

**Kimmo Brigatti**

**Nukkuvan solun havaitseminen itseorganisoituvissa  
LTE-radioverkoissa**

Tietotekniikan  
pro gradu -tutkielma  
30. marraskuuta 2011



UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ  
JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
TIETOTEKNIIKAN LAITOS

**Jyväskylä**

**Tekijä:** Kimmo Brigatti

**Yhteystiedot:** kimmo.brigatti@jyu.fi

**Työn nimi:** Nukkuvan solun havaitseminen itseorganisoituvissa LTE-radioverkoissa

**Title in English:** Detecting sleeping cell in self-organizing LTE mobile networks

**Työ:** Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

**Sivumäärä:** 66

**Tiivistelmä:** Tutkielmassa käydään läpi keskeisiä itseorganisoituvien LTE-radioverkkojen ominaisuuksia. Itseorganisoituvat radioverkot sisältävät toimintoja konfiguroinnissa, optimoinnissa ja korjautuvuudessa, joilla mahdollistetaan verkon laitteiden nopea ja yksinkertainen asennus, tehokas suorituskyky mukautumalla muuttuviin olosuhteisiin, ja nopea palautuminen vikatilanteista. Lisäksi kuvataan erään ongelmatapauksen, niin kutsutun nukkuvan solun, ominaispiirteitä ja sen vaikutus verkon toimintaan. Lopuksi kerrotaan kehitetystä menetelmästä, millä pystytään havaitsemaan nukkuva solu LTE-radioverkossa. Viimeisenä esitetään menetelmällä saadut tulokset.

**English abstract:** This thesis presents the key self-organizing network features of LTE network. Self-organizing network functions are related to configuration, optimization and healing, which allow network devices quick and simple installation, better performance by adapting to changing circumstances and rapid recovery from fault situations. In addition, describing is given to the so-called sleeping cell, and its features and effect on network operations. Finally, describes the method developed that can detect a sleeping cell from LTE network. Also results are shown.

**Avainsanat:** Itseorganisoituvat radioverkot, nukkuva solu, LTE, diffuusiokuvaus, luokittelu.

**Keywords:** Self-organizing networks, sleeping cell, LTE, diffusion maps, classification.

# Sisältö

<b>Kuvat</b>	<b>iii</b>
<b>Taulukot</b>	<b>iv</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Long Term Evolution</b>	<b>4</b>
2.1 Arkkitehtuuri . . . . .	5
2.2 OFDMA . . . . .	6
2.3 SC-FDMA . . . . .	7
2.4 Moniantennijärjestelmä . . . . .	9
2.5 Liikkuvuus . . . . .	10
2.6 Radiolinkkivirhe . . . . .	11
<b>3 Itseorganisoituvat radioverkot</b>	<b>13</b>
3.1 Itseorganisoituvien radioverkkojen arkkitehtuuri . . . . .	14
3.1.1 Keskitetty . . . . .	15
3.1.2 Hajautettu . . . . .	16
3.1.3 Paikallinen . . . . .	17
3.1.4 Hybridi . . . . .	17
3.2 Itsekonfigurointi . . . . .	18
3.3 Itseoptimointi . . . . .	21
3.4 Itsekorjautuminen . . . . .	24
3.4.1 Vian havaitseminen . . . . .	27
3.4.2 Ongelman minimointi . . . . .	29
3.4.3 Virheen poistaminen . . . . .	29
<b>4 Nukkuvan solun havaitseminen</b>	<b>30</b>
4.1 LTE-radioverkon simulointi . . . . .	30
4.2 Nukkuvan solun havaitseminen . . . . .	36
4.2.1 Esikäsittely . . . . .	36
4.2.2 Diffuusiokuvaus . . . . .	38
4.2.3 Luokittelu . . . . .	41
4.2.4 Nukkuvan solun määrittäminen . . . . .	43

<b>5 Tulokset</b>	<b>45</b>
5.1 Luokittelu . . . . .	45
5.2 Nukkuvan solun määrittäminen . . . . .	48
<b>6 Yhteenveto</b>	<b>52</b>
<b>Lähteet</b>	<b>53</b>
<b>Liitteet</b>	
<b>A Simulaatioasetukset</b>	<b>57</b>
<b>B Verkkotapahtumalogin parametrit</b>	<b>59</b>

## Kuvat

2.1	Yksinkertaistettu LTE-verkkoarkkitehtuuri. . . . .	6
2.2	E-UTRAN-arkkitehtuuri ja -rajapinnat. . . . .	7
2.3	Ortogonaalinen taajuudenjakotekniikka. . . . .	8
2.4	Yhden kantoaallon taajuudenjakotekniikka. . . . .	8
2.5	Solun vaihto. . . . .	11
2.6	Radiolinkkivirheen syntyminen ja siitä palautuminen. . . . .	12
3.1	Itseorganisoituvien radioverkkojen arkkitehtuurit. . . . .	15
3.2	Solut sopeutuvat uuden tukiaseman lisäämisen jälkeen. . . . .	19
3.3	Tavoitteisiin päästäkseen SON-algoritmit vaativat koordinoitua. . . . .	22
3.4	Palvelun laatu suhteessa kuormituksen kasvuun. . . . .	23
3.5	Itsekorjautuvuuden merkitys verkon suorituskykyyn. . . . .	26
4.1	Prosessikaavio nukkuvan solun havaitsemisen eri vaiheista. . . . .	31
4.2	Simuloidun LTE-verkon solusommitelma. . . . .	32
4.3	Etenemisvaimennus. . . . .	33
4.4	Solujen valta-asemat. . . . .	34
4.5	Verkkotapahtumien jakauma. . . . .	35
4.6	K nearest neighbor-algoritmi. . . . .	42
5.1	Kullback-Leibler divergenssi. . . . .	46
5.2	Luokittelun tarkkuus. . . . .	47
5.3	Luokiteltujen radiolinkkivirheiden jakautua solujen valta-asemiin. . . . .	50
5.4	Vertailuskenaarion luokitellut radiolinkkivirheet kartalla. . . . .	51
5.5	Ongelmaskenaarion luokitellut radiolinkkivirheet kartalla. . . . .	51

## Taulukot

4.1	Jaksolliset näytteet, solun vaihdot ja radiolinkkivirheet aineistoissa. .	33
4.2	Diffuusiokuvauksen parametrit. . . . .	40
4.3	Diffuusiokuvauksen ominaisvektorit ja -arvot. . . . .	41
A.1	Simulaation asetukset 1. . . . .	57
A.2	Simulaation asetukset 2. . . . .	58
B.1	Verkkotapahtumalogin parametrit. . . . .	59
B.2	Verkkotapahtumat. . . . .	60

# 1 Johdanto

Matkapuhelimesta ja muista mobiililaitteista on tullut osa jokapäiväistä elämää maailmanlaajuisesti. Vuonna 2009 GSM World arvioi käytössä olevan noin neljä miljardia päätelaitetta tuhannessa eri verkossa 222 valtiossa [24]. Päätelaitteet ja radioverkot kehittyvät koko ajan tarjoten monipuolisempia palveluita normaalien puheluiden lisäksi kuten videopuheluita, www-selailua, TV palveluja, tiedostojen latausta tai paikannuspalveluita. Kaiken lisäksi päätelaitteiden käyttäjät vaativat laitteiden toimimista jatkuvasti kaikkialla, mikä aiheuttaa paineita radioverkkojen operaattoreille ja laitevalmistajille kehittää palveluita paremmiksi.

Radioverkkojen kehittämisessä on havaittu staattisen ja hierarkkisen verkon rakenteen muuttuvan kohti hajautettua ja itsenäistä järjestelmää ilman keskitettyä hallintaa. Verkkoelementtien itsenäinen järjestäytyminen ja mukautuminen muuttuvassa ympäristössä ovat keskeisiä asioita [32]. Hincheyn ja Sterritin mukaan jopa puolet operaattorin kuluista hupenee vikatilojen estämiseen tai niistä palautumiseen. 40 % palveluiden katkoksista arvioidaan johtuvan inhimillisistä virheistä. Käyttö- ja ylläpitokulujen osuus kaikista IT-kuluista puolestaan arvioidaan olevan 80 % [26]. Käyttö- ja ylläpitokulut voivat nousta isoilla kansainvälisillä operaattoreilla yli miljardiin euroon [28]. Tähän hallinnolliseen kriisiin voidaan hakea ratkaisua muuttamalla osa verkon loogisista toiminnoista automaattisiksi. Samalla riippuvuus ihmisen suorittamiin huoltotoimenpiteisiin vähenisi ja asiantuntijat olisi mahdollista siirtää vaativampiin työtehtäviin, minkä seurauksena verkko pystyy toimimaan nopeammin ja tehokkaammin päätekäyttäjien muuttuvien tarpeiden mukaan.

Nykyisissä radioverkkojärjestelmissä verkonhallinta perustuu usein ihmisen tekemiin päätöksiin. Verkon valvonnassa apuna käytetään suorituskykymittauksia, virheraportteja, tilastoja, tuotettuja tietokantoja ja aikaisempaa kokemusta. Päätekäyttäjien vikailmoitusten ja verkon käyttötestien avulla pystytään myös havaitsemaan virheellisesti käyttäytyviä toimintoja. Kaikkien edellä mainittujen tietolähteiden yhtäaikaisten käsittely perinteisillä työkaluilla on vaikeaa ja aikaavievää. Ongelmalliseksi nykyisen verkonhallinnan tekee se, että sillä ei pystytä reagoimaan hetkessä syntyviin vikatilanteisiin tai verkon nopeasti muuttuviin olosuhteisiin, kuten paikallisiin käyttäjämäärien vaihteluihin lyhyillä ajanjaksoilla.

Tutkielmassa selvitetään pääpiirteittäin, kuinka radioverkkosuunnittelua, -opti-

mointia ja vianhallintaa voidaan toteuttaa LTE-radioverkossa (Long Term Evolution) automaattisesti, mikä on itseorganisoituvien radioverkkojen (engl. *Self-Organizing Networks, SON*) perimmäinen tarkoitus. Itseorganisoituvien radioverkkojen päämääränä on pienentää operaattorin käyttö- ja pääomakustannuksia sekä nostaa verkon suorituskykyä automatisoimalla verkonhallintaan liittyviä toimenpiteitä. Taloudellisia säästöjä saadaan muun muassa vähentämällä verkonhallinnasta vastaavien asiantuntijoiden määrää. Automaattisilla toimenpiteillä pystytään reagoimaan nopeammin ja tarkemmin verkon muuttuviin olosuhteisiin.

Itsekonfigurointi (engl. *self-configuration*) mahdollistaa uusien tukiasemien liittämissä verkkoon mahdollisimman vähällä ihmistyöllä. Tavoitteena on jättää vain tukiasemien fyysinen asennus ihmisen hoidettavaksi. Kaikki muut suunnittelu- ja konfigurointitoimenpiteet tukiaseman paikan valitsemisesta käyttövalmiiksi saattamiseen tapahtuu automaattisesti ottaen huomioon operaattorin vaatimukset ja tukiaseman yksilöllisen ympäristön vaikutukset sen asetuksiin. Itseoptimoinnilla (engl. *self-optimization*) muokataan verkon asetukset vastaamaan ympäristön muuttuviin olosuhteisiin ja vaatimuksiin. Itseoptimoinnilla pystytään parantamaan verkon suorituskykyä, koska asetuksia pystytään muuttamaan nopeasti olosuhteiden niin vaatiessa. Itsekorjautuvuus (engl. *self-healing*) auttaa paikkaamaan verkkolaitteissa esiintyviä vikoja. Virheiden ja vikojen havainnointi nopeutuu, ja niihin pystytään varautumaan sekä reagoimaan ennen kuin ne aiheuttavat suurta haittaa järjestelmälle. Esimerkiksi erilaisia lämpötila- ja yhteysongelmia tai asetuksiin liittyviä ongelmia voidaan yrittää ratkaista päivittämällä laitteiden ohjelmistoja tai muuttamalla asetuksia ja parametrejä. Järjestelmä osaa myös hälyttää, jos laitetoissa tarvitaan paikanpäällistä huoltoa. Näillä toimintamenetelmillä operaattorin on helpompi hallinnoida verkkoja, sopeutua tulevaisuuden haasteisiin ja tuottaa monipuolisia palveluita.

Tutkimuksessa keskitytään yhteen itsekorjautuvuuden ongelma-alueeseen, niin kutsuttuihin nukkuviin soluihin, joilla tarkoitetaan tilannetta, jossa tukiasema vikaantuu, mutta siitä ei saada suoraa ilmoitusta verkon hallintajärjestelmään. Simulaatiolla mallinnetaan radioverkon toimintaa, jossa yksi tukiasema kokee laitteiston vikaantumisen. Vikaantuminen on mallinnettu antennivahvistusta (engl. *antenna gain*) muuttamalla siten, että tukiaseman kaikki liikenne ala- ja ylälinkin suuntaan estyy. Kuitenkin tukiasema näyttää verkonhallinnassa toimivalta tukiasemalta, jolloin vian havaitseminen ei ole yksinkertaista.

Poikkeavan toiminnan havaitsemiseen voidaan käyttää useita olemassa olevia algoritmeja kuten neuroverkkoja (engl. *neural networks*), jossa verkon aineistoa verrataan vertailuaineistoon, jonka tiedetään toimivan halutulla tavalla [23]. Menetel-



män etuna on sen kyky mukautua erilaisiin ongelmatilanteisiin. Kumpulainen et al. ovat puolestaan päätyneet itseorganisoituvien karttoihin (engl. *emphself-organizing maps*) ja klusterointiin. Menetelmä kykenee käyttämään paikallisia kynnyksarvoja (engl. *thresholds*), jotka mahdollistavat algoritmin tehokkaan toiminnan erilaisissa ympäristöissä [31].

Tässä tutkimuksessa poikkeavan toiminnan havaitsemiseen käytetään diffuusio-kuvausta (engl. *diffusion maps*) ja luokittelua (engl. *classification*), joilla pystytään havaitsemaan monenlaisia ongelmia verkon toiminnasta. Diffuusiokuvauksella pystytään normalisoimaan ja pienentämään käytettävän aineiston moniulotteisuutta, mikä helpottaa ja tehostaa muita tiedonlouhintamenetelmiä. Menetelmässä verkon testattavaa aineistoa verrataan vertailuaineistoon, jolloin poikkeavat tapahtumat kuvaavat virheellistä toimintaa. Luokittelun avulla testattavasta aineistosta saadaan suurempi joukko poikkeavaa toimintaa kuvaavia näytteitä. Tutkimalla poikkeuksien sijaintia verkossa, voidaan löytää keskittyä, jotka kuvaavat nukkuvaa solua. Menetelmä ei tarvitse verkossa mahdollisesti esiintyvän vian määritelmää, jolloin menetelmää voidaan soveltaa myös muihin kuin laitteisto-ongelmiin.

Vian havaitseminen koostuu neljästä vaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa verkon toiminnasta kerätään tietoa mahdollisimman kattavasti ja esikäsitellään tieto sellaiseen muotoon, jota voidaan jatkokäsitellä erilaisilla tiedonlouhintamenetelmillä. Toisessa vaiheessa esikäsiteltyyn aineistoon sovelletaan diffuusiokuvausta, jonka tarkoituksena on pienentää käsiteltävän aineiston moniulotteisuutta ja samalla normalisoida valitut parametrit. Aineiston moniulotteisuuden pienentäminen nopeuttaa ja tarkentaa seuraavaksi suoritettavaa luokittelua. Luokittelun avulla aineistosta etsitään tietynlaisia näytteitä, joiden perusteella nukkuvaa solua voidaan havaita. Viimeisenä vaiheena on esittää tieto sellaisessa muodossa, mistä nukkuvaa solua voidaan helposti havaita.

Seuraava luku johdattelee LTE-järjestelmän ominaisuuksiin, jotka ovat tärkeitä tämän tutkimuksen kannalta. Luvussa 3 tarkastellaan itseorganisoituvien radioverkkojen ominaisuuksia ja niiden tuomia mahdollisuuksia. Luvun aluksi kerrotaan eri arkkitehtuurimalleista, jonka jälkeen siirrytään konfiguroinnin, optimoinnin ja korjautuvuuden ominaisuuksiin tarkemmin. Itsekorjautuvuuden yhteydessä käsitellään nukkuvan solun erityispiirteitä. Luvussa 4 esitetään menetelmä, jolla pystytään havaitsemaan verkon tallentamasta lokikirjasta poikkeavuuksia ja niiden avulla selvittää nukkuvan solun olemassaolo. Tämän jälkeen tarkastellaan edellä mainitulla menetelmällä saatuja tuloksia. Viimeisessä luvussa pohditaan kehitetyn menetelmän vahvuuksia ja heikkouksia.

## 2 Long Term Evolution

Long Term Evolution on neljännen sukupolven (4G) radiotekniikka, jonka standardointia tukee 3rd Generation Partnership Project (3GPP) [1]. Sen ensimmäinen tärkeä julkistaminen GSM:n (Global System for Mobile Communications) jälkeen oli vuonna 1999 julkaistu WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) [27]. Tätä on seurannut lukuisia julkaisuja, joissa LTE julkaistiin vuonna 2008 Release 8:ssa, ja vielä keskeneräinen Release 10, mikä tunnetaan nimellä LTE Advanced. Aikaisemmat julkaisut ovat yhteydessä LTE:hen, sillä tekniikka on omaksunut aikaisempien julkaisujen, kuten HSDPA:n (High-Speed Downlink Packet Access) ja HSUPA:n (High-Speed Uplink Packet Access), ominaisuuksia, mitkä liittyvät esimerkiksi vuorotukseen (engl. *scheduling*) ja fyysisen kerroksen uudelleenlähetyksen mekanismiin. LTE Advanced nostaa tiedonsiirtonopeuksia muun muassa tukemalla monipuolisempia moniantennijärjestelmiä (engl. *Multiple-Input Multiple-Output, MIMO*) ja skaalautuvaa kaistanleveyttä. Erityispiirteenä LTE käyttää kahta eri lähetystekniikkaa. Alalinkin (engl. *downlink*) suuntaan käytetään OFDMA:ta (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), mutta sama lähetystekniikka ei sovelly ylälinkillä käytettäväksi. OFDMA:n korkea huipputehon suhde keskimääräiseen tehoon (engl. *Peak-to-Average Power Ratio, PAPR*) vaatii tehovahvistimelta korkeaa lineaarisuutta, mikä puolestaan johtaa heikkoon hyötysuhteeseen. Tukiasemissa edellä mainitut vaatimukset pystytään toteuttamaan, mutta saman tekniikan käyttäminen päätelaitteissa nostaisi laitteiden hintoja huomattavasti. Ongelma on ratkaistu käyttämällä ylälinkissä (engl. *uplink*) SC-FDMA-tekniikkaa (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Kahden eri lähetystekniikan valitsemisen taustalla on idea ottaa kaikki potentiaali irti siirtotiestä.

3GPP on asettanut LTE:n tärkeimmiksi vaatimukset seuraavat asiat [1]:

- Vastata päätekäyttäjien vaatimukseen korkeampien tiedonsiirtonopeuksien ja paremman palvelunlaadun suhteen.
- Monimutkaisuuden välttäminen.
- Käyttö- ja pääomakulujen pienentäminen.

Nopeampien tiedonsiirtonopeuksien ja paremman palvelunlaadun takaa LTE:n monipuoliset ominaisuudet. LTE:n käyttämän spektrin hyötysuhde on korkea. Ala-

linkillä käytettävä OFDMA ei häiriinny merkittävästi monitiehäiriöistä. Ylälinkillä käytettävä SC-FDMA omaa pienen huipputehon suhteen keskimääräiseen tehoon, jolloin ei tarvita suuritehoista lähetintä. Edistyksellinen moniantennijärjestelmä mahdollistaa laajat peittoalueet ja nopeat tiedonsiirtoyhteydet molempiin tiedonsiirtosuuntiin. Tuettuja moniantennijärjestelmiä ovat 2x2, 4x2 ja 4x4. Viiveet yhdistäytymisessä verkkoon ja solun vaihdossa ovat pieniä. LTE tukee skaalautuvia 1.4, 3, 5, 10, 15 ja 20 MHz kaistanleveyksiä. Modulaatiovaihtoehtoja erilaisiin olosuhteisiin ovat QSPK, 16QAM ja 64QAM. Release 8:ssa on esitetty LTE:n maksimi tiedonsiirtonopeudeksi alalinkin suuntaan 300 Mb/s ja ylälinkin suuntaan 75 Mb/s. Kehittyneemmällä LTE-Advanced-järjestelmällä tavoitellaan 1 Gb/s tiedonsiirtonopeuksia [27].

Monimutkaisuutta on pystytty vähentämään aiempiin radiotekniikoihin verrattuna yksinkertaistamalla arkkitehtuuria. Arkkitehtuurista kerrotaan lisää seuraavassa luvussa.

Käyttö- ja pääomakustannuksien säästöjä tulee edellä mainitun yksinkertaisen arkkitehtuurin kautta, mutta myös itseorganisoituvien radioverkkojen soveltuvuuden seurauksena, mikä on otettu suunnitteluvaiheessa tarkasti huomioon. Itseorganisoituvien radioverkkojen ominaisuuksista kerrotaan lisää luvussa 3.

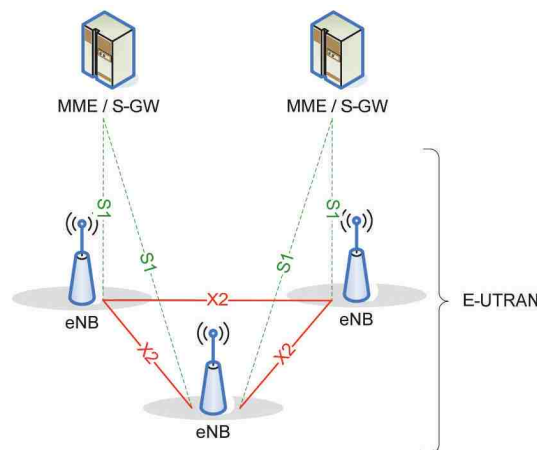
Suomen ensimmäinen LTE-verkko avattiin koekäyttöön Turussa kesäkuussa 2010. Seuraavaksi käydään läpi LTE-järjestelmän keskeisimmät ominaisuudet.

## 2.1 Arkkitehtuuri

3GPP on yksinkertaistanut LTE-verkon rakennetta aiempiin radiotekniikoihin verrattuna vähentämällä niin sanottuja välisolmuja verkon rakenteesta. Esimerkiksi 2G- ja 3G-radiotekniikoissa käytettyjen tukiasemaohjaimien (engl. *Base Station Controller BSC*) ja radioverkko-ohjaimien (engl. *Radio Network Controller, RNC*) poistamisella saadaan pienennettyä solmujen välisiä tiedonsiirtoviiveitä ja vähennettyä tarvittavien radiatorajapintojen määrää. LTE:ssä radioverkko-ohjaimen toiminnot on jaettu tukiaseman ja liikkuvuudenhallintayksikön (engl. *Mobility Management Entity, MME*) sekä palvelevan yhdyskäytävän (engl. *Serving Gateway, S-GW*) kanssa [33]. MME ja S-GW muodostavat tärkeimmän osan LTE:n EPC-runkoverkosta (Evolved Core Packet). MME vastaa päätelaitteiden ja istuntojen ohjaustoiminnoista, joita ovat palvelunlaadun valvonta sekä tietoturva- ja paikannustoiminnot. MME on yhteydessä HSS:ään (Home Subscriber Server), mikä pitää sisällään kaiken päätelaitteita koskevan tiedon. S-GW on puolestaan tietoliikenteen väliseksi E-UTRANin (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) ja runkoverkon välissä.

Sillä on tärkeä rooli esimerkiksi solun vaihtojen (engl. *handover, HO*) aikana reitittää pääteikäyttäjän tietoliikenne siten, ettei tietovirta häviä. Muita runkoverkon osia ovat PDN yhdyskäytävä (Packet Data Network gateway) sekä PCRF (Policy and Charging Rules Function). PDN yhdyskäytävä on vastaava kuin S-GW, mutta se toimii runkoverkon puolelle. PCRF vastaa muun muassa kunkin päätelaitteiden oikeuksista palveluihin ja niiden laskuttamisesta.

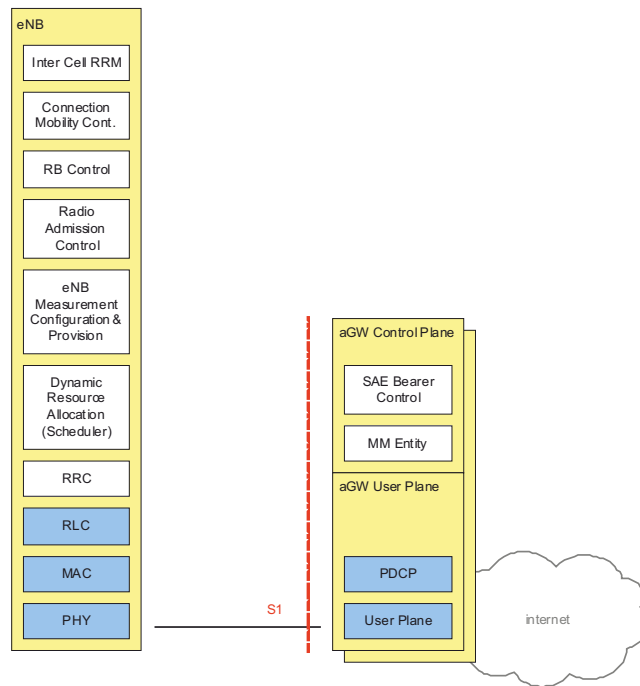
E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) koostuu tukiasemista, joita LTE:ssä kutsutaan eNodeB:ksi (Kuva 2.1). Tukiasemat pystyvät kommunikoimaan toistensa kanssa uuden X2-rajapinnan avulla, jota käytetään muun muassa ohjaustoiminnoissa ja solun vaihtojen aikana kun päätelaitteelle kulkevaa tietovirtaa voidaan uudelleenohjata toiselle tukiasemalle. Tukiasemat ovat yhteydessä runkoverkkoon S1-rajapinnan kautta. Päätelaitteelle tarjotaan kaksi rajapintaa: U-rajapinta hyötykäyttöön ja C-rajapinta ohjaukseen. Kuva 2.2 antaa yleiskäsityksen E-UTRAN-arkkitehtuurista, jossa kuvan keltaiset laatikot kuvaavat loogisia solmuja, valkoiset C-rajapinnan toiminnallisia kokonaisuuksia ja siniset laatikot U-rajapinnan toiminnallisia kokonaisuuksia [6].



Kuva 2.1: Yksinkertaistettu LTE-verkkoarkkitehtuuri [10].

## 2.2 OFDMA

LTE-järjestelmän alalinkin monipääsytekniikka (engl. *multiple access*) perustuu ortogonaaliseen taajuudenjakotekniikkaan [27], mikä soveltuu hyvin olosuhteisiin, joissa eri taajuudet heikentyvät eri tavoin. Lisäksi OFDMA on käyttökelpoinen, yksinkertainen ja edullinen tapa toteuttaa erityisesti lähettimissä. Myös OFDMA-vastaanotin on yksinkertainen. OFDMA tarjoaa hyvät spektriominaisuudet ja usean



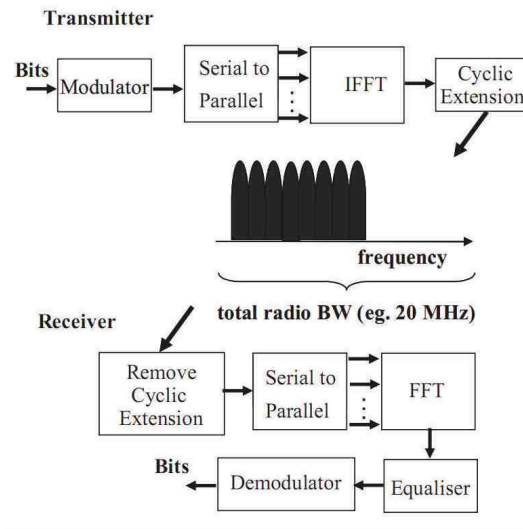
Kuva 2.2: E-UTRAN-arkkitehtuuri ja -rajapinnat [6].

kaistanleveyden käytön. OFDMA on myös yhteensopiva kehittyneiden moniantennijärjestelmien kanssa. Viime vuosina OFDMA-tekniikkaa on aloitettu käyttämään monissa erilaisissa ympäristöissä kuten digitaalisissa TV-signaaleissa, langattomissa kotiverkoissa ja kilpailevassa WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)-tekniikassa.

OFDMA:n toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.3. Lähettimen lähtökohtana on käyttää kapeita 15kHz, toisilleen ortogonaalisia, alikantoaaltoja. Ortogonaalisuus takaa järjestelmän tehokkuuden kun kantoaallot eivät häiritse toisiaan vaikka ne lähetetään limittäin. LTE:ssä alikantoaaltojen koko on sama riippumatta käytössä olevasta kaistanleveydestä. Datan käsittelyssä käytetään Inverse Fast Fourier muunnosta (IFFT), jolla pystytään muuttamaan aikapohjainen (engl. *time domain*) esitys taajuuspohjaiseksi (engl. *frequency domain*). Ennen signaalin lähetystä siihen lisätään jaksollinen lisä (cyclic extension), jolla estetään symbolien välinen häiriö. Vastaanotin tekee edellä mainitut kohdat käänteisessä järjestyksessä.

## 2.3 SC-FDMA

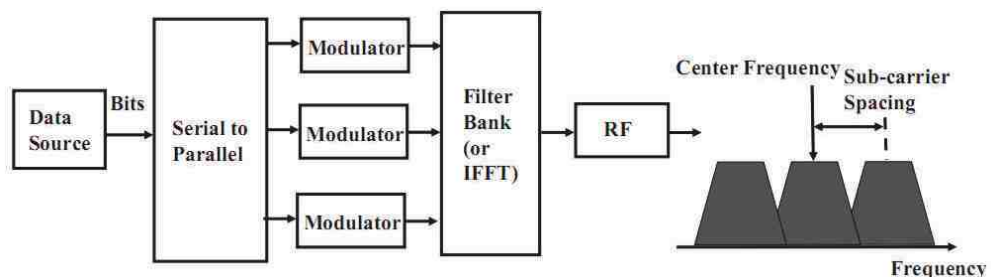
Ylälinkin suuntaan LTE-järjestelmässä monipääsytekniikka perustuu yhden kantoaallon taajuudenjakotekniikkaan [27]. Yhden kantoaallon lähetystekniikassa lähe-



Kuva 2.3: Ortogonaalinen taajuudenjakotekniikka lähettimessä ja vastaanottimessa [27].

tettävä informaatio moduloidaan yhteen kantaaltoon, jonka vaihetta (engl. *phase*), amplitudia ja/tai taajuutta muutetaan. Yksi kantaalto sisältää vain yhden päätelaitteen informaatiota. Erityishuomiota täytyy kiinnittää kantaallon muotoon etteivät ne häiritse toisiaan eikä tarvita isoja suojavälejä kantaallojen välille. SC-FDMA:lla on OFDMA:ta alhaisempi Peak-to-Average Power-suhde, joten se soveltuu päätelaitteella käytettäväksi huomattavasti OFDMA:ta paremmin pienen virrankulutuksen takia. Lisäksi SC-FDMA tarjoaa tehokkaan taajuuskorjauksen vastaanottajan puolella ja joustavamman taajuuksien jakamisen.

SC-FDMA:ssa kaikki lähetettävät datasympolit muutetaan aikajakoisesta taajuusjakoiseksi käyttämällä lineaarista diskreettiä Fourier muunnosta (engl. *Discrete Fourier Transform (DFT)*). Lopuksi taajuusjakoiset datasympolit muunnetaan IFFT:llä radiolähetykseen sopiviksi aikajakoisiksi kantaalloiksi (Kuva 2.4).



Kuva 2.4: Yhden kantaallon taajuudenjakotekniikka lähettimessä [27].

## 2.4 Moniantennijärjestelmä

Ensimmäisen kerran moniantennijärjestelmää sovellettiin puhelinverkossa HSDPA-järjestelmässä. Kuitenkin sen seuraaja LTE oli ensimmäinen tekniikka, johon moniantennijärjestelmä suunniteltiin tärkeäksi perusteknologiaksi alusta lähtien [38]. Ensimmäinen LTE versio tukee neljän antennin yhtäaikaista käyttöä. LTE-Advancedin tavoitteena on tukea kahdeksan antennin käyttöä. Perinteisessä antennijärjestelmässä (Single-Input, Single-Output, SISO) käytetään aika- tai taajuusjakoista käsittelyä ja koodausta. Antennien lisääminen tukiasemaan ja päätelaitteeseen vaatii uuden tilaulottuvuuden (engl. *spatial dimension*) käsittelyyn ja koodaukseen, jolla pystytään parantamaan linkin suorituskykyä, kuten häiriösuhdetta, tiedonsiirtonopeutta, peittoaluetta ja spektrin tehokkuutta. Moniantennijärjestelmän käyttöönoton haittoja ovat laitteiston monimutkaisuus ja niiden korkea hinta.

Moniantennijärjestelmä voi tuoda kolmenlaista hyötyä [38]:

- Monimuotoisuusvahvistus (engl. *diversity gain*)
- Tehovahvistus (engl. *array gain*)
- Tilakanavointivahvistus (engl. *spatial multiplexing gain*).

Monimuotoisuusvahvistus vähentää monitiehäipymän (engl. *multipath fading*) vaikutusta kun informaatio lähetetään tai vastaanotetaan monesta antennista samanaikaisesti, jolloin monitien aiheuttama häipymä kumoutuu. Monimuotoisuusvahvistus parantaa signaali-häiriösuhdetta (engl. *Signal-to-Noise Ratio, SNR*). Monimuotoisuusvahvistus mahdollistaa signaalin lähettämisen keskimääräistä alhaisemmalla teholla, koska yhtäaikaisesti eri antennilla lähetetyt signaalit voimistavat kokonaissignaalia vastaanotettaessa.

Tehoedun avulla pystytään kohdistamaan lähetys tarkemmin yhteen tai useampaan suuntaan koodauksen tai antennien suuntauksen avulla. Kohdistamalla useamman antennin samansisältöinen lähetys voidaan yksittäisen antennin lähetystehoa pienentää.

Tilakanavointivahvistus mahdollistaa useiden tietovirran lähettämisen yhtäaikaisesti ja myös erottaa eri tietovirrat niiden yksilöllisen tilatunnisteen avulla. Käytännössä tilakanavointi mahdollistaa yhdelle tai usealle päätelaitteelle suunnattujen tietovirtojen lähettämisen yhtäaikaan tai eri päätelaitteilta tulevien signaalien vastaanottamisen samanaikaisesti tukiasemassa.

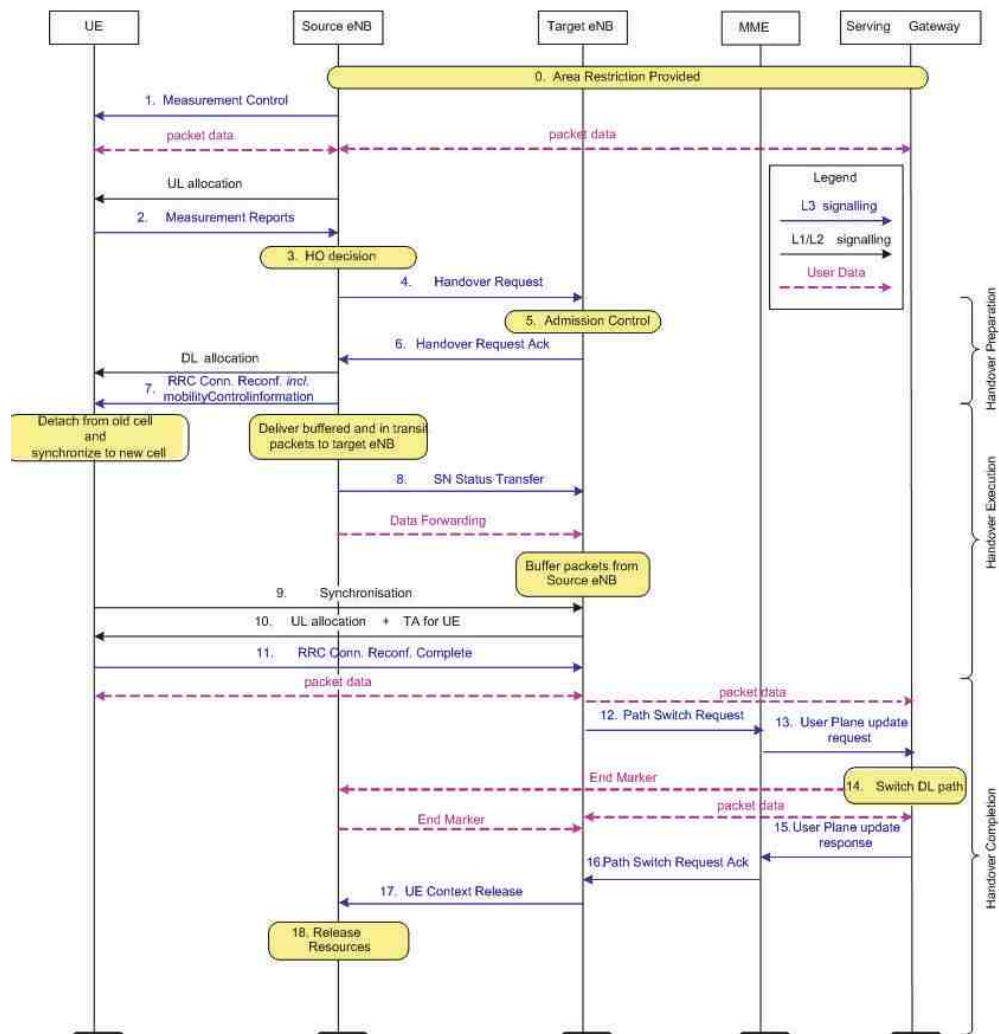
## 2.5 Liikkuvuus

LTE:ssä päätelaitteen liikkuvuutta tuetaan kahdessa eri tilassa: RRC (radio resource control) connected- ja RRC idle-tiloissa [27]. Idle-tilassa päätelaite tekee itsenäisesti päätöksen solun vaihdosta. Solun valinnassa käytetään hyväksi tietoa vastaanotettujen signaalien laaduista eri tukiasemilta. Idle-tilassa päätelaitteella ei ole aktiivista tiedonsiirtoa tukiaseman kanssa, joten uuteen soluun rekisteröinti on yksinkertaista.

RRC Connected-tilassa päätelaite on aktiivisessa tiedonsiirrossa palvelevan tukiaseman kanssa, jolloin täytyy huolehtia, ettei yhteys katkea eikä tietoa häviä solun vaihdon aikana. Tiedon häviäminen estetään käyttämällä pakettien edelleenlähtämistä tukiasemien välillä solun vaihdon aikana. Idle-tilasta poiketen, tukiasemat ohjaavat solun vaihdon suorittamista ajankohdan ja kohdetukiaseman osalta. Kuvassa 2.5 esitetään LTE:n solun vaihdon toimintamalli:

- Palveleva tukiasema (Source eNB) valvoo päätelaitteen (UE) suorituskykyä useiden erilaisten mittausten avulla, joihin päätelaite vastaa ennalta määrättyjen sääntöjen mukaan (1–2).
- Palveleva tukiasema tekee päätöksen siirtää päätelaite toiselle tukiasemalle-suorituskykymittauksiin ja radioresurssihallintaan (RRM, radio resource management) perustuen (3).
- Palveleva tukiasema neuvottelee kohdetukiaseman (Target eNB) kanssa solun vaihdon suorittamisesta (4–6)
- Palveleva tukiasema lähettää solun vaihtokomennon päätelaitteelle (7).
- Palveleva tukiasema lähettää tilapäivityksen (Status transfer) kohdetukiasemalle. Myös tietoliikenne ohjataan kohdetukiasemalle (8).
- Päätelaite synkronoi itsensä kohdetukiasemaan Random Access-toimenpiteellä, jonka kohdetukiasema täytyyhyväksyä. Lopuksi päätelaite myös vahvistaa solun vaihdon, jonka jälkeen tietoliikenne kulkee päätelaitteen ja kohdetukiaseman välillä normaaliin tapaan. (9–11).
- Kohdetukiasema ilmoittaa MME:n kautta S-GW:lle päätelaitteen vaihtaneen tukiasemaa, jolloin S-GW muuttaa päätelaitteelle kohdistuvan liikenteen reititystä (12–16).
- Lopulta entinen palveleva tukiasema saa komennon vapauttaa radioresurssit ja solun vaihto on suoritettu onnistuneesti (17–18).





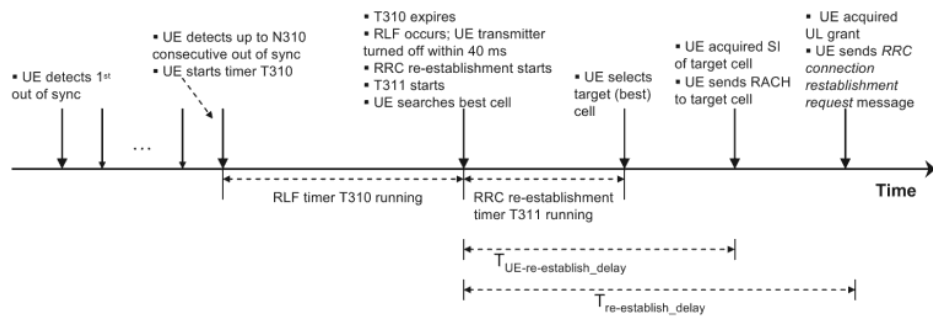
Kuva 2.5: Solun vaihto [10].

## 2.6 Radiolinkkivirhe

Normaalitilanteessa päätelaite suorittaa solun vaihdon toiseen tukiasemaan kun signaalin laatu heikkenee. Aina näin ei kuitenkaan tapahdu. Radiolinkkivirhe (engl. *Radio Link Failure, RLF*) kuvaa tilanetta, jossa päätelaitteen ja tukiaseman välinen signaali heikkenee niin paljon, että yhteys laitteiden välillä menetetään. Radiolinkkivirhe merkitsee päätelaitteelle katkosta palveluista ja mahdollisesti yhteydenmuodostusta toiseen tukiasemaan, joten tapahtumaa tulee välttää jos se vain on mahdollista. Radiolinkkivirhe on usein seurausta korkeasta häiriöstä, liian myöhäiseksi jätetystä solun vaihdosta tai kun päätelaite on peittoalueen rajalla [37].

Radiolinkkivirheen tapahtuminen ja siitä palautuminen esitetään kuvassa 2.6.

Päätelaite käynnistää T310-ajastimen kun ennalta määritetty määrä ( $N_{310}$ ,  $Q_{out}$ ) peräkkäisiä epätahti-ilmoituksia (engl. *out of sync*) on vastaanotettu tukiasemalta. Päätelaitteen lähetykset ovat epätahdissa, jos tukiasema ei vastaanota niitä ennalta määritettyjen aikajaksojen (engl. *cyclic prefix*) välillä [27]. Ajastin pysähtyy, jos päätelaitteen fyysinen kerros raportoi ennalta määritetyn määrän ( $N_{311}$ ,  $Q_{in}$ ) peräkkäisiä tahdissa-ilmoituksia, jolloin signaalin laatu on palautunut kelvolliselle tasolle ja tukiasema vastaanottaa lähetykset ajallaan. Jos T310-ajastin umpeutuu, radiolinkkivirhe tapahtuu, jonka seurauksena päätelaite sammuttaa lähettimen ja odottaa ajan  $T_{UE-re-establish-delay}$ , kunnes yrittää muodostaa yhteyttä verkkoon uudestaan. Päätelaitteen lähettimen sammuttamisella estetään ylimääräisen häiriön syntyminen, koska muutoin se jatkaisi informaation lähettämistä epätahdissa muiden päätelaitteiden lähetyksvuoroilla.  $Q_{out}$  on määritelty tasoksi, jossa signaaleja ei pystytä vastaanottamaan luotettavasti.  $Q_{out}$  vastaa 10% lohkovirhetasosta (engl. *block error rate*) oletetun fyysisen alalinkin kontrollikanavan (Physical Downlink Control Channel, PDCCH) lähetyksessä palvelevalta tukiasemalta.  $Q_{in}$  vastaa 2% lohkovirhetasosta [38].



Kuva 2.6: Radiolinkkivirheen syntyminen ja siitä palautuminen [38].

### 3 Itseorganisoituvat radioverkot

Radioverkon toiminnan edellytyksenä on toimiva verkonhallinta. Sen tarkoitus on mahdollistaa luotettava ja tehokas radioverkko, jossa voidaan tarjota yksilöllisiä palveluita. Niin kuin aiemmin mainittiin, radioverkkojen koko ja monimutkaisuus kasvavat jatkuvasti ja palveluiden odotetaan toimivan luotettavasti jatkuvasti ja kaikkialla, jolloin verkonhallinnan toimivuus korostuu. Verkonhallinnan keskeiset toiminnot liittyvät verkon suunnitteluun sekä suorituskyvyn- ja vianhallintaan. Verkon suunnittelu on avainasemassa onnistuneen radioverkon toiminnan kannalta. Suorituskyvynhallinnalla mukaudutaan verkon muuttuviin olosuhteisiin, jotta päättekäyttäjää pystytään palvelemaan tehokkaasti. Vianhallinnan tarkoituksena on virheiden reaaliaikainen havaitseminen, ongelman minimointi ja lopullinen korjaaminen.

Verkko-operaattoreiden allianssi NGMN (Next Generation Mobile Networks) [2] yhdessä standardointiorganisaatio 3GPP:n [1] kanssa vahvistavat tulevaisuuden langattomien tietoverkkojen sisältävän huomattavan määrän itseorganisoituvuutta. Itseorganisoituvien radioverkkojen toiminta perustuu edellä mainittujen verkonhallintatoimintojen automatisointiin, millä tavoitellaan erityisesti kahta asiaa [12]:

- Pienentää käyttö- ja pääomakustannuksia vähentämällä ihmisen osallistumista verkon operatiivisiin tehtäviin.
- Nostaa radioverkon suorituskykyä muun muassa optimoimalla verkon kapasiteettia, peittoaluetta ja palvelun laatua automaattisilla toimenpiteillä sekä palautumalla vikatilanteista automaattisesti.

Nykyisin ihmisen rooli verkonhallinnassa on merkittävä. Radioverkkosuunnittelu, käyttötestit, verkon valvonta, optimointi, vikojen havaitseminen ja niiden korjaustoimenpiteiden suorittaminen ovat ihmisen tekemiä toimenpiteitä. Itseoptimointi ja -korjaus ovat tapoja, joilla laitteiden vikaantuminen ja verkon epäoptimaalinen toiminta voidaan havaita ja korjata automaattisesti ilman ihmisen merkittävää osallistumista toimenpiteisiin tai päätöksien tekoon. Itsesuunnittelulla ja -konfiguroinnilla voidaan vähentää ihmisen tarvetta verkon suunnittelussa ja rakentamisessa. Pääomakustannukset vähenevät kun verkkoa ei ylimitoiteta rakennusvaiheessa vaan laajennetaan verkkoa sitä mukaan kun resurssien käyttöaste nousee. Käyttötesteillä asiantuntijat tarkastavat verkon sen hetkistä toimintaa. Automaattisilla suoritusky-

kymmittauksilla sama voidaan tehdä ilman ihmiseltä vaadittavia toimenpiteitä.

Huawein mukaan koko verkon manuaalinen optimointi saattaa viedä aikaa jopa kuukausia [4]. Sen aikana verkon tilanne muuttuu, käyttäjät eivät pysy paikoillaan, niiden käyttämät palvelutyypit voivat vaihtua, verkon rakenne saattaa muuttua (esimerksiki uuden tukiaseman liittäminen), toisten tukiasemien asetusten muuttaminen vaikuttaa ympärillä oleviin tukiasemiin ja niin edelleen. Automaattisella optimoinnilla koko verkon optimointi saattaa kestää vain joitain tunteja tai päiviä ja samalla pystytään reagoimaan verkon muuttuviin olosuhteisiin huomattavasti nopeammin, minkä päätekäyttäjät huomaavat parempana palvelun laatuna [3].

Teknologian näkökulmasta katsottuna tulevaisuuden radioverkkotekniikoiden monimutkaisuus luo merkittäviä haasteita johtuen lukuisista säädettävistä asetuksista ja niiden monimutkaisista riippuvuuksista toisiinsa [12]. Uusien verkkoteknologioiden yhteensovittaminen ja -toimiminen jo olemassa olevien tekniikoiden rinnalla lisäävät haasteita. Vaikka monimutkaisuus vaikeuttaa verkon toimintaa, tuo se myös mahdollisuuksia ja joustavuutta tarjota monipuolisia palveluita ja resurssien tehokasta käyttöä. Osittain näistä teknisistä monimutkaisuuksista johtuen nykyiset operatiiviset tehtävät radioverkkosuunnittelussa ja optimoinnissa ovat erillisiä tehtäviä. Itseorganisoituvuuden yhtenä tavoitteena on yhdistää nämä tehtävät yhdeksi automaattiseksi kokonaisuudeksi osaksi verkonhallintaa. Itseorganisoituvuuden mahdollistaminen vaatii päätelaitteilta, tukiasemilta ja muilta verkon komponenteilta teknistä kehittymistä.

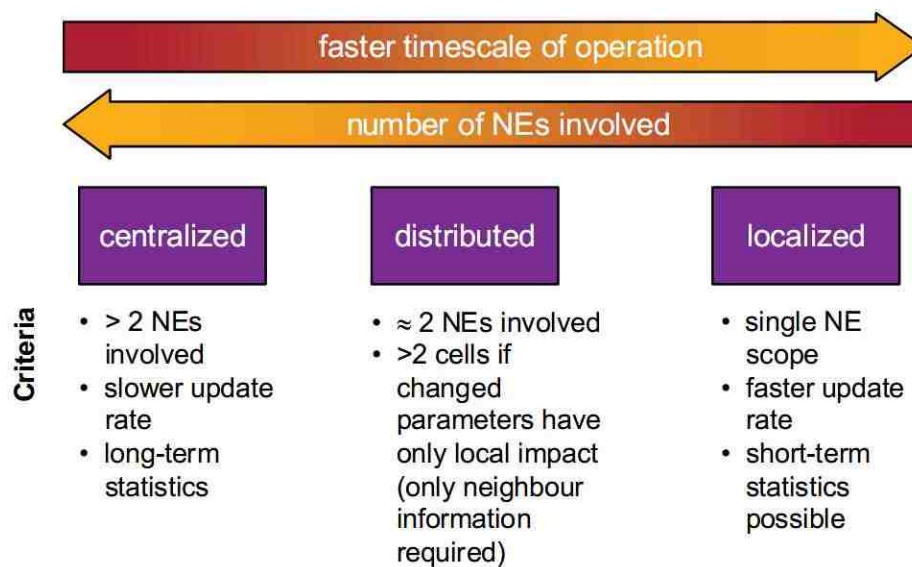
Seuraavaksi käydään läpi itseorganisoituvien radioverkkojen loogiset arkkitehtuurimallit. Tämän jälkeen selvitetään konfiguroinnin, optimoinnin ja korjautuvuuden erityspiirteet LTE-tekniikassa. Itseorganisoituvien radioverkkojen ideologia on käytettävissä muissakin radiotekniikoissa kunkin tekniikan ominaispiirteiden ja rajoitteiden puitteissa.

### **3.1 Itseorganisoituvien radioverkkojen arkkitehtuuri**

Itseorganisoituvia radioverkkoja voidaan toteuttaa eri korkean tason arkkitehtuureilla. Arkkitehtuurin valinta vaikuttaa huomattavasti itseorganisoituvien algoritmien toimintaan. Oikean arkkitehtuurin valinta ei ole aina yksiselitteinen ongelma. Eri ratkaisuille voidaan saavuttaa erilaisia tavoitteita ja myös operaattorit arvostavat tavoitteita ja vaatimuksia erilailla.

Neljä vaihtoehtoista arkkitehtuurimallia ovat keskitetty (engl. *centralized*), hajautettu (engl. *distributed*), paikallinen (engl. *localized*) ja hybridi (engl. *hybrid*). Arkkitehtuurien jakavana tekijänä on algoritmien sijainti. Kuvassa 3.1 vertaillaan arkkiteh-

tuurien eroavaisuuksia. Keskitetyssä arkkitehtuurissa algoritmit sijaitsevat verkonhallintajärjestelmän yhteydessä, mikä on hyvä vaihtoehto optimointi- ja konfigurointitoimenpiteisiin, jotka käsittävät samanaikaisesti useita tukiasemia (NE). Hajautetussa ja paikallisessa arkkitehtuurissa algoritmit sijaitsevat tukiaseman yhteydessä. Arkkitehtuurien erona on se, että hajautettu malli pystyy toimimaan yhteistyössä ympäröivien tukiasemien kanssa, kun taas paikallinen arkkitehtuuri toimii itsenäisesti yhdessä tukiasemassa. Kaksi viimeksi mainittua arkkitehtuuria soveltuvat hyvin yksinkertaisiin toimenpiteisiin, mitkä vaativat nopeita vastausaikoja. Hybridi arkkitehtuuri on sekoitus keskitetyn ja hajautetun arkkitehtuurimallin ominaisuuksista.



Kuva 3.1: Itseorganisoituvien radioverkkojen arkkitehtuurit ja niiden perusominaisuudet [21].

Yhden laitevalmistajan tai operaattorin itseorganisoituvien radioverkkojen kokonaisuus on lähes poikkeuksessa hybridimallinen. Yksittäiset SON-toiminnallisuudet ovat luonteeltaan toisistaan poikkeavia, joten yhdellä mallilla ei pystytä tuottamaan tehokkaita algoritmeja jokaiseen ongelmaan.

### 3.1.1 Keskitetty

Keskitetyssä arkkitehtuurissa [14] SON-algoritmit ja -päätöksenteko sijaitsevat verkonhallintajärjestelmässä tai sen yhteydessä. Keskitetyssä arkkitehtuurimallissa tukiasemat raportoivat suorituskyky mittaukset ja signaalintiviestit SON-yksikölle, mikä puolestaan vastaa tukiasemille miten tilanteessa toimitaan. Koska tukiasemat

eivät tee itsenäisiä päätöksiä, SON-yksikön vikaantuminen estäisi muun muassa uusien tukiasemien käyttöönoton ja radiolinkin optimoinnin. Kun radioverkot ovat tuhansien tukiasemien kokoisia keskitetystä SON-yksiköstä saattaa koitua järjestelmän pullonkaula.

Keskitetty arkkitehtuuri soveltuu hyvin useita soluja samanaikaisesti käsittäviin tilanteisiin, joita ovat esimerkiksi tukiaseman antenneihin tai lähetystehoihin liittyvät muutokset. Erityispiirteinä näillä on merkittävä vaikutusnaapurisoluihin häiriön tai peittoalueen muuttumisen muodossa. Myös tilanteet, joissa vaaditaan tukiasemien yhteistyötä, mutta mitkä ovat liian raskaista hajautetun arkkitehtuurin suoritettavaksi soveltuvat keskitettyyn arkkitehtuuriin. Muita arkkitehtuurin ominaispiirteitä ovat pitkän ajan tilastojen käyttö, josta seuraa hitaat päivitysnopeudet, mikä taas johtaa tilanteeseen, ettei keskitetyllä mallilla pystytä toteuttamaan erityisen hyvin hienosäätöä tarvitsevia toimenpiteitä. Keskitetty arkkitehtuurimalli on näistä malleista yksinkertaisin toteuttaa, mutta yhteensopivuus eri valmistajien laitteiden kesken on mahdollisesti ongelmallista.

Tyypillisiä keskitetyn arkkitehtuurin toimenpiteitä ovat muun muassa erilaiset peitto- ja kapasiteettioptimointiin liittyvät toimenpiteet. Myös itsekorjautumiseen liittyvät toimenpiteet ovat usein keskitettyyn arkkitehtuuriin pohjautuvia.

### **3.1.2 Hajautettu**

Hajautetussa arkkitehtuurissa [14] SON-algoritmit sijaitsevat tukiasemien yhteydessä. Näin pystytään vähentämään hallintajärjestelmän monimutkaisuutta ja kuormitusta, kun SON-päätöksenteot pysyvät hajautettuna eri puolilla verkkoa. Tukiasemat kommunikoivat keskenään, mutta tekevät päätökset itsenäisesti tukiasemissaan. Hajautetut SON-algoritmit soveltuvat tilanteisiin, mitkä koskettavat vain muutamaa solua. Hajautetun arkkitehtuurin toimintaan vaikuttaa, kuinka tukiasemien kommunikointi on mahdollistettu kyseisessä radiotekniikassa. LTE:ssä kaksi tukiasemaa voivat kommunikoida keskenään suoran X2-rajapinnan kautta, joten hajautettu arkkitehtuuri soveltuu LTE ympäristöön hyvin [1]. Hajautettu arkkitehtuuri ei sovellu monen tukiaseman yhtäaikaiseen optimointiin, koska usean tukiaseman välisen yhteistyön koordinointi on haasteellista ilman keskitettyä SON-yksikköä. Koordinoinnin puutteen takia tukiasemien SON-yksiköt voivat kohdata tilanteita, joissa suunnitellut muutokset ovat ristiriidassa aikaisemmin tehtyjen muutoksien kanssa.

Hajautetussa arkkitehtuurissa tukiaseman monimutkaisuus riippuu, kuinka paljon eri SON-toimintoja tehdään hajautetulla arkkitehtuurilla. Keskitettyyn arkkiteh-

tuuriin verrattuna hajautettu arkkitehtuuri on haasteellisempi ja kalliimpi toteuttaa.

Tyypillisiä hajautettuja toimenpiteitä ovat muun muassa solun vaihdon optimointi, häiriön hallinta, jotka vaativat yhteistyötä toisten tukiasemien kanssa. Toisaalta kyseiset toimenpiteet voidaan suorittaa myös laajamittaisempina, jolloin keskitetty arkkitehtuuri soveltuu ongelmanratkaisuun myös.

### 3.1.3 Paikallinen

Paikallinen arkkitehtuuri [35] on hajautetun arkkitehtuurin erikoistapaus. Erona hajautettuun arkkitehtuuriin on se, että yksittäinen SON-toimenpide koskee vain yhtä solua. Se ei ota huomioon, mitä muissa soluissa tapahtuu, tai miten toimenpide vaikuttaa naapurisoluihin. Tästä syystä paikallisten SON-toiminnallisuuksien ei tarvitse välttämättä olla standardoituja. Paikallinen SON-arkkitehtuuri voi käyttää muilta tukiasemilta saatuja suorituskykymittauksia tai muita tietoja hyväksi, mutta minkäänlaista koordinoitua tiedon välitykselle ei vaadita. Paikallisen SON-arkkitehtuurin etuja ovat nopeat päivitysajat ja vastaavasti lyhyen ajan tilastojen hyväksikäyttö. Se soveltuu hyvin hienosäätöä vaativiin yksinkertaisiin ja nopeasti toteutettaviin toimenpiteisiin.

Tyypillisiä paikallisen arkkitehtuurin toimenpiteitä ovat muun muassa mukautuva MIMO ja RACH (Random Access Channel), joiden vaikutusalue rajoittuu lähinnä vain oman solun alueelle.

### 3.1.4 Hybridi

Hybridi arkkitehtuuri [14] on hajautetun ja keskitetyn arkkitehtuurin yhdistelmä. Yksinkertaiset ja muutamiin soluihin liittyvät tehtävät voidaan suorittaa tukiasemassa mutta vaativat, monimutkaiset ja laajaan alueeseen vaikuttavat tehtävät suoritetaan keskitetyn SON-yksikön avulla. Tällä tavoin pystytään hyödyntämään molempien mallien hyvät puolet, kuten skaalautuvuus, nopeus ja suuri laskentateho. Malli tarvitsee määritellä hyvin, jotta yhteistyö kaikkien SON-yksiköiden välillä sujuu saumattomasti.

Hybridimallia pystyttäisiin hyödyntää muun muassa peittoalueen ja kapasiteetin optimoinnissa. Raskasta laskentaa vaativat suurmittaiset optimoinnit suoritetaan keskitetysti ja pienten alueiden hienosäätö suoritetaan hajautetulla arkkitehtuurilla.

## 3.2 Itsekonfigurointi

Nykyiset verkonhallintajärjestelmät eivät tue laitteiden automaattista havaitsemista, autentikointia tai ohjelmistojen latausta ja asennusta, joten laitteet on asennettava ja konfiguroitava käsin. Toiminnan kannalta tärkeiden parametrien, kuten antenni- ja kaapelihävikit (engl. *antenna loss*, *cable loss*) tai häiriösignaalien voimakkuudet täytyy mitata ja tallentaa tietokantoihin. Asennettavat ohjelmistot voivat olla vanhentuneita, joten manuaalinen ohjelmiston päivitys on usein tarpeellista [2]. Suoritettavat asennustoimenpiteet ovat suurimmilta osin johdonmukaisia, joten ne ovat mahdollista toteuttaa automaattisesti.

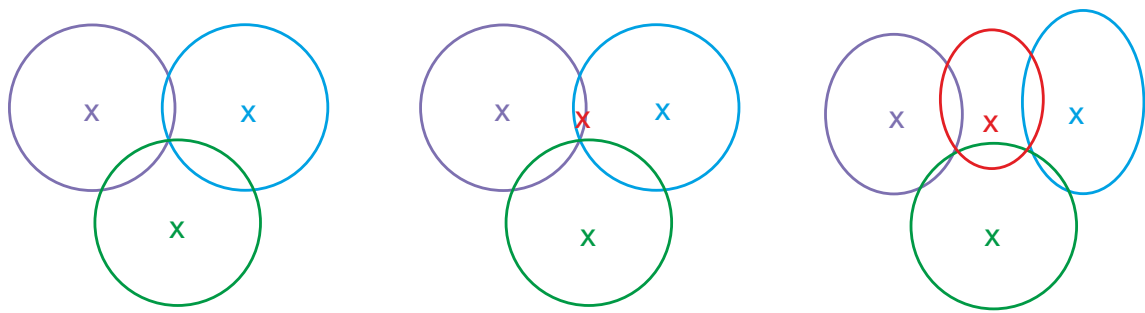
Itsekonfigurointi on ensimmäinen vaihe kohti älykkäitä radioverkkoja. Itsekonfiguroinnin tavoitteena on mahdollistaa uusien laitteiden liittäminen verkkoon ilman, että ihmisen täytyy tehdä käyttöönottoon liittyviä toimenpiteitä fyysistä asennusta ja kaapelointia lukuunottamatta. Tavanomaiseen verkon suunnitteluun verrattuna itsekonfigurointi mahdollistaa nopeamman reagoinnin lisäkapasiteetin tarpeen havaitsemiselle. Tukiaseman käyttöönotto nopeutuu kun järjestelmällä on kyky etsiä uudelle tukiasemalle optimaalinen sijainti ja samalla suositella uudet konfiguraatiot myös ympäröiville tukiasemille [13].

Kuva 3.2 esittää uuden tukiaseman lisäämistä verkkoon, ja kuinka se vaikuttaa jo olemassaoleviin soluihin. Alkutilanteessa verkko toimii normaalisti. Kuitenkin halutaan lisätä kapasiteettia (tai vaihtoehtoisesti paikata peittoalueen aukkoja), joten tilanteessa päädytään lisäämään uusi tukiasema alueen keskelle. Tukiaseman paikan valintaan vaikuttaa muun muassa maastonmuodot, käyttäjien hajaantuneisuus ja olemassa olevien tukiasemien sijainti. Fyysisen asennuksen jälkeen sekä uusi että ympäröivät tukiasemat osaavat sopeutua muuttuneeseen tilanteeseen siten, että ne etsivät itselleen mahdollisimman optimaaliset asetukset. Lopputilanteessa solut voivat olla eri muotoisia ja kokoisia kuin alkutilanteessa. Huomioitavaa on, että tukiaseman ei tarvitse olla keskellä solua, koska antenniasetuksilla solun muotoa on helppo muuttaa olosuhteisiin sopivaksi.

Itsekonfigurointi koostuu seuraavista osa-alueista:

1. Suunnitteluun liittyvät toimenpiteet:
  - Uuden tukiaseman vaatimuksen havaitseminen.
  - Tukiaseman maantieteellisen sijainnin valinta.
  - Asetuksien suunnittelu ja valitseminen.
2. Autentikointi.





1: Alkutilanne

2: Uusi tukiasema (punainen)  
lisätään

3: Tukiasemat konfiguroituvat  
uudelleen

Kuva 3.2: Solut sopeutuvat automaattisesti uuden tukiaseman lisäämisen jälkeen.

3. Asetuksien ja ohjelmistojen lataus, asennus ja päivitys.
4. Laitteiston ja ohjelmistojen testaus.

Itsekonfigurointiprosessi käynnistyy erilaisilla itsesuunnitteluun (engl. *self-planning*) liittyvillä toimenpiteillä. Uuden tukiaseman vaatimuksen havaitseminen tapahtuu analysoimalla verkon suorituskykyä. Paikallisen suorituskyvyn lasku (esimerkiksi katkaistujen puheluiden lukumäärä tai solun vaihto- ja radiolinkkivirheet), mikäli ongelmia ei pystytä paikkaamaan optimointitoimenpiteillä (katso luku 3.3).

Uuden tukiaseman sijainnin määrittämisessä käytetään hyväksi tietoja muun muassa olemassa olevasta infrastruktuurista, kuormituksesta eri tukiasemilla, maantieteellisestä luonteesta sekä oletuksia käytettävistä palveluista ja käyttäjämääristä. Automaattisen suunnittelun seurauksena suorituskyvyn ongelmat voidaan korjata nopeammin ja ihmisen roolia verkon suunnittelussa voidaan vähentää.

Asetuksien suunnittelu voidaan toteuttaa karkeasti ottaen kahdella eri tavalla: Joko käyttää oletusarvoisia tehdasasetuksia tai ladata ja asentaa kaikki asetukset onnistuneen autentikoinnin jälkeen. Nykyisissä radioverkkojärjestelmissä tukiasemat konfiguroidaan manuaalisesti tehtaalla ja/tai paikanpäällä asennuksen aikana. Itsekonfiguroinnissa tätä lähestymistapaa on tarkoitus välttää korkeiden kustannuksien ja paikanpäällä tarvittavan konfiguroinnin takia. Jos tehdasasetuksia ei käytetä kaikki tarvittavat asetukset ja sovellukset ladataan sen jälkeen kun tukiasema on kytketty verkkoon. Ladattavat asetukset voivat olla operaattorin oletusarvoisia tai tukiasemille yksilöityjä. Itseoptimoinnilla voidaan myöhemmin optimoida asetukset vastaamaan tukiaseman todellisia tarpeita. Muun muassa radiolinkkiin liittyvien asetusten kohdalla on suositeltavaa käyttää oletusarvoisia asetuksia, jolloin optimointia ei tarvitse aloittaa aivan alusta, ja tukiaseman käyttöönotto nopeutuu.

Tehdas- ja oletusarvoisten asetusten tulisi olla sellaisia, että niitä voidaan käyttää mahdollisimman monenlaisissa tilanteissa, ettei niillä ole välittömästi negatiivista vaikutusta naapurisoluihin esimerkiksi kasvavan häiriön muodossa. Toisaalta osa asetuksista on luonteeltaan sellaisia, joiden tehdasasetuksista ei ole mitään hyötyä ellei niitä yksilöidä jo valmistusvaiheessa. Tällaisia ovat esimerkiksi tietoturvaan ja osittain myös käytettäviin ohjelmistoihin liittyvät asetukset, mitkä ovat operaattori-kohtaisia.

Tukiaseman fyysisen asennuksen ja käynnistämisen jälkeen ensimmäinen tehtävä on tukiaseman autentikointi verkkoon. Autentikoinnin perimmäinen tarkoitus on todentaa laitteet ja varmistaa niiden kytkeytyminen oikeaan verkkoon. Samalla estetään vieraiden laitteiden kytkeytyminen verkkoon, millä estetään muun muassa tietomurtoja. Autentikointi perustuu yksilöllisen tunnisteiden (solu ID) vertaamista tietokannasta löytyviin tunnisteisiin, jotka on lisätty suunnitteluvaiheessa. Autentikointi tulisi tehdä myös aina ohjelmiston tai laitteiston päivityksen yhteydessä. Vasta onnistuneen autentikoinnin jälkeen tukiaseman yhteys hallintajärjestelmään avataan.

Onnistuneen autentikoinnin jälkeen ladataan ja asennetaan (tai päivitetään) tarvittavat asetukset, joita ovat muun muassa verkon tiedonsiirto- ja tietoturva asetukset (esimerkiksi laitteen IP-osoite, palvelimien IP-osoitteet, sertifiointit ja rajapinnat runkoverkkoon), tukiasemien yksilölliset asetukset (firmware ja tarvittavat ajurit) ja radioverkon asetukset (esimerkiksi lähetysteho ja antenniasetukset). Näiden jälkeen vuorossa ovat muut tarvittavat ohjelmistot, kuten SON-optimointialgoritmien lataus ja asennus. Osan tiedoista tukiasema saa selville omatoimisesti testaamalla parametreja ensimmäisen käynnistyksen yhteydessä, joita ovat muun muassa antenni- ja kaapelihävikit sekä signaalivahvistimen (engl. *Tower Mounted Amplifier, TMA*) hyöty [2]. Koska asetukset ja ohjelmistot ladataan operaattorin tietokannasta, ne ovat lähes poikkeuksetta uusimpia versioita, joten niiden yhteensopivuus ja toimivuus on usein parempi kuin jos käytettäisiin tehdasvalmisteisia asetuksia ja ohjelmistoja, jotka voivat sisältää vanhentuneita ohjelmistoversioita.

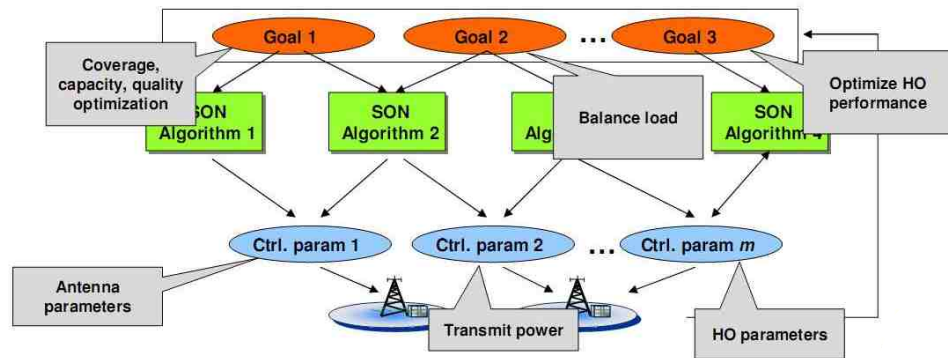
Viimeisenä vaiheena laite suorittaa itsetestauksen (engl. *self-testing*), jolla varmistetaan oikea ja vakaa toiminnallisuus [2]. Testattavia asioita ovat lähinnä, ettei asetuksissa ole ristiriitaisia arvoja ja käytössä olevat ohjelmistot toimivat suunnitellusti. Jos virheitä esiintyy, ne korjataan joko käsin tai automaattisesti, jonka jälkeen laite testataan uudelleen. Mikäli virheilmoituksia ei tule, laite on käyttövalmis. Laite pystytään ottamaan käyttöön ja konfiguraatiota parantamaan käytönaikana itseoptimointimenetelmillä.

### 3.3 Itseoptimointi

Itseoptimointi on jatkuva prosessi, jolla pyritään nostamaan verkon suorituskykyä muokkaamalla tukiasemien asetuksia vastaamaan verkon ja ympäristön muuttuviin olosuhteisiin [35]. Tavanomaiseen suorituskyvynhallintaan verrattuna itseoptimointi tarkentaa ja tehostaa verkon optimointia ja reagointi heikkoon suorituskykyyn nopeutuu. Optimointiprosessi on käynnissä koko verkon toiminta-ajan siitä lähtien kun tukiasema on asennettu verkkoon. Tukiasemien asetuksia ei välttämättä muokata koko ajan, mutta koko ajan järjestelmä tutkii verkon tilannetta, onko verkossa epäoptimaalista toimintaa ja kuinka siihen voitaisiin reagoida. Tukiaseman sisäisiä sekä tukiaseman ja päätelaitteen välisiä suorituskykymittauksia käytetään apuna säädettyä verkkoa. Suorituskykymittaukset voivat tapahtua tietyn aikajakson välein tai jonkin määritellyn tapahtuman jälkeen. Esimerkiksi tiettyjen raja-arvojen ylityksistä voidaan käynnistää tarkentavia suorituskykymittauksia. Niitä analysoidessa optimointiagentin päämääränä on havaita mahdolliset ongelma- tai virhetilanteet. Seuraavaksi agentti pyrkii etsimään syyt tällaisille tilanteille tarjoamalla muutosehdotuksen asetuksiin, jotta virhetilanteet poistuisivat tai ainakin lieventyisi [22]. Ensimmäisenä pyritään ratkaisemaan ongelman ydin karkeasti ja sen jälkeen tarkentaa asetukset kohdalleen vaiheittain iteratiivisesti. Ongelman suurimittainen ratkaisu on tärkeä tehdä nopeasti jolloin palveluita pystytään tarjoamaan edes jollain tasolla. Asetuksien viimeistely voi viedä ajallisesti yhtä kauan tai jopa kauemmin kuin suurimittaisen ongelman ratkaisu, joten ongelman ratkaisu vaiheittain koetaan hyväksi tavaksi. Tällä tavoin järjestelmä saa nopeasti palautetta, kuinka muutokset vaikuttavat verkon suorituskykyyn, ja sen pohjalta järjestelmä pystyy tarvittaessa muuttamaan strategiaa ongelman korjauksessa.

Kuvassa 3.3 tarkastellaan itseoptimoinnin osa-alueita [35]. Tavoite määrittää mitä pyritään saavuttamaan. Jokaisella itseoptimointialgoritmilla voi olla yksi tai useampi tavoite toteutettavana. Algoritmi muuttaa joukkoa asetuksia saavuttaakseen ennalta määritetyn tavoitteen. Asetuksia muutetaan algoritmin päätöksien mukaisesti, joilla haluttu tavoite saavutetaan. Algoritmien välistä yhteystyötä tarvitaan, koska niillä saattaa olla ristiriitaisia tavoitteita. Keskeisten asetusten muuttaminen saattaa vaikuttaa ei-halutulla tavalla muihin tavoitteisiin.

SON-algoritmi voi määritellä halutut muutokset suoraan parametreihin tai ylä- ja alarajat parametrin muuttuvalle arvolle. Koordinaattori voi hylätä halutun muutoksen tai hyväksyä osittain ottaen huomioon kaikkien SON-algoritmien vaatimukset ja muutoksen vaikutukset tavoitteisiin ja operaattorin politiikkaan. Koordinaattori ilmoittaa SON-algoritmile esimerkiksi jos haluttua muutosta ei voida suorittaa



Kuva 3.3: Tavoitteisiin päästäkseen SON-algoritmit vaativat koordinoitua [3].

tai muutoksista muissa parametreissa, jotka voivat vaikuttaa SON-algoritmin tavoitteeseen. Tällöin algoritmi pyrkii etsimään vaihtoehdoisen ratkaisun ongelmaan.

Seuraavaksi perehdytään optimoinnin osalta lähinnä optimoinnin tavoitteisiin, mitä niillä pyritään saavuttamaan ja kuinka ne voidaan saavuttaa. Tutkielmassa ei käsitellä asetuksiin ja algoritmeihin liittyviä teknisiä asioita, kuten mitkä ovat oikeat muutettavat asetukset ja kuinka asetusten muuttaminen käytännössä toimii ja vaikuttaa muihin asioihin.

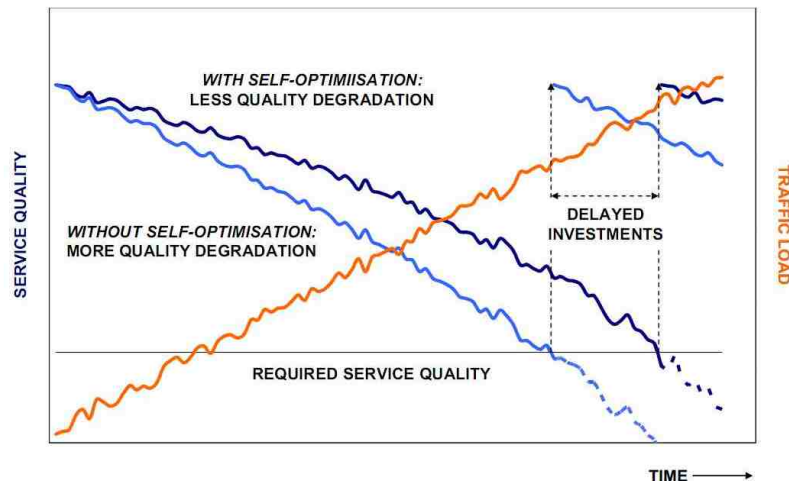
Operaattori pystyy harvoin toteuttamaan kaikki tavoitteensa, joten optimointi on kompromissien hakemista perustuen omaan suunnitelmaan siitä, mitkä ominaisuudet koetaan tärkeimmiksi. Päämääräiset tavoitteet; taloudelliset asiat ja verkon suorituskyvyn parantaminen ovat selkeitä tavoitteita, mutta toteutustapa on operaattorin oma valinta.

Optimointi ei ole yksiselitteinen asia. Oikean optimointiprosessin valitsemiseen vaikuttavat muun muassa seuraavat asiat:

1. Optimointitoimenpiteen vaikutusalue sekä sen ennakoitua hyödyt ja haitat.
2. Kuinka hyvin tietyt muutokset vaikuttavat verrattuna muihin vaihtoehtoihin?
3. Ongelman laajuus: Yksittäinen solu, paikallinen, verkon laajuinen?
4. Kuinka nopeasti korjausvaste vaaditaan? Sekunneissa, minuuteissa, tunneissa?
5. Kuinka paljon laskentatehoa on käytettävissä? Kuinka paljon laskentatehoa tarvitaan?
6. Kuinka paljon tietämystä verkon tilasta algoritmi vaatii?
7. Kuinka verkko käyttäytyy oppimisvaiheessa?

Edellisen listan kohdat 1 ja 2 liittyvät oikean optimointitavan valitsemiseen kullekin virhetilanteelle. Yksi ongelma voidaan ratkaista eri tavoilla, joten järjestelmän täytyy valita mahdollisista toimenpiteistä tilanteeseen sopivin. Kohdat 3–6 liittyvät ratkaisevasti, millainen arkkitehtuuri soveltuu kuhunkin tilanteeseen. Viimeinen kohta on erittäin tärkeä koneoppimisen näkökulmasta, ja siitä miten koneoppimista voidaan käyttää hyväksi itseorganisoituvissa radioverkoissa. Koneoppimisen tavoitteena on havaita toimintakuvioita verkon toiminnassa, yhdistää näitä virhetilanteisiin ja niitä vastaaviin korjausmenetelmiin [34].

Kuvassa 3.4 esitetään itseoptimoinnin vaikutusta verkon suorituskykyyn. Kuvan oranssi käyrä kuvaa kuormituksen tasoa verkossa. Vaalean sininen käyrä kuvaa palvelun laatua ilman itseoptimointia ja tumman sininen vastaavasti itseoptimoinnin kanssa. Vähäisellä kuormituksella itseoptimointi ei tuo mainittavaa hyötyä verkon suorituskykyyn. Kuormituksen kasvaessa ja sen ollessa lähellä maksimia, itseoptimoidun verkon suorituskyky säilyy parempana, koska verkko pystyy mukautumaan verkon muuttuneisiin olosuhteisiin reaaliajassa. Itseoptimoinnilla ei pystytä välttymään kokonaan suorituskyvyn laskulta kuormituksen noustessa, mutta sen vaikuttamisnopeuteen voidaan vaikuttaa.



Kuva 3.4: Palvelun laatu suhteessa kuormituksen kasvuun on parempi itseoptimointimenetelmien kanssa [12].

Tyypillisiä optimointikohteita ovat muun muassa häiriön hallinta, kuormituksen tasaaminen, solun vaihdon optimointi ja energiansäästöön liittyvät toimenpiteet [2] [13] [8].

### 3.4 Itsekorjautuminen

Vianhallinta on yksi tärkeimmistä verkonhallinnan osa-alueista, jolla taataan verkon vakaa toiminta koko toiminta-ajan. Sen tarkoituksena on virheiden reaaliaikainen havaitseminen, ongelman minimointi ja korjaaminen. Radioverkkojen kasvaessa pieni vika voi aiheuttaa ongelmia laajoille alueille. Verkonhallinnan asiayhteydessä virheeksi, viaksi tai poikkeukseksi ymmärretään kaikki tilanteet, joissa verkon normaali toiminta estyy. Virheet voivat olla laitteisto-, asetus-, ohjelmisto- ja käyttövirheitä sekä kaikkea muuta verkon epäoptimaalista toimintaa. Vikatilanteita ovat muun muassa verkkoyhteys-, tallennustila-, virransaanti- ja lämpötila- ja ohjelmistojen yhteensopivuusongelmat sekä kaikki epäoptimaalisista asetuksista johtuva heikko suorituskyky. Virheiden seurauksena päätelaitteet eivät saa tai pysty pitämään käytössään kaikkia radioresursseja paikallisella alueella, joten verkon suorituskyky heikkenee merkittävästi [16]. Käyttämättömät resurssit voivat tarkoittaa tiettyjä kriittisiä loogisia kokonaisuuksia tai sitä, että resursseja ei pystytä käyttämään yhtä tehokkaasti. Ensin mainittu tilanne on siinä mielessä hankalampi, koska esimerkiksi jos päätelaitteiden mahdollisuus yhteydenmuodostukseen tukiasemaan estyy, uusia käyttäjiä ei pystytä palvelemaan. Tukiaseman toiminnassa ei välttämättä havaita poikkeavuuksia verkonhallinnassa, koska solussa on käyttäjiä, ja niiden kanssa kommunikointi toimii normaalisti. Jälkimmäinen kuvaa tilannetta, jossa esimerkiksi tehonsäätö ei vastaa todellista tilannetta, jolloin peittoalue ei vastaa sitä, mitä sen pitäisi olla, eli tukiasema toimii niin sanotusti heikentyneesti. Laitteistonongelmat ovat verkonhallinnalle vaativia. Tukiaseman toimintakyky voi katketa esimerkiksi antenni tai kaapelointi-ongelmaan, jolloin käyttäjiä ei pystytä palvelemaan lainkaan [36]. Tällöin tukiasema näyttäytyy päättekäyttäjille tai naapuritukiasemille, mutta verkonhallinnassa tukiasema voi näyttäytyä vain käyttäjistä tyhjänä olevana soluna mutta silti toimintakykyisenä.

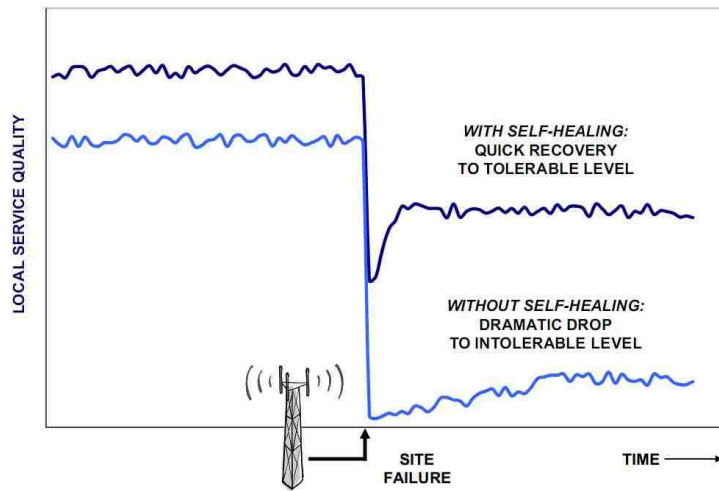
Ideaalitilanteessa edellä kuvatut ongelmat luovat virrehälytyksiä tai muita merkkejä, joiden avulla toimintahäiriöt pystytään havaitsemaan ja korjaamaan. Virrehälytyksellä tarkoitetaan tapahtumaraporttia, minkä päämäärä on paljastaa verkossa oleva virhetilanne tai epätavallinen verkon toiminta ilman erillistä asian tutkimista. Virrehälytykset voivat olla myös virheellisiä. Hälytyksien tulisi olla sellaisia, että niistä käy ilmi vian laatu, vakavuus ja syy sisältäen mahdollisimman tarkan tiedon sen olinpaikasta. Virrehälytyksiä voi tapahtua päivittäin satoja. Vianhallinta nykyisissä järjestelmissä on erittäin riippuvaista ihmisen toimenpiteistä. Kahden edellä mainitun syyn takia virheiden reaaliaikainen hallinta on erittäin vaikeaa. Monien yhtäaikaisten virrehälytyksien ilmaantuminen johtaa helposti virheellisiin tulkin-

toihin. Ongelmia voi olla hälytyksien priorisoinnissa tai eri hälytyksien yhdistämisessä samaksi viaksi [40]. Muun muassa katkos tukiasemassa voi luoda monia eri hälytyksiä.

Toinen ongelma on, että kaikki virheet eivät luo virrehälytystä. Vaikka ne eivät luo virrehälytyksiä (tai ne eivät saavu hallintajärjestelmään), virheet voivat olla vähintään yhtä kriittisiä kuin hälyttävät virheet. Niiden ongelmallisuus perustuu siihen, ettei niiden olemassaolosta saada tietoa kovin nopeasti niiden tapahtumisen jälkeen. Tukiasemaa, jonka resursseja ei pystytä käyttämään voidaan kutsua nukkuvaksi soluksi (engl. *sleeping cell*). Tapoja havaita tällaisia virheitä ovat pääteikäyttäjien vikailmoitukset, reaaliaikaiset laitetestit, poikkeuksien etsiminen luoduista tietokannoista ja huomaamalla virhe toiminnan aikana, esimerkiksi jos yhteydenmuodostus tiettyyn laitteeseen epäonnistuu. Yksinkertainen menetelmä verkon valvonalle olisi määritellä jokaista virhettä vastaavat ominaisuuskykykymittaukset ja niitä vastaavat kynnsarvot, mitkä kuvaavat vian olemassaoloa. Tällainen toimintamalli johtaisi kuitenkin isoihin tietokantoihin, lukuisiin suorituskykykymittauksiin ja lisääntyvään tiedonsiirtoon koko verkon toiminta-alueella, mikä puolestaan kasvattaa entisestään radioverkkojen monimutkaisuutta. Myöskään tietyille paikalliselle alueelle mitatut suorituskykykymittaukset ja niitä vastaavat arvot eivät ole vertailukelpoisia toisilla alueilla [43]. Itseorganisoituvuuden yhtenä tavoitteena on mainittu radioverkkojen monimutkaisuuden välttäminen, joten tällainen lähestymistapa on poissuljettu vaihtoehto.

Itsekorjautumisen tavoitteena on havaita ja paikallistaa virhe- ja poikkeustilanteet tukiasemissa ja tarjota menetelmät niiden korjaamiseen. Vikaantumiseksi ei laskea tilanteita, mitkä korjaantuvat optimoimalla asetuksia (vertaa itseoptimointi). Ongelmien minimointi tapahtuu usein konfiguroimalla ympäröiviä soluja uudelleen vastaamaan peittoalueen ja kapasiteetin muuttuneeseen tilanteeseen. Tavantomaiseen vianhallintaan verrattuna viat pystytään havaitsemaan nopeammin ja korjaustoimenpiteet ovat taloudellisesti edullisimpia suorittaa, koska viat pystytään paikallistamaan tarkemmin. Vioista aiheutuva haitta pääteikäyttäjille on pienempi, koska ongelman minimointi ja lopullinen korjaustoimenpide voidaan suorittaa nopeammin [13].

Kuvassa 3.5 esitetään itsekorjautuvuuden vaikutusta radioverkon paikalliseen palvelunlaatuun vikaantumistilanteessa. Vaalean sininen viiva kuvaa palvelunlaatua perinteisessä radioverkossa. Tumman sininen viiva kuvaa vastaavaa tilannetta itsekorjautuvassa radioverkossa. Jo lähtötilanteessa itsekorjautuvan radioverkkojärjestelmän palvelunlaatu on korkeampi kaikkien itseorganisoituvien ominaisuuksien seurauksena. Merkittävä kohta on, kun tukiasema vikaantuu. Ilman automaattisia



Kuva 3.5: Vikatilanteissa itsekorjautuvuuden merkitys verkon suorituskykyyn on merkittävä [12].

korjautumisominaisuuksia paikallinen palvelunlaatu tippuu sietämättömään ja se paranee ajan kuluessa vain hieman. Järjestelmä ei välttämättä edes huomaa heti laitteen vikaantumista, jonka seurauksena korjaaminen viivästyy. Itsekorjautuvassa tilanteessa verkko kokee pienemmän palvelunlaadun tiputuksen ja pian vikaantumisen jälkeen järjestelmä osaa automaattisesti sopeutua muuttuneeseen tilanteeseen, mikä nostaa palvelunlaadun jälleen kelvolliselle tasolle.

Tyypillinen itsekorjautuva ongelma voi olla jonkin komponentin lämpötilaongelma tai rikkoutuminen [22]. Korjaustoimenpiteenä esitetään esimerkiksi edellisen ohjelmistoversion palauttamista, varavirran käyttämistä tai laitteen uudelleenkäynnistämistä. Aina vikaa ei välttämättä pystytä korjaamaan automaattisesti. Tällaisissa tilanteissa pyritään lieventämään ongelmasta aiheutuvaa haittaa muun muassa konfiguroimalla ympäröivien tukiasemien asetuksia uudelleen. Fyysistä korjaustoimintaa vaativista työtehtävistä järjestelmä osaa ilmoittaa hälytyksen muodossa.

Itsekorjautuvuus voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, joista kerrotaan lisää seuraavaksi:

1. Havaitseminen
2. Ongelman minimointi
3. Virheen poistaminen.



### 3.4.1 Vian havaitseminen

Vikojen havaitseminen nykyisissä radiotekniikoissa on toteutettu manuaalisena valvonnalla verkon liikennetottumuksia ja -poikkeuksia tutkimalla, koska laitteet eivät useinkaan kerro suoranaisesti ongelmian olemassaoloa. Jos ongelmat tukiasemissa jäävät havaitsematta, niitä kutsutaan nukkuviksi soluiksi. Solut, joissa tavallisesti on liikennettä, mutta tietyllä hetkellä nähdään tyhjinä voidaan asettaa niin sanotuksi ”mahdollisiksi nukkuviksi soluiksi”, joihin kohdistetaan tarkempia tarkistuksia vian löytämiseksi. Tämän lähestymistavan suurin ongelma on solut, jotka ovat aika ajoin luonnollisesti tyhjiä. Täten on vaikea arvioida johtuuko tyhjiä solujen olemassaolo luonnollisista syistä vai onko niiden taustalla vikatilanne. Lisäksi eri kellonaikoina tai vuodenaikoina solujen käyttöasteissa on luonnollisia poikkeuksia. Erilaisten ajastimien tai laskureiden käytöllä luonnollisesti hetkelliset tyhjät solut saadaan karsittua pois, mutta samalla viivästyy ongelmallisten solujen korjaaminen [44]. Täten ollaan tilanteessa, jossa vaaditaan automaattista nukkuvan solun havaitsemistekniikkaa, mikä yhtäaikaaisesti löytää nukkuvat solut tehokkaasti ja on taloudellisesti tehokas tarkoittaen, ettei toimivia soluja merkitä nukkuviksi. Luvussa 4 kuvataan menetelmä, jolla voidaan havaita nukkuva solu kun vian syynä on rikkoutunut tukiasema.

Radioverkkojen kaltaisissa isoissa järjestelmissä vian havaitseminen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa on erittäin tärkeää, jolla vältetään pitkät katkokset järjestelmässä. Koska vian havaitseminen tehokkaasti vaatii aina jonkinasteista verkon valvontaa, on myös mahdollista ennakoita mahdollisia tulevia virheitä. Vian ennakkoinnilla pystytään antamaan järjestelmälle aikainen varoitus tulevasta ongelmasta, millä voidaan nopeuttaa varsinaista vian havaitsemista ja korjausta. Ennakoinnilla voidaan ottaa huomioon, missä solussa katkos tapahtuu, milloin sen on aika tapahtua, katkoksen todennäköisyys, katkoksen laajuus, tyyppi (kaikki resurssit saavuttamattomissa vai vain osa) ja mahdollinen tieto naapurisoluihin joihin katkos vaikuttaa. Nämä tiedot tulevat sittemmin myös varsinaisen havaitsemis-toiminnon käyttöön, jolloin näitä tietoja ei tarvitse tutkia uudelleen.

Vian automaattinen havaitseminen perustuu erilaisiin suorituskykymittauksiin. Suorituskykymittaukset eivät suoranaisesti kerro mahdollisista vioista vaan järjestelmän tulee kyetä analysoimaan eri mittareilta saatuja tietoja. Kaikkien suorituskykymittauksien kerääminen ja analysointi on paljon resursseja kuluttava operaatio, joten onkin järkevämpää valvoa vain keskeisiä suorituskykymittauksia, ja niiden osoittaessa ongelmaa, tarkentaa mahdollisen vian olemassaoloa ottamalla analyysiin mukaan tarkentavia suorituskykymittauksia. Suorituskykymittauksia voidaan

analysoida asettamalla kynnyksarvoja, joiden ylitys tai alitus kuvaa virhetilannetta tai käyttämällä erilaisia tiedonlouhintamenetelmiä. Omassa tutkimuksessa vian havaitsemisen apuna käytetään vertailuaineistoa, jonka tiedetään toimivan halutulla tavalla, ja johon testattavaa aineistoavertamalla pystytään havaitsemaan mahdollisia poikkeuksia verkon toiminnassa. Haasteena tällaisessa lähestymistavassa on määrittellä vertailuaineisto sellaiseksi, että sitä pystytään käyttämään mahdollisimman useissa ja erilaisissa tilanteissa.

Seuraavassa on listattu itsekorjautuvuudessa käytettäviä tietolähteitä, joita analysoimalla ja vertaamalla aiempiin tapahtumiin ja tilastoihin pystytään käyttämään hyväksi vian havaitsemisessa ja paikantamisessa.

- Päätelaitteen suorituskykymittaukset
  - Vastaanotettu lähetysteho
  - Signaalihäiriösuhde
  - Epäonnistuneiden solun vaihtojen osuus
  - ...
- Tukiaseman suorituskykymittaukset
  - Laitteiston ja ohjelmiston vika- ja käyttöraportit sekä omatoimiset testit
  - Lämpötila (laitetilan, laitteiden ja komponenttien)
  - Liikennemäärät, resurssien käyttö, ...
  - ...
- Hallintajärjestelmän suorituskykymittaukset
  - Tukiaseman ja runkoverkon päästä-päähän (engl. *end-to-end*) yhteyden toiminta
  - Siirtoviive tukiaseman ja runkoverkon välillä
  - ...
- Tieto ajoitetuista käyttökatkoksista liittyen muun muassa laitteiston tai ohjelmiston asennuksiin tai päivityksiin.

### 3.4.2 Ongelman minimointi

Vikaantumisesta johtuvaa katkosta tukiaseman toiminnassa ei välttämättä pystytä poistamaan välittömästi sen tapahduttua. Näin ollen onkin järkevää aloittaa ongelmasta johtuvan haitan minimointi. Sen päämääränä on määrittää ja asettaa radioverkon parametrit automaattisesti uudelleen siten, että se lieventää katkoksesta aiheutuvaa haittaa eli minimoi verkon suorituskyvyn laskun katkoksen aikana. Tämä voidaan tehdä optimoimalla peittoaluetta ja suorituskykyä siten, että kapasiteetti on mahdollisimman lähellä operaattorin tavoitearvoja, mutta samalla katkoksesta aiheutuneita peittoalueen aukkoja ei olisi. Muita sovellettavia optimointimenetelmiä ovat muun muassa solun vaihto ja kuormituksen tasaaminen. Ongelmien lieventämisessä optimointi-idea pysyy samana, mutta jonkin paikallisen alueen odottamaton ja heikompi suorituskyky lisää haastetta itseoptimoinnille. Mikäli naapurisoluja ei ole olemassa tai naapurisolut toimivat jo täydellä kuormituksella, päätelaitteita voidaan yrittää siirtää toisiin järjestelmiin, kuten laajan peittoalueen omaavaan GSM-järjestelmään.

### 3.4.3 Virheen poistaminen

Katkosta voidaan korjata samanaikaisesti ongelman lieventämisen aikana tai vasta sen jälkeen riippuen ongelman laajuudesta ja monimutkaisuudesta. Korjaustoimenpiteitä ovat erilaiset automaattisesti etänä suoritettavat hallintatoimenpiteet, kuten varavirran käyttö, vanhemman toimivaksi todetun ohjelmistoversion palauttaminen tai laitteen uudelleenkäynnistys. Mikäli nämä toimenpiteet eivät auta tai tiedetään, että paikalla tarvitsee tehdä fyysisiä huoltotoimenpiteitä, kuten komponenttien vaihtamista, ilmoitetaan siitä ylläpidolle hälytyksellä. Kun vika on korjattu kokonaan, vaikutuksen alaisille tukiasemille palautetaan ennen vikatilannetta olleet asetukset.

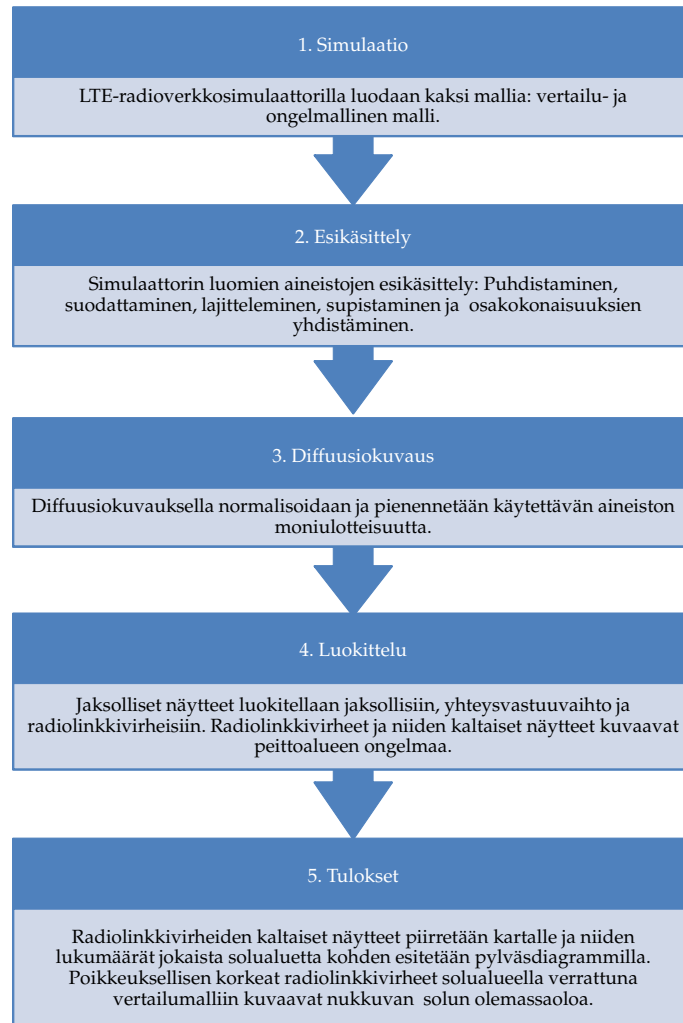
## 4 Nukkuvan solun havaitseminen

Prosessikuvasta 4.1 selviää, kuinka nukkuva solu pystytään havaitsemaan verkon tapahtumaraportteja hyödyntäen. Ensin LTE-radioverkkosimulaattorilla luodaan aineistot, joita käsitellään seuraavissa vaiheissa. Esikäsitteilyn avulla simulaattorin luomat aineistot muokataan sellaisiksi, että ne soveltuvat tuleviin tiedonlouhintamenetelmiin. Diffuusiokuvauksella pienennetään tutkittavan aineiston moniulotteisuutta, mikä tehostaa luokittelua. Luokittelun tutkittavasta aineistosta kerätään haluttunlaisia näytteitä jatkokäsittelyyn, joiden perusteella nukkuva solu voidaan löytää. Viimeisenä vaiheena on esittää havainnollistavia kuvia, jotka näyttävät mahdollisen nukkuvan solun olemassaolon ja sijainnin.

### 4.1 LTE-radioverkon simulointi

Tutkimuksessa on käytetty dynaamista radioverkkosimulaattoria, jolla on mallinnettu 3GPP Release 8 mukaista E-UTRAN verkkoa [17]. Dynaamiset simulaattorit ovat yleisesti monimutkaisia työkaluja, ja ne vaativat suurta laskentatehoa ja paljon aikaa lyhyysiinkin simulaatioihin. Ne kuitenkin tuottavat tarkkoja mallinnuksia verkon käyttäytymisestä ja suorituskyvystä, jolloin dynaaminen simulaattori antaa hyvät lähtökohdat tarkemmille tutkimuksille. Dynaamisessa simulaattorissa voi olla satoja parametrejä ja asetuksia, joilla pystytään mallintamaan haluttu tilanne radioverkossa. Simulaattori pystyy ottamaan huomioon muun muassa maanpinnan muodot, radiokanavan laadun, signaalin etenemis- ja monitiemallit sekä päätelaitteiden liikkumisen ja solun vaihdot.

Keskeisimmät simulaation asetukset perustuvat 3GPP:n määrittelyihin [5] [7], joiden lisäksi on lukuisia muutettavia asetuksia, joilla mahdollistetaan todentuntuisten ja tarkkojen ongelmien kuvaukset. Asetuksilla pystytään kuvaamaan sekä ylä- ja alalinkin radioresurssihallintaa, skedulointia, solun vaihtoja ja liikenteen mallintamisen toimintoja [29] [42] [17]. Simulaation verkkoasetukset ovat kerrottu liitteessä A. Simulaattorilla on luotu kaksi skenaariota (vertailuskenaario ja ongelmaskenaario) verkon käyttäytymisestä ja ominaispiirteistä eri tilanteissa. Ensimmäinen skenaario mallintaa verkon toimintaa normaalitilanteessa ja jälkimmäinen kuvaa verkkoa, jossa yksi tukiasema on vikaantunut, jota kutsutaan nukkuvaksi soluksi. Simulaattorin luomia tietokantoja ja tapahtumaraportteja käytetään tämän



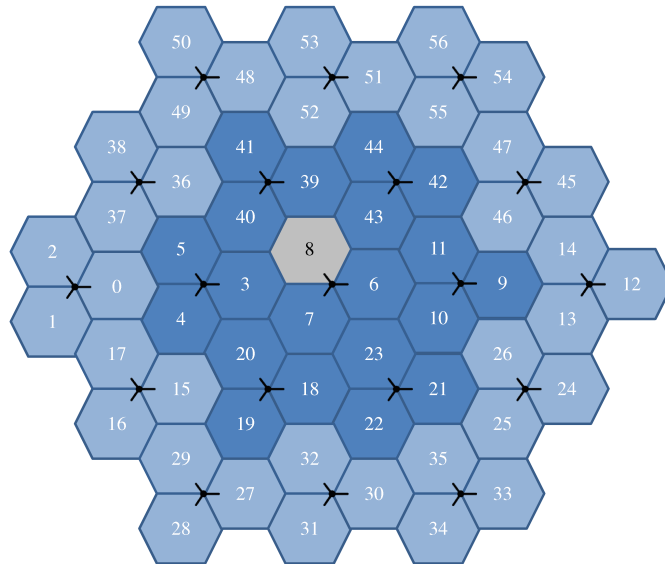
Kuva 4.1: Prosessikaavio nukkuvan solun havaitsemisen eri vaiheista.

jälkeen hyväksi analysoidessa verkon toimintatapaa ja havaitsemaan ennalta määritetty ongelma. Simulaattorin luoman tietokannan kaikki parametrit löytyvät liitteestä B. Kaikki tieto tietokannassa on numeerisessa muodossa, jonka analysointi tiedonlouhintatekniikoilla on helpompaa kuin nimellisarvojen.

Nukkuvan solun vikaantuminen on toteutettu siten, ettei tukiasema pysty lähettämään eikä vastaanottamaan mitään informaatiota. Simulaattorissa ongelma on toteutettu laittamalla ongelmaskenaariossa solun 8 antennivahvistus negatiiviseksi. Päätekäyttäjät eivät näin ollen pysty käyttämään solun 8 resursseja, mutta verkohallinnassa ei nähdä vikaantumista.

Simulaatiossa mallinnettu LTE-makroverkko on esitetty kuvassa 4.2. Verkko koostuu 19 tukiasemasta, joilla kaikilla on kolme sektoria muodostaen yhteensä 57 so-

lua. Verkon simulointi perustuu seitsemään keskimmäväliseen tukiasemaan (solut 3–11, 18–23 ja 39–44). Reunalla olevat tukiasemat (solut 1–2, 12–17, 24–38 ja 45–56) ovat vain aiheuttamassa häiriötä, jolloin simulaatiossa ei esiinny varsinaista verkon reuna-alueiden poikkeavaa käytöstä. Solu 8 on ongelmaskenaariossa nukkuva solu.

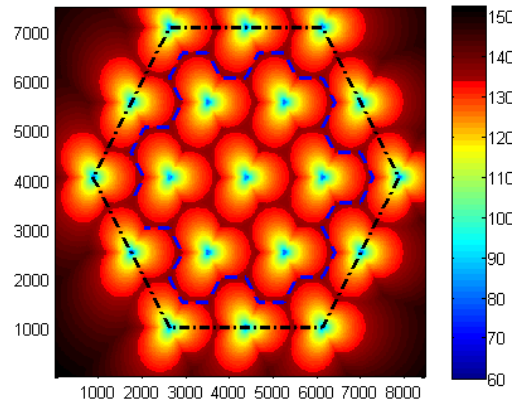


Kuva 4.2: Simuloidun LTE-verkon solusommitelma, jossa solu 8 on nukkuva solu ongelmaskenaariossa.

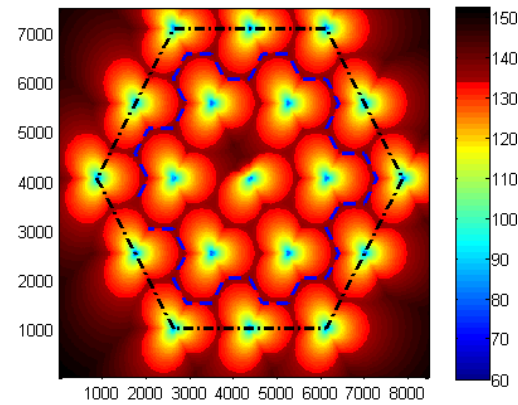
Ongelmaskenaariossa solu kahdeksan (8) on määritetty nukkuvaksi soluksi, mikä ei kykene vastaanottamaan eikä lähettämään mitään informaatio. Tämän seurauksena kyseisen alueen signaalin etenemisvaimennus (engl. *path loss* heikkenee, mikä näkyy kuvissa 4.3. X- ja Y-akselivat ovat metreinä ja väri kuvaa etenemisvaimennusta desibeleinä (dB). Etenemisvaimennus on lähetetyn ja vastaanotetun signaalin tehon ero.

Solujen valta-asetat (engl. *dominance area*) nähdään kuvissa 4.4. Kartoista nähdään, millä solulla on pienin etenemisvaimennus tietyllä alueella. Optimaalisessa tilanteessa valta-asetaman alueella olevien päätelaitteiden tulisi olla yhteydessä kyseisen alueen tukiasemaan. Ongelmaskenaarion solu 8 on vikaantunut, jolloin ympäröivien solujen valta-asetama kasvaa kattamaan solun 8 peittoalueen.

Taulukossa 4.1 nähdään molempia skenaarioiden tallentamat jaksolliset-, yhteysvastuuvaihto- ja radiolinkkitapahtumat. Solun vaihdon ja radiolinkkivirheen syntymallit ovat esitetty luvussa 2. Jaksollisia näytteitä otetaan jokaiselta päätelaitteelta 500 ms väliajoin. Yhden tukiaseman vikaantuminen lisää luonnollisesti radiolinkkivirheiden määrää ongelmaskenaariossa. Muutoin skenaarioiden ollessa samanlaiset, erot jaksollisten- ja solun vaihtotapahtumien lukumäärissä ovat pienet.



(a) Vertailuskenaario



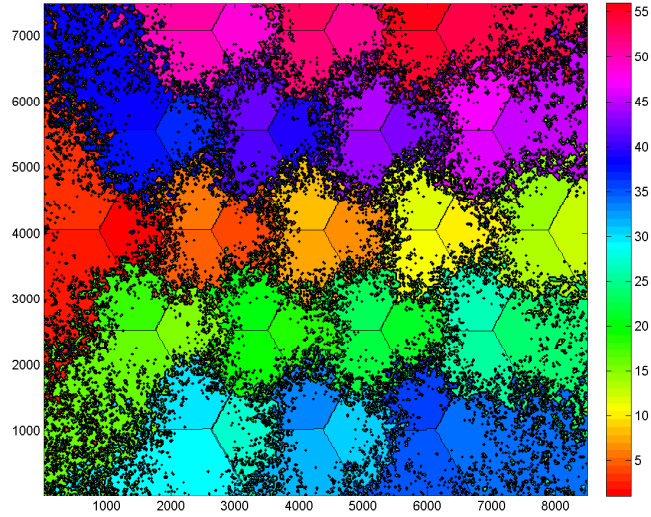
(b) Ongelmaskenaario

Kuva 4.3: Etenemisvaimennus kuvaa signaalin heikkenemistä. Ongelmaskenaariossa nukkuvasta solusta seuraa suurempi etenemisvaimennus kyseiselle alueelle.

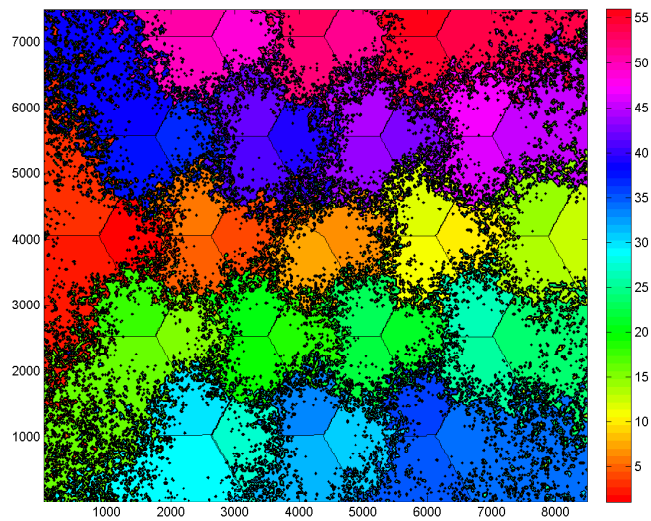
Aineisto	Jaksollinen	HO	RLF
Vertailuskenaario	148 723	698	136
Ongelmaskenaario	148 693	683	210

Taulukko 4.1: Jaksolliset näytteet, solun vaihdot ja radiolinkkivirheet aineistoissa.

Kuvissa 4.5 nähdään edellisessä taulukossa esitettyjen tapahtumien jakautuminen eri tukiasemille. Kuvasta nähdään, että kaikilta tarkkailunalaisilta soluilta saadaan saman suuruusluokan määrä näytteitä. Ainoa poikkeus on ongelmaskenaarion solu 8, jolta ei saada näytteitä. Todellisessa tilanteessa nukkuvakin voi tuottaa tapahtumaraportteja, mikäli se toimii edes osittain.



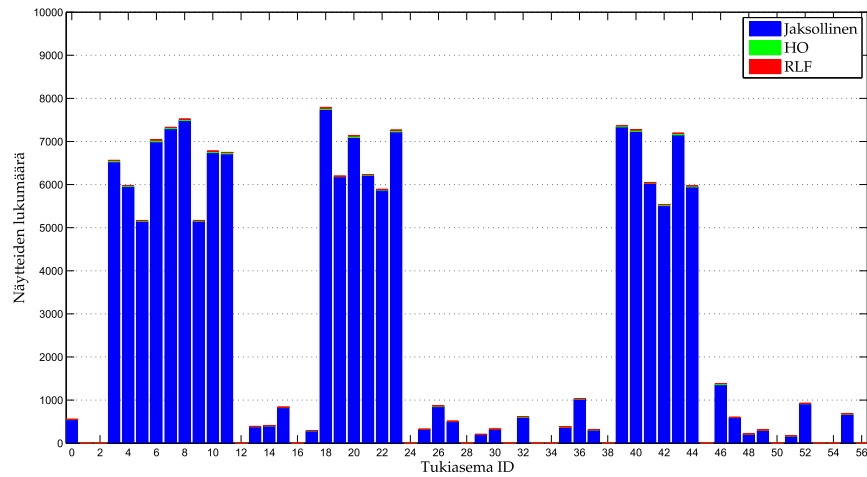
(a) Vertailuskenaario



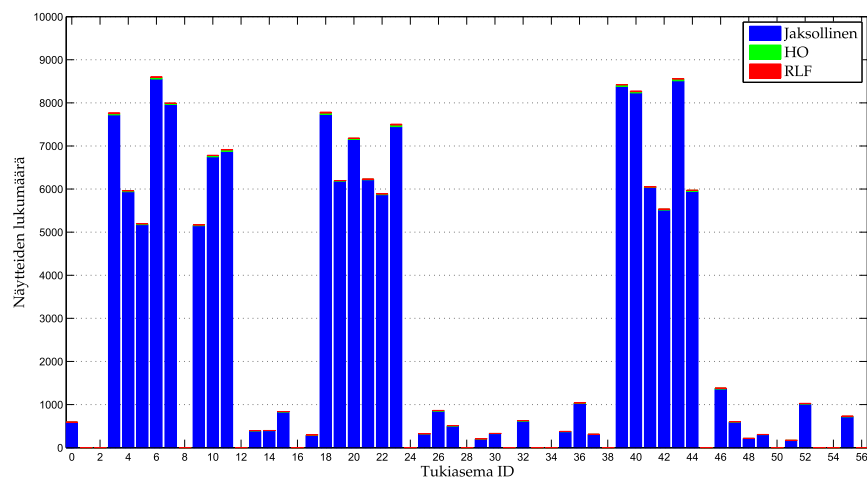
(b) Ongelmaskenaario

Kuva 4.4: Solujen valta-asetat kuvaavat alueita, joissa soluilla on pienin etenemisvaimennus ja täten optimaalinen palveleva solu. Ongelmaskenaariossa naapurisolut paikkaavat nukkuvan solun aluetta.





(a) Vertailuskenaario



(b) Ongelmaskenaario

Kuva 4.5: Verkkotapahtumien jakautuminen tukiasemien välillä. Ongelmaskenaarioissa solu 8 ei tuota tapahtumaraportteja.

## 4.2 Nukkuvan solun havaitseminen

Tutkimuksen tarkoituksena on havaita nukkuva solu, mikä on yksi epänormaalien toiminnallisuuden muoto radioverkoissa. Tässä luvussa kerrotaan menetelmästä havaita nukkuva solu vaihe vaiheelta. Työvaiheet voidaan jakaa aineiston esikäsittelyyn, tiedonlouhintaan, jälkikäsittelyyn ja tuloksien esittämiseen.

### 4.2.1 Esikäsittely

Radioverkon valvonta luo isoja moniulotteisia aineistoja. Oikean ja luotettavan informaation löytäminen moniulotteisesta aineistosta on vaikeaa. Eri parametrien riippuvuus toisistaan tai niiden muuttuminen eri tilanteissa on vaikeaa, jopa mahdollonta, huomata moniulotteisesta aineistosta [41]. Aineiston esikäsittelyn tarkoitus on muokata käsiteltävä aineisto sellaiseen muotoon, josta sitä on helppoa ja tehokasta jatkokäsitellä. Esikäsittelyä tarvitaan jo pelkästään sen takia, että osa simulaation tuottamista näytteistä on virheellisiä ja käyttökevyitä. Aineiston esikäsittelyn laiminlyönti saattaa johtaa virheellisiin lopputuloksiin analyysin myöhemmissä vaiheissa, joten esikäsittely on tärkeä tehdä huolella [30]. Työssä käytettäviä esikäsittelymenetelmiä ovat aineiston puhdistaminen (engl. *cleaning*), suodattaminen (engl. *filtering*), lajitteleminen (engl. *sorting*), supistaminen (engl. *reduction*), monistaminen (engl. *duplicating*) ja yhdistäminen (engl. *combining*). Esikäsittelyn seurauksena syntyy valmis kokonaisuus tiedonlouhintaan varten.

Esikäsittelyn ensimmäisenä vaiheena on poistaa tietokannasta kaikki näytteet, joiden signaalin voimakkuus on nolla. Tällaisia näytteitä syntyy simulaattorissa, koska näytteitä aloitetaan tallentamaan tietokantaan ennen kuin kaikkia parametrejä pystytään mittaamaan [17]. Nämä näytteet tuhoetaan kohinana eikä niitä oteta mukaan jatkoanalyysiin, koska niitä ei pitäisi olla tietokannassa lainkaan.

Seuraavaksi tietokannasta suodatetaan jatkokäsittelyyn vain solun vaihdot, radiolinkkivirheet ja jaksottaiset näytteet. 3GPP on määrittellyt tapahtumien raportointikriteerit [11]. Ongelmaskenaarion kaikkia edellä mainitut näytteet ovat käytössä kaikki analysoinnin vaiheet. Vertailuskenaarion näytteitä puolestaan supistetaan siten, että kaikki HO- ja RLF-näytteet otetaan jatkokäsittelyyn, mutta vain osa satunnaisesti valittuja jaksollisia näytteitä. Vertailuskenaarion näytteiden määrän kasvattaminen vaatii enemmän laskentatehoa hidasten algoritmien suoritusta merkittävästi. Käytännön maksimimäärä vertailuskenaarion näytteille on noin 5000. Kun tästä määrästä vähennetään HO- ja RLF-näytteiden osuus, on mahdollista valita 0 – 4000 jaksollista näytettä vertailuskenariosta. Vertailuskenariosta otettavien näytteiden määrä vaikuttaa huomattavasti luokittelualgoritmin toimintaan. Myöhem-

min tässä luvussa kerrotaan tavasta valita oikea määrä jaksollisia näytteitä jatkokäsittelyyn.

Taulukosta B.2 nähdään, että vertailuskenaariossa HO- ja RLF- näytteitä on merkittävästi vähemmän kuin suunniteltua määrää jaksollisia näytteitä. Vertailuskenaariosta valittuja näytteitä käytetään luokittelussa opetusaineistoja, jolloin ongelmia saattaa esiintyä, jos opetusaineiston luokat eivät ole tasaisesti jakautuneet. ”Enemmistö ratkaisee”-tyyppisten luokittelualgoritmien heikkous on, että määrällisesti isoimmat opetusaineiston luokat dominoivat testattavia alkioita. On luonnollista, että suuria luokkia edustavat alkiot ottavat osaa ”äänestyksiin” suuremmalla todennäköisyydellä. Kotsiantis et al. varoittaakin käyttämästä epätasaisesti jakautuneita luokkiaopetusaineistossa, ettei tiettyä luokkaa ylikorosteta ja jotain muuta jätetä vähemmälle huomiolle. Mahdolliseksi korjaustoimenpiteiksi ehdotetaan isojen luokkien pienentämistä tai pienten luokkien alkioiden monistamista [30]. Koska vertailuskenaariossa jaksottaisten näytteiden määrää on jo pienennetty, vaihtoehdoksi jää toisten luokkien alkioiden monistaminen. RLF-näytteiden monistaminen nelinkertaiseksi nostaa niiden määrän 544:ään, jolloin niitä on kutakuinkin yhtä paljon kuin HO-näytteitä. RLF-näytteiden edelleen monistaminen yhdessä HO-näytteiden kanssa saadaksesi ne yhtä isoiksi jaksollisten näytteiden luokan kanssa ei ole järkevää. Ensinnäkin se pakottaisi käyttämään entistä pienempää määrää jaksollisia näytteitä ja luokittelun luotettavuus voisi heikentyä alkioiden liiallisesta monistamisesta.

Kuten liitteestä B nähdään tietokanta sisältää jokaisen näytteen osalta kolmen naapurisolun RSRP (Reference Signal Received Power) ja RSRQ (Reference Signal Received Quality) arvot. Ne eivät kuitenkaan ole missään erityisessä järjestyksessä taulukossa, eikä siten suoraan vertailukelpoisia. Seuraavaksi naapurisolujen RSRP ja RSRQ arvot järjestetäänkin kunkin näytteen kohdalta nousevaan suuruusjärjestykseen, jolloin ne ovat vertailukelpoisia toisiin näytteisiin nähden.

Varsinaisessa tiedonlouhissa käytetään kymmentä parametriä 28:sta mahdollisesta (vertaa taulukkoa B.1), joiden lisäksi analysoinnin apuna käytetään tietoa päätelaitteen sijainnista ja verkkotapahtumamerkintää (Taulukko B.2) erotellessa jaksollisia-, HO- ja RLF-näytteitä. Päätelaitteen sijaintitieto on tärkeä kun määritellään, minkä solun alueella kukin päätelaite kullakin ajanhetkellä sijaitsee. Aineiston osajoukon valinnan tarkoituksena on tunnistaa ja poistaa niin paljon merkityksetöntä tietoa kuin mahdollista. Tämä pienentää aineiston moniulotteisuutta ja mahdollistaa tiedonlouhinta-algoritmien nopeamman toiminnan ja parantaa tiedonlouhinta-menetelmien tarkkuutta [30]. Seuraavaksi kerrotaan kunkin käytettävän parametrien keskeisimmät ominaisuudet. Tavoitteena on valita sellaiset parametrit, jotka ku-

vaavat hyvin signaalin ”laatua” ja täten erottelevat niin kutsutut voimakkaat signaalit heikoista signaaleista.

RSRP arvoja on käytössä neljä, yksi palvelevan tukiaseman ja kolme naapuritukiasemista. RSRP kuvaa solukohtaista signaalin voimakkuutta, ja sitä käytetään muun muassa solun uudelleenvalinnan päätöksenteossa. RSRP on määritelty lineaarisesti keskiarvoksi tehon osuudesta resurssilohkoista, jotka käyttävät viitesignaaleja samalla taajuusalueella [9].

RSRQ arvoja on samoin neljä kappaletta. Ne kuvaavat solukohtaista signaalin laatua. RSRQ:n käyttökohteet ovat samat kuin RSRP:n, ja sitä käytetään tilanteissa, joissa RSRP:n lisäksi halutaan kattavampaa tietoa signaalin laadusta. RSRP:stä poiketen RSRQ ottaa huomioon myös häiriösignaalit. RSRQ voidaan määrittellä kaavalla  $N \cdot \text{RSRP} / \text{RSSI}$ , jossa N on resurssilohkojen lukumäärä. RSSI (Received Signal Strength Indicator) kuvaa päätelaitteen kaikkien vastaanottamien signaalien voimakkuutta, joita ovat muun muassa oman ja naapurisolujen signaalit, rinnakkaiset kanavat ja lämpökohina [9].

Laajakaistaisella kanavan laadun mittarilla (engl. *Wideband Channel Quality Indicator, WCQI*) kuvataan päätelaitteen kokemaa kanavan laatua, toisin sanoen kuinka suurta tiedonsiirtokapasiteettiä voidaan käyttää. CQI ottaa huomioon signaali- ja kohinahäiriöt sekä vastaanottajalaitteen ominaisuudet. Laajakaistaisuus tarkoittaa, että päätelaitteen tukiasemalle ilmoittama raportti kuvastaa koko kaistan laatua [38].

Power Headroom tiedon perusteella tukiasema pystyy määrittelemään, kuinka paljon ylälinkin kaistaa päätelaite pystyy käyttämään. Käytännössä mittaus kertoo, kuinka paljon päätelaitteella on käytettävää lähetystehoa. Tällä raportoinnilla pystytään estämään liiallisten resurssien jakaminen sellaisille päätelaitteille, jotka eivät pystyisi käyttämään kaikkia tarjottuja resursseja [27].

#### 4.2.2 Diffuusiokuvaus

Esikäsittelyn jälkeen aineisto on vielä epäkäytöllinen moniulotteinen ja normalisoimaton, jonka käyttö tiedonlouhintamenetelmillä on epäluotettavaa. Normalisoinnin ja moniulotteisuuden pienentäminen tekevät aineiston käytöstä mahdollista, mikä tehdään diffuusiokuvauksella. Diffuusiokuvauksella pystytään muuttamaan aineiston esitysmuotoa yksinkertaisemmaksi siten, että sen sisältämä informaatio pysyy luotettavana [18]. Vertailemalla alkioden eukliidistä sijaintia tilassa (engl. *embedded space*), voidaan aineistolle suorittaa muita tiedonlouhintaoperaatioita, kuten klusterointia tai luokittelua.

Moniulotteisuuden pienentämiseen on olemassa muitakin menetelmiä kuten pää-

komponenttiansalyysi [39] (engl. *principal component analysis*) ja moniulotteinen skaalaus [15] (engl. *multidimensional scaling*). Mainitut menetelmät ovat lineaarisia, joten ne eivät pysty kuvaamaan luotettavasti aineistoa, jossa esiintyy epälineaarista riippuvuutta parametrien välillä. Diffuusiokuvauksen merkittävänä etuna on, että se pystyy kuvaamaan myös epälineaarisia riippuvuuksia. Diffuusiokuvausmenetelmässä aineisto esitetään painotettuna graafina, jossa solmut ovat aineiston alkioita ja solmujen välisten kaarien painot määräytyvät solmujen samankaltaisuutta kuvaavasta ydinfunktioista (engl. *kernel*). Diffuusiokuvaus saadaan johdettua Markovin matriisin ominaisarvojen ja -vektoreiden avulla kun kyseisen graafin satunnaiskulku (engl. *random walk*) esitetään Markovin tilasiirtymämatriisissa [41]).

Seuraavaksi esitetään diffuusiokuvauksen periaate [18]:

Diffuusiokuvaus annettava  $n$ -alkiainen datamatriisi on muotoa

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, x_i \in \mathbb{R}^m, \quad (4.1)$$

missä kaikki alkiot  $x_i$  kuuluvat  $m$ -ulotteiseen avaruuteen  $\mathbb{R}^m$ .

Ydinfunktio  $w_\epsilon(x_i, x_j)$  on solmujen  $x_i$  ja  $x_j$  välisen kaaren paino ja se kuvaa alkioiden samankaltaisuutta [41]. Ydinfunktion valinta perustuu tässä työssä eukliidiseen etäisyyteen (engl. *euclidian distance*).

$$w_\epsilon(x_i, x_j) = e^{-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{\epsilon}}, \quad (4.2)$$

missä  $\epsilon$  on skaalautuva parametri, mikä määrittelee, kuinka kaukana toisistaan olevat pisteet lasketaan samaan klusteriin. Ydinfunktion avulla saadaan luotua naapuruusmatriisi  $W$ .

Satunnauskävelijä  $P(x,y)$  luodaan normalisoidun Laplacen matriisin avulla, jossa  $P(x,y)$  kuvaa satunnauskävelijän  $X$  todennäköisyyttä liikkua pisteestä  $x$  pisteeseen  $y$ .

$$p(x, y) = \frac{w(x, y)}{d(x)}, \quad (4.3)$$

missä  $d(x)$  on solmun  $x$  asteluku.

$$d(x) = \int_X w(x, y) d\mu(y), \quad (4.4)$$

kun  $p(x) \geq 0$  ja voimassa on lause

$$\int_X p(x, y) d\mu(y) = 1. \quad (4.5)$$

$D_t(x,y)$  saadaan laskettua Markovin matriisin ominaisvektoreiden (engl. *eigenvector*)  $\psi_l$  ja ominaisarvojen (engl. *eigenvalue*)  $\lambda_l$  avulla.  $D_t(x,y)$  on pieni silloin kun

on olemassa lukuisia lyhyitä polkuja yhdistämässä solmut  $x$  ja  $y$ , eli kun liikkumisen todennäköisyys pisteestä  $x$  pisteeseen  $y$  on suuri, ja päin vastoin.

$$D_t(x, y) = \left( \sum_{l \geq 1} \lambda_l^{2t} \psi_l(x) \psi_l(y) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

Diffuusiokuvaus perheen komponentit  $\Psi_t(x)$  kuvaavat datan sijoittumista  $s$ -ulotteisessa eukliidisessä tilassa. Komponentit koostuvat  $s$  lyhimmästä ominaisvektorista  $\psi$  ja niitä vastaavista ominaisarvoista  $\lambda$ .

$$\Psi_t(x) \triangleq \begin{pmatrix} \lambda_1^t \psi_1(x) \\ \lambda_2^t \psi_2(x) \\ \vdots \\ \lambda_{s(\delta,t)}^t \psi_{s(\delta,t)}(x) \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Diffuusioetäisyys  $D_t^2$  pisteiden  $x$  ja  $z$  välillä ajanhetkellä  $t$  lasketaan ominaisvektoreiden avulla. Etäisyydellä voidaan kuvata moniulotteisten datapisteiden sijoittumista tilassa.

$$D_t(x, z)^2 = \sum_{l \geq 1} \lambda_l^{2t} (\psi_l(x) - \psi_l(z))^2 \quad (4.8)$$

Diffuusiokuvaus  $\Psi_t(x)$  upottaa datajoukon  $X$  eukliidiseen tilaan  $\mathbb{R}^{s(\delta,t)}$  siten, että euklidinen etäisyys on yhtä suuri kuin diffuusioetäisyys tarkkuudella  $\delta$ .

$$\|\Psi_t(x) - \Psi_t(y)\| = D_t(x, y) + \delta \quad (4.9)$$

Diffuusiokuvauksessa käytettävät parametrit ovat listattu taulukossa 4.2 ja ominaisvektoreita vastaavat normalisoidut ominaisarvot taulukossa 4.3.

Parametri	Arvo
Syöteparametrejä	10
Epsilon $\epsilon$	8
Poikkeavuustiheus $\delta$	5
Normalisointimenetelmä	Minmax
Parittainen etäisyysmenetelmä	L2, Eukliidinen etäisyys
Ominaisvektoreita	6

Taulukko 4.2: Diffuusiokuvauksen parametrit.

Ominaisvektori	Ominaisarvo
1	1
2	0.0198
3	0.0085
4	0.0065
5	0.0043
6	0.0038

Taulukko 4.3: Diffuusiokuvauksen ominaisvektorit ja -arvot.

### 4.2.3 Luokittelu

Esikäsittelyn ja diffuusiokuvauksen jälkeen aineisto on käyttövalmis erilaisiin tiedonlouhintatoimenpiteisiin. Tutkimus perustuu radiolinkkivirheiden analysointiin, tarkemmin sanottuna niiden sijoittumiseen verkossa. Taulukosta 4.1 nähdään, että ongelmaskenaariossa radiolinkkivirheitä tapahtuu 54 % enemmän kuin vertailuskenaariossa. Tasaisesti jakautuneena radiolinkkivirheitä tapahtuisi 3,7 / solu. Tutkimuksen tässä vaiheessa onkin tavoitteena etsiä jaksollisista näytteistä radiolinkkivirheen kaltaisia näytteitä, koska lähtökohtaisesti suurempi joukko näytteitä vastaa todenmukaisemmin verkon luonnetta ja on täten luotettavampi. Toiseksi, koska jaksolliset näytteet ovat mahdollista jaotella taulukon B.2 tapahtumien kaltaisiksi näytteiksi, mahdollistaa se sen, että ongelmaskenaariosta ei välttämättä tarvita tietoa radiolinkkivirheistä, vaan analyysi voidaan rakentaa vain jaksollisten näytteiden varaan.

Koska jaksollisia näytteitä otetaan 500 ms välein, radiolinkkivirheen kaltaisia näytteitä pitäisi olla ainakin tilanteissa, joissa päätelaite on ajautumassa kohti radiolinkkivirhettä. Oletettavasti on myös tilanteita, joissa signaalin laatu heikkenee merkittävästi, mutta radiolinkkivirheeltä vältytään esimerkiksi viime hetkellä suoritetun solun vaihdon seurauksena. Tällaisten näytteiden etsimiseen soveltuu luokittelu, koska vertailuskenaarion pohjalta on olemassa tietämys, millaisia näytteitä radiolinkkivirheet ovat. Myös esikäsittelyssä valittu parametrien osajoukko tukee luokittelun valintaa, koska jatkokäsittelyyn valittiin parametrit, jotka erottelevat tutkittavia näytteitä mahdollisimman hyvin.

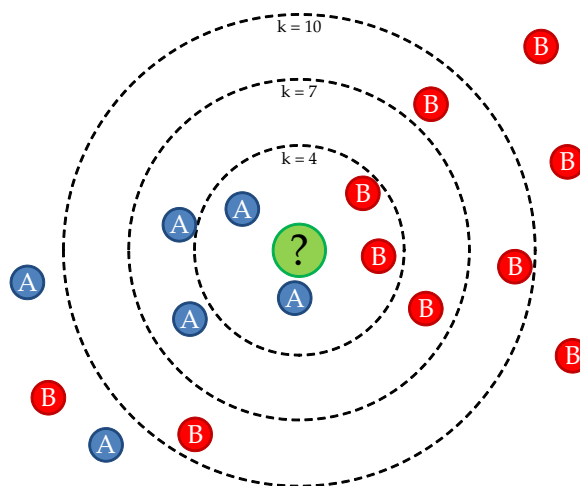
Luokittelu on niin sanottua valvottua oppimista (engl. *supervised learning*), jossa käytetään hyväksi opetusaineistoa [34]. Opetusaineisto koostuu esimerkkisyötteistä ja niitä vastaavista tulosteista, joiden avulla luokittelualgoritmi muodostaa yleistysfunktion. Yleistysfunktion avulla luokittelualgoritmi pystyy antamaan jokaiselle

testattavalle syötteelle sitä vastaavan tulosteen, myös sellaisille, joita ei esiinny opetusaineistossa. Lähtökohtaisesti, mitä tarkempi ja kattavampi opetusaineisto on, sitä tarkempia tulosteet ovat.

Erona valvomattomaan oppimiseen (engl. *unsupervised learning*) on se, että valvomattomassa oppimisessä opetusaineisto ei sisällä tietoa syötteen ja tulosteen yhteydestä. Valvoton oppiminen soveltuu tilanteisiin, joissa halutaan tutkia aineiston käyttäytymistä. Klusterointi on esimerkki valvomattomasta oppimisestä, jossa tavallaan luokitellaan aineistoa, mutta etukäteen ei määritellä, minkä mukaan aineistoa jaotellaan, eikä sitä klusteroinnin lopputulemastakaan suoraan näe [34].

Luokittelualgoritmiksi valitaan yksinkertainen  $k$  Nearest Neighbor [19]. Luokittelu perustuu testattavaa alkion  $k$  lähimmän vertailualkion edustaman luokan vertaamiseen. Pääsääntöisesti testattavan alkion luokka määräytyy sen mukaan, minkä luokan edustajia on eniten vertailualkioiden joukossa. Jos  $k = 1$ , luokaksi valitaan alkion lähimmän vertailualkion edustama luokka. Yleensä  $k$ :ksi valitaan kohtuullisen pieni positiivinen kokonaisluku.

Kuvassa 4.6 korostetaan  $k$  arvon määrittämisen haasteellisuutta.  $k = 4$  tilanteessa testattavan alkion lähimmäiset naapurit kuuluvat tasalukuisesti kahteen eri luokkaan, jolloin sovelletaan toissijaista sääntöä, jonka mukaan testattavan alkion luokaksi valitaan sitä lähinnä olevan alkion luokka. Valinta vastaa tällöin  $k = 1$  tilannetta, ja tässä tapauksessa valituksi tulee luokka A. Kasvattamalla  $k = 7$ , A-luokan edustajat voittavat 4 – 3, jolloin testattavan alkion luokaksi määräytyy A. Esimerkkiaineiston yleisilme kertoo, että B-luokan edustajia on opetusaineistossa enemmän, jolloin  $k = 10$  tilanteessa testattavan alkion luokaksi määräytyy B äänin 6 – 4.



Kuva 4.6:  $k$  nearest neighbor-algoritmi perustuu testattavaa alkion lähimpien vertailualkioiden edustamien luokkien lukumääriin.



Niin kuin aiemmin on tullut jo esiin,  $k$  Nearest Neighbor-luokitteluun liittyviä tärkeitä kysymyksiä on kolme:

- Mikä on optimaalinen  $k$ -arvo?
- Kuinka monta jaksollista näytettä valitaan opetusaineistoon?
- Tarvitseeko opetusaineiston pienempiä luokkia monistaa?

Edellä esitetyt kysymykset ovat sellaisia, joihin on vaikea löytää yksiselitteisiä vastauksia jo sen perusteella, millä mittarilla parametrien hyvyttä mitataan. Parametrit ovat myös sellaisia, joiden hyvyttä on erittäin vaikea ennustaa ennen niiden kokeilemistä. Parametrien hyvyden vertaaminen luokittelun ja mahdollisesti muiden toimenpiteiden jälkeen on erittäin aikaa ja laskentatehoa kulltavaa, joten onkin valittava joukko testattavia parametrien arvoja ja niiden perusteella tehtävä johtopäätökset, millaiset arvot kullekin parametrille tulisi valita. [30] mukaan opetusaineiston pienin luokka, radiolinkkivirheet, monistetaan nelinkertaiseksi, jolloin niitä on opetusaineistossa kutakuinkin sama määrä kuin solun vaihdon näytteitä.

Kahden muun parametrin hyvyttä voidaan testata esimerkiksi Kullback-Leibler divergenssillä [25], jolla mitataan kahden tiheysfunktion jakautuneisuuden muuttumista. Jos kahden vertailtavan funktion jakauma pysyy samana,  $D_{KL} = 0$  ja vastavasti, mitä suurempi jakautumien ero on, sitä suurempi  $D_{KL}$  on. Tiheysfunktioina käytetään luokiteltujen radiolinkkivirheiden jakautumista eri solujen alueille.  $D_{KL}$  saadaan vertailemalla kunkin valitun parametrijohdistelmän ongelmajakauman tiheysfunktioita, jolloin suurempi  $D_{KL}$  arvo kuvaa parempia parametrejä. Tutkimuksessa käytettävä  $k$ -arvo ja jaksollisten näytteiden määrä opetusaineistossa määritellään näin.

Parametrien hyvyttä voidaan testata myös luokittelun tarkkuutena. Testattava näytejoukko sisältää tiedon näytteiden alkuperäisistä luokista, joten voidaan tutkia, kuinka suuri osuus näistä alkioista luokituu oikeaan luokkaan. Koska lähtökohtainen tavoite on etsiä lisää radiolinkkivirheen kaltaisia näytteitä erityisesti jaksollisista näytteistä, 100% tarkasti toimiva luokittelija ei tule kysymykseen. Luokittelijan tavoitteena on siis, että osa näytteistä luokituu toisiin luokkiin, mutta kuitenkin siten, että luokittelu pysyy luotettavana.

#### 4.2.4 Nukkuvan solun määrittäminen

Luokittelun jälkeen tarkastelu kohdistuu luokiteltuihin radiolinkkivirheisiin, mikä sisältää osan oikeita radiolinkkivirheistä, pienen osan solun vaihtonäytteitä ja merkittävän määrän jaksollisia näytteitä. Ne oikeat radiolinkkivirheet, mitkä eivät

luokitu RLF-luokkaan, jäävät analyysien ulkopuolelle. Radiolinkkivirheet kuvaavat signaalin heikkoa "laatua", ja täten niiden ryhmittymisten perusteella voidaan paikantaa nukkuvan solu [20]. Kandidaatteja nukkuvaksi soluksi ovat ne solut, jotka sisältävät poikkeuksellisen paljon luokiteltuja radiolinkkivirheitä verrattuna toisiin soluihin ja/tai vertailuskenaarion jakaumaan.

Nukkuvan solun havaitsemiseksi tuotetaan kaksi kuvaa. Ensimmäisessä kaaviossa histogrammi kuvaa, kuinka monta luokiteltua radiolinkkivirhettä sisältyy kunkin solun alueelle. Huomion arvoista on, että jaottelua ei tehdä palvelevan tukiaseman perusteella. Histogrammin korkeimmat pylväät ovat kandidaatteja nukkuvaksi soluksi. Tilanne on sitä parempi, mitä vähemmän niin sanottuja ylimääräisiä kandidaatteja tuloksista löytyy. Simulaatiossa on käytetty vain yhden solun vikaantumista, jolloin optimaalitalanteessa kandidaatteja nukkuvaksi soluksi olisi vain yksi. Toisessa kuvassa luokitellut radiolinkki piirretään kartalle, josta nähdään, missä kohtaa verkkoa radiolinkkivirheitä on eniten ja sen pohjalta pystytään hahmottamaan ongelmallisen solun sijainti. Kartalle piirretyt radiolinkkivirheet auttavat hahmottamaan ongelmien laajuutta varsinkin, jos useita soluja on vikaantunut, kun taas histogrammi antaa tarkan tiedon oletettavasti vikaantuneesta tukiasemasta tunnistena.

## 5 Tulokset

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää menetelmä, jolla pystytään havaitsemaan nukkuva solu LTE-radioverkossa. Radioverkon jaksollisia suorituskykymittauksia analysoimalla tämä onnistuu. Luokittelemalla testattavasta aineistosta radiolinkkivirheiden kaltaisia näytteitä, saadaan kattava joukko näytteitä, jotka kuvaavat heikkoa signaalinlaatua. Luokittelussa käytetään kolmatta solun vaihtoluokkaa, jolloin saadaan rajattua tarkemmin, että vain huonoimmat näytteet luokituvat radiolinkkivirheiksi. Jaksolliset näytteet olisi mahdollista luokitella tehokkaammin useampaankin luokkaan, mutta koska kiinnostus kohdistuu vain radiolinkkivirheiden kaltaisiin näytteisiin, ei ole syytä suorittaa tarkempaa luokittelua. Nukkuva solu löytyy tutkimalla radiolinkkivirheeksi luokiteltujen näytteiden sijaintia verkossa. Normaalista suurempi esiintymistiheys kuvastaa mahdollista ongelmakohtaa.

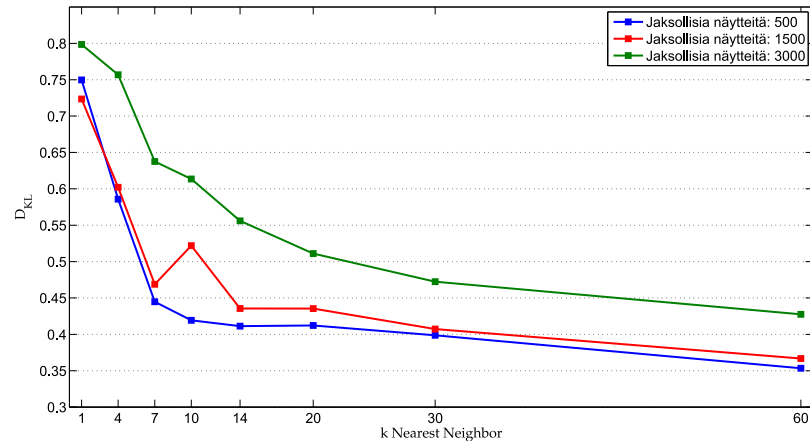
Seuraavaksi kerrotaan, kuinka luokitteluun liittyvät parametrit on valittu, jonka jälkeen esitetään näiden parametrien pohjalta syntyneet tulokset nukkuvan solun havaitsemiseksi. Samalla myös pohditaan esitettyjen tuloksien luotettavuutta ja ominaispiirteitä.

### 5.1 Luokittelu

Luokittelu perustuu  $k$  Nearest Neighbor-algoritmiin, jonka toimivuuteen vaikuttaa kaksi seikkaa:  $k$ -arvo sekä jokaisen luokittelijan tapauksessa opetusaineiston rakenne. Tutkimuksen kannalta opetusaineistossa on kaksi parametriä: Kuinka monta jaksollista näytettä opetusaineistoon otetaan, ja monistetaanko pienempiä luokkia. Jälkimmäisen kohdalla päätös on perusteltu luvussa 4.2.1. Jaksollisten näytteiden määrän ja  $k$ -arvon kohdalla päätös perustuu Kullback-Leibler divergenssiin, jolla pystytään löytämään rajoitetusta parametrijoukosta sellaiset parametrit, jotka tuottavat isoimmat jakauman muutokset ongelma- ja vertailuskenaarion välillä, kun tutkitaan luokiteltujen radiolinkkivirheiden jakautumista eri solujen alueille.

Testattavaksi jaksollisen näytteiden määräksi valitaan 500, 1500 ja 3000, jotka kattavat vaihtoehdot RLF- ja HO-luokkien kokoa vastaavasta määrästä algoritmien toimivuuden kannalta lähellä maksimi määrää olevaan arvoon. Lisäksi tältä väliltä valittiin yksi arvo mukaan.  $K$ -arvoksi valittiin ensisijaisesti kohtuullisen pieniä arvoja, mutta myös isoja arvoja vertailun vuoksi. Kuvasta 5.1 nähdään, että  $D_{KL}$  on pää-

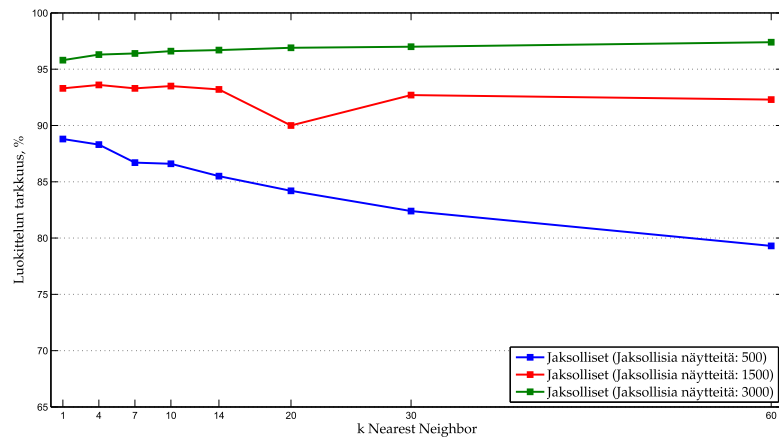
sääntöisesti korkeampi pienillä  $k$ -arvoilla. Samalla nähdään, että  $D_{KL}$  on pääsääntöisesti korkeampi suuremmalla jaksollisten näytteiden määrällä. Näin ollen parametrien valinta tulisi kohdistaa suurimpaan määrään jaksollisia näytteitä ja pienimpään  $k$ -arvoon.  $K = 1$  jätetään kuitenkin huomioimatta, koska luokittelu perustuisi vain testattavan alkion lähimmäisen vertailualkion vertaamiseen. Lopulta parametreiksi valitaan  $k = 4$  ja jaksollisia näytteitä opetusaineistoon 3000.



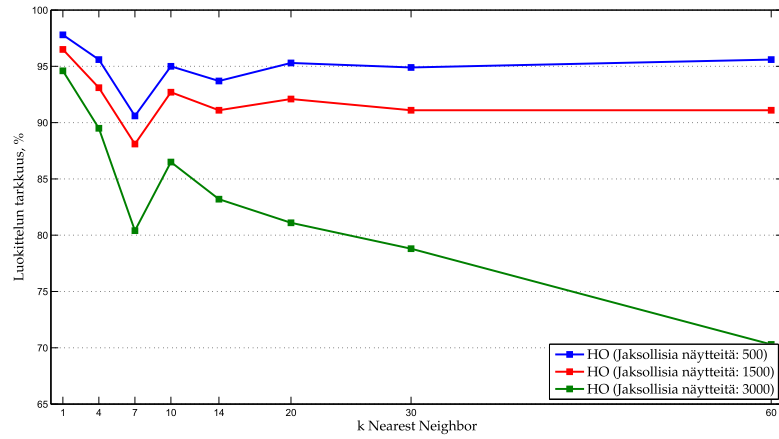
Kuva 5.1: Luokittelun parametrien hyvyttä mitataan Kullback-Leibler divergenssillä.

Kuvissa 5.2 nähdään testattavien näytteiden luokittelutarkkuudet kunkin ryhmän kesken, kun jaksollisten näytteiden määrää opetusaineistossa muutetaan yhdessä  $k$ -arvon kanssa. Jaksollisten näytteiden luokittelutarkkuus muutosten perusteella voidaan päätellä, että pienillä jaksollisten näytteiden määrällä opetusaineistossa, jaksollisia näytteitä luokituu enemmän HO- ja RLF-luokkiin. Tämä johtuu siitä, että tällöin opetusaineisto on paremmin tasapainossa, eikä jaksollista ryhmää ylikorosteta. Solun vaihtojen luokittelun tarkkuus on heikompaa suurilla  $k$ -arvoilla ja isommalla jaksollisten näytteiden opetusaineistolla, mikä johtuu paljolti radiolinkkivirhenäytteiden monistamisesta opetusaineistossa. Tällöin HO- ja RLF-näytteiden rajoilla olevat näytteet luokitellaan useimmin radiolinkkivirheiksi. Radiolinkkivirheiden luokittelutarkkuus pysyy kaikilla parametrien arvoilla lähellä 95%:a, joten Kullback Leibler divergenssin perusteella tehty parametrien valinta on järkeen käypä.

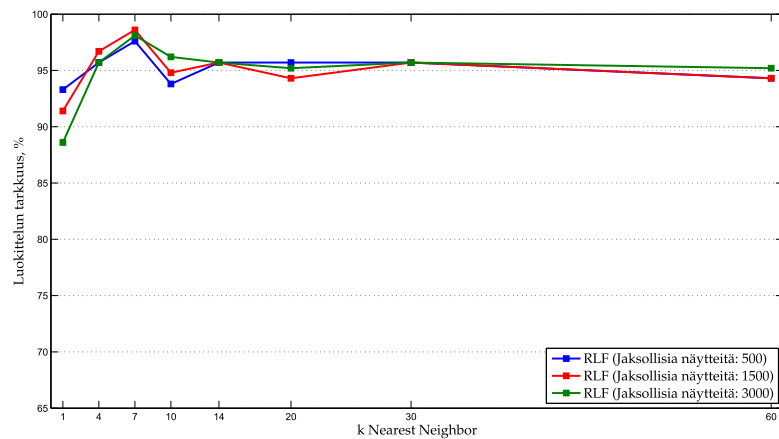
Valituilla parametreilla,  $k = 4$  ja jaksollisia näytteitä opetusdatassa on 3000, testattavista näytteistä 1311 luokituu RLF-luokkaan, joita voidaan käyttää nukkuvan solun havaitsemiseksi. Määrä on yli kuusinkertainen verrattuna ongelmaskenaarion oikeiden radiolinkkivirheiden määrään, joten tulosten voidaan olettaa olevan luo-



(a) Jaksollinen



(b) HO



(c) RLF

Kuva 5.2: Luokittelun tarkkuudella kuvataan kuinka suuri osuus testattavista näytteistä luokitteu oikeaan luokkaan.

tettavampia. Jos luokiteltujen radiolinkkivirheiden lukumäärää pidettäisiin yhtenä luokittelun parametrien valinnan kriteerinä, voidaan käyttää suurempia  $k$ -arvoja ja pienempää jaksollisten näytteiden määrää opetusaineistossa saadakseen enemmän luokiteltuja radiolinkkivirheitä. Esimerkiksi 1500 jaksollisella opetusaineiston näytteellä ja  $k = 14$  arvolla, luokiteltuja radiolinkkivirheitä saadaan 2199, mikä on jo lähes kymmenkertainen määrä verrattuna oikeisiin radiolinkkivirheisiin. Radiolinkkivirhenäytteet, jotka eivät luokitu RLF-luokkaan, ei oteta mukaan jatkoanalyysiin. RLF-luokan ulkopuolelle jäävät radiolinkkivirheet ovat enemmän solun vaihdon kaltaisia näytteitä ja ne luokituvatkin lähes poikkeuksessa HO-luokkaan. Solun vaihtoja tai luokiteltuja solun vaihtoja ei käytetä apuna nukkuvan solun havaitsemisessa. Solun vaihdot tapahtuvat usein solujen rajoilla, joten tilanteessa, jossa etsitään viikaantuneita soluja, ne eivät tuo lisäarvoa.

## 5.2 Nukkuvan solun määrittäminen

Seuraava vaihe nukkuvan solun havaitsemisessa on tutkia luokiteltujen radiolinkkivirheiden jakautumaa verkon alueella. Niin kuin luvussa 4.1 mainitaan, ongelmaskenaariossa nukkuvalta solulta (solu 8) ei saada mitään suorituskykyraportteja, koska kaikki ylä- ja alalinkin tiedonsiirto on estynyt. Idea siitä, että vertaillaan luokiteltujen radiolinkkivirheiden palvelevan tukiaseman tietoa ei sovellu käytettäväksi juuri sen takia, että itse nukkuvalta solulta ei tule raportteja. Tällöin luokitellut radiolinkkivirheet jakautuisivat solun 8 naapurisoluille, jolloin ongelman tarkka sijainti jäisi arvailujen varaan.

Tutkimuksessa käytetään niin kutsuttua solujen valta-asemaan perustuvaa jaottelua. Solujen valta-aseman määrittely perustuu kunkin solun laskennallisen etenemisvaimennuksen vertaamiseen, ja kunkin solun valta-asema määräytyy sen perusteella, missä solulla on vähiten etenemisvaimennusta verrattuna muihin soluihin. Menetelmän heikkoutena on vaatimus solujen valta-asemien määrittelystä ja samanaikaisesti vaatimus päätelaitteiden sijaintitiedosta suorituskykyraportointien aikana. Toisaalta menetelmä antaa tarkan tiedon, minkä solun alueella kukin päätelaite kulloinkin sijaitsee.

Kuvassa 5.3a nähdään vertailuskenaariossa 729 luokitellun radiolinkkivirheen jakautuminen eri solujen valta-asemille. Suurimmat näytemäärät ovat soluilla 6, 7, 18, 22 ja 43, jotka kaikki kuuluvat niin sanottuihin verkon sisäsoluihin. Solut 6 ja 7, 6 ja 43 sekä 18 ja 22 ovat keskenään naapurisoluja, ja niiden välillä esiintyy todennäköisesti pieni peittoalueen aukko tai jokin häiriötä aiheuttava tapahtuma, joista kohonnut radiolinkkivirheen kaltaisten näytteiden määrä johtuu. Radiolinkkivirheet

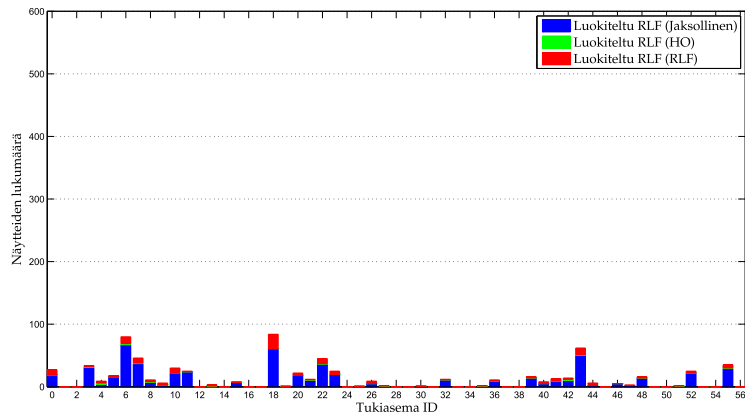
ovat jakautuneet kuitenkin suhteellisen tasaisesti, eikä kuvassa esiinny merkittäviä poikkeuksia, niin kuin asian pitääkin olla. Solu 8 toimii vertailuskenaariossa normaalisti, ja sen alueella esiintyy vain vähäinen määrä radiolinkkivirheen kaltaisia näytteitä.

Vertaamalla vertailuskenaarion kuvaa ongelmaskenaarion kuvaan 5.3b, huomataan poikkeama solun 8 kohdalla. Luokiteltujen radiolinkkivirheiden määrä solussa 8 on noussut 530:lla, mikä on lähtötilanteeseen verrattuna todella suuri korotus. Minkään toisen solun näytemäärä ei ole noussut yli kymmenellä näytteellä, joten muiden solujen voidaan todeta toimivan edelleen samoin kuin vertailuskenaariossa. Koska käytännön tilanteessa harvoin on saatavilla täsmälleen saman tilanteen vertailuskenaariota, vertailu on suoritettava toisiin soluihin. Kaikkiaan solun 8 alueella on 41,3 % kaikista luokitelluista radiolinkkivirheistä. Solulla 8 on yli kuusinkertainen määrä näytteitä verrattuna soluihin 6 ja 18, ja yli seitsemänkertainen määrä verrattuna soluun 43, jotka ovat solun 8 jälkeen seuraavaksi todennäköisimmät kandidaatin nukkuvaksi soluksi. Voidaan todeta solun 8 olevan suurella todennäköisyydellä ongelmallinen solu. Todellisia kandidaatteja muiksi nukkuviksi soluiksi kuva ei tarjoa. Jos useassa solussa olisi muita selkeästi enemmän luokiteltuja radiolinkkivirheitä, näitä kaikkia soluja voitaisiin kohdella kandidaattina nukkuvaksi soluksi. Tällaisille soluille tulisi tehdä muita toimenpiteitä, joilla varmistetaan solujen todellinen toiminta ja mahdollisessa vikatilanteessa pyritään minimoimaan ongelman laajuus ja tarvittaessa suorittaa korjaustoimenpiteitä.

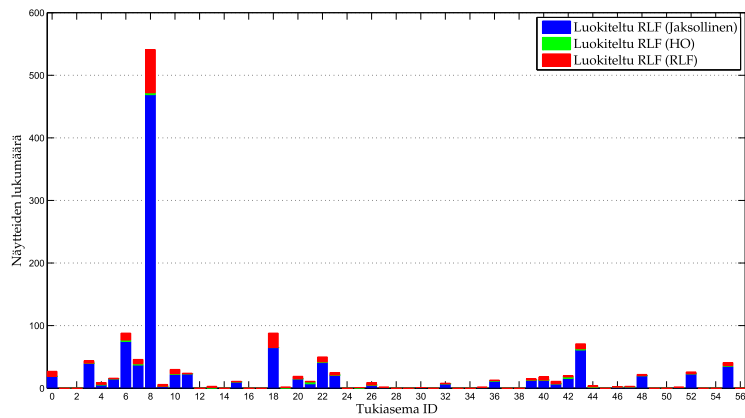
Jaksollisten näytteiden jakauma luokitelluista radiolinkkivirheistä noudattelee samaa jakaumaa koko ryhmän kanssa, joten testattaviksi näytteiksi riittäisi ongelmaskenaariosta vain jaksolliset näytteet. Tämän avulla menetelmän käytettävyys paranee, kun voidaan tutkia skenaarioita, jotka eivät luo huomattavaa määrää radiolinkkivirheitä.

Toinen mahdollisuus nukkuvan solun havaitsemiseksi on piirtää kaikki luokitellut radiolinkkivirheet kartalle, jolloin nukkuvan solun alue on se, jossa on tihein keskittymä näytteitä. Kuvassa 5.4 vertailuskenaarion luokitellut radiolinkkivirheet on piirretty tiheystiedon omaavalle kartalle. Huomaa, että kuvan tiheyväritys perustuu suhteellisiin lukuihin, eikä eri kuvien tiheydet ole vertailukelpoisia. Kuvassa nähdään monia pieniä ongelmakeskittymiä solujen rajoilla, jotka kuvaavat erisyistä johtuvia peittoalueen aukkoja tai korkeasta häiriöstä johtuvia ongelmia. Keskittymät ovat pieniä ja suhteellisesti saman tiheyden omaavia, joten kandidaatteja nukkuvaksi soluksi ei löydy, niin kuin ei pidäkään.

Ongelmaskenaarion vastaavasta kartasta 5.5 pystytään havaitsemaan yksi iso poikkeama. Laajuuden ja tiheyden lisäksi keskittymän sijainti keskellä solua on poik-



(a) Vertailuskenario



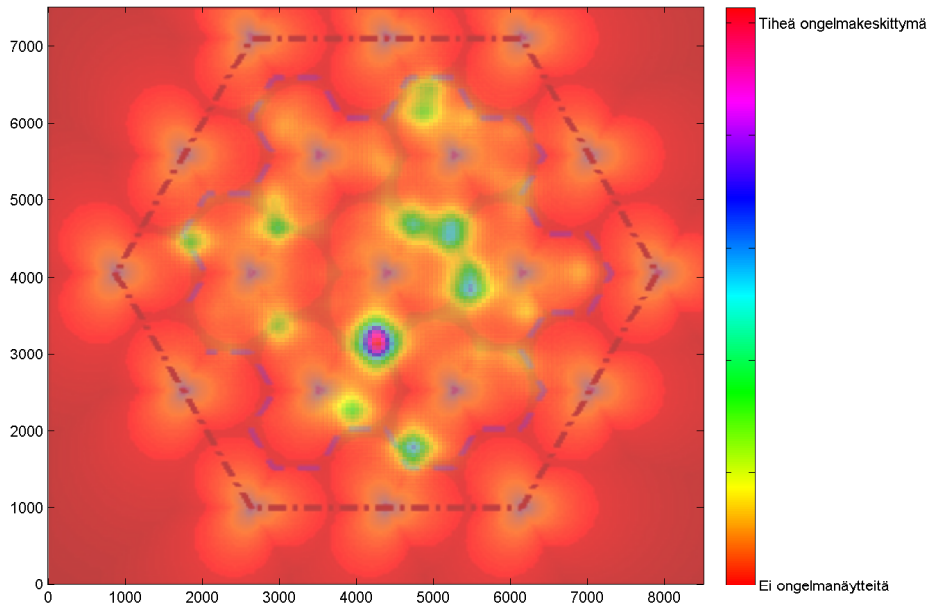
(b) Ongelmaskenaario

Kuva 5.3: Luokiteltujen radiolinkkivirheiden jakauma solujen valta-asemiin. Solun 8 kohdalla on selvä poikkeus vertailuskenarioon sekä muihin tukiasemiin verrattuna, mikä tarkoittaa mahdollista nukkuvaa solua.

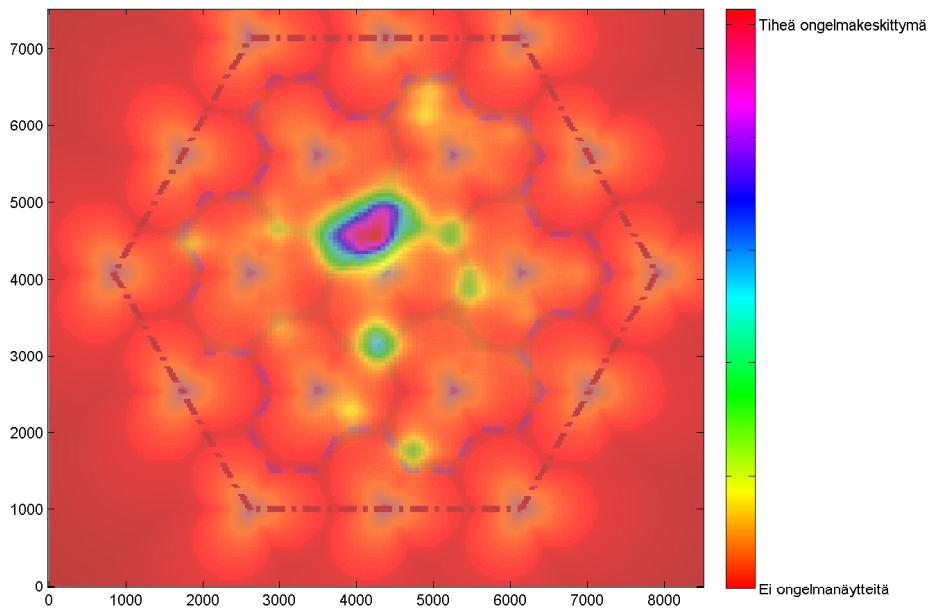
keuksellista, koska kuvan muut pienemmät keskittymät sijaitsevat solujen rajoilla. Solun tunnistetta kuvasta ei pystytä suoraan katsomaan, mutta vertaamalla kuvan 4.2 pystytään vahvistamaan solun olevan solu 8, jonka alueella keskittymä on.

Nukkuvan solun havaitsemisen jälkeen on tärkeä jatkaa toimenpiteisiin, joilla pyritään palauttamaan verkon normaali toiminta. Ongelman minimoiseksi alueen peittoaluetta tulisi optimoida kattamaan solun 8 jättämä aukko, mikä voidaan toteuttaa muun muassa antenniasetuksia tai solun vaihtoon liittyvien asetusten muuttamisella. Ongelmaa voidaan yrittää korjata luvussa 3.4 esitetyillä etätoimenpiteillä. Antennivahvistusongelma on kuitenkin laitteistovika, mikä tarvitsee paikapäällistä korjausta.





Kuva 5.4: Vertailuskenaarion luokitellut radiolinkkivirheet kartalla.



Kuva 5.5: Ongelmaskenaarion luokitellut radiolinkkivirheet kartalla. Väri kuvaa näytteiden esiintymisen tiheyttä paikallisesti. Solun 8 alueella iso keskittymä näytteitä, mistä voidaan päätellä nukkuvan solun sijainti.

## 6 Yhteenveto

Itseorganisoituvien radioverkkoihin tutustumisen ohella tutkimuksen keskeisenä tavoitteena oli kehittää menetelmä nukkuvan solun havaitsemiseksi LTE-radioverkossa. Edellisessä luvussa esitettyjen tuloksien perusteella kehitetyllä menetelmällä pystytään todella havaitsemaan nukkuva solu LTE-radioverkossa. Menetelmän etuna on sen monikäyttöisyys, jolla tarkoitetaan menetelmän soveltuvuutta muihinkin vikatilanteisiin, jotka tuottavat radiolinkkivirheitä tai sen kaltaisia näytteitä. Tutkimuksen seuraavana vaiheena voisikin olla menetelmän soveltaminen esimerkiksi RACH-vikaantumiseen, jossa päätelaitteen kyky yhteydenmuodostukseen estyy. Myös mahdollisuus käyttää testattavana aineistona pelkästään jaksollisia näytteitä lisää menetelmän monikäyttöisyyttä. Lähtökohtaisesti menetelmää voitaisiin soveltaa myös sellaisiin vikatilanteisiin, jotka eivät luo merkittävästi radiolinkkivirheitä, kunhan luokittelun opetusaineistoon löydetään sellaisia luokkia, jotka kuvastavat virheellistä toimintaa.

Menetelmän soveltuminen kaikenlaisiin skenaarioihin on puolestaan kyseenalaista. Tiheässä verkossa nukkuvaa solua ei välttämättä pystytä huomioimaan, jos naapurisolut pystyvät kattamaan vikaantuneen solun peittoalueen. Tällöin radiolinkkivirheitä tai niiden kaltaisia näytteitä ei synny, mikä on menetelmän toimivuuden kannalta välttämätöntä. Toisaalta kun peittoalueen aukkoa ei pääse syntymään, tilanne ei ole niin kriittinen. Toinen heikkous on menetelmän perustuminen solujen valta-asemiin ja päätelaitteiden sijaintitietoihin, joten vaatimuksena on LTE-radioverkon kyky raportoida päätelaitteiden sijaintitieto. Menetelmään voidaan soveltaa muihinkin kuin päätelaitteen koordinaatteihin perustuvaa sijaintitietoa.

Toteutettujen algoritmien ongelmana on suuren laskentatehon vaatimus etenkin moniulotteisuuden pienentämisen yhteydessä. Normalisointi ja moniulotteisuuden pienentäminen ovat kuitenkin välttämättömiä luotettavan luokittelun kannalta, joten asiaa ei voida sivuuttaa. Vaihtoehtona voisi olla testattavan aineisto esisuodattaminen, jossa aineistosta poistetaan tarpeettomia näytteitä ennen diffuusiokuvausta. Menetelmässä, jossa tutkitaan signaalin laadun kannalta heikoimpia näytteitä, hyvää signaalinlaatua kuvaavat näytteet ovat tarpeettomia.

## Lähteet

- [1] *The 3rd Generation Partnership Project*, <http://www.3gpp.org/>
- [2] *Next Generation Mobile Networks*, <http://www.ngmn.org/>
- [3] *Self-optimisation & self-configuration in wireless networks*, <http://www.fp7-socrates.eu/>
- [4] *Huawei*, <http://www.huawei.com/>
- [5] 3GPP TR 25.814, *Physical layer aspects for evolved Universal Radio Access (UTRA)*, Release 7, 2009.
- [6] 3GPP TR 25.912, *Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)*, Release 10, 2011.
- [7] 3GPP TR 36.814, *Further Advancements for E-UTRA Physical layer aspects*, Release 9, 2010.
- [8] 3GPP TS 32.521, *Self-Organizing Networks (SON) Policy Network Resource Model (NRM) Integration Reference Point (IRP); Requirements*, Release 9, 2010.
- [9] 3GPP TS 36.214, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements*, Release 10, 2011.
- [10] 3GPP TS 36.300, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2*, Release 10, 2010.
- [11] 3GPP TS 36.331, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) - Radio Resource Control (RRC) - Protocol specification*, Release 8, 2009.
- [12] M. Amirijoo, J.L. van den Berg, C. Blondia, A. Eisenblätter, T. Kürner, O. Linnell, R. Litjens, J. Oszmianski, L.C. Schmelz & N. Scully, *Self-configuration, -optimisation and -healing in wireless networks*, Wireless World Research Forum Meeting 20, 2008.

- [13] M. Amirijoo, I. Balan, C. Blondia, A. Hecker, T. Jansen, L. Jorguseski, T. Kurner, R. Litjens, I. Moerman, R. Nascimento, J. Oszmianski, O. Linnell, L.C. Schmelz, N. Scully, K. Spaey, S. Thiel & K. Zetterberg, *Use Case for Self-Organising Networks*, SOCRATES D2.1, 31.8.2008.
- [14] M. Amirijoo, I. Balan, H. van den Berg, M. Döttling, T. Jansen, L. Jorguseski, R. Litjens, R. Nascimento, J. Oszmianski, O. Linnell, L.C. Schmelz, K. Spaey, U. Turke & K. Zetterberg, *Framework for the development of self-organisation methods*, SOCRATES D2.4, 2008.
- [15] I. Borg & P.J.F. Groenen, *Modern multidimensional scaling: theory and applications*, Springer, 2005.
- [16] B. Cheung, S. G. Fishkin, G. N. Kumar, & S. A. Rao *Method of monitoring wireless network performance*, USPTO Patent Application 20060063521, 23.3.2006.
- [17] F. Chernogorov, *Detection of Sleeping Cells in Long Term Evolution Mobile Network*, Pro-gradu tutkielma, Jyväskylän yliopisto, 2010.
- [18] R.R. Coifman & S. Lafon, *Diffusion Maps*, Applied and Computational Harmonic Analysis, Vol 21, Issue 1, s. 5 – 30, 2006.
- [19] T. Cover & P. Hart, *Nearest neighbor pattern classification* IEEE Transactions on Information Theory, Vol 13, Issue 1, s. 21 – 27, 1967.
- [20] D. Das, *Designing a Self-Healing Approach to Radio Link Failures in Mobile Handsets*, Proceedings of the Second International Conference on Digital Telecommunications, s. 23, 2007
- [21] M. Döttling & I. Viering, *Challenges in mobile network operation: Towards self-optimizing networks*, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, s. 3609 – 3612, 2009.
- [22] S. Feng & E. Seidel, *Self-Organizing Networks (SON) in 3GPP Long Term Evolution*, Nomor Research, 20.5.2008.
- [23] A.K. Ghosh, J. Wanken & F. Charron, *Detecting Anomalous and Unknown Intrusions Against Programs*, Computer Security Applications Conference, s. 259 – 267, 1998.
- [24] GSM World, *GSM Roaming and Coverage Maps*, <http://www.gsmworld.com/roaming/roaming.html>, viitattu 5.10.2010.

- [25] J. R. Hershey & P. A. Olsen, *Approximating the Kullback Leibler divergence between Gaussian mixture models*, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, s. 317 – 320, 2007.
- [26] M. Hinchey & R. Sterrit, *Why computer-based systems should be autonomic*, 12th IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer-Based Systems, s. 406 – 412, 2005.
- [27] H. Holma & A. Toskala, *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, John Wiley & Sons, 2009.
- [28] P. Kendall, *Wireless Operator Performance Benchmarking Q2 2007*, saatavilla <http://www.strategyanalytics.com/>, 14.9.2007
- [29] P. Kela, J. Puttonen, N. Kolehmainen T. Ristaniemi, T. Henttonen & M. Moisio, *Dynamic Packet Scheduling Performance in UTRA Long Term Evolution Downlink*, ISWPC , 2008.
- [30] S.B. Kotsiantis, D. Kanellopoulos & P.E. Pintelas, *Data Preprocessing for Supervised Learning*, IJCS Volume 1 Number 2, s. 111 – 117, 2006.
- [31] P. Kumpulainen & K. Hatonen, *Local anomaly detection for mobile network monitoring*, Information Sciences 178 (2008) s. 3840 – 3859, 2008.
- [32] K. Leibnitz, M. Murata & N. Wakamiya, *Biologically Inspired Networking*, Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks, s. 1 – 21, Wiley, 2007.
- [33] P. Lescuyer & T. Lucidarme, *Evolved Packet System (EPS); The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*, John Wiley & Sons, 2008.
- [34] T. M. Mitchell, *Machine Learning*, McGraw-Hill, 1997.
- [35] W. Mohr, *Self Organizing Networks; A Manufactes View*, ICT Mobile Summit, Santander, 2009.
- [36] C. M. Mueller, M. Kaschub, C. Blankenhorn & S. Wanke, *A Cell Outage Detection Algorithm Using Neighbor Cell List Reports*, Proceedings of the 3rd International Workshop on Self-Organizing Systems, s. 218 – 229, 2008 .
- [37] J. Puttonen, J. Kurjenniemi & O. Alanen, *Radio Problem Detection Assisted Rescue Handover for LTE*, IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, s. 1752 – 1757, 2010.

- [38] S. Sesia, I. Toufik & M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution - From theory to practice*, John Wiley & Sons, 2011.
- [39] J. Shlens, *A Tutorial on Principal Component Analysis*, Versio 3.01, New York University, 22.4.2009
- [40] J. Strassner, *The Role of Autonomic Networking in Cognitive Networks*, Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks, s. 23 – 52, Wiley, 2007.
- [41] J. Turkka, *Diffuusiokuvaus ja sen soveltaminen datajoukon dimension pienentämiseen*, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 31.5.2011.
- [42] J. Turkka & A. Lobinger, *Non-regular Layout for Cellular Network System Simulations*, PIMRC-2010 , 2010.
- [43] J. Turkka, T. Ristaniemi, G. David & A. Averbuch, *Anomaly Detection Framework for Tracing Problems in Radio Networks*, International Conference on Networks, 2011.
- [44] E. Westerberg, K. Balck & A.P. Rimhagen *Method of monitoring cells in wireless communication systems*, US Patent Application 2010/0254274, 7.10.2010.

## A Simulaatioasetukset

Parametri	Arvo
Cellular layout	57 cells (19 eNBs)
Carrier frequency	2 GHz
Inter-site distance	1750 m
Operating bandwidth	10 MHz
Penetration loss	20 dB
UE speed	3 km/h
Reuse factor	1
User distribution	Uniformly
Load	20 users in each cell
Path loss	$L[\text{dB}] = 128.1 + 37.6 \log_{10}(R)$ , where R is distance in km
Horizontal antenna pattern	$A(\theta) = -\min[12(\frac{\theta}{\theta_{3dB}})^2, A_m]$ , where $\theta_{3dB} = 70^\circ$ and $A_m = 25$ dB
Channel model	Typical urban
Total BS TX power	46 dBm
UE TX power	23 dBm (200 mW)
UE receiver	1-2 antennas
UE transmitter	1 antenna
UE antenna gain	0 dBi (isotropic)
UE noise figure	9 dB
eNB receiver	1 antenna
eNB transmitter	1 antenna
eNB antenna gain in reference scenario	15 dBi
eNB antenna gain in problematic scenario	-50 dBi
eNB noise figure	5 dB
Slow fading standard deviation	8dB

Taulukko A.1: Simulaation asetukset 1.

Parametri	Arvo
Simulaation length	142 s (2 million steps)
Step length	71,43 $\mu$ s (duration of one OFDM symbol)
Duplexing mode	FDD
Network synchronicity	Asynchronous
Power control DL/UL	Off/On
HARQ	Asynchronous, chase combining, 8 SAW channels, max 3 retransmissions
ARQ	Off
RLC mode	Unacknowledged
Initial cell selection criteria	Strongest RSRP defines the target cell
Handover margin	3 dB
Handover time to trigger	160 ms
OLLA (DL/UL)	On (DL player target = 0.2 / UL player target = 0.3)
UL power control	$B_0 = -62, \alpha = 0,6$
DL packet scheduler	Proportional Fair
UL packet scheduler	Adaptive Transmission Bandwidth
RLF T310 timer length	600 ms
RLF $Q_{out}$ threshold	-8 dB
RLF $Q_{out}$ window size	200 ms
RLF $Q_{in}$ threshold	-6 dB
RLF $Q_{in}$ window size	100 ms

Taulukko A.2: Simulaation asetukset 2.



## B Verkkotapahtumalogin parametrit

Indeksi	Parametri
1	Time stamp
2	User entity ID
3	eNB ID
4	Network ID
5, 6	X- & Y-coordinates of UE
7	Network event (katso taulukko B.2)
8	Serving cell RSRP
9	Serving cell RSRQ
10, 12, 14, 16, 18, 20	IDs of three neighbor cells (doubled)
11, 13, 15	Corresponding neighbor RSRP values
17, 19, 21	Corresponding neighbor RSRQ values
22	Handover Source eNB ID
23	Handover Target eNB ID
24	Wideband channel quality indicator
25	Power Headroom
26	HO process status CQI
27	HO message status
28	Statistic BS

Taulukko B.1: Verkkotapahtumalogin parametrit.

Taulukon B.2 termien selitykset löytyvät 3GPP:n teknisestä raportista [11]. Tutkimuksessa käytetyt tapahtumat ovat 2, 13 ja 15.

Tunniste	Tapahtuma
0	DL_problem
1	DL_problem_recovery
<b>2</b>	<b>RLF</b>
3	RLF_reestablishment
4	RLF_reconfiguration
5	Reselection
6	TXP_HR_enter
7	TXP_HR_leave
8	A2_RSRP_enter
9	A2_RSRP_leave
10	A2_RSRQ_enter
11	A2_RSRQ_leave
12	A3
<b>13</b>	<b>HO_command_RCVD</b>
14	HO_complete_RCVD
<b>15</b>	<b>Periodic</b>
16	Out_of_Service
17	BCH_failure
18	HOF

Taulukko B.2: Verkkotapahtumat.