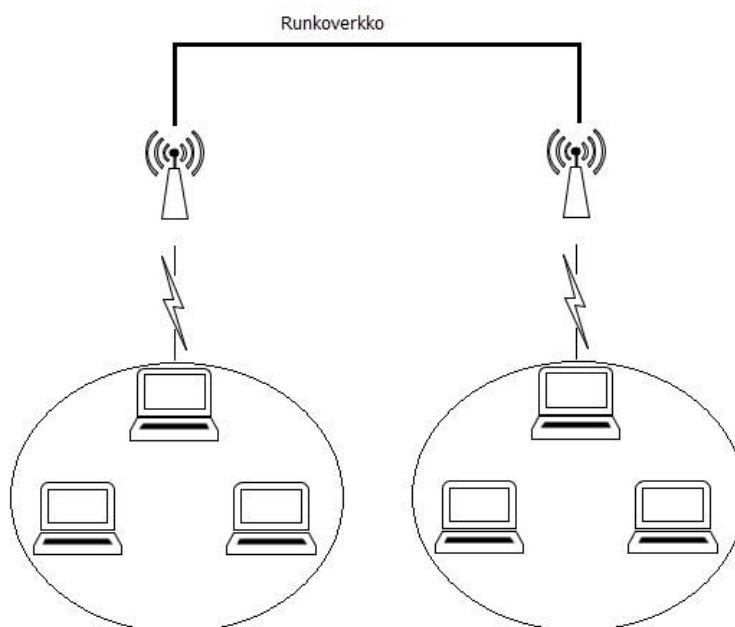
BSS-verkko muodostuu tukiasemasta ja siihen liittyneistä päätelaitteista. Kaikki laitteiden välinen kommunikointi tapahtuu tämän tukiaseman kautta. Tämän ratkaisu ei kuitenkaan ole järin luotettava, sillä jos tukiasema menettää toimintakyvyn, menettävät laitteet yhteyden kiinteään verkon palveluihin. Lisäksi siirtokapasiteetti kärsii, kun tieto on ensin siirrettävä tukiasemalle ja vasta sitten toiselle päätelaitteelle. (Granlund 2007, 295.)



KUVA 3. BSS-topologia (Pirskanen 2018-09-19)

#### 4.3 ESS

BSS-verkkoa voidaan laajentaa lisäämällä tukiasemia, jotka liitetään samaan runkoverkkon. Tätä kutsutaan ESS-verkoksi. Tämä on myös kaikkein yleisin tapa muodostaa langaton verkko, eikä verkon kattavuus rajoitu pienelle alueelle. ESS mahdollistaa myös roaming -ominaisuuden. (Grnlund 2007, 296.)



KUVA 4. ESS-topologia (Pirskanen 2018-09-19)

## 5 KANAVAT JA TAAJUUDET

Langattomat verkot käyttävät 2,4 GHz:n ja 5 GHz:n taajuusalueita. 2,4 GHz:n kantama on parempi, johtuen pienemmästä taajuudesta, mutta se on myös ruuhkaisampi kuin 5 GHz:n verkko. Se kumpaa taajuutta verkko käyttää riippuu tukiaseman tuetusta taajuudesta tai taajuuksista. Tukiasemat tukevat oletuksena 2,4 GHz:n taajuutta. Jos ne tukevat molempia, käytettävä taajuus voidaan määrittää laitteen hallinnasta.

Jotkut laitteet mahdollistavat myös kummankin taajuuden yhtäaikaisen käytön. Tällöin molemmille taajuuksille voidaan luoda oma langaton verkko. Päätelaitteen verkkokortin on kuitenkin tuettava 5GHz:n verkkoa, jotta se voi toimia kyseisellä taajuudella. (Telia 2018.)

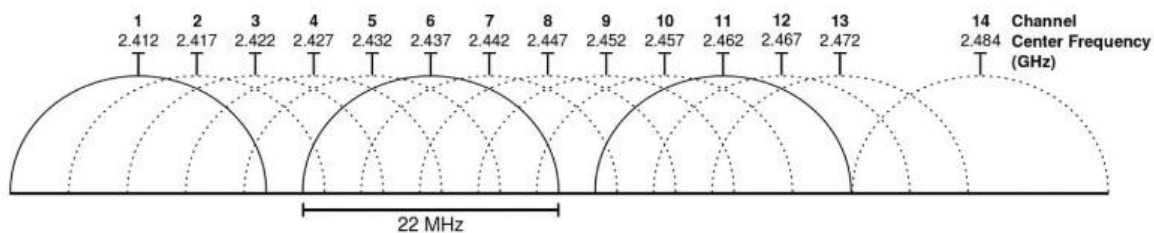
### 5.1 2,4 GHz:n taajuusalueen kanavat

Taajuusalueen kanavat kuuluvat ISM-kaistaan ja ne menevät osittain päällekkäin käytettävien modulointimenetelmien takia. ISM-kaistan käyttö ei vaadi käyttäjältä erillistä lupaa. Kanavia on yhteensä neljätoista, joista kolmetoista on sallittu käytettäväksi Euroopassa. Standardit määrittelevät kaistanleveydeksi 22 MHz.

Verkkoa suunnitellessa pitää ottaa huomioon tukiasemille määritettävä kanava. Esimerkiksi kanavat 1, 6 ja 11 sekä 2, 7 ja 12 eivät mene päällekkäin, joten lähellä toisiaan toimiville tukiasemille olisi hyvä määrittää kyseiset kanavat, jotta ne eivät aiheuttaisi toisilleen häiriötä. (Poole 2018.)

Taulukko 1. 2,4 GHz:n taajuusalueen kanavat (Poole 2018.)

| Kanavanumero | Alataajuus (MHz) | Keskitaajuus (MHz) | Ylätaajuus (MHz) |
|--------------|------------------|--------------------|------------------|
| 1            | 2401             | 2412               | 2423             |
| 2            | 2406             | 2417               | 2428             |
| 3            | 2411             | 2422               | 2433             |
| 4            | 2416             | 2427               | 2438             |
| 5            | 2421             | 2432               | 2443             |
| 6            | 2426             | 2437               | 2448             |
| 7            | 2431             | 2442               | 2453             |
| 8            | 2436             | 2447               | 2458             |
| 9            | 2441             | 2452               | 2463             |
| 10           | 2446             | 2457               | 2468             |
| 11           | 2451             | 2462               | 2473             |
| 12           | 2456             | 2467               | 2478             |
| 13           | 2461             | 2472               | 2483             |
| 14           | 2473             | 2484               | 2495             |



KUVA 5. Havainnollistava kuva päällekkäin menevistä kanavista (Netspot 2018.)

## 5.2 5,0 GHz:n taajuusalueen kanavat

5,0 GHz:n kanavat kuuluvat myös osittain ISM-kaistaan, mutta jotkut kanavat ovat varattu Euroopassa ilmailuradioille. Euroopassa on sallittua käyttää 5150-5350 MHz:n kanavia ainostaan sisätiloissa ja teho saa olla enintään 200 mW. 5470-5725 MHz:n kanavia voidaan käyttää sekä sisä- että ulkotiloissa, mutta teho saa olla maksimissaan yhden watin. (Hakala ja Vainio 2005, 155.) 5,0 GHz:n taajuusalueella ei pääse muodostumaan samanlaista ongelmaa kuin 2,4 GHz:n alueella, sillä käytössä on vain joka neljäs kanava (Riihikallio 2018).

## 6 TIETOTURVA

Tietoturva on yksi olennaisimpia asioita langattomia verkkoja suunniteltaessa. Koska lähetettävä tieto liikkuu avoimesti tavoitettavissa ilmassa, on hakkerin mahdollista tarkkailla suojaamatonta liikennettä ja saada tietoonsa käyttäjätunnuksia, salasanoja, luottokortinnumeroita tai muita tärkeitä tietoja. Asiakaslaitteen ja tukiaseman välillä on siis tärkeää käyttää salausta, joka muuntaa databitit salausavaimen avulla. (Geier 2005, 171-172.)

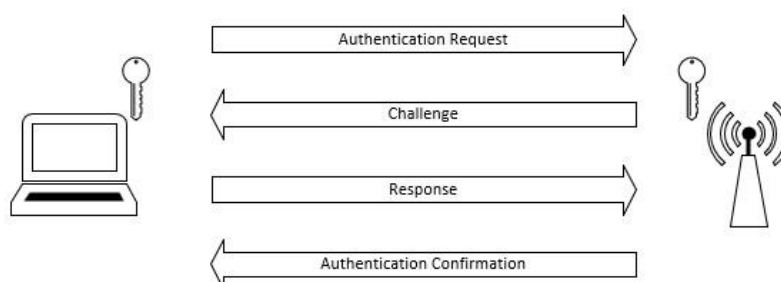
### 6.1 Salaus

Data liikkuu ennen salausta selkokieleisenä, jolloin se on helppo purkaa eri työkaluja käyttäen. Salaus muuntaa sen salatuksi muuttamalla paketin bittejä, joilloin purku onnistuu vain oikealla salausavaimella. (Geier 2005, 178.)

#### 6.1.1 WEP

WEP on alkuperäinen 802.11 –standardiin kuuluva liikenteen salausmenetelmä. WEP ei kuitenkaan ole turvallinen ratkaisu, sillä sen salaus on helposti murrettavissa. Kaikille langattomille asemille tulee olla määriteltynä sama avain kuin yhteyspisteellä. Salauksessa käytetään 40-bittistä tai 104-bittistä avainta. WEP-tunnistautuminen tapahtuu seuraavien vaiheiden mukaan:

1. Päätelaitte lähettää Authentication Request -pyynnön. Hallintakehykseen tulee sekvenssinumeroksi 1.
2. Yhteyspiste lähettää seuraavaksi päätelaitteelle vastauksen. Vastauksen tunnistusalgoritmiksi tulee jaetun avaimen tunnistus, tilakoodi on onnistunut ja haastetekstiksi generoituu satunnainen merkkijono. Vastaus saa sekvenssinumerokseen 2.
3. Päätelaitte vastaa tähän samalla tunnistusalgoritmilla ja haastetekstillä. Sekvenssinumeroksi tulee 3. Informaatioelementit kuitenkin salataan päätelaitteen WEP-avaimella.
4. Yhteyspiste koittaa purkaa informaation avaimellaan. Jos tulos on sama, kuin lähettämässään haasteessa, on myös salausavaimet samat. Tunnistus on hyväksytty, josta lähetetään kiittäus. Sekvenssinumero on 4. (Puska 2005, 74.)



KUVA 6. WEP (Pirkanen 2018-09-17)

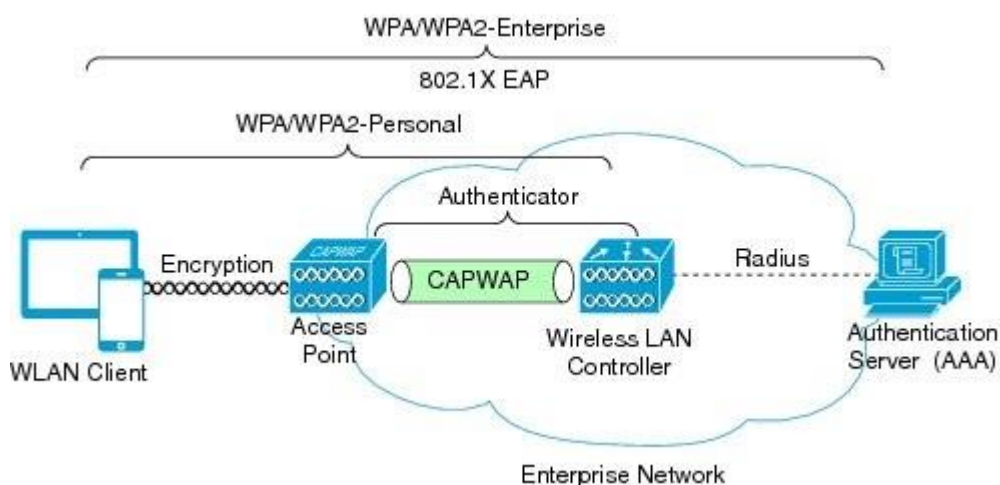
### 6.1.2 WPA

WPA kehitettiin paikkaamaan WEP-protokollassa havaittuja puutteita. Se käyttää dynaamista avaimen salausta. Avain vaihtuu automaattisesti 10 000 paketin välein. Lisäksi tämä protokolla tukee käyttäjien kaksisuuntaista todennusta. Pakettien salausta tapahtuu TKIP-protokollaa hyödyntäen ja käyttäjien todennus tapahtuu EAP-protokollalla. (Hakala, Vainio ja Vuorinen 2006, 297.)

Päätelaite todentaa ensin itsensä tukiaseman kanssa, jonka jälkeen tukiasema valtuuttaa sen lähettämään itselleen kehyksiä. Tämän jälkeen tapahtuu käyttäjätason todennus, jossa ollaan yhteydessä todennuspalvelimeen. Todennuspalvelin voi vielä olla yhteydessä esimerkiksi yrityksen Active Directory -hakemistoon. Tällöin langattomaan verkkoon kirjautumisessa käytetään samoja tunnisteita, kuin lähiverkossa. WPA:n käyttö ei kuitenkaan vaadi todennuspalvelinta, vaan sitä voi myös käyttää esijaetun avaimen avulla. Tällöin loppukäyttäjillä on tiedossa salausavain, joka on määritetty tukiasemaan. (Hovatta ym. 2005, 29.)

### 6.1.3 WPA2

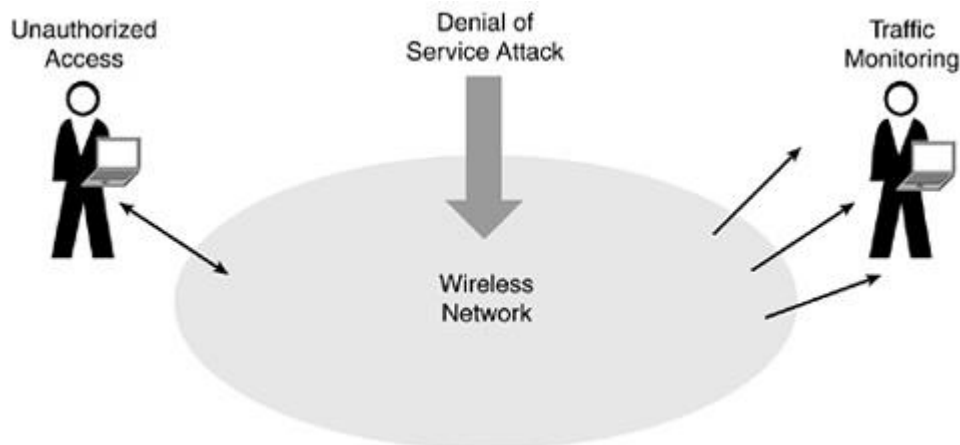
WPA2 on tämän hetken kehittynein salausmenetelmä. Kun WPA:ssa salaus tapahtui TKIP:n avulla, niin WPA2:ssa se tapahtuu AES:n avulla. AES on erittäin vahva salausmenetelmä ja se vaatii suurta suorituskykyä tukiasemilta ja päätelaitteilta. Tästä syystä vanhimpia tukiasemia ja päätelaitteita ei saada päivitettyä siten, että ne tukisivat WPA2:ta. (Hovatta ym. 2005, 30.) AES kehitettiin Yhdysvaltain hallituksen toimesta. Se käyttää Rijndael-algoritmia, jonka avaimet ovat 128-, 192-, tai 256-bittisiä. (Hakala ym. 2006, 382.)



KUVA 7. WPA ja WPA2 verkkomalli (Cisco 2018.)

## 6.2 Tietoturvauhat

Langattomiin verkkoihin kohdistuu monenlaisia uhkia. Uhkia voivat olla muun muassa tietojen varastaminen, luvaton pääsy sovelluksiin tai verkon toiminnan lamaannuttaminen. (Geier 2005, 171.)



KUVA 8. Langattoman verkon tietoturvauhia (eTutorials.org 2018.)

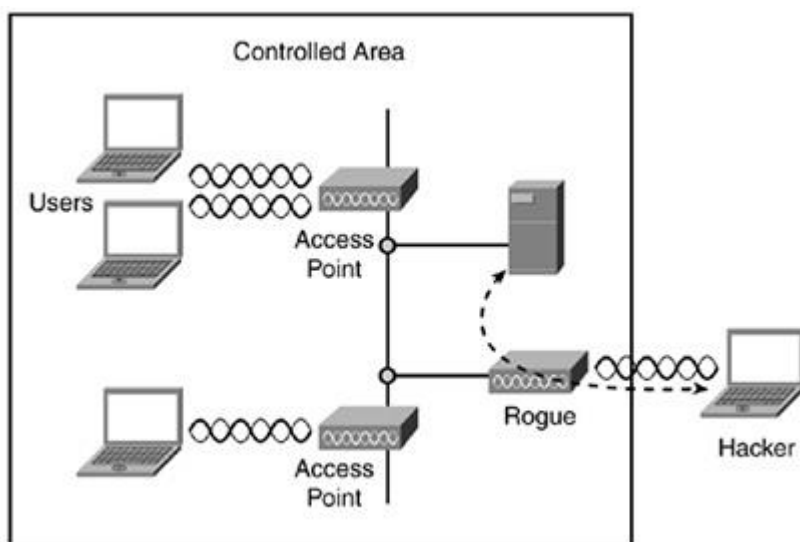
### 6.2.1 Liikenteen tarkkailu

Langattomia datapaketteja voidaan tarkkailla erilaisilla hakkerointityökaluilla. Niillä voidaan saada selville täysin, mitä paketit pitävät sisällään. Niin kutsutut war driverit, jotka ajavat ympäriinsä, voivat siis saada salasanoja tai luottokortin numeroita tietoonsa. Liikenteen tarkkailulta voidaan suojautua käyttämällä vahvoja salausmenetelmiä. (Geier 2005, 172.)

### 6.2.2 Luvaton pääsy

Jos langattomien verkkojen tietoturva ei ole riittävällä tasolla, voi luvaton henkilö mahdollisesti assosioitua yrityksen johonkin langattomaan tukiasemaan. Tätä kautta hänellä voi olla pääsy yrityksen verkossa oleviin palvelimiin tai sovelluksiin.

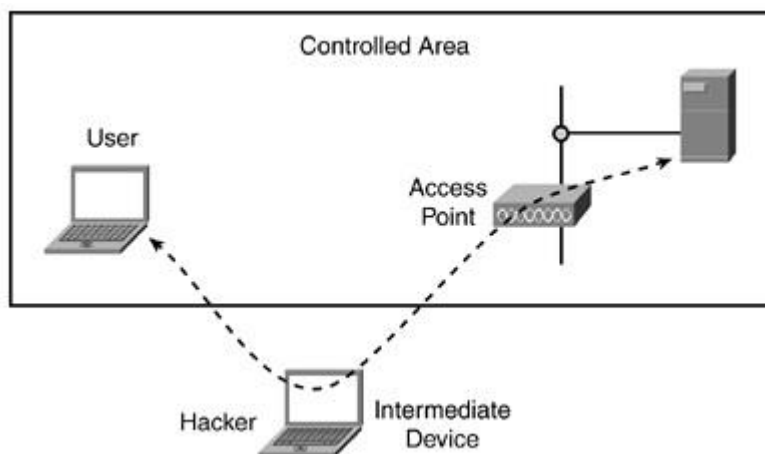
Rosvotukiasemat muodostavat suuren uhan langattomille verkoille. Hakkerit voivat mahdollisesti asentaa suojaamattoman rosvoasukiaseman yrityksen tiloihin. Tämän voi myös tehdä tietoturvariskeistä tietämätön yrityksen työntekijä. Rosvotukiasemat tarjoavat hakkeirelle portin yrityksen verkkoon. Rosvotukiasema on mahdollista asentaa myös langalliseen verkkoon. Yritysten tulisi tarkkailla verkkoaan mahdollisten rosvoasukiasemien varalta sekä käyttää kaksisuuntaista todennusta päätelaitteiden ja tukiasemien välillä. Tällä varmistetaan käyttäjän luvallisuus ja että yhteys muodostetaan luvalliseen tukiasemaan. (Geier 2005, 172-174.)



KUVA 9. Verkkoon hyökkäminen rosvotukiasemalla (eTutorials.org 2018.)

### 6.2.3 Välistävetohyökkäykset

Välistävetohyökkäyksissä hakkerit laittavat valelaitteen langattoman verkon sekä sen käyttäjien väliin. Tyypillisesti välistävetohyökkäyksissä hyödynnetään ARP-protokollaa, jota käyttää kaikki TCP/IP-verkot. ARP:n avulla lähetettävä verkkokortti selvittää vastaanottavan verkkokortin fyysisen osoitteen, jota kutsutaan MAC-osoitteeksi. Jotta verkkokortti voi lähettää paketteja, on sen tiedettävä vastaanottajan MAC-osoite. MAC-osoite saadaan selville lähettämällä ARP-pyyntö, joka sisältää kohteen tiedossa olevan IP-osoitteen. Kaikki asemat saavat tämän pyynnön ja se asema, jonka IP-osoite vastaa pyynnössä olevaa, palauttaa ARP-vastauksen, joka sisältää sen MAC- ja IP-osoitteen. Tätä toimintoa hyödyntäen hakkeri voi lähettää rosvotukiasemalta valheellisen ARP-vastauksen, joka sisältää luvallisen verkkolaitteen IP-osoitteen sekä rosvon MAC-osoitteen. Tämän seurauksena verkon asemat päivittävät ARP-taulunsa virheellisillä tiedoilla ja lähettävät pakettinsa rosvolaitteelle. Hakkeri voi täten saada haltuunsa luvatonta dataa tai mahdollisesti saada yhteyden yrityksen palvelimiin. (Geier 2005, 174-175.)



KUVA 10. Välistävetohyökkäys (eTutorials.org 2018.)

#### 6.2.4 Palvelunestohyökkäykset

Palvelunestohyökkäyksellä voidaan rajoittaa langattoman verkon suorituskykyä tai lamaannuttaa se kokonaan. Väsytyshyökkäys on yksi palvelunestohyökkäyksen muoto. Tällöin verkkoon lähetetään niin paljon paketteja, että ne kuluttavat kaikki resurssit aiheuttaen verkon kaatumisen. Internetistä löytyy työkaluja, joilla hakkeri voi lähettää palvelimille hyödyttömiä paketteja verkon muilta tietokoneilta vieden kaistanleveyttä luvallisilta käyttäjiltä. Toinen hyökkäyksen muoto on käyttää voimakasta radiosignaalia, joka ottaa ilmatien haltuun ja tekee tukiasemista ja radiokorteista hyödyttömiä. Palvelunestohyökkäyksiltä voidaan suojautua kehittämällä ja ylläpitämällä yritysten tietoturvakäytäntöjä. Tähän sisältyy muun muassa palomuurien käyttö, virussuojaus, tietoturvapäivitysten asentaminen sekä vahvojen salasanojen käyttö. Lisäksi verkosta on hyvä poistaa laitteet, jotka eivät ole sillä hetkellä käytössä. (Geier 2005, 176-177.)

## 7 VERKKOLAITTEET

### 7.1 Reitittimet

Reititin siirtää paketteja eri tietoverkkojen välillä. Se valitsee paketille parhaan mahdollisen reitin kohteeseen, käyttäen hyväkseen IP-protokollan pakettiotsikoita, reititystauluja ja sisäisiä reititysprotokollia. Reitittimissä käytetään myös NAT-protokollaa, jotta verkkolaitteet voivat käyttää samaa julkista IP-osoitetta. Myös DHCP-protokolla voi toimia reitittimissä. DHCP jakaa laitteille yksityiset IP-osoitteet. NAT ja DHCP yhdessä mahdollistavat kaikille verkon laitteille yhteisen Internet IP-osoitteen. (Geier 2005, 108.)

### 7.2 Tukiasemat

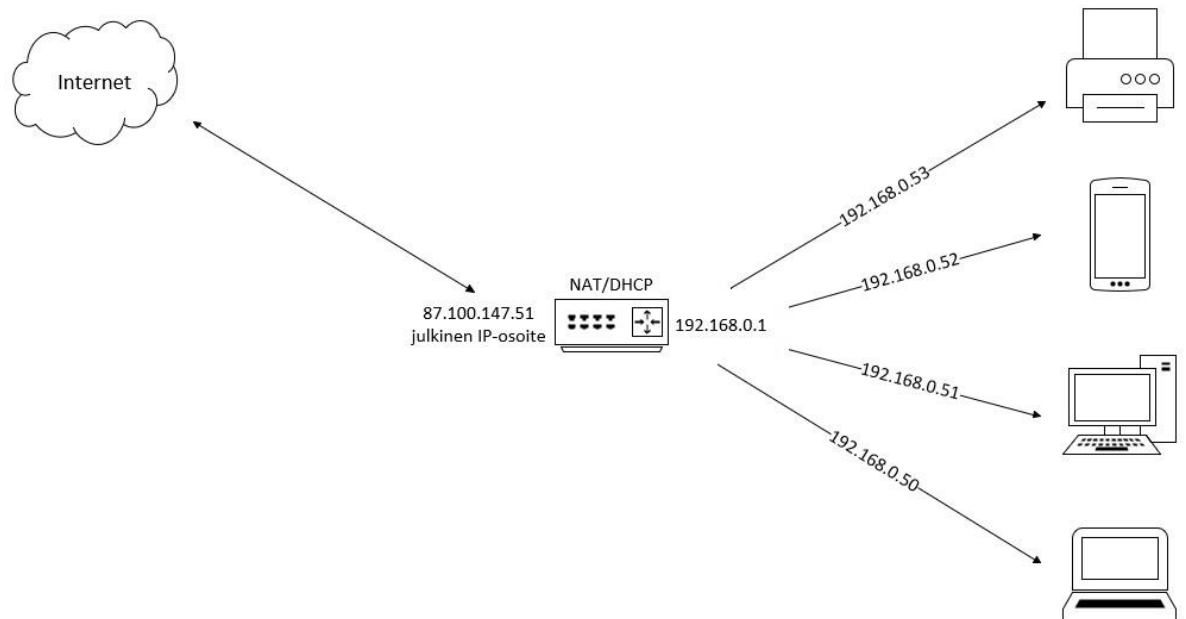
Tukiasemilla toteutetaan wlan-verkon radioverkko. Ne toimivat siltana lankaverkon ja langattomaan verkkoon liittyneiden päätelaitteiden välillä. Lisäksi ne vastaavat muun muassa yhteyden salaamisesta sekä käyttäjien autentikoinnista. (Hovatta ym. 2005, 13.) Samaan langattomaan verkkoon liitetyt tukiasemat mahdollistavat saumattoman liikkuvuuden, kun päätelaitteen verkkokortti pyrkii muodostamaan yhteyden aina lähimpään tukiasemaan (Geier 2005, 38).

### 7.3 WLAN-kontrollerit

Kontrollerit ovat laitteita, joita käytetään langattoman verkon keskitettyyn hallintaan. Kontrolleriin on keskitetty toimintoja, joita ennen on joutunut toteuttamaan hajautetusti yksittäisissä tukiasemissa. Kontrollereiden myötä tukiasemien toiminnallisuus vähenee ja niiden rakenne ja valmistuskustannukset kevenevät. Keskitetyn ratkaisun edut käyvät ilmi verkon hallinnassa. Tukiasemiin saadaan päivitettyä laiteohjelmistot tekemällä muutos ainoastaan kontrolleriin. Lisäksi tukiasemia vaihdettaessa tai lisättäessä asetukset ja ohjelmistot voidaan hakea suoraan kontrollerilta. Kontrollerit tuovat myös kanavasuunnitteluun automatisoivia toimintoja sekä tukiasemien välistä liikkuvuutta kehittäviä ratkaisuja. (Hovatta ym. 2005, 15-16.)

### 7.4 Päätelaitteet

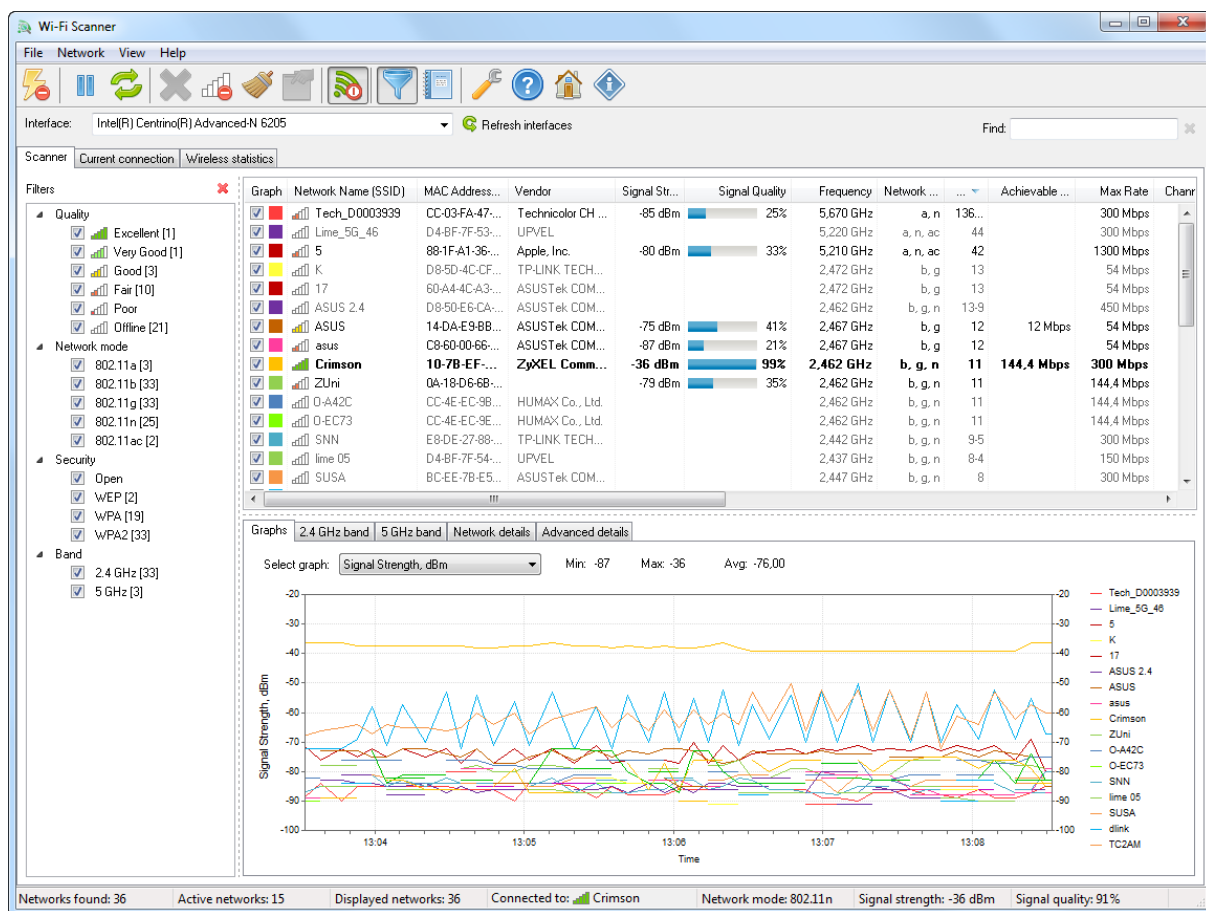
Langattomiin verkkoihin kuuluu monenlaisia päätelaitteita eli asiakkaita (client). Päätelaitteita voivat olla esimerkiksi matkapuhelimet, kannettavat tietokoneet, IP-puhelimet tai tulostimet. (Geier 2005, 33.)



KUVA 11. Eri päätelaitteita sekä reitittimessä toimiva NAT/DHCP (Pirskanen 2018-09-25)

## 8 LIZARD SYSTEMS WI-FI SCANNER

Lizard Systemsin kehittämällä Wi-Fi Scanner -ohjelmalla on helppo paikantaa näkyviä langattomia verkkoja. Sillä on mahdollista selvittää verkon nimi (SSID), signaalin voimakkuus ja laatu, kuormitus, MAC-osoite (BSSID), käytettävä salausmenetelmä sekä paljon muuta tietoa. Se tukee standardeja 802.11ac ja 802.11a/b/g/n. Työkalulla voi määrittää tukiasemille optimaalisen sijainnin signaalin laadun kannalta sekä selvittää mitkä kanavat ovat kaikista ruuhkaisimpia. (Lizard Systems 2018.)



KUVA 12. Lizard Systems Wi-Fi Scanner käyttöliittymä (Lizard Systems 2018.)

## 9 MITTAUKSET

Langattoman verkon mittauksia suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulun Microkadun sekä Opistontien kampuksilla. Mittaukset painottuivat langattoman verkon kuormituksen mittaamiseen. Microkadulla ei voitu mitata 5GHz:n verkkoa, koska oma kannettava ei tue sitä. Opistotiellä saatiin Savonialta kannettava tietokone lainaan, jolla saatiin mitattua myös 5GHz:n verkon kuormitus.

Mittauksissa keskityttiin ensisijaisesti wlan-kanavien kuormituksen mittaamiseen. Tulosten perusteella voitaisiin arvioida, tarvitseeko tukiasemien määrää kasvattaa ja tarvitseeko tukiasemien käyttämä kanava vaihtaa johonkin muuhun. Mittaukset suoritettiin aamupäivällä, jolloin opetus oli käynnissä. Näin saatiin todenmukaiset tulokset siitä, miten verkko kuormittuu, kun päätelaitteita on käytössä useita.

Wi-Fi Scanner antaa skannauksen tuloksena verkon SSID-tunnuksen, salausmenetelmän, MAC-osoitteen (BSSID) sekä muun muassa kuormituksen. Ohjelma antaa kunkin tukiasemalle määritetyn kanavan kuormituksen prosentteina. Mittaus lähtee käyntiin saman tien, kun ohjelman käynnistää. Sen jälkeen lähdetään kulkemaan haluttua mittausreittiä pitkin.

### 9.1 Microkadun mittaukset

Microkadulle on valmistunut B-osan viidenteen kerrokseen uusien opetusmenetelmien tilat, jossa langattomuus on suuressa roolissa. Suurimalla osalla opiskelijoista on siellä käytössään omat kannettavat tietokoneet sekä muita mobiililaitteita, joten on tärkeää, että langaton verkko toimii luotettavasti päätelaitteiden lisääntyessä.

B5-siipeen asennettiin Ciscon AIR-CAP3602I-E-K9 -tukiasemia. Kyseiset tukiasemat tukevat standardeja IEEE 802.11a/b/g/n. Lisäksi ne tukevat MIMO- ja PoE-tekniikoita.



KUVA 13. Cisco AIR-CAP3602I-E-K9 -tukiasema (Pirskanen 2018-09-07)

Taulukkoon 2. on kerätty Microkadun mittausten tuloksia. Luokan B5018 heikompi signaali johtui siitä, että oltiin assosioituneena luokan B5019 tukiasemaan. Luokan B5015 kohdalla mitatessa oltiin assosioituneena luokan B5016 tukiasemaan. Tuloksista nähdään, että roaming ei toimi niin kuin kuuluisi, sillä mittauskoneen verkkokortti ei yhdistänyt parhaan signaalin omaavaan tukiasemaan. Kuorituksen suhteen verkossa riittää vielä suorituskykyä, mutta jos päätelaitteiden määrät kasvavat entisestään, on mahdollista, että tukiasemien määrää joudutaan kasvattamaan.

Taulukko 2. Microkadun 2,4 GHz:n verkon mittaustuloksia

| <b>Mittauspiste</b> | <b>SSID</b> | <b>Signaalin vahvuus</b> | <b>Signaalin laatu</b> | <b>Kanava</b> | <b>Kanavan kuormitus</b> | <b>Päätelaitteet</b> |
|---------------------|-------------|--------------------------|------------------------|---------------|--------------------------|----------------------|
| B5014               | Savonia-web | -42 dBm                  | 100%                   | 11            | 64%                      | 9                    |
| B5015               | Savonia-web | -61 dBm                  | 78%                    | 1             | 62%                      | 5                    |
| B5016               | Savonia-web | -41 dBm                  | 100%                   | 1             | 64%                      | 4                    |
| B5018               | Savonia-web | -66 dBm                  | 68%                    | 11            | 87%                      | 4                    |
| B5019               | Savonia-web | -34 dBm                  | 100%                   | 11            | 88%                      | 5                    |

## 9.2 Opistotien mittaukset

Opistotielle vaihdettiin uudet tukiasemat kuuteen luokkaan. Nämä luokat ovat niin sanottuja BYOD-luokkia, eli bring your own device. Tukiasemat ovat Ciscon AIR-AP3802I-E-K9 -mallia, jotka tukevat standardeja IEEE 802.11a/b/g/n/ac. Nämäkin tukiasemat tukevat MIMO- ja PoE-tekniikoita.

Taulukoihin 3. ja 4. on kerätty tuloksia Opistotien mittauksista. Sama päti myös Opistotiellä roamingin suhtee, eli välillä jäätiin assosioiduksi edellisen luokan tukiasemaan, esimerkiksi luokkien A3008 ja A3013 välillä. Luokissa A3061 ja A3077 oltiin mitä ilmeisimmin kiinni käytävän tukiasemissa, minkä voi päätellä heikommasta signaalin laadusta. 5GHz:n verkossa tätä ongelmaa ei tuntunut esiintyvän. Opistotiellä kanavien kuormitus oli alhaisempi kuin Microkadulla. Uskon, että Opistotien verkko säilyy suorituskykyisenä siihen asti, kunnes toiminta Opistotiellä aikanaan lakkaa.

Taulukko 3. Opistotien 2,4GHz:n verkon mittaustuloksia

| <b>Mittauspiste</b> | <b>SSID</b> | <b>Signaalin vahvuus</b> | <b>Signaalin laatu</b> | <b>Kanava</b> | <b>Kanavan kuormitus</b> | <b>Päätelaitteet</b> |
|---------------------|-------------|--------------------------|------------------------|---------------|--------------------------|----------------------|
| A2084               | Savonia-web | -55 dBm                  | 90%                    | 1             | 68%                      | 9                    |
| A3008               | Savonia-web | -66 dBm                  | 68%                    | 1             | 76%                      | 7                    |
| A3013               | Savonia-web | -10 dBm                  | 100%                   | 1             | 61%                      | 7                    |
| A3056               | Savonia-web | -61 dBm                  | 78%                    | 6             | 45%                      | 1                    |
| A3061               | Savonia-web | -72 dBm                  | 56%                    | 6             | 73%                      | 8                    |
| A3077               | Savonia-web | -71 dBm                  | 58%                    | 1             | 63%                      | 4                    |

Taulukko 4. Opistotien 5 GHz:n verkon mittaustuloksia

| Mittauspiste | SSID        | Signaalin vahvuus | Signaalin laatu | Kanava | Kanavan kuormitus | Päätelaitteet |
|--------------|-------------|-------------------|-----------------|--------|-------------------|---------------|
| A2084        | Savonia-web | -59 dBm           | 99%             | 36     | 3%                | 3             |
| A3008        | Savonia-web | -60 dBm           | 99%             | 36     | 3%                | 2             |
| A3013        | Savonia-web | -57 dBm           | 99%             | 56     | 3%                | 4             |
| A3056        | Savonia-web | -60 dBm           | 99%             | 36     | 3%                | 1             |
| A3061        | Savonia-web | -69 dBm           | 80%             | 44     | 31%               | 8             |
| A3077        | Savonia-web | -54 dBm           | 99%             | 64     | 2%                | 2             |

Opistotiellä päästiin lisäksi tutustumaan Savonian WLAN-kontrolleriin, josta havaittiin, että joidenkin viereisten luokkien tukiasemat oli määritetty samalle kanavalle, joka myös vaikuttaa heikentävästi verkon suorituskykyyn. Havaintojen perusteella pystyttiin tekemään tarvittavat muutokset kanavien määrittelyyn, joka vähentää verkon kuormitusta.



KUVA 14. Savonian WLAN-kontrolleri (Pirskanen 2018-11-23)

## 10 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aihe oli erittäin mielenkiintoinen ja ajankohtainen. Koulussa ei opetettu juuri lainkaan langattomien verkkojen teoriaa, joten aihe oli erittäin sopiva. Langattomien verkkojen kysynnän kasvun myötä koen, että saan työstä paljon apua myös työelämään.

Itse mittauksissa oli jonkun verran epäselvyyksiä mittaustuloksissa, kun ei osannut aina täysin ottaa huomioon kaikkea tulosten kannalta oleellisia asioita. Uskon, että mittaustöihin olisi ollut parempia-kin ohjelmistoja, mutta Wi-Fi Scannerilla saatiin kyllä ihan ymmärrettäviäkin tuloksia. Tulosten perusteella pystyttiin parantamaan tukiasemien kanavasunnittelua, joka omalta osaltaan vähentää verkon kuormittumista.

Hyvänä lisänä oli mielenkiintoista päästä tutustumaan käytännössä WLAN-kontrollereiden toimintaan ja nähdä mitä kaikkea niillä on mahdollista saada aikaan. Itse asiassa kontrollerilla olisi voinut suoraan tehdä tarvittavat analyysit kuormituksesta, kun se kertoo selkeästi ja myös paljon laajemmin minkä verran on kuormitusta missäkin tukiasemassa.

## LÄHTEET

- CISCO 2018. Real-Time Traffic over Wireless LAN Solution Reference Network Design Guide. [Viitattu 2018-09-23.] Saatavissa: [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Mobility/RToWLAN/CCVP\\_BK\\_R7805F20\\_00\\_rtowlan-srnd/CCVP\\_BK\\_R7805F20\\_00\\_rtowlan-srnd\\_chapter\\_0100.html](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Mobility/RToWLAN/CCVP_BK_R7805F20_00_rtowlan-srnd/CCVP_BK_R7805F20_00_rtowlan-srnd_chapter_0100.html)
- ETUTORIALS.ORG 2018. Security Threats. [Viitattu 2018-10-13.] Saatavissa: <http://etutorials.org/Networking/wn/Chapter+8.+Wireless+Network+Security+Protecting+Information+Resources/Security+Threats/>
- GEIER, Jim 2005. Langattomat verkot. Helsinki: Edita Prima Oy.
- GRANLUND, Kaj 2007. Tietoliikenne. Jyväskylä: Docendo Finland Oy.
- HAKALA, Mika & VAINIO, Mika 2005. Tietoverkon rakentaminen. Jyväskylä: Docendo Finland Oy.
- HAKALA, Mika & VAINIO, Mika & VUORINEN, Olli 2006. Tietoturvallisuuden käsikirja. Jyväskylä: Docendo Finland Oy
- HERNANDEZ, Delia 2018. How to Improve Wi-Fi Reception by Boosting Roaming Aggressiveness. [Viitattu 2018-09-10.] Saatavissa: <https://www.versatek.com/blog/how-to-improve-your-wi-fi-reception-by-boosting-roaming-aggressiveness/>
- HOVATTA, Tauno & KIVINIEMI, Jussi & SOMISKA, Jukka 2005. WLAN-tekniikat ja -käyttösovellukset toimitilakiinteistössä. Espoo: Sähköinfo Oy.
- LIZARD SYSTEMS 2018. Wi-Fi Scanner. [Viitattu 2018-09-16.] Saatavissa: <https://lizardsystems.com/wi-fi-scanner/>
- MITCHELL, Bradley 2018. What Is 802.11ac in Wireless Networking? [Viitattu 2018-09-23.] Saatavissa: <https://www.lifewire.com/802-11ac-in-wireless-networking-818284>
- NETSPOT 2018. Increase your Wi-Fi speed with the help of NetSpot – choose the best WiFi channel. [Viitattu 2018-09-20.] Saatavissa: <https://www.netspotapp.com/wifi-channel-scanner.html>
- POOLE, Ian 2018. IEEE 802.11ac Gigabit Wi-Fi. [Viitattu 2018-09-23.] Saatavissa: <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11ac-gigabit.php>
- POOLE, Ian 2018. IEEE 802.11n Standard. [Viitattu 2018-09-19.] Saatavissa: <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11n.php>
- POOLE, Ian 2018. Wi-Fi / WLAN Channels, Frequencies, Bands & Bandwidths. [Viitattu 2018-09-20.] Saatavissa: <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/80211-channels-number-frequencies-bandwidth.php>
- PUSKA, Matti 2005. Langattomat lähiverkot. Helsinki: Talentum Media Oy.
- RIIHIKALLIO, Petri 2018. WLAN 5GHz taajuusalue ja leveät kanavat. [Viitattu 2018-09-24.] Saatavissa: <https://metis.fi/fi/2018/01/5ghz-kanavat/>
- TELIA 2018. Langattoman verkon standardit ja taajuudet. [Viitattu 2018-09-20.] Saatavissa: <https://www.telia.fi/asiakastuki/nettiyhteydet/wifi/langattoman-verkkoyhteyden-nopeus>