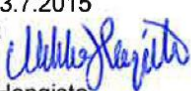




# **Esiselvitys matkaviestinverkkojen tukiasemien sähkön käytöstä ja energiatehokkuudesta**

Kirjoittajat: Olli Apilo, Mikko Hongisto, Mika Lasanen

Luottamuksellisuus: Julkinen

<b>Raportin nimi</b>		
Esiselvitys matkaviestinverkkojen tukiasemien sähkön käytöstä ja energiatehokkuudesta		
<b>Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot</b>		<b>Asiakkaan viite</b>
Viestintävirasto, 0709019-2 Petri Lehikoinen PL 313 00181 Helsinki		Doha-#4471134-v2
<b>Projektin nimi</b>		<b>Projektin numero/lyhytnimi</b>
Esiselvitys matkaviestinverkkojen tukiasemien sähkön käytöstä ja energiatehokkuudesta		Rbs-eneff
<b>Tiivistelmä</b>		
<p>Liikenne- ja viestintäministeriön Vihreän ICT:n ohjelman mukaisesti Viestintävirasto käynnisti toimenpiteitä matkaviestinverkkojen energiantarpeiden selvittämiseksi. Tässä työssä aihetta kartoitettiin tukiasemien ja matkaviestinverkkojen osalta julkaistuja tietolähteitä hyödyntäen. Työssä muodostettiin alustava arvio kolmen suurimman operaattorin nykyisestä sähkönkulutuksesta ja energiatehokkuudesta sekä mallinnettiin sähkönkulutuksen kehittymistä lähitulevaisuudessa. Raportissa on myös esitetty viestintäverkkojen laitteille esitetyt vapaaehtoiset energiatehokkuustavoitteet (CoC), kuvattu sähkönkulutuksen jakautumista tukiaseman laitteistoissa sekä esitelty ja tarkasteltu muutamissa aiemmissä tutkimushankkeissa käytettyjä tehonkulutusmalleja.</p> <p>Viestintäviraston seurantatietojen mukaan matkaviestinverkon tiedonsiirtomäärä on kasvanut 2010 luvulla vuosittain 70-82 % ja nykytason (325 000 teratavua/a) odotetaan lähes kaksinkertaistuvan vuosittain mm. erilaisten videopalveluiden käytön lisääntyessä mobiililaitteissa. Toisaalta kolmen suurimman operaattorin raportoimien tietojen perusteella niiden Suomen toimintojen kokonaissähkönkulutus oli vuosina 2011-2014 laskenut ollen noin 0,55 TWh/a, josta tukiasemien laitteistojen osuuden arvioidaan olevan merkittävä eli suuruusluokaltaan lähes puolet (0,25 TWh/a). Siirrettyä gigatavua kohden lasketun energiatehokkuuden arvioidaan parantuvan lähivuosina merkittävästi rakenteilla olevien LTE-verkkojen tukiasemien liikennekuormien kasvaessa ja kapasiteetin käytön lisääntyessä. Matkaviestinverkkojen sähköntarpeen arviointia mallinnuksen keinoin vaikeutti se, että tukiasemien määrät (teknologioittain) ja mallien parametrisoinnissa tarvittavat tiedot eivät olleet julkisina saatavilla. Energiatehokkuuslain piiriin 2015 tulleet operaattorit ovat toteuttaneet erityyppisiä energiatehokkuus- ja raportointitoimia (mm. CDP-raportointi) vapaaehtoisesti, joten valmiudet konsernitason energiakatselmuksen suorittamiseksi 2015 aikana ovat olemassa.</p> <p>Raportin loppuun on koottu tietoja viitatuissa tutkimuksissa havaituista energiatehokkuutta parantavista ratkaisuista komponenttitasolla, laitetasolla, verkkotasolla sekä arvioitu niiden sovellusaluetta, vaikuttavuutta ja teknologian valmiusastetta. Tiedostettuaan toimialan suhteellisen suuren sähkönsäätöpotentiaalin ja jatkamalla energiatehokkuustoimien käyttöönottoa operaattorit saattavat kyetä pitämään lähivuosien sähkön kulutuksensa nykytasolla tai vähentämään sitä tietoliikenteen määrän erittäin nopeasta kasvusta huolimatta. Vuotuisen tai hieman harvemmin toteutettavan tietoliikennemääriin suhteutetun energiatehokkuusseurannan järjestäminen kustannustehokkaasti olisi jatkossa mahdollista Energiaviraston ja Viestintäviraston keräämiä viranomaistietoja yhdistämällä.</p>		
Espoo 3.7.2015 <b>Laatija</b>  Mikko Hongisto, erikoistutkija, proj.pääll.	<b>Tarkastaja</b>  Mika Lasanen, erikoistutkija, ohjelmapäällikkö	<b>Hyväksyjä</b>  Tuula Mäkinen, tutkimusalueen päällikkö
<b>VTT:n yhteystiedot</b>		
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, PL 1000, 02044 VTT		
<b>Jakelu (asiakkaat ja VTT)</b>		
Jarno Ilme, Petri Lehikoinen, Pertti Suortti (Viestintävirasto). Mika Lasanen, Olli Apilo, Mikko Hongisto, Tuula Mäkinen, Tapio Rauma, Karri Rantasila (VTT).		
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.		

## Sisällysluettelo

---

Sisällysluettelo.....	2
1. Toimeksiannon tausta.....	3
1.1 Johdanto ja hankkeen tavoitteet .....	3
1.2 Hankkeen sisältö, tehtävät ja työn rajaus.....	5
2. Tukiasemien sähkökäytöstä.....	5
2.1 Tukiasemat osana mobiiliverkkoa.....	5
2.2 Lähestymistapoja mobiiliverkon energiankulutuksen seuraamiseksi .....	7
2.3 Tukiaseman tehonkulutusmallit.....	9
2.4 Merkittävimmät tukiaseman tehonkulutukseen vaikuttavat tekijät.....	13
2.5 Tukiasemien määrästä Suomessa.....	15
2.6 Tukiasemien energiankulutuksen arvioinnissa tarvittavia tietoja.....	16
3. Operaattoreiden sähkökulutuksen nykytilakartoitus.....	17
3.1 Tilastolliset tietolähteet.....	17
3.2 Operaattorikohtaiset julkiset tietolähteet.....	19
3.3 Arvio kolmen suurimman teleoperaattorin sähkökulutuksesta.....	19
4. Energiatehokkuuslain velvoitteista operaattoreille.....	21
5. Energiatehokkuuskäsitteen soveltaminen matkaviestinverkkoihin.....	22
6. Arvioita ja laskelmia mobiiliverkkojen lähitulevaisuuden sähkökulutukselle .....	24
6.1 Lähitulevaisuuden teknologiset kehitystrendit .....	25
6.2 Aiempia mobiiliverkkojen sähkökulutuksen kehitysarvioita .....	26
6.3 Arvio matkaviestinverkkojen sähkökulutuksen kehittymiselle Suomessa.....	27
6.3.1 Liikennemäärän kasvu .....	27
6.3.2 Energiankulutustrendit .....	28
6.3.3 Laskennallinen energiankulutusarviointi.....	30
7. Lupaavimmat energiaterhokkuutta parantavat ratkaisut .....	34
7.1 Komponenttitason ratkaisut.....	34
7.2 Laitetason ratkaisut.....	35
7.3 Solutason ratkaisut .....	36
7.4 Verkkotason ratkaisut .....	36
8. Yhteenveto tuloksista ja johtopäätelmät.....	38
Lähdeviitteet.....	41

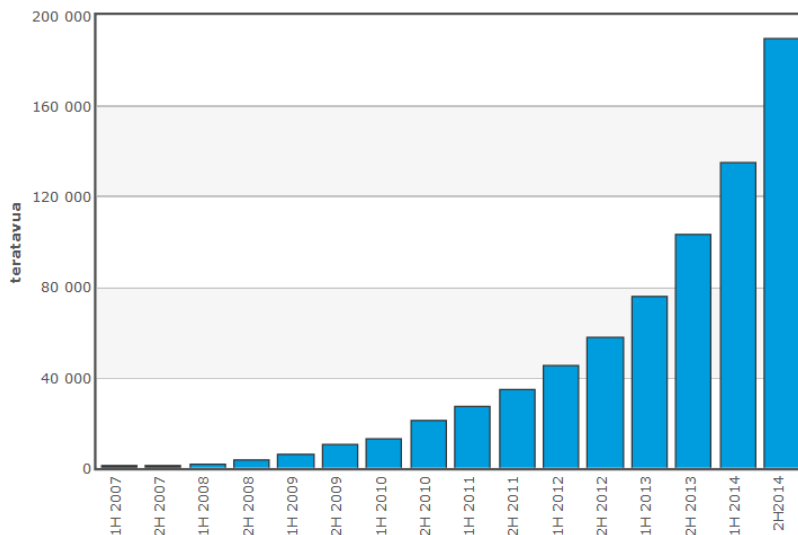
## 1. Toimeksiannon tausta

Liikenne- ja viestintäministeriön joulukuussa 2013 julkaiseman Vihreän ICT:n ohjelman [LVM13] avulla pyritään selvittämään mm. ICT infrastruktuurin edellyttämät energiantarpeet sekä kehittämään yhteistyötä, jonka avulla ICT:n negatiiviset vaikutukset voitaisiin minimoida. Ohjelman yhtenä toimenpidealueena on tietoliikenneverkkojen osalta todettu (luku 5.2.), että vuoden 2015 loppuun mennessä selvitetään tieto- ja viestintäverkkoinfrastruktuurin vaatimat energiantarpeet ja kehittämiskohteet. Lisäksi tavoitteena on tunnistaa lainsäädännöllisiä esteitä tieto- ja viestintäinfrastruktuurin energiankulutuksen tehostamiseksi. Lisäksi LVM:n koordinoiman viestintäpolitiikan KIDE-ohjelman asiakirjassa vuodelta 2012 [LVM12] mainitaan teeman Vihreä ICT alla kehittämiskohteina (luku 5.2 "älykkäät viestintäverkot") yhteistyön rakentaminen ICT ja energiasektorin välille sekä energiatehokkuuden lisääminen viestintäverkoissa. Ministeriö onkin pyytänyt Viestintävirastoa seuraamaan laajakaistaisten viestintäverkkojen energiankulutusta. Lisäksi yhteistyötä on lisätty ICT- ja energiasektoreiden välillä.

Toisaalla kansallisten energia- ja ilmastotavoitteiden energiatehokkuustoimenpiteiden yhteydessä tieto- ja viestintäverkkojen sekä ICT-infrastruktuurien kasvavalle energiankulutukselle ehdotetaan asetettavaksi määrätietoisia energiatehokkuustavoitteita [TEM13] (s. 16, kohta 16).

### 1.1 Johdanto ja hankkeen tavoitteet

Mobiililaitteiden ja niiden tietoliikenteen määrän lisääntyessä nopeasti verkkojen suorituskyvyn ja kapasiteettivaatimusten kasvun odotetaan heijastuvan myös laitteistojen sähköntarpeeseen. Viestintävirasto pystyy seuraamaan matkaviestintäverkoissa siirrettyjen teratavujen määrää (kuva 1). Kasvu on viime vuosina ollut nopeaa.

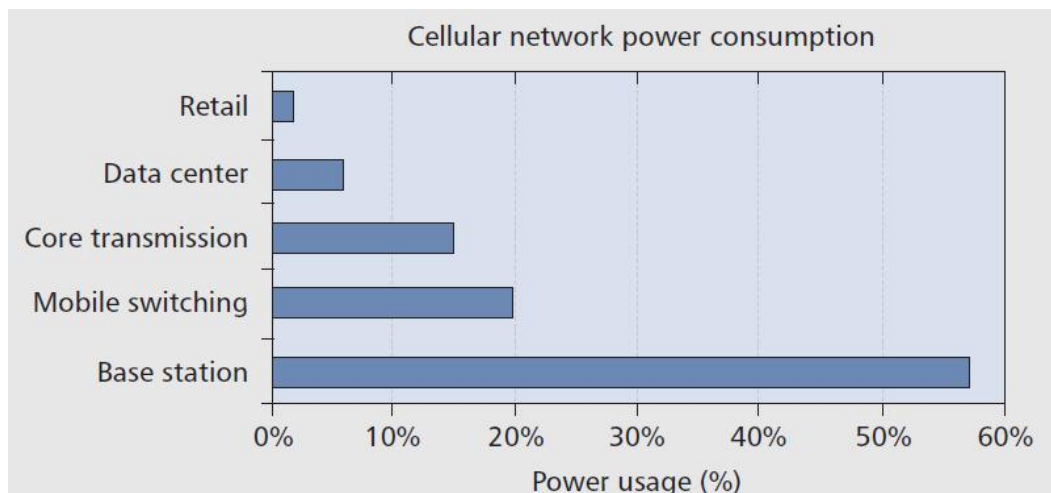


Kuva 1. Tiedonsiirtomäärän kasvu Viestintäviraston mukaan. Tiedonsiirtomäärä on ilmoitettu teratavuina eli tuhansina gigatavuina. Määrä sisältää sekä käyttäjien lähettämän (uploaded) että vastaanottaman (downloaded) tietoliikenteen [Ficora 15a].

Kasvu on kiihtynyt ja se voi heijastua myös sähköntarpeeseen järjestelmätasolla. Viestintäviraston toimialakatsauksen 1/2015 mukaan matkaviestinverkoissa vuoden 2014 aikana siirretyn tiedon määrä oli noin 325 000 teratavua eli 82 prosenttia enemmän kuin edellisvuonna [Ficora15b, s. 12].

Mobiiliverkkojen tiedonsiirtomääriä lisäävät nopeasti mm. erilaisten videopalveluiden käytön yleistyminen mobiililaitteissa.

Alustavat tiedot viittaavat siihen, että teleoperaattorin sähkönkulutuksesta tukiasemat laitteistoihin ja apujärjestelmien muodostavat suurimman osan. Muun muassa tutkimuksen [Han11] mukaan tukiasemien osuus olisi noin 57% (kuva 2), mutta tilanne on voinut muuttua uuden teknologian käyttöönoton myötä merkittävästi. Taustatiedot viittaavat siihen, että viestintäverkkojen energiatehokkuuden selvittäminen on perusteltua aloittaa tukiasemista (ml. asemarakennuksen järjestelmät). Viestintävirasto onkin katsonut tukiasemien ja verkkojen energiankulutusta koskevien taustatietojen täsmentämisen tarpeelliseksi Vihreän ICT:n ohjelman tavoitteiden mukaisesti vuoden 2015 aikana.



Kuva 2. Tehonkulutus tyypillisessä matkapuhelinverkossa lähteen [Han11] mukaan perustuen Vodafonen tietoihin.

Hankkeen yleisenä tavoitteena on etsiä toimintatavat, joilla mobiiliverkkojen ja erityisesti tukiasemien energiankulutusta voitaisiin seurata tarkemmin ja niiden energiatehokkuutta parantaa tulevaisuudessa siten, että voimakasta sähkönkulutuksen kasvutrendiä voitaisiin ohjata mahdollisesti maltillisempaan suuntaan ja tulevaisuudessa jopa kääntää laskuun.

Mobiiliverkkojen tukiasemien määrät ja rinnakkaiset laitteistot ja järjestelmät lisääntyvät nopeasti, joskin myös yhteistoiminta operaattoreiden välillä on paikoin lisääntymässä. Myös laitteistopuolella on muutoksia, jotka voivat vähentää merkittävästi energiankulutusta (mm. multiradioiden käyttöönotto). Myös tehojen optimoinnilla ja taajuussuunnittelulla voitaneen vaikuttaa verkkojen ja tukiasemien energiatehokkuuteen.

Energiatehokkuuden monitoroimiseksi tarvitaan lisätietoa tiedonsiirtomäärän ja sähkönkulutuksen välisestä suhteesta eri tilanteissa ja vallitsevien kehitystrendien seuraamiseksi ja ennakoimiseksi. Olennaista on hahmottaa, mitä asioita tulee seurata, mitä tietoja tarvitaan ja selvittää, miten ne voidaan kerätä kokonaiskuvan hahmottamiseksi.

Selvityksen tavoitteena on tuottaa taustatietoa toimille, joita Viestintäviraston odotetaan omalla vastualueellaan edistävän kansallisiin energia- ja ilmastotavoitteisiin sekä LVM:n Vihreä-ICT ja Kide-ohjelmiin liittyen. Työ on luonteeltaan esiselvitys, joka on toteutettu VTT:n

energia- ja radiojärjestelmäasiantuntijoiden yhteistyönä. Selvityksen toivotaan parantavan yleisesti Viestintäviraston valmiuksia ottaa energiatehokkuusnäkökulmaa huomioon tukiasemia ja verkkoja koskevia ohjaustoimenpiteitä valmistellessaan.

Hallinnon linjausten lisäksi energiatehokkuudesta on kehittymässä olennainen kilpailutekijä laitevalmistajille, sillä operaattoreille aiheutuviassa elinkaarikustannuksissa laitteistojen sähkönkulutuksella on kasvavaa merkitystä, jota lisääntyvä jäähdytys- ja varavoimakapasiteetin tarve vielä korostavat.

## 1.2 Hankkeen sisältö, tehtävät ja työn rajaus

Pääosin aikavälillä 10.12.2014 - 31.3.2015 toteutetun hankkeen avulla luotiin valmiuksia ja hahmoteltiin menettelyitä mobiiliverkkojen sähkönkulutuksen seurannalle (mahdollisuuksien mukaisesti operaattoreittain) sekä etsittiin ja yksilöitiin alustavia keinoja ja ratkaisuja mobiiliverkkojen energiatehokkuuden parantamiseksi (yleistasolla).

Toimeksianto suunniteltiin sisältämään seuraavat keskeiset tehtävät. Tehtävä (T1) kohdistui sen selvittämiseen, missä tukiasemien sähköenergia kuluu ja mitkä seikat siihen erityisesti vaikuttavat sekä erityisesti siihen, miten ja minkälaisien tietolähteiden ja tiedonkeruun avulla kolmen suurimman verkko-operaattorin tukiasemien sähkönkulutusta voitaisiin jatkossa seurata.

Tehtävä (T2) liittyi siihen, miten sähkönkulutusta voitaisiin suhteuttaa siirretyn tiedon määrään tai muihin saatavilla oleviin suorituskykyä kuvaaviin tietoihin energiatehokkuuden monitoroimiseksi.

Tehtävässä (T3) arvioitiin mobiiliverkkojen sähköntarpeen muutoksia lähitulevaisuudessa kehitystrendit huomioon ottaen ja tunnistettiin siihen vaikuttavia seikkoja. Lopuksi tehtävässä (T4) paikallistettiin alustavasti mahdollisia energiatehokkuuden parantamismahdollisuuksia ja toimenpiteitä. Hankkeesta laadittiin myös esitykset LVM:n ja VTT:n organisoimaan työpajaan "TV-sisältöjen monikanavaisen jakelun energiankulutuksen arviointi" keskusteluiden alustamiseksi. Työpaja liittyen hankkeeseen [Federley15] pidettiin Otaniemessä 27.2.2015.

Hankkeessa selvitettiin kirjallisuuden pohjalta, miten sähköntarve jakautuu tukiasemalaitteistoissa ja miten sitä voitaisiin verkostotasolla seurata systemaattisesti vuosittain monitorointinäkökulmaa mahdollisimman hyvin palvelevalla tavalla (mahdollisuuksien mukaan mittauksen perusteella). Työhön sisältyi katsaus aiempaan työhön, jonka pohjalta tukiasemien energiankulutusta hahmotettiin. Lisäksi selvitettiin sitä, miten tarkasti toimialan sähkönkulutusta on seurattu kansallisessa tilastointijärjestelmässä ja voitaisiinko tietoja käyttää estimoinnissa apuna.

Hankkeen keskeisenä tavoitteena oli kehittää toimintatapoja ja menetelmiä, joiden avulla tukiasemien energia-tehokkuutta voitaisiin lähitulevaisuudessa seurata systemaattisemmin kolmen suurimman mobiiliverkko-operaattorin (TeliaSonera, Elisa ja DNA) osalta. Digitan ja Ukkoverkot Oy:n verkkoja ei tässä hankkeessa tarkasteltu lainkaan.

## 2. Tukiasemien sähkönkäytöstä

---

### 2.1 Tukiasemat osana mobiiliverkkoa

Matkapuhelinverkko koostuu tukiasemista ja kiinteästä verkosta. Puhelu tai tieto siirtyy matkapuhelimesta radiosignaalina lähimpään tukiasemaan ja siitä edelleen kiinteään verkkoon. Tietoliikenne voidaan ohjata tukiasemalta kiinteän verkon kautta internetiin.

Viestintävirasto on kartoittanut aiemmin laajakaistaisten verkkojen energiatehokkuutta viitteissä [Ficora11] ja [Ficora12] kattaen sekä liityntäverkon, runkoverkon ja palvelinkestusten energiatehokkuusaihepiiriä. Tässä työssä huomiota kiinnitetään erityisesti mobiiliverkon tukiasemiin (liityntäverkkoon).

Mobiiliverkko on jaettu soluihin eli alueisiin, joilta ollaan yhteydessä kyseisen alueen peittäviin tukiasemiin. Solut voidaan jakaa suuriin makrosoluihin (useita kilometrejä, esim. noin 10 km), mikrosoluihin (alle 1 km) ja pikosoluihin (alle 100 m). Solun koko ja muoto riippuvat käytännössä lähettimen taajuusalueesta, tehosta, tukiasema-antennien suuntakuvioista ja maastosta. Lähettimien tehoja säädetään optimaaliseksi.

Makrosolun tukiasemapaikka sisältää tehovahvistimet, radiotaajuuksisen signaalinkäsittelyn (RF) sekä kantataajuuden signaalinkäsittelyn (baseband, BB) laitteistot. Lisäksi tukiasemaan liittyy tehonlähde, tarvittaessa ilmastointi ja jäähdytysjärjestelmä ja runkoverkon rajapinta (nk. backhaul, kts. kuvat 3 ja 4). Backhaul-ratkaisuihin kuuluvat myös mikroaaltolinkit sellaisten tukiasemien välillä, jotka eivät ole suoraan kytkettynä alueelliseen valokuituverkkoon (nk. point-to-point –linkit tukiasemien välillä, joita on useita tuhansia käytössä). Nämä linkit vaativat toimiakseen voimakkaasti suunnatut antennit ja ”näköyhteyden” tukiasemien välille (line-of-sight, LOS). Mikrosolujen tukiasemissa ”langaton backhaul” ei välttämättä onnistu LOS-vaatimuksen ja tukiasemien matalan sijainnin takia. Tilanne muuttuu pienten solujen yleistyessä.

Tässä työssä tarkastelun kohteena ovat tukiasemapaikat kokonaisuudessaan ja huomiota kiinnitetään erityisesti makrosolujen tukiasemiin.

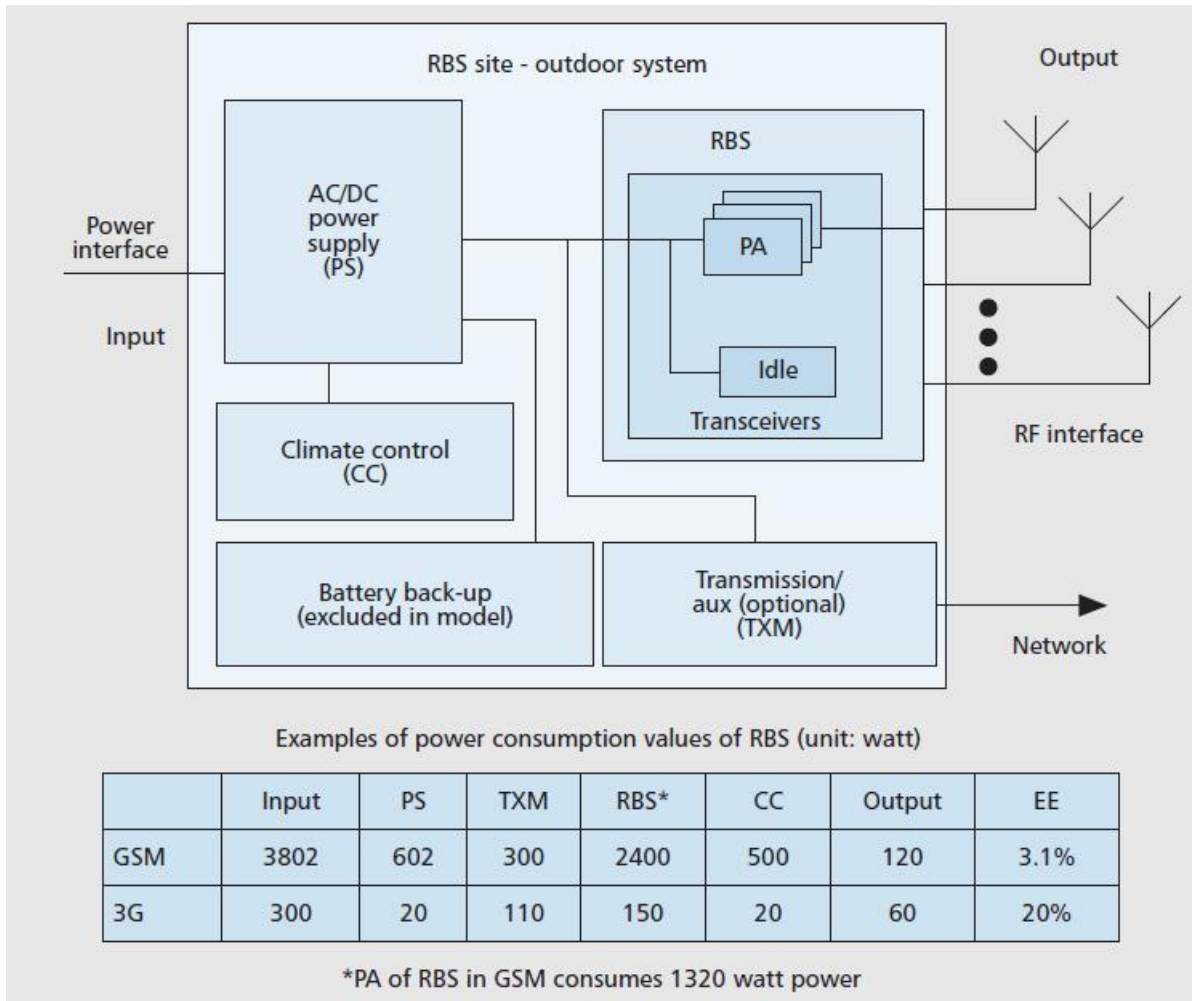
Harvaan asutuilla alueilla solujen koko on suurempi ja tukiasemien lähettimien tehot ovat suurempia kuin taajamissa, koska tarvitaan laajempi peittoalue, mutta ei välttämättä kovin suurta siirtokapasiteettia. Taajamissa taas yhdellä alueella voi olla useampia tukiasemia riittävän kapasiteetin saavuttamiseksi ja katvealueiden peittämiseksi. Yksi asema voi käsitellä vain rajallisen määrän puheluita ja dataa kerralla. Alhaisempi taajuus mahdollistaa laajan peittoalueen harvemmillä tukiasemilla, kun taas korkeampi taajuus mahdollistaa suuremman kapasiteetin taajamissa.

Samassa lähetyksessä tai mastossa voi olla useamman operaattorin tukiasema-antenneja. Tukiasemaverkko peittää käytännössä koko Suomen.

Tukiasemien lähtimet on taajamissa sijoitettu ulkona rakennusten yhteyteen. Lähettimistä signaali siirretään kaapeleita pitkin antenneihin. Kaupungeissa ja taajamissa suurta aluetta palvelevat makrosolutukiasemat on sijoitettu usein talojen katoille. Harvaan asutuilla seuduilla käytetään enemmän tukiasemamastoja, joiden yhteydessä on pieni tukiasemarakennus laitteistoille. On myös järjestelmiä, joissa laitteistot on viety mastoon mm. jäähdytystarpeen vähentämiseksi ja energiatehokkuuden parantamiseksi.

Pikosolutukiasemat voivat esimerkiksi hoitaa tietyn tilan tai paikan matkapuhelinliikennettä. Niiden avulla saadaan parempi kuuluvuus katvealueille ja paikkoihin, joissa kapasiteettitarve on suuri (erittäin paljon tietoliikennettä).

Tukiaseman eri laitteiden sähkönkulutusta on havainnollistettu mm. lähteessä [Chen11] seuraavasti.



Kuva 3. Sähkönkulutuksen referenssimalli yleiselle tukiasemalle [Chen11] Katso myös kuva 4. (Huom. 3G:n osalta tehot eivät vastaa CoC määrittämiä, katso taulukko 1 ja ovat ilmeisesti liian pienet.)

Eri komponenteista eniten energiaa kuluttavat tehovahvistimet (PA). Sähköä kuluu myös teholähteessä (AC/DC muunnos), kaapeleissa ja jäähdytyksessä. Luvussa 2.4 on analysoitu tarkemmin sähkönkulutuksen jakautumista eri teknologioilla (taulukko 2) sekä tehonkulutukseen vaikuttavia tekijöitä.

Energiätehoikkua voidaan parantaa mm. tehovahvistinten tehokkuutta parantamalla, passiivisia jäähdytysmenetelmiä soveltamalla, viemällä vahvistimia mastoon lähelle antennien syöttö- ja jäähdytyksestä aiheutuvien häviöiden minimoimiseksi sekä käyttämällä energiatehokkaita runkoverkkoon liitännästeknologioita. Lupaavimpia ratkaisuja energiatehokkuuden parantamiseksi on koottu raportin lukuun 7.

## 2.2 Lähestymistapoja mobiiliverkon energiankulutuksen seuraamiseksi

Luotettavin tapa tukiasemien sähkönkulutuksen seuraamiseksi perustuisi kaikki asemat kattavaan tukiasemalistaukseen (tietokantaan) ja tukiasemakohtaisiin sähköenergian kulutusmittauksiin. Vielä tarkemmissa tarkasteluissa mukaan otettaisiin mahdollisten



varavoimageneraattoreiden polttoaineen kulutustiedot. Suomen olosuhteissa niillä on käytännössä hyvin vähäinen merkitys. Viitteen [DNA14] mukaan varavoimakoneiden polttoaine-energian osuus on ollut eri vuosina selvästi alle 0,5 % sähkönkäytöstä, joten huomio voidaan kohdentaa yksinomaan sähkönkulutukseen. Lähestymistavan ongelmana on se, että tukiasematietokanta on vain operaattoreilla itsellään eikä kattavia tietoja ole julkisena saatavilla. Myös mahdollisuus seurata kulutusmittausten tuloksia on vain käyttöpaikan sähköliittymän omistajalla ilman erillisiä valtuutuksia (sekä jakeluverkon haltijalla, joka toimii yleensä myös mittausvastaavana).

Osa tukiasemista sijaitsee vuokrapaikoilla eikä erillistä kulutusmittausta ole aina järjestetty. Käytetyn sähköenergian kustannukset saattavat sisältyä vuokraan. Mikäli vuokran suuruus ei riipu suoranaisesti sähköenergian kulutusmittauksilla havaittavista muutoksista, on energiatehokkuuslain mukainen vastuu energiankulutuksen seurannasta ja raportoinnista vuokralle antajalla. Tämän periaatteen osalta operaattoreiden käytössä olevat sähköenergian kulutuksen seurantajärjestelmät todennäköisesti eroavat, sillä käytössä on mm. arviointimenetelmiä vuokrattujen tilojen kulutusosuuksien selvittämiseksi. Viitteessä [Elisa14a] on esimerkiksi sovellettu keskimääristä sähkönhintaa kulutuksen arvioimiseksi vuokraosuuksista.

Alkuvuodesta 2015 laadittu Valtioneuvoston asetus energiakatselmuksista (20/2015) toteaa jaosta seuraavaa:

3 § Kohdekatselmusten määrä (2. mom.)

*"Jos yrityksen tai konsernin jokin toimipaikka on vuokralla rakennuksessa, kokonaisenergiankäyttöön lasketaan mukaan vain se osuus käytetystä energiasta, josta yritys tai konserni maksaa mittauksiin perustuvan kulutuksen mukaan"*

Makrosolujen tukiasemarakennuksissa on tyypillisesti mittauskeskus ja energiankulutuksen rekisteröivä yleensä jakeluverkonhaltijan toimesta etäluettava sähköenergiamittari, jonka käyttöpaikkakohtaisia tuntitietoja operaattorit voivat halutessaan seurata ja aggregoida jakeluverkonhaltijan palveluista.

Myös laitteistoja mallintamalla on mahdollista arvioida niiden energiantarvetta ja analysoida sähkötarpeeseen vaikuttavia tekijöitä (kuten liikennemäärän vaikutusta tukiaseman sähkön kulutukseen). Mallinnuksessa tarvitaan kuitenkin paljon tietoa ja mallinnettavien parametrien määrä kasvaa varsin suureksi, jolloin todellisten lähtötietojen puuttuminen aiheuttaa merkittävää epävarmuutta tuloksiin. Mallinnukseen perustuvaa lähestymistapaa on esitelty seuraavassa luvussa. Tukiasemien sijainnit ja määrät sekä niiden liikennemäärät eivät ole kuitenkaan julkista tietoa, mikä tekee tarkan kokonaiskuvan muodostamisen haasteelliseksi julkisen tiedon pohjalta mallintamalla.

Huomion kiinnittäminen yksittäisiin tukiasemiin saattaa myös johtaa nk. haitalliseen osaoptimointiin koko verkoston energiatehokkuuden parantamisen kannalta. Energiatehokkuuden parantamiseksi on siten tarkasteltava sekä komponentti-, laite-, soluetä verkkotason ratkaisuja.

Toistaiseksi vuotuisen sähkönkulutuksen kannalta luotettavin kokonaiskuva saadaan kolmen suurimman operaattorin itse julkaisemista tiedoista. Suurimmat operaattorit laativat vuosittain vastuullisuusraportit ja GRI-ohjeistuksen mukaiset raportit Carbon Disclosure -projektin sivuille ([www.cdp.net](http://www.cdp.net)). Näitä tietoja voidaan täydentää muista omaehtoisen raportoinnin lähteistä kuten  vastuullisuus-, ympäristö- ja vuosiraporteista. Näiden tietojen perusteella saatiin alustavia tietoja operaattoreiden Suomen toimintojen vuotuisesta sähkönkäytöstä tyydyttävällä tarkkuudella vuosille 2011-2014. Tietojen perusteella voitiin haarukoida tuotantoverkon osuutta operaattoreiden kokonaissähkönkulutuksesta. Vuoden 2014 tietojen

päivittämiseksi hanketta päädyttiin jatkamaan vuosiraporttien julkaisun tapahtuessa tyyppillisesti ennen ko. konsernien kevätkauden yhtiökokouksia.

Kokonaiskuvaa arvioitiin voitavan parantaa yhdistämällä julkaistuja vuotuisia seurantatietoja mallinnukseen, joka tuo ymmärrettävällä tavalla esiin myös muita tehonkulutukseen vaikuttavia tekijöitä. Tavoitteena oli myös muodostaa riippuvuussuhteita, joiden avulla sähköntarpeen lähitulevaisuuden ennakointi tietoliikennemäärien kasvutrendiin ja teknologiamuutoksiin nähden mahdollistuisi.

Tiedonhankintaa valmisteltaessa osoittautui, että kansallinen energiatilastointijärjestelmä (Tilastokeskuksen ja Energiateollisuus ry:n tiedonkeruujärjestelmät) ei seuraa tarkasti palveluliiketoimintojen sähkönkäyttöä toimialoitain, mistä seuraa, että julkisista tilastoista ei ollut löydettävissä teleoperaattoreiden tai mobiiliverkon sähkönkulutuksen arviointia ja seurantaa mahdollistavaa tietoa.

Tiedonkeruun tarkkuuden ja energiankäyttöä koskevien tietojen saatavuuden (ainakin viranomaiskäyttöön) arvioidaan paranevan energiatehokkuuslain seurauksena (kts. Hallituksen esitys 182/2014 vp, Energiatehokkuuslaki 1429/2014 sekä raportointiasetus 41/2015 ja VNA energiakatselmuksista 20/2015). Suuria yrityksiä koskien laki sisältää yrityksen energiakatselmusvelvoitteen, jonka mukaisesti niiden on tehtävä yrityksen energiakatselmus neljän vuoden välein ja ensimmäisen kerran 5.12.2015 mennessä. Yrityksen energiakatselmuksessa selvitetään yrityksen tai konsernin kaikkien toimipaikkojen energiankulutusprofiili ja tunnistetaan mahdollisuudet energiansäästöön (kts. [www.energiavirasto.fi](http://www.energiavirasto.fi) ->alan toimijat -> energiatehokkuus). Tätä asiaa tarkastellaan yksityiskohtaisemmin luvussa 4.

Tällä esiselvityksellä pyrittiin paikallistamaan myös tietopuutteita, joissa yhteistyö operaattoreiden kanssa saattaisi olla välttämätöntä julkisten tietojen tarkentamiseksi. Tätä varten Viestintäviraston käyttöön laadittiin alustava kyselypohja. Luottamuksellisten operaattorikohtaisten tukiasemia, niiden teknologioita ja laitteistojen sähkönkulutusta koskevien tietojen keräämistä ei kuitenkaan päädytty toteuttamaan tämän hankkeen puitteissa mm. käynnissä olleen energiatehokkuuslain toimeenpanon ja siihen liittyvien vuonna 2015 toteutuvien raportointivelvoitteiden vuoksi.

## 2.3 Tukiaseman tehonkulutusmallit

EU on laatinut tavoitteet (Code of Conduct) viestintäverkkojen laitteiden energiantehokkuudelle. Merkittävimmät laitevalmistajat ovat sitoutuneet esitettyihin tavoitteisiin. Sitoutuminen on kuitenkin vapaaehtoista ja tavoiteohjelmasta voi halutessaan jättäytyä pois [Ficora12]. Tehonkulutustavoitteet GSM/EDGE-, WCDMA/HSDPA- ja LTE-tukiasemille on esitetty taulukossa 1 lähteiden[CoC13a] ja [Coc13b] pohjalta.

Oletukset tukiasemien kokoonpanoista ja parametreista sekä liikennekuormantason määrittelyt löytyvät ETSI EE:n dokumentista [TS102706]. Saman suuruusluokan tehonkulutukseen on päästy myös mittauksilla, joiden tulokset on kerätty dokumenttiin [TR103116].

Taulukko 1: CoC-ohjeiden mukaiset tukiasemien tehonkulutustavoitteet.

	2011	2012	2013-2014	2015-2016
GSM/EDGE, korkea kuorma	1000 W	950 W	800 W	760 W
GSM/EDGE, kohtalainen kuorma	800 W	750 W	700 W	650 W
GSM/EDGE, matala kuorma	650 W	600 W	580 W	540 W
WCDMA/HSDPA, korkea kuorma	1000 W	900 W	800 W	760 W
WCDMA/HSDPA, kohtalainen kuorma	910 W	780 W	670 W	650 W
WCDMA/HSDPA, matala kuorma	835 W	690 W	570 W	540 W
LTE, korkea kuorma	1200 W	1100 W	900 W	840 W
LTE, kohtalainen kuorma	1080 W	950 W	750 W	700 W
LTE, matala kuorma	800 W	750 W	650 W	600 W

Jos varsinaisen tukiasemalaitteiston tehonkulutus  $P_{equipment}$  on arvioitavissa, voidaan tukiasemapaikan (site) tehonkulutusta  $P_{site}$  arvioida käyttämällä ETSI EE:n kaavaa [TS102706],

$$P_{site} = PSF \cdot CF \cdot P_{equipment} \quad (1)$$

jossa  $PSF$  on teholähteen korjauskerroin ja  $CF$  on jäähdytyskerroin. Lisäksi jos kyseessä on ns. hajautettu tukiasema, jossa radiotaajuuksinen (RF) signaalinkäsittely on hajautettu erilleen keskitetystä kantataajuisesta (baseband, BB) signaalinkäsittelystä, kaavaan 1 lisätään tehosyötön kerroin  $PPF$ . Tukiasemapaikan tehonkulutuksen kertoimien esimerkkiarvot ovat [TS102706]:

- $PSF = 1.0$ , kun tukiasemapaikkaan syötetään vaihtovirtaa (AC)
- $PSF = 1.1$ , kun tukiasemapaikkaan syötetään tasavirtaa (DC)
- $CF = 1.0$ , kun tukiasemalaitteisto on ulkona
- $CF = 1.05$ , kun tukiasemalaitteisto on sisällä ja käytössä on tuulettimet (fresh air fan)
- $CF = 1.5$ , kun tukiasemalaitteisto on sisällä ja ilman lämpötila on ilmastoinnilla säädetty 25 °C:een
- $PPF = 1.05$

Tyypillinen makrosolun tukiasemapaikan lohkokaavio on esitetty kuvassa 4[Deruyck13]. Kuvan symboli  $N_s$  tarkoittaa sektorien lukumäärää ja  $N$  lähetin-vastaanottimien lukumäärää per sektori. ETSI EE:n dokumentin [TR103117] liitteissä on esitetty kahden eurooppalaisen tutkimusprojektin tuloksena syntyneet tukiaseman tehonkulutusmallit, joissa tehonkulutus parametrisoidaan ja jaetaan tukiaseman toiminnallisten lohkojen kesken. OPERA-Net-projektin mallissa keskitytään varsinaiseen tukiasemalaitteistoon, jonka kuluttama teho  $P_{BS}$  on

$$P_{RS} = \eta \cdot P_{BB} + N_{TRX} \cdot P_{RF} + \sum_{n=1}^{N_{TRX}} k_n \cdot P_{max,n} / c \quad (2)$$

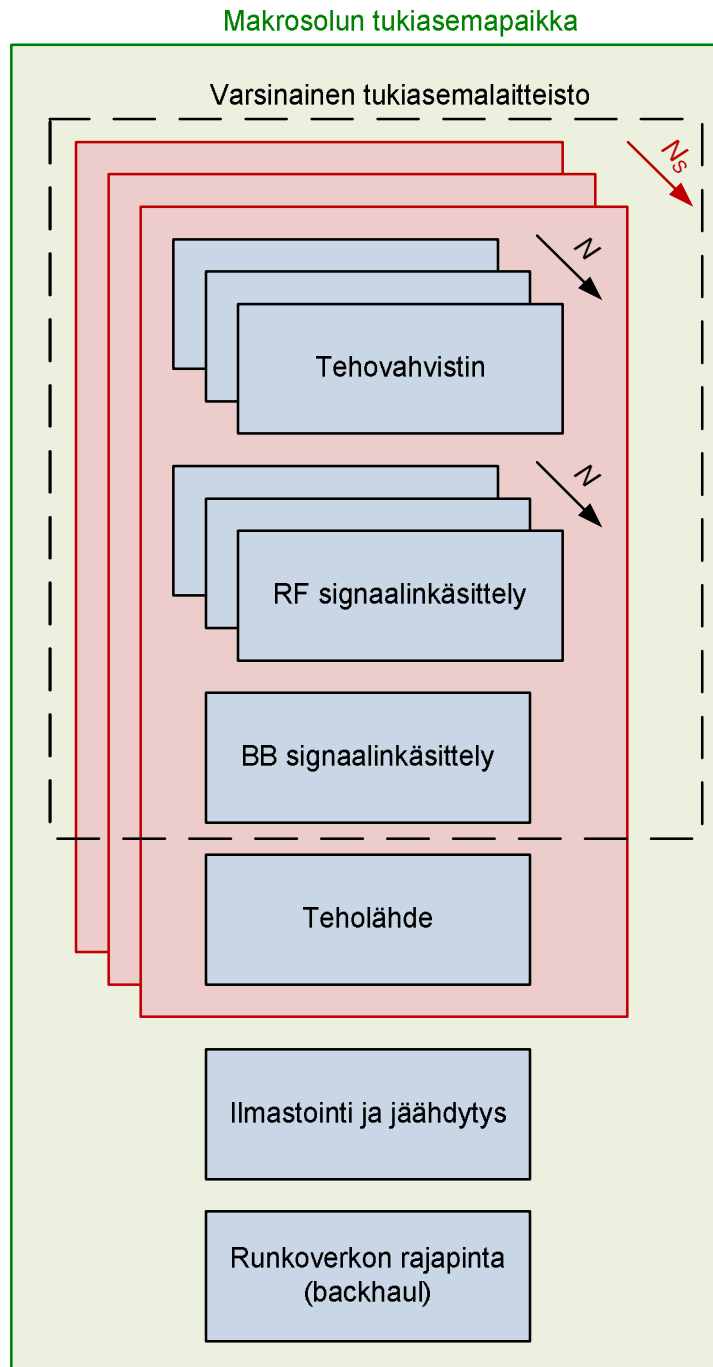
missä  $n$  on laskentakapasiteetin kokonaislukukerroin, joka kuvaa asennettujen kantataajuuslaskentayksiköiden lukumäärää,  $P_{BB}$  on kantataajuussignaalinkäsittelyn kuluttama teho,  $N_{TRX} = N_S \cdot N$  on lähetin-vastaanottimien lukumäärä,  $P_{RF}$  on RF signaalinkäsittelyn kuluttama teho,  $0 < k \leq 1$  on liikenteen kuorman kerroin,  $P_{max}$  on maksimilähetysteho, ja  $0 < c \leq 1$  on DC-RF muunnoksen kerroin, joka ottaa huomioon mm. tehonvahvistimen hyötysuhteen ja häviöt RF-kaapeleissa. EARTH-projektissa on mallinnettu koko tukiasemapaikan tehonkulutus seuraavasti [Auer11], [Holtkamp13]:

$$P_{total} = \begin{cases} N_S (P_1 + (k - 1) P_{max}/c), & 0 < k \leq 1 \\ N_S P_{sleep}, & k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

missä  $P_{sleep}$  on tehonkulutus virransäästötilassa (sleep mode) ja  $P_1$  on tehonkulutus suurimmalla lähetysteholla.  $P_1$  jaotellaan toiminnallisten lohkojen kesken seuraavasti:

$$P_1 = \frac{\frac{P_{max}}{N \eta_{PA} \cdot (1 - \sigma_{feed})} + N \frac{W}{10 \text{ MHz}} (P_{RF} + P_{BB})}{(1 - \sigma_{DC})(1 - \sigma_{MS})(1 - \sigma_{cool})} \quad (4)$$

missä  $\eta_{PA}$  on tehovahvistimen hyötysuhde,  $\sigma_{feed}$  on RF-kaapeloinnin häviökerroin,  $W$  on kaistanleveys,  $\sigma_{DC}$  on DC-DC teholähteen häviökerroin,  $\sigma_{MS}$  on AC-DC teholähteen häviökerroin ja  $\sigma_{cool}$  on jäädytyksen häviökerroin. Käytännössä tehovahvistimen hyötysuhde riippuu lähetystehosta. Tämä voidaan ottaa molemmissa malleissa huomioon korvaamalla vakioparametri  $c$  funktiolla  $c(k)$ . Tärkeimpänä erona malleissa on se, että EARTH-mallissa oletetaan BB-signaalinkäsittelyn tehonkulutuksen kasvavan lineaarisesti lähetys-vastaanottimien lukumäärän mukaan. Lisäksi EARTH-malli sisältää tehonkulutuksen riippuvuuden kaistanleveydestä.



Kuva 4: Makrosolun tukiasemapaikan (site) lohkokaavio [Deruyck13].

CoC-ohjeiden mukaiset LTE-tukiaseman tehonkulustavoitteet on annettu olettaen 3 sektoria, 20 MHz:n kaistanleveys, 2 lähetin-vastaanotinta, ja 20 W:n antennikohtainen maksimilähetysteho [CoC13b]. Kun nämä parametrit ja EARTH-projektin esimerkkiarvot tehonkulutusparametreille [Holtkamp13] yhdistetään, voidaan EARTH-mallin mukaista makrotukiaseman tehonkulutusta verrata CoC-tavoitteisiin. Esimerkiksi kohtalaiselle kuormalle saadaan tukiaseman tehonkulutukseksi<sup>1</sup>  $P_{\text{total}} \approx 830 \text{ W}$ . Tämä täyttää vuoden 2012 LTE-tukiaseman CoC-tavoitteen kohtalaiselle kuormalle.

<sup>1</sup> Käytetyt parametrit:  $N_s = 3$ ,  $k = 0.3$ ,  $P_{\text{max}} = 40 \text{ W}$ ,  $c = 0.2381$ ,  $N = 2$ ,  $\eta_{\text{PA}} = 0.2520$ ,  $\sigma_{\text{feed}} = 0.5$ ,  $\frac{W}{10 \text{ MHz}} = 2$ ,  $P_{\text{RF}} = 12.9 \text{ W}$ ,  $P_{\text{BB}} = 29.4 \text{ W}$ ,  $\sigma_{\text{DC}} = 0.075$ ,  $\sigma_{\text{MS}} = 0.09$  ja  $\sigma_{\text{cool}} = 0.1$

## 2.4 Merkittävimmät tukiaseman tehonkulutukseen vaikuttavat tekijät

Lähteestä riippumatta tukiasemapaikan tehonkulutus on jaoteltu pääosin edellisen kuvan mukaisiin lohkoihin. Tehonkulutuksen jakautumista eri lohkojen kesken on esitetty useissa eri kirjallisuuslähteissä. Nämä prosenttiosuudet on kerätty taulukkoon 2.

Taulukossa on oletettu käytössä olevan Code of Conduct –dokumentin konfiguraatio ja täysi liikennekuorma ellei toisin ole mainittu. Taulukon perusteella voidaan todeta, että makrosolujen LTE-tukiasemissa tehoa eniten kuluttaa tehovahvistin. Mallin 4 mukaisesti, tehovahvistimen osuus kasvaa, kun käytettävä kaistanleveys on pienempi kuin LTE:n maksimi, 20 MHz. Esimerkiksi 10 MHz:n kaistanleveydellä ja täydellä kuormalla tehovahvistimen osuus makrosolun LTE-tukiaseman tehonkulutuksesta nousee 49 %:iin.

Kun siirrytään pienempiin soluihin, kantataajuinen signaalinkäsittely alkaa dominoida tehonkulutusta. Aktiivijäähdytystä ei yleensä käytetä pienten solujen tukiasemissa [Holtkamp13], [Deruyck13].

Runkoverkon rajapintaratkaisujen (backhaul) merkitys kokonaistehonkulutukseen kasvaa, kun (pienen) tukiasemien määrä kasvaa. Viitteen [Tombaz14] mukaan backhaul-ratkaisun osuus perinteisissä makroverkoissa on alle 5 %, mutta heterogeenisissä verkoissa osuus olisi suurempi ja se voi olla jopa 50 %.

Ilmastointia ja aktiivijäähdytystä ei Suomen olosuhteissa tarvita myöskään isoille tukiasemille, jos varsinainen tukiasemalaitteisto sijoitetaan ulos esimerkiksi tukiasemamastoon [Nokia14]. Joissakin lähteissä, kuten [Correia10], WCDMA-tukiaseman tehovahvistimen osuuteen on laskettu mukaan myös muuta lähetin-vastaanottimen toiminnallisuutta ja näin tehovahvistimen osuudeksi on ilmoitettu jopa 50 – 80 % [Suarez12].

Taulukko 2: Tukiaseman tehonkulutuksen jakautuminen lohkoittain.

Lähde	Teknologia	Teho- vahvistin	RF signaalin- käsittely	BB signaalin- käsittely	Teho- lähde	Ilmastointi ja jäähdytys	Runko- verkon rajapinta
[Holtkamp13]	LTE, makrosolu	37 %	12 %	27 %	15 %	9 %	N/A
[Deruyck14] <sup>2</sup>	LTE, makrosolu	38 %	25 %	12 %	12 %	9 %	3 %
[Deruyck14] <sup>3</sup>	LTE, mikrosolu	4 %	27 %	27 %	27 %	16 %	N/A
[Holtkamp13] <sup>4</sup>	LTE, pikosolu	7 %	17 %	57 %	19%	0%	N/A
[Holtkamp13] <sup>5</sup>	LTE, femtosolu	7 %	14 %	60 %	19 %	0 %	N/A
[Micallef13] <sup>6</sup>	WCDMA/HSP A, makrosolu	35 %	31 %	11 %	N/A	23 %	N/A
[Arnold10] <sup>7</sup>	WCDMA, makrosolu	55 %	15 %		8 %	22 %	N/A
		19 %	49 %		10 %	22 %	
[Arnold10] <sup>6</sup>	GSM, makrosolu	56 %	18 %		8 %	19 %	N/A
		48 %	23 %		8 %	21 %	

Kuten kaavoista (2) ja (3) nähdään, liikennekuorman tasolla on suuri merkitys tukiaseman tehonkulutukseen, kun lähetysteho on korkea (makrosolut). Käytännössä tukiaseman kapasiteetti on mitoitettu niin, että yhteyshäiriöitä kapasiteetin loppumisen takia esiintyy vain poikkeustapauksissa. Tyypillisesti kiiretunnin (busy hour) aikana makrotukiaseman kuorma on noin 60 % maksimista tiheillä kaupunkialueilla ja noin 30 % maaseudulla [Ambrosy12].

Tyypillinen liikenneprofiili Euroopassa on esitetty kuvassa 5 [Ambrosy12]. Kuvassa on oletettu, että tukiaseman kuorma on 50 % maksimista kaupungissa ja 40 % lähiöissä.

<sup>2</sup>  $W = 5 \text{ MHz}, N = 1$

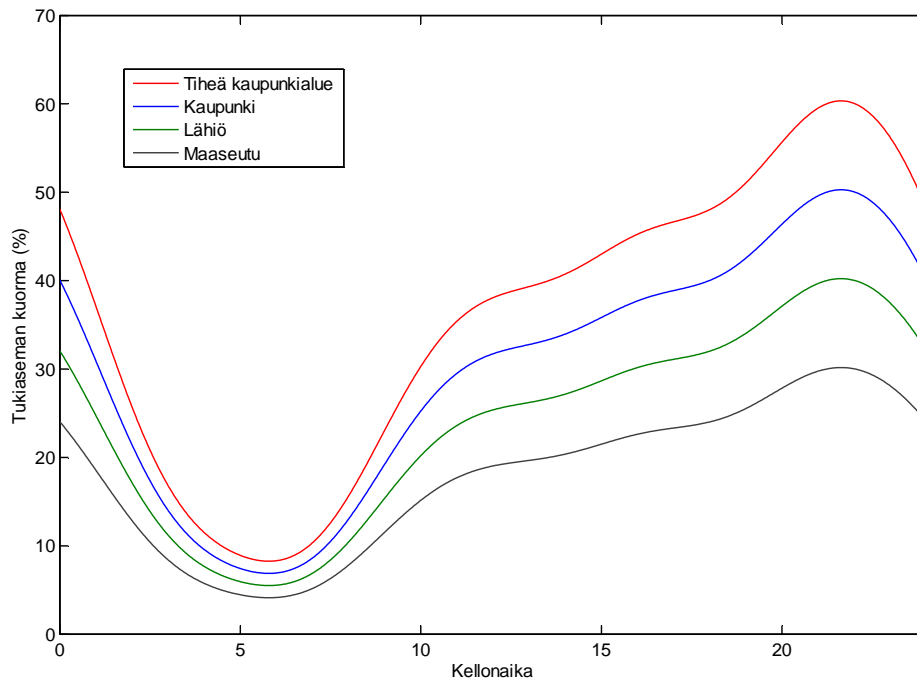
<sup>3</sup>  $N_S = 1, W = 5 \text{ MHz}, N = 1, P_{\max} = 4 \text{ W}$

<sup>4</sup>  $N_S = 1, P_{\max} = 0.25 \text{ W}$

<sup>5</sup>  $N_S = 1, P_{\max} = 0.1 \text{ W}$

<sup>6</sup> 1 kantoaalto/sektori

<sup>7</sup> 2 eri tukiasemaa



Kuva 5: Tyypillinen tukiaseman keskimääräinen kuorma vuorokaudessa [Ambrosy 2012].

Vaikka tietoliikennekuorma vaihtelee vuorokauden sisällä, oletetaan, että tukiaseman ylivuorokautinen (viikoittainen ja kuukausittainen) sähköenergian tarve vuorokautta kohden sekä yli vuorokauden mittaisen aikavälin keskitheho Suomen olosuhteissa on varsin tasainen. Joillakin makrosolujen tukiasemilla kulutukseen vaikuttaa kuitenkin käytössä oleva ilmalämpöpumppu jäädytyksen tehostamiseksi tarvittaessa (esim. ottoteho noin 1,5 kW ja jäädytysteho noin 5 kW - käyntiajat jäänevät hyvin vähäisiksi). Tarkemmilla tukiasemakohtaisilla vuorokausienergian tarvetta koskevilla mittaustiedoilla sekä mm. lämpötiloista ja liikennemääristä aiheutuvaa tehonvaihtelua koskevilla tiedoilla olisi merkitystä muun muassa varavoimajärjestelmien taloudellisen tapauskohtaisen mitoituksen kannalta (ml. akusto, mahdolliset varageneraattorit, polttokennot ja apuenergianlähteenä mahdollisten aurinko- ja tuulisähköjärjestelmien taloudellinen mitoitus).

## 2.5 Tukiasemien määrästä Suomessa

Tukiasemien määrä ja sijainti eivät ole Suomessa julkista tietoa, joten laitteistojen ja asemapaikkojen kokonaislukumäärästä voidaan esittää tässä vaiheessa vain karkeita arvioita. Lisäksi nopeiden LTE-verkkojen rakentaminen on vielä käynnissä ja uusia laitteistoja asennetaan jatkuvasti. Merkittävä osa niistä rakennetaan olemassa oleviin tukiasemapaikkoihin ja osa vanhoista laitteistoista jäänee myös käyttöön, jolloin tehontarpeen kasvua yksittäisen tukiaseman osalta voidaan arvioida taulukon 1 perusteella.

Yhden suomalaisen teleoperaattorin tukiasemien lukumäärät vuoden 2011 alussa on jaoteltu seuraavasti [Katsigiannis2014]:

- GSM/EDGE, 466
- HSPA, 9603
- HSPA + GSM/EDGE, 23843

Jos oletetaan, että kahden muun markkinaosuudeltaan merkittävän operaattorin tukiasemien lukumäärä olisi samaa suuruusluokkaa, voidaan kokonaismäärästä saada karkea käsitys. Käytännössä tukiasemapaikkoja (site) lienee kuitenkin huomattavasti vähemmän, koska



samalla paikalla yhtä mastoa hyödyntäen on useita tukiasemalaitteistoja, jotka voivat paikoin olla myös eri operaattoreiden hallinnassa. Tukiasemamäärien arvioimista vaikeuttaa se, että "site" –käsitteellä saatetaan tarkoittaa eri tutkimuksissa eri asioita (useampi sektori/site sekä useampi teknologia/site ja lisäksi saatetaan viitata multiradio-tukiasemiin).

## 2.6 Tukiasemien energiankulutuksen arvioinnissa tarvittavia tietoja

Karkeimmalla tasolla makrotukiasemien kokonaisenergiankulutusta voidaan arvioida, kun tiedossa on:

- tukiasemien lukumäärä teknologioittain (GSM, WCDMA, LTE). Tällöin voitaisiin käyttää taulukon Taulukko 1 mukaisia tehonkulutuksia. Tämä kuitenkin saattaa johtaa hyvin optimistiseen arvioon, sillä vanhaa laitekantaa lienee käytössä vielä paljon.
  - Liikennekuorman osuus voidaan jaotella korkeaan, kohtalaiseen ja matalaan kuvan 5 avulla. Voidaan esimerkiksi arvioida, että kaupungissa tukiasemissa kuorma on korkea 25 %, kohtalainen 46 % ja matala 29 % ajasta.

Karkeimman tason arvioinnissa on ongelmana se, että CoC-tavoitteita on saatavilla vain makrosolujen tukiasemille. Pienempien solujen yksittäisten tukiasemien tehonkulutukset ovat huomattavasti taulukon 1 arvoja pienempiä. Karkean tason energiankulutuksen arviointia helpottaisikin, jos CoC-tavoitteet olisivat saatavilla myös pienemmille lähetystehon tasoille (ts. pienemmille soluille). Asiaa tulisi selvittää jatkossa operaattoriyhteistyön keinoin.

Jos tiedossa on tukiasemien lukumäärä teknologioittain, arvioita voidaan parantaa käyttämällä tukiaseman tehonkulutusmalleja, jotka mahdollistavat operaattori- ja valmistajakohtaisen parametrinsoinnin. Esimerkiksi kaavan (3) mukaisen EARTH-mallin parametreista operaattorikohtaisia ovat:

- Liikennekuorma  $k$ , joka luonnollisesti vaihtelee teknologia- ja solukohtaisesti. Jos operaattorilta on saatavilla kuvan 5 kaltaista tietoa keskimääräisestä kuormasta, sitä voidaan käyttää arvioina verkon kaikille soluille.
- Maksimilähetysteho  $P_{max}$ . Solutyypikohtaista keskiarvoa voidaan käyttää arviointiin.
- Sektorien lukumäärä  $N_s$ , joka on  $N_s > 1$  tyypillisesti vain makrosoluissa.
- Lähetin-vastaanottimien lukumäärä per sektori  $N$
- Kaistanleveys  $W$ . Koska tehonkulutus vaihtelee merkittävästi sekä lähetin-vastaanottimien lukumäärän että kaistanleveyden muuttuessa, operaattoreilta saatava tukiasemien määrä olisi syytä jaotella parametrien  $N_s$ ,  $N$  ja  $W$  suhteen.

Vastaavasti valmistajakohtaisia parametreja (yhdeeltä tai useammalta valmistajalta) ovat:

- DC-RF muunnoksen hyötysuhde  $c(k)$
- Tehonkulutus virransäästötilassa  $P_{sleep}$
- Tehovahvistimen hyötysuhde maksimilähetysteholla  $\eta_{PA}$
- RF-kaapeloinnin häviökerroin  $\sigma_{feed}$ , joka yleensä oletetaan olevan  $\sigma_{feed} = 0.5$  perinteisille tukiasemapaikoille ja  $\sigma_{feed} = 0$ , kun RF signaalinkäsittely tehdään antennien läheisyydessä (remote radio head).
- RF signaalinkäsittelyn kuluttama teho täydellä kuormalla  $P_{RF}^1$

- Kantataajuisen signaalinkäsittelyn kuluttama teho täydellä kuormalla  $P_{BB}$
- DC-DC tehonlähteen häviökerroin  $\sigma_{DC}$
- AC-DC tehonlähteen häviökerroin  $\sigma_{MS}$
- Aktiivijäähdytyksen häviökerroin  $\sigma_{cool}$ , joka tyypillisesti oletetaan olevan  $\sigma_{cool} > 0$  vain makrotukiasemille.

Jos joitakin ym. parametreista ei ole saatavilla, arvioinnissa voidaan käyttää kirjallisuudesta löytyviä tyypillisiä arvoja [Holtkamp13]. Varsinkin valmistajakohtaisia parametreja on luultavasti vaikeaa saada.

Tarkimman tason tietoa energiankulutuksesta saadaan monitoroimalla operaattoreiden eri tukiasematyyppejä. Suosituksia monitorointiin on annettu ETSI EE:n dokumenteissa [TR103117] ja [TS102706]. Energiankulutusarvioita voitaisiin lisäksi tarkentaa mittaamalla tukiasemien liikennekuormaa ja tekemällä mittausten perusteella kuvan 5 mukaisia liikenneprofiileja. Monitoroitavan otoksen koon pohjalta olisi mahdollista määrittää myös luottamusvälejä saaduille tuloksille. Otopohjainen lähestymistapa voisi olla tehokas, mikäli kattavaa monitorointia ei voida toteuttaa.

Suoran energiankäytön lisäksi tulevaisuuden tarkastelut voivat laajentua kattamaan myös laitteistojen valmistuksen epäsuoraa energiankäyttöä. Asia on hyvin monimutkainen ja ETSI onkin laatimassa standardia "Elinkaariarvioinnin metodologia ICT- tuotteille, -verkoille ja -palveluille" josta on saatavilla luonnosversio [ETSI14].

### 3. Operaattoreiden sähkökulutuksen nykytilakartoitus

Operaattorikohtaisen ja toimialan sähkökulutuksen haarukoimiseksi käytiin läpi kaikki keskeiset energiatilastoinnin tietolähteet. Vuotuisen monitoroinnin näkökulmasta on tärkeää tiedostaa, että energiankulutuksen seurantaraportointi voidaan tarkimmin toteuttaa operaattoreiden itsensä toimesta perustuen verkonhaltijoiden kulutusmittauksiin. Vuokratilajärjestelyissä energia on kuitenkin usein sisällytetty vuokraan, joten siltä osin operaattoreilla itselläänkään ei aina ole tarkkoja tietoja vaan nykytiedot ovat osin arvioperusteisia. Seuraavissa luvuissa mainitaan lyhyesti keskeisimmät kulutustietojen etsintätyössä tehdyt havainnot.

#### 3.1 Tilastolliset tietolähteet

Tavoitteena oli selvittää, miten tarkasti ja minkälaisissa luokissa julkisissa energiatilastoissa raportoidaan tietoja, jotka tukisivat mahdollisimman hyvin mobiiliverkkojen sähkökäytön seurantaa. Toimialaluokituksen näkökulmasta kyse olisi luokituksen TOL 2008 mukaisesta toimialasta 612 eli "Langattoman verkon hallinta ja palvelut", joka määritellään seuraavasti:

*"Tähän kuuluu operointi, ylläpito ja yhteyspalveluiden tarjoaminen puheen, äänen, datan, tekstin ja kuvan siirtämiseksi matkaviestinverkoissa ja muissa langattomissa verkoissa. Tähän kuuluu myös liittymä- ja verkkokapasiteetin hankkiminen verkon omistajilta ja verkko-operaattoreilta sekä tätä kapasiteettia käyttäen langattomien televiestintäpalveluiden (paitsi satelliittipalveluiden) tarjoaminen yrityksille ja kotitalouksille. Tähän kuuluu myös langattoman verkon operaattorin tarjoamat Internet-yhteydet. Nämä palvelut tarjotaan radioaaltoja käyttäen, ja infrastruktuuri voi perustua joko yhteen teknologiaan tai usean teknologian yhdistelmään.*

*Tähän kuuluvat: puhelinpalvelut, tiedonsiirtopalvelut, ohjelmansiirtopalvelut kuten mobiili-TV, Internet-yhteyksien tarjoaminen.*

*Tähän eivät kuulu: televiestinnän jälleenmyyjät (eli verkkokapasiteetin hankinta ja jälleenmyynti ilman lisäpalveluiden tuottamista) (61900) ja televiestintälaitteiden myynti itsenäisenä toimintana (47420)"*

Tilastokeskuksen energiatilastoinnin [TK15a ja b, TK13a, TK14a] sekä PX-Web StatFin järjestelmän (<http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/>) tarkasteluista ilmeni, ettei niistä ollut löydettävissä mobiiliverkko-operaattoreita lähellä olevan toimialan monitoroinnin kannalta relevantteja energiankäyttötietoja. Lisäksi selvisi, ettei Tilastokeskus julkaise lainkaan toimialan 6120 toimialatason sähkönkulutustietoja. Syynä on se, että teollisuuden energiankäytön tilastoinnin kaltaista yritystason kyselyihin perustuvaa tiedonkeruuta ei sovelleta mobiiliverkon operaattoreiden sähkönkäytön tilastointiin, eivätkä nämä tiedot ole Tilastokeskuksen lakisääteisen tiedonkeruun piirissä [TKAV15].

Teollisuustoimialoista kerätään huomattavasti palvelutoimialoja tarkempaa tietoa. Tiedonkeruuproseduuri on kuvattu osoitteessa <http://www.stat.fi/keruu/teen/>. Siinä todetaan, että ”Teollisuuden energiankäyttökyselyssä kerätään tietoja yrityksen toimipaikalla käyttämästä sähkön ja lämmön määrästä sekä käytetyistä polttoaineista. Tilastointijaksona käytetään kalenterivuotta”. Palveluiden kulutusta selvitetään ”residuaalina” eli laajoja palvelusektoreita koskeva energiankulutustieto syntyy suurelta osin Tilastokeskuksen järjestelmässä vähennyslaskujen seurauksena tuotanto-kulutustaseista. Energiatilaston taulukko ”Sähkön kulutus sektoreittain” julkaistaankin vuosittain erittäin laajalla rajauksella (sektorina ”palvelut ja julkinen kulutus”).

Nelinumerotasoista toimialatietoa 6120 ei ole toistaiseksi saatavilla. Energiatilastoja sekä StatFin-järjestelmästä tehtyjä poimintoja voidaan toistaiseksi hyödyntää vain matkaviestinverkkojen ja mobiiliverkko-operaattoreiden kokonaissähkönkulutuksen suuruusluokan asettamisessa laajempaan kontekstiin. StatFin järjestelmän mukaiset toimialan ”palvelut ja julkinen kulutus” –sektorin sähkönkulutustiedot (GWh/a) ja osuus (%) koko Suomen kulutuksesta selviävät taulukosta 3. Seurantamenetelmiä kehitettäessä on lisäksi tarpeen tiedostaa, että vuosittaisen Energiatilaston valmistuminen kestää noin vuoden kalenterivuoden päättymisestä eli joulukuussa 2015 julkaistaan lopulliset vuoden 2014 tiedot.

Myöskään Energiateollisuuden kokoama sähkötilasto [ET15] ei sisällä matkaviestinverkkoihin yhdistettävissä olevaa toimialakohtaista tietoa.

Havainnot osoittavat, että nykyinen kansallinen energiatilastointijärjestelmä ei kuvaa ICT-sektorin ja erityisesti operaattoreiden sähkönkäyttöä riittävällä tarkkuudella vuotuisen mobiiliverkkojen sähkönkulutusseurannan näkökulmasta. Toisaalta toimialaryhmään 61200 ”langattoman verkon hallinta ja palvelut” kuuluvien keskeisten operaattoreiden lukumäärä on vähäinen, mikä saattaisi mahdollistaa ja helpottaa ajoittain toistuvan teollisuuden energiatilastoinnin kaltaisen yrityskohtaisen tiedonkeruun toteuttamisen suurimmille operaattoreille lähettävällä kyselyllä sekä toimialatason tietojen julkaisemisen, mikäli sellainen koettaisiin tarpeelliseksi ja palvelutoimialojen sähkönkulutustietoja muutoinkin tarkennetaan. Toimialan 61200 yritysten lukumäärä on vähintään 3kpl, joten estettä toimialatasoisten tietojen julkaisemiselle ei Tilastolain (280/2004, muutettu §13a) näkökulmasta liene, kunhan lakimuutoksen 361/2013 vaatimus täyttyy:

*”...tilastoviranomainen voi tuottaa ja antaa julkiseen käyttöön sellaisia tilastotarkoituksiin kerätyistä tiedoista muodostettuja tiedostoja, joista on poistettu tunnistetiedot ja jotka on käsitelty siten, ettei tilastoyksikköä voida tunnistaa suoraan eikä välillisesti.*

*Taulukko 3. Sähkön kulutus sektoreittain (Tilastokeskus PX-web StatFin-järjestelmästä poimittu taulukko ”palvelut ja julkinen kulutus”. Huom: Vuoden 2014 tieto on vasta ennakkollinen ja tarkentuu joulukuussa 2015 Energiatilastojen julkaisun yhteydessä.)*

<b>PALVELUT JA JULKINEN KULUTUS</b>	<b>Osuus %</b>	<b>GWh</b>
<b>2010</b>	21,2	18 569
<b>2011</b>	21,3	17 968
<b>2012</b>	21,8	18 573
<b>2013</b>	21,7	18 220
<b>2014*</b>	23,0	19 159

### 3.2 Operaattorikohtaiset julkiset tietolähteet

Tietolähteiden kartoituksissa parhaaksi nykytilaa kuvaavaksi tietolähteeksi osoittautuivat operaattoreiden itsensä laatimat raportoinnit, vuosikertomukset, vastuullisuusraportoinnit ja internet-sivut sekä Carbon Disclosure Project ”CDP” järjestelmään laaditut yhtiökohtaiset raportit (www.cdp.net). Näiden tietolähteiden avulla myös konsernien Suomen toiminnot kattavat alustavat sähkönkulutusarviot oli mahdollista laatia.

### 3.3 Arvio kolmen suurimman teleoperaattorin sähkönkulutuksesta

Koska 2 teleoperaattoria (TeliaSonera ja Elisa) kolmesta suurimmasta toimii Suomen lisäksi useissa muissa maissa, jouduttiin Suomea koskevia vuosikulutustietoja muodostamaan näiden osalta eri vuosille eri vuosien taulukoita ja niistä laskettuja suhdelukuja käyttämällä. Menettely aiheutti vähäistä epävarmuutta yksittäisten operaattoreiden Suomen toimintoja koskeviin sähkönkulutustietoihin.

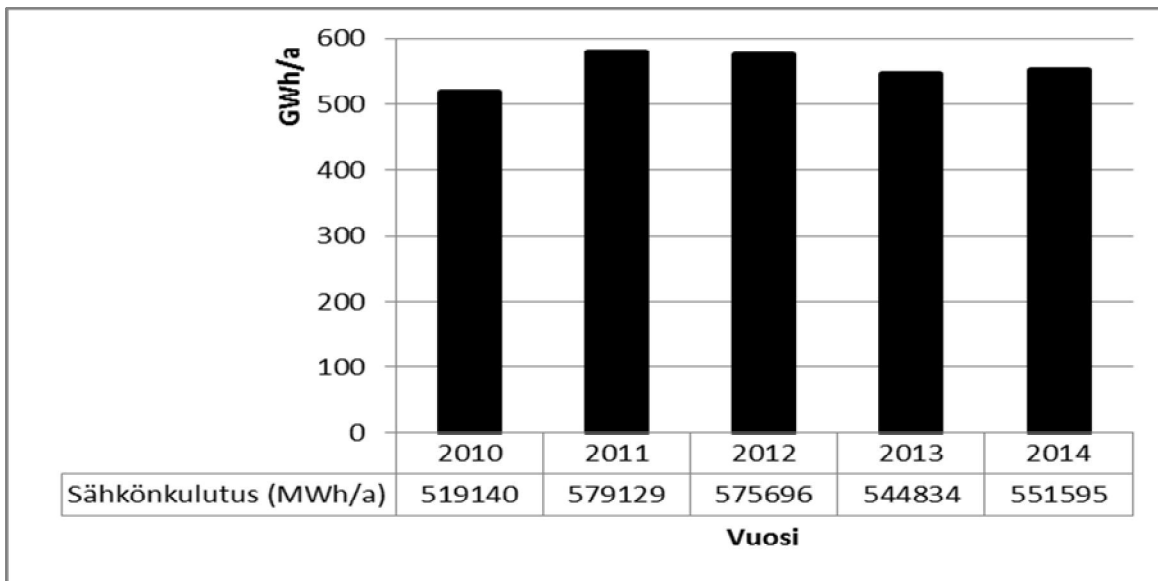
DNA julkaisee GRI:n mukaisen yritysraportin kerran vuodessa (tyypillisesti maaliskuuhun). DNA on julkaissut vuotuiset sähkönkulutustietonsa GRI-ohjeistuksen mukaisesti jaoteltuna vuosilta 2010-2014 internet-sivuillaan verkkovuosikertomusten yhteydessä [DNA12, DNA14 ja DNA15b]. Kaikki DNA:n raportit on tehty GRI:n (Sustainability Reporting Guidelines) G3-ohjeistuksen mukaan. G4-ohjeistuksen käyttöön siirrytään vuodesta 2014 alkaen.

Myös Elisa on julkaissut sähkönkulutustietonsa internet-sivuillaan varsin kattavasti GRI-raportointiperiaatteita noudattaen [Elisa15a]. Elisa Oyj:n sähkönkulutustiedot ovat löydettävissä vuoden 2013 vuosikertomuksesta [Elisa14b] sekä vuoden 2012 vuosikertomukseen liittyneestä yritysraportista [Elisa13] siten, että sähkönkulutuksen aikasarja vuosille 2010-2014 voitiin muodostaa. Elisa Eestin sähkönkulutukset on raportoitu erikseen. Viitteessä todetaan, että suurin osa sähköenergiasta käytetään tuotantoverkossa ja tuotantoverkon hiilijalanjälki oli noin 80 % koko hiilijalanjäljestä [Elisa14b]. Elisa on seurannut vuodesta 2011 hiilijalanjälkensä kehittymistä puolivuositain menetelmällä [Elisa14c] ja raportoinut sen laskeneen tasolta 0,6 kgCO<sub>2</sub>/Gtavu tasolle 0,08 kgCO<sub>2</sub>/Gtavu vuonna 2014 [Elisa15a]. Lisäksi viitteessä todetaan, että ”radioverkossa tukiasemalaitteiden

energiatehokkuus on viime vuosina parantunut ja energiankulutus siirrettyä datamäärää kohden pienentynyt. Samanaikaisesti verkon kokonaiskulutus on kuitenkin kasvanut. Merkittävin tekijä on tukiasemien kokonaismäärän ja siirrettävän datan kasvu”.

TeliaSonera toimii useissa maissa ja julkaisee sähkönkulutustietonsa vuotuisissa kestävyysraporteissaan maaryhmittäin [TS14b]. Kestävyysraporteja on julkaistu ainakin vuodesta 2004 alkaen (<http://www.teliasonera.com/en/sustainability/reports/>). Suomen toimintojen sähkönkulutus sisältyy näissä raporteissa ryhmään pohjoismaat. Kuitenkin TeliaSonera on julkaissut myös maakohtaisia tietoja vuotta 2012 koskevassa CDP-raportissaan [TS13b]. Suomen osuus ryhmän Suomi+Ruotsi sähkön kulutuksesta oli tuolloin 37,6 % ja kaikkien pohjoismaiden toimintojen kulutuksesta 30,4 % (vuonna 2012). Soveltamalla näitä eri maiden osuuksia sekä uusiutuvan energian sertifikaattien määrätietoja läheisten vuosien estimointiin pohjoismaita koskevaan tietoon saatiin suuntaa-antavat vuosien 2010-2014 sähkönkulutustiedot arvioiduksi myös TeliaSoneran osalta. Yhtiö mainitsee kestävyysraportissaan pohjoismaiden kokonaisenergiankulutuksensa vähentyneen.

Koska tietolähteissä on eroavaisuuksia eikä kaikkia niihin vaikuttavia tekijöitä tunneta julkaistujen raporttien perusteella eivätkä kaikki kolme operaattoria ole välttämättä soveltaneet yhdenmukaisia periaatteita mm. vuokratilojen sähkönkulutuksen arvioinnissa ja muutamien vuosien kulutustiedot jouduttiin arvioimaan edellä mainituilla periaatteilla, julkaistaan tässä vain kaikkia kolmea operaattoria koskevat sähkönkulutustiedot vuosilta 2010-2014 (kuva 6).



Kuva 6. Kolmen suurimman mobiiliverkko-operaattorin yhteenlasketun sähkönkulutuksen kehittyminen vuosina 2010-2014 yhtiöiden julkaisemien tietojen perusteella määritettynä.

Johtopäätelmänä operaattorikohtaisista tarkasteluista operaattoreiden itsensä julkistamien tietojen perusteella voidaan havaita, että kolme markkinaosuudeltaan merkittävä operaattoria ovat yhtiötasolla eli kaikki toimintonsa mukaan lukien kyenneet tehostamaan sähköenergiankäyttöään ja vähentämään kokonaissähkönkulutustaan vuosina 2012-2013 vapaaehtoisin toimin. Vuosina 2011-2013 toimialan sähkön kulutus ei ole kasvanut vaan hieman vähentynyt. Vuodesta 2011 vuoteen 2012 kokonaissähkönkulutuksen muutos on ollut -2,4 % ja vuoteen 2013 peräti -5,2 %. Lisäksi vuoden 2014 tiedoista voidaan päätellä, että vuoden 2014 operaattorikohtaiset ja niistä yhteenlaskettu absoluuttinen sähkönkulutus on kasvanut hieman vuoteen 2013 verrattuna, mikä johtunee LTE-verkkojen nopeasta

rakentamisesta. Kahden operaattorin kokonaiskulutukset ovat kasvaneet 3-7 % vuodesta 2013, mikä kuvastanee käynnissä olleen muutoksen mittakaavaa. Vuoden 2014 aikana erilaisten TV- ja videopalveluiden käyttö mobiililaitteissa yleistyi nopeasti, mikä on myötävaikuttanut liikennemäärien nopeaan kasvuun ja liikennemäärät ovat lähes kaksinkertaistuneet viimevuosina (kuva 1). Tämän kehityksen seurauksena suhteellinen tiedonsiirtomääriin suhteutettu sähkönkulutus on kuitenkin pienentynyt lähivuosina nopeasti. Kaikki operaattorit ovat myös raportoineet julkisesti ja kattavasti energiatehokkuustoimistaan GRI-ohjeistuksen mukaisesti ja aihepiiriin on kiinnitetty viimevuosina kasvavasti huomiota.

#### 4. Energiatehokkuuslain velvoitteista operaattoreille

---

Energiakatselmusten tarkoitus on tehostaa yritysten energiankäyttöä ja vähentää sitä kautta niiden toiminnasta aiheutuvia ympäristöpäästöjä. Uusi laki koskee toimialasta riippumatta kaikkia yrityksiä, joiden työntekijämäärä on yli 250 henkilöä tai liikevaihto yli 50 miljoonaa ja taseen loppusumma yli 43 miljoonaa euroa. Pakolliset katselmuksot koskevat niin teollisuuden, kiinteistöalan, palvelualan kuin pankki- ja vakuutusalan yrityksiä [EVSY15].

Suuryrityksiksi luokiteltavat operaattorit täsmentänevät tietopohjaansa 1.1.2015 voimaan tulleen energiatehokkuuslain (1429/2014) toimeenpanon seurauksena ainakin edeltävän vuoden 2014 tietojen osalta. Aiemmin energiakatselmuksien toiminta on ollut Suomessa vapaaehtoista.

Suuryrityksen kriteerit täyttävien operaattoreiden on tehtävä pakollinen energiatehokkuuslain 6§:n mukainen yrityksen energiakatselmus vähintään neljän vuoden välein eikä se saa olla neljää vuotta vanhempi viranomaisen sitä pyytäessä. Ensimmäisen kerran se on tehtävä viimeistään 5.12.2015 mennessä (katso lain 33§). Laki mahdollistaa kuitenkin myös erilaisia toteutustapoja, kuten mm. standardin ISO 50 001 mukaisen järjestelmän soveltamisen.

Lain 4 § määrittelee yrityksen energiakatselmuksen seuraavasti:

”Yrityksen energiakatselmus on järjestelmällinen menettely, jolla saadaan riittävästi tietoa koko konsernin tai yrityksen energiankulutusprofiilista, tunnistetaan mahdollisuudet kustannustehokkaaseen energiansäästöön, määritetään säästön suuruus ja raportoidaan katselmuksen tuloksista. Yrityksen energiakatselmuksessa otetaan huomioon kaikki yrityksen energiankäyttökohteet, joita ovat rakennukset, teollinen ja kaupallinen toiminta sekä liikenne.

Yrityksen energiakatselmukseseen on sisällytettävä erillisiä kohdekohtaisia katselmuksia riittävästä määrästä yrityksen toimintoja, jotta voidaan muodostaa luotettava kuva yrityksen kokonaisenergiatehokkuudesta ja todeta luotettavalla tavalla sen merkittävimmät parantamismahdollisuudet.”

Energiatehokkuuslaki sisältää mm. vähimmäisvaatimukset yrityksen energiakatselmuksille sekä siihen liittyville kohdekatselmuksille sekä raportoinnille. Lisäksi kohdekatselmusten raportoinnista (41/2015) ja energiakatselmuksista (20/2015) on säädetty lakia täsmentävät asetukset.

Koska vuoden 2015 tietoja voidaan käyttää vasta vuoden päätyttyä ja yhtiöiden kerättyä alkuperäistiedot eri kulutuskohteista vuosiraportteihinsa, joudutaan ensimmäiset raportoinnit toteuttamaan edeltävän vuoden tietojen perusteella (2014) ja kohdekatselmuksissa katselmoitujen kohteiden osalta kolmen vuoden ajalta (2012, 2013 ja 2014, katso asetus 41/2015, liite 1 kohdekatselmuksien raportin sisältö, luku 2).

Energiaviraston linjauksen mukaan pakollista yrityksen energiakatselmuksien raportointia ei toimiteta Energiavirastolle kuin erikseen pyydettyä. Yrityksen on kuitenkin toimitettava

kaikista yrityksen energiakatselmukseen sisällytettävistä kohdekatselmusraporteista keskeiset tiedot Energiaviraston ylläpitämään tai osoittamaan rekisteriin kolmen kuukauden kuluessa kunkin kohdekatselmusraportin valmistumisesta (11§). Laki kuitenkin mahdollistaa Energiavirastolle aiempia tarkempien yrityskohtaiset energiakatselmusten tietojen keräämisen suurimmilta mobiiliverkko-operaattoreilta.

Ensimmäisten energiakatselmusten sisältämien tietojen arvioidaan täsmentävän edellisessä luvussa kerättyjä tietoja sekä mahdollistavan viranomaisyhteistyönä tapahtuvan energiaseurannan toimialakohtaisesti. Myös toimintokohtainen raportointi mahdollistuisi raportoitavia tietokokonaisuuksia yhdenmukaistamalla kaikki eri operaattorit kattaen. Yhdenmukaistaminen olisi mahdollista toteuttaa antamalla suosituksia siitä, miten energiankulutustiedot operaattorikohtaisissa katselmuksissa tulisi ryhmitellä eri toimintojen osalta. Myös operaattoreiden suositellaan harkitsevan, miten tietoliikenneverkkoja koskevien tietojen ryhmittely voitaisiin toteuttaa yhdenmukaisella ja tarkoituksenmukaisella tavalla yrityksen energiakatselmukseen.

Energiatehokkuuslain toimeenpanosta ja lakisääteisistä tehtävistä vastaa Energiavirasto eikä siitä aiheudu Viestintävirastolle uusia lakisääteisiä tehtäviä. Yhteistyö viestinnällisissä aihepiireissä saattaa kuitenkin olla hyödyllistä. Yrityksen energiakatselmusraportin tulee sisältää myös tukiasemien energiankulutukset, vaikka niihin ei Energiaviraston mukaan tarvitse välttämättä tehdä tavanomaisia kohdekatselmuksia asetuksen 20/2015 3§ tarkoittamalla tavalla [EVJT15].

## **5. Energiatehokkuuskäsitteen soveltaminen matkaviestinverkkoihin**

Tiedonsiirtoa voidaan pitää yhtenä arvokkaimmista palveluista, mitä sähköenergialla voidaan aikaansaada. Siksi sähkönkulutuksen absoluuttisen määrän rinnalla on tarpeellista miettiä myös sen suhdetta aikaansaatuun palveluun, sen määrään tai palvelun arvoon. Loppupalvelua tai sen arvoa käyttäjälleen ei ole viestintäverkkojen osalta aina yksikertaista määritellä. Tällä aihepiirillä on hyvin olennaista merkitystä päätöksenteossa, mikäli kehitettyjä suhteellistavia indeksejä käytetään vaihtoehtojen vertailuun.

Energiatehokkuus on suhteellinen käsite, jossa toteutunutta tai toteutuvaa energiankulutusta on suhteutettava johonkin olennaiseen suorituskykyä kuvaavaan seikkaan. Siten viestintäverkkojen tapauksessa ja pitkäaikaisen monitoroitavuuden näkökulmasta on pohdittava myös sitä, mihin energiankäyttöä käytännössä verrataan energiategokkuusindeksien muodostamiseksi ja miten kyseinen tieto voidaan kerätä ja miten se pitäisi ryhmitellä.

Yleisin tapa on suhteuttaa sähkönkäyttöä tietyn tarkastelujakson aikana järjestelmällä siirretyn tietoliikenteen määrään. Haasteeksi muodostui operaattorikohtaisten tietoliikennemäärien luottamuksellisuus.

Vaihtoehtoja energiankäytön suhteuttamiseen operatiivisen seurannan kannalta ovat:

- Tiedonsiirron määrä (esim. kWh/gigatavu), tämä on jo käytössä muutamien operaattoreiden omissa seurantajärjestelmissä ja siksi se valittiin tässä hankkeessa ”perusvaihtoehdoksi”.

Muita mahdollisia olisivat:

- Liittymämäärät (tyypeittäin, kWh/kpl,a.)

-Palvelun käyttöaika (palvelukohtainen lähestymistapa, esim. TV-ohjelmien katselu, sähkönkulutuksen suhteutus palvelun käyttöaikaan -> palvelun tarvitsema teho W)

-Palvelusuoritus (palvelukohtainen, kWh/tehtävä tai suoritus)

-Palvelun arvo loppukäyttäjälle (monetarisointi, kWh/eur)

Toistaiseksi osoittautui mahdolliseksi vain suuntaa antavan energiatehokkuusindikaattorin laatiminen "toimialatasolle" Viestintäviraston julkaisemaan kaikkia matkaviestinverkkoja koskevaan liikennemäärädataan suhteutettuna.

Operaattoreilla itsellään on kuitenkin käytännön valmiudet seurata matkaviestinverkkojensa liikennemäärää ja määrittää tarkempia energiatehokkuusindikaattoreita (riippuen niiden käyttämistä tietojen luokittelutavoista sekä tietokannoista). Jopa teknologiatasoa vastaavien indeksien kehittäminen voisi olla mahdollista (3G, LTE). Luvussa 3 koottiin Suomen kolmen suurimman operaattorin sähkönkulutustiedot vuosille 2010-2014. Esimerkinomaisesti suhteutus voidaan tehdä seuraavasti (suora sähkökäyttö suhteessa tietoliikennemäärään):

-Jos oletetaan tuotantoverkon osuudeksi 80% operaattorikohtaisesta kokonaissähkönkulutuksesta ja tukiasemien osuus olisi siitä esim. 57% viitteen [Han11] lähtökohdista, johtaisi se mobiiliverkkojen sähkönkulutusarvioon 437 GWh ja tukiasemien sähkönkulutusarvioksi noin 250 GWh (vuodelle 2013, mikä vastaisi noin 30 MW jatkuvaa tehoa).

-Kun vuonna 2013 Suomen matkaviestinverkoissa siirrettiin Viestintäviraston mukaan tietoa noin 179 petatavua, saataisiin suoran sähkönkulutuksen huomioon ottavaksi energiatehokkuusarvioiksi:

2,4 kWh/Gigatavu koko "tuotantoverkolle" ja  
1,4 kWh/Gigatavu tukiasemien osuudeksi.

-Vastaavasti, jos kokonaissähkönkulutus vuonna 2014 olisi ollut 552 GWh, saataisiin vuoden 2014 mobiiliverkkojen sähkönkulutusarvioksi 441 GWh ja tukiasemien sähkönkulutusarvioksi 252 GWh. Kun vuonna 2014 Suomen matkaviestinverkoissa siirrettiin tietoa 325 petatavua (kuva 1), saadaan energiatehokkuusarvioiksi:

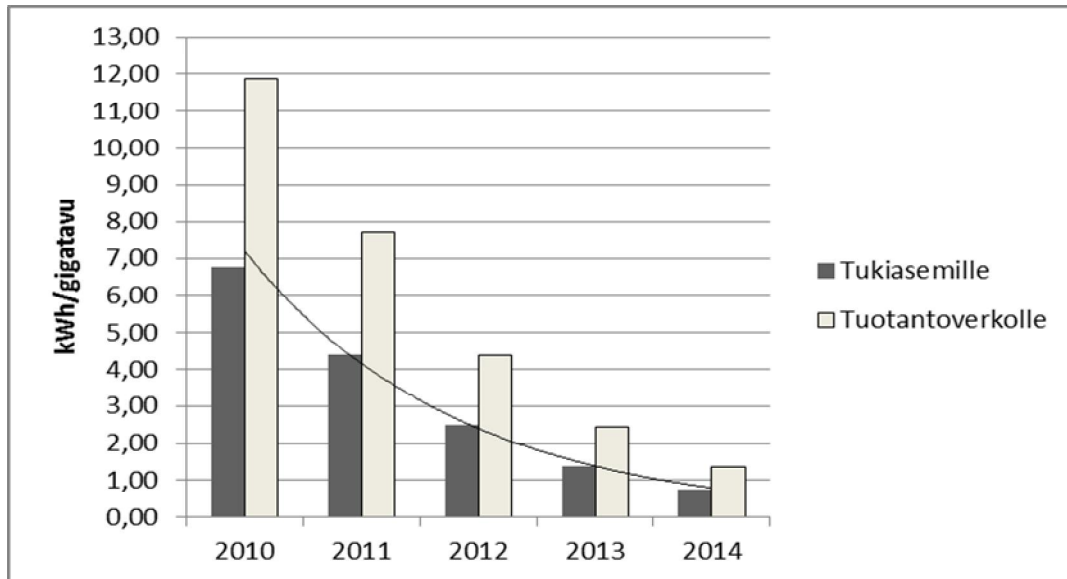
1,36 kWh/GB tuotantoverkolle ja  
0,77 kWh/GB tukiasemille.

Edellä mainittuja arvioita voidaan verrata suuruusluokan näkökulmasta hyvin karkealla tasolla lähteeseen [Malmodin14]:

-Mobiiliverkon tukiasemien sähkönkulutus vuodessa oli 306 GWh. Keskimääräinen tukiaseman (GSM tai 3G, vuonna 2010 ei vielä ollut LTE tukiasemia) sähkönkulutus vuodessa oli 10600 kWh. Liittymää kohden keskimääräinen tukiaseman vuosittainen sähkönkulutus oli 25 kWh. Mobiiliverkon läpi kulkeneeksi datamääräksi arvioitiin 57,6 PB. Tästä saadaan karkeaksi mobiiliverkkojen energiatehokkuusarvioksi 5,3 kWh/GB (Ruotsin tilannetta vuoden 2010 osalta heijastaen, vrt. kuva 7).

Yhdistämällä luvussa 3 esitetyt summatiedot Viestintäviraston liikennemäärätietoihin (kuva 1) voitiin muodostaa alustavat energiatehokkuusindeksit vuosille 2010-2014 seuraavasti (kuva 7).





Kuva 7. Suuntaa-antava mobiiliverkkojen siirtämiin liikennemääriin suhteutettu operaattoreiden vuotuisista sähkökulutustiedoista johdettu energiatehokkuuden parantumiskehitys vuodesta 2010 vuoteen 2014 edellä mainittujen oletusten avulla määritettynä.

Ominais sähkökulutuksen siirrettyä liikennemäärää kohden odotetaan laskevan jatkossakin verkon liikennemäärän kasvaessa nopeasti verkkojen kapasiteettia vastaavaksi ja sähkökulutuksen absoluuttisen tason pysyessä likimäärin ennallaan. Tämän arvon perusteella vuonna 2015 jo selvästi alle yhden kWh:n keskimääräinen kulutus yhden gigatavun suuruista siirrettyä tietoliikennemäärää kohden on todennäköistä. Kuitenkaan ei ole selvää, miten mielekästä erillisten laitteistojen ja järjestelmien summakulutustiedon soveltaminen on esimerkiksi uusien LTE-verkkojen tiedonsiirron energiankulutuksen arvioinnissa esim. videopalveluille, joissa ei hyödynnetä lainkaan hidasta tiedonsiirtoa ja vanhempia verkkoja ja vanhojen tukiasemien laitteistoja. LTE-verkoissa liikennemääriin suhteutettu sähkökulutus on pienempi, mutta suuren osan ajasta dataa ei siirretä läheskään maksimikapasiteetilla.

## 6. Arvioita ja laskelmia mobiiliverkkojen lähitulevaisuuden sähkökulutukselle

Operaattoreiden julkaisemia sähkökulutustietoja yhdistettiin verkostojen kehittymistä ja trendejä koskevaa tietoa, jotta voitaisiin arvioida mobiiliverkkojen sähköntarpeen mahdollisia muutoksia lähitulevaisuudessa vallitsevat teknologiset kehitystrendit huomioon ottaen. Tehtävässä pyrittiin tunnistamaan tukiasemien ja verkkojen sähkönkäyttöön todennäköisesti vaikuttavia kehitystrendejä ja teknologiamuutoksia.

Koska esimerkiksi tukiasemien lähettimien tarkkaa lukumäärää ei toistaiseksi tunneta, eikä pystytä todennäköisesti hankkeen aikana määrittämään, niistä jouduttiin tekemään arvioita oletusten varassa. Viranomaisten saatavilla olevien tukiasemien lukumäärä- ja lähetintietojen oletetaan kuitenkin tarkentuvan lähitulevaisuudessa, joten ”tulevaisuusmallin” päivittäminen tarkempien tietojen saatavuuden parantuessa tulisi olla tehtävissä viraston toimesta. Tätä varten hankkeessa laadittiin Matlab-skripti. Tavoitteena oli kehittää menetelmää joka

mahdollistaisi sen, että mahdollisia/tarvittavia ohjaustoimenpiteitä voitaisiin jatkossa suhteuttaa tähän kehitysarvioon. Tässä vaiheessa kehitystä pyrittiin arvioimaan enintään 10 vuoden aikaperspektiivillä.

## 6.1 Lähitulevaisuuden teknologiset kehitystrendit

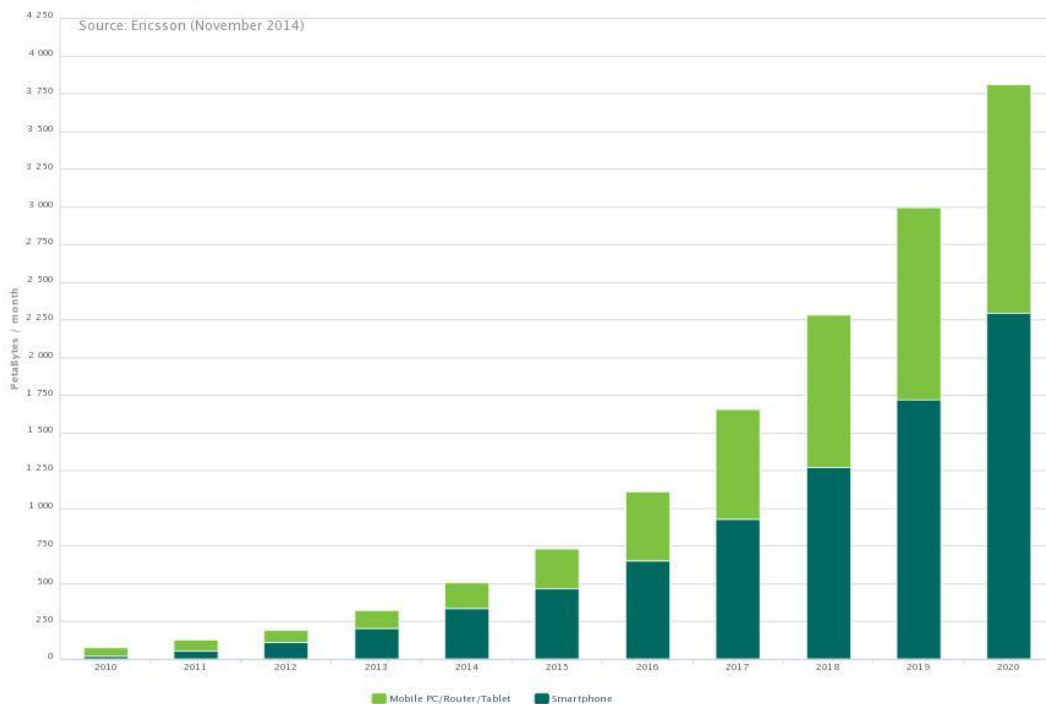
### Lähde [Ericsson14a]:

LTE:n osuus mobiili liittymistä kasvaa vahvasti, vuoden 2014 kolmannella neljänneksellä maailmassa oli jo 350 miljoonaa LTE-liittymää. Vuonna 2020 LTE-liittymiä arvioidaan olevan jo 3.5 miljardia, kun vastaavasti WCDMA/HSPA-liittymiä olisi 4.4 miljardia. Länsi-Euroopassa 65 % liittymistä on WCDMA/HSPA-liittymiä LTE-liittymien osuuden kasvaessa 75 %:iin vuoteen 2020 mennessä. GSM/EDGE-liittymien määrä maailmassa on kääntynyt laskuun. GSM-järjestelmien arvioidaan säilyvän käytössä ainakin vuoteen 2020 asti, koska ne tarjoavat parhaimman peiton harvaan asutuille alueille.

Mobiilidataliikenteen määrä jatkaa voimakasta kasvuaan, kun taas puheliikenteen määrä on jo vuosia pysynyt samalla tasolla. Vuosien 2013 ja 2014 välillä vuosittainen mobiilidataliikenteen kasvu maailmassa oli 60 %. Länsi-Euroopassa mobiilidataliikenteen odotetaan kasvavan 8-kertaiseksi vuosien 2014 ja 2020 välillä kuvan 8 mukaisesti. Dataliikenne kasvaa pääasiassa älypuhelinien yleistymisen ja videopalveluiden suosion kasvamisen takia. Videon osuus kokonaisliikenteestä on tällä hetkellä 45 % ja sen osuuden arvioidaan kasvavan 55 %:iin vuoteen 2020 mennessä.

Data Traffic – Split Per Device

in Mobile PC/Router/Tablet | Smartphone | Feature/Basic Phone



Kuva 8: Dataliikenteen kasvu Länsi-Euroopan mobiiliverkoissa [Ericsson15b].

Laitteiden välisen (M2M) liikenteen mobiiliverkon yli arvioidaan kasvavan tasaisesti lähitulevaisuudessa. Tällä hetkellä sen osuus kaikesta mobiili liikenteestä on vain 0.1 % pääosin siksi, että M2M-liikenteen tiedonsiirtonopeusvaatimukset ovat matalia. M2M-liittymien määrä on tällä hetkellä 230 miljoonaa ja määrän odotetaan nousevan 800 miljoonaan vuoteen 2020 mennessä. Tällä hetkellä M2M-liittymistä 80 % on GSM-liittymiä, mutta 3G/4G-liittymien osuus on kasvussa.

Vaikka LTE-verkkojen lisääntyminen on lähitulevaisuuden selvän trendi, myös HSPA-verkkojen kehitys jatkuu lähivuosina. Tällä hetkellä maailman kaikista HSPA-verkoista 70 % tukevat 21 Mbps:n DL-maksiminopeutta. Olemassa olevia HSPA-verkkoja ollaan parhaillaan päivittämässä tukemaan useampaa kantaaltoa (multicarrier). Vuonna 2014 30 % HSPA-verkoista tuki kahden kantaallon (dual-carrier) lähetystä ja vuonna 2015 otetaan ensimmäiset kolmen kantaallon verkot käyttöön. Nämä parannukset kasvattavat DL-maksiminopeuden 42 ja 63 Mbps:iin.

LTE-verkkojen merkittävimiksi lähivuosien kehitystrendeiksi on tunnistettu kantaaltojen yhdistäminen (carrier aggregation), pienten solujen lisääntyminen sekä broadcast-videon ja puheen siirtäminen (voice over LTE) LTE-verkossa. Kantaaltojen yhdistämisellä saadaan hyödynnettyä epäyhtenäistä taajuusaluetta solujen kapasiteetin kasvattamiseen. Pienillä soluilla saadaan paikallisesti lisättyä kapasiteettia sinne, missä sitä eniten tarvitaan ja toisaalta myös parannettua sisätilojen kuuluvuutta. Broadcast-videon siirtäminen LTE-verkon yli ei ole vielä käytössä Suomessa, mutta sitä pidetään yhtenä potentiaalisena ratkaisuna tarjoamaan televisiopalveluita mobiilikäyttäjille kaupunkialueilla [LVM14]. Puheen siirto LTE-verkossa on jo käytössä 12 operaattorilla pääosin Aasiassa. Suomessa puheliikenne on toistaiseksi palveltu vielä GSM- ja HSPA-verkoilla.

Ensimmäisten 5G-liittymien arvioidaan tulevan markkinoille 2020. Tämänhetkisten tavoitteiden mukaan 5G-verkon tulisi tarjota:

- yli 10 Gbps maksimitiedonsiirtonopeutta,
- alle 1 ms:n päästä-päähän viivettä,
- 1000-kertaista kapasiteetin lisäystä ja
- 1000-kertaista energiatehokkuuden paranemista.

Luonnollisestikaan kaikkia yllämainittuja vaatimuksia ei tarvitse täyttää jokaisessa skenaariossa. Niinpä 5G-verkon tärkein ominaisuus onkin joustavuus ja konfiguroitavuus, jotta erilaisten käyttötilanteiden vaatimukset saadaan täytettyä.

## 6.2 Aiempia mobiiliverkkojen sähkönkulutuksen kehittymisarvioita

### Lähde [Nokia14]:

Lähes kaikki toimijat matkaviestinalalla ovat yksimielisiä siitä, että liikennemäärät tulevat lähitulevaisuudessa kasvamaan ja samalla matkaviestinverkon energiatehokkuus tulee paranemaan. Suuri kysymys onkin, kumpi näistä kasvutrendeistä on voimakkaampi.

Nokian tutkimuksen mukaan uusilla energiatehokkuutta parantavilla ratkaisuilla, tukiasemalaitteiston modernisoinnilla sekä tukiasemien korkeamman kuormituksen kautta on mahdollista saavuttaa 110-kertainen energiatehokkuuden (b/J) paraneminen matkaviestinverkoissa samaan aikaan, kun liikennemäärät kasvavat satakertaiseksi.

Tutkimuksen lähtötilanne vastasi vuotta 2010 ja liikennemäärän oletettiin 100-kertaistuvan 10 vuodessa. Tutkimuksen perusteella lähitulevaisuudessa matkaviestinverkkojen energiankulutus hieman vähenisi.

### Lähde [Frenger13]:

Vodafone ja Ericssonin tutkimuksessa arvioitiin, kuinka energiankulutus kehittyi Vodafone ja Ericssonin verkoissa, kun 2G/3G-tukiasemia modernisoidaan ja samalla uusia LTE-tukiasemia

asennetaan olemassa oleville tukiasemapaikoille. Tutkimuksen perusteella energiankulutusta on mahdollista vähentää 60 %:lla vuoteen 2020 mennessä verrattuna 2012 tilanteeseen. Vaikka uusista LTE-tukiasemista 79 % on pienten solujen tukiasemia, niiden osuus LTE:n kokonaiskulutuksesta on vain 5 %. Vastaavan suuruusluokan arvio pienten solujen energiankulutuksesta on annettu viitteessä [Nokia14]. Tutkimuksen tulokset perustuivat seuraaviin oletuksiin:

- Liikennemäärät kasvavat eniten siellä, missä ne ovat tälläkin hetkellä suurimpia. Liikennemäärien kasvuun vastataan pääosin asentamalla uusia pieniä LTE-soluja.
- Tukiasemien tehonkulutus noudattaa EARTH-projektin oletusarvoja
  - 2010 State-of-the-Art (SoA) tukiasemien [Auer11] asennus aloitetaan vuonna 2012.
  - 2012 State-of-the-Art (SoA) tukiasemien [EARTH23] asennus aloitetaan vuonna 2014.
  - Luvussa 7 esitellyt ratkaisut 1.1, 1.2, 1.3 ja 3.1 ovat käytössä tukiasemissa, joiden asennus aloitetaan vuonna 2016.
  - Muina vuosina asennettavien tukiasemien oletetaan kuluttavan tehoa 8 % vähemmän kuin edellisenä vuonna asennetut tukiasemat.
- Vuosittain 1/8 tukiasemapaikoista päivitetään seuraavasti
  - 2G/3G-tukiasemalaitteisto päivitetään uusiin. Tukiasemien määrää ei lisätä.
  - Kaupungissa sijaitseviin tukiasemapaikkoihin asennetaan yksi kuuluvuuspeittoa tarjoava LTE-makrotukiasema (800 MHz kantataajuus, 10 MHz kaistanleveys), yksi kapasiteettia tarjoava LTE-makrotukiasema (2.6 GHz kantataajuus, 20 MHz kaistanleveys) ja 15 pientä LTE-tukiasemaa (2.6 GHz kantataajuus, 5 MHz kaistanleveys)
  - Lähiöissä sijaitseviin tukiasemapaikkoihin asennetaan yksi kuuluvuuspeittoa tarjoava LTE-makrotukiasema ja 10 pientä LTE-tukiasemaa. Lisäksi 20 % tukiasemapaikkoihin asennetaan yksi kapasiteettia tarjoava LTE-makrotukiasema.
  - Maaseudulla sijaitseviin tukiasemapaikkoihin asennetaan yksi kuuluvuuspeittoa tarjoava LTE-makrotukiasema.

## 6.3 Arvio matkaviestinverkkojen sähkönkulutuksen kehittymiselle Suomessa

### 6.3.1 Liikennemäärän kasvu

Kuvan 8 mukaista mobiilidataliikenteen kasvuarviota Länsi-Euroopassa voidaan verrata Viestintäviraston raportoihin matkaviestinverkoissa siirrettyihin tietomääriin (kuva 1).

Kun Suomen tiedonsiirtomäärät petatavuina syötettiin Matlab-ohjelmiston Curve Fitting – työkaluun, saatiin tiedonsiirtomääräksi puolessa vuodessa petatavuina ajan funktiona  $D_1(x)$

$$D_1(x) = 2.693x^3 - 8.219x^2 + 21.46x + 12.23 \quad (5)$$

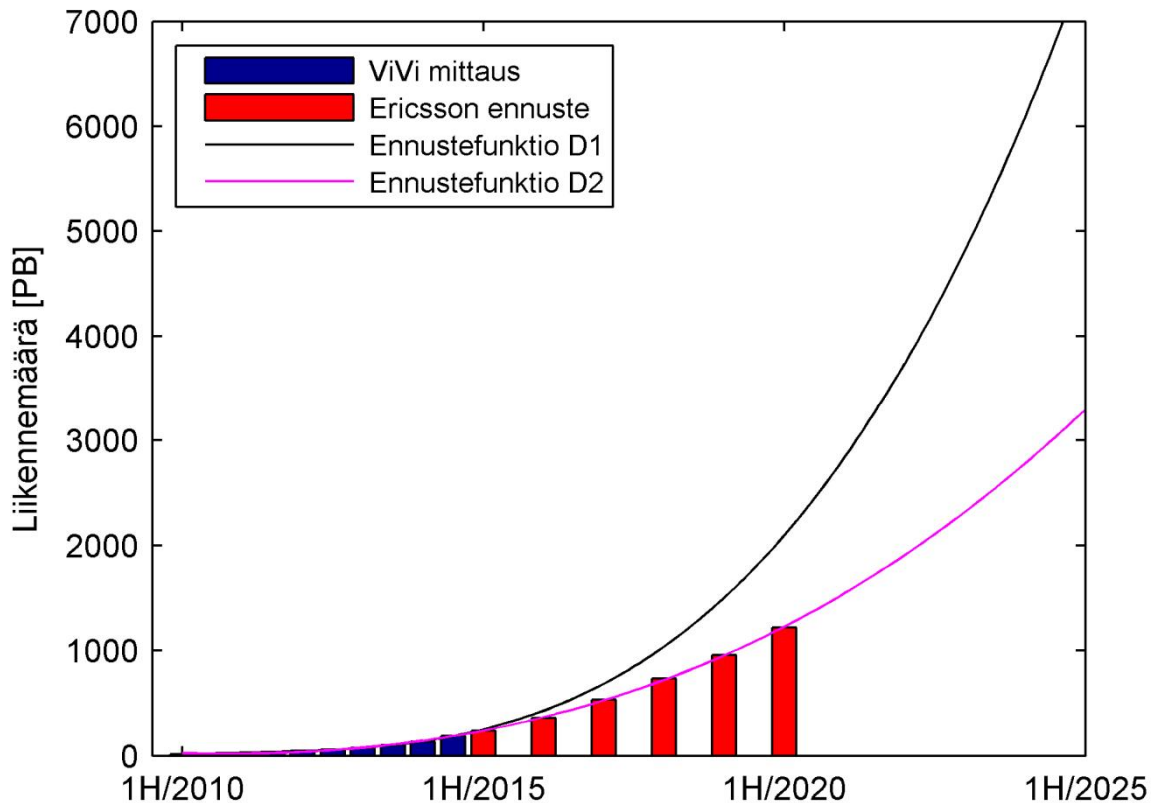
missä  $x$  on aika vuosina siten, että  $x = 0$  vastaa kesäkuun loppua vuonna 2010. Vuoden 2014 jälkeistä kehitystä voidaan karkeasti arvioida käyttämällä hyväksi kuvan 8 arviota.

Jos oletetaan, että Suomen tiedonsiirtomäärien suhteellinen vuosittainen kehitys noudattaa Länsi-Euroopan yleistä trendiä saadaan ennuste vuoteen 2020 asti. Suomen

tiedonsiirtomääristä sekä Länsi-Euroopan trendin mukaisista tiedonsiirtomääristä saadaan käyrän sovituksella tiedonsiirtomääräksi puolessa vuodessa petatavuina ajan funktiona  $D_2(x)$

$$D_2(x) = 0.4068x^3 + 9.365x^2 - 13.99x + 24.46. \quad (6)$$

Viestintäviraston raportoima tiedonsiirtomäärä (kuva 1), kuvan 8 mukainen mobiilidataliikenteen kasvuvarvio suhteutettuna Suomen 1H/2014 lähtötilanteeseen sekä ennustefunktiot ovat esitettyinä samassa kuvassa 9. Kuvan 9 käyriä voidaan toistaiseksi pitää ylä- ja alarajana ennusteelle Suomen matkaviestinverkoissa puolessa vuodessa siirretylle datalle.



Kuva 9: Liikennemääräarvion vaihteluväli suomalaisissa matkaviestinverkoissa siirrettävälle tiedolle puolessa vuodessa.

### 6.3.2 Energiankulutustrendit

Luvussa 3.3. arvioitiin Suomen matkaviestinverkkojen tukiasemien sähköenergiankulutuksen vuodessa olevan 264 GWh vuonna 2011, 263 GWh vuonna 2012, 248 GWh vuonna 2013 ja 252 GWh vuonna 2014. Vuoden 2010 tietoa ei käytetä sen ollessa muita epävarmempi.

Lähteen [Frenger13] kuva 10 mahdollistaa myös matkaviestinverkkojen tukiasemien energiankulutuksen ennustamisen lähitulevaisuudessa olettaen, että energiatehokkuusparannuksia otetaan aktiivisesti käyttöön. Jos oletetaan, että Suomessa vastaavanlainen trendi alkaa vuodesta 2014, jolloin matkaviestinverkkojen energiankulutus oli 252 GWh, saadaan käyrän sovituksella energiankulutukseksi vuonna  $x$   $E_0(x)$

$$E_0(x) = 253.1 \cdot e^{-\left(\frac{x-2014}{9.245}\right)^2}. \quad (7)$$

Luvun 3.3. ja 5 arvion perusteella Suomen matkaviestinverkkojen tukiasemien energiatehokkuus on ollut 4.37 GWh/PB vuonna 2011, 2.56 GWh/PB vuonna 2012, 1.39 GWh/PB vuonna 2013 ja 0.77 GWh/PB vuonna 2014. Nokian arvion mukaan matkaviestinverkkojen energiatehokkuus vuonna 2020 on 110-kertainen verrattuna vuoden 2010 tasoon [Nokia14]. Jos oletetaan, että sama paraneminen tapahtuu myös vuosien 2011 ja 2021 välillä sekä käytetään yllä mainittuja arvoja vuosien 2011-2014 energiatehokkuudelle, saadaan energiatehokkuudelle vuonna  $x$   $\epsilon(x)$  käyrän sovituksella

$$\epsilon(x) = 7.534 \cdot e^{-0.5561x}. \quad (8)$$

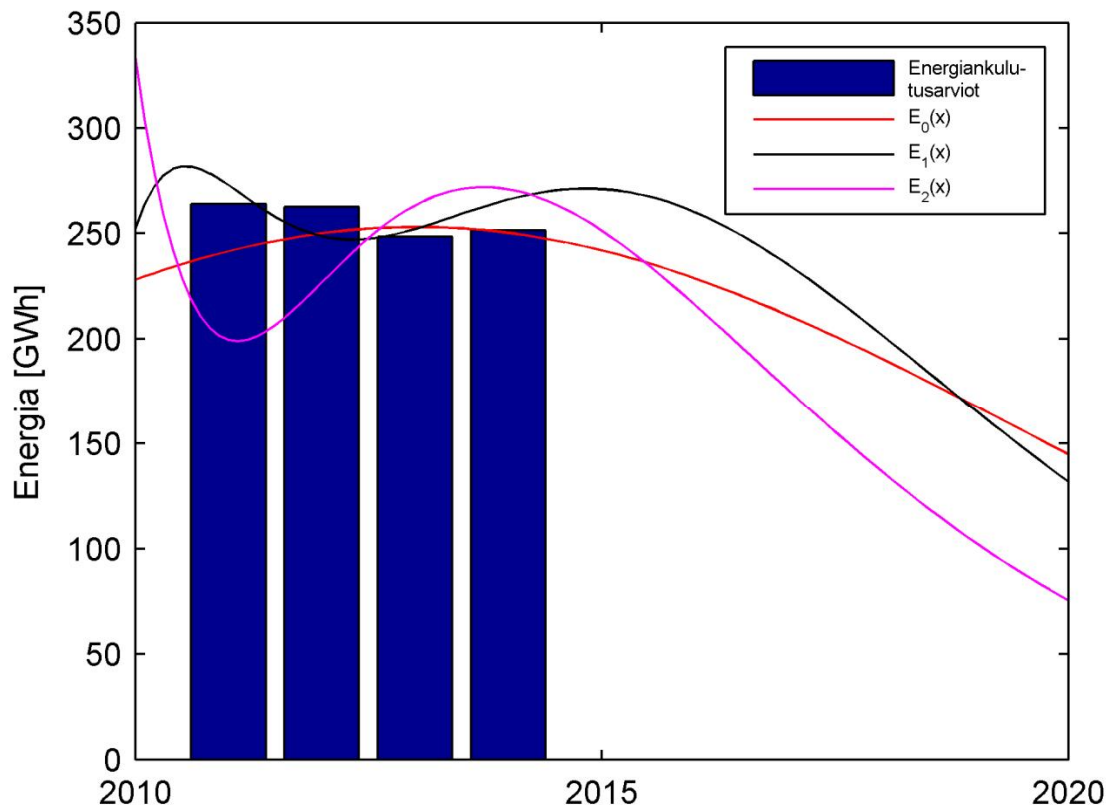
Käyttämällä energiatehokkuusfunktiota, ennustefunktioksi Suomen matkaviestinverkkojen tukiasemissa kuluvalle sähköenergialle vuonna  $x$  saadaan

$$E_i(x) = \epsilon(x) \cdot (D_i(x) + D_i(x + 0.5)). \quad (9)$$

Tässä raportissa esitetyt energiankulutusennusteet on kerätty kuvaan 10.

Kaikki ennusteet antavat hyvin positiivisen kuvan tukiasemien tulevaisuuden energiankulutuksesta. Tämä johtuu siitä, että käytetyissä lähteissä [Frenger13] ja [Nokia14] tukiasemien energiankulutuksen oletetaan pienenevän jatkuvasti voimakkaasti erilaisten energiatehokkuusparannusten ansiosta. Vuonna 2014 rakennettiin uusia LTE-tukiasemia voimakkaasti ja tämä näkyy energiankulutuksen lievänä kasvuna vuoteen 2013 verrattuna. Koska uusien LTE-tukiasemien rakentaminen jatkuu, on odotettavissa, että energiankulutus tulee lähivuosina vielä hieman kasvamaan. Karkealla tasolla voidaan sanoa, että makrotukiasemien lukumäärän kasvu lisää myös energiankulutusta. Niinpä vanhemman teknologian tukiasemien määrää tulisi vähentää tai niitä pitäisi korvata uusilla multiradio-tukiasemilla, jotta ennusteiden mukaiseen laskevaan energiankulutustrendiin päästäisiin.

Ilman aktiivisia toimia tukiasemien energiakulutuksen pienentämiseksi nykyisten tukiasemien energiankulutus kasvaa vain hieman, koska tukiaseman tehonkulutukseen vaikuttaa paljon liikennekuormasta riippumattomia komponentteja. Tämä on nähtävissä luvun 2.3 tehonkulutusmalleissa. Mahdollinen energiankulutuksen kasvu tulevaisuudessa johtuisi siis tukiasemien määrän kasvusta pikemminkin kuin tukiasemien kuormituksen kasvusta liikennemäärien lisääntyessä. Esimerkiksi Ericssonin tuore raportti [Ericsson14b] arvioi, että matkaviestinverkkojen hiilidioksidipäästöt maailmassa kasvaisivat lievästi vuoteen 2020 mennessä. Tästä voidaan päätellä, että tukiasemien lukumäärä varsinkin kehittyvissä maissa tulee tulevaisuudessa edelleen kasvamaan vaikka Suomen tapaisissa maissa matkaviestinverkon energiankulutus pienenesi.



Kuva 10: Ennusteet Suomen matkaviestinverkkojen tukiasemien vuosittain kuluttamasta sähköenergiasta<sup>8</sup>. Ennustefunktiot sisältävät oletuksen, että energiatehokkuusparannuksia otetaan aktiivisesti käyttöön ja vanhoja tukiasemia päivitetään uusiin.

Mallinnus päädyttiin katkaisemaan vuoteen 2020, jota pidemmälle toistaiseksi laadittua matemaattista mallinnusta ei koettu mielekkääksi tarkkojen operaattoritason lähtötietojen puuttuessa. Tukiasemien lukumäärät kasvavat ja vanhoille paikoille lisätään uusia tukiasemia ja laitteistoja. Toimenpiteet, joilla turvattaisiin sitä, että myös käytännössä energiatehokkuustoimia toteutettaisiin systemaattisesti, olisivat edellytys sähkönkulutuksen pysymiselle nykytasolla tai sen maltilliselle alenemiselle.

### 6.3.3 Laskennallinen energiankulutusarviointi

Kuten luvussa 2.3 on mainittu, matkaviestinverkkojen energiankulutusta Suomessa voidaan arvioida myös laskennallisesti. Käytettäessä esimerkiksi EARTH-mallia tukiaseman tehonkulutukselle, parametrien lukumäärä nousee helposti moniin satoihin. Niinpä laskennallisesti järkevintä lienee luokitella tukiasemat noudattaen Taulukon 1

<sup>8</sup> Siniset pylväät vastaavat operaattoreiden ilmoittamista tiedoista tehtyjä energiankulutusarvioita, ennustefunktio  $E_0(x)$  kuvaa lähteen [Frenger13] mukaista trendiä, ennustefunktio  $E_1(x)$  on saatu yhdistämällä kaavan (9) mukaisesti lähteestä [Nokia14] saatu energiatehokkuusennuste  $\epsilon(x)$  ja Suomen tiedonsiirtomääristä saatu ennuste  $D_1(x)$ , ennustefunktio  $E_2(x)$  on saatu yhdistämällä kaavan (9) mukaisesti lähteestä [Nokia14] saatu energiatehokkuusennuste  $\epsilon(x)$  ja Ericssonin tiedonsiirtotrendeistä saatu ennuste  $D_2(x)$ .

lähestymistapaa. Tämän avulla saadaan seuraava kaava matkaviestinverkon tukiasemissa kuluvalle teholle vuonna  $x$   $P_x$

$$P_x = \sum_{t=1}^4 \sum_{y=x-U}^x \sum_{l=1}^3 N_{t,y} \cdot f_{t,l,x} \cdot P_{t,y,l} + N_{s,y} \cdot P_{s,y} \quad (10)$$

missä käytetyt symbolit on määritelty seuraavasti:

- $t$  määrittää käytetyn teknologian siten, että  $t = 1$  vastaa GSM-tukiasemaa,  $t = 2$  HSPA-tukiasemaa,  $t = 3$  GSM+HSPA-tukiasemaa ja  $t = 4$  LTE-tukiasemaa
- $y$  on tukiaseman "vuosimalli" eli asennusvuosi
- $U + 1$  on tukiaseman maksimikäyttöaika vuosina
- $l$  määrittää liikennekuormatason CoC-dokumentin [CoC13b] mukaisesti siten, että  $l = 1$  vastaa matalaa kuormaa,  $l = 2$  kohtalaista kuormaa ja  $l = 3$  korkeaa kuormaa
- $N_{t,y}$  on vuonna  $y$  asennettujen teknologian  $t$  makrotukiasemien lukumäärä
- $f_{t,l,x}$  on keskimääräinen osuus vuodesta  $x$ , jolloin teknologian  $t$  makrotukiaseman kuorma on  $l$
- $P_{t,y,l}$  on vuonna  $y$  asennettujen teknologian  $t$  makrotukiasemien kuluttama keskimääräinen teho, kun kuorma on  $l$
- $N_{s,y}$  on vuonna  $y$  asennettujen pienten solujen tukiasemien lukumäärä. Oletetaan, että kaikki pienet solut toteutetaan LTE-tukiasemilla. Sama oletus on käytössä myös lähteessä [Frenger13].
- $P_{s,y}$  on vuonna  $y$  asennettujen pienten solujen tukiasemien kuluttama keskimääräinen teho. Pienten solujen tukiasemien kuluttama teho on lähes riippumaton liikennekuormasta [Auer11].

Kaavaa 10 voitaisiin tarkentaa lisäämällä siihen tehonkulutukseen vaikuttavia parametreja kuten sektoreiden ja lähettimien lukumäärä sekä kaistanleveys. Tämä kuitenkin merkittävästi lisäisi muuttujien määrää.

Esimerkin vuoksi laskemme karkean arvion matkaviestinverkon tukiasemissa kuluvalle teholle vuosille 2010-2020 käyttäen kaavaa 10 ja "valistuneita arvauksia" muuttujien arvoille. Esimerkkilaskelmassa tehdään seuraavat oletukset:

- 5G-tukiasemat tulevat markkinoille n. 2020, mutta niiden lukumäärä Suomessa tarkasteluvälillä on niin pieni, ettei niitä oteta huomioon arvioissa.
- 1/8 tukiasemista päivitetään vuosittain uuteen vuosimalliin [Frenger13]. Päivittäminen tehdään siten, että vanhimmat tukiasemat päivitetään ensin.
- $U = 7$
- Yhden operaattorin tukiasemien lukumäärä vuoden 2011 ensimmäisellä vuosipuoliskolla on saatavilla [Katsigiannis14]. Koska todellista tietoa kaikkien operaattorien tukiasemien lukumäärästä ei ole saatavilla, käytimme lähteen [Katsigiannis14] tukiasemien lukumäärien suhteita eri teknologioille ja skaalasimme kokonaismäärän siten, että lopullinen tukiasemien kokonaiskulutus 2010-luvun alussa on samalla tasolla kuin energiatilastoihin perustuvat arviot (200-300 GWh). Päivitettyjen tukiasemien lukumääräksi oletettiin



$N_{1,y} = 35, N_{2,y} = 720, N_{3,y} = 1700$ , missä  $y = -7, \dots, 15$ . Niinpä GSM- ja 3G-tukiasemien lukumääräksi oletettiin 20344 ja se pysyy vakiona läpi tarkasteluvälin.

- Oletetaan, että 1000 uutta LTE-makrotukiasemia asennetaan vuosittain vuoteen 2020 saakka,  $N_{4,y} = 1000$ , kun  $1 \leq x \leq 10$ . LTE-tukiasemia ryhdyttäisiin päivittämään uusiin vasta vuonna 2011. Pieniä LTE-tukiasemia asennetaan vuosittain  $N_{s,y} = 10 \cdot N_{4,y}$ .

- Soveltaen luvun 2.4 kuvaan 5 liikenneprofilleille ja lähteen [Katsigiannis14] mukaista tukiasemien määrän jakautumista kaupunkeihin, lähiöihin ja maaseudulle, käytetään seuraavia kuormaosuuksia:

$$f_{1,1,x} = 0.53, f_{1,2,x} = 0.47, f_{1,3,x} = 0; f_{2,1,x} = f_{3,1,x} = f_{4,1,x} = 0.30, f_{2,2,x} = f_{3,2,x} = f_{4,2,x} = 0.49, f_{2,3,x} = f_{3,3,x} = f_{4,3,x} = 0.21$$

- Makrotukiasemien tehonkulutuksen oletetaan noudattavan taulukon 1 mukaista trendiä, josta saatiin käyrän sovituksella

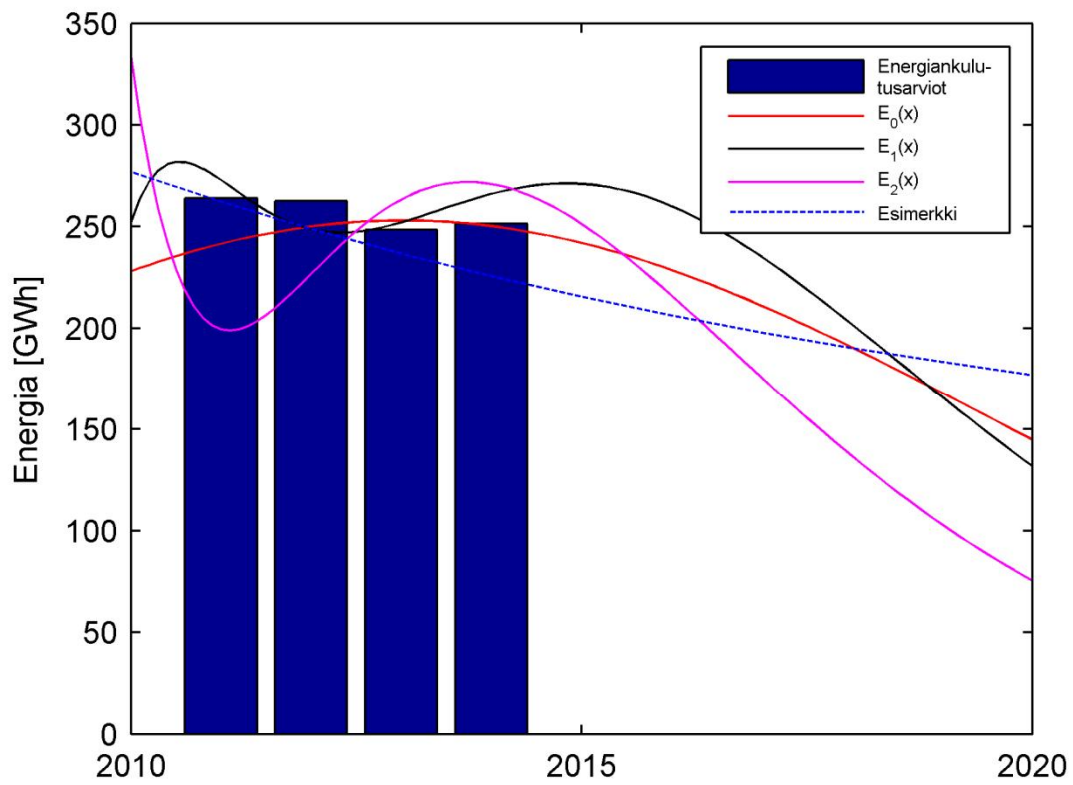
- $P_{1,y,1} = 669.1 \cdot e^{-0.04504y}$
- $P_{1,y,2} = 835.5 \cdot e^{-0.05268y}$
- $P_{1,y,3} = 1073 \cdot e^{-0.07533y}$
- $P_{2,y,1} = 900.3 \cdot e^{-0.1194y}$
- $P_{2,y,2} = 955.5 \cdot e^{-0.09015y}$
- $P_{2,y,3} = 1048 \cdot e^{-0.07181y}$
- $P_{3,y,l} = 1.2 \cdot P_{2,y,l}, l = 1,2,3$
- $P_{4,y,1} = 858.7 \cdot e^{-0.07665y}$
- $P_{4,y,2} = 1192 \cdot e^{-0.1203y}$
- $P_{4,y,3} = 1301 \cdot e^{-0.09762y}$

- Pienten solujen tukiasemien tehonkulutuksen oletetaan olevan  $P_{s,y} = 0.015 \cdot P_{4,3}$

Yllä olevilla parametrioilla saatiin kuvan 11 mukainen esimerkkilaskelma. Esimerkin energiankulutuskäyrä on laskeva, josta voidaan päätellä, että GSM-, HSPA-, ja GSM+HSPA-tukiasemien päivityksen energiasäästö on suurempi kuin uusien LTE-tukiasemien asentamisesta aiheutuva lisäkulutus. Kokeilimme lisäksi, kuinka yksittäisen parametrin muutos vaikuttaa energiankulutustrendiin:

- Tukiaseman käyttöaika vuosina  $U + 1$  liikuttaa käyrää y-akselilla. Eli kun  $U$  kasvaa, energiankulutus kasvaa mutta käyrän laskeva muoto säilyy. Sama vaikutus näkyy myös, kun "vanhojen" (GSM, 3G, GSM+3G) tukiasemien kokonaismäärää kasvatetaan.
- Kun vuosittain asennettavien uusien LTE-makrotukiasemien lukumäärä kasvatetaan riittävän suureksi ( $N_{4,y} > 2500$ ), energiankulutuksen trendi kääntyy nousevaksi.
- Pienten solujen tukiasemien osuus muuttaa energiankulutustrendin nousevaksi, mikäli niiden lukumäärä tai tehonkulutus kymmenkertaistuu ( $N_{s,y} > 100 \cdot N_{4,y}$  tai  $P_{s,y} > 0.15 \cdot P_{4,3}$ ).

Parametrien suuri määrä estää niiden muutosten yhteisvaikutusten tarkemman analysoinnin. Niinpä esimerkkilaskelmaa voidaan pitää vain suuntaa-antavana, jota olisi syytä tarkentaa yhteistyössä operaattoreiden kanssa.



Kuva 11: Ennusteet Suomen matkaviestinverkkojen tukiasemien vuosittain kuluttamasta sähköenergiasta (mukana laskennallinen esimerkki sinisellä katkoviivalla).

## 7. Lupaavimmat energiatehokkuutta parantavat ratkaisut

Energiatehokkuuden parantaminen matkaviestinverkoissa on noussut viimeisten viiden vuoden ajan yhdeksi tärkeimmistä teemoista langattoman tietoliikenteen tutkimuksessa. Tässä luvussa käydään läpi lupaavimpia ehdotettuja menetelmiä ja toimenpiteitä, joilla tukiasemien energiatehokkuutta voitaisiin parantaa lähitulevaisuudessa. Koska painopiste on lähitulevaisuudessa, painotamme erityisesti ratkaisuja, joita voitaisiin soveltaa LTE- ja LTE-Advanced-järjestelmissä. Menetelmät ja toimenpiteet ovat jaoteltu komponentti-, laite-, solu- ja verkko-tasolle. Komponenttitason ratkaisuilla tarkoitetaan uusia innovaatioita, joilla tukiaseman merkittävimpiä komponentteja saadaan toimivaan energiatehokkaammin. Laitetason ratkaisut sisältävät mm. tukiaseman laitteiden sijoittelun ja niiden toiminnan optimoinnin. Solutasolla energiatehokkuutta parantavat ratkaisut liittyvät usein radioresurssien hallintaan. Verkkotasolla tukiasemien sijainnin ja määrän suunnittelulla sekä kuorman hallinnalla (load balancing) voidaan usein vaikuttaa merkittävästi matkaviestinjärjestelmän energiatehokkuuteen. Ratkaisujen esittelyn yhteydessä on esitetty teknologian valmiusaste.

### 7.1 Komponenttitason ratkaisut

Ratkaisun kuvaus	Sovellusalue	Ilmoitettu vaikutus energiatehokkuuteen	Teknologinen valmiusaste
<b>1.1</b> RF-signaalinkäsittelyn lyhyen aikavälin deaktivointi/aktivointi [EARTH43]	Makrosolujen tukiasemat matalalla liikennekuormalla	38 % pienennys RF-signaalinkäsittelyn tehonkulutukseen, kun tukiasemasta ei lähetystä.	Osana makrotukiaseman lähetin-vastaanottimen prototyyppiä vuonna 2012.
<b>1.2</b> Tehovahvistimen maksimiulostulotehon adaptointi ja aktivointi/deaktivointi [EARTH43]	Tukiasemat kohtalaisella ja matalalla liikennekuormalla	Makrosolun tehovahvistimen tehonkulutus pienenee 6-35 %. Pienten solujen tehovahvistimen tehonkulutus pienenee 14-55 %.	Osana makrotukiaseman ja pienen solun lähetin-vastaanottimen prototyyppiä vuonna 2012.
<b>1.3</b> RF-signaalinkäsittelyn tehonkulutuksen adaptointi liikennekuorman mukaan [EARTH43]	Pienten solujen tukiasemat kohtalaisella ja matalalla liikennekuormalla	RF-signaalinkäsittelyn tehonkulutus pienenee 0-58 %.	Osana pienen solun tukiaseman lähetin-vastaanottimen prototyyppiä vuonna 2012.
<b>1.4</b> Matalahäviöinen antennirajapinta [Bories11]	Pienten solujen tukiasemat	Tehovahvistimen ulostulotehoa voidaan pienentää 1.5 dB. => Tehovahvistimen tehonkulutus pienenee.	Osana pienen solun tukiaseman lähetin-vastaanottimen prototyyppiä

			vuonna 2012. [EARTH43]
<b>1.5</b> Nykyistä paremman hyötysuhteen tehovahvistimet, esim. signaalin verhoikäyrää seuraavat (envelope tracking) vahvistimet [Nokia14]	Kaikki tukiasemat	Tehovahvistimien hyötysuhteen arvioidaan parantuvan n. 30 %:sta 45 %:iin lähivuosina [Nokia14]. Käyttäen EARTH-tehonkulutusmallia [Holtkamp13] ja – liikenneprofiilia [Ambrosy12] käyttäen, voidaan tukiaseman kokonaistehonsäästön olevan 5 – 10 % luokkaa.	Signaalin verhoikäyrää seuraavat vahvistimet ovat käytössä jo uusimmissa terminaaleissa, tukiasemiin niitä voidaan odottaa lähivuosina [Talbot14].

## 7.2 Laitetason ratkaisut

Ratkaisun kuvaus	Sovellusalue	Ilmoitettu vaikutus energiatehokkuuteen	Teknologinen valmiusaste
<b>2.1</b> Uudelleen konfiguroitavat antennit, solukohtainen keilanmuodostus [Cardoso13].	Makrosolujen tukiasemat	8 % pienennys mobiiliverkon tehonkulutukseen, joka on seurausta lähetystehon pienentämisestä.	Tuettuna uusimmissa aktiiviantenneihin perustuvissa tukiasemissa [Nokia13].
<b>2.2</b> Pienikokoiset, lähelle antennejä sijoitettavat tukiasemat [Nokia14], [Frenger14a].	Makro- ja mikrosolut	Tukiasema ei tarvitse ilmastointia ja kaapeloinnin häviöt pienenevät. Näistä seuraa tukiaseman tehonkulutuksen pieneminen.	Valmiina operaattoreiden käyttöön [Nokia12]. Suomessa DNA on julkisesti ilmoittanut saaneensa energiasäästöjä tämän ratkaisun käytöstä [DNA15].
<b>2.3</b> Saman RF-signaalinkäsittely-yksikön käyttäminen usealle sektorille [Frenger14a].	Matalan kuorman 3G-tukiasemat	Jopa 40 % pienennys tukiaseman tehonkulutukseen.	Käytössä jo 3G-verkoissa. Ratkaisun mahdollistaminen myös LTE-tukiasemille suunnitteilla [Ericsson15].
<b>2.4</b> Saman tehovahvistimen käyttäminen eri teknologioille (3G/LTE, GSM/LTE) [Frenger14b].	Montaa teknologiaa tukevat (multi-radio) tukiasemat.	Jopa 40 % pienennys tukiaseman tehonkulutukseen.	Valmiina operaattoreiden käyttöön [Nokia11].

### 7.3 Solutason ratkaisut

Ratkaisun kuvaus	Sovellusalue	Ilmoitettu vaikutus energiatehokkuuteen	Teknologinen valmiusaste
<p><b>3.1</b> Epäjatkuva lähetys (DTX) [Frenger11]. Lähetettävien referenssisignaalien vähentäminen, joka mahdollistaa tukiaseman lyhytkestoiset virransäästötilat, kun hyötysignaalia ei lähetetä.</p>	<p>Matalan liikennekuorman tukiasemat</p>	<p>15-30 % parannus koko tukiaseman energiatehokkuuteen [EARTH43]. Parannuksen suuruus riippuu liikennekuormasta ja tukiaseman laitteiston valmiudesta lyhyen aikavälin deaktivointiin.</p>	<p>Yksi DTX:n varianteista (MBSFN subframes) ei vaadi standardimuutoksia [TR36927] ja lienee jo lähitulevaisuudessa käytössä tukiasemissa.</p> <p>LTE-Advancedin Release 12 (standardi valmis 03/2015) sisältää tuen pienten solujen epäyhtenäiselle lähetykselle. [Release12]</p>
<p><b>3.2</b> Kaistanleveyden adaptointi kuorman mukaan [Ambrosy12]</p>	<p>Kohtalaisen ja matalan kuorman tukiasemat, joissa ratkaisu 1.2 on käytössä</p>	<p>20-25 % parannus koko tukiaseman energiatehokkuuteen.</p>	<p>Toteutus mahdollista, kun ratkaisu 1.2 valmiina.</p>
<p><b>3.3</b> Adaptiivinen käyttäjäkohtainen keilanmuodostus [Cardoso13].</p>	<p>Tukiasemat soluille, joiden käyttäjät ovat hitaasti liikkuvia.</p>	<p>2.5-7.5 % parannus koko tukiaseman energiatehokkuuteen, joka on seurausta lähetyksen pienentämisestä.</p>	<p>Tuettuna LTE ja LTE-Advanced –standardeissa, joten lienee jo käytössä uusimmissa tukiasemissa.</p>
<p><b>3.4</b> Antennien mykistäminen [Skillermark12]. Lähetin-vastaanottimien sulkeminen, kun tiedonsiirtotarve on vähäistä.</p>	<p>Kohtalaisen ja matalan liikennekuorman tukiasemat</p>	<p>7-45 % pienennys koko tukiaseman tehonkulutukseen.</p>	<p>Yhteensopiva LTE-standardin kanssa. Voidaan ottaa käyttöön, kun ratkaisut 1.1 ja 1.2 valmiina.</p>

### 7.4 Verkkotason ratkaisut

Ratkaisun kuvaus	Sovellusalue	Ilmoitettu vaikutus energiatehokkuuteen	Teknologinen valmiusaste
<p><b>4.1</b> Tukiasematiheyden optimointi energiatehokkuuden</p>	<p>Makrosoluista koostuva verkko</p>	<p>Kaupunkialueiden makrosolutiheys on tyypillisesti ylimitoitettu. Energiatehokkuuden</p>	<p>Voidaan ottaa käyttöön uusien tukiasemien sijainteja</p>

kannalta [EARTHHD33].		parannus riippuu tilanteesta, johon verrataan.	suunnitellessa.
<b>4.2</b> Toistimien (relay node) lisääminen makrosolujen alueelle [Fantini11].	Korkean liikennekuorman makrosolut	20 – 30 % parannus kokonaisenergiatehokkuuteen [EARTHHD33].	Toistimet laajemmin tuettuna LTE-A standardissa, joten voidaan ottaa käyttöön LTE-A verkkojen käyttöönoton yhteydessä.
<b>4.3</b> Tukiasemien dynaaminen sektorointi [Hevizi11].	Makrosolujen tukiasemat	29 – 65 % parannus kokonaisenergiatehokkuuteen [EARTHHD33]	Voidaan ottaa käyttöön, kun tukiasemat tukevat ratkaisua 2.1. Tulokset toistaiseksi varmennettu ainoastaan verkkosimulaatioilla .
<b>4.4</b> Solujen deaktivointi/aktivointi (deep sleep modes) [TR36927], [Oh13].	Matalan ja kohtalaisen kuorman matkaviestinverkot	25 – 40 % parannus kokonaisenergiatehokkuuteen [EARTHHD33]	Tulokset toistaiseksi varmennettu ainoastaan verkkosimulaatioilla . Kenttätestejä suunnitteilla.
<b>4.5</b> Solujen lähetystehtojen minimointi [R3-130669]	Kuuluvuuspeittoa tarjoavien solujen tukiasemat	4 – 22 % kokonaisenergian säästö [TR36887]	Tukiasemien välinen signalointi vaatii tuen LTE-A standardiin.
<b>4.6</b> Kuuluvuusalueeltaan päällekkäisten solujen deaktivointi/aktivointi yhteistyössä eri operaattoreiden välillä [Marsan11].	Matalan ja kohtalaisen kuorman matkaviestinverkot	Yli 20 % kokonaisenergian säästö	Voitaisiin teknisesti toteuttaa roaming-tekniikoin. Käytännössä vaatisi operaattoreiden halun yhteistyöhön sekä reilun käyttäjä- ja energiahinnoittelun .
<b>4.7</b> Kontrolli- ja käyttäjäliikenteen jakaminen erillisiin soluihin [Xu13]. Tämä mahdollistaa käyttäjäliikennettä tarjoavien solujen	Matalan ja kohtalaisen kuorman heterogeeniset verkot, joissa makrosolut huolehtivat	Yli 33 % kokonaisenergian säästö	Tuki kahteen tukiasemaan liittymiseen (dual connectivity) on mukana LTE-A Release 12:ssa.

joustavan aktivoinnin/deaktivoinnin.	kontrolliliikenteestä (kuuluvuudesta) ja pienet solut käyttäjäliikenteestä (kapasiteetista).		[TS36300].
--------------------------------------	--	--	------------

## 8. Yhteenveto tuloksista ja johtopäätelmät

Työssä selvitettiin Liikenne- ja viestintäministeriön Vihreän ICT:n ohjelman lähtökohdista matkaviestinverkkojen energiantarpeita kolme suurinta operaattoria kattaen sekä kartoitettiin energiankäyttöä ja sen tehostamismahdollisuuksia erityisesti tukiasemien osalta julkisia tietolähteitä hyödyntäen. Työssä muodostettiin alustava arvio kolmen suurimman operaattorin nykyisestä sähkönkulutuksesta ja energiatehokkuudesta sekä mallinnettiin sähköntarpeen kehittymistä lähitulevaisuudessa. Raportissa on myös esitetty viestintäverkkojen laitteille esitetyt vapaaehtoisen energiatehokkuustavoitteet (CoC, Code of Conduct), kuvattu sähkönkulutuksen jakautumista tukiaseman laitteistoissa sekä tarkasteltu muutamissa tutkimushankkeissa käytettyjä tehonkulutusmalleja sekä esitelty ratkaisumalleja, joilla energiatehokkuutta voitaisiin mahdollisesti parantaa.

Viestintäviraston seurantatietojen mukaisesti matkaviestinverkon tiedonsiirtomäärä on kasvanut 2010 luvulla vuosittain 70-82% ja nykytason (325 000 teratavua/a) odotetaan lähes kaksinkertaistuvan vuosittain mm. erilaisten videopalveluiden käytön lisääntyessä mobiililaitteissa. Toisaalta kolmen suurimman operaattorin raportoimien tietojen perusteella niiden Suomen toimintojen kokonaissähkönkulutus oli vuosina 2011-2014 laskenut ollen noin 0,55 TWh/a, josta tukiasemien laitteistojen osuuden arvioidaan olevan merkittävä eli suuruusluokaltaan lähes puolet (0,25 TWh/a). Siirrettyä gigatavua kohden lasketun energiatehokkuuden arvioidaan parantuvan lähivuosina merkittävästi rakenteilla olevien LTE-verkkojen tukiasemien liikennekuormien kasvaessa ja kapasiteetin käyttöasteen parantuessa. Operaattorit ovat toistaiseksi kyenneet tehostamaan suoraa sähköenergian käyttöään vuosina 2011-2014 vapaaehtoisin toimin vaikka samalla tiedonsiirron määrä on samalla kasvanut erittäin merkittävästi.

Matkaviestinverkkojen sähköntarpeen arviointia mallinnuksen keinoin vaikeutti se, että tukiasemien määrät (teknologioittain) ja mallien parametrisoinnissa tarvittavat tiedot eivät olleet julkisina saatavilla.

Työssä demonstroitettiin kuitenkin menetelmää, jossa keskeisimmille parametreille asetettiin oletusarvot ja kehitetyn mallin avulla laskettiin arvio energiankäytölle vuoteen 2020 (vain nk. suora sähkönkäyttö mukana). Alustava mallilaskelma viittasi mobiiliverkkojen kokonaissähkönkäytön osalta laskevaan trendiin sekä mittakaavaltaan jopa noin 30% vähenemään vuoteen 2020 mennessä. Käytännössä ei ole kuitenkaan selvää, miten laajasti energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä otetaan käytännössä käyttöön, joten myös siltä osin alustava arvio sisältää merkittävää epävarmuutta.

Kehitettyä mallia olisi mahdollista täsmentää keräämällä operaattoriyhteistyön avulla nyt käytettävissä olleita tietoja tarkempia tietoja mallin parametrisoimiseksi. Energiakulutuksen luotettavaa arvioimista varten tarvitaan lukuisia parametreja ja operaattoriyhteistyöstä olisi tässä merkittävää hyötyä. Yhteistyö voisi myös auttaa löytämään energiatehokkaampia ratkaisuja sekä edistää niiden käyttöönottoa.

Erityisesti vuoden 2014 laskenta uusimpien tarkennettujen tietojen avulla olisi suositeltavaa LTE-verkkojen laajamittaisen rakentamisen ollessa loppusuoralla ja toisaalta videopalveluiden käytön lisääntyessä mobiililaitteissa.

Raportin loppuun on koottu tietoja viitatuissa tutkimuksissa havaituista energiatehokkuutta parantavista ratkaisuista komponenttitasolla, laitetasolla, verkkotasolla sekä arvioitu niiden sovellusalueita, vaikuttavuutta ja teknologian valmiusastetta.

Kuvattujen ratkaisujen, aihepiirin tärkeimpien tutkimusprojektien tulosten ([EARTHHD64], [GreenTouch13]) ja tukiasemavalmistajien arvioiden ([Nokia14], [Frenger14a]) perusteella voidaan todeta, että energiatehokkuuden merkittävä parantaminen lähitulevaisuudessa on mahdollista (luku 7). Tällä hetkellä suurin osa tukiasemista on kapasiteetin suhteen reilusti ylimitoitettu ja ns. kiiretunninkin liikennekuorma on kaukana tukiasemien maksimikapasiteetista [Ambrosy12]. Koska vain osa tukiasemien tehonkulutuksesta skaalautuu liikennekuorman mukaan, tukiasema toimii sitä energiatehokkaammin mitä korkeampi liikennekuorma on. Jos uusia tukiasemia ei merkittävästi lisätä liikennemäärien kasvaessa, matkaviestinverkkojen energiatehokkuus paranee ”automaattisesti”, kun tukiasemien kuormitustasot nousevat. Yleistäen voidaan todeta, että perinteinen tukiasema on tyypillisesti sitä energiatehokkaampi mitä enemmän se välittää dataa.

Nykytilanteeseen verrattuna suurimmat energiatehokkuusparannukset saadaan, kun verkon ja tukiasemien toimintaa optimoidaan kuorman ollessa matala tai kohtalainen. Matalan kuorman aikaan tukiasemia voidaan väliaikaisesti sulkea tai laittaa syvään virransäästötilaan (deep sleep mode) ja suljettujen solujen käyttäjät saadaan siirrettyä toisiin soluihin (Ratkaisu 4.4). Tukiasemien syvän virransäästötilan käyttöönottoa saattaa hidastaa sekä lainsäädäntö (häätäpuheluja ei saa vaarantaa) että huoli palvelunlaadun heikkenemisestä. Tärkeää onkin, että verkkojen jatkuva toiminta on taattu siten, että palvelutarpeen ollessa pieni liikenne siirretään toisille tukiasemille, jotka mahdollistavat päällekkäisen peittoalueen. Näin ollen virransäästötilat on helpointa ottaa käyttöön sulkemalla ajoittain pieniä tukiasemia, jotka on otettu käyttöön tarjoamaan lisäkapasiteettia makrosolujen alueelle ruuhka-aikana.

Koska Suomen kolmen suurimman operaattorin kuuluvuusalueet ovat käytännössä lähes päällekkäisiä, huomattavaa energiatehokkuusparannusta voitaisiin saada myös operaattoreiden välisellä yhteistyöllä (Ratkaisu 4.6) varsinkin harvaan asutuilla alueilla. Suomen Yhteisverkko Oy on perustettu toteuttamaan tulevaisuudessa verkkoyhteistyötä Pohjois- ja Itä-Suomessa. Lisäparannuksia saadaan sulkemalla matalan kuorman sektoreita (Ratkaisu 4.3), sulkemalla tarpeettomia antennejä (Ratkaisu 3.4) ja lyhyen aikavälin virransäästötiloilla (Ratkaisut 3.1, 1.1 ja 1.2). EARTH-projektin lopuksi on arvioitu, että yhdistämällä Ratkaisut 1.1, 1.2, 1.3, 3.1, 3.4 ja 4.3 tyypillisessä maanlaajuisessa verkossa saavutetaan 75 % energiankulutussäästö verrattuna tavalliseen LTE-verkkoon [Fallgren13].

Kun solussa on korkea liikennekuorma, tehokkaimmiksi ratkaisuiksi arvioidaan korkeamman hyötysuhteen tehovahvistimet (Ratkaisu 1.5), kaapelihäviöiden ja jäähtymisen minimointi (Ratkaisu 2.2) sekä solukohtainen keilanmuodostus uudelleen konfiguroitavilla antenneilla (Ratkaisu 2.1).

Yhtenä tärkeimmistä tekijöistä mahdollistamaan tulevaisuudessa merkittävästi kasvavat liikennemäärät pidetään pienten solujen lisäämistä olemassa olevien makrosolujen alueelle. Ilman virransäästöominaisuuksia (Ratkaisu 4.4) pelkkä pienten solujen määrän kasvu lisää energiankulutusta vaikka varsinainen energiatehokkuus paranisikin lisääntyneen tiedonsiirron myötä [Frenger14a]. Energiankulutus voidaan saada pieneneväksi, kun makrosolut välittävät kontrolliliikenteen ja pienet solut pääosan käyttäjäliikenteestä (Ratkaisu 4.7). Niinpä voidaan väittää, että pienten tukiasemien eriaisteiset virransäästötilat ovat olennainen osa energiatehokasta heterogeenista verkkokonseptia.

Johtopäätelmänä voidaan todeta, että energiatehokkuuden parantamiseen on suurimmat mahdollisuudet silloin, kun liikenteen määrä on pieni tai kohtalainen (nukkuminen, resurssien



uudelleenjakaminen). Lisäksi tuodaan esiin, että mobiiliverkot ovat toistaiseksi aika vahvasti ylimitoitettuja (jopa liikaa tukiasemia) eikä maksimi kapasiteettia tyypillisesti ole käytetty (arvio perustuu kv. EARTH-projektiin eikä sellaisenaan välttämättä kuvaa Suomen nykyistä tilannetta). Energiankulutus ei ole aiemmin ollut keskeisenä kriteerinä verkkosuunnittelussa ja tämä on osaltaan saattanut aiheuttaa jonkinasteista ylimitoitusta. Tilanteen odotetaan muuttuvan tältä osin lähivuosina. Myös aihepiirin tutkimuskirjallisuudesta on löytynyt useita optimistisia arvioita energiatehokkuuden kehittymiselle vuoteen 2020 saakka.

Digitaalisen prosessoinnin tehokkuuden hidastuminen voi kuitenkin vaikuttaa kehitykseen 2020-luvulla, koska digitaalisen prosessoinnin osuus tukiaseman kulutuksesta kasvaa pienissä soluissa [Markov14].

Energiatehokkuuslain piiriin 2015 tulleet operaattorit ovat toteuttaneet erityyppisiä energiatehokkuus- ja raportointitoimia (mm. CDP-raportointi) vapaaehtoisesti energiatehokkuustoimistaan ja asiaan on kiinnitetty viimevuosina kasvavasti huomiota. Valmiudet konsernitason energiakatselmuksen suorittamiseksi 2015 aikana ovat olemassa.

Vuotuisen tai hieman harvemmin toteutettavan tietoliikennemääriin suhteutetun energiatehokkuusseurannan järjestäminen kustannustehokkaasti olisi jatkossa mahdollista energia- ja viestintävirastojen keräämiä viranomaistietoja yhdistämällä. Viestintävirasto julkaisee mobiiliverkkojen liikennemäärätiedot vuosittain summatietona kaikkien operaattoreiden osalta. Energiavirastolla on puolestaan mahdollisuus saada operaattoreilta vuoden 2015 aikana yrityksen energiakatselmusraportit, joissa tulee olla sähkökäyttötiedot. Mikäli tiedot tuotettaisiin jatkossa tarkoituksenmukaisesti ryhmiteltynä ja yhdenmukaisia periaatteita käyttäen energiatehokkuuden seurantaindikaattoreiden rakentaminen voisi olla toteutettavissa viranomaisyhteistyönä ilman lisätietojen keräämistä ja hyvin vähäisin lisäkustannuksin eri osapuolille.

Ensimmäisten energiakatselmusten sisältämien tietojen arvioidaan täsmentävän tässä raportissa julkaistavia tietoja sekä mahdollistavan viranomaisyhteistyönä tapahtuvan energiaseurannan toimialakohtaisesti. Myös toimintokohtainen raportointi mahdollistuisi raportoitavia tietokokonaisuuksia yhdenmukaistamalla kaikki eri operaattorit kattaen. Yhdenmukaistaminen olisi mahdollista toteuttaa antamalla suosituksia siitä, miten energiankulutustiedot operaattorikohtaisissa katselmuksissa tulisi ryhmitellä eri toimintojen osalta. Myös operaattoreiden suositellaan harkitsevan, miten tietoliikenneverkkoja koskevien energiatietojen ryhmittely voitaisiin toteuttaa yhdenmukaisella ja tarkoituksenmukaisella tavalla yrityksen energiakatselmukseen ja samalla yhtiöiden omiin raportointijärjestelmiin.

Uusien teknologioiden (mm. 5G) kehittämisen kannalta energiatehokkuus on hyvin tärkeä aihepiiri. Esiin nousee kysymys siitä, voitaisiinko Suomeen kehittää kansainväliset vaatimukset täyttävä testausympäristö matkaviestinverkkojen laitteistojen ja palveluidenkin energiatehokkuuden tutkimiseksi kokeiluverkossa.

Tiedostettuaan toimialan suhteellisen suuren sähkönsäästöpotentialin ja jatkamalla energiatehokkuustoimien käyttöönottoa operaattorit saattavat kyetä pitämään lähivuosien sähkön kulutuksensa nykytasolla tai vähentämään sitä tietoliikenteen määrän erittäin nopeasta kasvusta huolimatta.

## Lähdeviitteet

---

- [Ambrosy12] A. Ambrosy, M. Wilhelm, W. Wajda, and O. Blume, "Dynamic bandwidth management for energy savings in wireless base stations," in Proc. IEEE GLOBECOM, Anaheim, CA, Dec. 2012, pp. 3502-3507.
- [Arnold10] O. Arnold, F. Richter, G. Fettweis, and O. Blume, "Power consumption modelling of different base station types in heterogeneous cellular networks," in Proc. Future Network and Mobile Summit, Florence, Italy, Jun. 2010.
- [Auer11] G. Auer et al., "How much energy is needed to run a wireless network?," IEEE Wireless Commun., vol. 18, no. 5, pp. 40-49, Oct. 2011.
- [Bories11] S. Bories, L. Dussopt, A. Giry, and C. Delaveaud, "Duplexer-less RF front-end for LTE pico-cell using a dual polarization antenna," in Proc. European Wireless, Vienna, Austria, Apr. 2011, pp. 729-731.
- [Cardoso13] F. D. Cardoso, L. M. Correia, S. Petersson, and M. Boldi, "Beamforming strategies for energy efficient transmission in LTE," in Proc. IEEE VTC Spring, Dresden, Germany, Jun. 2013.
- [CDP15] Carbon Disclosure Project -raportointijärjestelmä: <https://www.cdp.net/en-US/Pages/HomePage.aspx>
- [CoC13a] Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, Renewable Energy Unit, V4.1, 2013.
- [CoC13b] Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, Renewable Energy Unit, V5.0, 2013.
- [Correia10] L. M. Correia et al., "Challenges and enabling technologies for energy aware mobile radio networks," IEEE Commun. Mag., vol. 48, no. 11, pp. 66-72, Nov. 2010.
- [Chen11] Chen T. et al., Network Energy Saving technologies for Green Wireless Access Networks. IEEE Wireless Communications, Oct 2011.
- [Deruyck13] M. Deruyck, W. Joseph, B. Lannoo, D. Colle, and L. Martens, "Designing energy-efficient wireless access networks: LTE and LTE-Advanced," IEEE Internet Comput., vol. 17, no. 5, pp. 39-45, Sep. 2013.
- [Deruyck14] M. Deruyck, W. Joseph, and L. Martens, "Power consumption model for macrocell and microcell base stations," Trans. Emerging Tel. Tech., vol. 25, no. 3, pp. 320-333, Mar. 2014.
- [DNA15] DNA Oy:n web-sivut (2015, Jan.) Energiatohokkuus. [Online]. <https://www.dna.fi/dna-oy/energiatohokkuus>
- [DNA15b] DNA:n verkkovuositiedote 2014. Taulukko EN3 – Organisaation oma energiankulutus (TJ). Saatavilla <http://annualreporting.dna.fi/2014/yritysvastuu/gri-osio/ymparistotunnuslukuja>.

- [DNA14] DNA:n verkkovuosikertomus 2013. Yritysvastuu. Tiedot kerätty sivulta: <http://annualreporting.dna.fi/2013/yritysvastuu/ymparistotietoa>.
- [DNA12] Vuosikertomus 2011. Yritysvastuu 2011, Tiedot kerätty sivulta: <http://annualreporting.dna.fi/>
- [EARTH33] *Final report on green network technologies*, EARTH project deliverable D3.3, V1.0, 2012.
- [EARTH43] *Final report on green radio technologies*, EARTH project deliverable D4.3, V1.0, 2012.
- [Elisa14c] Elisan CO2 päästösäästömittareiden laskentadokumentti, päivitetty 26.2.2014, Elisa Oyj. Saatavilla: <http://corporate.elisa.fi/attachment/content/Elisan-CO2-mittarit-laskentadokumentti.pdf>
- [Elisa14a] Investor CDP 2014 Information Request, Elisa Oyj, Kohta CC8.5. Ladattu [www.cdp.net](http://www.cdp.net) -järjestelmästä 29.4.2015.
- [Elisa13] Elisa Oyj yritysraportti vuodelta 2012. Elisan GRI-sisällysluettelo 2012. Kts. <http://vuosikertomus.elisa.fi/>
- [Elisa14b] Elisa Vuosikertomus 2013. Oma hiilijalanjälki. Taulukko: "Päälähteiden epäsuora energiankulutus". Tiedot kerätty osoitteesta: <http://vuosikertomus2013.elisa.fi/vastuullisuus/kestava-arvo-yhteiskunnalle/oma-hiilijalanjalki.html>
- [Elisa15a] Elisa Vuosikertomus 2014. Energiategohokkuus ja hiilijalanjälki. Taulukko: "Päälähteiden epäsuora energiankulutus". Tiedot kerätty 29.4.2015 sivulta <http://vuosikertomus.elisa.fi/vuosikertomus-2014/vastuullisuus/kestava-arvo-yhteiskunnalle/energiategohokkuus-ja-hiilijalanjalki.html> saatavilla myös [http://vuosikertomus.elisa.fi/media/ladattavat-pdf/elisa\\_vastuuraportti\\_2014.pdf](http://vuosikertomus.elisa.fi/media/ladattavat-pdf/elisa_vastuuraportti_2014.pdf) <http://corporate.elisa.fi/elisa-oyj/vastuullisuus/ymparisto/hiilijalanjalki-ja-energiategohokkuus/>
- [EARTH23] Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown, EARTH project deliverable D2.3, V2.0, Jan. 2012.
- [EARTH64] Final integrated concept, EARTH project deliverable D6.4, V1.0, 2012. [Ericsson15] Ericsson product portfolio (2015, Jan.) Ericsson Psi Coverage. [Online]. <http://www.ericsson.com/ourportfolio/telecom-operators/psi-coverage>
- [Ericsson14a] Ericsson Mobility Report: On the pulse of the networked society, Ericsson white paper, Nov. 2014.
- [Ericsson14b] Ericsson Energy and Carbon Report, Ericsson white paper, Nov. 14.
- [Ericsson15b] Traffic Exploration tool (2015, Jan.) Ericsson Mobility Report. [Online]. <http://www.ericsson.com/TET/trafficView/loadBasicEditor.ericsson>
- [ET15] Energiategohokkuus ry. Sähkötilasto. <http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut/sahkotilastot>
- [ETSI14] [Environmental Engineering \(EE\); Methodology for environmental Life Cycle Assessment \(LCA\) of Information and Communication Technology \(ICT\) goods, networks and services. Final draft ETSI ES 203 199 V1.3.0 \(2014-12\)](#). [EVJT15] Energiavirasto, palaveri Energiavirastossa 17.2.2015 ja sitä seurannut kirjeenvaihto sähköpostitse, Juha Toivanen, Yli-insinööri, Energiategohokkuus, Energiavirasto.

- [EVSY15] Energiaviraston suurten yritysten katselmussivusto:  
<http://www.energiavirasto.fi/suurten-yritysten-pakolliset-katselmukset>
- [Fallgren13] M. Fallgren, M. Olsson, and P. Skillermark, "Energy saving techniques for LTE: Integration and system results," in *Proc. IEEE PIMRC*, London, UK, Sep. 2011, pp. 3269-3273.
- [Fantini11] R. Fantini, D. Sabella, and M. Caretti, "An E3F based assesment of energy efficiency of relay nodes in LTE-Advanced networks," in *Proc. IEEE PIMRC*, Toronto, Canada, Sep. 2011, pp. 182-186.
- [Federley15] Federley M., Myllysilta M. Esiselvitys: TV-sisältöjen monikanavaisen jakelun energiankulutuksen arviointi. VTT-CR-01429-15, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 31.3.2015, <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2015/VTT-CR-01429-15.pdf>
- [Ficora12] Laajakaistaisten viestintäverkkojen energiatehokkuus, Viestintäviraston muistio, 2013. [Online]. Available: <https://www.viestintavirasto.fi/ohjausjavalvonta/ohjeettulkinnatsuositukseneselvitykset/ohjeidentulkintojensuositustenjaselvitystenasiakirjat/laajakaistaistenviestintaverkkojenenergiatehokkuus.html>
- [Ficora14] Viestintävirasto web-sivut (2014, Oct. 24) Matkaviestinverkossa siirretty tieto. <https://www.viestintavirasto.fi/tietoatoimialasta/tilastot/internetjapuhelin/matkaviestinverkossasiirrettytieto.html>
- [Ficora11] Laajakaistaisten viestintäverkkojen energiatehokkuus. Viestintäviraston muistio vuodelta 2012. <https://www.viestintavirasto.fi/ohjausjavalvonta/ohjeetjulkaisut/ohjeidentulkintojensuositustenjaselvitystenasiakirjat/laajakaistaistenviestintaverkkojenenergiatehokkuus.html>
- [Ficora15a] Viestintäviraston Internet sivusto, päivitetyt tiedot 18.03.2015. <https://www.viestintavirasto.fi/tietoatoimialasta/tilastot/internetjapuhelin/matkaviestinverkossasiirrettytieto.html>
- [Ficora15b] Viestintäviraston toimialakatsaus 1/2015.
- [Frenger11] P. Frenger, P. Moberg, J. Malmödin, Y. Jading, and I. Gódor, "Reducing energy consumption in LTE with cell DTX," in *Proc. IEEE VTC Spring*, Budapest, Hungary, May 2011.
- [Frenger13] P. Frenger, Y. Jading, and J. Turk, "A case study on estimating future radio network energy consumption and CO2 emissions," in *Proc. IEEE PIMRC*, London, UK, Sep. 2013.
- [Frenger14a] P. Frenger, C. Friberg, Y. Jading, M. Olsson, and O. Persson, "Radio network energy performance: Shifting focus from power to precision," *Ericsson Review*, no. 2, Feb. 2014.
- [Frenger14b] P. Frenger and M. Ericson, "Assessment for alternatives for reducing energy consumption in multi-RAT scenarios," in *Proc. IEEE VTC Spring*, Seoul, Korea, May 2014.
- [GreenTouch13] *GreenTouch Green Meter research study: Reducing the net energy consumption in communications networks by up to 90% by 2020*, GreenTouch white paper, 2013.
- [GRI15] GRI raportointiohjeistus, katso: <https://www.globalreporting.org/>

- [Han11] Han C. et al., "Green Radio: Radio Techniques to Enable Energy-efficient Wireless Networks," *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 49, no. 6, June 2011, pp. 46–54.
- [HE14] HE 182/2014 vp. Hallituksen esitys eduskunnalle energiatehokkuuslaiksi ja eräiksi siihen liittyviksi laeiksi. Saatavilla: [www.finlex.fi](http://www.finlex.fi)
- [Hevizi11] L. G. Hévizsi and I. Gódor, "Power saving in mobile networks by dynamic base station sectorization," in *Proc. IEEE PIMRC*, Toronto, Canada, Sep. 2011, 2415-2417.
- [Holtkamp13] H. Holtkamp, G. Auer, V. Giannini, and H. Haas, "A parameterized base station power model," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 11, pp. 2033-2035, Nov. 2013.
- [Katsigiannis14] M. Katsigiannis and H. Hämmäinen, "Energy consumption of radio access networks in Finland," *Telecommun Syst.*, vol. 55, no. 2, pp. 241-251, 2014.
- [LVM12] Viestintäpolitiikan KIDE-ohjelma. Liikenne- ja viestintäministeriö. 2012. Saatavilla: <http://www.lvm.fi/lvm-mahti-portlet/download?did=79469>
- [LVM13] Vihreän ICT:n toimintaohjelma. Liikenne- ja viestintäministeriö, 13.12.2013. Saatavilla: [http://www.lvm.fi/docs/fi/2497123\\_DLFE-22412.pdf](http://www.lvm.fi/docs/fi/2497123_DLFE-22412.pdf)
- [LVM14] Internet audiovisuaalisten sisältöjen jakelutienä, Liikenne- ja viestintäministeriön raportti, Dec. 2014.
- [Malmodin14] J. Malmodin, D. Lunden, Å. Moberg, G. Andersson, and M. Nilsson, "Life cycle assessment of ICT: Carbon footprint and operational electricity use from the operator, national, and subscriber perspective in Sweden," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 18, no. 6, pp. 829-845, Dec. 2014.
- [Markov14] I. L. Markov, "Limits on fundamental limits to computation," *Nature*, vol. 512, pp. 147–154, 14 Aug. 2014.
- [Marsan11] M. A. Marsan and M. Meo, "Energy efficient wireless Internet access with cooperative cellular networks," *Computer Networks*, vol. 55, no. 1, pp. 386-398, Feb. 2011.
- [Micallef13] G. Micallef, "Energy efficient evolution of mobile broadband networks," Ph. D. thesis, Aalborg University, Aalborg, Apr. 2013.
- [Nokia11] *Nokia Siemens Networks LTE 1800 MHz: Introducing LTE with maximum reuse of GSM assets*, Nokia white paper, 2011.
- [Nokia12] *Nokia Solutions and Networks Flexi Compact Base Station: Macro base station in micro size*, Nokia Datasheet, [Online]. Available: <http://networks.nokia.com/portfolio/products/mobile-broadband/single-ran-advanced/flexi-compact-base-station>
- [Nokia13] *Nokia Solutions and Networks Active Antenna Systems: A step-change in base station site performance*, Nokia white paper, Oct. 2013.
- [Nokia14] Flatten network energy consumption – Technology Vision 2020, Nokia white paper, 2014.
- [Oh13] E. Oh, K. Son, and B. Krishnamachari, "Dynamic base station switching-on/off strategies for green cellular networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 2126-2136, May 2013.

- [R3-130669] *Transmission power optimization for non-overlapping macro deployments*, 3GPP TSG-RAN WG3 #79-bis Meeting Document, Nokia Siemens Networks, CMCC, Apr. 2013.
- [Release12] *Overview of 3GPP Release 12*, 3GPP document, V0.1.4, Sep. 2014.
- [Skillermark12] P. Skillermark and P. Frenger, "Enhancing energy efficiency in LTE with antenna muting," in *Proc. IEEE VTC Spring*, Yokohama, Japan, May 2012.
- [Suarez12] L. Suarez, L. Nuaymi, and J.-M. Bonnin, "An overview and classification of research approaches in green wireless networks," *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, Apr. 2012.
- [Talbot14] D. Talbot. (2014, Jan.) The Hottest Technology Not on Display at CES: Smart Radio Chips. MIT Technology Review. [Online]. Available: <http://www.technologyreview.com/news/523286/the-hottest-technology-not-on-display-at-ces-smart-radio-chips/>
- [TEM13] Kansallinen energia ja ilmastostrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 20.3.2013, VNS 2/2013 vp. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia ja ilmasto, 8/2013. Saatavilla: [http://www.tem.fi/files/36730/Energia-ja\\_ilmastostrategia\\_2013\\_SUOMENKIELINEN.pdf](http://www.tem.fi/files/36730/Energia-ja_ilmastostrategia_2013_SUOMENKIELINEN.pdf)
- [TK15a] Energian hankinta ja kulutus –tilastot [verkkojulkaisu]. Suomen virallinen tilasto (SVT): ISSN=1799-795X. 3. vuosineljännes 2014, Laatuseloste energian hankinta ja kulutus . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 9.1.2015]. Saantitapa: [http://www.stat.fi/til/ehk/2014/03/ehk\\_2014\\_03\\_2014-12-19\\_laa\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehk/2014/03/ehk_2014_03_2014-12-19_laa_001_fi.html)
- [TK13a] Tilastokeskus: Energiatilastot vuodelta 2012, saatavilla osoitteesta:[http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2013/html/suom0002.htm](http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2013/html/suom0002.htm)
- [TK14a] Tilastokeskus: Energiatilastot vuodelta 2013, saatavilla osoitteesta: [http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2014/html/suom0002.htm](http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2014/html/suom0002.htm)
- [TK15b] Tilastokeskus: Energia 2014 taulukkopalvelu saatavilla osoitteessa: [http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2014/alku.htm](http://pxweb2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2014/alku.htm)
- [TKAV15] Tiedonanto puhelimitse: Anssi Vuorio, 9.1.2015, Tilastokeskus.
- [Tombaz14] [S. Tombaz, P. Monti, F. Farias, M. Fiorani, L. Wosinska and J. Zander. Is Backhaul Becoming a Bottleneck for Green Wireless Access Networks? IEEE ICC 2014 - Selected Areas in Communications Symposium](#)
- [TR36887] *Study on energy saving enhancement for E-UTRAN (Release 12)*, 3GPP Technical Report TR 36.887, V12.0.0, Jun. 2014.
- [TR36927] *Potential solutions for energy saving for E-UTRAN (Release 12)*, 3GPP Technical Report TR 36.927, V12.0.0, Sep. 2014.
- [TS36300] *E-UTRA and E-UTRAN Overall description Stage 2 (Release 12)*, 3GPP Technical Specification TS 36.300, V12.4.0, Dec. 2014.
- [TR103116] Practical verification of ETSI TS 102 706 V1.2.1, ETSI EE Technical Report TR 103 116, V1.1.1, 2012.
- [TR103117] Principles of Mobile Network level energy efficiency, ETSI EE Technical Report TR 103 117, V1.1.1, 2012.

- [TS102706] Measurement method for energy efficiency of wireless access network equipment, ETSI EE Technical Specification TS 102 706, V1.3.1, 2013.
- [TS13b] TeliaSonera, Investor CDP 2014 Information Request.Table 10.1a  
<https://www.cdp.net>
- [TS14b] TeliaSonera. Annual and Sustainability Report 2014. Taulukko G4-EN3 "indirect energy consumption by region.  
[http://www.teliasonera.com/Documents/Reports/2014/annual%20report/TeliaSonera\\_Annual%20and%20Sustainability%20Report\\_2014\\_eng.pdf](http://www.teliasonera.com/Documents/Reports/2014/annual%20report/TeliaSonera_Annual%20and%20Sustainability%20Report_2014_eng.pdf) myös muiden vuosien kestävyysraportit saatavilla osoitteesta:  
<http://www.teliasonera.com/en/sustainability/reports/>
- [Vatanen14] P. Vatanen. (2014, Oct.) DNA oli nopein Nettitutkan 4G-mittauksissa – Elisalla kattavin verkko. YLE Kuningaskuluttaja. [Online]. Available:  
<http://yle.fi/aihe/artikkeli/2014/10/23/dna-oli-nopein-nettitutkan-4g-mittauksissa-elisalla-kattavin-verkko>
- [Xu13] X. Xu, G. He, S. Zhang, Y. Chen, and S. Xu, "On functionality separation for green mobile networks: Concept study over LTE," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 5, pp. 82-90, May 2013.