

Laura Harjaluoma

**5G NR -VERKON ENERGIATEHOKKUU-
DEN KEHITTÄMISEN KEINOJA**
Kandidaatintyö

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Ilona Ilvonen
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Laura Harjaluoma: 5G NR -verkon energiatehokkuuden kehittämisen keinoja
Ways to improve energy-efficiency of a 5G NR-network
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tietojohtamisen tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2021

Matkapuhelinverkkojen merkitys yhteiskunnalle on kasvanut verkkojen kehittyessä monipuolisemmiksi. Digitalisaatio ja kehittyneemmät verkot ovat tärkeä osa jokapäiväistä vuorovaikutusta ja monia yhteiskunnan toimintoja. Matkapuhelinverkkojen kehittyminen ja yleistyminen ovat lisänneet matkapuhelinverkkojen käyttäjien määrää, joka kasvaa jatkuvasti nopeammin. Käyttäjien määrän lisääntyminen kasvattaa verkossa liikkuvan mobiilidatan määrää. Myös matkapuhelinverkon käyttäjien mobiilidatan kulutustottumukset ovat muutoksessa kohti dataintensiivisempää sisältöä. Nämä tekijät johtavat matkapuhelinverkkojen suurempaan energiankulutukseen.

Koska 5G NR -verkot ovat suunniteltu vastaamaan jatkuvasti kasvavaan mobiilidatan kysyntään sekä uusiin vaatimuksiin teollisuudesta, niiden vaikutusta matkapuhelinverkkojen energiankulutukseen on syytä tarkastella. Dataliikenteen määrä matkapuhelinverkoissa nousee 5G:n myötä, koska se mahdollistaa käyttötottumusten muutoksen mukaisen datarikkaan sisällön kuluttamisen entistä tehokkaammin. 5G-verkko on energiatehokkaampi kuin aikaisemmat verkot eli se pystyy kuljettamaan enemmän datayksikköjä energiamäärää kohti kuin aikaisemmat matkapuhelinverkot, silti 5G-verkkojen myötä verkontarjoajat kertovat niiden energiankulutuksen kaksin- tai kolminkertaistuvan. Tämän takia on tärkeää ymmärtää, mistä energiankulutuksen kasvu johtuu, jotta voidaan tutustua ja käsitellä keinoja, joilla 5G:n energiatehokkuutta voidaan kehittää.

Tutkimuksessa todettiin, että 5G-verkko on matkapuhelinverkkojen uudenlainen viitekehys, joka tavoittelee virtuaalisten verkkoja, palvelupohjaista arkkitehtuuria ja uuden rajapinnan luomista, jotta esimerkiksi 4G-verkot voidaan liittää osaksi 5G-verkkoa. Radiopääsyteknologiasta riippumaton rajapinta auttaa 5G-verkkoja kestämaan tulevaisuuden haasteita paremmin. Koska 5G-verkko käyttää hyväksi verkon eri osien virtualisointia ja ohjelmoitavuutta, on mahdollista luoda joustavasti resursseja käyttävä verkko. Kun verkon resursseja käytetään joustavasti, verkon energiatehokkuus kehittyy.

Tutkimus osoitti että, 5G-verkon radiopääsyverkkoa, tukiasemia sekä sen runkoverkkoa kehitettäviä keinoja on useita. Tutkimuksessa haluttiin luoda yleiskatsaus 5G-verkkojen rakenteeseen ja rakenteen mahdollistamiin energiatehokkuutta kehittäviin keinoihin. Radiopääsyverkon ja tukiasemien keinot liittyvät tukiasemien energian säästöön eli lepotiloihin, massiivisiin moniantennitekniikoihin ja radiosignaalien suuntaamiseen eli keilanmuodostukseen sekä pilvipohjaisiin radiopääsyverkoratkaisuihin. Runkoverkon energiatehokkuutta kehittävät keinot taas kohdistuivat runkoverkon laitteiston sekä sen toimintojen jakamiseen virtualisoinnin ja ohjelmoinnin avulla, kuten myös runkoverkon tehokkaaseen resurssien ohjaamiseen.

Koska 5G-verkkojen energiankulutuksen vaikutus oletetaan olevan merkittävä, jatkotutkimuksen kannalta voidaan tutkia ratkaisuja, joilla käytettyä energiaa voidaan ottaa talteen esimerkiksi tukiasemien jäähdytyksen yhteydessä. Mahdollista olisi myös tutkia dataliikenteen minimointia, jotta verkon laitteiden kuormitus vähenee. Voidaan myös tutkia uusiutuvan energian ratkaisuja matkapuhelinverkon osien energianlähteinä, jotta energiankulutuksen päästöjen merkitys pienee.

Avainsanat: 5G, energiatehokkuus, energiatietoinen, matkapuhelinverkko, energiankulutus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty kandidaatintyönä Tampereen yliopiston tietojohdamisen koulutusohjelmaan kevätlukukaudella 2021. Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja siinä tutkittiin 5G NR -verkkojen energiatehokkuuden kehittämisen keinoja. Aihe valikoitui oman mielenkiinnon ja tietoliikennetekniikan sivuaineeni perusteella.

Haluan kiittää ohjaajaani Ilona Ilvosta, joka ohjasi tutkimusta oikeaan suuntaan. Lisäksi haluan kiittää Jukka Talvitietä, keneltä sain apua teknisiin yksityiskohtiin, sekä läheisiä, jotka jaksoivat oikolukea tutkimustani useaan kertaan.

Tampereella, 3.5.2021

Laura Harjaluoma

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoite	1
1.2 Tutkimusongelma ja rajaus	2
1.3 Tutkimuksen rakenne	3
2. TUTKIMUSMENETELMÄN JA AINEISTON ESITTELY	5
2.1 Tutkimusmenetelmä	5
2.2 Tutkimusaineiston esittely	6
3. MATKAPUHELINVERKOT	8
3.1 Matkapuhelinverkkojen kehitys	8
3.2 5G NR -radiopääsyverkko ja tukiasemat	10
3.3 5G NR -runkoverkko	11
4. ENERGIANKULUTUS MATKAPUHELINVERKOISSA	13
4.1 Matkapuhelinverkkojen energiankulutukseen vaikuttavat tekijät	13
4.2 Dataliikenteen kasvu ja käyttötottumusten muuttuminen	15
4.3 5G NR -verkkojen vaikutus energiankulutukseen	17
5. 5G NR –VERKON ENERGIATEHOKKAITA KEINOJA	20
5.1 Radiopääsyverkon ja tukiasemien energiatehokkaita keinoja	20
5.1.1 Tukiasemien lepotilat	20
5.1.2 M-MIMO ja keilanmuodostus	22
5.1.3 Pilvipohjainen radiopääsyverkko	23
5.2 Runkoverkon energiatehokkaita keinoja	24
5.2.1 Pilvilaskenta, verkon funktioiden virtualisointi ja ohjelmoitu verkko 24	
5.2.2 Hallinta ja ohjaus	26
5.2.3 Verkon viipalointi	26
6. YHTEENVETO	28
6.1 Tutkimuksen tulokset	28
6.2 Tulosten arviointi ja jatkotutkimusehdotukset	31
LÄHTEET	33

LYHENTEET JA MERKINNÄT

5G = Viides matkapuhelinverkkojen sukupolvi käsittää laajan valikoiman uusia palveluita, joiden on tarkoitus olla mahdollista tulevassa matkapuhelinviestinnässä, eikä viittaa pelkästään radioyhteysteknologiaan (Dahlman et al. 2020, s. 3).

AR = Lisätty todellisuus (engl. Augmented Reality) tarkoittaa todellisen kuvan päälle lisättyjä tietokoneella generoituja kuvia. Käyttäjä voi nähdä todellisen maailman, jossa on virtuaalisia objekteja, jotka ovat päällekkäin todellisen maailman kanssa tai yhdistetty todelliseen maailmaan (Ariso 2017 s. 3).

C-RAN = Pilvipohjainen radiopääsyverkko (engl. Cloud-Radio Access Network) tarkoittaa radiopääsyverkkoa, joka hyödyntää pilven ominaisuuksia ja tukee NFV ja SDN -teknologioita (Guizani & Hamdi 2017).

eMBB = Paranneltu matkapuhelinlaajakaista (engl. enhanced mobile broadband) viittaa matkapuhelinverkkojen laajakaistan kehitykseen ja se mahdollistaa suuremman dataliikenteen sekä paremman käyttäjäkokemuksen (Dahlman et al. 2020, s. 3).

ICT = Tieto- ja viestintäteknologia (engl. Information and Communication Technology) viittaa erilaisiin viestintäverkkoihin ja niissä käytössä oleviin teknologioihin (OECD 2021).

IoT = Esineiden internet (engl. Internet of Things) tarkoittaa laitteita, jotka voivat käsitellä, tallentaa sekä lähettää dataa fyysisestä maailmasta verkon yli (Rubí & Gondim 2019).

M-MIMO = Massiivinen moniantennitekniikka (engl. Massive MIMO) tarkoittaa älykästä antennitekniikkaa, jossa tukiasema on varustettu kymmenillä tai sadoilla aktiivisilla antenneilla (Isabona & Srivastava 2017).

MIMO = Moniantennitekniikka (engl. Multiple Input Multiple Output) tarkoittaa esimerkiksi antennia, jossa on enemmän kuin yksi lähetin- ja vastaanotinantenni (Chen 2006).

mMTC = Massiivinen koneiden kommunikointi (engl. massive machine-type communication) tarkoittaa palveluita, jotka tarvitsevat tyypillisesti valtavan määrän laitteita, kuten etäantureita, erilaisia valvontalaitteita. (Dahlman et al. 2020, s. 4).

NFV = Verkon funktioiden virtualisointi (engl. Network Function Virtualization) mahdollistaa verkon hallinnan ja laajentamisen virtuaalisilla ja ohjelmistopohjaisilla sovelluksilla, jotka toimivat fyysisillä laitteilla verkon arkkitehtuurissa (Ericsson 2021).

NR = Viides matkapuhelinverkkojen sukupolvi (engl. New Radio) viittaa 5G:n radioyhteysteknologiaan (Dahlman et al. 2020, s. 3).

RAN = Radiopääsyverkko (engl. Radio Access Network) tarkoittaa matkapuhelinverkon osaa, joka yhdistää käyttäjalaitteen ja verkon toisiinsa. Sen näkyvät elementit ovat antennit ja tukiasemat, jotka lähettävät ja vastaanottavat signaaleja käyttäjalaitteilta. (Nokia 2020).

SDN = Ohjelmoitu verkko (engl. Software Defined Network) mahdollistaa verkon joustavan hallinnan, kun verkon käyttäjädatan taso ja sen tason kontrollitaso erotetaan toisistaan (Guizani & Hamdi 2017).

URLLC = Erittäin luotettavat ja alhaisen viiveen yhteydet (engl. ultra-reliable low-latency communication) sopivat näitä ominaisuuksia vaativille palveluille, kuten liikenteen turvallisuuteen, automaattiseen ohjaukseen ja tehtaan automaatioon. (Dahlman et al. 2020, s. 4).

VR = Virtuaalitodellisuus (engl. Virtual Reality) tarkoittaa todellisen kuvan ja äänen korvaamista tietokoneella generoidulla illuusiolla maailmasta, jossa käyttäjä voi navigoida ja vuorovaikuttaa (Bates-Brkljac 2012 s. 52).

1. JOHDANTO

Tämä työn tavoitteena on tutkia uusimman matkapuhelinverkon eli 5G NR:n keinoja tavoitella energiatehokkuutta. Tässä luvussa käydään läpi tutkimuksen tausta ja tavoite, tutkimusongelma rajauksineen sekä tutkimuksen rakenne.

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoite

Markkinoille on tullut noin 10 vuoden välein uuden sukupolven langaton matkapuhelinverkko, joka on tarjonnut edeltäjänsä verrattuna uusia ominaisuuksia. Ensimmäiset langattomat verkot pystyivät kuljettamaan vain puhetta, seuraavat lähettivät tekstiviestejä ja aloittivat langattoman tiedonsiirron ja viimeisimmät ovat jatkaneet kehitystä parantamalla runsaasti tiedonsiirron kapasiteettia ja nopeutta (FiCom 2018). Samaan aikaan verkon merkitys yhteiskunnalle digitalisaation myötä on kasvanut ja yhteiskunta luottaa jatkuvasti enemmän matkapuhelinverkkoihin. Esineiden internet ja digitalisaatio ovat lisänneet tieto- ja viestintäteknologian käyttöä kaikkialla (Pihkola et al. 2018). Matkapuhelinverkot ovatkin nykypäivänä tärkeä osa ihmisten jokapäiväistä vuorovaikutusta (Vanithamby & Soong 2020).

Verkkojen yleistymisen myötä mobiililaitteiden määrä kasvaa maailmanlaajuisesti ja samaan aikaan kuluttajien käyttötottumukset ovat muutoksessa, mitkä ovat johtaneet dataliikenteen lisääntymiseen. Esimerkiksi Suomessa mobiilidatan käyttö on kasvanut nopeasti ja kasvun odotetaan jatkuvan tulevaisuudessa. (Pihkola et al. 2018) Matkapuhelinverkkojen yleistyminen on edistänyt dataliikenteen kasvua.

Tästä voi kertoa myös matkapuhelinverkkojen energiankulutuksen runsas kasvu maailmassa. Matkapuhelinverkkojen energiankulutuksen on arvioitu kasvavan 10 TWh:sta 31 TWh:iin vuosien 2011 ja 2020 aikana (Canfora et al. 2020 s. 11 mukaan Öko Institut 2013). Eksponentiaalisen videosisällön kulutuksen kasvu ja esineiden internetin kehittyminen ovat laukaisseet 5G-verkkojen kehityksen (Barakabitze et al. 2020). Talouselämän (2019) mukaan langaton tietoliikenne kuluttaa huomattavasti energiaa ja 5G-verkkojen käyttöönotto lisää alan energiankulutusta entisestään. Kuluttajat tai lainsäätäjät eivät kuitenkaan enää hyväksy talouskasvun saavuttamista ympäristön kustannuksella

(Vannithamby ja Soong 2020). Tällä hetkellä tavoitellaankin energiatehokasta 5G-matkapuhelinverkkoa (Nokia 2020).

Energiatehokas matkapuhelinverkko voi tarkoittaa sitä, että se käyttää energiaa säästäviä menetelmiä tai hyödyntää energiatehokkaita keinoja (Srivastava 2020). 3GPP:n mukaan matkapuhelinverkon energiatehokkuus voidaan määrittellä sen suorituskyvyn ja energiankulutuksen osamäärällä. Mitä suurempi suorituskyky on yhtä kulutettua energiayksikköä kohti, sitä suurempi on verkon energiatehokkuus. (3GPP 2021) Energiatehokkuudella tässä tutkimuksessa tarkoitetaan lähetettyä datayksikköä sen kuluttamaa energiamäärää kohti.

1.2 Tutkimusongelma ja rajaus

Tässä työssä syvennyttään 5G NR -verkkojen energiatehokkuuden kehittämisen keinoihin ja selvitetään, miten uusin matkapuhelinverkko vaikuttaa niiden kokonaisenergiankulutukseen. Tätä varten kasvatetaan ymmärrystä aiheesta ensin selvittämällä, miten 5G-verkko rakentuu ja miten se eroaa aikaisemmista matkapuhelinverkoista. Tämän jälkeen esitellään löydettyjä 5G-verkon tekijöitä, jotka voivat nostaa matkapuhelinverkon energiankulutusta. Tutkimuksessa tarkastellaan joitakin keinoja, jotka voivat kehittää 5G:n energiatehokkuutta tai säästää energiaa 5G-verkoissa. Aihe rajataan 5G NR-verkkojen energiatehokkuuden osalta koskemaan sen runkoverkkoa sekä radiopääsyverkkoa ja tukiasemia. Kyseiset tarkasteltavat keinot antavat vain suuntaa energiatehokkuuden tutkimiselle 5G-verkossa. Tarkasteltavien energiatehokkuutta kehittävien keinojen ulkopuolelle jätetään käyttäjälaitteisiin sekä palvelinkeskuksiin liittyvät keinot, jotta tutkimuksen laajuutta saadaan rajattua.

Päätutkimuskysymyksenä on:

- Miten 5G-matkapuhelinverkkojen energiatehokkuutta voidaan parantaa?

Päätutkimuskysymystä tukevana alatutkimuskysymyksinä ovat:

- Miten matkapuhelinverkot toimivat ja miten 5G eroaa aikaisemmista matkapuhelinverkoista?
- Mikä kuluttaa energiaa matkapuhelinverkoissa?
- Miten energiankulusta voidaan alentaa 5G-verkoissa?

Tutkimusongelman avulla pohditaan, miten 5G-matkapuhelinverkkojen energiatehokkuutta voidaan parantaa. Tutkimus tuo esille merkittäväksi koettuja keinoja, joita voidaan hyödyntää 5G-verkkojen energiatehokkuuden kehittämisessä ja se kuvailee haasteita

näiden keinojen käytössä. Tutkimuksen tarkoituksena ei ole esitellä kaikkia keinoja, jotka voivat parantaa 5G:n energiatehokkuutta tai säästää energiaa, vaan esitellä merkittävimmät tutkimuksen perusteella löydetyt keinot.

Tutkimuksessa keskitytään nimenomaan 5G-verkkoihin, koska uskotaan, että niiden yleistymisellä on suuri vaikutus matkapuhelinverkkojen energiankulutukseen. Tutkimuksessa käy ilmi luvussa 4.1 että, 4G-verkot jatkavat leviämistä maailmassa ja samalla vaikuttavat matkapuhelinverkkojen energiankulutukseen, kuitenkin 5G-verkkojen odotetaan leviävän nopeammin laajaan käyttöön kuin 4G-verkot aikanaan. Tämän takia voidaan olettaa, että vaikutukset energiankulutuksessa näkyvät nopeasti ja siksi 5G-verkot koetaan tärkeäksi näkökulmaksi tutkimukselle. Niiden vaikutus matkapuhelinverkkojen energiankulutukseen oletetaan varsin ajankohtaiseksi. Tutkimus tekee havaintoja matkapuhelinverkkojen energiankulutuksesta ja syistä, jotka vaikuttavat energiankulutukseen. Hypoteesina on että, 5G kasvattaa matkapuhelinverkkojen energiankulutusta, ja tarkoituksena on luoda kuva, miten 5G-verkkojen ominaisuudet ja vaatimukset vaikuttavat energiankulutukseen. Tutkimus sivuaa myös matkapuhelinverkkojen käyttötottumuksia ja sitä, miten 5G-verkkojen yleistyminen muuttaa niitä.

Palvelinkeskusten, käyttäjälaitteiden sekä datan langallisen siirtämisen energiatehokkaat keinot rajataan kuitenkin tämän tutkimuksen ulkopuolelle, koska halutaan keskittyä matkapuhelinverkon eniten energiaa kuluttavaan osaan eli radiopääsyverkkoon sekä radiopääsyverkon resurssien optimaaliseen kuluttamiseen, johon runkoverkon ominaisuuksilla voidaan vaikuttaa.

1.3 Tutkimuksen rakenne

Tutkimus rakentuu kuudesta osasta. Ensimmäisessä luvussa on johdanto, jossa esitellään matkapuhelinverkkojen merkitys ja niiden kehityksen vaikutuksia, tutkimusongelma sekä tutkimuksen rajaukset. Johdannon jälkeen tutkimuksessa tarkastellaan tutkimusmenetelmää ja esitellään aineisto ja sen keräämisen prosessi. Luvussa syvennytään siihen, miten ja mistä tietoa haetaan sekä annetaan esimerkkejä tärkeimmästä aineistosta. Kolmannessa luvussa käsitellään varsinaista aineistoa ja tarkastellaan matkapuhelinverkon perusteita, aikaisempia matkapuhelinverkon sukupolvia ja otetaan katsaus viidennen sukupolven verkon rakenteeseen. Neljännessä luvussa syvennytään matkapuhelinverkkojen energiankulutukseen ja tarkastellaan syitä, jotka lisäävät matkapuhelinverkkojen energiankulutusta ja verkon käyttäjien käyttötottumusten muuttumista myös 5G-verkon myötä. Viidennessä luvussa tutustutaan 5G-verkkojen energiatehokkaisiin keinoihin.

Viimeisenä kuudennessa luvussa tehdään tutkimuksen yhteenveto ja pohditaan, mitä tutkimuksen tuloksista voidaan päätellä ja kuinka hyvin tutkimus on onnistunut.

2. TUTKIMUSMENETELMÄN JA AINEISTON ESITTELY

Tutkimus suoritettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa tutkitaan aiheeseen liittyvää kirjallisuutta ja muodostetaan tutkimusongelmaan vastaava kokonaiskuva aiheesta. Tässä luvussa esitellään tutkimuksen tutkimusmenetelmä, käytetyt tietokannat ja hakulausekkeet sekä esitellään tutkimusta varten kerättyä tutkimusaineistoa.

2.1 Tutkimusmenetelmä

Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa tutkittiin asiantuntijoiden ja tutkijoiden tuottamaa tutkimusaineistoa. Kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan ja tiivistetään alan asiantuntijoiden tutkimuskirjallisuutta. Kirjallisuustutkimus toteutetaan käyttämällä Finkin mallia. Salmisen mukaan (2011) Finkin mallissa ensimmäisenä asetetaan tutkimuskysymys, toisena valitaan tietokannat ja kolmantena hakutermit, joilla haetaan tietokannasta tutkittavaa aineistoa. Neljäs vaihe on hakutulosten karsinta, lisärajausten perusteella, kuten kielen tai julkaisuvuoden perusteella. Viidennessä vaiheessa hakutuloksia karsitaan niiden laadun perusteella ja valitaan laadukkain mahdollinen materiaali. Kuudennessa vaiheessa katsaus suoritetaan ja seitsemännessä vaiheessa katsauksen tulokset yhdistetään. (Salminen 2011)

Salmisen mukaan (2011) Finkin mallin mukaan ensin asetetaan tutkimuskysymys, joka tehtiin luvussa 1.2. Seuraavaksi mallin mukaan on tarkoitus valita tutkimuksen tietokannat, joista haetaan tutkimusaineistoa. Tietokannoiksi valittiin Tampereen yliopiston kirjaston hakukone Andor sekä ProQuest ja Web of Science. Tietokantoja pidettiin luotettavina ja kattavina tietokantoina. Tiedonhaussa käytettiin myös luotettavina pidettyjä tahoja, kuten EU:n, VTT:n ja Ericssonin erilaisia raportteja, joita haettiin internetistä. Tutkimusaineistoksi otettiin myös konsultointikeskustelu Tampereen yliopiston Jukka Talvitién kanssa.

Kolmantena Finkin mallissa Salmisen mukaan (2011) valitaan hakulausekkeet, joita käytetään tutkimusmateriaalin hakemiseen hakukannoista. Hakulausekkeet muodostettiin englanninkielisistä termeistä, koska suurin osa julkaisuista on englanniksi. Hakutermit on valittu päätutkimuskysymyksen sekä sen alatutkimuskysymysten perusteella. Finkin mallissa Salmisen mukaan (2011) on neljäntenä asettaa hakukriteerejä. Tutkimuksen aineistoa haettiin siten vuoden 2017 jälkeen julkaistuista vertaisarvioituista aineistoista

ja tutkimuksista. Hakutermit jätettiin tarkoituksella laajoiksi, jotta voitaisiin huomata, mitkä tekniikat toistuvat tuloksissa. Taulukkoon 1 on kirjattu käytettyjä hakulausekkeita ja niitä vastaavat karsitut tulokset kustakin tietokannasta.

Taulukko 1: Lähdeaineiston hakemisessa käytetyt hakulausekkeet ja niitä vastaavat karsitut tulokset

Hakulauseke	Andor	ProQuest	Web of Science
5G AND "energy efficiency"	12 820	2 067	1 669
5G AND "mobile network" AND energy	14 915	577	125
5G AND "energy efficient"	9 542	1 934	476
5G AND "energy consumption"	10 546	2 246	624

Ensimmäinen hakulauseke viittaa 5G-verkon energiatehokkuuteen, josta haluttiin saada kattava kuva tutkimuksen aineistoksi. Tuloksia saatiin tekniikoista, joilla voidaan parantaa 5G:n energiatehokkuutta. Seuraava hakulauseke (5G AND "mobile network" AND energy) toimi laajempaan hakulausekkeena hakemaan erilaisia tekniikoita ja selventämään käsitteiden suhdetta. Myöhemmin hakulausekkeina käytettiin myös tutkimuksessa esiintyvien tekniikoiden termejä, tarkoituksena hakea lisätietoa kyseisestä tekniikasta. Viidentenä Salmisen mukaan (2011) Finkin mallissa hakutuloksia karsitaan niiden laadun perusteella ja valitaan laadukkain mahdollinen materiaali. Tätä tehtiin, kun valittiin vertaisarvioituja aineistoja tutkimukseen. Kuitenkaan jokaisessa tietokannassa ei ollut mahdollista rajata aineistoa vertaisarvioitu-kriteerin perusteella.

Kuudennessa vaiheessa Finkin mallissa Salmisen mukaan (2011) suoritetaan hakutulosten katsaus. Jokaisen tietokannan aineistoa silmäiltiin ja siten valittiin oleellimmat aineistot tutkimuksen aineistoksi. Hakutuloksia tuli runsaasti eikä niitä kaikkia voitu käydä läpi. Koska tietokannat järjestivät hakutulokset niiden relevanssin mukaan, oli mahdollista silmäillä luotettavalta tuntuva määrä aineistoa ja suorittaa aineiston valinta tämän perusteella. Lopuksi tutkimuksen tuloksia yhdistettiin, mikä kuuluu Finkin mallin viimeiseen vaiheeseen (Salminen 2011).

2.2 Tutkimusaineiston esittely

Tutkimuksen aihe on ajankohtainen ja uutta aineistoa oli mahdollista löytää, joka oli myös tavoite aineiston valinnassa. Hakulausekkeilla yritettiin hakea tietoa 5G:n energiankulutuksesta, mikä kuitenkin osoittautui haastavaksi. Tämän takia raportteja energiankulutuksesta sekä myöhemmin muutoksesta dataliikenteessä etsittiin myös organisaatioiden

ja yritysten sivulta. Tietoa haettiin myös internet-hauilla Googlen hakukoneella erilaisista uutisista ja artikkeleista tukemaan tutkimusaineistoa taulukossa näkyvillä hakusanoilla sekä suomeksi hakusanoilla ”Langattomat sukupolvet”, ”Energiankulutus matkapuhelinverkoissa” ja ”matkapuhelinverkkojen energiatehokkuus”.

Tutkimuksen aineisto sisältää kirjallisuutta, tutkimuksia ja julkaisuja. Tutkimuksessa käytettiin aineistona Dahlman et al. (2020) alan perusteosta, joka kuvailee yksityiskohtaisesti 5G-verkkojen rakennetta, ominaisuuksia. Teos pohjustaa myös 5G-verkkojen energiatehokkaiden keinojen löytämistä. Tutkimuksen kannalta merkittävimmät lähteet ovat esitelty liitteessä A. Taulukkoon on kirjattu myös muita alan perusteoksia ja tutkimuksia alasta rajauksen puitteissa. Tutkimuksen aineistona on käytetty myös vanhempia alan perusteoksia, joita tarvittiin esimerkiksi vanhempien tekniikoiden ja niiden historian kuvailemiseen. Tutkimuksessa on käytetty niin kutsuttua helmenkasvatusta, eli lähdemateriaalia on etsitty myös lähdemateriaalien omista lähteistä. Tutkimusaineistoa on myös vastaanotettu Tampereen yliopiston Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunnan Jukka Talvitieltä.

3. MATKAPUHELINVERKOT

Tässä osiossa esitellään lyhyesti, mikä on matkapuhelinverkko ja millaiset ovat matkapuhelinverkkojen aikaisemmat sukupolvet. Erityisesti tässä luvussa syvennytään siihen, millainen 5G-verkon rakenne on sekä millaisia ominaisuuksia se mahdollistaa.

3.1 Matkapuhelinverkkojen kehitys

Yksinkertaisuudessaan matkapuhelinverkot rakentuvat sen runkoverkosta ja radiopääsyverkosta, johon on kytketty tukiasemia. Alue, jolle halutaan verkko, jaetaan soluihin. Näin muodostetaan verkolle peittoalue. Tukiasema sijoitetaan tyypillisesti siten, että se voi palvella kolmen solun käyttäjiä, jolloin se asetetaan solujen leikkauspisteeseen (Rommer et al. 2019, s.60). Tukiaseman voi kuitenkin asettaa myös yhden solun keskelle palvelemaan yhden solun käyttäjiä. Solualueen koko ja muoto riippuvat muun muassa tukiaseman lähettimen käyttämästä taajuudesta, tehosta ja solualueen maastosta (VTT 2015). Mikäli solualueella on esimerkiksi metsiä tai vuoria, ne voivat häiritä signaalien kulkua, jolloin solualueen todellinen koko voi olla pienempi. Tukiaseman lähettimen lähettää radioaaltoja, joiden taajuus vaikuttaa signaalin kantamaan. Mitä alhaisempi radioaallon taajuus on, sitä pidemmän matkan se yleensä etenee, kun taas korkeampi taajuus etenee lyhyemmän matkan, mikäli käytetään samaa tehoa (Rommer et al. 2019, s.60). Tämän takia tukiasemat on sijoitettava lähemmäksi toisiaan, mikäli käytetään korkeita taajuuksia, kun taas matalien taajuuksien kanssa tukiasemat voidaan sijoittaa kauemmaksi toisiaan verkon voidessa silti palvella käyttäjiä. Kun käyttäjälaite muodostaa yhteyden matkapuhelinverkkoon, sen on ensin luotava yhteys tukiaseman avulla radiopääsyverkkoon. Tukiasema ottaa vastaan ja lähettää signaaleja, ja on usein yhteydessä matkapuhelinverkon runkoverkkoon langallisen yhteyden avulla. (Verizon 2020) Puhelu tai data siirtyy käyttäjän laitteesta radiosignaalina lähimpään tukiasemaan ja siitä runkoverkkoon (STUK n.d.).

Matkapuhelinverkon toimintaan liittyvät verkon resurssit, kuten kapasiteetti ja laskentateho, jota tukiasemat käyttävät toiminnassaan (Liyange et al. 2018, s. 44–46). Verkon kapasiteetti viittaa siihen, kuinka paljon verkossa voi olla enintään olla dataliikennettä ja laskentatehon käyttö taas kuluttaa energiaa tukiasemissa. Tukiasemat käyttävät signaalien lähetyksessä energiaa, jota kutsutaan lähetystehoksi. Stukin mukaan, mikäli tukiaseman kattama alue on harvaan asuttua, solualue on usein suuri, jolloin tukiasemien

on käytettävä suurempaa lähetystehoa. Kun taas tiheämmin asutuilla alueilla tukiasemia on yleensä enemmän, sillä tukiasema pystyy käsittelemään vain tietyn määrän puheluita ja dataa kerralla. (STUK n.d.)

Matkapuhelinverkot ovat kokeneet suuria kehitysaskelia niiden evoluutiossa ensimmäisestä sukupolvesta viidenteen sukupolveen. Ensimmäisen sukupolven matkapuhelinverkot (1G) esiteltiin 1980-luvulla. Näiden pohjimmainen idea oli mahdollistaa mobiilit eli liikuteltavat järjestelmät ja vähentää lankapuhelimen merkitystä (Shetty 2021, k.1). Kymmenen vuoden ajan analoginen 1G-verkko toimi matkapuhelinverkkojen standardina, mutta sen haittapuolina olivat heikko äänenlaatu ja tehoton taajuuskaistan käyttö (Kharbuli 2018). Seuraavaksi kehitettiin toisen sukupolven verkot, jotka ilmestyivät 1990-luvulla. 2G-verkkojen avulla oli mahdollista siirtää puhetta digitaalisesti. Toisen sukupolven myötä matkapuhelimien koko pieneni ja puheluiden lisäksi myös tekstiviestien lähettäminen oli mahdollista, mikä keräsikin suosiota. (Shetty 2021, k.1)

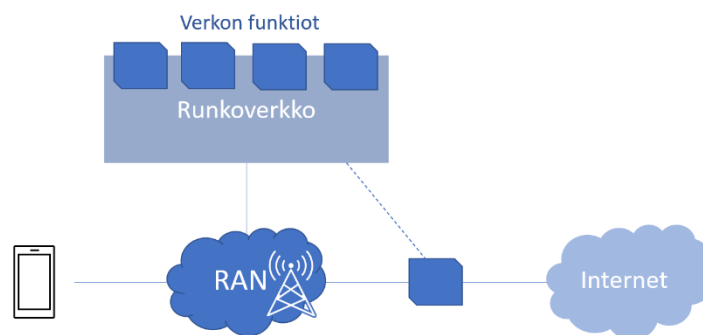
Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkot eli 3G-verkot otettiin kaupalliseen käyttöön vuonna 2000 (Chen 2006). Ne sopivat 2G-verkkoja paremmin dataliikenteen käyttämiseen puhelimen avulla. Ne mahdollistivat alun perin videopuhelut ja mobiilin internetin, jolloin oli mahdollista lukea sähköposteja ja käyttää Messenger-palveluita puhelimen avulla missä vain verkon peittoalueella (Shetty 2021, k.1). Viimeisten matkapuhelinverkkojen sukupolvien aikana datakeskeiset palvelut ovat kasvattaneet suosiotaan äänikeskeisten palveluiden kustannuksella (Chen 2006). Tämä on myös osittain johtanut neljännen matkapuhelinverkon kehitykseen. Neljännen sukupolven matkapuhelinverkot eli 4G-verkot tulivat kaupalliseen käyttöön vuonna 2009 (Ericsson 2020b). 4G menestyi hyvin ja levisi nopeasti maailmanlaajuiseen käyttöön. 4G sopi hyvin purskeiseen dataliikenteeseen, koska se oli ensimmäinen täysin datapohjainen verkko. Se tarjosi nopeammat tiedonsiirtonopeudet kuin koskaan aikaisemmin, mikä muutti käyttäjien tapaa elää. Älypuhelimet täyttivät markkinat, liiketoiminta siirtyi internettiin, online-pelaaminen ja reaaliaikainen navigointi tulivat mahdolliseksi. (Shetty 2021, k. 1) Maailmanlaajuisesti 4G on edelleen tärkein matkapuhelinverkkoteknologia ja se pysyy sellaisena vielä pitkään, vaikka seuraavan sukupolven matkapuhelinverkot ovat jo ilmestyneet. Siksi onkin tärkeää, että 5G-verkko voidaan liittää osaksi 4G-verkkoa. (Rommer et al. 2019, s. 16)

Käyttäjien ja uusien palveluiden määrän kasvaminen aiheuttaa haasteita matkapuhelinverkoille. Myös uudet vaatimukset teollisuuden sektoreilta, kuten autoteollisuudesta, maataloudesta, terveydenhuollosta ja logistiikasta tuovat oman haasteensa käytössä oleville matkapuhelinverkkojen sukupolville, kuten 4G:lle. (Liyanage et al. 2018, s. 31)

4G on edelleen käytössä oleva pätevä teknologia mutta sen ominaisuudet eivät riitä vastaamaan uusia vaatimuksia, joita matkapuhelinverkoilta halutaan (Dahlman, et al., 2020, s. 5). Nämä vaatimukset synnyttivät 5G NR:n – viidennen sukupolven matkapuhelinverkon. (Liyanage et al. 2018, s. 31)

3.2 5G NR -radiopääsyverkko ja tukiasemat

Tietoliikenteen määrän kasvaessa suuresti tarvitaan täysin uudenlainen matkapuhelinverkkoarkkitehtuuri (Al-Quzweeni et al. 2019). 5G ei ole pelkästään matkapuhelinverkojen kehitysaskel vaan myös niiden kokonainen uusi viitekehys (Liyanage et al. 2018, s. 31). 5G:n ensimmäinen versio julkaistiin vuonna 2018 (Dahlman, et al. 2020, s. 5). Toinen 5G:n versiojulkaisu julkaistiin vuonna 2020 ja se keskittyi verkon ominaisuuksiin, joita voidaan hyödyntää teollisuuden tarpeissa (Shetty 2021, k. 1). Kolmannen julkaisun odotetaan tapahtuvan vuonna 2022, ja se tuo huomattavasti aikaisempaa merkittävämpiä ominaisuuksia 5G:lle (Shetty 2021, k. 1). 5G on 4G:n tavoin dataliikennettä varten suunniteltu verkko. Verkon kapasiteetin odotetaan kasvavan 1000-kertaiseksi (Usama & Erol-Kantarci 2019). 5G on 10-kertaa nopeampi kuin 4G ja sen viive tiedonsiirrossa on alhaisempi eli odotettavissa oleva nopeus on 10Gb/s ja viive 1 ms tai vähemmän (Shetty 2021, k. 1).



Kuva 1: 5G-verkon karkea rakenne (Yksinkertaistettu ja mukailtu lähteestä Dahlman, et al. 2020, s. 80)

Kuvasta 1 voidaan nähdä, kuinka käyttäjälaite muodostaa yhteyden 5G-verkon kautta internettiin. Kuvassa näkyvät runkoverkko sekä sen funktiot ja radiopääsyverkko (RAN), joka yhdistyy internettiin yhden runkoverkon funktion kautta. 5G:n radiopääsyverkko rakentuu useista tukiasemista, jotka yhdistetään runkoverkkoon ja toisiinsa (Rommer et al. 2019, s.67). Radiopääsyverkon tehtävänä on luoda langaton yhteys käyttäjään ja siirtää käyttäjän dataa (Talvitie 2021) Tukiasema on vastuussa esimerkiksi erilaisten moniantennitekniikoiden käytöstä, radioresurssien hallinnasta, yhteyden muodostamisesta

käyttäjälaitteelle sekä käyttäjätiedon reitittämisestä oikealle funktiolle runkoverkkoon. (Dahlman et al. 2020, s. 82)

5G-verkon tyypillisessä tukiaseman toteutuksessa yksi tukiasema käsittelee kolmen solun radiolähetystä. On myös mahdollista, että yksi tukiaseman laskentatehoa käyttävä toimintayksikkö palvelee useampaa etäradioantennia (engl. Remote radio head). (Dahlman et al. 2020, s. 82) Etäradioantennit ottavat käyttäjään yhteyden ja ovat langallisesti yhteydessä tukiaseman toimintayksikköön. 5G-verkon tukiasema käyttää signaalien lähetykseen kahta taajuuskaistaa, joista alempi asettuu 450MHz - 6GHz:n alueille ja ylempi millimetriaaltoalueelle 24-100GHz (Rommer et al. 2019, s. 62; Shetty 2021, k. 1). Mikään aikaisemmista matkapuhelinverkon sukupolvista ei ole tukenut millimetriaaltoaluetta (Rommer et al. 2019, s. 61). Koska 5G-verkon tukiasemissa käytetään aikaisempaa korkeampia taajuuksia, tukiaseman pitää olla myös aikaisempaa lähempänä käyttäjää, sillä korkeat taajuudet eivät etene yhtä pitkälle kuin matalat (Usama & Erol-Kantarci 2019). Tämä johtaa aikaisempaa pienempien solualueiden käyttöön. Koska 5G-verkon halutaan olevan kattava, soluja tarvitaan paljon.

5G:n radiopääsyverkko on suunniteltava joustavaksi, jotta kaikkia sen tulevia sovelluksia ja käyttökohteita voidaan tukea (Rommer et al. 2019, s. 61). Verkon joustavuuden parantamisessa auttaa 5G-verkon osittain virtuaalinen rakenne, johon palataan luvussa 3.3. 4G-verkon tukiasema on verrattavissa 5G:n tukiasemaan, mutta 5G:n tukiasema ei ole kuitenkaan tyypillinen fyysinen rakenne vaan se muodostaa uudenlaisen loogisen verkon solmun (node) (Shetty 2021 k.1; Dahlman et al. 2020 s. 82). 5G-verkoissa tukiasemien ja verkon fyysisten laitteiden sijainnin merkitys osittain vähenee verrattuna aikaisempien sukupolvien verkkoihin (Talvitie 2021). 5G-verkon tukiasema voi nimittäin suorittaa radioyhteyden liittyviä toimintoja yhdessä tai useammassa solussa (Dahlman et al. 2020, s. 82). Tukiaseman suorittama signaalin prosessointi voidaan tehdä verkon alueella muuallakin kuin signaalin vastaanottaneessa tai lähettäneessä tukiasemassa, eikä signaalien prosessointi ole sidottu enää yhteen tukiasemaan, mikä mahdollistaa koko verkon prosessointikapasiteetin käyttämisen. On kuitenkin huomioitava, että tukiasemat ovat sijoitettava siten, että verkolle saadaan sopiva peittoalue. (Talvitie 2021)

3.3 5G NR -runkoverkko

5G-runkoverkko on vastuussa toiminnoista, jotka eivät liity radioyhteyden, mutta joita tarvitaan verkon tarjoamiseen (Dahlman et al. 2020, s. 79). Kun radiopääsyverkon tehtävänä on luoda yhteys ja siirtää dataa, niin runkoverkon tehtävä on liittää käyttäjät toisiinsa

verkkoihin, kuten internettiin (Talvitie 2021). Tämän tapahtumiseen tarvitaan useita toimintoja, joita runkoverkon funktiot suorittavat. Runkoverkko rakentuu erilaisia tehtäviä suorittavien toimintayksikköjen eli funktioiden varaan. Yksi verkon funktio esimerkiksi jakaa IP-osoitteita käyttäjälaitteille (Dahlman et al. 2020, s. 81) ja toinen luo turvallisia istuntoja käyttäjälaitteiden ja verkon välille ja kolmas siirtää käyttäjätietoa käyttäjälaitteelle ja -laitteilta (Rommer et al. 2019, s. 26).

Infrastruktuurin suurin ero 5G:n ja 4G:n välillä ovat 5G:n mahdollistamien virtuaalisten verkkojen käyttö. 4G aloitti aikanaan siirtymisen kohti virtuaalisia verkkoja mutta 5G vie muutoksen pidemmälle. (Shetty, 2021, k.1) 5G-runkoverkko tuo siten 4G:n runkoverkoon verrattuna kolme uudenlaista parannusta, jotka ovat palvelupohjainen arkkitehtuuri, verkon viipaloinnin tukeminen ja verkon kahden tason eli käyttäjätason ja kontrollitason erottamisen toisistaan (Dahlman et al. 2020, s. 79). Palvelupohjaisen arkkitehtuurin teknologia on ollut käytössä web-pohjaisissa sovelluksissa, mutta 5G:n myötä se tulee käyttöön myös matkapuhelinverkkoihin (Shetty 2021, k. 1).

Aikaisemmilla verkkoteknologiolla on ollut jokaisella erilainen toiminnallinen jako radio- ja runkoverkon välillä mutta 5G-runkoverkko tavoittelee radiopääsyteknologiasta riippumattonta rajapintaa, jotta 5G kestäisi tulevaisuuden asettamia haasteita paremmin (Rommer et al. 2019, s. 15). Koska aikaisemmin luetellut runkoverkon toiminnot käsitellään 5G:n runkoverkossa radiopääsyverkon sijasta, se mahdollistaa useiden radioyhteysteknologioiden palvelemisen samassa runkoverkossa. 5G voidaan yhdistää 4G-verkkoon, koska niiden radiopääsymenetelmät ja runkoverkot ovat samankaltaiset. Tämä on uusi mahdollisuus, sillä aikaisemmassa siirtymässä 3G-verkosta 4G-verkkoon, verkkojen yhdistäminen ei ollut mahdollista. (Dahlman et al. 2020, s. 79)

4. ENERGIANKULUTUS MATKAPUHELINVERKKOISSA

Tietoliikenneala on tietoinen sen energiankulutuksen haasteesta – ala kasvaa huomattavan nopeasti älypuhelinien käyttäjien määrän lisääntyessä (Srivastava 2020). Tutkimuksen ja ICT-alan keskuudessa vallitsee yhteisymmärrys 5G:n energiatehokkuuden tavoittelun tärkeydestä, koska ICT-ala on vastuussa jo merkittävästä osasta maailman hiilijalanjäljestä (Surya Vara Prasad et al. 2017). ICT-alan energiankulutuksen arvioitiin olevan vuonna 2020 14 prosenttia koko maailman energiankulutuksesta, kun taas vuonna 2030 osuuden arvioidaan olevan 21 prosenttia (Sitra 2020; Al-Quzweeni et al. 2019). Matkapuhelinverkkojen energiankulutuksen voidaan puolestaan olettaa nostavan ICT-alan energiankulutusta, koska suurin osa ICT-alasta on langatonta vuonna 2020 (Usama & Erol-Kantarci 2019). Canfora et al. (2020) mukaan matkapuhelinverkkojen osuus ICT-alan energiankulutuksesta nousee arvion mukaan 210 prosenttia vuosien 2011–2020 välillä Euroopassa (Canforan et al. 2020 mukaan Öko Institut 2013). Vaikka matkapuhelinverkot voivat mahdollistaa ympäristön kannalta kestäväää toimintaa, niiden kulutetun energian arvioitu kasvu vaatii huomiota (Pihkola et al. 2018).

4.1 Matkapuhelinverkkojen energiankulutukseen vaikuttavat tekijät

Viimeisten vuosikymmenien aikana tietoliikenneala sekä ICT-ala ovat kasvaneet tasaisesti sekä langallisten ja langattomien yhteyksien yleistyttyä. Vaikka Euroopassa kehittyneet tietoliikennejärjestelmät toimivat kattavasti, laitteita ja uusia palveluja tarjotaan, ala on jatkanut tasaista kasvua. (Canfora et al. 2020) VTT:n mukaan (2015) energiankulutukseen verkkojen suunnittelussa ei ole aikaisemmin kiinnitetty huomiota. Tämän seurauksena on kehitetty yhä enemmän energiaa ja resursseja kuluttavia järjestelmiä, joiden ympäristövaikutukset kasvavat jatkuvasti (Canfora et al. 2020).

Matkapuhelinverkkojen energiankulutukseen vaikuttavat verkon eri komponentit, kuten palvelinkeskukset, tukiasemat, tiedonsiirtäminen langallisesti ja langattomasti ja käyttäjälaitteet, kuten älypuhelimet. Palvelinkeskuksissa energiaa kuluu esimerkiksi palvelimien toimintaan, jäähtymiseen ja niiden virtalähteisiin (Motiva 2011). IEA:n raportin

(2020) mukaan palvelinkeskuksien energiankulutus ei ole merkittävästi kasvanut samalla dataliikenteen määrän kasvaessa vuoteen 2019 mennessä. Tämän kerrotaan johtuvan siitä, että palvelinkeskusten energiatehokkuuteen kiinnitetään huomiota ja kyseisen trendin jatkuessa, palvelinkeskusten energiankulutus voi pysyä lähes samana lähivuosina, vaikka niiden käyttö lisääntyy (IEA 2020 mukaan: IEA:n analyysi perustuen Masanet, E. et al. 2020). Palvelinkeskusten energian käytöstä on kuitenkin myös eriäviä arviointeja: EU:n raportin mukaan palvelinkeskusten energiankulutus voi nousta vuosien 2018–2030 välillä jopa 28 prosenttia (EU 2020). Pihkolan et al. (2018) mukaan käyttäjälaitteiden energiatehokkuus on parantunut, mutta niiden määrän kasvu sekä yksittäisen käyttäjälaitteen käytön lisääntyminen ylittävät jo niiden energiatehokkuuden kehittymisestä syntyneet energiansäästöt. Datan siirtäminen langallisesti valokuidun kautta taas on verrattain energiatehokas menetelmä mutta sille soveltuvan infrastruktuurin rakentaminen vaatii yhteyksien konkreettista rakentamista, kuten maan kaivamista, mikä voi vaikuttaa merkittävästi langallisen yhteyden hiilijalanjälkeen (Talvitie 2021). Datan siirtäminen langattomasti radiopääsyverkossa tukiasemien kautta on matkapuhelinverkon entisen energian käyttävä osa (3GPP 2021; Zhang et al. 2018; Lähdekorpi 2017; VTT 2015). Matkapuhelinverkon energiankulutuksesta noin 57 prosenttia voidaan kohdentaa tukiasemille (Pihkola et al. 2018).

Pihkolan et al. mukaan (2018) energiankulutus datayksikköä kohti on pienentynyt matkapuhelinverkkojen sukupolvien edetessä. Tukiasemien energiatehokkuus onkin VTT:n mukaan (2015) parantunut esimerkiksi 2010-luvulla. Silti matkapuhelinverkon kokonaisenergiankulutus on kasvanut, minkä merkittävin syy on tukiasemien kokonaismäärän ja dataliikenteen kasvu. (VTT 2015) Energiankulutuksen kasvun voidaan olettaa tänä aikana johtuvan silloisen uusimman verkkoteknologian eli 4G:n käyttöönotosta, jonka myötä tukiasemien määrä matkapuhelinverkossa kasvoi ja dataliikennettä kulki enemmän niiden kautta. Tätä tukee myös Ericssonin raportti (2020b), jonka mukaan matkapuhelinverkkojen dataliikenne on kasvanut esimerkiksi vuosien 2015–2020 aikana noin 5 EB:sta 50 EB:iin eli eksabittiin.

Käytössä olevien mobiililaitteiden, kuten älypuhelimien, määrä kasvaa maailmanlaajuisesti, mikä johtaa kasvavaan myös dataliikenteeseen (Pihkola et al. 2018). Vuonna 2020 matkapuhelimen käyttäjiä oli noin 7,9 miljardia ja vuoden 2026 loppuun mennessä määrän arvioidaan nousevan 8,8 miljardiin, joista suurin osa (75–85 %) on älypuhelimien liittymiä (Ericsson 2020b). Älypuhelinliittymissä datankäytön voidaan olettaa olevan suurempaa kuin perinteisessä matkapuhelimessa. Pihkolan et al. mukaan (2018) dataliiken-

teen jatkuva kasvaminen nostaa verkon kokonaisenergiankulutusta. Matkapuhelinverkkojen dataliikenteen määrä taas vaikuttaa verkon komponenttien energiankulutukseen. Voidaan olettaa, että tukiasemat käyttävän laskenta- ja lähetystehoa datan siirtämiseen radiosignaalien muodossa käyttäjälaitteelle. Canfora et al. tukee (2020) dataliikenteen ja yhteyttä verkon laitteiden energiankulutukseen: nykyaikaisten tietoliikennelaitteiden energiankulutus on suurin, kun dataliikenteen aiheuttama kuormitus on suurin mahdollinen, mutta energiankulutus ei kuitenkaan vähene merkittävästi, vaikka dataliikenteen määrä vähenee. Schien et al. mukaan (2013) matkapuhelinverkon energiankulutus kasvaa, kun dataintensiivistä sisältöä ladataan käyttämällä mobiililaitteita (Pihkola et al. 2018 mukaan Schien et al. 2013). Mobiililaitteet, kuten älypuhelimet ovat keskeisiä tekijöitä dataliikenteen muodostumisessa, koska ne esimerkiksi tuottivat 95 prosenttia kaikesta mobiilidataliikenteestä vuonna 2020 ja niiden osuuden arvioidaan jatkossa edelleen kasvavan (Ericsson 2020b).

Statistan (2021) mukaan 4G-verkot ovat syrjäyttäneet lanseerauksensa jälkeen 2G- ja 3G-verkkojen osuutta maailmassa ja ne jatkavat leviävää vielä vuoteen 2025 asti. 4G-verkon käyttö lisääntyy edelleen maailmanlaajuisesti myös puheliikenteessä, mikä tarkoittaa sen käyttämistä puheluiden soittamiseen 2G tai 3G:n sijasta. (Ericsson 2020b) Myös 4G-verkon ominaisuudet ovat kehittyneempiä kuin sitä aikaisempien verkkojen ja siten sen energiankulutus on suurempi, mikä pätee myös 5G-verkkoihin (Usama & Erol-Kantarci 2019). Tämän voidaan olettaa johtuvan siitä, koska 5G-verkot tuovat matkapuhelinverkon toimintaan lisäominaisuuksia ja kykyjä, niiden energiankulutus on suurempi kuin 4G-verkon. Ericssonin raportin (2020b) mukaan huomattava määrä 5G-verkon käyttäjiä ilmestyy jo vuoden 2021 jälkeen. Tällöin energiankulutuksen lisääntyminen matkapuhelinverkoissa voidaan olettaa johtuvan molempien verkkoteknologioiden leviämisestä. Kuitenkin Ericssonin raportin (2020b) mukaan 5G-liittymät yleistyvät nopeammin kuin 4G-liittymät aikanaan. Se tarkoittaa nopeaa 5G-verkkojen infrastruktuurin rakentamista, mikä johtaa kehittyneemmän verkon takia suurempaan kokonaisenergiankulutukseen. Samaan aikaan uudempien matkapuhelinverkkojen merkitys maailmassa kasvaa, kun vanhempien vähenee, joten matkapuhelinverkkojen kokonaisenergiankulutuksen voidaan olettaa kasvavan myös.

4.2 Dataliikenteen kasvu ja käyttötottumusten muuttuminen

Maailmanlaajuiseen datan käytön kasvuun voidaan löytää erilaisia syitä erilaisilta alueilta, minkä voidaan olettaa johtuvan verkon ja matkapuhelimien erilaisesta penetraatiosta alueiden välillä. Esimerkiksi Sveitsissä yli 90 prosenttia maan asukkaista eli 5G-

verkon peittoalueella jo vuonna 2019, kun taas muualla maailmassa on alueita, joissa rakennetaan vielä 4G-verkon peittoalueita. (Ericsson 2020b) Erilaisesta verkon penetraatiosta seuraa suuria vaihteluita dataliikenteen kasvussa eri alueiden välillä. Ericssonin raportin mukaan Koillis-Aasiassa tarjotaan edullisia matkapuhelinliittymiä sekä uudenlaisia mobiilisovelluksia ja sisältöä. Kaakkois-Aasiassa ja latinalaisessa Amerikassa taas dataliikenteen kasvua vauhdittaa verkon kattavuuden lisääminen ja 4G:n käyttöönotto, mikä aiheuttaa älypuhelintilausten kasvua ja älypuhelinkohtaisen keskimääräisen datankäytön lisääntymistä. Pohjois-Amerikassa sijaitsee älypuhelimet tunteva kuluttajakunta, joille tarjotaan liittymiä suurilla datapaketeilla, joita taas käytetään paljon dataa kuluttaviin videokeskeisiin sovelluksiin. Lisäksi, kun kuluttajat ottavat käyttöön VR- ja AR-palveluja, pitkällä aikavälillä on odotettavissa vielä suurempaa dataliikenteen kasvua. (Ericsson 2020b)

Vaikka eri alueilla on erilaisia syitä dataliikenteen kasvuun, yhteistä alueille on käyttäjäkohtaisen dataliikenteen kasvaminen (Pihkola et al. 2018). Joillakin alueilla mobiilidatan käyttäminen on keskimäärin huomattavasti halvempaa kuin langallisen yhteyden käyttäminen. Mikäli matkapuhelinyhteydet ovat kustannuksiltaan alhaisia ja samaan aikaan tehokkaita, ne sallivat käyttäjien ladata jatkuvasti enemmän sisältöä verkosta. (Pihkola et al. 2018)

Videosisällön osuus matkapuhelinverkon dataliikenteestä on Ericssonin arvion mukaan 66 prosenttia ja sen odotetaan kasvavan vuoteen 2026 mennessä 77 prosenttiin (Ericsson, 2020b). Dataa kulutettiin Ericssonin raportin mukaan vuonna 2019 eniten videoiden katseluun, sitten sosiaaliseen verkostoitumiseen, ja lopuksi ohjelmistojen lataamiseen ja päivittämiseen, internetin selaamiseen sekä audion kuluttamiseen. Arvioidaan, että vuonna 2025 videoiden osuus kulutetusta datasta kasvaa samalla, kun sosiaaliseen verkostoitumiseen kuluu suhteellisesti vähemmän dataa kuin vuonna 2019. Samoin internetin selaamiseen ja audion kuluttamiseen kuluu suhteellisesti vähemmän dataa kuin vuonna 2019. (Ericsson 2020b)

Barakabitze et al. mukaan (2020) voidaankin sanoa, että videosisällön kulutuksen kasvaminen eksponentiaalisesti mobiililaitteissa ja esineiden internetin kehittyminen, ovat toimineen 5G-verkkojen kehittämisen motivaationa. 5G:n myötä matkapuhelinverkoissa saavutetaan korkeammat datansiirtonopeudet kuin koskaan aikaisemmin, mikä mahdollistaa uusien sovellusten kehittämisen (Shetty 2021, k. 1). Yksinkertaisesti 5G-verkko mahdollistaa erilaisia palveluita ja käyttökohteita monille eri toimialoille. Nämä mahdollisuudet voidaan jakaa kolmeen osaan: laajakaistainen matkapuhelinverkko (eeMB), mas-

siivisen esineiden internetin tukemisen (mMTC) sekä erittäin luotettavat ja alhaisen viiveen yhteydet (URLLC) (Rommer et al. 2019, s. 61). Erittäin luotettavat ja alhaisen viiveen yhteydet tarjoavat laadukkaan yhteyden, jota voidaan käyttää esimerkiksi itsestään ohjautuvassa liikenteessä ja tehtaiden automatisoinnissa (Dahlman, et al. 2020, s. 4) tai terveydenhuollossa etänä tapahtuvassa kirurgiassa. (Shetty 2021, k. 1). Massiivinen esineiden internet mahdollistaa uudenlaisia IoT-kokemuksia ja esimerkiksi älykkäitä kaupunkeja (Shetty 2021, k.1). Uusia sovelluskohteita laajakaistaisessa matkapuhelinverkossa voivat olla esimerkiksi virtuaalisen ja lisätyn todellisuuden käyttö pelaamisessa tai liiketoiminnassa ja erittäin korkealaatuiset videot (Liyanage et al. 2018, s. 32). 5G-verkko tuo siis uudenlaisia käyttötottumuksia ja monet sovelluskohteet, kuten korkealaatuiset videot, ovat dataintensiivisiä ja lisäävät yleistyessään kokonaisdataliikennettä. Dataliikenteen määrän odotetaan kasvavan nopeasti 5G:n myötä, ja vuonna 2026 5G kuljettaa arvioilta 54 prosenttia maailman mobiilidataliikenteestä (Ericsson 2020b).

4G-verkko keskittyy toimimaan älypuhelimien kanssa ihmisten välisessä viestinnässä, kun taas 5G-verkon odotetaan tukevan älypuhelimien ja ihmisten välisen viestinnän lisäksi muutakin, kuten uusia sovelluksia ja teollisuutta. (Liyanage et al. 2018, s. 44–46) 5G-yhteyden odotetaan kuluttavan noin 4,7 kertaa enemmän dataa kuin 4G-yhteyden (Barakabitze et al. 2020 mukaan Cisco 2020).

Matkapuhelinliittymien ja verkkoon liitettyjen IoT-laitteiden lukumäärät nousevat. 5G:n myötä verkkoon halutaan liittää runsaasti uusia erilaisia laitteita, kuten kodinturvallisuuden sensoreita, tabletteja ja puettavia laitteita, jotka seuraavat terveyttä (Usama & Erol-Kantarci 2019). Vuonna 2019 näitä IoT-laitteita oli 12 miljardia ja niiden määrän arvioidaan nousevan 25 miljardiin vuoteen 2025 mennessä (IEA, 2020 mukaan: GSMA, 2020). Voidaan olettaa että, mitä enemmän matkapuhelinverkkoihin on liitetty käyttäjiä ja IoT-laitteita, sitä enemmän verkoissa on dataliikennettä. Samalla 5G tuo mukanaan uusia ja vielä tuntemattomia sovelluskohteita, joiden todellista vaikutusta dataliikenteen kasvuun ei voida arvioida.

4.3 5G NR -verkkojen vaikutus energiankulutukseen

Matkapuhelinverkoilta odotetaan jatkuvasti enemmän kapasiteettia ja peittoaluetta (Ericsson, 2020b). 5G:n ennakoitu 1000-kertainen kapasiteetin lisääminen halutaan saavuttaa nykyisellä tai sitä alhaisemmalla energiankulutuksella (Usama & Erol-Kantarci 2019). Kuitenkin monet yksityiskohdat 5G-verkossa viittaavat siihen, että tavoitteen saavuttamisessa on haasteita, joita tarkastellaan tässä luvussa.

Mitä enemmän matkapuhelinverkkoihin on liitetty käyttäjiä ja IoT-laitteita, sitä enemmän verkoissa on dataliikennettä ja sitä enemmän tarvitaan tukiasemia sinne, missä kysyntää verkolle on. Jotta 5G-verkko toimii odotetusti, verkon tukiasemien määrä kasvaa ja ne on sijoitettava lähemmäksi toisiaan kuin aikaisemmissa verkoissa. Näin käy varsinkin tiheästi asutuilla alueilla, joissa tarvitaan mahdollisuutta palvella monia käyttäjiä samaan aikaan, kuten kaupungeissa (Spectrum IEEE 2018). Verkon fyysisten laitteiden (engl. hardware) energiatehokkuutta kehittämällä on saatu aikaan aikaisemmin merkittäviä säästöjä matkapuhelinverkkojen energiankulutuksessa laitteiden tasolla. Kuitenkin 5G-verkossa tukiasemia on asetettava lähemmäksi toisiaan, mikä tarkoittaa tukiasemien määrän merkittävää lisääntymistä verkon alueella. Tällöin aikaisemmin jatkunut asteittainen kehitys verkon fyysisten laitteiden energiatehokkuudessa on riittämätöntä. (Abdullaziz et al. 2017) 5G:n tukiasemissa on myös 4G:n tukiasemia enemmän antennoja, jotka kasvattavat 5G:n tukiaseman energiankulutusta 4G:n tukiasemaan nähden (Pihkola et al. 2018). Matkapuhelinverkoissa etäisyyksien lyhentyessä lähetystehon merkitys pienenee mutta laskentatehon merkitys kasvaa (Pihkola et al. 2018). Esimerkiksi IoT-laitteiden määrän runsas lisääntyminen aiheuttaa myös laskennallisen tehon käytön lisääntymisen tukiasemissa, mikä nostaa verkon energiankulutusta (Usama & Erol-Kantarci 2019).

Käyttäjälaitteiden ja verkon kehittyminen on nostanut niiden energiankulutusta (Usama & Erol-Kantarci 2019). Joka kerta, kun uusi matkapuhelinverkko on lanseerattu, matkapuhelinverkkojen energiankulutus on kasvanut huomattavasti (Ericsson 2020c). Osa verkon tarjoajista on arvioinut, että heidän energiankulutuksensa tulee kaksinkertaistumaan, kun päivittävät verkkonsa 5G:hen (Ericsson 2020a). 5G:n korkea tiedonsiirtonopeus ja kysyntä korkealaatuiselle viiveettömälle verkolle rajoittavat myös sen mahdollisuuksia alentaa energiankulutustaan. (Usama & Erol-Kantarci 2019)

Kuten luvussa 4.1 sanotaan, 4G:n käyttöönoton myötä tukiasemien määrä ja siirrettävän datan määrä kasvoi johtaen verkon energiankulutuksen kasvamiseen. Tästä päätellä, että 5G:n käyttöönoton myötä verkkojen energiankulutus kasvaa. Myös Nokian mukaan (2020) 5G-verkot vaativat toimenpiteitä, jotta sen energiatehokkuutta voidaan parantaa jatkossa sekä minimoida päästöjä, jotka seuraavat niiden myötä tulevasta eksponentiaalisesta dataliikenteen kasvusta. (Nokia, 2020)

On arvioitu, että 5G-verkkojen energiatehokkuus on 100-kertainen verrattuna 4G-verkkoihin (Liyanage et al. 2018, s.36). Myös Nokian tutkimuksen mukaan 5G:n energiatehokkuus lähetettyä datayksikköä kohti on 90 prosenttia pienempi kuin 4G:n (Nokia 2020).

Kuitenkin 5G-verkon sähkönkulutus on kokonaisuudessaan merkittävästi suurempi kuin 4G-verkon (Euractiv 2020; Huawei 2020). Arvioidaankin, että 5G-laitteisto kuluttaa kahdesta neljään kertaa enemmän energiaa kuin 4G-laitteisto. Esimerkiksi Kiinassa matkapuhelinverkkojen sähkönkulutus ylittää 50 miljardia kWh ja kun 5G-verkkojen myötä se ylittää arviolta 100 miljardia kWh. (Huawei 2020) Voidaan siis todeta, että 5G-verkot ovat energiatehokkaampia kuin sitä aikaisemmat verkot mutta niiden käyttöönotto lisää matkapuhelinverkkojen energiankulutusta. Kuten kuvasta 2 voidaan havaita, että muutos matkapuhelinverkkojen energiankulutuksessa johtuu verkkolaitteiden kehityksestä ja käyttäjien, dataliikenteen ja tukiasemien määrän kasvusta, sekä kehittyneiden verkkojen leviämisestä maailmalla.



Kuva 2: Matkapuhelinverkon energiankulutuksen kasvuun vaikuttavat tekijät

On myös huomioitava, että virtuaaliset verkot lisääntyvät 5G:n myötä, eikä niiden energiankulutuksen mittaamiseen ole kehitetty vielä standardeja (3GPP 2021). Tämä voi hankaloittaa 5G-verkkojen todellisen energiatehokkuuden mittaamista. Matkapuhelinverkkojen energiatehokkuus on kuitenkin eri verkon sukupolvien ajan kehittynyt, vaikka siihen onkin kiinnitetty huomiota vasta 5G-verkkojen myötä. Koska matkapuhelinverkkojen kokonaiskulutus on kasvanut ja ennusteet osoittavat trendin jatkuvan, voidaan olettaa, että matkapuhelinverkkojen leviäminen ja niiden määrän kasvaminen aiheuttavat niiden energiankulutuksen kasvamisen. Myös, kun verkon suorituskyky ja kapasiteetti kasvavat, niiden energiantarve kasvaa (VTT 2015). Matkapuhelinverkkojen kehittyminen ja niiden yleistymisen maailmassa aiheuttavat niiden energiankulutuksen kasvamista. Vaikka 5G-verkot kuluttavat energiaa enemmän kuin aikaisemmat matkapuhelinverkot niin 5G-verkkojen energiatehokkuuden parantamiseen on kehitetty keinoja. Niitä tarkastellaan seuraavassa luvussa.

5. 5G NR –VERKON ENERGIATEHOKKAITA KEINOJA

5G-verkko on aikaisempia matkapuhelinverkkojen sukupolvia energiatehokkaampi (Nokia 2020; Pihkola et al. 2018). Tässä luvussa käsitellään, mitkä keinot kehittävät 5G-verkkojen energiatehokkuutta. Ensin tarkastellaan radiopääsyverkon ja tukiasemien keinoja, minkä jälkeen käydään läpi runkoverkon keinoja energiatehokkuuden kehittämiseen. Keinoissa keskitytään runkoverkon sekä radiopääsyverkon merkittävimpiin keinoihin, joita on ehdotettu kehittämään 5G-verkkojen energiatehokkuutta.

5.1 Radiopääsyverkon ja tukiasemien energiatehokkaita keinoja

Tässä luvussa tarkastellaan, mitkä keinot voivat lisätä 5G:n radiopääsyverkon ja tukiasemien energiatehokkuutta. Erilaisia keinoja vaikuttaa radiopääsyverkon ja tukiasemien energiatehokkuuteen useita, eikä niitä kaikkia voida käydä läpi. Mainitsemisen arvoisia keinoja ovat myös sellaiset, jotka eivät suoraan kehitä verkon energiatehokkuutta, vaan mahdollistat esimerkiksi käytetyn energian hyötykäytön. Näin Nokian ja Elisan yhteisessä tukiasemaratkaisussa, jossa tukiasemaa viilennetään nestejäähdytyksellä, jolloin tukiaseman toiminnan hukkalämpö voidaan käyttää kiinteistöjen lämmitykseen (Uusi-teknologia 2020). Monissa energiatehokkuutta tutkivissa tutkimuksissa käytetään uusiutuvia energianlähteitä 5G-verkoille (Usama & Erol-Kantarci 2019), mutta nekin jätetään tämän tarkastelun ulkopuolelle. Tässä luvussa tarkasteltavat keinot mielletään merkittävimiksi energiatehokkaiksi keinoiksi 5G-radiopääsyverkossa sekä tukiasemissa.

5.1.1 Tukiasemien lepotilat

Kuten 4.1 luvussa kerrottiin, suurin osa energiasta langattomassa verkossa kuluu tukiasemien toimintaan. Nykyisten matkapuhelinverkkojen ongelmana onkin niiden tukiasemien dataliikenteen määrästä riippumattomat signaalit, joita kutsutaan usein myös aina-päällä signaaleiksi. Niitä lähetetään jatkuvasti riippumatta siitä, onko tukiaseman solussa aktiivista dataliikennettä vai ei. Näiden signaalien avulla tukiasema voi arvioida esimerkiksi lähetyskanavansa laatua seuraavaa mahdollista lähetystä varten. (Dahlman et al. 2020, s. 59) Kun solussa ei ole käyttäjiä, tukiasemat lähettävät tiettyjä signaaleja, joiden

on tarkoitus antaa käyttäjälaitteille mahdollisuus löytää kyseinen solu (Talvitie 2021). Tällaiset aina-päällä olevat signaalit vähentävät matkapuhelinverkon energiatehokkuutta sekä häiritsevät toisen solun tukiaseman signaaleja käyttäjälaitteiden kanssa, mikä taas vähentää tiedonsiirtonopeutta ja dataliikenteen määrää. Koska 5G-verkoissa voidaan käyttää pieniä soluja, tietyn alueen dataliikenne jakaantuu helposti useiden solujen kesken. Tällöin keskimääräinen datakuorma tukiasemaa kohti voidaan olettaa olevan alhainen, jolloin näiden signaalien jatkuva lähettäminen muodostaa merkittävemmän osan verkon lähetyksistä. (Dahlman et al. 2020 s. 59)

Matkapuhelinverkoissa kulkevan dataliikenteen määrä vaihtelee huomattavasti alueen ja ajan mukaan (Canfora et al. 2020 s. 203). Päivisin liikennettä on enemmän, koska käyttäjät kuluttavat dataa työaikana sekä vapaa-ajalla mutta yöllä dataliikennettä on vähemmän. Sen seurauksena suuri määrä energiaa käytetään tukiaseman pitämiseen aktiivisena esimerkiksi öisin. (Srivastava 2020) Tällä hetkellä tietoliikennelaitteet kuluttavat eniten energiaa, kun dataliikenteen kuormitus on suurin mahdollinen. Vaikka dataliikenteen kuormitus vähenee, laitteiden energiankulutus ei vähene merkittävästi, joten huomattava osa verkon energiankulutuksesta käytetään koko järjestelmän kapasiteetin tarjoamiseen, vaikka kapasiteetin todellinen tarve olisi merkittävästi pienempi. (Canfora et al. 2020 s. 203)

Mikäli alikuormitetut tukiasemat asetetaan dynaamisesti pois päältä, käyttäjää voidaan palvella jäljelle jäävistä aktiivisista tukiasemista. Dataliikenteen kuormituksen mukaan tukiasemat voivat vaihtaa tilaansa aktiivisen, lepotilan tai inaktiivisen väliltä. Tukiasemien lepotilat voidaan myös jakaa useisiin erilaisiin lepotasoihin. (Srivastava 2020) Lähdekorven et al. tutkimuksessa (2017) esiteltiin tukiasemien ajastettu lepotila, jonka avulla voidaan vähentää tukiasemien energiankulutusta (Al-Quzweeni et al. 2019 mukaan: Lähdekorpi et al. 2017). Lähdekorven tutkimuksen (2017) mukaan dataliikenteen määrällä on suuri vaikutus tukiasemien mahdollisessa energiansäästöissä. Kun dataliikennettä on keskimääräinen määrä, mahdollinen energiansäästö on 52 prosenttia. Kun taas dataliikennettä ei ole, mahdollinen energiansäästö on 92 prosenttia. Ero energiansäästöissä johtuu siitä, että normaalissa dataliikenteessä tukiaseman todellinen lepotilassa vietetty aika jää lyhyemmäksi kuin tilanteessa, jossa dataliikennettä ei ole. (Lähdekorpi 2017) Jotkin lepotilatekniikat säästävät merkittävästi energiaa mutta niiden käyttöönotto voi olla kallista (Srivastava 2020).

5.1.2 M-MIMO ja keilanmuodostus

Tukiasematasolla 5G:n energiatehokkuutta voidaan parantaa M-MIMO-tekniikan avulla (Massive Multiple Inputs Multiple Outputs) (Surya Vara Prasad et al. 2017; Srivastava, 2020). M-MIMO tarkoittaa massiivista moniantennitekniikkaa käyttävää antennia, joka voi vastaanottaa tai lähettää samaan aikaan yhtä monta signaalia kuin sillä on antennia. M-MIMO-tekniikan käyttö edellyttää korkeampien taajuuksien eli millimetriaallon käyttöä, jotta radiosignaalin aallonpituus vastaa antennien kokoa ja antennia on mahdollista pakata pienelle alueelle (Srivastava 2020 mukaan: Ejaz et al., 2020).

Korkea antennien lukumäärä viittaa energiatehokkaampaan antennisysteemiin (Srivastava, 2020). Antennien lukumäärän kasvattaminen mahdollistaa myös suuremman dataliikenteen läpäisemisen tukiasemassa (Pihkola et al. 2018). Kun antennien lukumäärä on merkittävästi suurempi tukiasemassa kuin käyttäjälaitteessa, käyttäjän havaitseman signaalin laatu paranee huomattavasti, jolloin lähetystehoa voidaan laskea. Käyttämällä massiivista moniantennitekniikkaa energiatehokkuuden pitäisi parantua verrattuna tavalliseen 4G-tukiasemaan matalatehoisten radiokomponenttien (RF components) käytön takia. (Pihkola et al. 2018)

M-MIMO sekä millimetriaallon käyttö mahdollistavat tukiaseman signaalien lähetystehojen pienenemisen, mutta samaan aikaan kasvattavat tukiasemalta vaadittavaa laskentatehon suuruutta (Ge et al. 2017). Mitä enemmän antennia on M-MIMO:ssa sitä enemmän energiaa käytetään signaalien laskentatehoon tukiasemassa, koska antennien lukumäärän noustessa tukiaseman radiosignaalia lähettävien komponenttien lukumäärä nousee, kuten käy myös signaalien aiheuttamalle prosessointitaakalle (Isabona & Srivastava 2017). Ge et al. tutkimuksessa (2017) tutkimuksessa todettiin, että tukiasemien laskentateholla on suuri vaikutus 5G-verkon pienien solujen energiatehokkuuteen, sillä 5G:n tukiasemien energiankulutuksesta yli 50 prosenttia kuluu laskentatehoon. Mikäli olisi mahdollista muuttaa aktiivisten antennien lukumäärää tukiasemassa käyttäjien mukaan, voitaisiin vaikuttaa merkittävästi systeemin energiatehokkuuteen. Siksi onkin laskettava energiatehokas määrä antennia tiettyä määrää käyttäjälaitteita kohti. (Pihkola et al. 2018) Antennien lukumäärän kasvaminen vaikuttaa myös laitteiston (hardware) monimutkaisuuteen (Isabona & Srivastava 2017).

5G käyttää usein keilanmuodostus ja M-MIMO-tekniikan yhdistelmää (Rommer, et al. 2019, s.66). Keilanmuodostuksessa signaali lähetään lähettäjältä keilamaisena säteenä vastaanottajalle, jolloin vältetään signaalin lähetys koko solualueelle. Energiaa ei tällöin

tarvitse käyttää signaalin lähettämiseen joka puolelle solua, vaan lähetettävän signaalin energia voidaan kohdistaa tiettyyn suuntaan. Signaalin vastaanottaja pystyy myös keskittymään kuuntelemaan pääosin lähettäjän suunnasta tulevia signaaleja, mikä vähentää muista suunnista tulevien häiriösignaalien määrää ja siten parantaa havaitun signaalin laatua. Mitä parempi signaalin laatu on, sitä enemmän voidaan myös lähettää dataa (higher data throughput). (Rommer, et al. 2019, s.66) Farahmand & Mohammadi tutkimuksen (2019) mukaan keilanmuodostukseen perustuva teknologia kehittää energiatehokkuutta pilvipohjaisissa verkoissa (Farahmand & Mohammadi, 2019), joita tarkastellaan seuraavassa luvussa.

Jotta keilanmuodostusta sekä moniantennitekniikkaa voidaan käyttää, tukiaseman on sopeuduttava solun aiheuttamiin muutoksiin kanavassa, johon radiosignaali lähetetään. Tukiaseman on tehtävä jatkuvaa lähetyiskanavan arviointia, jotta keilanmuodostus ja moniantennitekniikkaa voidaan kontrolloida optimaalisen lähetyksen suorittamiseksi (Rommer et al. 2019 s.67) Voidaan olettaa, että jatkuva lähetyiskanavan arviointi kuluttaa energiaa ja vaatii tukiasemalta laskentatehoa.

5.1.3 Pilvipohjainen radiopääsyverkko

Pilvipohjainen radiopääsyverkko eli Cloud-based Radio Access Network (C-RAN) mielletään merkittäväksi teknologiaksi 5G-verkoissa ratkaisemaan haasteita, jotka liittyvät energiatehokkuuden ohella myös tiedonsiirtonopeuksien kasvattamiseen sekä sen verkon viiveen vähentämiseen (Dinh et al. 2019). Pilvipohjaisessa radiopääsyverkossa irrotetaan etäradioantenni (Remote radio head) tukiaseman resurssiyksiköstä (Baseband Unit). Etäradioantenni voidaan yhdistää langallisesti resurssiyksikköön. (Liyanage et al. 2018 s. 42). Kun tämä irrotus tehdään, tukiasemassa suoritettavat toiminnot yksinkertaistuvat ja ne voidaan rakentaa yksinkertaisimmiksi ja vähemmän energiaa vaativiksi. Toimintojen siirtäminen pois tukiasemasta mahdollistaa tukiasemien laskentatehojen muuttamisen dynaamisesti sen dataliikenteen kuormituksen perusteella. (Bassoli et al. 2017)

Pihkolan et al. mukaan (2018) C-RAN-arkkitehtuuri parantaa 5G-verkon skaalautuvuutta sekä tehostaa verkon resurssien jakamista oikeaan paikkaan oikeaan aikaan. C-RAN:issa on yhteinen tukiasemien radiosignaalien käyttämien taajuusalueiden resurssipooli (baseband unit pool), joka jaetaan useiden solujen kesken. Kun tämä resurssipooli toimii yhteisenä resurssien lähteenä, resurssija on mahdollista jakaa tehokkaammin sinne, mihin niitä tarvitsee. (Pihkola et al. 2018) Voidaan olettaa, että kun resurssija

jaetaan tehokkaammin ja todellisen tarpeen mukaan, energiaa käytetään dataliikenteeseen, eikä tukiasemien pitämiseen aktiivisena ilman dataliikennettä. C-RAN:in yhteinen tukiasemien resurssiallas parantaa myös tukiasemien mahdollisuuksia asettua lepotiilaan, ja siten säästää energiaa (Pihkola et al. 2018).

C-RAN:in on osoitettu kehittävän 5G-verkkojen energiatehokkuutta (Al-Quzweeni et al. 2019 mukaan: Bassoli et al. 2017). Tutkimuksessa Bassoli et al. (2017) kuvattiin analyttinen malli, jonka avulla voidaan verrata perinteisiä RAN- ja C-RAN-arkkitehtuureja toisiinsa. Tuloksia voidaan käyttää hyödyksi 5G-verkkojen energiatehokkuuden parantamisessa. Tutkimuksessa osoitettiin, että C-RAN yhdessä verkkojen virtualisoinnin kanssa voivat säästää koko verkon energiankulutuksesta yli 38 prosenttia. (Bassoli et al. 2017) Pilvipohjaisessa radiopääsyverkon käyttämisessä on kuitenkin haasteita, kuten tukiasemien resurssipoolin liittäminen etäradioantenneihin, suorituskyvyn optimointi ja etäradioantennien sijoittamisen optimointi (Liyanage et al. 2018, s. 42).

5.2 Runkoverkon energiatehokkaita keinoja

Runkoverkon osalta 5G:n energiatehokkaiden keinojen sisällä vaikuttavat muun muassa verkon kapasiteettiin ja sen hallintaan liittyvät toiminnot. 5G-runkoverkon tehtävänä on hallita laskentatehon kapasiteettia ja siirtää sitä sinne, missä sitä tarvitaan (Talvitie, 2021). Voidaan päätellä, että mitä tehokkaammin runkoverkko pystyy jakamaan verkon resursseja, sitä energiatehokkaampi verkko on ja sitä paremmin se pystyy vastaamaan käyttäjien vaatimuksia suoriutumalla raskaasta dataliikenteestä. Runkoverkon energiatehokkuutta lisääviä keinoja on kuitenkin monia, eikä kaikkia voida tarkastella tässä tutkimuksessa. Tässä osassa tutkimusta huomataan, että 5G-runkoverkon arkkitehtuurin merkittävä ominaisuus on sen eri osien virtualisointi. Liyanagen et al. (2018) mukaan ohjelmoitu verkko, verkon funktioiden virtualisointi ja pilvilaskenta ovat 5G-runkoverkon merkittävimpiä mahdollistavia teknologioita (Liyanage et al. 2018, s. 44).

5.2.1 Pilvilaskenta, verkon funktioiden virtualisointi ja ohjelmoitu verkko

Pilvilaskennan (engl. Cloud computing) avulla voidaan virtualisoida laitteisto, jossa runkoverkko toimii. Pilvilaskennassa 5G:n runkoverkon funktiot nähdään virtuaalisina koneina, joita pilvipalvelun ohjaaja hallinnoi. Pilvilaskennassa resurssit keskitetään, jolloin niiden hallinta ja jakaminen helpottuu, mikä mahdollistaa radiopääsyverkon joustavan

toiminnan. Pilvilaskenta mahdollistaa palvelujen ja resurssien jakamisen kysynnän mukaan internetin yli. Resurssien keskittäminen johtaa kuitenkin kasvaneeseen viiveeseen, mikä ei välttämättä sovi joillekin uusille 5G:n mahdollistamille palveluille. (Liyanage et al. 2018, s. 46) Mikäli verkon resurssit ovat keskitetty verkossa niin voidaan olettaa, että niiden jakaminen kauemmas resurssipoolista vie enemmän aikaa kuin jos resurssit olisivat hajautettu verkon sisälle.

Pilvilaskennan avulla on muodostettu ajatus verkon funktioiden virtualisoinnista (engl. Network Function Virtualization). Se tarkoittaa sitä, että verkon funktiot toimivat virtuaalisina toimintayksikköinä tavallisten tietoliikennelaitteiden päällä. NFV:n avulla verkon funktiot voidaan ottaa käyttöön ja sijoittaa dynaamisesti tarpeen mukaan eri puolille verkkoa, siten verkon resurssit voidaan jakaa verkon virtuaalisille funktioille. (Liyanage et al. 2018, s. 45) Aiemmissa matkapuhelinverkoissa verkon eri toiminnot operoivat siellä, mihin niiden laitteistot olivat sijoitettu. NFV:n myötä on kuitenkin mahdollista virtualisoida verkon toiminnot, jolloin niiden mahdollistamat toiminnot eivät ole enää sidottuja laitteiston sijaintiin. Kun verkon funktiot toimivat ohjelmiston tavoin, on mahdollista siirtää verkon resursseja dynaamisesti sinne, missä resursseja tarvitsee. (Liyanage et al. 2018, s. 44–46) Al-Quzweeni et al. tutkimuksessa (2019) verkon funktioiden virtualisoinnin pohjalta saavutettiin keskimääräisesti 34 prosentin energiansäästö. Myös Canfora et al. (2020) mukaan verkon virtualisointi tuo merkittäviä mahdollisuuksia energiankulutuksen vähentämiseen. Verkon funktioiden virtualisointiin liittyy kuitenkin haasteita, kuten verkon funktioiden sijoittelun optimointi, verkon resurssien jakamisen suorittaminen sekä verkon resurssien hallinta ja ohjaaminen (Liyanage et al. 2018, s. 44).

Verkon joustavuuden ja ohjelmoitavuuden parantamisessa voidaan käyttää hyväksi ohjelmoitua verkkoa (engl. Software Defined Network). Ohjelmoitu verkko käyttää hyväksi 5G-verkon ominaisuutta, jossa käyttäjä- ja kontrollitaso ovat erotettu toisistaan, minkä avulla verkon infrastruktuuri voidaan rakentaa resurssien kysynnän varaan. (Liyanage et al. 2018, s. 44–46) SDN mahdollistaa 5G-verkkojen energiankulutuksen alentamisen mahdollistaman verkon joustavuuden kehittämisen avulla (Abdullaziz et al. 2017). Ohjelmoidussa verkossa verkon infrastruktuuri voidaankin rakentaa kysynnän ja palveluiden vaatimusten perusteella, mikä parantaa verkon resurssien käyttöä (Liyanage et al. 2018, s. 44). Voidaan olettaa, että kun verkon resursseja käytetään tehokkaasti, verkko pystyy kuljettamaan enemmän dataliikennettä käyttämälläan energialla. Myös Canfora et al. mukaan (2020) ohjelmistot sallivat joustavuuden lisäämisen verkon funktioiden toiminnassa, mikä johtaa parempaan verkon energiatehokkuuteen. Ohjelmistojen

avulla voidaan vähentää lisäksi esimerkiksi tarvittavan laitteiston määrää, sillä verkko-tarjoajat voivat jakaa fyysisiä verkon laitteita ja operoida silti itsenäisesti verkossa. (Canfora et al. 2020 s. 231) Ohjelmoidun verkon haasteisiin liittyvät esimerkiksi viiveen kasvamisen laitteiden ja ohjelmoidun verkon ohjaajan välillä, verkon kontrolli- ja käyttäjätason välisen kanavan turvallisuusriski sekä tämän kanavan standardisoinnin puute. (Liyanage et al. 2018, s. 44)

5.2.2 Hallinta ja ohjaus

Runkoverkon hallinta ja ohjaus (Management and Orchestration) eli MANO vastaa verkon resurssien jakamisesta sekä verkon viipaleiden yhteyden hallinnasta, jotta ne tapahtuvat dynaamisesti ja automaattisesti. MANO huolehtii verkon resursseista, kuten laskennasta ja suorituskyvystä. Verkon resurssien tehokas hallinta on 5G-verkon myötä yhä tärkeämpää, sillä verkon luotetaan palvelevan laadukkaasti erilaisia käyttökohteita ja palveluita kuluttajien tai teollisuuden keskuudessa. (Liyanage et al. 2018, s. 47–48)

Abdullaziz et al. tutkimuksessa (2017) tarkasteltiin muun muassa MANO-arkkitehtuurin SDN- ja NFV-pohjaisia ratkaisuja, ja todettiin, että niiden avulla oli mahdollista säästää 10–60 prosenttia 5G-verkkojen energiankulutuksesta ilman vaikutusta käyttäjän kokemaan palvelunlaatuun (Abdullaziz et al. 2017). Tällöin käyttäjän kokemaa palvelunlaatu pysyy hyvänä samaan aikaan kun verkon energiatehokkuus paranee. NFV MANO -konsepti onkin jo toteutettu useille avoimen lähdekoodin alustoille, joita sovelletaan nykyisen 4G:n runkoverkkoon sekä myöhemmin 5G:n runkoverkkoon (Liyanage et al. 2018, s. 47–48).

Koska verkon resurssit vaihtelevat radiopääsyverkon laitteiden resurssien ja runkoverkon funktioiden resurssien välillä, nykyinen NFV:n ja MANO:n yhdistetty viitekehys pitäisi laajentaa hallitsemaan virtuaalisten verkon funktioiden lisäksi fyysisiä verkon laitteita (node), minkä lisäksi dynaamisesti tarpeen mukaan verkon palveluiden ja viipaleiden hallinnointi on haastavaa. (Liyanage et al. 2018, s. 47–48)

5.2.3 Verkon viipalointi

Tässä luvussa keskitytään ainoastaan palvelupohjaisen runkoverkon näkökulmaan, vaikka käsitteellisesti verkon viipalointi kattaa sekä radiopääsyverkon että runkoverkon tekniikat. Palvelupohjaisessa arkkitehtuurissa (Service-based architecture) verkon funktioita jaetaan palveluina verkon eri toiminnoille ja toisille funktioille (Dahlman et

al. 2020, s. 80; Shetty 2021 k.1). Palvelupohjaisen arkkitehtuurin myötä 5G-verkossa voidaan käyttää verkon viipalointia (Dahlman et al. 2020, s. 80). Koska 5G:n myötä verkoon halutaan liittää runsaasti erilaisia IoT-laitteita, verkolta vaaditaan erilaisia ominaisuuksia ja verkon viipalointi mahdollistaa näiden tarjoamisen IoT-laitteille. Toisessa verkon viipaleessa voidaan korostaa esimerkiksi korkeaa tiedonsiirtonopeutta ja viiveettömyyttä, kun taas toisessa viipaleessa hitaampi tiedonsiirtonopeus ja suurempi viive voidaan sallia. SDN:n ja NFV:n yhdistäminen on edistänyt verkon viipaloinnin kehittämistä. (Liyanage et al. 2018, s.44–46)

Viipale koostuu sille tarpeellisista palvelupohjaisen arkkitehtuurin tarjoamista verkon funktioista, jotka ovat konfiguroitu keskenään. (Dahlman et al. 2020, s. 80) 5G-verkko rakentuukin useista verkon viipaleista, jotka ovat eristetty loogisesti muusta verkosta (Liyanage et al. 2018, s.44–46). Viipaleet käyttävät kuitenkin keskenään samaa runko- ja radiopääsyverkkoa. Verkon viipaleet näyttävät käyttäjille siis itsenäisinä verkkoina, kuten virtuaaliset tietokoneet yhden fyysisen tietokoneen sisällä. (Dahlman et al. 2020, s. 80) Viipaleelle varataan tietty määrä verkon resursseja (Liyanage et al. 2018, s.44–46).

Koska osa verkkoon liitetystä laitteista ei tarvitse nopeaa tiedonsiirtoa on verkon energiatehokkuuden näkökulmasta kannattavaa jakaa tällaisille laitteille vain vähän verkon resursseja. Kun verkon resursseja käytetään optimaalisesti ja tehokkaasti, mahdollistetaan energiatehokkuuden kehittäminen. Liyanage et al. mukaan (2018) verkon viipaloinnin haasteena on kuitenkin monia ongelmia ja standardien puuttuminen vaikeuttaa tekniikan käyttöä. Verkon viipaleiden määrittäminen, niiden elinkaarenhallinta ja hallinnan joustavuus asettavat haasteita. Myös resurssien jakaminen sekä optimointi viipaleen sisällä sekä verkon viipaleiden välillä on vielä tutkimuksen alaisuudessa. Näiden lisäksi myös viipaleiden turvallisuus ja niiden yhdistettävyyys muiden teknologioiden kanssa kuten laitteiden välisessä viestinnässä on haasteita. (Liyanage et al. 2018, s.44-46)

6. YHTEENVETO

Tässä luvussa esitellään tutkimuksen tulosten yhteenveto, muodostetaan päätelmiä ja arvioidaan tutkimuksen tuloksia. Lopuksi luvussa esitellään jatkotutkimusehdotukset.

6.1 Tutkimuksen tulokset

Energiankulutus ei ole aikaisemmin ollut keskiössä matkapuhelinverkkojen kehityksessä. Jokainen matkapuhelinverkon sukupolvi on kuluttanut myös enemmän energiaa, kuin sitä aikaisempi sukupolvi, koska verkkojen prosessit ovat tulleet vaativammiksi. Energiankulutukseen matkapuhelinverkoissa vaikuttavat verkon eri osat, mutta suurin osa energiasta kuluu tukiaseman toimintaan. 5G-verkkojen myötä tukiasemien määrä kasvaa, mistä voidaan päätellä matkapuhelinverkkojen energiankulutuksen kasvamista. Energiankulutus matkapuhelinverkoissa lisääntyy, koska sen käyttäjämäärät kasvavat, kehittyneemmät matkapuhelinverkot leviävät yhä laajemmalle maailmassa, verkon laitteiden ominaisuuksien kehittyvät, matkapuhelinverkkojen infrastruktuurin, kuten tukiasemien, määrä kasvaa sekä dataliikenteen määrä kasvaa. Dataliikenteen kasvu puolestaan vaikuttaa matkapuhelinverkkojen kokonaisenergiankulutukseen verkon komponenttien kuormituksen vuoksi. Verkon komponentit kuluttavat energiaa eniten, kun niiden läpi kulkee suurin mahdollinen dataliikenteen määrä, mutta niiden kulutus ei vähene merkittävästi dataliikenteen määrän vähentyessä.

Vaikka verkot kehittyvät eri alueilla eri aikaan, on kuitenkin nähtävillä maailmanlaajuinen trendi, joka vie kohti kehittyneempiä matkapuhelinverkkoja, jotka myös kuluttavat enemmän energiaa. Sitran (2020) mukaan kuitenkin kaikki tutkimukset eivät ennusta samanlaista negatiivista kuvaa energiankulutuksen kasvamisesta. Kuitenkin olisi johdonmukaista päätellä, että matkapuhelinverkkojen kokonaisenergiankulutus kasvaa näiden yleistyessä ja levitessä yhä laajemmille alueille joka puolella maailmaa.

4G-verkot aloittivat aikanaan matkapuhelinverkkojen kapasiteetin ja tiedonsiirtonopeuden kehittämisen, mutta 5G-verkot kehittävät näitä ominaisuuksia edelleen ja samalla ne edesauttavat käyttötottumusten muuttumista sallimalla suuremman dataliikenteen määrän siirtämisen lyhyemmässä ajassa. Samalla 5G myös mahdollistaa entistä enemmän dataa kuluttavien sovellusten syntymisen ja käytön. Matkapuhelinverkkojen yleistyminen ja niiden kapasiteetin kasvaminen on edistänyt dataliikenteen kasvua. Kuluttajat käyttävät mobiililaitteita yhä useammin paljon dataa kuluttaviin sovelluksiin (Barakabitze et al.

2020). Matkapuhelinverkossa kulkevan dataliikenteen määrän jatkuvaan kasvuun vaikuttaakin siis kuluttajien käyttötottumusten muuttuminen, kuten videoiden suoratoiston lisääntyminen, virtuaalisen todellisuuden ja lisätyn todellisuuden käyttäminen yksityiselämässä sekä niiden hyödyntäminen liiketoiminnassa, esineiden internetin runsas kasvamisen ja, tulevaisuudessa älykkäät kaupungit, teollisuuden tarpeet, kuten tehtaiden automatisointi ja uudenlaisten vielä tuntemattomien sovellusten suosion kasvu.

Tutkimustulosten perusteella voidaan sanoa, että 5G-verkkojen kehityksessä sen energiatehokkuus on otettu huomioon. Vaikka voidaan sanoa, että 5G on energiatehokkaampi kuin aikaisemmat matkapuhelinverkot, matkapuhelinverkkojen kokonaisenergiankulutus kasvaa merkittävästi niiden käyttöönoton myötä. Kuitenkin 5G-verkkojen energiankulutuksen arviointi ja ennakoiti on haastavaa, sillä kaikkia sen mahdollisuuksia ja tulevia käyttökohteita ei tunneta ja koska sen virtuaalisten verkkojen mittaamiseen ei ole kehitetty vielä standardeja. On mahdollista arvioida 5G-verkkojen energiatehokkuutta tutkimalla sen käytössä olevien ja sen käyttöön ehdotettujen teknologioiden energiatehokkuutta ja energiaa säästäviä menetelmiä. Tässä tutkimuksessa käsiteltiin molempien runko-, radiopääsyverkon sekä tukiasemien energiatehokkaita menetelmiä, ja havaittiin 5G-verkoissa kaikki kolme verkon osaa voivat vaikuttaa verkon energiankulutukseen.

Taulukko 2: 5G-verkkojen energiatehokkuutta kehittäviä keinoja sekä niiden mahdollisuudet ja haasteet

Matkapuhelinverkon osa	Keino	Toimintaperiaate	Energiatehokkuuden tai säästämisen mahdollisuudet	Haasteet
Tukiasemat	Tukiasemien lepotilat	Käyttämättömät tukiasemat menevät lepotilaan ja mahdolliset käyttäjät ottavat yhteyttä viereiseen tukiasemaan	Mahdollinen energiansäästö on 52–92 prosenttia riippuen dataliikenteen määrästä	Joidenkin teknikoiden käyttöönotto kallista
	Massiivinen moniantennitekniikka	Antennien lukumäärän kasvattaminen tukiasemassa ja lähetettävän radiosignaalin laadun parantaminen	Tukiaseman lähetystehon laskeminen	Tukiaseman laskentatehon lisääntyminen, laitteiston monimutkaisuus ja antennien optimaalisen lukumäärän laskeminen
	Keilanmuodostus	Tukiasema lähettää radiosignaalin vastaanottajalle keilamaisena säteenä	Tukiaseman lähetystehon laskeminen	Tukiaseman laskentatehon lisääntyminen ja jatkuva lähetyskanavan arviointi

Radiopääsyverkko	Pilvipohjainen radiopääsyverkko	Etäradioantennit ovat yhteydessä tukiasemien toimintayksikköön, ja käyttävät yhteistä resurssipoolia	Tukiasemat kuluttavat vähemmän energiaa, ja ne voidaan asettaa useammin lepotilaan. Säästää yhdessä muiden tekniikoiden kanssa yli 38 prosenttia verkon energiankulutuksesta.	Resurssipoolin liittäminen tukiasemiin, suorituskyvyn ja etäradioantennien sijoittamisen optimointi on haastavaa
Runkoverkko	Pilvilaskenta	Virtualisoidaan runkoverkon laitteisto	Keskitettyjen resurssien jakaminen kysynnän mukaan internetin yli	Verkon viive kasvaa
	Verkon funktioiden virtualisointi	Virtualisoidaan verkon funktiot, jolloin niiden toiminnot eivät ole enää sidottuja laitteiston fyysiseen sijaintiin	Verkon funktioiden virtualisoinnin pohjalta saavutettiin keskimääräisesti 34 prosentin energiansäästö.	Verkon funktioiden sijoittelun optimointi ja resurssien jakaminen, verkon hallinta ja ohjaaminen haastavaa
	Ohjelmoitu verkko	Verkon käyttäjä- ja kontrollitaso on erotettu toisistaan ja verkko rakennetaan kysynnän varaan	Verkon resursseja ja laitteita voidaan jakaa joustavasti tarpeen mukaan, mikä luo energiansäästöä	Verkon viiveen kasvaminen, turvallisuusriski ja standardisoinnin puute
	Hallinta ja ohjaus	Toimii yhdessä esimerkiksi verkon funktioiden virtualisoinnin kanssa ja hallitsee verkon resursseja	Voidaan säästää 10–60 prosenttia verkon energiankulutuksesta yhteistyössä ohjelmoidun verkon ja verkon funktioiden virtualisoinnin kanssa	Verkon fyysisten laitteiden resurssien hallinta verkon funktioiden resurssien lisäksi. Verkon palveluiden ja viipaleiden hallinta dynaamisesti on haastavaa
	Verkon viipalointi	Luo oikeanlaisilla ominaisuuksilla varustettuja verkkoja laitteille	Verkon resurssien optimaalinen ja tehokas käyttö, johtaa energiatehokkuuteen	Viipaleiden määrittely ja niiden elinkaarenhallinta, hallinnan joustavuus, resurssien jakaminen ja optimointi viipaleiden sisällä ja välillä, turvallisuus sekä yhdistettävyyden muiden teknologioiden kanssa on haastavaa

Taulukkoon 2 on koottu 5G-verkkojen energiatehokkuutta kehittäviä keinoja, joita tutkimuksessa löydettiin. 5G:n runkoverkon energiatehokkaiden keinojen havaitaan nojautuvan verkon virtualisointiin ja ohjelmointiin, jolloin kapasiteetin ja verkon toiminnan kannalta merkittävien resurssien jakaminen tehostuu verrattuna aikaisempiin matkapuhelinverkkoihin. Näitä keinoja olivat pilvilaskenta, ohjelmoitu verkko, verkon funktioiden virtualisointi, verkon hallinta ja ohjaus sekä verkon viipalointi. Pilvilaskenta, verkon funktioiden virtualisointi, ohjelmoitu verkko sekä verkon hallinta ja ohjaus linkittyvät vahvasti toisiinsa ja tekniikoita on käytetty usein yhdessä kehittämään verkon energiatehokkuutta. Myös radiopääsyverkon energiatehokkaista keinoista yksi tässä tutkimuksessa esitelty keino liittyy verkon resurssien dynaamiseen jakamiseen pilvipohjaisen radiopääsyverkon

avulla. Muut radiopääsyverkon ja tukiasemien ratkaisut liittyvät radioyhteyden kehittämiseen eri tekniikoiden avulla, kuten massiivisen moniantennitekniikan sekä keilanmuodostukseen ja energiaa säästävien tukiasemien lepotiloihin. Kun on tarkasteltu keinoja, joiden avulla 5G-verkot voivat toimia energiatehokkaammin, huomataan, että energiatehokkuuden kehittämiseen ei ole yksinkertaisia keinoja. Jotkin keinot vähentävät toisen komponentin energiankulutusta ja lisäävät toisen komponentin energiankulutusta. Löydettyihin energiatehokkuutta kehittäviin keinoihin liittyy myös paljon haasteita, jotka eivät liity samalla tavalla energiankulutuksen kasvamiseen toisessa komponentissa vaan esimerkiksi teknologian monimutkaisuuteen, turvallisuuteen tai fyysisten laitteiden sijoittelun optimointiin. Tutkimuksessa käsitelty aineisto antaa keskenään saman suuntaisia tuloksia energiatehokkuuden kehittymisestä matkapuhelinverkoissa, matkapuhelinverkkojen kokonaisenergiankulutuksesta ja tekijöistä, jotka vaikuttavat siihen.

6.2 Tulosten arviointi ja jatkotutkimusehdotukset

Tutkimuksen laajuus osoittautui haasteelliseksi sen rajausten takia. Tutkimuksessa ei voitu tarkastella kaikkia 5G-verkkojen energiatehokkuutta kehittäviä ratkaisuja niiden suuren lukumäärän vuoksi. Energiatehokkuutta kehittäviä ratkaisuja voidaan löytää runkoverkon ja radiopääsyverkon sisältä myös eri komponenttien tasoilta. Myös verkkojen ohjelmistojen välillä energiatehokkuudessa voi olla eroja. Tutkimuksessa kuitenkin tuotiin esille merkittävimpiä tekniikoita, joita voidaan hyödyntää energiatehokkuuden kehittämisessä molempien verkon osien kannalta. Varsinaisia energiatehokkuuden kehittämistä tai energiansäästöstä kertovia prosenttilukuja ei löydetty jokaisen tutkimuksessa tarkastellun keinon osalta. Kuitenkin löydettiin keinojen energiatehokkuutta tai energiansäästöä tukevia perusteluita, joiden avulla oli mahdollista muodostaa johtopäätöksiä. Tutkimuksessa ei käyty läpi muiden matkapuhelinverkon komponenttien, kuten datakeskusten ja käyttäjälaitteiden energiatehokkuuden kehittämisen menetelmiä. Myös niiden energiankulutus on kasvanut verkkojen kehittyessä samalla niiden lukumäärän kasvaessa.

Koska tutkimus käsittelee laajaa aihetta, on mahdollista löytää useita jatkotutkimusehdotuksia. Mikäli jatkotutkimuksessa tarkastellaan energiatehokkuutta, matkapuhelinverkon eri osat, kuten käyttäjälaitteet ja datakeskukset voivat olla keskiössä. Myös syventyminen 5G-verkon radiopääsyverkon ja tukiasemien sekä runkoverkon eri komponenttien energiatehokkuuteen ja sen kehittämisen keinoihin on mahdollista. Jatkotutkimuksen osalta olisi myös tärkeää tarkastella, miten energia voidaan tuottaa matkapuhelinverkon

laitteistolle, jotta käytettävän energian päästöjen merkitys pienenee. Koska matkapuhelinverkkojen merkityksen odotetaan kasvavan edelleen, dataliikenteen, käyttäjien ja verkkoinfrastruktuurin odotetaan lisääntyvän. Tarkasteltavaksi tulisi siten uusiutuvan energian ratkaisut matkapuhelinverkon energialähteenä. Dataliikenteen minimoiminen matkapuhelinverkoissa on myös mahdollinen jatkotutkimuksen aihe.

LÄHTEET

3GPP, 2021. Better energy efficiency for 5G. Saatavilla: https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/2159-ee_5g (3.5.2021)

Abdullaziz, O.I., Capitani, M., Casetti, C.E., Chiasserini, C.F., Chundrigar, S.B., Landi, G., Talat, S.T. 2017. 'Energy monitoring and management in 5G integrated fronthaul and backhaul', in 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). [Online]. 2017 IEEE. pp. 1–6.

Al-Quzweeni, A. N., Lawey, A. Q., Elgorashi, T. E. H., Elmirghani, J. M. H. 2019. Optimized Energy Aware 5G Network Function Virtualization

Ariso, J. M. 2017. Augmented Reality: Reflections on its Contribution to Knowledge Formation / Berlin / Boston: De Gruyter

Bassoli, R., Di Renzo, M., & Granelli, F. 2017. Analytical energy-efficient planning of 5G cloud radio access network. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996871>

Bates-Brkljac, N. 2012. Virtual reality. Nova Science Publishers.

Barakabitze, A., Ahmad, A., Mijumbi, R., & Hines, A. 2020. 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges. Computer Networks (Amsterdam, Netherlands: 1999), 167, 106984–. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106984>

Canfora P., Gaudillat P., Antonopoulos I., Dri M., Best Environmental Management Practice in the Telecommunications and ICT Services sector, maR 30365 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-21574-5, doi:10.2760/354984, JRC121781.

Chen, H., Guizani, M. 2006. Next Generation Wireless Systems and Networks.

Cisco, 2020. Cisco Annual Internet Report (2018–2023). Saatavilla: Cisco Annual Internet Report - Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper - Cisco

Dahlman E, Parkvall S, Skold J. 2020. 5g Nr: The Next Generation Wireless Access Technology. San Diego: Elsevier Science & Technology.

Dinh, T.H.L., Kaneko, M., Boukhatem, L. 2019. Energy-Efficient User Association and Beamforming for 5G Fog Radio Access Networks.

Ericsson, 2020a. Breaking the energy curve. Saatavilla: <https://www.ericsson.com/495d5c/assets/local/about-ericsson/sustainability-and-corporate-responsibility/documents/2020/breaking-the-energy-curve-report.pdf> (3.5.2021)

Ericsson, 2020b. Ericsson Mobility Report November. Saatavilla: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports> (3.5.2021)

Ericsson, 2020c. Breaking the energy curve. Podcast. Saatavilla: <https://soundcloud.com/ericsson-news-podcast/breaking-the-energy-curve> (3.5.2021)

Ericsson, 2021. Network Functions Virtualization (NFV). Saatavilla: <https://www.ericsson.com/en/nfv> (3.5.2021)

EU, 2020. Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market. Saatavilla: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/energy-efficient-cloud-computing-technologies-and-policies-eco-friendly-cloud-market> (3.5.2021)

Euractiv, 2020. Ericsson: 5G could 'dramatically increase' network energy consumption. Saatavilla: <https://www.euractiv.com/section/energy/news/ericsson-5g-could-dramatically-increase-network-energy-consumption/> (3.5.2021)

Farahmand, M., Mohammadi, A. (2019). Characterization of sparse beamforming for energy efficiency in cloud radio access networks using Gauss–Poisson process. *Wireless Networks*, 25(8), 4555–4567. <https://doi.org/10.1007/s11276-018-1752-x>

Ficom, 2020. Langattomat sukupolvet 1G, 2G, 3G, 4G, 5G. Saatavilla: <https://www.ficom.fi/ajankohtaista/uutiset/langattomat-sukupolvet-1g-2g-3g-4g-5g%E2%80%A6> (3.5.2021)

Ge, X., Yang, J., Gharavi, H., & Sun, Y. 2017. Energy Efficiency Challenges of 5G Small Cell Networks.

GSMA, 2020. The Mobile Economy. Saatavilla: https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/03/GSMA_MobileEconomy2020_Global.pdf. (3.5.2021)

Guizani, Z., Hamdi, N. 2017. CRAN, H-CRAN, and F-RAN for 5G systems: Key capabilities and recent advances

Huawei, 2020. 5G Power: Creating a green grid that slashes costs, emissions & energy use. Saatavilla: <https://www.huawei.com/en/publications/communicate/89/5g-power-green-grid-slashes-costs-emissions-energy-use> (3.5.2021)

IEA, 2020. Data Centres and Data Transmission Networks. Saatavilla: <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks> (3.5.2021)

IEA analysis based on Masanet, E. et al. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates, *Science*, 367(6481), 984-986, <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>. (3.5.2021)

Isabona, J. & Srivastava, V., M. 2017. Downlink Massive MIMO Systems: Achievable Sum Rates and Energy Efficiency Perspective for Future 5G Systems. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11277-017-4324-y>

Kharbuli, P. V., Sultana, A. 2018. A Comparative Study on the Generations of Mobile Wireless Telephony: 1G-5G

Liyanaage, M., Ahmad, I., Abro, A., Gurtov, A., & Ylianttila, M. 2018. A Comprehensive guide to 5G security (1st edition). John Wiley & Sons. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?pq-origsite=primo&docID=5216619>

Lähdekorpi, P., Hronec, M., Jolma, P., & Moilanen, J. 2017. Energy efficiency of 5G mobile networks with base station sleep modes. 2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), 163–168. <https://doi.org/10.1109/CSCN.2017.8088616>

Motiva, 2011. Energy-efficient Data Centre. Saatavilla: https://www.motiva.fi/files/5321/Energy-efficient_Data_Centre.pdf (3.5.2021)

Nokia, 2020. Open RAN explained. Saatavilla: <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/open-ran-explained/>.

OECD, 2021. Information and communication technology (ICT) Saatavilla: https://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/information-and-communication-technology-ict/indicator-group/english_04df17c2-en

Pihkola, H., Hongisto, M., Apilo, O. & Lasanen, M., 2018, Valuating the Energy Consumption of Mobile Data Transfer—From Technology Development to Consumer Behaviour and Life Cycle Thinking

Rommer, S., Hedman, P., Olsson, M., Frid, L., Sultana, S., Mulligan, C. 2019. 5G Core Networks: Powering Digitalization. San Diego: Elsevier Science & Technology

Rubí, J.N.S. & Gondim, P.R.L., 2019. IoMT Platform for Pervasive Healthcare Data Aggregation, Processing, and Sharing Based on OneM2M and OpenEHR 25.

Salminen, A 2011. Mikä kirjallisuuskatsaus? Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyypeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin. Vaasan yliopisto, Vaasa

Schien, D.; Shabajee, P.; Yearworth, M.; Preist, C. 2013. Modeling and assessing variability in energy consumption during the use stage of online multimedia services. J. Ind. Ecol. 2013, 17, 800–813. [CrossRef]

Shetty, R. S. 2021. 5G Mobile Core Network Design, Deployment, Automation, and Testing Strategies. 1st ed. 2021. [Online]. Berkeley, CA: Apress. <https://learning.oreilly.com/library/view/5g-mobile-core/9781484264737/>

Sitra, 2020. Tuhoaako vai pelastaako digitalisaatio ympäristöä. Saatavilla: <https://www.sitra.fi/artikkelit/tuhoaako-vai-pelastaako-digitalisaatio-ymparistoa/> (3.5.2021)

Spectrum IEEE, 2018. The 5G Dilemma: More Base Stations, More Antennas—Less Energy. Saatavilla: <https://spectrum.ieee.org/energywise/telecom/wireless/will-increased-energy-consumption-be-the-achilles-heel-of-5g-networks>

Srivastava, A., Gupta, M., S., Kaur, G., 2020. Energy efficient transmission trends towards future green cognitive radio networks (5G): Progress, taxonomy and open challenges

Statista, 2021. Market share of mobile telecommunication technologies worldwide from 2016 to 2025, by generation. Saatavilla: <https://www.statista.com/statistics/740442/worldwide-share-of-mobile-telecommunication-technology/>

STUK, n.d. Matkapuhelinverkon toiminta ja tukiasemat. Saatavilla: <https://www.stuk.fi/aiheet/matkapuhelimet-ja-tukiasemat/matkapuhelinverkko/matkapuhelinverkon-toiminta-ja-tukiasemat>

Surya Vara Prasad, K., Hossain, E., & Bhargava, V. (2017). Energy Efficiency in Massive MIMO-Based 5G Networks: Opportunities and Challenges. IEEE Wireless Communications, 24(3), 86–94. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500374WC>

Talouselämä, 2019. Digitalous. Saatavissa: <https://www.talouselama.fi/uutiset/langaton-tietoliikenne-kuluttaa-valtavasti-energiaa-5gn-kayttoonotto-lisaasahkonkulutustantisestaan/39cebe3d-8791-4cab-9412-7714f88d78f5>

Talvitie, J. (2021, 15.4.). Konsultointikeskustelu.

Usama, M. & Erol-Kantarci, M. 2019. A Survey on Recent Trends and Open Issues in Energy Efficiency of 5G

Uusi-teknologia, 2020. Saatavilla: <https://www.uusiteknologia.fi/2020/11/18/nesteaahdytetty-5g-tukiasema-palkittiin/>

Vannithamby, R. & Soong, A. 2020. 5G verticals: customising applications, technologies and deployment techniques. 1st edition. Hoboken, New Jersey; Wiley.

Verizon, 2020. What are Radio Access Networks and 5G RAN. Saatavilla: <https://www.verizon.com/about/our-company/5g/5g-radio-access-networks>

VTT, 2015. Esiselvitys matkaviestinverkkojentukiasemien sähkön käytöstä ja energiatehokkuudesta. Saatavilla: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2015/VTT-CR-03348-15.pdf>

Zhang, R., Wang, J., Zhong, Z., Li, C., Du, X., Guizani, M. 2018. Energy-Efficient Beamforming for 3.5 GHz 5G Cellular Networks based on 3D Spatial Channel Characteristics

Öko Institute. (2013). Study on the practical application of the new framework methodology for measuring the environmental impact of ICT - cost/benefit analysis

LIITE A: TUTKIMUSAINEISTO

Taulukko 2. Tärkeimmän tutkimusaineiston esittely

Tekijät	Vuosi	Otsikko	Sisältö
Dahlman E, Parkvall S, Skold J.	2020	5g Nr: The Next Generation Wireless Access Technology	Kirja on jatkoa tekijöiden aikaisemmille 3G- ja 4G-verkoista kertoville kirjoille. Kirjassa esitellään 5G:n toimintaa, uusia ominaisuuksia ja sen vaatimuksia yksityiskohtaisesti ja teknisesti.
Liyanage, M., Ahmad, I., Abro, A., Gurtov, A., & Ylianttila, M.	2018	A Comprehensive guide to 5G security	Kirjassa esitellään 5G:n mahdollistavia tekniikoita, joita voidaan käyttää myös energiatehokkaiden keinojen kehittämisen pohjalla. Alan perusteoksia.
Rommer, S., Hedman, P., Olsson, M., Frid, L., Sultana, S., Mulligan, C.	2019	5G Core Networks: Powering Digitalization	Kirja tarkastelee 5G:n runkoverkkoa yksityiskohtaisesti ja kuvailee sen toiminnallisuutta.
Shetty, R. S	2021	5G Mobile Core Network Design, Deployment, Automation, and Testing Strategies	Teos esittelee 5G:n uusia ominaisuuksia ja kertoo, mitä 5G mahdollistaa.
Usama, M. & Erol-Kantarci	2019	A Survey on Recent Trends and Open Issues in Energy Efficiency of 5G	Artikkelissa tarkastellaan viimeaikaisia teoksia, joissa tutkitaan 5G:n energiatehokkuutta ja hahmotellaan niihin liittyviä haasteita.
Pihkola, H., Hongisto, M., Apilo, O. & Lasanen, M.	2018	Valuating the Energy Consumption of Mobile Data Transfer—From Technology Development to Consumer Behaviour and Life Cycle Thinking	Artikkelissa tarkastellaan matkapuhelinverkkojen energiankulutuksen nousua sekä dataliikenteen kasvun vaikutusta energiakulutukseen.