

Tomi Mannila

VIRTUALISOIDUN RADIOLIITYNTÄ- VERKON HYÖDYT JA HAASTEET

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaatintyö
Toukokuu 2019

TIIVISTELMÄ

Tomi Mannila: Virtualisoidun radioliityntäverkon hyödyt ja haasteet
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Tarkastaja: TkT Taneli Riihonen
Toukokuu 2019

Radioliityntäverkkoteknologioiden vaatimuksien kasvaessa tarvitaan uusia keinoja niiden tehokkuuden, suorituskyvyn ja taloudellisuuden takaamiseksi. Yhdeksi tällaiseksi vaihtoehdoksi on muodostunut verkkokokonaisuuden tai sen osien virtualisointi eli fyysisten ominaisuuksien abstrahointi ja viipalointi loogisiin osuuksiin. Tämän työn tavoitteena on selvittää mitä radioliityntäverkon virtualisointi on, yleiset toteutustavat ja mitä eroavaisuuksia sillä on perinteisen radioliityntäverkon toteutukseen verrattuna.

Työssä esitellään ensin radioliityntäverkon virtualisoinnin mahdollistamat uudet liiketoimintamallit, jotka voidaan jakaa kaksi- ja nelitasoisesti osiin. Näissä malleissa on uusia rooleja perinteiseen matkaviestinverkko-operaattorin toimintaan nähden, kuten virtuaalisen matkaviestinverkon operaattori, joka ei omista fyysistä infrastruktuuria. Lisäksi esitellään radioliityntäverkon virtualisoinnin vaatimukset, joita on muun muassa rinnakkaiselo, hallittavuus ja eristäminen. Radioliityntäverkon virtualisoinnin eri toteutustasoja tarkastellaan ja havainnoidaan. Työssä esitellään myös radioliityntäverkon virtualisoinnin hyötyjä ja haasteita, joista muun muassa taloudelliset edut tulevat erityisesti esiin. Lopuksi esitellään virtualisointi lyhyesti nykyisissä ja tulevaisissa matkaviestinverkoissa, kuten 5G:ssä, jossa radioliityntäverkon virtualisointi on otettu huomioon jo standardeissa.

Avainsanat: Radioliityntäverkko, RAN, Virtualisointi, 5G, Pilviradioliityntäverkko, Cloud RAN

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VIRTUALISOINNIN PERUSTEET JA TAUSTA.....	3
2.1 Verkkovirtualisoinnin historia.....	4
2.2 Ohjelmisto-ohjattu verkko ja pilvipalvelut.....	5
2.3 Langattoman lähiverkon virtualisointi	6
3. VIRTUALISOINTI RADIOLIITYNTÄVERKOISSA.....	7
3.1 Langattoman tietoliikenneverkon virtualisointi	7
3.1.1 Resurssien viipalointi	9
3.1.2 Matkaviestinoperaattoriverkkojen jakaminen.....	14
3.2 Virtualisoinnin hyödyt radioliityntäverkoissa	15
3.2.1 Skaalautuvuus	15
3.2.2 Taloudellisuus.....	15
3.2.3 Innovointi ja uudet palvelut.....	16
3.2.4 Verkon hallinta	16
3.3 Virtualisoinnin haasteet radioliityntäverkoissa	17
3.3.1 Resurssien varaus, eristäminen ja liikkuvuus	17
3.3.2 Yleisrasite ja viive	18
4. VIRTUALISOINTI KAUPALLISISSA MATKAVIESTINVERKOISSA	20
4.1 Perinteiset virtuaalioperaattorit.....	20
4.2 Virtualisointi LTE-järjestelmissä	21
4.3 Tulevaisuuden matkaviestinverkot	22
4.3.1 Viipalointi 5G-matkaviestinverkoissa	22
4.3.2 Pilviradioliityntäverkko.....	23
5. YHTEENVETO.....	25
LÄHTEET	26

KUVALUETTELO

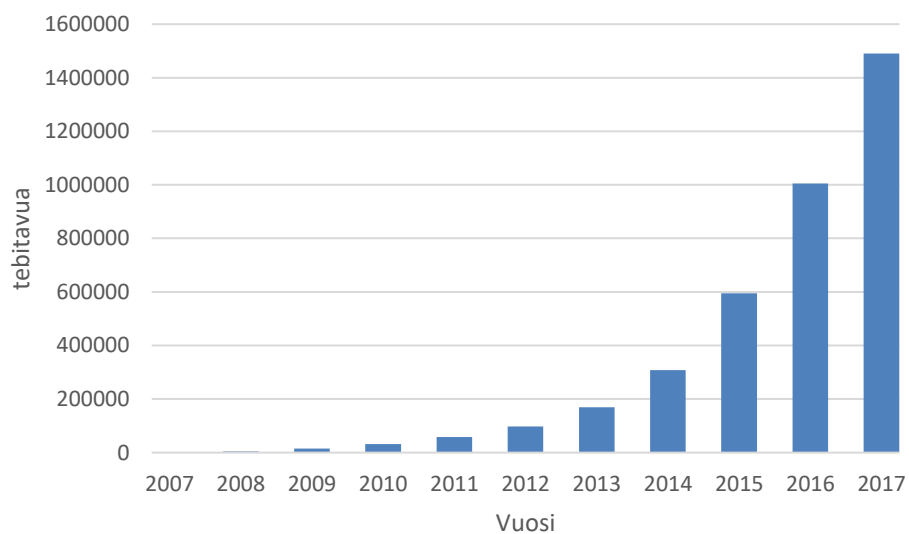
<i>Kuva 1. Matkaviestindatan käyttö Suomessa. Perustuu lähteeseen [2].....</i>	<i>1</i>
<i>Kuva 2. Perinteinen ja virtualisoinnin mahdollistamat liiketoimintamallit. Muokattu lähteestä [7].</i>	<i>7</i>
<i>Kuva 3. a) Radioresurssi taajuus-, tila- ja aikatasossa. b) Taajuusmultipleksaus. c) Aikamultipleksaus. d) Tilamultipleksaus.</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 4. Esimerkki infrastruktuuritasoviipaloinnista. Muokattu [7].</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 5. Verkkotasoviipalointi. Muokattu lähteestä [7].</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 6. Esimerkki LTE-verkon virtualisoinnista. Muokattu lähteestä [7].</i>	<i>21</i>
<i>Kuva 7. Viipalointi palvelun laadun mukaan 5G-verkossa. Muokattu lähteestä [7].</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 8. Yksinkertaistettu pilviradioliityntäverkko. Muokattu lähteestä [34].....</i>	<i>24</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3G	Kolmannen sukupolven langaton tiedonsiirtoteknologia.
3GPP	3rd Generation Partnership Project, yhteistyöorganisaatio, joka tekee matkaviestinverkoille teknisiä määrittelyjä.
4G	Neljännän sukupolven langaton tiedonsiirtoteknologia.
5G	Viidennen sukupolven langaton tiedonsiirtoteknologia.
C-RAN	engl. Cloud Radio Access Network, keskitetty radioliityntäverkko, jossa koko radioliityntäverkkoa ohjataan pilvestä.
eMBB	engl. Enhanced Mobile Broadband, 5G:n paljon kapasiteettia ja suuria datanopeuksia tarjoava palvelutyyppi.
IoT	engl. Internet-of-Things, esineiden internet.
LAN	engl. Local Area Network, lähiverkko.
LTE	engl. Long-Term Evolution, Neljännän sukupolven langaton tiedonsiirtoteknologia.
SDN	engl. Software-Defined Networking, ohjelmisto-ohjattu verkko.
MAC-osoite	engl. Media Access Control, osoite, joka on laitteen yksilöivä tunnus.
MME	engl. Mobility Management Entity, liikkuvuuden hallintayksikkö.
mMTC	engl. Massive Machine-Type Communication, 5G:n erittäin monta yhtäaikaista laitetta tukeva palvelutyyppi.
NFV	engl. Network Function Virtualization, verkkotoimintojen virtualisoinnin mahdollistava arkkitehtuuri.
OSI-malli	engl. Open Systems Interconnection Reference Model, tietoliikennettä kuvaava monitasoinen malli.
PGW	engl. Packet Data Network Gateway, runkoverkossa sijaitseva lähtevän ja saapuvan liikenteen yhdyskäytävä.
PRB	engl. Physical Resource Block, resurssilohko esimerkiksi ajassa ja taajuudessa.
RAT	engl. Radio Access Technology, radioliityntäverkkoteknologia, kuten 4G tai 5G.
URLLC	engl. Ultra-Reliable and Low Latency Communications, 5G:n erittäin luotettava ja pieniviiveinen palvelutyyppi.
VLAN	engl. Virtual Local Area Network, virtuaalinen lähiverkko.
VLAN-tunnus	engl. VLAN Tag, virtuaalisen lähiverkon tunniste.
VPN	engl. Virtual Private Network, virtuaalinen erillisverkko.
WAN	engl. Wide Area Network, suuralueverkko.

1. JOHDANTO

Matkaviestindatan käyttö on yleistynyt valtavasti viime vuosina älypuhelimien ja muiden kannettavien laitteiden vaikutuksesta. Vuodesta 2013 lähtien älypuhelimien yleisyys suomalaisilla on kasvanut noin viisi prosenttiyksikköä vuosittain, joten vuonna 2017 kolmella neljästä suomalaisesta oli 3G- tai 4G-internetyhteydellä varustettu älypuhelin [1]. Älylaitteiden kehitys ja laskentatehon kasvu on mahdollistanut erilaisia ja vaativia toimintoja, joista monet kuluttavat paljon matkaviestindataa tai edellyttävät käyttäjän pysyvän jatkuvasti verkossa. Kasvaneeseen matkaviestindatakysyntään on vastattu aina isomman kapasiteetin ja datanopeuden omaavilla uuden sukupolven verkkoratkaisuilla. Vuoden 2017 matkaviestindatan käyttö oli yli kaksinkertainen vuoteen 2015 nähden ja jo vuoden 2018 ensimmäisellä puoliskolla saavutettiin noin 62 % koko vuoden 2017 matkaviestindatakäytöstä [2]. Kuva 1 esittää Viestintäviraston tilastoa [2], josta voidaan havaita matkaviestindatan käytön valtava kasvu Suomessa.



Kuva 1. Matkaviestindatan käyttö Suomessa. Perustuu lähteeseen [2].

Matkaviestindatan käytön kasvaessa palveluntarjoajat voivat kohdata ongelmia tuottaa kaikille käyttäjille haluttuja datanopeuksia eritoten ruuhkaisissa kaupungeissa, sillä kyseisen alueen järjestelmä ei kykene tuottamaan riittävää kapasiteettia. Kapasiteetin kasvattamiseksi solukokoja yleensä pienennetään lisäämällä tukiasemien määrää. Tällöin yksittäinen tukiasema kattaa pienemmän alan, joka vähentää solukohtaista käyttäjien määrää nostoen kapasiteettia. Tiheät ja pienet solut aiheuttavat nykyisissä järjestelmissä

ongelmia, sillä nopea ja samanaikainen lähetyksen kontrollointi on osoittautunut haasteelliseksi. Tiheät solut aiheuttavat ympäristössä toisilleen häiriötä matkaviestinverkoissa, joka laskee huomattavasti kapasiteettia ja tukiaseman tehokkuutta. [3] Tukiasemien lisääminen ja tukiasemien huono käyttötaso on matkaviestinoperaattoreille kallista ja näiden matkaviestinverkkojen haasteiden ratkaisuksi esitetään matkaviestinverkon tai sen osien abstrahointia ja jakamista, eli virtualisoitua matkaviestinverkkoa.

Tässä työssä esitetään ensin lyhyesti, mitä virtualisointi tarkoittaa yleisesti tietotekniikassa ja langallisissa tietoliikenneverkoissa, jonka jälkeen käsitellään radioliityntäverkon virtualisoinnin vaatimuksia. Lisäksi esitetään radioliityntäverkon virtualisoinnin mahdollistamia liiketoimintamalleja. Työssä käsitellään myös, miten virtualisoituja radioliityntäverkkoja voidaan jakaa virtuaalisiin osiin eri virtualisointitasoilla, miten virtualisointi toimii pääpiirteittäin sekä mitä hyötyjä ja haasteita virtualisointi tuo. Vaikka radioliityntäverkon virtualisointi on monilta osin erittäin hyödyllistä innovoinnin, taloudellisuuden ja matkaviestinverkon joustavuudelle, virtualisoidun radioliityntäverkon signalointi ja kontrollointi on osoittautunut haasteelliseksi. Lopuksi esitetään radioliityntäverkon virtualisoinnin nykyisiä ja tulevia tekniikoita ja arvioidaan näiden tulevaisuutta.

Luvussa 2 esitetään mitä virtualisointi on, virtualisoinnin historiaa sekä mihin sitä tällä hetkellä käytetään. Luvussa 3 kerrotaan langattoman tietoliikenneverkon virtualisoinnin vaatimuksista, sekä mitä virtualisointi sisältää ja mahdollistaa. Lisäksi esitetään radioliityntäverkon virtualisoinnin mahdollistamat liiketoimintamallit sekä keinoja matkaviestinverkon jakamiseen loogisiin osiin. Luvussa 3 esitellään myös matkaviestinoperaattori-verkkojen jakaminen sekä suurimmat radioliityntäverkon virtualisoinnin hyödyt ja haasteet. Nykyisiä LTE-järjestelmiä tarkastellaan virtualisoinnin näkökulmasta sekä esitetään katsaus tulevaisuuden matkaviestinverkoista luvussa 4. Lopuksi esitellään yhteenveto tärkeimmistä radioliityntäverkon virtualisoinnin havainnoista luvussa 5.

2. VIRTUALISOINNIN PERUSTEET JA TAUSTA

Virtualisointi tarkoittaa jonkin fyysisen ominaisuuden viipaloimista loogisiin osuuksiin. Täten yksittäinen fyysinen resurssi voi näyttäytyä monena loogisena resurssina tai toisinpäin – monta fyysistä resurssia voi näyttäytyä yhtenä loogisena resurssina. Virtualisoinnin yhtenä tärkeimpänä ominaisuutena voidaan pitää resurssien erottamista alla olevasta laitteistosta [4][5]. Virtualisointia voidaan kuvailla esimerkiksi autoilun analogialla, jossa henkilöt haluavat päästä aamulla töihin ja jokaisella on omat resurssinsa. Näihin kuuluu oma auto, polttoaine ja yksityinen tie työpaikalle. Tällaisen järjestelmän virtualisoinnin jälkeen jäljellä olisi vain yksi tai useita isoja autoja, jotka vievät kaikki halukkaat töihin, sekä yksi tai useampi tie, joita isot autot käyttävät pääsemään määränpäihinsä. Matkustajilla on virtuaaliodellisuuslasit päässään, jolloin heidän näkökulmastaan he ajavat yhä omilla autoillaan. Tässä tapauksessa säästetään resursseja autojen, polttoaineen ja teiden muodossa.

Tietotekniikassa virtualisoinnilla usein tarkoitetaan virtuaalista tietokonetta (engl. virtual machine), joka toimii kuten normaali tietokone, mutta jakaa laitteiston mahdollisten muiden virtuaalikoneiden kanssa. Tällöin virtualisointi tarvitsee virtualisointiympäristön (engl. virtual machine monitor, hypervisor) käyttöjärjestelmän ja laitteiston väliin. Virtualisointiympäristön tärkein tehtävä on jakaa fyysisiä resursseja virtualisoiduille toiminnoille. Jaettaviin resursseihin voi kuulua muun muassa laskentateho, muisti ja datan varastointi. Laitteiston käyttöä voidaan jakaa virtuaalikoneiden käytön mukaan dynaamisesti. Esimerkiksi suuri palvelin voidaan jakaa moneksi pieneksi palvelimeksi ja laitteiston resursseja voidaan jakaa näille pienille palvelimille dynaamisesti niiden tarpeen mukaan. Täten voidaan hyödyntää paremmin käytettävissä olevia resursseja. [5] Virtualisointiympäristöä voidaankin ajatella ohjelmointirajapintana virtuaalisten resurssien hallintaan [6].

Samaan tapaan tietoverkon virtualisointi voidaan määrittää tietoverkon jakamisena pienempiin viipaleisiin, jotka käyttävät fyysisiä resursseja [6][7]. Virtualisoidun verkon hallintalogiikka antaa tietotekniikan virtualisointiympäristön tavoin fyysisiä resursseja viipaleiden käyttöön. Esimerkiksi yhden tiedonsiirtolinkin läpi voidaan kuljettaa monen virtuaalisen tietoverkon liikennettä eikä montaa tiedonsiirtolinkkiä tarvita. Tiedonsiirtolinkki tarkoittaa käytettävää siirtotietä bittien siirtämiseen, kuten ethernet-kaapelia, jota käytetään monissa langallisissa verkoissa. Langattomissa verkoissa bitit siirtyvät ilman ylitse.

2.1 Verkkovirtualisoinnin historia

Tietoverkoissa on käytetty virtualisointia standardien mukaisesti vuodesta 1998 lähtien, kun standardi IEEE 802.1Q hyväksyttiin ja lopulta julkaistiin vuonna 1999 [8]. IEEE 802.1Q –standardissa esitellään virtuaalilähiverkko (engl. virtual local area network, VLAN), jonka avulla voidaan luoda useita loogisia tietoverkkoja yhteen fyysiseen tietoverkkoon. Perinteiset VLAN-verkot toteutetaan VLAN-kytkimillä, jotka ohjaavat liikenteen OSI-mallin toisella kerroksella eli siirtokerroksella. Paketti ohjataan lähettäjän verkkosovittimen yksilöivän osoitteen (MAC-osoite) ja VLAN-tunnuksen avulla. VLAN-verkot ovat joustavia, kustannustehokkaita ja helppoja hallita. [9]

Virtual Private Network (engl. virtual private network, VPN) mahdollistaa useiden verkkojen yhdistämisen toisiinsa jo olemassa olevien verkkojen kautta [10]. Monissa yrityksissä, joilla on toimipisteitä useilla paikkakunnilla, käytetään yhtenäistä sisäistä lähiverkkoa (engl. local area network, LAN), toisin sanoen intranettiä, vaikka toimipisteet eivät jakaisikaan yhteistä fyysistä lähiverkkoa. Yhtenäinen tietoverkko toteutetaan VPN:n avulla, jossa verkot yhdistetään loogisesti virtuaalisten linkkien, tunneloiden, avulla suuralueverkon (engl. wide area network, WAN) ylitse käyttämällä salaus- sekä tunnelointiprotokollia, jotka pyrkivät varmistamaan tietoliikenteen tietoturvan, eheyden sekä todentamisen. Myös yksittäinen käyttäjä voi hyödyntää VPN:ää yhdistääkseen kohdeverkkoon julkisen verkon yli.

Aktiiviset ja ohjelmoitavat verkot (engl. active and programmable networks) on tietoverkkojen lähestymistapa, jossa kytkimet ja reitittimet voivat muovata paketteja ja pakettien sisältöä ohjelmallisesti [11]. Pakettien muokkaus on toteutettu tarpeiden mukaan, esimerkiksi tietyn käyttäjän, käyttäjäryhmän tai ohjelman perusteella. Perinteisessä reitityksessä reitittimet tai kytkimet eivät muokkaa paketin sisältöä, paketin tunnistetietoja (engl. header) lukuun ottamatta. Aktiivisien ja ohjelmoitavien verkkojen eräs lähestymistapa on niin sanottu kapseloiminen, jossa ohjelmoitavat reitittimet ja kytkimet asettavat pienen ohjelman jokaiseen pakettiin, joka voidaan käsitellä toisella ohjelmoitavalla reitittimellä tai kytkimellä muokaten verkon toimintaa dynaamisesti. Aktiiviset ja ohjelmoitavat verkot eivät sisällä virtualisointia suoraan, mutta edistysaskeleet ohjelmoitavissa verkoissa edesauttoi tietoverkkojen virtualisoinnin kehittymistä.

Päällysverkot (engl. overlay networks) ovat virtuaalisia verkkoja, jotka sijoittuvat toisien verkkojen päälle muodostaen loogisen topologian [9]. Esimerkiksi vertaisverkot (engl. peer-to-peer) ovat päällysverkkoja, sillä ne muodostavat erillisen loogisen verkon OSI-

mallin sovelluskerroksella. Solmukohtien (engl. node) välissä on loogiset linkit, jotka voivat muodostua monesta eri fyysisestä linkistä. Täten päällysverkoilla voi olla täysin erilainen topologia kuin alla olevalla verkolla.

2.2 Ohjelmisto-ohjattu verkko ja pilvipalvelut

Verkkolaitteiden kontrolli- ja datatasot ovat tyypillisesti kiinni toisissaan reitittimessä tai kytkimessä, josta johtuu perinteisen verkon jäykkyys infrastruktuurin muutoksille. Ohjelmisto-ohjattu verkko (engl. software-defined networking, SDN) pyrkii eriyttämään verkon kontrolli- ja datatasot toisistaan, joka tarkoittaa laitteiston ohjauksen siirtämistä erilliselle kontrollipalvelimelle, joka voi ohjata verkon toimintaa [7]. [12] Eriyttämisen jälkeen reitittimistä ja kytkimistä tulee yksinkertaisia laitteita, jotka välittävät tietoliikennettä toimintaa ohjaavan keskitetyn kontrollipalvelimen ohjeiden mukaan. Kontrollipalvelin on looginen kokonaisuus, joka voi muodostua monesta fyysisestä laitteesta. Käyttämällä eriytettyä kontrolleria muodostuu dynaaminen verkko, jota on helppo hallita: ohjelmoitavat sovellukset voivat määrittää koko verkon eikä manuaalista konfiguraatiota tarvita itse datatason laitteisiin. Täten eriyttäminen on helposti skaalautuva ja taloudellinen ratkaisu.

Datatason laitteiden ohjelmoinnin mahdollistaa data- ja kontrollitason välissä oleva ohjelmointirajapinta. Yksi tällainen ohjelmointirajapinta on OpenFlow, joka määrittelee viestintäprotokollan sekä osan datatasosta [13]. Ohjelmisto-ohjattu verkko vaatii ohjelmoitavat kytkimet ja reitittimet verkkoliikenteen ohjaamisen toteuttamiseksi. OpenFlow-kytkimet ovat kyseiseen protokollaan erikoistuneita kytkimiä, jotka mahdollistavat laitteen monikäyttöisen toiminnan. Kytkimessä voi olla useita sääntötauluja, kuten perinteisessä reitittimessä reititystauluja, jotka määrittävät kytkimen toiminnon tämän läpi kulkevalle liikenteelle. Kyseessä olevan kytkimen sääntötaulu voidaan ohjelmoida kontrollitasolta monipuolisesti erilaisiin toimintoihin: kytkin voi toimia muun muassa reitittimenä, kytkimenä, palomuurina tai kuormituksen tasaajana [12].

Pilvipalveluiden määritelmässä [14] kuvataan pilvipalveluiden olevan helposti skaalautuvia palveluja, jotka sijaitsevat verkon ylitse saatavilla olevissa palvelinkeskuksissa. Keskuksen palvelimet ovat virtuaalisia ja niille voidaan tarpeen vaatiessa antaa dynaamisesti enemmän tai vähemmän fyysisiä resursseja. Näitä resursseja voi olla muun muassa muisti, käytettävissä olevat prosessoriytimet, laskenta-aika tai välityskyky. Pilvi-infrastruktuuri on kokoelma laitteistoa ja ohjelmistoa, jotka muodostavat fyysisen kerroksen ja abstrahointikerroksen. Koska keskus on virtualisoitu, koko pilven muodostava palvelinkeskus voi käyttäjän tietämättä sijaita fyysisesti hajautettuna useassa paikassa.

2.3 Langattoman lähiverkon virtualisointi

Standardi IEEE 802.11 on tuonut langattoman lähiverkon (engl. wireless local area network, WLAN) yleiseen käyttöön koteihin, työpaikoille ja julkisille paikoille. Huomattavan käytön ja erilaisten käyttötapauksen vuoksi on kehittynyt tarve langattoman lähiverkon virtualisoimiseen. Tällainen käyttötapaus on muun muassa saman verkon jakaminen usean toimijan kanssa, jotka käyttävät erilaisia verkkoon liittymismekanismeja [15].

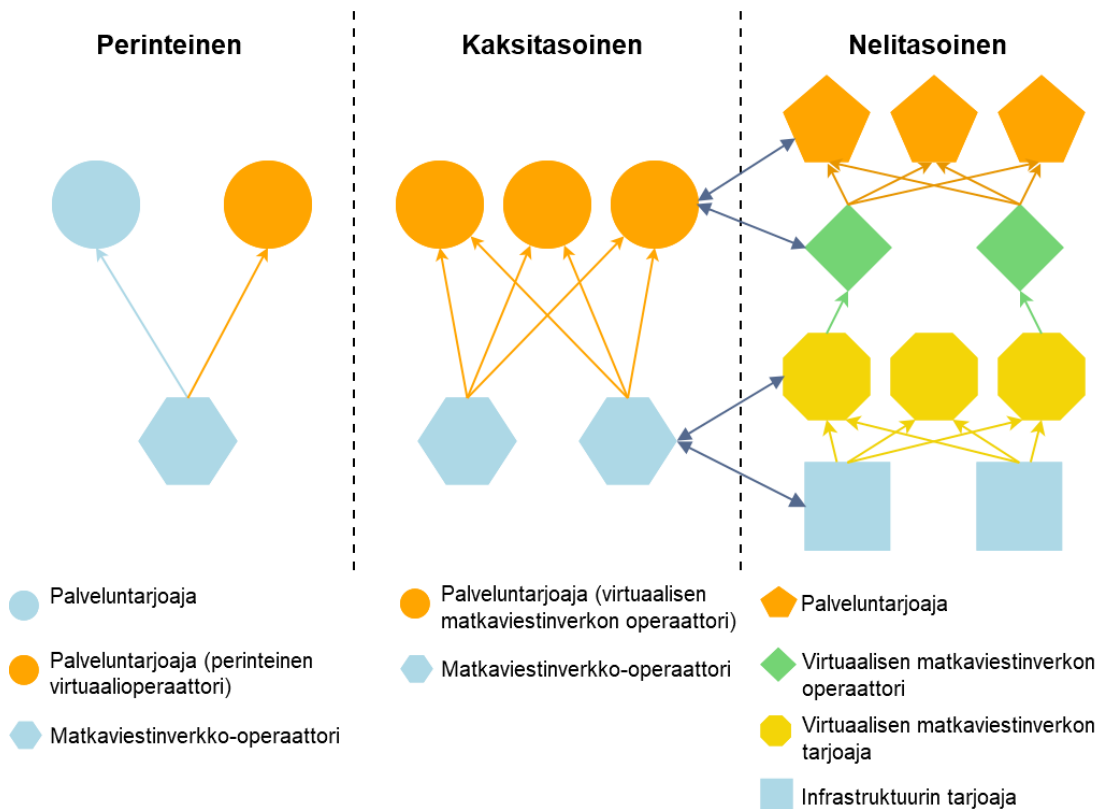
Langattoman lähiverkon virtualisoinnin on mahdollistanut fyysisten verkkosovittimien ja porttien virtualisointi, jossa luodaan loogisia resursseja verkon käyttöön. Tällöin yhdestä fyysisestä langattoman lähiverkon sovitimesta, eli tukiasemasta, voidaan luoda useita virtuaalisia sovitimia niin, että jokaisella virtuaalisella sovitimella on oma yksilöllinen MAC-osoite ja tietoverkko. Yhdestä fyysisestä sovitimesta jaetut kaksi loogista sovitinta näkyy käyttäjälle kahtena täysin erillisenä sovitimena eikä virtualisointi näy ulospäin. [15] Esimerkiksi julkiselle WLAN-tietoverkolle ja sisäiselle intraverkolle on usein omat virtuaaliset tietoverkkonsa, vaikka molemmat käyttävät samaa fyysistä laitteistoa. Täten virtualisointi on edullisempi ratkaisu muihin vaihtoehtoihin verrattuna, kuten esimerkiksi kahden tietoverkon luomiseen kahdella eri fyysisellä verkkosovittimella [15].

3. VIRTUALISOINTI RADIOLIITYNTÄVERKOISSA

Tutkimus [7] esittää, että langaton virtualisointi voi olla sähkömagneettisten taajuuksien, infrastruktuurin tai tiedonsiirtolinkin viipaloimista eli osiin jakamista. Langattoman verkon virtualisointi on fyysisten infrastruktuuriresurssien sekä fyysisten radioresurssien abstrahoinnista ja viipaloimista virtuaalisiksi langattoman verkon resursseiksi, jotka voidaan eristää toisistaan ja jakaa muiden kanssa [7, luku 3]. Resurssien viipaloiminta on langattoman verkon virtualisoinnin päämäärä ja täten viipale on nimitys virtuaalisille verkoille.

3.1 Langattoman tietoliikenneverkon virtualisointi

Langattoman tietoliikenneverkon virtualisointi mahdollistaa alan tutkimuksien [16][17] esittämiä uusia liiketoimintamalleja, joissa fyysisen infrastruktuurin omistajat ja infrastruktuurin käyttäjät ovat eri yrityksiä. Matkapuhelinverkkojen tapauksessa infrastruktuuriin kuuluvat muun muassa mastot, antennit, tukiasemat toimintoiheen, kytkimet, reitittimet sekä linkit radioliityntäverkon ja runkoverkon välillä. Uusista liiketoimintamalleista voidaan huomata, kuinka virtualisointi mahdollistaa fyysisen verkon jaon yhdeltä omistajalta ja toimijalta useammalle.



Kuva 2. Perinteinen ja virtualisoinnin mahdollistamat liiketoimintamallit. Muokattu lähteestä [7].

Kuvasta 2 voidaan havaita liiketoimintamallien roolit, jotka voidaan esittää perinteisenä, kaksitasoisena [18] tai erikoistuneempana nelitasoisena [19, luku 2] mallina. Perinteisessä mallissa toimija voi olla sekä palveluntarjoaja (engl. service provider) että matkaviestinverkko-operaattori (engl. mobile network operator), jolloin yhden toimijan on hallittava radioliityntä- ja runkoverkkoa sekä myydä tuottamia palveluja loppukäyttäjille asti. Tässä liiketoimintamallissa on myös toinen palveluntarjoaja, virtuaalioperaattori, joka käyttää matkaviestinverkko-operaattorin radioliityntäverkkoa ja toteuttaa tai vuokraa runkoverkon osia matkaviestinverkko-operaattorin ja virtuaalioperaattorin sopimuksen mukaisesti.

Kaksitasoisessa mallissa matkaviestinverkko-operaattorit omistavat muun muassa oikeuden käyttää viestinnässä käytettäviä taajuuksia, radioliityntäverkkoja ja runkoverkkoja. Näistä resursseista matkaviestinoperaattorit jakavat fyysiset resurssit virtuaalisiksi resursseiksi, joita palveluntarjoajat voivat vuokrata ja käyttää, toisin sanoen matkaviestinoperaattorin tehtävä on hallita koko verkon toimintaa. Täten palveluntarjoajien ei tarvitse huolehtia fyysisistä ominaisuuksista ja ne voivat sen sijaan keskittyä tarjoamaan ja kehittämään palveluitaan vuokratuilla resursseilla.

Nelitasoisessa mallissa infrastruktuurintarjoajat (engl. infrastructure provider) omistavat infrastruktuurin ja langattomat resurssit, joita virtuaalisen matkaviestinverkon tarjoaja (engl. mobile virtual network provider) vuokraa ja virtualisoi. Näitä virtuaalisia resursseja käyttävät ja jakavat virtuaalisen matkaviestinverkon operaattorit (engl. mobile virtual network operator) palveluntarjoajille. Tällöin palveluntarjoajien tehtäväksi jää ainoastaan tarjota palveluitaan virtuaalisen matkaviestinverkon operaattoreilta vuokratuilla virtuaaliresursseilla [7].

Tutkimuksessa [7, luku 3] esitetään langattoman verkon virtualisoinnin vaatimuksia, jotka kuuluvat tietoverkon virtualisoinnin suunnittelutavoitteisiin [9][16]. Nämä vaatimukset voidaan jakaa perus- ja lisävaatimuksiin riippuen virtualisoinnin tasosta [7]. Perusvaatimuksiin kuuluvat seuraavat vaatimukset.

1. **Rinnakkaiselo:** Langattomat tietoliikenneverkot on voitava jakaa pienemmiksi verkoiksi riippumatta siitä, että jaetut tietoverkot ovat erilaisia topologiaaltaan, palvelutyypiltään tai esimerkiksi palvelun laatuvaatimuksiltaan [7]. Näiden tietoverkkojen yhtäaikaisen olomassaolon on oltava mahdollista koko fyysisen tietoverkon alueella tai osassa sitä [16].

2. **Joustavuus, hallittavuus ja ohjelmitavuus:** Palveluntarjoajalla tulee olla mahdollisuus toteuttaa mielivaltaisia reititys- ja välitystoimintoja, erillisiä kontrolliprotokollia sekä tietoverkkotopologioita fyysisestä tietoverkosta tai muista virtuaalisista tietoverkoista riippumatta [7][16].
3. **Eristäminen:** Virtuaalisten tietoverkkojen on oltava näkymättömiä toisilleen, eivätkä ne saa häiritä toisia tietoverkkoja [7][16][18]. Verkkojen eristäminen parantaa viansietokykyä, tietoturvallisuutta ja yksityisyyttä. Viansietokyvyllä tarkoitetaan tilanteita, jolloin vikatilassa oleva virtuaalinen verkko ei häiritse muita tietoverkkoja, vaan vika on havaittavissa ainoastaan viallisessa tietoverkossa.

Vaatimuksia voidaan laajentaa lisävaatimuksilla, joihin kuuluvat seuraavat asiat:

1. **Heterogeenisyys:** Tässä yhteydessä heterogeenisyys tarkoittaa useiden radioverkkoteknologioiden, kuten 3G, 4G ja 5G, yhtäaikaista käyttöä. Tämän on oltava mahdollista sekä fyysisessä langattomassa että langallisessa tietoverkossa [7][16].
2. **Skaalautuvuus:** Infrastruktuurin tarjoajien tulee mahdollistaa uusien rinnakkaisien virtuaalisten tietoverkkojen tai resurssien lisääminen ja poistaminen [7][16].
3. **Vakaus ja konvergenssi:** Fyysisen infrastruktuurin on oltava vakaa, jotta välttyttäisiin virtuaalisten verkkojen epävakaudelta [7]. Infrastruktuurin tarjoajan on tarjottava virheetön fyysinen tietoverkko, jossa ei ole erinäisiä epävakautta aiheuttavia ongelmia, kuten tietoliikennereittien vaihteluja. [16]
4. **Liikkuvuus:** Liikkuvuuden eli käyttäjän käyttämän verkon vaihtaminen toiseen tulisi olla mahdollista eri palveluntarjoajien tai virtuaalisten matkaviestinverkon operaattorien kanssa. Tällöin palveluntarjoajilla tulee olla tapa liikkuvuuden hallintaan muiden palveluntarjoajien kanssa [7].
5. **Resurssien käyttö:** Infrastruktuurin tarjoajien pitää taata tehokas radio- ja laskenta-resurssien sekä muiden resurssien käyttö [7].

Radioliityntäverkon virtualisointiin pätevät kaikki langattoman tietoverkon virtualisoinnin vaatimukset.

3.1.1 Resurssien viipalointi

Resurssien viipalointi tarkoittaa infrastruktuurin tarjoajan tai matkaviestinoperaattorin fyysisien infrastruktuuri- ja radioresurssien abstrahoimista ja viipalointia virtuaalisiksi resursseiksi eli viipaleiksi [7]. Kuvan 3 esittämät viipaloidut resurssit ovat muun muassa

taajuus, aika ja tila. Taajuusresurssilla tarkoitetaan käytettävissä olevia taajuuksia, joihin vaikuttavat käytettävä taajuuskaista ja taajuuksien käyttöoikeus. Suomessa matkaviestinoperaattorit vuokraavat taajuusalueita valtion huutokaupasta. Aikaresurssilla tarkoitetaan aikoja, jolloin lähetys voidaan tehdä häiritsemättä toista lähetystä. Taajuusresurssit ja aikaresurssit jaetaan edelleen resurssilohkoihin ja tällöin saadaan kuvan 3 a-diagrammin yksinkertaistettu resurssilohko. Resurssilohko on taajuuden sekä aikavälin yhdistelmä, josta muodostuu taajuusvarauksen perusyksikkö. Koska langaton viestintä toimii yleislähetyksillä, tarvitaan myös tilaresurssi, jotta lähetykset voidaan jakaa tarpeeksi etäälle toisistaan. Resursseihin kuuluu myös rajallinen tukiaseman lähetysteho, jota tarvitaan lähetysten tekemiseksi. Täten kaikille viipaleille ei välttämättä ole saatavilla täyttä lähetystehoa, jolloin lähetystehoa tulee jakaa eri viipaleiden kesken.

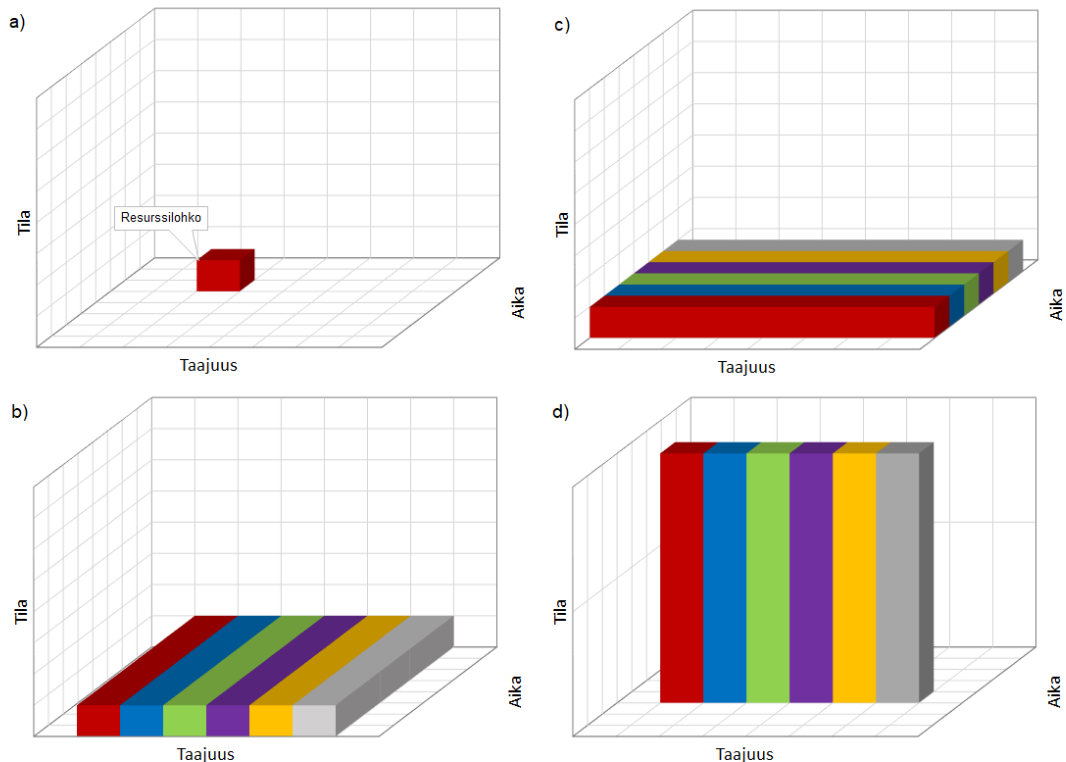
Viipale on looginen kokonaisuus käytettäviä resursseja, joka on eristetty muista viipaleista ja joka voidaan jakaa useille tahoille, kuten palveluntarjoajille. Viipaloitinta voidaan toteuttaa useilla eri tavoilla riippuen muun muassa halutun virtualisoinnin tasosta ja siitä, viipaloidaanko ainoastaan taajuus-, aika- ja tilaresurssit vai viipaloidaanko koko fyysinen infrastruktuuri antenneineen.

Tutkimus [20] esittää kaksi erityyppistä käyttötapaa viipaleiden käyttöön:

1. **Viipaloitinta palvelun laadun mukaan** (engl. quality of service slicing), jossa infrastruktuurin tarjoaja tai matkaviestinoperaattori luo viipaleita erityyppisiä palveluita varten räätälöidyllä palvelun laadulla. Esimerkiksi suoratoistosovelluksella voisi olla viipale, joka mahdollistaa suuren välityskyvyn, kun taas videopeliapplikaation viipaleella pieni viive on tärkeämpää.
2. **Infrastruktuuriviipaloitinta**, jossa viipaloituja virtuaalisia resursseja käytävillä virtuaalisen matkaviestinverkon operaattoreilla on täysi kontrolli käyttämästään resurssiviipaleesta sekä tietoverkkoinfrastruktuurista.

Tutkimuksessa [7] esitetään virtualisoinnin toteuttamiselle neljä eri tasoa, joissa jokainen virtualisoi eri resurssikokonaisuuksia käyttötapauksesta tai vaatimuksista riippuen. Yksinkertaisimmillaan viipaleet voidaan muodostaa käyttämällä eri taajuuksia eri viipaleille. Ideaalitapauksessa viipale pitää sisällään kaikki infrastruktuurissa virtualisoidut osat, mukaan lukien runkoverkon laitteet, kuten reitittimet ja kytkimet. Ideaalitapauksen viipale muodostaa siis kokonaisen virtuaalisen radioliityntäverkon sekä runkoverkon toiminnot, kuten lähtevän ja vastaanotettavan liikenteen yhdyskäytävän (engl. packet data network gateway).

Taajuustasoviipaloinnissa käytetty taajuus voidaan viipaloida aika-, taajuus- tai tilamultipleksauksella [7]. Multipleksaus tarkoittaa tässä yhteydessä resurssin jakamista osiin siten, että yksikään osa ei häiritse toista osaa. Esimerkiksi taajuusmultipleksauksessa käytettävä taajuuskaista jaetaan osiin siten, että kukin viipale käyttää eri taajuutta. Taajuustasoviipaloitinta voidaan ajatella linkin virtualisointina [7][20]. Kuva 3 havainnollistaa taajuustasoviipaloitinta taajuusmultipleksauksella toteutettuna aika-, taajuus- sekä tilatasossa.

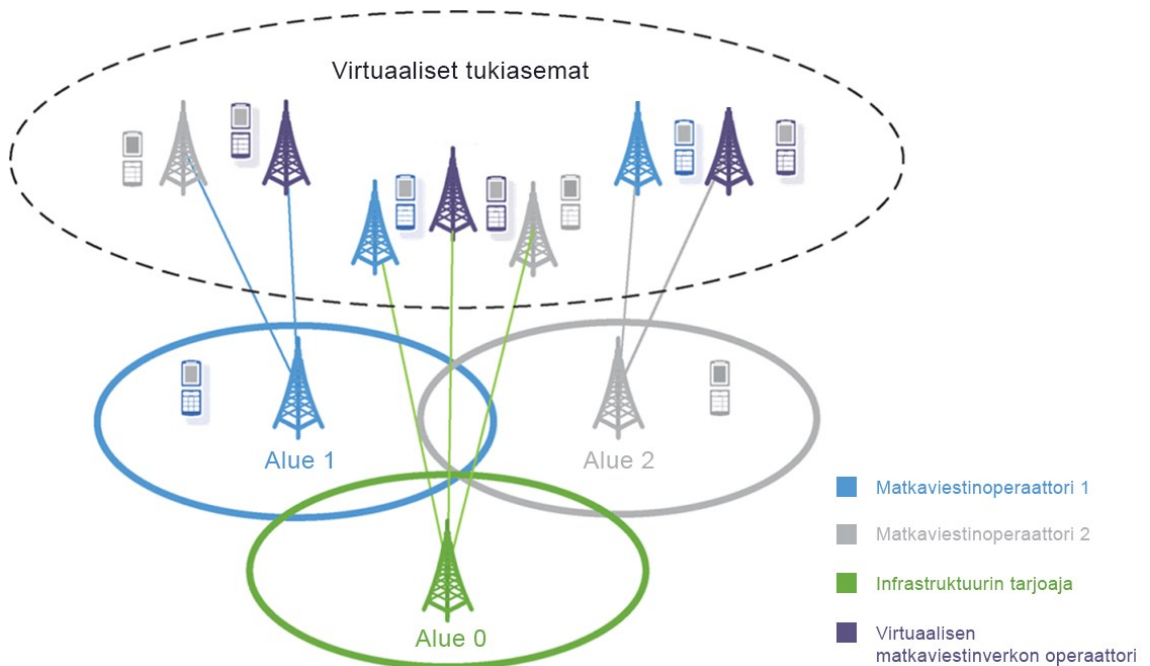


Kuva 3. a) Radioresurssi taajuus-, tila- ja aikatasossa. b) Taajuusmultipleksaus. c) Aikamultipleksaus. d) Tilamultipleksaus.

Infrastruktuuritasoviipaloinnissa jaetaan fyysiset verkkoelementit, kuten antennit, tukiasemat, prosessorit ja muisti, virtuaali-infrastruktuuri- ja virtuaalikoneviipaleiksi, jotka voidaan jakaa eri operaattoreiden kesken. Joitain infrastruktuuritasoviipaloinnin mekanismeja on käytetty myös verkkojakamisen yhteydessä [24]. [7] Verkkojakaminen tarkoittaa fyysisten resurssien jakamista toisen matkaviestinoperaattorin kanssa.

Kuvassa 4 esitetään esimerkki tilanteesta, jossa neljä eri toimijaa haluavat kattaa koko esimerkin alueen. Infrastruktuurin tarjoaja virtualisoi fyysisen infrastruktuurinsa kolmeksi virtuaaliseksi osaksi ja vuokraa näitä matkaviestinoperaattoreille sekä virtuaalisen matkaviestinverkon operaattorille. Molemmat matkaviestinoperaattorit viipaloivat omat verk-

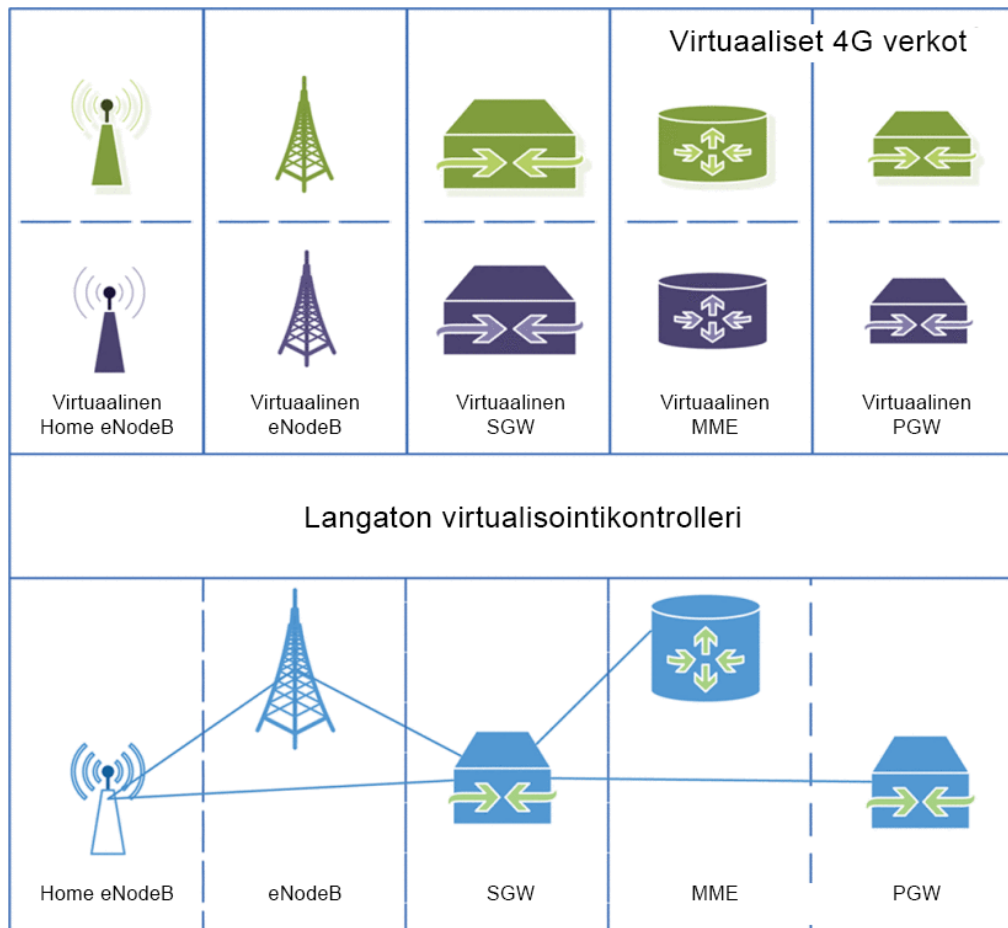
konsa. Virtuaalinen matkaviestinverkon operaattori vuokraa molemmilta matkaviestinoperaattoreilta sekä infrastruktuurin tarjoajalta yhden viipaleen. Matkaviestinoperaattorit vuokraavat viipaleet toisiltaan, jolloin kaikki toimitsijat kattavat esimerkin alueen yhdellä infrastruktuurilla.



Kuva 4. Esimerkki infrastruktuuritasoviipaloinnista. Muokattu [7].

Verkkotasoviipalointi esitetään tutkimuksessa [7] koko verkkoinfrastruktuurin virtualisointina, sisältäen myös muun muassa taajuudet. Tässä tasossa tukiasema virtualisoidaan useiksi virtuaalitukiasemiksi, radioresurssit viipaloidaan ja viipaleet jaetaan virtuaalitukiasemille. Myös runkoverkon toiminnallisuudet, kuten reitittimet ja liikkuvuuden hallintayksikkö (engl. mobility management entity, MME), virtualisoidaan, jotta voidaan muodostaa useita kokonaisia virtuaaliverkkokokonaisuuksia. Kuva 5 esittää tämän kaltaista tilannetta.

Kuvasta 5 nähdään radioliityntä- ja runkoverkon fyysinen infrastruktuuri, joka on virtualisoitu kahdeksi viipaleeksi, jotka molemmat muodostavat virtuaaliverkkokokonaisuuden. Kuvan eNodeB on 4G-matkaviestinverkon tukiasema ja Home eNodeB on tukiaseman alueella sijaitseva matkaviestinverkon piensolu. Näitä verkkokokonaisuuden viipaleita virtuaalisen matkaviestinverkon operaattori voi vuokrata infrastruktuurin tai virtuaalisen matkaviestinverkon tarjoajalta.



Kuva 5. Verkkotasoviipalointi. Muokattu lähteestä [7].

Vuotasoviipaloinnissa viipalointi tapahtuu joillekin tietyille verkkoliikennevuoloille. Vuolo on tietoliikennettä jonkin lähteen ja jonkin kohteen välillä, jossa lähde voisi olla esimerkiksi matkapuhelimet. Verkkotasoviipaloinnin tapaan infrastruktuuri virtualisoidaan ja viipaloidaan. Nämä viipaleet voivat olla taajuuskaistapohjaisia, kuten tiedonsiirtonopeus, tai resurssipohjaisia, kuten aikaväli (engl. time slot) [7]. Vuotasoviipaloinnissa palveluntarjoajille merkittävää on linkki palveluntarjoajalta asiakkaalle eikä niinkään koko verkon toiminta [17]. Palveluntarjoajalle matkapuhelinverkon komponentit ja topologia onkin näkymätöntä.

Yhteistä jokaisella viipalointitasolla on langaton virtualisointikontrolleri, joka mahdollistaa virtuaalisten viipaleiden hallinnan ja ohjelmoinnin palveluntarjoajille. Kontrolleri voidaan jakaa kahteen osaan: alusta- ja virtuaalikontrolleriksi. Alustakontrolleri mahdollistaa matkaviestinoperaattorille tai infrastruktuurin tarjoajalle virtuaalisten viipaleiden luomisen alla olevaan fyysiseen infrastruktuuriin. Alustakontrolleri on yhteydessä fyysisten resursien virtualisointiympäristöihin, jotka luovat ja hallitsevat virtuaalisia resursseja. Virtuaalikontrollerilla palveluntarjoajat voivat hallita virtuaalisia viipaleitaan ja muokata protokollia sekä palveluita, kuten välittämistä (engl. forwarding) ja vuoronnutta (engl. scheduling)

[6]. [7][17] Välittäminen tarkoittaa tietoliikennepakettien välittämistä verkon osasta toiseen ja vuoronnus on tässä yhteydessä päätöksen tekoa radioresurssien jaosta aika- sekä taajuustasossa.

3.1.2 Matkaviestinoperaattoriverkkojen jakaminen

Artikkelissa [21] esitetään matkaviestinverkkojakamisen olevan yksi tärkeimmistä ominaisuuksista, jotta matkaviestinverkkojen virtualisointi olisi mahdollista. Matkaviestinoperaattoriverkkojen jakaminen tarkoittaa jo olemassa olevan infrastruktuurin ja resurssien hyödyntämistä yhdessä muiden matkaviestinoperaattoreiden kanssa. Matkaviestinoperaattoriverkkojen jakaminen on ollut standardoitu 3rd Generation Partnership Projectin (3GPP:n) kuudennesta julkaisusta lähtien. Kyseistä standardia on päivitetty neljännen sukupolven langattomalle tiedonsiirtotekniikalle (engl. long-term evolution, LTE) 3GPP:n kahdeksannessa julkaisussa [22]. Yhdennessätoista julkaisussa esitettiin myös toinen dokumentti, joka kattaa muun muassa käyttöönotto- ja vaatimuksia [23]. Näitä vaatimuksia ja määrittelyitä on päivitetty monesti niiden ensijulkaisun jälkeen.

3GPP:n tietoverkkojakamisstandardien esittämät tietoverkkojen jakamistavat voidaan eritellä kahteen osuuteen: passiiviseen ja aktiiviseen [21]. Passiiviseen tietoverkkojen jakamiseen kuuluu muun muassa mastot, kaapeloinnit, virtalähteet ja ilmastointi. Aktiiviseen osuuteen kuuluu aktiivisten komponenttien jakaminen kuten tukiasemien, tukiasemakontrollerien ja antennien jakaminen. Aktiivisessa jakamisessa voidaan myös jakaa yhteinen taajuuskaista tai käyttää erillisiä taajuuksia eri operaattorien välillä. Aktiivista osuutta voidaan kutsua myös radioliityntäverkon jakamiseksi.

Radioliityntäverkon jakaminen edellyttää tukiaseman ja sen osien virtualisointia, verkon viipalointia sekä sopivan vuorontajan käyttöä. Tutkimuksen [20] mukaan kolme vaihtoehtoa erilaisille vuorontajille ovat resurssilohkojen (engl. physical resource block, PRB) vuoronnus, viipalevuoronnus sekä liikenteen muokkaus, joista radioliityntäverkoissa yleisin on resurssilohkovuoronnus.

Resurssilohkovuoronnuksessa tukiasemalla on virtualisointiympäristö, joka jakaa fyysisen tukiaseman fyysiset resurssit moneksi virtuaaliseksi tukiasemaksi sekä ajoittaa langattomia resursseja virtuaalisten tukiasemien välillä [20]. Virtualisointiympäristö jakaa resurssilohkot virtuaalisten tukiasemien välillä, jotka jakavat ne eteenpäin käyttäjille.

3.2 Virtualisoinnin hyödyt radioliityntäverkoissa

Radioliityntäverkon virtualisoinnin motivaattoreina ovat muun muassa parempi resursien käyttö, taloudellisuus, uudet liiketoimintamallit sekä resurssien jakaminen. Myös heterogeenisten verkkojen luominen on virtuaalisuuden seurauksena helpompaa [20]. Radioliityntäverkon virtualisoinnista hyötyvät sekä infrastruktuurien tarjoajat että palveluntarjoajat [17]. Palveluntarjoajat voivat verkon käytön mukaan vuokrata käytettäviä viipaleita halutuilla ominaisuuksilla infrastruktuurin tarjoajilta, joilla on helpompaa muokata ja ylläpitää vuokraamiaan viipaleita.

3.2.1 Skaalautuvuus

Virtuaalisen radioliityntäverkon vaatimuksien mukaan infrastruktuurin pitää tukea monia yhtäaikaista viipaleita samanaikaisesti sekä niiden luonti ja poisto pitää olla mahdollista [7]. Täten saadaan skaalautuva radioliityntäverkko, joissa viipaleita voidaan luoda mielivaltaisesti fyysisten rajoitteiden puitteissa.

Viipaleiden luonti ja poisto mahdollistavat vaihtelevan määrän toimijoita samalla infrastruktuurilla, jolloin tukiasemien käyttötaso ja tehokkuus kasvavat. Luonti ja poisto mahdollistavat matkaviestinverkon dynaamisuuden tietyn toimijan käyttöasteen mukaan. Esimerkiksi, jos palveluntarjoajan viipale ruuhkautuu, voi se vuokrata uuden viipaleen ja jakaa käyttäjänsä viipaleiden välillä. Ruuhkan väistyttyä viipaleiden määrää kyseiselle palveluntarjoajalle voidaan taas vähentää.

3.2.2 Taloudellisuus

Virtuaalinen radioliityntäverkko mahdollistaa tutkimuksen [24] kaltaisen operaattorien infrastruktuurien jakamisen, jonka taustalla on olemassa olevien tukiasemien laitteistojen huono käyttötaso: 50 % kaikesta tietoliikenteestä tapahtuu ainoastaan 20 % tukiasemista [25, katso [21]]. Täten suurin osa tukiasemista on vajaakäyttöisiä, jolloin infrastruktuurin tarjoajat eivät saa kaikkea mahdollista hyötyä investoinneistaan. Samaisessa tutkimuksessa arvioidaan 3G-verkon jakamisen taloudellisia hyötyjä eri operaattoreiden kanssa eri ympäristöissä: maaseudulla, lähiöissä ja kaupungissa. Arviolta 20-30 % pääomakustannuksista voidaan säästää jakamalla tukiasemat ja antennit. Jakamalla koko radioliityntäverkkoa uuden rakentamisen sijasta, infrastruktuurin tarjoajat säästävät parhaillaan 25-45 % pääomakuluissa sekä 15-20 % käyttökustannuksissa riippuen ympäristöistä [24].

Artikkeli [26] esittää viipaloinnin olevan tärkeä osa heterogeenistä radioliityntäverkkoa, jossa käytetään tehokkaasti radioresursseja. Tulevaisuuden matkaviestinverkot tulevat olemaan enemmän loogisia kuin fyysisiä ja ne pystyvät kohdistamaan käytettävissä olevat resurssit käyttötärpeen mukaan. Tällöin voidaan saavuttaa parempi radioliityntäverkon tehokkuus ja säästää kustannuksissa.

3.2.3 Innovointi ja uudet palvelut

Radioliityntäverkon virtualisointi painottuu enemmän ohjelmistoihin kuin laitteistoihin, jolloin uusien projektien ja innovaatioiden kokeileminen on helpompaa ja halvempaa. Aiemmin uusien innovaatioiden toteuttaminen ja testaaminen on ollut kallista ja kehittäjien on pitänyt olla varmoja uuden ominaisuuden toimivuudesta olemassa olevissa verkoissa vanhojen palveluiden rinnalla. Radioliityntäverkon virtualisointi tuo mahdollisuuden uusille palvelutyypeille, kuten testausympäristöpalvelulle (engl. testbed-as-a-service) [7]. Tämä mahdollistaa muiden uusien ominaisuuksien tai palveluiden innovoimista, sillä testaus todellisessa ympäristössä on suhteellisen helppoa verrattuna aikaisempaan laitteistopainotteiseen lähestymistapaan.

Testausympäristön tapaiset uudet palvelut ovat mahdollisia matkaviestinoperaattorin tarjotessa viipaloimiaan virtuaalisia resursseja. Näiden eristettyjen viipaleiden vuoksi palvelu ei häiritse muita verkon viipaleita, vaikka sen sisällä jokin menisikin vikaan. Tämä mahdollistaa useiden eri palveluiden yhtäaikaista käyttöä ja ylläpitämistä ilman normaaliin palvelujen häiritsemistä. [27] Ohjelmistopainotteisen luonteen sekä verkkojen helpon muokkaamisen vuoksi uusia verkkotekniikoita ja palveluita on helpompi toteuttaa, sillä fyysisiä ominaisuuksia ei tarvitse ottaa huomioon. [7] Tutkimus [20] esittää viipaloinnin mahdollistavan ”kaikki palveluna” (engl. everything-as-a-service) tyyppisen liiketoimintamallin, jossa matkaviestinverkon operaattorit saavat infrastruktuuripalvelun (engl. infrastructure-as-a-service) infrastruktuurin tarjoajalta ja operaattorit jakavat tietoverkkopalvelua (engl. network-as-a-service) palveluntarjoajille. Tällöin uusien toimintaansa räätälöityjen palveluiden kehitys ja tuottaminen mahdollistuu [27].

3.2.4 Verkon hallinta

Palvelun vaatimuksien mukainen viipalointi helpottaa verkkojen hallintaa sallimalla viipaleen muokkauksen ja toimintojen määrittämisen yksilöllisesti [20]. Täten viipaleet voidaan määrittää palvelun mukaisesti, kuten esimerkiksi palvelu, joka kattaa ainoastaan liikkumattomia käyttäjiä tai laitteita. Tällöin verkkoa voidaan yksinkertaistaa minimoimalla liikkuvuuden hallinta ja tällöin koko verkon hallinta helpottuu.

Verkon toiminnot, kuten kuormantasaus (engl. load balancing), voidaan virtualisoida tietoverkon toimintojen virtualisointi (engl. network function virtualization, NFV) -arkkitehtuurin avulla, jonka päämääränä on irroittaa toiminnot tehtävänsä erikoistuneesta laitteistosta [20]. Täten virtuaaliset toiminnot eivät tarvitse tätä erikoistunutta laitteistoa, vaan niitä voidaan ajaa yleiskäyttöön soveltuvilla virtuaalikoneilla. Sijoittaminen erikoislaitteistoihin on kallista, joten infrastruktuurin tarjoajalle virtuaalikoneiden hyödyntäminen on edullista. Virtuaaliset toiminnot mahdollistavat virtuaalisien toimintojen helpon luomisen, tuhoamisen sekä siirtämisen. Itse toimintojen hallinta voidaan toteuttaa keskitetysti SDN:n avulla.

Palvelun tarpeen mukainen toimintojen käyttö ja muokkaus säästää infrastruktuurin tarjoajan resursseja, jolloin voidaan varata näitä saatavilla olevia resursseja muille viipaleille. NFV:n ja SDN:n avulla viipaleiden luominen ja tuhoaminen on joustavaa [20].

3.3 Virtualisoinnin haasteet radioliityntäverkoissa

Radioliityntäverkon virtualisointi tuo uusia haasteita operaattoreille fyysisten resurssien, kuten vapaana olevien käytettävien taajuuksien ja aikavälien, ollessa rajalliset. Erinäiset verkon suorituskykyvaatimukset, kuten pieni viive, tuottavat omat haasteensa. Toisin kuin langallisissa verkoissa, langattoman verkon virtualisointi monimutkaistuu siirtotien yleislähetyksellisen luonteen vuoksi.

Yleislähetykset ovat lähetysisiä, jotka kaikki kuulevat. Langattomia lähetysisiä ei voi saada täysin keskitettyä vain haluttuun kohteeseen. Lähetykset tapahtuvat kuitenkin ainoastaan tietyillä taajuuksilla ja tiettyinä aikoina, jotka mahdollistavat tietyn lähetysten kuuntelemisen. Kuitenkin kaksi lähetystä samalla taajuudella, samaan aikaan ja lähellä toisiaan häiritsevät vastaanotettavia signaaleita, sillä signaalit summautuvat keskenään ja täten tiedonsiirto vaikeutuu tai jopa estyy. Yleislähetyksellisen luonteen vuoksi resurssijakoon, viipaleiden eristämiseen ja liikkuvuuteen tulee kiinnittää paljon huomiota, joka aiheuttaa tarpeen lisäsignaloinnille. Hallintasiignaloinnin seurauksena ongelmaksi voi muodostua suuri yleisrasite (engl. overhead) ja viive.

3.3.1 Resurssien varaus, eristäminen ja liikkuvuus

Tutkimuksen [20] perusteella verkkoviipaloinnin suurimmat haasteet löytyvät tukiasemista ja niiden langattomista linkeistä. Linkkien kapasiteetti ja rajalliset resurssit tuottavat ongelmia toisin kuin langallisissa verkoissa, joissa käytettäviä taajuuksia voidaan laajentaa. Langattomissa verkkoyhteyksissä kapasiteettiin vaikuttaa signaalin suhde häiriöihin

(engl. signal-to-interference, SIR) sekä signaalin suhde kohinaan (engl. signal-to-noise-ratio, SNR), jotka voivat vaihdella muun muassa monitie-etenemisen vaikutuksesta.

Tutkimukset [7][20] esittävät langattoman verkon viipaloinnin resurssien varauksen erityisen ongelmalliseksi. Resurssin määritelmäkin voi vaihdella riippuen näkökulmasta: resurssi voi olla aika-, taajuus- tai tilajaettu radiotaajuus, saatavissa oleva lähetysaika tai tiedonsiirtokapasiteetti. Resurssien varauksessa on monta muuttujaa, kuten resurssin määrittelyminen, kuinka resurssit on mallinnettu, miten viipaleelle voidaan pyytää resursseja sekä mitä mekanismeja käytetään resurssien varaamiseen viipaleille. Toisin sanoen resurssien varaus -ongelman ratkaisu vastaa kysymykseen: miten virtuaalisia langattomia verkkoja voidaan sisällyttää fyysisiin verkkoihin?

Eristäminen tarkoittaa radioresurssivarausten hallitsemista siten, etteivät viipaleet häiritse toisiaan, vaikka viipaleita muokattaisiin, lisättäisiin tai poistettaisiin. Ongelmana onkin viipaleiden eristäytymisen takaaminen, joka on monimutkaista kanavan vaihtelevuuden sekä käyttäjien liikkuvuuden vuoksi. [20] Fyysinen tiedonsiirtonopeus voi vaihdella paljonkin muun muassa lähetystehon, häiriöiden ja monitie-etenemisen vuoksi ja siksi tarvitaankin dynaamisia resurssivaraustekniikoita, jotka hyödyntävät kanavan tilatietoja tehdessään varauspäätöksiä.

Langattoman radioliityntäverkon virtualisointi aiheuttaa myös uusia haasteita liikkuvuudelle tuodessaan monimutkaisuutta liikkuvuudenhallintaan. Uusi kanavanvaihtomekanismi (engl. handover) tarvitaan, jotta käyttäjä voi vaihtaa tukiasemaa, käytettävää verkoteknologiaa sekä verkkoviipaletta, silloinkin kun viipale ei kuulu samalle infrastruktuurin tarjoajalle tai virtuaalisen matkaviestinverkon operaattorille, säilyttäen silti palvelun laadun ja jatkuvuuden. [7] Tutkimus [20] kertoo vaatimuksien mukaisen kanavanvaihtomekanismin toteuttamisen vaikuttavan monimutkaiselta.

3.3.2 Yleisrasite ja viive

Nykyiset radioliityntäverkot ovat usein hajautettuja eli suuri osa radioliityntäverkkojen toiminnasta ja logiikasta käsitellään muun muassa tukiasemilla. Myös keskitetty radioliityntäverkon toteutustapa on mahdollinen, jossa tukiasemien logiikka, signalointi ja tukiasemien ohjaus, siirretään tukiasemilta kauemmas keskitettyyn sijaintiin, kuten radioliityntäpilveen. Sekä hajautetun että keskitetyn radioliityntäverkon virtualisointi on mahdollista, mutta keskitetyt radioliityntäverkon virtualisoinnin toteutustavat tuottavat ylimääräistä

yleisrasitetta verrattuna hajautetun radioliityntäverkon virtualisointiin. Yleisrasite on ylimääräistä dataa, jota joudutaan lähettämään hyötykuorman eli viestin sisällön lähettämiseksi.

Kasvaneen yleisrasitteen vuoksi matkaviestinoperaattorit joutuvat investoimaan suurta tietoliikennemäärää mahdollistavaan valokuitukaapelien käyttöön, sillä esimerkiksi kirjan [28, luku 13.3] mukaan keskitetyssä radioverkossa tukiaseman ja radioliityntäpilven välisen yhteyden (engl. fronthaul) vaatimukset ovat 50-kertaiset runkoliityntäyhteyteen (engl. backhaul) verrattuna. Artikkele [27] esittää linkin suorituskyvyn sekä prosessointisuorituskyvyn rajoittavaksi tekijäksi virtualisoidulle radioliityntäverkolle, jossa kontrolli on siirretty kauemmas tukiasemasta.

Tutkimuksen [7] mukaan uudet liiketoimintamallit pakottavat uusien koordinoitumekanismien ja -rajapintojen käyttöön riippumatta siitä, että onko radioliityntäverkko hajautettu vai keskitetty. Täten verkon monimutkaisuus sekä viive voivat lisääntyä logiikan lisääntymisessä verkossa, mutta toisaalta viiveen lisääntymistä voidaan kompensoida räätälöidyillä palvelun laatuun erikoistuneilla viipaleilla ja täten jopa vähentää viivettä.

4. VIRTUALISOINTI KAUPALLISISSA MATKAVIESTINVERKOISSA

Tässä luvussa esitellään lyhyesti perinteiset virtuaalioperaattorit, LTE-tietoverkkojen virtualisointi sekä katsaus tulevaisuuden matkaviestinverkkojen virtualisointiin. Virtualisointia tarkastellaan myös tulevaisuuden 5G-matkaviestinverkkoteknologian virtualisoinnin sekä keskitetyn pilviradioliityntäverkon (engl. cloud radio access network, C-RAN) virtualisoinnin näkökulmasta.

Virtualisoinnin käyttäminen 5G-matkaviestinverkoissa varmistui 3GPP:n 15. julkaisun [29] myötä. Kyseisessä julkaisussa esitetään 5G:n järjestelmäarkkitehtuuri, jossa käytetään muun muassa radioliityntä- ja runkoverkon virtualisointia ja viipalointia. Artikkelin [30] toteaa arkkitehtuurin olevan modulaarinen, uudelleenkäytettävä ja useita radioliityntäteknologioita tukeva.

4.1 Perinteiset virtuaalioperaattorit

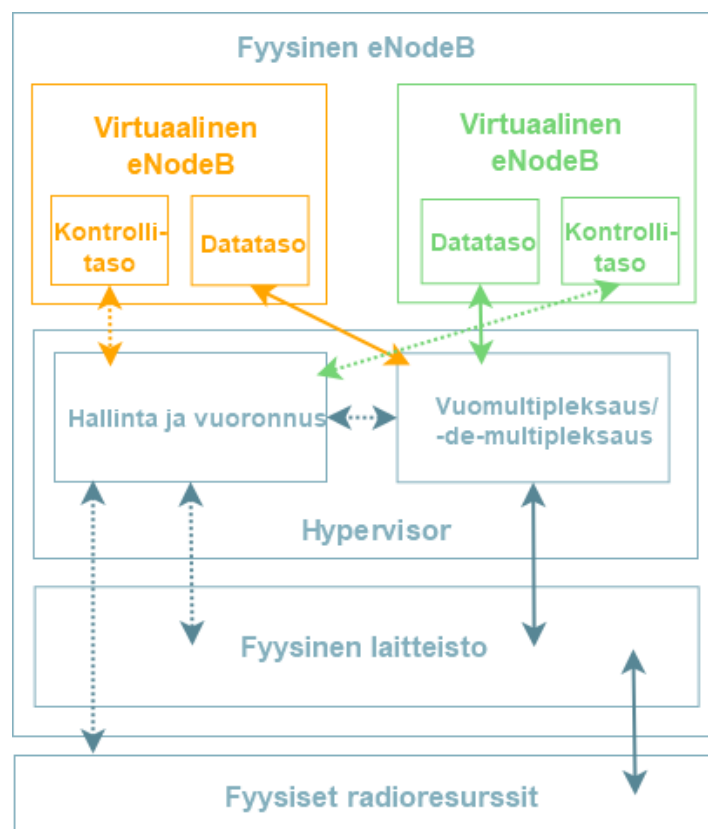
Virtuaalioperaattoreita on ollut 1990-luvulta lähtien [31]. Virtuaalioperaattori on matkaviestinverkko-operaattorin radioliityntäverkkoa käyttävä operaattori, joka tarjoaa omia palvelujaan käyttäjille. Virtuaalioperaattori voi vaikuttaa moniin runkoverkon toimintoihin, toisin kuin palveluntarjoaja. Motivaationa tällaisille operaattoreille on muun muassa tukiasemien pieni käyttöaste, infrastruktuurin pääoma- ja käyttökustannukset. Perinteiset virtuaalioperaattorit eivät kuitenkaan ole täysin tässä työssä esitettyjen virtuaalisten matkaviestinverkko-operaattoreiden kaltaisia.

Perinteisessä matkaviestinverkossa vallitsee liiketoimintamalli, joka on esitetty kuvassa 2. Perinteisesti virtuaalioperaattori ei voi vaikuttaa radioliityntäverkkoon, mutta sillä on vaihtoehtoja paljonko toimintoja operaattori toteuttaa itse [31]. Näitä toimintoja on muun muassa brändäys, laskutus tai runkoverkossa tapahtuva välitys. Virtuaalioperaattori voi olla esimerkiksi vain uusi brändi, joka myy palvelujaan omalla nimikkeellä, mutta käyttää matkaviestinverkko-operaattorin radioliityntä- ja runkoverkkoa laskutustoimintoihin. Virtuaalioperaattorilla on mahdollisuus toteuttaa myös oma runkoverkko. Tämä on mahdollista LTE-matkaviestinverkoissa esitetyillä rajapinnoilla, jotka mahdollistavat aikaisempaa helpomman matkaviestinverkko-operaattorin radioliityntäverkkoon liittymisen. Myös vaihtoehdot näiden kahden vaihtoehdon välillä onnistuu matkaviestinverkko-operaattorin ja virtuaalioperaattorin sopimuksen mukaisesti. Esimerkiksi Suomessa tällä hetkellä tunnetuin virtuaalioperaattori on luultavasti voimakkaan mainonnan ansiosta Moi

Mobiili Oy, joka käyttää matkaviestinverkko-operaattorin, DNA Oyj:n, palveluja tarjotakseen omia palveluitaan käyttäjille.

4.2 Virtualisointi LTE-järjestelmissä

LTE-matkaviestinverkon virtualisointi on toteutettu tutkimuksessa [32] lisäämällä fyysinen hypervisor LTE-verkon tukiasemalle, eli eNodeB:lle. Hypervisor virtualisoi tukiasemat useiksi tukiasemiksi sekä hallinnoi resursseja näiden virtuaalisten tukiasemien välillä. Lisäksi hypervisorin tehtävänä on vuorontaa radioresursseja virtuaalisten tukiasemien välillä. Kuva 6 havainnollistaa mahdollista LTE-verkon virtualisointia.



Kuva 6. Esimerkki LTE-verkon virtualisoinnista. Muokattu lähteestä [7].

Virtuaaliset matkaviestinverkon operaattorit voivat käyttää hypervisorin virtualisoimia virtuaalisia tukiasemia ja hypervisorin jakamia taajuuksia, jotka määräytyvät virtuaalisen matkaviestinverkon operaattorin sekä infrastruktuurin tarjoajan sopimuksen mukaisesti [32, luku 3]. Hypervisor kerää tietoa virtuaalisten tukiasemien tilasta, kuten kanavan tilasta, käyttöasteesta tai palvelun laatuvaatimuksista, joiden perusteella hypervisor tekee resurssien jakopäätökset. Näiden lisäksi hypervisorin voi vuorontaa resursseja muun muassa taajuuskaistan tai datanopeuden mukaan. [7] Vuorontajan haasteena on resurssijaon reiluus ja virtuaalisten matkaviestinverkko-operaattoreiden vaatimuksien toteuttaminen [32].

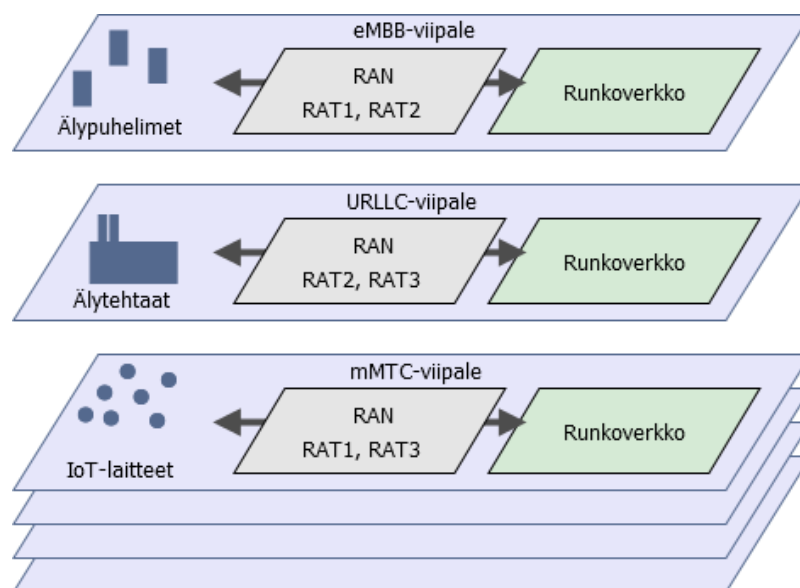
LTE-verkkojen virtualisoinnin yhteydessä käytettävä dynaaminen kuormantasaus auttaa saavuttamaan paremman verkon suorituskyvyn [7]. Dynaaminen kuormantasaus siirtää kuormaa suuren käyttöasteen viipaleelta pienemmän käyttöasteen viipaleille. Vaikka LTE-järjestelmän virtualisointi saadaan nykytekniikoilla toteutettua, tutkimuksen [7] mukaan tarvitaan edelleen parannuksia muun muassa kontrollisignalointiin ja virtuaalisten tukiasemien eristämiseen toisistaan.

4.3 Tulevaisuuden matkaviestinverkot

Tulevaisuuden matkaviestinverkoissa on nähtävissä useita käyttötapauksia radioliityntä- ja runkoverkon virtualisoimiseen, jotka parantavat muun muassa radioliityntäverkon heterogeenisyyttä. Tavoitteena on paremmat palvelut, energiatehokkuudet sekä suorituskyvyt. Yhteensopivuus menneiden ja tulevien teknologioiden kanssa on tärkeää sekä 5G- että pilviradioliityntäverkoille.

4.3.1 Viipalointi 5G-matkaviestinverkoissa

Tulevan 5G-matkaviestinverkon palvelupohjainen järjestelmäarkkitehtuuri käyttää viipalointia 3GPP:n 15. julkaisun [29] myötä. Palvelupohjaisuus näkyy artikkelin [30] kuvauksessa, jossa käytetään kolmannessa luvussa esitettyä viipalointia palvelun laadun mukaan, jonka tarkoituksena on muodostaa viipaleita räätälöidysti eri palveluille. Palvelut voivat määrittellä tarvittavat vaatimukset käyttämilleen viipaleille. Kuvasta 7 voidaan havaita kolme eri palvelun laadun omaavaa viipaletta eri käyttötarkoituksiin.



Kuva 7. Viipalointi palvelun laadun mukaan 5G-verkossa. Muokattu lähteestä [7].

Artikkelin [33] mukaan 5G tulee tukemaan kolmea yleistä palvelua: enhanced mobile broadband (eMBB), massive machine-type communications (mMTC) ja ultra-reliable and low-latency communications (URLLC). Jokaiselle palvelulle luodaan oma viipale, jotka pitävät sisällään radioliityntä- ja runkoverkot. Nämä verkot muodostavat virtuaalisen verkkokokonaisuuden, joten 5G toteuttaa myös verkkotasoviipalointia. Nämä palvelut keskittyvät aina johonkin tarkoituksen mukaiseen palvelun laatuvaatimukseen.

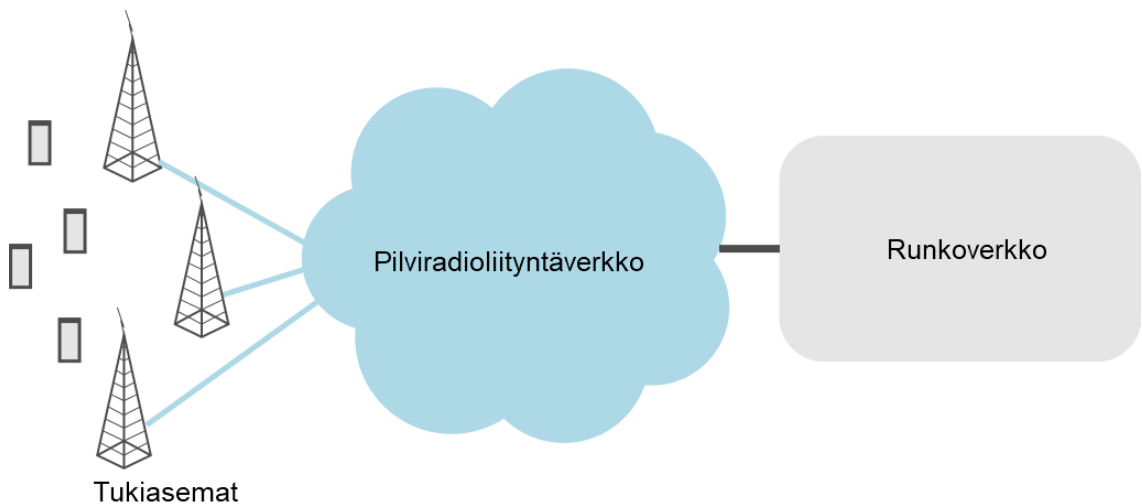
Vaatuksena eMBB:llä on suuret datanopeudet ja verkon suuri kapasiteetti eikä esimerkiksi viiveeseen tarvitse kiinnittää erityistä huomiota. Viipaleelle voidaan allokoida esimerkiksi suurien tietoliikennenopeuksien mahdollistava reitti, vaikka kyseinen reitti nostaisi viivettä. Reitti muodostuu lähetyksen lähettäjän ja kohteen välisistä laitteista. Näitä reittejä voi olla useita erilaisia, kuten esimerkiksi suurien tiedonsiirtolinkkien omaava reitti tai vaikkapa laitteiden määrän minimoiminen, jolloin usein viive vähenee. Esineiden internet (engl. internet-of-things, IoT) -laitteille tarkoitettu mMTC keskittyy minimoimaan signaloinnin sekä mahdollistamaan erittäin monen laitteen yhtäaikaisen tukemisen. Artikkelin [35] esittää mMTC:n tarvitsevan paljon laskentatehoa, mutta vähän taajuuskaistaa, joten viipale tulee luoda tarpeeksi suurella laskentateholla sekä taajuuskaistan minimoimisella. Kriittiseen tietoliikenteeseen keskittynyt URLLC tarjoaa luotettavaa ja erittäin pieniviiveistä palvelua. Viivettä voidaan vähentää esimerkiksi minimoimalla tarvittavien hyppyjen määrä reitillä kohteeseen ja takaisin [35]. Käytännössä tämä tarkoittaa tietoliikenteen kohteen fyysisen sijoittamisen mahdollisimman lähelle runkoverkkoa. Kuva 7 esittää näitä palveluita käyttäen useita eri radioliityntäverkkoteknologioita.

5G:n tavoitteena on tukea heterogeenisiä verkkoja. Tutkimus [20] arvioi, että viipalointi on yksi tärkeimmistä tavoista saavuttaa heterogeenisten verkkojen vaatimukset tulevaisuuden 5G-järjestelmissä. Artikkelin [30] toteaa, että 5G on yhteensopiva useiden radioliityntäverkkoteknologioiden (engl. radio access technology, RAT) kanssa ja uusien teknologioiden yhteensovittaminen on jo alkanut. Samainen artikkeli kertoo myös liikkuvuuden olevan saumatonta eri radioliityntäteknologioiden kesken 5G-runkoverkkoteknologialla.

4.3.2 Pilviradioliityntäverkko

Toinen tulevaisuuden matkaviestinverkkoarkkitehtuuri on pilviradioliityntäverkko [34], joka on keskitetty matkaviestinverkkoratkaisu. Radioliityntäverkot tarvitsevat radioresurssien lisäksi laskentatehoa suorittaakseen erinäisiä toimintoja, kuten radioresurssien hallintaa. Digitaaliset laskentaresurssit kerätään keskitettyyn paikkaan, josta niitä voidaan jakaa tukiasemien kesken dynaamisesti tarpeen mukaan. Nämä laskentaresurssit

voivat olla yleiskäyttöisiä prosessoreita. Niillä toteutetaan toiminnot, kuten fyysisen kerroksen signaalin käsittely, jotka virtualisoidaan. Tavoitteena kyseisellä arkkitehtuurilla on laskentaa vaativien toimintojen poistaminen tukiasemilta ja toteuttamalla näistä vastaavat virtuaaliset toiminnot keskitettyyn paikkaan. Kuvassa 8 esitetään yksinkertaistettu pilviradioliityntäverkko, jossa radioliityntäverkon toiminnot toteutetaan keskitetysti pilvessä eikä tukiasemien tarvitse suorittaa laskentaa vaativia toimintoja toisin kuin perinteisessä radioliityntäverkossa.



Kuva 8. Yksinkertaistettu pilviradioliityntäverkko. Muokattu lähteestä [34].

Pilviradioliityntäverkossa radioresurssit ovat edelleen jaettu hajautetusti tukiasemille, kuten perinteisissä radioliityntäverkoissa. Näiden resurssien virtualisointia tarvitaan, jotta resurssit voidaan jakaa monen virtuaalisen matkaviestinverkon operaattorin kanssa. Tutkimuksen [34] mukaan pilviradioliityntäverkko mahdollistaisi skaalautuvan, energiatehokkaan ja suorituskykyisen matkaviestinverkon. Samaisessa tutkimuksessa esitetään matkaviestinverkko-operaattoreille säästöjä pääomakustannuksista 15 % sekä käyttökustannuksista 50 % verrattuna perinteiseen matkaviestinverkkoon.

5. YHTEENVETO

Radioliityntäverkon virtualisointi tarkoittaa matkaviestinverkon infrastruktuurin ja radiore-surssien abstrahoinnista ja jakamista osiin, joita kutsutaan viipaleiksi. Yksi näiden vaati-muksista on eristyneisyys muista viipaleista. Langattoman tietoliikenneverkon virtuali-soinnin muita vaatimuksia on muun muassa rinnakkaiselo, toisin sanoen infrastruktuurin tarjoajien pitää pystyä ylläpitämään monia viipaleita yhtäaikaisesti. Nämä viipaleet pitää olla myös ohjelmitavissa ja hallittavissa käyttötarpeisiin sopiviksi. Virtualisointi tuo mu-kanaan myös uusia liiketoimintamalleja, joissa on uusia rooleja, kuten infrastruktuurin tarjoaja ja virtuaalisen matkaviestinverkon operaattori, joka vuokraa virtuaalisia viipaleita matkaviestinverkko-operaattoreilta. Radioliityntäverkon virtualisointi voidaan toteuttaa monella eri tapaa ja eri tasoisena. Viipaleet voivat olla ainoastaan taajuusmultipleksat-tuja radiore-surssitasolla tai ne voivat olla koko matkaviestinverkon laitteiden ja toiminto-jen virtualisoitu kokonaisuus.

Virtualisointi parantaa skaalautuvuutta, säästää energiaa ja on taloudellisesti erittäin kil-pailukykyinen nykyisten matkaviestinverkkoihin verrattuna. Viipaleiden tarjoamat ominai-suudet, kuten helppo hallittavuus ja virheensietokyky, avaavat ovia monille uusille pal-veluille. Yleislähetyksellisen luonteen vuoksi radioliityntäverkon virtualisointi ja verkkovii-paleiden käyttö aiheuttaa haasteita, joita ei langallisessa verkossa ole. Näitä haasteita on muun muassa resurssien varaus ja eristämisen monimutkaisuus. Myös yleisrasite ja viive voivat lisääntyä esimerkiksi resurssivarauksista aiheutuneen signaloinnin vuoksi.

Neljännän sukupolven matkaviestinverkoissa virtualisointia ei käytetä ainakaan viipaloin-nin muodossa, vaikka virtuaalioperaattoreita on ollut olemassa jo 1990-luvulta asti. Tu-leva 5G määrittelee viipaloinnin jo standardin tasolla. Viipaleet toteutetaan verkkotasovii-paleina, jotka muodostavat virtuaalisen verkkokokonaisuuden koko käytettävästä ver-kosta, sisältäen radioliityntä- ja runkoverkon toiminnot. Viipalointia palvelun laadun mu-kaan -käyttötapausta sovelletaan erilaisten viipaleiden luomiseen, jolloin viipaleet luo-daan palvelun vaatimuksien mukaan. Esimerkiksi eMMB:n vaatimukset ja 5G-teknologia mahdollistavat suuren kapasiteetin ja datanopeuden. Viipalointi näyttääkin olevan tule-vaisuuden verkkojen vaatimuksien mahdollistaja.

LÄHTEET

- [1] Suomen virallinen tilasto (SVT): Väestön tieto- ja viestintätekniikan käyttö [verkojulkaisu]. ISSN=2341-8699. 13 2017, 2. Internetin käyttö mobiililaitteilla. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 9.11.2018]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/sutivi/2017/13/sutivi_2017_13_2017-11-22_kat_002.fi.html
- [2] Matkaviestinverkossa siirretty tieto, Viestintävirasto, 2018 [viitattu 4.11.2018]. Saatavissa: <https://www.viestintavirasto.fi/tilastotjatutkimukset/tilastot/2013/matkaviestinverkossasiirrettytieto.html>
- [3] A. Gudipati, D. Perry, L. Li, S. Katti, SoftRAN: Software defined radio access network, Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on hot topics in software defined networking, ACM, 2012, pp. 25–30.
- [4] D. Mishra, P. Kulkarni, A survey of memory management techniques in virtualized systems, Computer Science Review, Vol. 29, 2018, pp. 56–73.
- [5] J. E. Smith, R. Nair, Chapter One - Introduction to virtual machines, virtual machines, Morgan Kaufmann, Burlington, 2005, pp. 1–26.
- [6] R. P. Esteves, L. Z. Granville, R. Boutaba, On the management of virtual networks, IEEE Communications Magazine, Vol. 51, Iss. 7, 2013, pp. 80–88.
- [7] C. Liang, F. R. Yu, Wireless network virtualization: A survey, some research issues and challenges, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 17, Iss. 1, 2015, pp. 358–380.
- [8] IEEE standards for local and metropolitan area networks: Virtual bridged local area networks, IEEE Std 802.1Q-1998, 1999. 211 p.
- [9] N. M. M. K. Chowdhury, R. Boutaba, A survey of network virtualization, Computer Networks, 2010, pp. 862–876.
- [10] J. T. Harmening, Chapter 58 - Virtual Private Networks, Computer and Information Security Handbook (Third Edition), Morgan Kaufmann, Boston, 2017, pp. 843–856.
- [11] D. L. Tennenhouse, J. M. Smith, W. D. Sincoskie, D. J. Wetherall, G. J. Minden, A survey of active network research, IEEE Communications Magazine, Vol. 35, Iss. 1, 1997, pp. 80–86.
- [12] D. Kreutz, F. M. V. Ramos, P. E. Veríssimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, S. Uhlig, Software-defined networking: A comprehensive survey, Proceedings of the IEEE, Vol. 103, Iss. 1, 2015, pp. 14–76.
- [13] P. Görransson, C. Black, T. Culver, Chapter 5 - The OpenFlow specification, software defined networks (second edition), Morgan Kaufmann, Boston, 2017, pp. 89–136.

- [14] P. Mell, T. Grance, The NIST definition of cloud computing, National Institute of Standards and Technology, 2011, [Viitattu 20.03.2019] Saatavissa: <http://faculty.winthrop.edu/domanm/csci411/Handouts/NIST.pdf>
- [15] G. Aljabari, E. Eren, Virtualization of wireless LAN infrastructures, Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, 2011, pp. 837–841.
- [16] N. M. M. K. Chowdhury, R. Boutaba, Network virtualization: State of the art and research challenges, IEEE Communications Magazine, Vol. 47, Iss. 7, 2009, pp. 20–26.
- [17] C. Liang, F.R. Yu, Wireless virtualization for next generation mobile cellular networks, IEEE Wireless Communications, Vol. 22, Iss. 1, 2015, pp. 61–69.
- [18] R. Kokku, R. Mahindra, H. Zhang, S. Rangarajan, NVS: A substrate for virtualizing wireless resources in cellular networks, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 20, Iss. 5, 2012, pp. 1333–1346.
- [19] A. Belbekkouche, M. M. Hasan, A. Karmouch, Resource discovery and allocation in network virtualization, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 14, Iss. 4, 2012, pp. 1114–1128.
- [20] M. Richart, J. Baliosian, J. Serrat, J. Gorricho, Resource slicing in virtual wireless networks: A survey, IEEE Transactions on Network and Service Management, Vol. 13, Iss. 3, 2016, pp. 462–476.
- [21] X. Costa-Perez, J. Swetina, T. Guo, R. Mahindra, S. Rangarajan, Radio access network virtualization for future mobile carrier networks, IEEE Communications Magazine, Vol. 51, Iss. 7, 2013, pp. 27–35.
- [22] Universal mobile telecommunications system (UMTS); LTE; Network sharing; Architecture and functional description, 3GPP TS 23.251, v. 11.3.0, 2012.
- [23] Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal mobile telecommunications system (UMTS); LTE; Service aspects and requirements for network sharing, 3GPP TR 22.951, v. 15.0.0, 2018.
- [24] D.E. Meddour, T. Rasheed, Y. Gourhant, On the role of infrastructure sharing for mobile network operators in emerging markets, Computer Networks, 2011, pp. 1576–1591.
- [25] H. Guan et al., Discovery of Cloud-RAN, Cloud-RAN Workshop, 2010.
- [26] 5G systems, Ericsson, Stockholm, Sweden, Jan. 2015, [Viitattu 20.03.2019] Saatavissa: <https://www.ericsson.com/assets/local/news/2015/1/what-is-a-5g-system.pdf>.
- [27] H. Wen, P.K. Tiwary, T. Le-Ngoc, Current trends and perspectives in wireless virtualization, 2013 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (MoWNeT), 2013, pp. 62–67.

- [28] H. Holma, A. Toskala, I. ebrary, LTE advanced: 3GPP solution for IMT-advanced, Wiley, Chichester [England]; Hoboken, N.J, 2012, 248p.
- [29] 5G; System architecture for the 5G System, 3GPP TS 23.501, v. 15.4.0 Release 15, 2019.
- [30] F. Mademann, System architecture milestone of 5G Phase 1 is achieved, 3GPP, 2017. [verkkojulkaisu, viitattu 15.04.2019] Saatavissa: https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1930-sys_architecture
- [31] R. Copeland, N. Crespi, Modelling multi-MNO business for MVNOs in their evolution to LTE, VoLTE & advanced policy, 2011 15th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks, pp. 295–300.
- [32] Y. Zaki, L. Zhao, C. Goerg, A. Timm-Giel, LTE mobile network virtualization, Mobile Net. & Applications, vol 16, 2011, pp. 424–432.
- [33] P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, G. Durisi, 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View, IEEE Access, vol. 6, 2018. pp. 55765–55779.
- [34] A. Checko, H.L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M.S. Berger, L. Dittmann, Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 17, Iss. 1, 2015, pp. 405–426.
- [35] W. Guan, X. Wen, L. Wang, Z. Lu, Y. Shen, A Service-Oriented Deployment Policy of End-to-End Network Slicing Based on Complex Network Theory, IEEE Access, Vol. 6, 2018, pp. 19691–19701.