Reunalaskenta arkkitehtuurit

Lauri Vene

Pro gradu -tutkielma
HELSINGIN YLIOPISTO
Tietojenkäsittelytieteen laitos

Helsinki, 19. huhtikuuta 2018

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta — Fakultet — Faculty	Laitos — Institution — Department
Matemaattis-luonnontieteellinen	Tietojenkäsittelytieteen laitos

Tekijä — Författare — Author
Lauri Vene

Työn nimi — Arbetets titel — Title

Reunalaskenta arkkitehtuurit

Oppiaine — Läroämne — Subject
Tietojenkäsittelytiede

Työn laji — Arbetets art — Level	Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages
Pro gradu -tutkielma	19. huhtikuuta 2018	37

Tiivistelmä — Referat — Abstract

Tiivistelmä.

Avainsanat — Nyckelord — Keywords
reuna, pilvi, tietojenkäsittelytiede

Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited

Muita tietoja — Övriga uppgifter — Additional information

Sisältö

Huomioita

- reuna
- reunasolmu

Tutkielmassa puhutaan mobiililaitteesta, mutta monet toiminnallisuudet ovat sovellettavissa kaikenlaisiin mobiileihin laitteisiin, esimerkiksi kannettaviin tai älykkäisiin ajoneuvoihin.

Listan Mobile Computingin neljästä pääasiallisesta rajoitteesta.
Unpredictable variation in network quality, lowered trust and robustness of mobile elements, limitations on local resources imposed by weight and size constraints, and concern for battery power consumption [13]

[13]M. Satyanarayanan, "Fundamental Challenges in Mobile Computing,"Proc. 15th ACM Symp. Principles of Dist. Comp., Philadelphia, PA, May, 1996

1 Johdanto

2 Reunalaskennan perusteet

2.1 Motivaatio

Reunalaskennan ideana on täydentää ja avustaa resurssiköyhiä asiakaslaitteita. Mobiililaitteisiin voitaisiin teoriassa lisätä enemmän resursseja, mutta ne tulisivat kannettavuuden ja käyttöajan kustannuksella. Avustamiseksi voidaan ajatella esimerkiksi tilanne, jossa akkuvirtaa säästääkseen, mobiililaite välittää resurssi intensiivisen laskutoimituksen reunasolmulle laskettavaksi. Reunasolmun voi ajatella kevennetyksi versioksi palvelimesta joten sen rajoitteet ovat hyvin erilaiset kuin asiakaslaitteen. Täydentävä toiminta reunalaskennan avulla tarkoittaa asiakaslaitteen resurssin puutetta suoriutua jostakin tehtävästä. Esimerkiksi muistin riittämättömyys kuvankäsittelyyn. Tällöin voitaisiin esimerkiksi ottaa etäkäyttöyhteys reunasolmuun jolla käsittely tehdään. Asiakaslaitteelle jäisi tässä tilanteessa tehtäväksi ainoastaan esittää reunasolmun tilaa käyttäjälle.

Satyanarayana [Satyanarayanan, 2001] esitti artikkelissaan pervasive computing esimerkkejä jokapaikan tietotekniikasta. Ympäristöön sijoitettujen laitteiden yhteistoiminnan avulla, asiakkaalle voidaan tarjota parempaa ja täsmällisempää palvelua. Yhtenä palvelun laadun ehtona on kyky ennakoida asiakkaan toimintaa. Nykyään mobiililaitteilla on mahdollista hyödyntää langattomia yhteyksiä. Suurin osa palvelinresursseista ja palveluiden tuottamiseen käytettävästä tiedosta on keskittyneenä pilveen. Käytännössä minkä tahansa palvelun käyttäminen mobiililaitteella edellyttää yhteyttä näihin pilvipalveluihin. Pilvipalveluiden ylläpitäminen

Satyanara etal. argumentoivat julkaisussaan että verkon lantenssia ei voida enää juurikaan pienentää. Ratkaisuksi jää palveluiden tuominen lähemmäksi.

Toinen painopiste on siinä että tieto seuraa käyttäjää. Esimerkiksi pöytäkoneelta mobiililaitteeseen.(Satyanarayanan, 2001). Cyber foraging, on termi jota käytetään kuvaamaan paradigmaa jossa laite etsii ympäristöstä hyödynnettävää tietoa ja avustajia/korvikkeita. Avustajan (surrogate) rooli on täydentää lähtökohtaisesti resurssirajallista laitetta, esimerkiksi suorittamalla laskentaa, jotta asiakaslaite voisi esimerkiksi säästää akkua. Tähän toimintaan liittyy kuitenkin useita haasteita. Esimerkiksi kuinka asiakaslaite löytää avustajan? Mitäs jos avustaja on ruuhkautunut? Kuinka avustaja alustetaan ja kauanko siinä kestää? Nämä ovat keskeisiä kysymyksiä myös reunalaskennassa. Vastuun jakaminen asiakaslaitteen sekä reunanklusterin välillä on riippuvainen siitä, kuinka paljon avustusta asiakaslaite tarvitsee. Toiseen ääripäähän vietynä asiakaslaite on niin sanottu kevyt asiakaspääte (thin client), jolla ei olisi resursseja juurikaan mihinkään. Tällainen asiakaslaite joutuisi jakamaan kaiken laskennan eteenpäin avustajalle. Tämän kaltainen asiakaslaite olisi riippuvainen reunan mahdollisuuksista suorittaa palveluiden vaatimia toiminnallisuuksia. Seuraavana askeleena kohti itsenäisempää suoriutumista olisi asiakaslaite, joka pystyy osittain tarjoamaan käyttäjälle palveuita. Tämä laite tarvisi reunaklusterilta avustusta ainoastaan joissain tapauksissa. Viimeisenä toimijana olisi kokonaan itsenäinen asiakaslaite, joka tarvitsisi reunalta ainoastaan palveluita täydentäviä ominaisuuksia. Tämä laite saattaisia turvautua reunalaskentaan esimerkiksi jos akku on vähissä, tai laitteella itsellään ei ole kaikea tarvittavaa tietoa laskennan suorittamiseksi.

a

- Mistä reunalaskenta koostuu? (Suurimmat toimijat, keskeisimmät toiminnot)
- Mikä on MEC?
- Reunalaskenta vai reunapalvelu?
- MCC vai MEC?
- Pilvi vai palvelinkeskus, palvelinresursseja.
- Mitä reunalaskenta on?
- Miksei siirretä laskentaa pilveen?
- Mitkä ovat mobiilin ongelmat nykyisellään?
- Mitkä ovat reunalaskennan haasteet?

Pilvipalvelulla tarkoitetaan palvelua, joka sijaitsee internetissä. Palvelut tarjotaan käyttäjälle verkkoyhteyden välityksellä. Pilvipalvelut sisältävät usein suuria määriä laskenta- ja tallennusresursseja. Palvelut usein sijoitettu siten että ne ovat runkoverkossa kiinni, jolloin niiden voidaan ajatella sijaitsevan internetin "keskustassa". Yleensä palveluita ylläpidetään keskitettyinä korkeintaan muutamaan eri konesaliin. Pilvipalvelun palvelun kohde on usein asiakaslaite (UE, user equipment), joka sijaitsee internet-topologian näkökulmasta lehtisolmussa.

Reunalaskenta on yksi hajautetun laskennan muoto jossa

Mobiililaitteiden yleisiä ominaisuuksia ovat resurssien vähyys ja akkuvirran rajallisuus. Mobiililaitteiden käyttö on myös usein riippuvaista langattomista verkkoyhteyksistä. Palveluiden toiminta mobiililaitteilla on siis riippuvainen näiden kolmen ominaisuuden asettamista rajoista. Laskentaresurssien lisääminen johtaisin lyhyempään käyttöaikaan akkuvirralla. Suurempi akku mahdollistaa pidemmän käyttöajan, mutta se tekisi laitteesta suuremman. Akun kokoa ja laskentaresurssien määrää pyritäänkin tasapainottamaan. Voidaan pyrkiä minimoimaan laitteen virrankulutus esimerkiksi laittamalla laitteeseen heikkotehoisempi suoritin. Tämä näkyy siinä, millaisia palveluita mobiililaitteella voidaan tarjota. Esimerkiksi kuvankäsittelyä tai muuta raskaampaa laskentaa vaativaa toiminnallisuutta ei voida tällaisella laitteella tehdä. Seuraava vaihtoehto olisi lähettää laskentaa tehokkaammille laitteille pilveen. Laskennan siirtäminen vie aikaa ja tällöin ei voida tarjota kovin reaaliaikaisia palveluita. Siirrettyyn laskentaan kuluva aika koostuu pääasiassa verkon viiveestä, siirrosta ja itse laskennasta. Kokonaisuudessa siirtämiseen ja laskentaan kuluvan ajan määrään vaikuttaa pilven sijainti, verkon ruuhkaisuus, verkon kapasiteetti, sekä käytössä olevan laskentakapasiteetin määrä. Reunalaskenta on konsepti, jonka avulla laskenta voidaan tuoda lähemmäksi käyttäjää.

Reunalaskennassa (MEC,Mobile Edge Computing vai MCC Mobile Cloud Computing?) on tarkoitus tuoda palvelinresursseja lähemmäksi käyttäjää. Reunalaskenta on osassa kirjallisuutta jaettu kahteen kategoriaan sen mukaan tarjotaanko palvelua RAN (Radio access network) vai yleisesti WAN yhteydessä. RAN verkossa toimivaa reunalaskentaa kutsutaan Multi-access edge computing ja muita reunalaskennan ratkaisumalleja nimillä kuten sumu(fog computing) tai cloudlet[Taleb et al., 2017] . Tässä kontekstissa reunalla tarkoitetaan käyttäjän ja pilven väliin jäävää tilaa. TCP/IP-mallissa sovellustasolla olevia toimintoja ei siis esiinny tällä välillä. Reunalaskenta siis mahdollistaa palveluiden tuottamisen lähempänä käyttäjää. Lähempänä on hieman harhaan johtava termi, koska mikä tahansa pilveä lähempänä oleva palvelu on lähempänä, eikä siis välttämättä konkreettisesti lähellä.

Reunalaskennalle ei vielä ole olemassa kokonaisvaltaista arkkitehtuuria. Ongelmakentän voi jakaa karkeasti kahteen osaan. Fyysiseen arkkitehtuuriin ja sovellustason arkkitehtuuriin. Nämä ovat toisistaan riippuvaisia. Arkkitehtuuriratkaisut ovat riippuvaisia tarjottavista palveluista. Toiset arkkitehtuu-

riratkaisut tukevat toisia palveluita paremmin kuin toiset, kompromisseilta on siis vaikea välttyä.

Reunalaskennan muodot

Esimerkiksi etälaskenta (offload) tai reunapalvelu.

2.2 Keskeiset käsitteet

Tässä kappalessa esitellään (mobiilin) reuna-arkkitehtuurin keskeiset käsitteet ja toimijat. Koska reunajärjestelmä sijoittuu osaksi olemassa olevaa hierarkiaa, esitellään myös reunan läheisyydessä sijaitsevat toimijat. Reunan itsensä lisäksi käsitellään siis asiakaslaitteet ja pilvi, niiltä osin kuin ne liittyvät reunajärjestelmän käyttöön tai toimintaan. Lähes kaikki tässä tutkielmassa esiteltävät reuna-arkkitehtuurit sijoittuvat mobiiliverkkoon. Tästä syystä esitellään LTE-mobiiliverkon toimijat ja siihen kuuluvat käsittet. Lopuksi määritellään mitä tässä tutkielmassa tarkoitetaan reuna-arkkitehtuurilla.

2.2.1 Asiakaslaite

Asiakaslaite (user equipment) on yleisnimitys reunan tai pilven palveluita kuluttavalla laitteelle. Asiakaslaite -käsitettä ei ole rajattu mihinkään tiettyihin laitteisiin ja asiakaslaite voikin olla esimerkiksi älypuhelin, älylasit tai verkkoyhteydellä varustettu auto. Asiakaslaitteiden yhdistävänä tekijänä on siis jonkinlainen yhteys reuna- tai pilvipalveluihin. Yleisesti asiakaslaitteen käyttämä yhteys on tyypiltään langaton. Yksinkertaisuuden vuoksi tässä tutkielmassa asiakaslaitteen voi ajatella älypuhelimena, jollei toisin mainita.

Verkkohierarkian näkökulmasta asiakaslaitteet ovat lehtisolmuja. Tämä tarkoittaa että asiakaslaitteet toimivat ainoastaan palveluiden kuluttajina eivätkä siis tarjoa itse palveluita. Myöskään kulutettavien palveluiden tyypillä ei ole juurikaan merkitystä, kun asiaa käsitellään infrastruktuuri tai arkkitehtuuritasolla.

Konkreettinen esimerkki asiakaslaitteesta, joka hyödyntää reunapalvelua, voisi olla jokin ajoneuvo. Ajoneuvolla on mobiiliyhteys reunapalveluun jonka tarkoitus on välittää tietoa liikenteestä muille ajoneuvoille. Esimerkiksi tilanteessa jossa edellä on ruuhkaa, voitaisiin muille lähistöllä oleville ajoneuvoille välittää tieto tästä, jolloin voidaan valita jokin toinen reitti määränpäähän.

2.2.2 Reuna

Reuna koostuu useista toiminnallisista entiteeteistä, jotka voidaan jakaa sekä fyysisiin, että loogiisin kokonaisuuksiin. Tässä kappaleessa lähdemme liikkeelle määrittelemällä reuna-alueen, joka edustaa reunan toimialuetta, sekä reunaa yleisenä käsitteenä. Tämän jälkeen esitellään reunasolmu, joka

on reunajärjestelmän keskeisin fyysinen rakennuspalanen. Lopuksi esitellään pääasiassa ohjelmallisen tason toimivat toimijat reuna-alusta ja reunasovellus.

Reuna-alue Yleisesti puhuttaessa reunalla viitataan alueeseen, joka ulottuu asiakaslaitteelta runkoverkkoon asti. Reuna-alue siis alkaa asiakaslaitteelta ja laajenee kohti internettiä. Reunalla ei siis ole tarkkaa määritelmää, vaan termiä usein sovelletaan käytettävän kontekstin mukaan siten, että reuna-alue rajautuu kontekstissa esiintyvien toimijoiden mukaan edellä manitulle välille. Esimerkiksi mobiiliverkon tukiasemien yhteyteen rakennettua reunajärjestelmää käsiteltäessä, reunalla tarkoitetaan ainoastaan reunajärjestelmän asiakaslaitteita palvelevien osien muodostamaa vyöhykettä. Kuten jo aiemmin mainittu, reunan keskeisenä etuna muihin palveluihin voidaan pitää reunapalveluiden ja asiakaslaitteen välisen viiveen vähäisyyttä. Yleisenä nyrkkisääntönä reunalle voidaankin pitää verkkoyhteyksien viivettä suhteessa muuhun internettiin, koska reuna-alueella viiveiden tulisi siis olla muuta internettiä nopeampia. Toisin sanoen reunan palveluiden tulisi sijaita lähempänä kuin pilvessä sijaitsevien palveluiden.

Reunasolmu Tämän tutkielman kontekstissa reunasolmulla (mobile edge host) tarkoitetaan yksittäistä reunalaskentaa tarjoavaa entiteettiä[ETSI, 2016b]. Reunasolmu -termillä viitaataan reunasolmun fyysiseen laitteiston ja reunasolmun toiminnalliseen kokonaisuuteen. Reunasolmu sisältää reunasovelluksien suorittamiseen tarvittavat resurssit, joita ovat laskenta, tallennustila ja verkkoyhteydet. Reunasolmu voi koostua esimerkiksi mobiilitukiaseman ja palvelinlaitteiston muodostamasta kokonaisuudesta. Reunasolmun toiminnallinen kokonaisuus sisältää erinäisiä toimintoja, joiden tehtävänä on mahdollistaa reunasovelluksien suorittaminen. Tällaisia ovat muun muassa tietoliikenteen reitittäminen ja virtualisointi-alustan tarjoaminen, sekä sen hallinnointi. Myös seuraavassa kappaleessa käsiteltävä reuna-alusta kattaa osan reunasolmun toiminnoista.

Kuten aiemmin mainittu, reunajärjestelmä koostuu joukosta reunasolmuja, jotka ovat maantieteellisesti hajautettuja. Reunasolmut siis eroavat toisistaan vähintään sijainnin perusteella, mutta voivat erota myös käytettävissä olevien resurssien osalta. Resurssien osalta reunasolmu voi olla mitä tahansa vähäisillä laskenta ja tallennus resursseilla varustetun WiFi-tukiaseman ja kokonaisen palvelinklusterin väliltä. Reunasolmun sijaintiin vaikuttaa käytössä oleva reuna-arkkitehtuuri. Reunan rakennetta ja reunasolmujen sijaintia käsitellään tarkemmin luvussa 5.

Reuna-alusta Reuna-alusta (Edge platform) on ohjelmistotason toimija. Se tarjoaa rajapinnan reunasovelluksien suorittamista varten[ETSI, 2016b]. Toisin sanoen se siis tarjoaa reunasovelluksille toimintaympäristön. Reuna-alustan tehtävät eivät rajaudu ainoastaan yksittäiseen reunasolmuun, vaan

sen lisäksi se hoitaa hallinnollisia tehtäviä kuten tietoliikenteen ohjausta. Lisäksi reuna-alustan tehtäviin voidaan lukea reunasovelluksia suorittaviin virtuaalikoneisiin liittyvät hallinnolliset toimet. Esimerkkinä reuna-alustan tehtävistä on kappaleessa 4.1 esiteltävä virtuaalikoneiden live migraatio reunasolmulta toiselle. Reunasovelluksien lisäksi reuna-alusta voi itsessään tarjota palveluita, jotka eivät suoranaisesti ole reunasovelluksia vaan esimerkiksi nopea kommunikaatioväylä laitteelta-laitteelle (machine-to-machine), jota voi käyttää vaikka ajoneuvojen väliseen viestintään.

Reunasovellus Reunasovelluksella (Edge application) tarkoitetaan yksittäistä reunasolmulla suoritettava ohjelmistoa [ETSI, 2016b], jonka kuluttajana voi toimia asiakaslaite tai toinen reunasovellus. Reunasovellus ei ota kantaa millaista palvelua sillä tuotetaan ja sen rajoitteet asettaa pääasiassa käytössä oleva reuna-alusta.

Reunasovelluksen tuottama palvelu voi olla tyypiltään yhteiskäyttöinen tai käyttäjäkohtainen, esimerkiksi käyttäjäkohtainen virtuaalikone johon käyttäjä voi ottaa etäyhteyden. Esimerkki yhteiskäyttöisestä reunasovelluksesta olisi pelipalvelin, jota voivat käyttää reunasolmun lähistöllä olevat pelaajat.

2.2.3 Pilvi

[Armbrust et al., 2010] määrittelevät artikkelissan pilven. Pilvellä viitataan sekä pilvessä tuotettaviin palveluihin, että itse järjestelmään, pilvi-alustaan, joka mahdollistaa palveluiden tuottamisen. Artikkelin mukaan pilven tuottamisen yhtenä keskeisimmistä mahdollistajista on toiminut edullisille sijainnelle rakennetut suuret tietokonekeskukset. Toisin sanottuna pilvipalvelut tuotetaan tietokonekeskuksissa, jotka ovat keskitettyjä ja sijaitsevat kauempana asutuksesta.

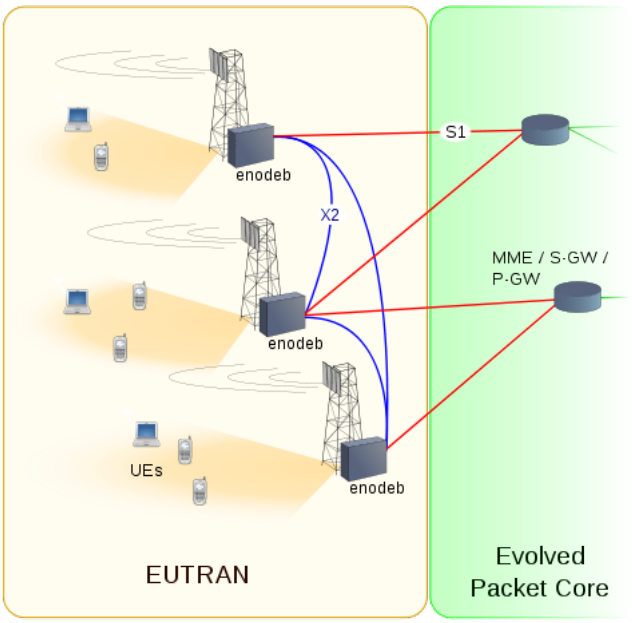
Keskeinen osa pilvi paradigmaa on myös tapa jolla palveluita tuotetaan. Pilvi-alusta tarjoaa asiakkailleen mahdollisuuden skaalata palveluitaan näennäisesti äärettömyyksiin. Tämän lisäksi aika, jossa käytössä olevien resurssien lisäys tai poisto voidaan tehdä on huomattavasti lyhyempi, verrattuna perinteiseen tietokonekeskukseen jossa palvelun tuottaja omistaisi itse laitteiston. Tässä tutkielmassa pilvellä viitataan kuitenkin enemmänkin järjestelmän rakenteeseen ja sijaintiin, kuin palveluiden tuottamiseen käytettävään malliin.

Reunan ei ole tarkoitus korvata pilveä, vaan täydentää sitä. Myöskään pilven ja reunan välinen raja ei ole tarkka. Tässä tutkielmassa pilvellä tarkoitetaan suhteessa reunaa kaumpana sijaitsevia palveluita. Pilvi ulottuu verkon ytimestä kohti asiakaslaitetta ja saattaa olla osittain päällekkäin reunan kanssa. Kuten aiemmin mainittu, reuna lähestyy verkon ydintä asiakaslaitteen suunnasta.

Pilven ja reunan väliin mahtuu vielä yksi paradigma, nimittäin sumu (fog computing). Sumun tavoitteet ovat samankaltaisia kuin reunan. Sumun

tavoitteita ovat muun muassa pienet viiveet, maantieteellisesti hajautettu rakenne ja langattomien laitteiden palvelu [Bonomi et al., 2012]. Sumun on tarkoitus olla hieman kuten pilvi, mutta hajautetumpana ja huomattavasti lähempänä käyttäjää. Reunaan verrattuna sumu on hieman kuin reuna, joka on viety kauemmaksi verkonreunasta. Sumua ei käsitellä tämän enempää tässä tutkielmassa, vaan keskitymme lähempänä reunaa sijaitsevaan laskentaan.

2.2.4 Mobiiliverkko



Kuva 1: Mobiiliverkon rakenne

MEC ehdotuksia tarkasteltaessa, olemassa olevien mobiiliverkkojen arkkitehtuurit ovat keskeisessä asemassa. Useat reunalaskentaa käsittelevät ehdotukset on tarkoitettu integroitaviksi osaksi olemassa olevaa mobiiliverkkoarkkitehtuuria. Erityisesti asiakaslaitteiden ollessa mobiililaitteita ja mahdollisimman pieniä viiveitä tavoiteltaessa, reunalaskenta ratkaisujen integroiminen osaksi mobiiliverkkoa on väistämätöntä. Seuraavaksi käydään pääpiirteittäin läpi 4G mobiiliverkon arkkitehtuurin funktionaaliset osat.

Yksinkertaistettuna mobiiliverkko koostuu kahdesta osasta: radiorajapinnasta ja mobiilinverkon runkoverkosta (puhelinkeskuksesta?). 3GPP kehittämässä LTE standardissa radiorajapinnan sisältävä osuus on nimeltään E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) ja runkoverkon osuus EPC (Evolved Packet Core).

E-UTRAN tehtävänä on toimia rajapintana asiakaslaitteen ja EPC:n

välillä. Asiakaslaitteiden suuntaan yhteys on radiosignalointia ja yhtenä E-UTRAN tehtävänä onkin radioresurssien hallinointi. E-UTRAN sisältää verkon puolella pääasiallisena toimijana eNodeB tyyppisiä tukiasemia [ETSI, 2017a], myös muutamia poikkeustapauksia on, mutta ne jätetään käsittelemättä. Tukiasema on asiakaslaitetta lähimpänä sijaitseva funktionaalinen verkon osa ja sen seurauksena se on houkutteleva kohde MEC ratkaisuille. Tukiasemaa voikin ajatella *reunan* viimeisenä etappina ennen asiakaslaitetta. Tämä tutkielma käsittelee pääasiassa ratkaisuja, jotka keskittyvät LTE verkkoihin kohdistuvia ratkaisuja, joten tukiasemista puhuttaessa tarkoitetaan nimenomaan E-UTRAN mukaista eNodeB:tä.

ENodeB:n tehtävänä on kommunikoida radioyhteyttä käyttäen asiakaslaitteen kanssa ja välittää molemminsuuntaista liikennettä EPC:n (Evolved packet core) suuntaan S1 rajapinnan kautta. eNodeB:t ovat myös yhteydessä toisiinsa X2 rajapintaa käyttäen. X2 rajapintaa käytetään tukiasemien väliseen kommunikointiin, joka sisältää handoverin yhteydessä tehtävää asiakaskontekstin siirtoa ja erinäisiä muita hallinnollisia toimintoja. Handoverin vaikutukset näkyvät myös MEC puolelle ja handoveria toimintaa käsitellään tarkemmin kappaleessa XYZ.

Mobiiliverkkojen tietoliikenne koostuu kahdesta eri tasosta: kontrollikerroksesta ja datakerroksesta. Kontrollikerroksella on hallinnointiin liittyviä protokollia joiden tehtävänä on välittää esimerkiksi asiakaslaitteeseen liittyviä kontekstitietoja entiteetiltä toiselle. Datakerros puolestaan välittää IP liikennettä asiakkaan ja palveluiden välillä. EPC koostuu kolmesta alikomponentista jotka ovat MME (Mobility Management Entity), SGW (Serving Gateway) ja PGW (PDN gateway) [ETSI, 2016a]. SGW:n eli palveluyhdyskäytävän tehtävänä on välittää datakerroksen liikennettä asiakaslaitteen ja ulkoisten palveluiden välillä. SGW on yhdistettynä PGW:hen, jonka tehtävänä on toimia IP tason reitittimenä EPC:n ja ulkoisen verkon välillä. PGW toimii asiakkaan ulkoverkon yhteyksien kiintopisteenä [Firmin, 2017]. MME on EPC:n hallinnollinen komponentti ja se toimii ainoastaan kontrollikerroksessa.

2.3 Reuna-arkkitehtuuri

Tässä tutkielmassa käsiteltävät arkkitehtuurit koostuvat oletusarkkitehtuurin (framework) tai suunnittelumallin (design model) tyylisistä arkkitehtuurikuvauksista. Oletusarkkitehtuuri jakaa järjestelmän jonkin tehtävän toteuttaviin kokonaisuuksiin, kuten komponentteihin ja moduuleihin [Tuovinen, 2017b]. Suunnittelumallit puolestaan kuvaavat tarkemmin järjestelmän komponentteja, sekä niiden toimintoja. Suunnitelumallit ovat kuitenkin ainoastaan osajoukko suunnittelupäätöksistä [Tuovinen, 2017a], joten ne jättävät osan päätöksistä toteuttajalle. Lisäksi suunnittelumallit kuvaavat järjestelmää ainoastaan jollain tietyllä abstraktiotasolla ja koko järjestelmän kattavaan kuvaamiseen tarvittaisiin useita sisäkkäisiä ja hierarkisia suunnittelumalleja.

Tämän tutkielman yhteydessä läpikäydy arkkitehtuurit ovat, ETSI:n referenssiarkkitehtuuria [ETSI, 2016b] lukuunottamatta, korkean tason luonnehdintoja järjestelmän ja sen osien toiminnasta. Toisin sanoen nämä arkkitehtuurit ovat osajoukko suunnittelupäätöksiä.

Reuna-arkkitehtuurissa toiminnalliset osat on jaettu loogisiin kokonaisuuksiin, eli tehtävien mukaan kasattuihin komponentteihin. Reuna-arkkitehtuurit asettavat rajoitteita myös toimintojen fyysiselle sijoittumiselle, jolloin osa toimijoista on jaoteltu fyysisiin komponentteihin. Joskin kappaleessa 3.3 esiteltävä NFV tekee toimintojen fyysisestä sijoittumisesta dynaamisempaa ja vähemmän fyysiseen sijaintiin sidonnaista. Kappaleessa 2.2.2 käsiteltyjen reunan keskeisten käsitteiden mukaan tässä tutkielmassa reuna-arkkitehtuurit keskittyvät reunasolmun ja reuna-alustan toiminnalliseen määrittelyyn. Tämän lisäksi reunajärjestelmää käsitellään alijärjestelmänä, eli osana suurempaa kokonaisjärjestelmää, joka koostuu muun muassa mobiiliverkosta. Reuna-arkkitehtuurit eivät siis ota kantaa reunasovelluksien toimintaan.

3 Mahdollistavat teknologiat

Seuraavaksi käsitellään reunalaskennan mahdollistavat teknologiat SDN, NFV ja virtualisointi. Tähän esiteltäväksi valittujen teknologioiden joukko perustuu tämän tutkielman luvussa 6 esitettyjen arkkitehtuuriratkaisujen yhteydessä esiintyneisiin teknologioihin. Edellä mainittujen teknologioiden lisäksi reunalaskentaa käsittelevien julkaisujen yhteydessä on esitetty myös muita teknologioita kuten verkon viipalointi (network slicing) [Taleb et al., 2017], jonka käsittely sivuutetaan tämän tutkielman yhteydessä.

3.1 Virtuaalikoneet ja kontit

Virtualisoinnilla tarkoitetaan tietokoneohjelmiston suorittamista ohjelmallisesti toteutetun rajapinnan päällä. Toisin sanoen virtualisointi erottaa suoritettan ohjelmiston suorittavasta laitteistosta. Usein virtualisoitava ohjelmisto on kokonainen käyttöjärjestelmä, jolloin suoritettavaa instanssia kutsutaan virtuaalikoneeksi. Virtualisointi mahdollistaa laitteiston resurssien jakamisen useamman toisistaan erillään olevan virtuaalikoneen kesken. Juurikin resurssien jakamisen mahdollisuus yhdessä palvelinlaitteiston suorituskyvyn kasvun kanssa on johtanut virtuaalikoneiden käytön yleistymiseen palvelinsaliympäristössä.

Virtuaalikoneen ja laitteiston välillä toimivaa ohjelmistoa kutsutaan hypervisoriksi. Hypervisorin pääasiallinen tehtävänä on tarjota rautatason resursseja virtuaalikoneiden käytettäväksi. Yksi hypervisorin tehtävistä on virtuaalikoneiden luominen. Sen avulla voidaan määrittä virtuaalikoneen käytössä olevat resurssit, esimerkiksi virtuaalikoneen käytettävissä olevan muistin tai prosessorien määrä. Hypervisorilla on myös monia muita toiminnallisuuksia, joita ei tässä tutkielmassa käydä läpi tämän enempää.

Virtuaalikoneet ovat vahvasti esillä reunalaskenta-arkkitehtuurien yhteydessä. ETSI:n reunalaskennan referenssiarkkitehtuurissa [ETSI, 2016b] virtuaalikoneet esitetään reunapalvelun tuottamisen välineenä ja Taleb et al. [Taleb et al., 2017] esittävät kirjallisuuskatsauksessaan virtuaalikoneet yhdeksi reunalaskennan mahdollistavista teknologioista. Virtuaalikoneiden dynaamisuus verrattuna tavallisesti suoritettavaan ohjelmistoon on reunalaskennan näkökulmsta haluttu ominaisuus. Virtuaalikoneet tarjoavat myös helpon tavan jakaa reunasolmun resursseja usean toisistaan erillisen palvelun välillä. Toisena etuna on virtuaalikoneiden vahva eristys muusta järjestelmästä ja muista virtuaalikoneista.

Virtuaalikoneet eivät aseta rajoitteita tarjottavan palvelun tyypille ja niiden avulla onkin mahdollista tarjota monia erilaisia palvelumalleja. Yksi ehdotetuista palvelumalleista on käyttäjäkohtaisen virtuaalikoneet [Satyanarayanan et al., 2009, Wang et al., 2015].

Tulevissa kappaleissa perehdytään tarkemmin virtuaalikoneiden hyödyntämistä osana reunapalveluita. Kappaleessa 4.1 käsittellään virtuaalikoneiden siirtelyä suorituslaitteistolta toiselle, ilman että itse järjestelmän suorittamista tarvitsee keskeyttää siirron ajaksi. Kappaleessa 6.1 käsitellään cloudletiksi nimettyä virtuaalikoneisiin pohjautuvaa reunapalvelun tuottamisjärjestelmää.

3.2 Software-defined networking

Perinteinen tietoliikenneverkko koostuu joukosta erikoistuneista verkkolaitteita. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi kytkin, palomuuri ja reititin. Näiden laitteiden joukko muodostaa hajautetun rakenteen, jossa jokainen laite täytyy konfiguroida erikseen. Laitevalmistajat tarjoavat hallinnointityökaluja, joiden avulla valmistajan omia laitteita on mahdollista konfiguroida suljettua rajapintaa käyttäen. Verkkoinfrastruktuurin hallintaa kuitenkin vaikeuttaa eri laitteiden konfiguraatioiden erilaisuus, sekä puute kokonaisvaltaiselle ohjelmalliselle konfiguroitavuudelle. Tästä johtuen verkkoon tehtävät muutokset ovat työläitä ja riskialttiita [Kreutz et al., 2015].

Perinteisessä tietoliikennelaitteistossa tiedonvälityskerros ja kontrollikerros ovat tiukasti toisistaan riippuvaisia. Tiedonvälityskerroksella tarkoitetaan itse tietoliikennepakettien välittämiseen käytettävää kerrosta, eli tietoliikennettä ohjaavia laitteistoja. Kontrollikerroksella tarkoitetaan tietoliikenteen reitittämiseksi käytettävää logiikkaa, kuten esimerkiksi reititystauluja. Kontrollikerros on siis tällä hetkellä hajautettuna laitteiston mukana ympäri verkkoa. Tästä johtuen verkko on usein hyvin staattinen ja muutokset kankeita.

SDN (Software-defined networking) eli ohjelmallisesti määritetty verkko on yleistyvä paradigma verkkoympäristöissä. SDN on ratkaisu, jossa tiedonvälitys- ja kontrollikerros on erotettu toisistaan. SDN:ssä ei ole erikoistunutta verkkolaitteistoa vaan nykyinenen tiedonvälitykseen käytetty

laitteisto korvattaisiin yleisillä reitittävillä laitteilla[1]. Kontrollikerroksen toiminnasta vastaa SDN Controller. Se on loogisesti keskitetty entiteetti, joka vastaa näiden reitittävien laitteiden ohjaamisesta.

SDN Controllerin ja reitittävän laitteiston välille oletetaan hyvin määritelty rajapinta, jonka kautta reitittäviä laitteita voidaan hallita [Kreutz et al., 2015]. SDN siis toteuttaa *Separation of Concerns* -periaatetta jakamalla verkon reititysmäärittelyjen konfiguroinnin ja itse laitteistopohjaisen toteutuksen omiin osiinsa. SDN Controller tarjoaa rajapinnan ylöspäin ohjelmalliselle verkkokonfiguroinnille ja hoitaa sääntöjen tulkkaamisen alaspäin. OpenFlow on yksi tunnetuimmista SDN Controllerin ja verkkolaitteiden välisestä protokollasta[2].

Tarve SDN pohjaisille ratkaisuille kumpuaa jo aiemmin mainitusta konfiguraation työläydestä ja dynaamisuuden tarpeesta. Esimerkiksi virtuaalikoneiden käytön yleistyessä tarve verkon ohjelmalliselle hallittavuudelle on kasvanut [Jammal et al., 2014]. Virtuaalikoneiden sijainti verkossa ei välttämättä ole kiinteä, vaan virtuaalikone saattaa siirtyä esimerkiksi migratoinnin seurauksena. Virtuaalikoneita saattaa tulla ja poistua verkosta. Perinteisessä verkkoympäristössä esimerkiksi MAC osoitetaulujen päivittäminen saattaa aiheuttaa yhteyskatkoksia palvelimeen [Jammal et al., 2014]. SDN pohjaisia ratkaisuja on jo olemassa, mutta niiden käyttö ei vielä ole korvannut perinteisiä verkkolaitteita.

3.3 Network Function Virtualization

NFV (Network function virtualization) lähtee liikkeelle ongelmasta, jossa nykyisen verkkolaitteiston käyttöikä on lyhyttä ja toiminnot ovat hajautettuina useisiin proprietary (omisteisiin?) laitteisiin [ETSI, 2012].

NFV:n tarkoituksena on eriyttää verkkolaitteisto ja verkkotoiminnot. Tämä toteutuisi siten, että erillistä verkkolaitteistoa ei enää tarvittaisi ja nykyisten verkkolaitteiden toiminnallisuudet toteutettaisiin tavallisella palvelinlaitteistolla ohjelmatasolla. Periaate on hyvin samankaltainen kuin perinteisten palvelimien siirtyminen virtuaalikoneita hyödyntävään ympäristöön. Virtualisoidulla verkkotoiminnallisuudella (jossain yhteyksissä VNF, Virtualized network function) tarkoitetaan ohjelmallisesti toteutettua verkkotoimintoa. Tämä mahdollistaa verkkotoiminnallisuuksien suorittamisen tavallisella palvelinlaitteistoilla hyprvisorin päällä.

Verkkotoimintojen toteuttaminen virtuaalisina, mahdollistaisi useamman toiminnon sijoittamisen samaan laitteistoon. Tämä ainakin teoriassa mahdollistaisi myös paremman skaalautuvuuden. Myös verkkotoiminnallisuuksien käyttöönotto helpottuu mikäli erillisen laitteiston asennusta ei tarvita. Vir-

[1] Reitittämisellä tarkoitetaan tässä yhteydessä pakettien ohjausta ja välitystä yleisessä mielessä

[2] `https://www.opennetworking.org/software-defined-standards/specifications/`

tuaalisten verkkotoimintojen avulla on myös mahdollista säästää kaappitilaa, sekä pienentää sähkönkulutusta [Nguyen and Cheriet, 2016].

NFV on soveltuva mille tahansa data-tason prosessoinnille ja kontrollitason toiminnoille [ETSI, 2012]. NFV siis soveltuu toteutustavaksi monille erilaisille verkkoitoiminnoille mobiiliverkoissa ja perinteisissä tietoliikenneverkoissa. Esimerkkeinä käyttökohteista ETSI:n NFV whitepaperissä on esitetty muunmuassa reitittimet, palomuurit, kuormantasaajat, eNodeB:t ja MME:t. ETSI on pohtinut NFV:n laajamittaisen käyttöönoton mahdollisuuksia 5G-verkkoingrastruktuurissa ja mainitsee reunalaskennan yhtenä sen käyttötapauksena [ETSI, 2017b].

Mobiiliverkossa toimivan reunalaskennan näkökulmasta NFV:n potentiaali on ilmeinen. Jos suurin osa mobiiliverkon toiminnoista voitaisiin virtualisoida ja siirtää tavalliselle palvelinlaitteistolle, voisi reunalaskentaa suorittaa samalla laitteistolla, eikä se vaatisi erillistä laitteistoa omille toiminnoilleen.

NFV:n haasteet? Periaatteessa vielä hyvin epäkypsä tekniikka, mutta suunniteltu 5G integraatio.

4 Ominaisuudet

Reunalaskennan keskeisin tarkoitus on laskennan siirtäminen reunalla toimivalle reunalaskentaklusterille. Reunaa voidaan lähestyä pilven ja käyttäjälaitteiden puolelta. Käyttäjälaitteiden, kuten älypuhelimien laskentateho on suhteellisen heikkoa, lisäksi ne ovat akkuvirrasta riippuvaisia. Mobiililaitteen käyttöajan pidentämiseksi voidaan pyrkiä tekemään mahdollisimman vähän akkuakuluttavaa laskentaa paikallisesti, siirtämällä sitä reunalaskentaklusterille (Etsi se lähde jossa verrataan tietokoneita ja mobiililaitteita - eroa oli yhden kertaluokan verran). Esimerkiksi verkkoliikenne mobiililaitteen ja kohdepalvelimen välillä on merkittävä viive toisi reunaklusteri palvelun huomattavasti lähemmäksi ja pienentäisi viivettä palvelussa. Viiveen pienenemisen seurauksena monet reaaliaikaisuuttaa tai nopeaa reagointia vaativat palvelut ovat mahdollisia. Lisäksi verkon viiveestä tai ruuhkasta johtuen, mobiililaitteella on usein huomattavasti nopeampi yhteys fyysisesti lähelle itseään verra

Lisäksi pilven tai konesalien suunnasta asiaa lähestyttäessä runkoverkko tukkeutuu. Siirtämällä osan palveluvastuusta reunalle, runkoverkon rasitteen tulisi ainakin periaatteessa pienentyä.

4.1 Live migraatio

> Tarkista käsitelläänkö myös tapaus jossa virtuaalikonetta ei liikuteta vaan ainoastaan varmistetaan yhteyden säilyminen?

Live migraatio, eli suorituksen aikanen siirto, tarkoittaa ohjelman tai virtuaalikoneen siirtämistä laitteistolta toiselle, siten että ohjelman tai virtuaali-

koneen käyttö ei keskeydy. Useimmiten tällaista toiminnallisuutta käytetään palvelinkeskuksissa virtuaalikoneiden siirtelyyn. Palvelinkeskuksissa siirtämiseen käytetään nopeita sisäisiä yhteyksiä, jolloin tiedon siirtoon käytettävät väylät ovat nopeita. Syitä live migraation suorittamiseksi on muutamia. Perinteisessä palvelinympäristössä live migraation syinä ovat virrankulutuksen optimointi, kuorman tasaaminen tai fyysisen laitteiston huoltoon ottaminen [Soni and Kalra, 2013].

Reunalaskentaan sovellettuna live migraation tehtävänä on laskentaa tai palvelua suorittavan virtuaalikoneen siirtäminen reunasolmujen välillä. Syyt joiden vuoksi reunalaskentaympäristössä tehdään live migraatiota koskevat pääasiassa asiakaslaitteen liikkumista verkossa, jolloin virtuaalikone siirretään asiakaslaitetta lähimpänä olevalle reunasolmulle. Reunalaskentaa suoritettaessa voi myös tulla tilanne, jossa laskentaa suorittavalla reunasolmulla ei ole resursseja laskennan suorittamiseksi. Tällöin asiakkaan virtuaalikone joudutaan siirtämään toiselle reunasolmulle, jolla on enemmän resursseja.

Handover/handoff

Virtuaalikoneille tehtävän live migraation ja mobiiliverkossa suoritettavan handoverin ideat ovat samankaltaisia. Handoverilla tarkoitetaan asiakaslaitteen yhteyden siirtämistä tukiasemalta toiselle tukiasemalle. Handover tehdään yleensä tilanteessa, jossa asiakaslaite on liikkunut mobiiliverkossa siten että se on lähempänä toista tukiasemaa. Handover voidaan myös tehdä mikäli tukiasema on ruuhkautunut. [**?**] 4G LTE:ssä yhteys on tyypiltään tunnelimainen ja handoverissa tunnelin toinen pää siirretään toiselle tukiasemalle. Yhteyden siirron alkaessa tukiasema välittää kohteena olevalle tukiasemalle asiakaslaitetta koskevat tilatiedot. Kun tilatiedot on välitetty, asiakaslaitteen ja tukiaseman välinen yhteys katkaistaan ja asiakaslaite muodostaa yhteyden uudelle tukiasemalle. Asiakaslaitteen tietoliikennettä puskuroidaan S-GW:n toimesta sillä välin kun yhteys on katkaistuna. Yleensä handover on niin nopea toimenpide, että laitteen käyttäjä ei sitä huomaa. Handover on nopea toimenpide koska sen aikana siirrettävän tiedon määrä on vähäinen ja se koostuu pääasiassa erilaisista asiakaslaitteen ja tunneleiden tunnisteista.

Live migraation toiminta

Live migraatiossa virtuaalikone siirretään palvelimelta toiselle palvelimelle, ilman että virtuaalikoneen käyttö keskeytyy. Perinteinen live migraatio on toteutettu siten, että virtuaalikoneen suoritustilan eli prosessorin tilan ja muistin siirretään toiselle palvelimelle.

Siirtäminen suoritetaan iteraatioittan siten, että ensimmäisellä iteraatiolla kaikki muistisivut siirretään kohdelaitteelle. Seuraavilla kierroksilla lähtölaitteelta siirretään vain ne muistisivut joille on tapahtunut muutok-

sia edellisen siirron alkamisen jälkeen. Tätä jatketaan kunnes muutoksia sisältävien muistisivujen määrä ei vähene iteraatioittan. Tässä vaiheessa lähtöpisteenä oleva virtuaalikone pysäytetään ja loput virtuaalikoneen muistisivut ja tilatiedot siirretään kohdelaitteelle. Tämän jälkeen virtuaalikone käynnistetään uudessa sijainnissa.

Live migraatioon liittyy myös erilaisia optimointeja ja lähestymistapoja joita ei tässä tutkielmassa sen tarkemmin avata. Konesali ympäristössä on myös yleistä että varsinaista tallennustilaa ei ole tarpeen siirtää, koska se on toteutettu levypalvelimen avulla, jolloin ainoastaan yhteys täytyy siirtää. Mikäli näin ei ole, myös tallennustila tulee siirtää laitteelta toiselle.

Live migraation suorituskykyä mitataan seuraavilla metriikoilla [Soni and Kalra, 2013]:

- Migraation kesto: Aika joka kuluu migraation suorittamiseen
- Katkon kesto: Aika jona palvelut eivät käytettävissä
- Siirretyn datan määrä: Migraatiosta aiheutuva tietoliikenteen määrä
- Migraation yleisrasite: Paljonko migraatio vie järjestelmän resursseja
- Suorituskyvyn alentuma: Siirrettävän virtuaalikoneen suorituskyvyn heikentyminen siirron aikana

Näistä kolme ensimmäistä ovat keskeisimpiä [Farris et al., 2017]. Tavoitteena perinteisessä live migraatiossa on mahdollisimman lyhyt käyttökatko. [Ha et al., 2015]

Reunalaskennassa

Reunalaskentaympäristössä suoritettavan live migraation toiminnallisuus on pääpiirteittäin sama kuin edellä kuvattu. Reunalaskennassa live migraatiolla viitataa asiakaslaitteen käyttämän palvelun tai ohjelmiston suoritusaikaista siirtämistä reunasolmulta toiselle. Tavoitteena on usein reunalaskennan siirtäminen asiakasta lähempänä sijaitsevalle reunasolmulle. Reunalla tehtävän live migraation keskeisenä erona palvelinsaliympäristöön on juurikin suoritusympäristö.

Päällimmäisenä erona on palvelinsaleissa tehtävään migraatioon on käytettävien yhteyksien nopeus. Reunasolmujen väliset yhteydet ovat oletettavasti hitaampia ja nopeus saattaa vaihdella[Ha et al., 2017]. Hitaat yhteyden johtavat pitkään siirtoaikaan, joka puolestaa johtaa pidempään käyttökatkokseen ja täten palvelun laadun heikkenemiseen. Siirtoajan minimoimiseksi on siis pyrittävä pitämään siirrettävän datan määrä mahdollisimman pienenä.

Palvelinsaleja ja reunalaskentaympäristöä erottaa myös se, että palvelinsaliympäristössä virtuaalikoneiden live migraatiot voidaan pääsääntöisesti tehdä koordinoidusti ilman tiukkkoja aikarajoitteita. Reunalaskentaympäristössä migraatiopäätös perustuu usein johonkin ulkoiseen tapahtumaan.

Todennäköisintä onkin että migraatiopäätös tehdään samankalataisin perustein kuin edellä esitelty handover. Keskeisin syy migraatiolle oletettavasti on asiakaslaitteen liikkuminen verkossa. Asiakaslaitteiden liikkumiseen pohjautuva migraatio yhdistettynä heikkoihin tietoliikenneyhteyksiin on kuitenkin ongelmallinen. Voidaan esimerkiksi kuvitella tilanne jossa aamulla kaupungin keskustaan saapuvat työmatkailijat aiheuttavat "migraatiotulvan", joka ruuhkauttaa reunasolmujen käytössä olevat tietoliikenneyhteydet.

Lähes kaikki läpikäydyt reunalaskenta-arkkitehtuurit tiedostivat tarpeen laskennan migraatiolle, mutta kovin monessa sen tarkempaa toiminnallisuutta ei määritelty. Cloudletit ovat yksi tunnetuimpia reunasolmujen välisten migraatioiden ratkaisumalleja. Cloudlettien live migraatio ratkaisuja on käsitelty tarkemmin tulevassa kappaleessa 6.1.1. MobiScud:n yhteydessä käytettiin Xen hyperviisorin migraatiotoiminnallisuutta suoraan sovellettuna reunalaskentaympäristöön[Wang et al., 2015].

4.2 Integraatio mobiiliverkkoihin

> Tarkista onko käsitelty myös niin että laitteistovaatimukset tulevat esiin. Esimerkiksi vaatiiko reunalaskennan toteuttaminen erikoisvalmisteisia laitteita vai selvitäänkö tavallisilla palvelimilla?

Useat reunalaskentaan liittyvät arkkitehtuurit on suunniteltu integroitaviksi osaksi mobiiliverkkoa. Motivaatio on ilmeinen, koska lähes kaikki mobiiliverkossa toimivat laitteet kuuluvat reunalaskennan kohderyhmään. Reunalaskentatoiminnallisuutta lisättäessä olemassa olevaan järjestelmään, yhdeksi suurimmista tekijöistä tulee hinta. Kuten aiemmin mainittu, mobiiliverkon laitteisto on usein suljettu, eikä siihen välttämättä ole mahdollista tehdä muutoksia tai laajennoksia. Tämä tarkoittaa että ainakin osa olemassa olevasta laitteistosta jouduttaisiin korvaamaan uudella, mikäli reunalaskentatoiminnallisuus halutaan lisätä. Tämän vuoksi on esitetty tekniikoita joiden avulla laitteiston uusimiselta voidaan välttyä, tai ainakin minimoida korvattavan laitteiston määrä. Yksi erottavata tekijä on reunalaskentaratkaisun sidonnaisuus mobiiliverkkoon. Tämä tarkoittaa että löyhästi sidonnaisten ratkaisujen tuottajana voi jokin kolmas osapuoli, mutta yleisesti tämä myös tarkoittaa että reunapalvelu tuotetaan kauempana reunasta. Jokaisessa ratkaisussa on siis hyvät ja huonot puolensa.

Tavat joilla reunalaskenta voidaan lisätä osaksi mobiiliverkkoa voidaan jakaa kolmeen pääryhmään

- **Suorat integraatiot** sisältävät uusien toimintojen lisäämistä osaksi olemassa olevaa arkkitehtuuria. Tämänkaltainen ratkaisu edellyttää muutoksia myös olemassa olevien komponenttien toimintaan.

- **Epäsuorat itegraatiot** eivät edellytä toiminnallisia muutoksia mobiiliverkon toimintoihin.
- **Läpinäkyvät integraatiot** vaativat muutoksia mobiiliverkkoon, mutta eivät vaadi muutoksia olemassa olevien komponenttien toimintaan.

Suorat integraatiot edustavat niiden ratkaisujen joukkoa jotka muokkaavat olemassa olevan mobiiliverkkoarkkitehtuuria. Näiden ratkaisujen voidaan olettaa olevan kalleimpia, koska yhteistoiminnallisten toimijoiden lisääminen olemassa olevaan infrastruktuuriin vaatii muidenkin toimijoiden päivittämistä. Pääasiassa nämä ratkaisut tähtäävät lisäämään reunalaskentaa viidennen generaation mobiiliverkkoihin, mutta myös LTE:hen pohjautuvia ratkaisuja on esitetty. Koska viidennen generaation määrittelytyö on vielä kesken, ehdotetut ratkaisut rakentuvat osittain oletuksien päälle. Esimerkkinä suorasta integraatiosta on CONCERT (esitellään kappaleessa 6.5). Suora integraatio mahdollistaa reunalaskennan tuomisen niin lähelle reunaa kuin mahdollista.

Epäsuoralla integraatiolla tarkoitetaan ratkaisuja, joiden pääasiallinen toiminnallisuus on sijoitetu mobiiliverkko-arkkitehtuurin ulkopuolelle. Tällaiset ratkaisut mahdollistavat reunalaskentainfrastruktuurin tuottamisen kolmansilla osapuolilla. Esimerkkinä tällaisesta ratkaisusta on FMC (käsitellään tarkemmin kappaleessa 6.2). Haasteena tämänkaltaisissa ratkaisuissa on optimaalisen reunasolmun valinta, koska se joudutaan tekemään asiakaslaitteen antamien tietojen pohjalta. Onkin siis huomattava, että asiakaslaite joutuu osallistumaan reunalaskentaan liittyviin hallinnollisiin toimiin.

Läpinäkyvissä ratkaisuissa reunalaskennan mahdollistavat toiminnot on toteutettu siten että suoria yhteyksia mobiiliverkon toimintoihin ei ole. Periaate on hieman samankaltainen kuin läpinäkyvässä välipalvelimessa. Käytännössä tämä tarkoittaa jonkinlaiseen tietoliikennemonitoriin pohjautuvaa ratkaisua. Monitorin tehtävänä on tarkkailla mobiiliverkon tapahtumia, sekä mahdollistaa halutun tietoliikenteen ohjaaminen reunalaskennalle. Näiden toimintojen toteuttamisen helpottamiseksi käytössä on tai käyttöön oletetaan SDN, NFV tai molemmat. Joskaan läpinäkyvät ratkaisut eivät ole osa mobiiliverkkoa, ne sijaitsevat sen välittömässä yhteydessä. Tämä sitoo ne osaksi mobiiliverkon infrastruktuuria ja käytännössä tämä tarkoittaa että reunapalvelualustan tuottajana on mobiiliverkon-operaattori. Esimerkkinä tällaisesta ratkaisusta on MobiScud, joka käydään tarkemmin läpi kappaleessa 6.4.1. Tämänkaltaiset ratkaisut ovat asiakaslaitteen näkökulmasta "näkymättömiä".

4.3 Kommunikaatio

Reunalaskennan toimiminen vaatii asiakaslaitteen ja reunajärjestelmän välille kommunikaatioväylän. Kommunikaatioväylän tehtävänä on välittää asiakaslaitteen ja reuna-alustan välistä tietoliikennettä molempiin suuntiin. Reunan

ja asiakaslaitteen välinen kommunikaation toteutuminen vaatii suunnittelupäätöksiä, joihin reuna-arkkitehtuurit ottavat kantaa. Johtuen edellisessä kappaleessa käsitellystä reunajärjestelmän integroinnista mobiiliverkkoon, tietoliikenne reunajärjestelmän ja asiakaslaitteen välillä joudutaan ohjaamaan hieman perinteisistä tavoista eroavilla metodeilla.

Tavallisesti mobiiliverkko ohjaa kaiken asiakkaslaitteelta lähtevän tietoliikenteen mobiiliverkosta ulos internettiin P-GW:n kautta. Mobiiliverkko ei käsittele asiakkaan tietoliikennettä IP-tasolla, vaan asiakkaan tietoliikenne EPC:n ja tukiasemien välillä tunneloidaan GTP:n (GPRS Tunnelling Protocol) avulla [Lobillo et al., 2014]. Toisin sanoen mobiiliverkko on asiakaslaitteen tietoliikenteen näkökulmasta näkymätön. Koska reuna-arkkitehtuurien ehdotus on integroida reunajärjestelmän toimijat mobiiliverkon sisään, joudutaan mobiiliverkon sisäisiä tietoliikenteen ohjausmetodeja muokkaamaan. Ensimmäinen ratkaistava ongelmana on siis, että kuinka asiakaslaitteen tietoliikenne voidaan ohajata mobiiliverkon sisällä sijaitsevalle reunajärjestelmälle. Toinen ratkaistava ongelma on yhteyden säilyttäminen tilanteessa, jossa asiakaslaitteen ja mahdollisesti myös reunasolmun sijainti vaihtuvat.

Tietoliikenteen haarauttaminen

Ensimmäiseen ongelmaan on ehdotettu erilaisia ratkaisuja, joiden toimintamalli rippuu pääasiassa siitä, kuinka tiukasti reunajärjestelmä on integroitu osaksi mobiiliverkkoa. Ongelman ratkaisussa on otettava huomioon, että tietoliikennettä on aina kahteen suuntaan. Tämän lisäksi asiakaslaitteen tietoliikenne pitää jatkossa haarauttaa suuntautumaan joko reunajärjestelmälle tai internettiin. Koska perinteisesti asiakaslaitteen tietoliikenne on voitu ohjata P-GW:n kautta ulos verkkoon, ei mobiiliverkon sisällä ole valmiiksi mekanismia jonka avulla tietoliikennettä voisi ohjata. Yleinen tähän ongelmaan ehdotettu ratkaisumalli on perustunut ajatukseen tietoliikennettä tarkkailevasta entiteetistä. Tällaisella entiteetillä olisi mahdollisuus tarkkailla asiakaslaitteiden tietoliikenteen kohdetta, esimerkiksi kohde IP-osoitetta, ja ohjata paketit tarvittaessa reunajärjestelmälle. Kaiken muun tietoliikenteen se antaisi kulkea normaalia reittiä pitkin.

LIPA (Local IP Access) ja SIPTO (Selected IP Traffic Offload) ovat ehdotuksia mobiiliverkkoon tehtävästä reititysratkaisusta [Samdanis et al., 2012, tarkista tarkista, 2017]. LIPA ja SIPTO lisäisivät tukiasemien yhteyteen L-GW:n (Local Gateway), jonka mahdollistaisi asiakaslaitteen tietoliikentee ohjaamisen tukiaseman yhteydestä esimerkiksi reunasolmulle. tietoliikenne internettiin, ilman että tietoliikenteen tarvitsee kulkea EPC:n kautta. L-GW:n tarkoitus olisi siis mahdollistaa nopeammat yhteydet tukiaseman läheisyydessä sijaitsevaan verkkoon. Tätä olisi mahdollista hyödyntää reunalaskennassa, mutta se monimutkaistaisi olemassa olevan mobiiliverkon toiminnallisuutta [Cho et al., 2014]. LIPA:a ja SIPTO:a ei varsinaisesti ole ehdotettu minkään reuna-arkkitehtuurin yhteydessä ratkaisuksi edellä kuvattuun ongelmaan.

Reuna-arkkitehtuureissa tietoliikenteen tarkkailua mahdollistava toiminnallisuus on ehdotettu toteutettavan SDN, NFV tai jollain ratkaisu spesifillä toiminnallisuudella. SDN:n käyttö ratkaisuna tarjoaa tavan reitittää liikennettä mobiiliverkon sisällä. Se lisäksi mahdollistaa reitityksien muokkaamisen jolloin tiettyjen yhteyksien reittiä voidaan dynaamisesti muokata. SMORE:n yhteydessä esitetyssä ratkaisussa E-UTRAN ja EPC:n välille sijoitetaan SDN kerros, jossa eNodeB ja EPC:n välistä tietoliikennettä voidaan monitoroida. Koska tällä välillä oleva tietoliikenne on GTP tunneloitua, paketteja joudutaan purkamaan ja uudelleen paketoimaan. Tilanteessa jossa paketin suunta on asiakaslaitteelta reunalle, paketin tunnelointi joudutaan purkamaan ja varsinainen paketti välitetään reunapalvelulle. Reunalta asiakaslaitteelle suuntautuvat paketit joudutaan uudelleen kapseloimaan GTP:n mukaisiksi. Uudelleen kapselointi vaatii erinäisten mobiiliverkon sisäisten tunnisteiden seurantaa ja hyödyntämistä. Tarkempi kuvaus toiminnasta annetaan SMORE:n käsittelyn yhteydessä kappalessa 6.4. Ratkaisu spesifien toiminnallisuuksien yhteydessä noudatetaan hyvin samankaltaista toimintamallia. Esimerkiksi Small Cell Cloud (käsitellään kappaleessa 6.3) ratkaisun yhteydessä pakettien monitorointi on sijoitettu tukiasemiin, josta GTP tunnelointi alkaa. Täten paketit voidaan monitoroida ja välittää tarpeen mukaan reunasolmuille, ennen GTP tunnelointia.

Monitorointia suorittavalla entiteetillä on myös muuta käyttöä kuin asiakasliikenteen ohjaaminen reunalle. Kontrollitason pakettien tarkkailu paljastaa esimerkiksi tukiasemien välisen handoverin alkamisen, jota voidaan hyödyntää laskennan live migraation käynnistämiseen.

Yhteyden säilyvyys

Toiseen ongelmaa, eli liikkuvuuden varmistamiseen

4.4 Hallinta

Reunan hallinta koostuu joukosta hallinnollisia toimia toteuttavia entiteettejä. Tämän tutkielman yhteydessä hallinnolliset toimet rajautuvat pääasiassa niihin toimintoihin, jotka jotka mahdollistavat, ylläpitävät tai säätelevät asiakaslaitteen ja reunasolmun välistä kommunikaatiota. Arkkitehtuuritasolla keskeisimmät hallinnolliset toimijat liittyvätkin juuri reunasolmujen saavutettavuuden varmistamiseen. Tämän tukielman esittelyjen ulkopuolelle jäävät siis ne hallinnolliset toimijat, jotka esiintyvät arkkitehtuurikuvauksissa pääasiassa mainintana. Esimerkiksi virtuaalikoneisiin pohjautuvien järjestelmien resurssien oikeanlainen utilisointi [Yousaf and Taleb, 2016, Taleb et al., 2017] on keskeinen haaste johon arkkitehtuuritasolla ei oteta juurikaan kantaa ja sen suunnittelu jätetään järjestelmän toteuttajan vastuulle.

Pääasiassa hallinnollisten toimijoiden rooli esiintyy reunalaskenta-arkkitehtuurissa passiivisena tarkkailijana, jonka tehtävä on reagoida mobiiliverkon tapah-

tumiin. Esimerkki tällaisesta tapahtumasta on mobiiliverkossa tapahtuva handover, johon hallinnollinen entiteetti saattaa haluta reagoida esimerkiksi aloittamalla reunalaskennan migraation lähemmäksi käyttäjää.

Arkkitehtuurien esittelyiden yhteydessä hallinnosta vastaava entieetti esitellään kaikissa arkkitehtuureissa. Hallinnosta vastaavat entiteetit arkkitehtuureittain ovat SCM (Small Cell Cloud Manager) Small Cell Cloudissa [Lobillo et al., 2014, Gambetti et al., 2015], conductor CONCERT:ssa [Liu et al., 2014], FMC Controller FMC:ssä [Taleb and Ksentini, 2013], MC (MobiScud Controller) MobiScud:ssa [Wang et al., 2015], ja edge orchestrator ETSI MEC refenssiarkkitehtuurissa [ETSI, 2016b]. *Tarkista onko kaikki*

Hallinnollisten toimien osalta arkkitehtuuri voi olla hajautettu tai keskitetty. Hajautetuissa malleissa lähestytään vertaisverkko -tyylistä ratkaisua. Siinä hallinnolliset entiteetit organisoivat hallinnolliset toimet keskenään. Hajautetussa mallissa hallinnolliset entiteetit usein vastaavat jostain osajoukosta reunasolmuja ja esimerkiksi virtuaalikoneiden migraation yhteydessä hoitavat hallinnollisen vastuun siirtämisen vertaiselleen. Tämä muistuttaa eNodeB:n kaltaista ratkaisua, jossa handoverin yhteydessä vastuu asiakaslaitteen yhteydestä siirtyy handoverin kohteena olevalle eNodeB:lle. Hallinnollisten toimien ollessa keskitettynä yhdelle entiteetille. Esimerkiksi SCM:n [Lobillo et al., 2014] tapauksessa oletetaan, että SCM:llä on saatavillaan kokonaiskuva verkon tilasta ja sen pohjalta SCM voi tehdä päätöksiä esimerkiksi resurssien käyttöönotosta sekä reunalaskennan migraatiosta.

5 Rakenne

Seuraavaksi käydään läpi reunan rakennetta. Koska aihepiirinä on arkkitehtuurit, varsinaisten toteutettujen reunajärjestelmien rakennetta voidaan käydä ainoastaan hypoteettisesti. Eli mitä arkkitehtuuri mahdollistaa tai rajoittaa. Ensimmäiseksi käsitellään reuna-arkkitehtuurien vaikutuksen toteutettavaan järjestelmään. Tämän jälkeen esitellään reunan fyysisen rakenteen eri mallit, jossa keskeisessä osassa ovat reunasolmujen sijainnit. Lopuksi käydään läpi reunan rakenteen merkitystä järjestelmän toiminnalle.

5.1 Rakennetyypit

Tässä kappaleessa käsitellään reunasolmujen muodostaman järjestelmän rakennetta. Rakenteet jakautuvat kahteen päätyyppiin: litteään ja hierarkiseen. Litteä rakenne edustaa perinteisempää lähestymistapaa reunasolmujen asetteluun. Hierarkinen rakenne puolestaan uudempaa ajatusmallia, jossa reunasolmut delegoivat tehtäviä suhteessa tehokkaammille reunasolmuille.

Reunan rakenteeseen vaikuttaa useampi tekijä. Myöhemmässä kappaleessa 6.1 käsiteltävien cloudlettien yhteydessä visioitu operaattoreista riippumattomat reunasolmut mahdollistaisivat esimerkiksi kauppakeskuksien ja

yksityishenkilöiden hankkia omat reunalaskentaa suorittavat yksiköt. Tällaisessa tilanteessa keskeiseksi kysymykseksi nouseekin reunapalveluiden tuottamiseen käytettävä liiketoimintamalli. Yksinkertaisuuden vuoksi tässä kappaleessa aihetta käsitellään, kuin reunan rakenne olisi yhden entiteetin, esimerkiksi operaattorin, käsissä.

reunavyöhyke Määritellään reunavyöhyke alueeksi jolla reunajärjestelmä sijaitsee, käytetään sitä myös vertailussa järjestelmien vertailuun. Reunavyöhyke voi olla kapea tai lavea, joka vastaa suurinpiirtein litteää ja hierarkista.

5.1.1 Litteä rakenne

Litteällä rakenteella tarkoitetaan että jokainen reunasolmu on hierarkisesti samalla tasolla toisiinsa nähden. Litteän järjestelmän keskeisin päätös on valita taso, jolle reunasolmut sijoitetaan. (Voisiko sanoa että tällainen järjestelmä on reunavyöhyke)

Yksinkertainen esimerkki tällaisesta toteutuksesta olisi reunajärjestelmä, jossa reunasolmut sijoitettaisiin mobiiliverkon tukiasemien yhteyteen. Esimerkin järjestelmä toteuttaisi äärimmäistä hajautusta ja lisäksi se olisi fyysisesti erittäin lähellä asiakaslaitetta. Tällaisessa rakenteessa on kuitenkin ilmeisiä ongelmia. Järjestelmän käyttö olisi teoriassa mahdollista ainaostaan niiden tukiasemien ympäristössä, joissa reunajärjestelmä sijaitsee. Tämän seurauksena reunalaskennan laajamittainen käyttöönotto olisi riippuvainen tukiasemiin sijoitettavien reunasolmujen hankinnasta. Mikäli oletetaan että siellä missä laskennan tarve on suurin, on myös eniten ihmisiä. Tästä yleensä seuraa että tällaisessa tilanteessa lähelle tuotu reunalaskenta on kalliimpaa, jo käytettävien tilojen hintojen vuoksi [Mao et al., 2017].

Vaihtoehtoinen ratkaisu olisi siirtää reunasolmuja kauemmaksi tukiasemista. Esimerkiksi siten että yksi reunasolmu vastaisikin useamman tukiaseman kautta tulevasta reunalaskennasta. Mobiiliverkko kontekstissa, reunasolmu sijaitsisi siis joko tukiasemien ja EPC:n välillä tai vasta EPC:n takana. Useamman tukiaseman niputtamista yhden reunasolmun vastuulle kutsutaan klusteroinniksi. Keskeisenä haasteena klusteroinnissa on valita oikean kokoiset klusterit ja sijoittaa oikea määrä resursseja kuhunkin klusteriin [Malandrino et al., 2016]. Klusterin suuruus ja viive todennäköisesti korreloivat jolloin on varottava tekemästä klustereista tarpeettoman suuria. Reunasolmujen siirtäminen kauemmaksi asiakaslaitteista pitäisi siis mahdollistaa helpompi ja edullisempi käyttöönotto, koska tarvitaan suhteessa vähemmän reunasolmuja ja reunasolmujen ylläpito on näin ollen edullisempaa. Kompromissina on kuitenkin suurempi viive reunasolmujen ja asiakaslaitteiden välillä. Onkin siis tärkeää että reunasolmuja ei viedä liian kauas reunasta, jolloin palvelun laatu heikkenee [Mao et al., 2017].

Kuitenkin riippumatta litteän rakenteen sijainnista, sen pohjimmaisena ongelmana on resurssien kiinteys. Ympäristössä jossa reunalaskennan mää-

rä vaihtelee, seuraa tilanne jossa reunasolmu on joko ylikuormitettuna tai alikuormitettuna suhteessa käytössä oleviin resursseihin [Tong et al., 2016]. Jotta reunasolmut pystyisivät suoriutumaan kaikesta reunalaskennasta, reunasolmujen resurssit jouduttaisiin mitoittamaan rasitus-huippujen mukaan. Tästä seuraa lähes jatkuvaa alikuormitusta, joka tarkoittaa että reunajärjestelmän kustannukset olisivat korkeammat kuin olisi tarpeen. Tämän ongleman ratkaisuksi on esitetty hierarkista järjestelmää.

5.1.2 Hierarkinen rakenne

Hierarkinen rakenne on parannusehdostus reunalaskennan oletetulle litteälle rakenteelle [Tong et al., 2016] Reunasolmujen hierarkisella asettelulla tarkoitetaan järjestelmää, jossa reunasolmut on jaettu kerroksiin. Alimmalla kerroksella sijaitsevat reunasolmut ovat lähimpänä asiakaslaitetta, mutta niiden sisältämät laskentaresurssit ovat vähäisiä. Ideana on että alemmalla kerroksessa sijaitsevat reunasolmut voivat siirtää laskentaa ylemmällä kerroksella sijaitsevalle reunasolmulle, jolla on enemmän resursseja. Tasojen määrälle ei ole mitään rajaa, mutta useimmat ehdotukset sisältävät kaksi tai kolme tasoa. Ylemmällä tasolla sijaitsevalla reunasolmulla on vastuullaan useampi alemman tason reunasolmu. Hierarkinen rakenne on siis puun mallinen.

Hierarkisen rakenteen keskeisenä tavoitteena on reunajärjestelmän resurssien käyttöasteen parantaminen [Tong et al., 2016]. Ylemmillä kerroksilla sijaitsevat resurssit ovat suuremman joukon käytössä, hieman kuten litteässä mallissa tukiasemia klusteroitaessa. Hierarkisessa rakenteessa on kuitenkin riskinsä. Järjestelmän voidaan olettaa monimutkaistuvan jos laskentaa tehdään useassa kerroksessa. Ja etenkin järjestelmän ylempien kerroksien etäisyys asiakaslaitteisiin kasvaa, joka voi potentiaalisesti johtaa viiveiden kasvuun ja palvelun laadun heikkenemiseen.

Tong et al [Tong et al., 2016] esittävät tukimuksessaan vertailua litteälle ja erilaisille hierarkisille rakenteille. Tilanteessa jossa järjestelmään on jaettavissa kiinteä määrä resursseja, kolmeen kerrokseen jaettu järjestelmä vaikutti optimaalisimmalta. Vertailun mittarina käytettiin aikaa joka reunapalvelulla kului vastata annettuihin laskennallisiin tehtäviin. Kolmikerrokisen mallin etuina oli laskentaresurssien määrä ylemmillä kerroksilla. Tällöin etenkin ruuhkaisissa tilanteissa se suoriutui tehtävistään nopeammin kuin litteä. Lisäksi tutkimuksessa todettiin, että ylemmillä tasoilla sijaitseva tehokkaampi laskenta pystyy kompensoimaan siirtämisestä aiheutuvaa viivettä. Huomattakoon kuitenkin että tutkimuksessa käytettävä kuorma oli tyypiltään hienojakoista ja pientä.

5.1.3 Yhteenveto

Hierarkinen järjestelmä on potentiaalinen vaihtoehto litteälle rakenteelle. Koska reunalaskennalle on monia hyvin erilaisia sovelluskohteita, hierarkinen rakenne vaatii tarkempaa tutkimusta erilaisilla reunalaskennan tyypeillä. Litteän rakenteen heikkoina puolina voidaan pitää sen kyvyttömyyttä sopeutua kuorman epätasaisuuseen, sekä järjestelmän ylläpidon kustannuksia, mikäli järjestelmää päätetään hajauttaa aggressiivisesti. Litteä järjestelmä on rakenteeltaan yksinkertainen ja se tukee esimerkiksi olemassa olevaa mobiiliverkon tukiasemien rakennetta.

5.2 Arkkitehtuurin vaikutus

Edellisessä kappaleessa järjestelmän rakenteen oletettiin olevan vapaa sijoittamaan reunasolmut haluamiinsa paikkoihin. Todellisuudessa reuna-arkkitehtuurit kuitenkin asettavat joitakin rajoitteita reunsolmujen sijaintien suhteen. Seuraavaksi käsittelemme reuna-arkkitehtuurin vaikutusta reunasolmujen sijoitteluun.

Koska mobiiliverkko on usein asiakaslaitetta lähimpänä sijaitseva verkko, reuna-arkkitehtuurit ovat pyrkineet muodostamaan integraation sen kanssa. Mobiiliverkon ja reunajärjestelmän integraatioissa voidaan puhua integraation sitovuudesta. Tällä tarkoitetaan kuinka sidoksissa reunajärjestelmä on mobiiliverkon rakenteeseen. Monet ehdotetuista reuna-arkkitehtuureista ovat pyrkineet pitämään sidonnaisuutta mahdollisimman vähäisenä, jotta reunajärjestelmän käyttöönotto ei vaatisi mobiiliverkon uusimista. Mutta mobiiliverkosta saatava tieto esimerkiksi tukiasemien handoverit ovat reunajärjestelmän kannalta oleellista tietoa, kun päätetään asiakaslaitteen laskennan suorittavasta reunasolmusta. Tämä tarkoittaa siis että on lähes pakollista sijoittaa hallinnollisia toimia mobiiliverkon yhteyteen. Vaikka reunan hallinnolliset toimet olisivat sidottuina mobiiliverkkon, reunasolmujen sijoitteluun on yleensä enemmän vapauksia. Etenkin tilanteessa jossa reunasolmulla ei itsellään ole hallinnollisia tehtäviä. Ehdotettujen reuna-arkkitehtuurien keskuudessa on huomattavia eroja reunasolmunen mahdollisten sijaintien suhteen. Näitä käydään tarkemmin läpi luvussa 6, jossa jokaisen arkkitehtuuriehdotuksen toiminnallisuus esitellään.

Reuna-arkkitehtuurin riippuvuutta ympäröiviin järjestelmiin voidaan yrittää pienentää esimerkiksi ottamalla käyttöön SDN. SDN mahdollistaa tietoliikennevirtojen ohjaamisen siten että reunajärjestelmän tietoliikennevirrat eivät vaikuta mobiiliverkon toimintaan. Tämän seurauksena reunajärjestelmä on täysin vapaa sijoittamaan reunasolmut mobiiliverkon ulkopuolelle

Toinen ehdotettu ratkaisu on sitoa reunasolmut tukiasemiin. Tämä pakottaa järjestelmän reunasolmuille litteän rakenteen. Järjestelmä on siis reunasolmujen osalta sidoksissa mobiiliverkkoon. Small Cell Cloud (käsitellään kappaleessa 6.3) käyttää tämänkaltaista ratkaisua. Ideana on että

tukiasemat ovat tyypiltään *pienisoluisia*, jolloin tukiaseman kantama olisi pieni ja täten palveltavien asiakaslaitteiden määrä myös vähäinen. Tämä mahdollistaisi reunalaskennan vaatimien laskentaresurssien sijoittaminen tukiaseman yhteyteen.

Kolmas ja viimeinen tyyppi on kokonaan mobiiliverkon ulkopuolelle sijoitettu reunajärjestelmä. Tämä antaa käytännössä täydellisen vapauden sijoitella reunasolmuja. Esimerkki tämänkaltaisesta järjestelmästä on Follow Me Cloud (käsitellään kappaleessa 6.2). Reunajärjestelmän sijoittaminen mobiiliverkon ulkopuolelle tarkoittaa että asiakaslaitteen ja reunasolmun välinen viive on vähintään se aika joka tietoliikenteellä kuluu mobiiliverkossa. Follow Me Cloudin tapauksessa oletetaankin että mobiiliverkon sisäistä viivettä voitaisiin minimoida ja että reunasolmut sijaitsisivat välittömästi mobiiliverkon ulkopuolella.

6 Esitetyt ratkaisut

Reunalaskennan toteuttamiseksi on esitetty useita erilaisia ratkaisuja. Sen sijaan että esitettäisiin ratkaisu yksittäiselle toiminnolle, reunalaskenta-arkkitehtuuri pyrkii toteuttamaan tarpeeksi suuren osajoukon toteuttamisen kannalta kriittisistä ominaisuuksita. Seuraavaksi käydään läpi ehdotettuja arkkitehtuureja ja lopuksi tarkastellaan ETSI:n dokumentaatioiden esittämä reunalaskennan referenssiarkkitehtuuri ja reunalaskennalle asetetut vaatimukset.

6.1 Cloudlet

Cloudlet on virtuaalikoneita hyödyntävä reuna-alusta ratkaisu [Satyanarayanan et al., 2009]. Tarkemmin ottaen cloudlet on enemmänkin arkkitehtuuri elementti kuin kokonainen arkkitehtuuri. Muihin tässä tutkielmassa käsiteltäviin arkkitehtuuri-ehdotuksiin verrattuna cloudlet onkin hieman suppeamman laajuinen konsepti. Sen merkitys reunalaskennan ilmentymisessä on kuitenkin niin huomattava että se käsitellään omana kokonaisuutenaan. Seuraavaksi käsitellään cloudletin perustoiminnallisuutta sekä toimintaperiaatteita

Cloudletin toiminta perustuu käyttäjäkohtaisten virtuaalikoneiden suorittamiseen reunasolmulla. Virtuaalikoneiden käyttö tuo järjestelmään useita haluttuja ominaisuuksia. Koska cloudletin tapauksessa reunalaskennan oletetaan olevan ainoastaan hetkellistä tai väliaikaista[Satyanarayanan et al., 2009], on virtuaalikone-instanssien käyttö luonnollista. Virtuaalikoneet tarjoavat erinomaisen tavan jakaa suoritusalustan resursseja käyttäjäkohtaisille instansseille. Koska virtuaalikoneet eivät ole tiukasti sidoksissa suoritusalustaan, voidaan niitä ainakin teoriassa siirrellä helposti. Tietoturva näkökulmasta virtuaalikoneet tarjoavat myös vahvan eristyksen jokaiselle virtuaalikone-instanssille. [Ha et al., 2015] Lisäksi virtuaalikone ei ota kantaa suoritetta-

vaan ohjelmistoon, jolloin se tarjoaa valinnanavapauden ohjelmointikielten ja käyttöjärjestelmän suhteen

Vaikka virtuaalikoneet ovat helposti alustalta toiselle siirrettävässä muodossa, on otettava huomioon reunakonteksti. Tavallinen virtuaalikoneen tilavaatimus muodostuu virtuaalisesta kovalevystä, muistin kopiosta, prosessorin tilatiedosta ja metatiedoista. Virtuaalikoneiden koot vaihtelevat, mutta esimerkkitapauksissa Ha et al ja Satyanarayanan et al käyttämien virtuaalikoneiden suuruus oli 8GB kovalevyä ja 1GB RAM [Ha et al., 2013, Satyanarayanan et al., 2009]. Reunaympäristössä tämän kokoisten tiedostojen siirtely aiheuttaisi varmasti ruuhkaa ja odottelua. Tämän kokoisten virtuaalikoneiden siirtely vaatii siis aikaa ja kaistaa. Myöskään näin suurten tiedostojen tallentaminen ei ole erityisen mielekäs vaihtoehto. Alkuperäisen cloudlet ehdotuksen keskeinen sisältö onkin optimoida reunalaskennassa käytettävien virtuaalikoneiden kokoa siten että niiden tallentaminen, sekä siirtäminen olisi mielekästä [Satyanarayanan et al., 2009].

Cloudletin keskeinen oivallus on käyttää virtuaalikoneissa yhteistä pohjaa (base) ja erottaa pohjasta käytön aikana muuttuneet osat erilliseksi pinnoitteeksi (VM overlay). Pohjalla tarkoitetaan virtuaalikoneen lähtötilaa, joka voidaan uudelleen käyttään useamman käyttäjän virtuaalikoneiden käyttöönotossa. Käytön aikana pohjana toimineeseen virtuaalikoneeseen tulee muutoksia käyttäjän toiminnan mukaan, esimerkiksi asennettujen sovelluksien osalta. Näiden käyttäjän tekemien muutoksien seurakuksena tallennustilan ja muistin tila eroaa joiltain osin pohjan mukaisesta lähtötilasta. Kun käyttäjä lopettaa virtuaalikoneen käytön, cloudlet järjestelmä alkaa muodostamaan käyttäjäkohtaista pinnoitetta. Yksinkertaistettuna pinnoite tehdään siten, että käyttäjän virtuaalikonetta verrataan pohjana toimineeseen virtuaalikone-kuvaan. Tämän jälkeen muuttuneet osat kerätään omaan tiedostoonsa ja tämä tiedosto pakataan pienemmän tiedostokoon saavuttamiseksi. Satayanaran et al ensimmäisessä cloudletteja käsittelevässä julkaisussa [Satyanarayanan et al., 2009] virtuaalikoneen muutoksien tallentaminen pinnoitteeksi tuottaa noin 100-200 megatavun kokoisen tiedoston Suhteessa lähtökohtana toimineeseen virtuaalikoneeseen, pinnoite on tiedostokooltaan kertaluokkaa pienempi. [Satyanarayanan et al., 2009]

Alkuperäisen idean mukaan pinnoitteen erottamisen jälkeen, pinnoite voitaisiin siirtää joko pilveen tai asiakaslaitteelle odottamaan seuraavaa käyttökertaa. Ideaa on kuitenkin jatkojalostettu tukemaan live migraatiota joka käsitellään tämän kappaleen loppupuolella.

Kun käyttäjä haluaa jälleen ottaa virtuaalikoneensa käyttöön alkaa niin sanottu dynaaminen virtuaalikone synteesi (Dynamic VM synthesis), jossa pohja ja pinnoite yhdistetään suorituskelpoiseksi virtuaalikoneeksi. Pinnoitteen sisältämät muutokset palautetaan virtuaalikonepohjaan jotta se vastaisi tilaa johon käyttäjä oli sen jättänyt. Pohjan luomiseen, pinnoitteen erottamiseen ja dynaamiseen virtuaalikone synteesiin liittyy huomattava määrä yksityiskohtia joita ei käsitellä tässä tutkielmassa. Niiden sisältämistä

yksityiskohdista on mahdollista lukea lisää [Ha et al., 2013] tutkielmasta.

Tiedostokooltaan pienempi virtuaalikoneen tallennusmuoto ei kuitenkaan tule ilman kustannuksia. Pinnoitteen erottaminen ja pakkaaminen vaativat huomattavan määrän laskentaresursseja. Alkuperäisessä ideassa pinnoitteen luominen oli prosessi joka voitiin tehdä ilman aikarajoitetta. Kun järjestelmään lisättiin VM handoff, siihen kuluva aika muuttui merkittäväksi tekijäksi. Myös dynaaminen virtuaalikoneen synteesi vaatii resursseja. Jaetussa suoritusympäristössä korkea yleisrasite näkyy muiden samalla laitteistolla tarjottavien palveluiden laadun heikkenemisessä, tässä tapauksessa siis muiden virtuaalikoneiden. Lisäksi cloudlet ympäristössä virtuaalikoneen käynnistäminen vaatii virtuaalikoneen syntetisoinnin pohjasta ja pinnoittesta, joka luonnollisesti vie myös aikaa, eikä virtuaalikone käynnisty yhtä nopeasti kuin perinteinen virtuaalikone.

Cloudletin toiminnallisuuden edellytyksenä on joukko pohja-aihioita, joita käyttäjät voivat ottaa käyttöön. Sujuvan toiminnan takaamiseksi reunasolmulla tulisi olla tarvittavat pohjat jo valmiiksi. Eräs toimintamalli on säilöä reunasolmulla ainoastaan suosituimpien pohjien joukko ja tarpeen mukaan puuttuvia pohjia voitaisiin ladata pilvestä lisää.

6.1.1 VM handoff

Cloudlet ympäristössä suoritusaikaista virtuaalikoneen siirtoa kutsutaan termillä *VM handoff* [Ha et al., 2015]. Cloudletiltä toiselle tehtävä live migraatio muistuttaa toiminnaltaan mobiiliverkon tutkiasemien välistä handoffia, mutta sovellettuna virtuaalikoneisiin. Kappaleessa 4.1 esitettyjen live migraation metriikkojen osalta VM handoff eroaa palvelinsalista. VM handoff tavoittelee mahdollisimman lyhyttä migraation kestoa, verrattuna palvelinsalien mahdollisimman lyhyeen katkon kestoon. Syyksi tälle esitetään että asiakaslaitteen ja virtuaalikoneen heikentyneen yhteyden korjaaminen on korkeammalla prioriteetillä kuin varsinaisen katkon keston lyhentäminen [Ha et al., 2015]. Toisin kuin palvelinsaliympäristössä olevat lähiverkkoyhteydet, cloudlettien välinen yhteys ei välttämättä ole kovin nopea. Perinteisen live migraation iteratiivinen toiminta ole hitailla yhteyksillä kannattavaa. Viimeinen ero tavallisen live migraation ja VM handoffin välillä on cloudletin pohjaan ja pinnoitteseen perustuva toimintamalli.

Cloudletit voivat hyödyntää yhteistä pohjaa VM handoffin yhteydessä, jolloin siirrettävän tiedon määrä on vähäisempi. Etenkin hitailla yhteyksillä siirrettävän tiedon määrän minimointi on keskeisiä tavoitteita. VM handoffin tehokkuutta on vertailtu tavalliseen live migraatioon Ha et al tutkimuksessa [Ha et al., 2017]. Siinä todettiin että etenkin hitailla yhteyksillä VM handoff saavutti merkittävästi lyhyemmän migraation keston ja selvisi lähes kaikissa tapauksissa huomattavasti pienemmällä tiedonsiirrolla. VM handoffin aiheuttaman katkon kesto oli hieman pidempi verrattuna live migraatioon. VM handoff on kuitenkin erittäin resurssi-intensiivinen toimenpide, eikä tutki-

muksessa otettu tarkemmin kantaa sen vaikutukseen reunasolmun muuhun toiminnallisuuteen. Tutkimuksessa ei oteta kantaa useamman virtuaalikoneen siirtäminen samanaikaisestsi.

6.1.2 Yhteenveto

Cloudlet kattaa reuna-arkkitehtuurista vain pienen osan, joka keskittyy yksittäisellä reunasolmulla suoritettavaan reuna-alustaan. Cloudletin keskeinen toiminnallisuus sisältää virtuaalikoneita hyödyntävän toimintaympäristön joka tukee laskennan suoritusaikaista siirtoa cloudletiltä toiselle VM handoff tekniikalla. Cloudlet jättää toimintaympäristön avoimeksi eikä siis sitoudu esimerkiksi mobiiliverkkoihin. Cloudlet ei myöskään esitä keinoja, joilla tietoliikenne ohjataan virtuaalikoneelle tai kuinka yhteys siirrettyyn virtuaalikoneeseen säilytetään. Näistä syistä johtuen cloudlettiä voidaan pitää hyvin suppeana reunalaskennan ratkaisuna, joka vaatii ympärilleen hallinnollisia toimintoja.

6.2 FMC - Follow me cloud

Asiakaslaitteiden määrän kasvu, sekä tietoliikenne-intensiivisien sovelluksien käytön yleistyminen aiheuttaa suurta kuormaa verkkoinfrastruktuurille. Ongelmat johtuvat pääasiassa keskitetystä rakenteesta, jossa tietoliikenneyhteydet kerätään kulkemaan keskitetyn pisteen kautta. Tämän lisäksi yhteyksissä on huomattavasti viivettä, koska asiakkaan ja palvelimen väliset yhteydet ovat pitkiä. FMC ehdottaa ratkaisua jossa operaattorin keskitetty verkkorakenne muutettaisiin hajautetuksi. [Taleb and Ksentini, 2013] Käytännössä tämä tarkoittaisi, että EPC:n ja ulkoverkon välisten yhdyskäytävien, eli P-GW, määrää lisättäisiin. Toinen osa ideaa on, että P-GW:t voitaisiin hajauttaa palvelinsaleihin lähemmäksi asiakkaan käyttämiä palveluita. Tämä siksi, että myös palveluiden tarjoajat ovat huomanneet hajautustarpeen ja alkaneet hajauttaa palveluitaan. FMC:n arkkitehtuuri koostuu hajautetusta EPC:stä ja hajautetusta palvelinkeskuksista. Asiakaslaitteen yhdistäessä verkkoon verkkoyhteyksien kiintopisteenä toimii todennäköisimmin lähimpänä sijaitseva P-GW. Perinteisessä mobiiliverkossa asiakaslaite pysyy samana P-GW:n asiakkaana, vaikka liikkuisi mobiiliverkossa. FMC lähteekin ratkaisemaan ongelmaa jossa asiakaslaitteelle tarjottaisiin aina optimaalisin[3] yhteys tavoiteltuun palveluun.

FMC:n ratkaisemat ongelmat voidaan jakaa kahteen osaa, optimaalisen reitin valitseminen ja optimaalisen reitin ylläpitämiseen käyttäjän liikkuessa.

Optimaalisella reitinvalinnalla tarkoitetaan, että käyttäjän yhteys kohdepalveluun olisi mahdollisimman lyhyt tai nopea. Tämä jakautuu matkaan, jonka asiakkaan yhteys kulkee mobiiliverkossa, eli tarkemmin ottaen EPC:n

[3]optimaalisella tarkoitetaan tässä yhteydessä parasta mahdollista, käyttäen mittareina fyysistä sijaintia ja kuormaa

sisällä, ja matkaan P-GW:ltä kohdepalvelimeen. Tämän saavuttamiseksi mobiiliverkon arkkitehtuurin tarvitaan palvelinkeskuksien ja P-GW välisiä mappauksia tekevä entiteetti.

FMC tarjoaa optimaalisen reitin löytämiseen ratkaisua, jossa mobiiliverkkoon lisättäisiin hallitseva entiteetti – FMC Controller. Optimaalisen asiakaslaite-palvelinsali -yhteyden ylläpitäminen vaatii jonkin verran muutoksia tapaan jolla käyttäjän siirtymiseen mobiiliverkossa reagoidaan. P-GW:n vaihtaminen ja mahdollisesti myös palvelun tarjoavan konesalin vaihtaminen tarkoittavat että käyttäjän ja palvelun välinen IP-yhteys katkeaa osoitteiden muuttuessa. Kuten kappaleessa 6.3.1 mainittiin, perinteisessä mobiiliverkko arkkitehtuurissa käyttäjän liikenne ulkoverkkoon kulkee GTP-tunnelia pitkin ja käyttäjän liikkuminen tukiasemien välillä ei näy asiakkaslaitteen yhteyksissä. FMC Controllerin tehtävänä on hoitaa avattujen yhteyksien yhteys-tunnisteita sekä tehdä päätöksiä palveluiden migratoinnista palvelinkeskuksien välillä asiakkaan liikkuessa.

FMC eroaa muista mobiiliverkon ratkaisuista sillä, että se ei tuo palvelinresursseja osaksi mobiiliverkkoa ja pyrkii tekemään mobiili infrastruktuuriin mahdollisimman vähän muutoksia. Sen sijaan FMC pyrkii takaamaan nopeimman mahdollisen yhteyden haluttuun palveluun. FCM jättääkin auki mahdollisuuden, että reunapalvelut tarjoaa joku muu kuin operaattori itse.

6.3 Small Cell Cloud

Small Cell Cloud (SCC, pienisoluinen pilvi?) perusidea on reunapalveluiden integroiminen osaksi LTE-verkkoinfrastruktuuria. Reunaopalveluita tuotettaisiin tukiasemiin (Base Station) sijoitetuilla palvelinresursseilla. LTE mahdollistaa heterogeenisten verkkojen luomisen. Matkapuhelinverkkojen tapauksessa tällä tarkoitetaan sitä, että yksittäisen solun sisällä saattaa olla pienempiä soluja. Verkko saattaa siis koostua useammasta kerroksesta erikokoisia soluja. Kun solut ovat muuttumassa pienemmiksi tukiasemat tulevat fyysisesti lähemmäksi käyttäjää.

SCC tarkoituksena on hyödyntää solujen pienentymistä, tuomalla niihin reunapalveluiden tuottamisen mahdollistavaa teknologiaa. SCC reunalaskentapalvelut tuotetaan SCeNBce klustereissa. SCeNBce (Small-cell eNodeB computing-enhanced) on palvelinresursseilla varustettu eNodeB tukiasema [Lobillo et al., 2014]. Verrattuna cloudletteihin, SCeNBce:ssä palvelinresurssit ovat tiiviisti osana tukiasemaa.

SCM (Small Cell Manager) on SCC arkkitehtuurissa hallinnasta vastaava komponentti [Gambetti et al., 2015]. Normaalisti LTE verkossa keskeinen hallinnosta vastaava komponentti on Mobility Management Entity (MME). Sen tehtäviin kuuluu on hoitaa muunmuassa MME:ltä toiselle tapahtuvat handoverit ja asiakkaiden autentikointi. Täten on luonnollista että SCM liitetään MME:n yhteyteen, jossei suorasti niin ainakin jonkin yhteyden välityksellä. Eräs ehdotettu tapa toteuttaa SCM onkin integroida se suoraan

MME:n yhteyteen jolloin tämä komponentti vastaa sekä reunapalveluista ja LTE-verkon hallinnasta[Lobillo et al., 2014]. SCM tehtävänä on organisoida resurssien utilisointia SCeNBce klustetereiden välillä. Tähän kuuluu esimerkiksi palvelinresurssien sammuttaminen mikäli ne eivät ole käytössä ja mahdollisesti yliutilisoidulta SCeNBce:ltä kuorman siirtäminen toiselle SCeNBce:lle. Tämän lisäksi esimerkiksi virtuaalikoneiden migraatiopäätöksien tekeminen on SCM tehtävä.

Koska SCC:n tapauksessa palveluiden tuottamiseen käytettäisiin matkapuhelinverkkoa, rajaisi se myös asiakaslaitteet älypuhelimiin ja muihin tätä verkkoa käyttäviin laitteisiin. Reunapalveluiden sitominen tiukasti matkapuhelinverkkoon vaikuttaa erikoiselta. Ratkaisulla on hyvät ja huonot puolensa. Reunapalveluiden tarjoamisen muihin verkkoihin, esimerkiksi WiFi yhteydellä ei onnistu suoraan ehdotetulla

SCC:n arkkitehtuurin haasteena saattaa olla niiden ylläpidettävyys, jossa matkapuhelinverkko-operaattori on vastuussa reunasolmun ylläpidosta, koska se on tiukasti sidoksissa tukiasemaan[Lobillo et al., 2014]. Tukiasemaan tiukasti sidotulla ratkaisulla on kuitenkin mahdollista hyödyntää laajemmin tukiaseman ominaisuuksia, kuten radioyhteyksiä toisiin tukiasemiin. SCeNBce tukiasemien hankkiminen vaatii operaattoreilta investointeja sekä lisää ylläpitotyön määrää. (Näiden vuoksi ehkä kantsis miettii, että miksi se on niin tiukasti kiinni siinä televerkossa. Muutenkin useampi operaattori samalla alueella tarkoittaa että jokaisella on myös omat reunapalvelut, joka taas meinaa kokonaiskuvassa että sama palvelu pitää duplikoida monelle operaattorille.)

6.3.1 Kommunikointi reunapalveluun

SCC pohjaisessa järjestelmässä tavallinen verkkoon menevä tietoliikenne ja reunapalvelulle menevä tietoliikenne on ehdotettu eroteltavaksi toisistaan [Puente et al., 2015]. Eristyksen seurauksena LTE-A arkkitehtuuriin ei tarvitse koskea muutoin kuin lisäyksien osalta. Liikenne SCeNBce:llä tarjottuihin reunapalveluihin on tehtävä tarkoitusta varten olevan rajapinnan kautta. Asiakaslaitteelta tuleva liikenne reititetään SCeNBce:llä. Pakettien reitittämiseksi SCeNBce joutuu päättelemään, onko paketin määränpää reunapalvelu vai tavallinen tietoliikenne.

Koska LTE-tukiasemat eivät toimi IP tasolla, ei reunapalvelulta tuleva pakettiliikenteen sisältämä asiakaslaitteen IP-osoite riitä identifioimaan kohdelaitetta. Yleisesti LTE verkossa, internetistä asiakaslaitteelle suuntautuvan liikenteen osalta pakettien ohjaamiseksi, käytetään GTP-tunnelia. GTP-tunnelilla tietoliikenne saadaan ohjattua oikealle tukiasemalle. Tukiaseman ja asiakaslaitteen välisen kommunkaatioväylän selvittämiseksi joudutaan tekemään TEID (Tunnel endpoint IDentifier) ja DRB-ID (Data Radio Bearer ID) muunnos.

Vastaava ongelma on myös reunapalvelulta asiakaslaitteelle suuntautu-

vassa tietoliikenteessä. SCC:n yhteydessä ehdotetussa ratkaisussa reunapalvelulta tulevan liikenteen yhdistäminen asiakaslaitteen IP-osoitteeseen voidaan tehdä käyttäen TEID perustuvaa ohjaustaulua. TEID on asiakaskohtaisen GTP-tunnelin indetifioiva tunniste. TEID:stä ja asiakaslaitekohtaisesta IP-osoitteesta voidaan muodostaa SCeNBce:lle reititystaulu. Reititystaulun avulla voidaan ohjata IP-osoitte muuntaa DRB liikkenneväyläksi ja ohjata tietoliikenne asiakaslaitteeseen.

6.4 SMORE ja MobiScud

SMORE (Software defined network Mobile Offloading aRchitecturE) on toinen televerkkoihin suunniteltu MEC ratkaisu. [Cho et al., 2014] SMORE:n keskeisin sisältö on ottaa SDN (Software Defined Networking) käyttöön reunapalveluiden saavuttamiseksi. SDN käyttöönotolla tavoitellaan sitä, että televerkon toimintaan ei tarvitsisi tehdä muutoksia. Minkään olemassa olevan komponentin toiminta ei siis muutu. SMORE:n toiminta on jaettu kahteen osaa, joita varten SDN on käytössä. Ensimmäisenä on mobiiliverkon kontrollitasolla (control-plane) tapahtuva viestien monitorointi. Toisena toimintona on monitoroitujen tietojen pohjalta tehtävät SDN hallintatoimenpiteet. Näiden avulla voidaan ohjata haluttu osa tietoliikenteestä haluttuihin reunalaskentayksikköihin. Kontrollitasolla viestejä monitorointia suorittaa SMORE monitori (SMORE monitor) ja tietoliikenteen ohjauspäätöksistä vastaava komponentti on SMORE kontrolleri (SMORE controller).

Tietojen välitys SMORE kontrollerin ja SMORE monitorin välillä on toteutettu yhteisen tietokannan kautta. SMORE monitor tallentaa poimitut tiedot tietokantaan ja antaa tiettyjen tapahtumien yhteydessä SMORE kontrollerille herätteen tehdä asianmukaiset muutokset SMORE:n SDN reitityksiin. Herätteitä laukaisevat tapahtumat ovat asikkaan liittyminen verkkoon ja asikkaan liikkuminen verkossa.

SMORE monitori tarkkailee asiakaslaitteen ja LTE/EPC:n välistä liikennettä. Asiakaslaitteen liittyessä mobiiliverkkoon, asiakaslaite ja LTE/EPC:n sisäiset komponenti muodostavat tunneleita ja asiakaslaitteeseen liitetään erilaisia tunneleita koskevia osoite ja metatietoja. SMORE monitorin tehtävänä on poimia asiakaslaitteen liittyessä ja yhteydenmuodostuksen aikana asiakaslaitteisiin liittyviä tietoja. Asiakaslaitteen lähettäessä liittymispyynnön (attach request) SMORE monitori poimii pyynnöstä asiakaslaitteen IMSI (international Mobile Subscriber Identity) ja TAI:n (Tracking Area Identifier). Tämän jälkeen SMORE monitori poimii MME:n asiakaslaitteelle lähettämästä liittymispyynnön hyväksymis -viestistä (attach accept) monitori poimii asiakaslaitteelle annetun IP-osoitteen, SGW:n IP-osoitteen, SGW:n TEID:n ja asiakaslaitteen GUTI:n (Globally Unique Temporary Id). Tämän jälkeen eNodeB neuvottelee asiakaslaitteen kanssa radioyhteydestä ja tämän lopputulos välitetään MME:lle. SMORE monitor poimii eNodeB:n ja MME:n välisestä kommunikaatiosta eNodeB:n IP-osoitteen ja eNodeB:n TEID:n.

Kun edellä mainitut tiedot on tallennettu SMORE:n tietokantaan, SMORE monitor lähettää SMORE kontrollerille herätteen päivittää SDN reitityksiä.

Toinen tapahtuma josta SMORE kontrolleri on kiinnostunut on handover, eli mikäli asiakaslaite siirtyy mobiiliverkossa eNodeB:den välillä. SMORE kontrollerin on tässä tapauksessa kiinnostunut mobiiliverkossa tapahtuvista muutoksista. Handover alkaa kun tällä hetkellä käytössä oleva eNodeB päättää, että on aika siirtää asiakaslaitteen yhteys toiselle eNodeB:lle (kohde). Alkuperäinen eNodeB välittää pyynnön kohteena olevalle eNodeB:lle joka oletettavasti hyväksyy sen. Tämän jälkeen, kohteena oleva eNodeB pyytää MME:ltä reitityksen muutosta. Tässä välissä oleva SMORE monitor poimii reitityksen muutosta koskevan tiedon ja välittää ne SMORE kontrollerille. Tämän tiedon pohjalta SMORE kontroller voi tehdä SDN muutokset siten että vanhat reitit ykset voidaan poistaa ja korvata uusilla.

6.4.1 MobiScud

MobiScud [Wang et al., 2015] on SMORE:n ideoita ammentava versio reunalaskentapalveluiden tuottamisesta mobiiliverkoissa. MobiScud:in perustoiminnallisuus on hyvin samankaltainen kuin SMORE:ssa. MobiScud painottaa enemmän käyttäjän tarvetta liikkua verkossa. Lisäksi MobiScud käyttää hyödykseen oletusta mobiiliverkkojen hajautettua rakennetta.

Kuten SMORE, MobiScud käyttää hyödykseen SDN:n tarjoamia ominaisuuksia ja siten olettaa sen käyttöönottoa palveluntarjoajan infrastruktuurissa. Lisäksi MobiScudin toiminnallisuudet on ajateltu toteutettavan Network Function Virtualisantionin (NFV) avulla. MobiScud Controller (MC) koostuu kahdesta loogisesta kokonaisuudesta: monitorista ja kontrollerista. Näiden toimintaperiaate on käytännössä identtinen SMORE:n vastaavan nimisiin toimijoihin. MC:n sijaintia ei kuitenkaan ole keskitetty kuten SMORE:ssa vaan sen oletetaan sijaitsevan hajautettna RAN ja EPC välissä. Käyttäjän ja reuna-infrastruktuurin välinen yhteys toteutetaan hyvin samalla tavalla kuin SMORE:ssa.

MobiScudin reunapalvelut on ajateltu toteutettavan hyvin cloudletmäisesti. Mahdollisimman lähellä reunaa sijaitsevassa "pilvessä"on palvelinresursseja, joita käyttäjät hyödyntävät yksityisien virtuaalikoneinstanssien muodossa (Private Virtual Machinem, PVM).

MobiScudin tavoitteena on tarjota asiakkaalle mahdollisimman nopea yhteys asiakkaan ja PVM:n välille. MobiScud hyödyntää televerkon omia kontrollitason viestejä asiakkaan liikkumisen seuraamiseen. Kun handoverista tulee viesti MC:n monitoroivalle entiteetille, alkaa MC organisoimaan reunalaskentaan liittyviä muutoksia.

Asiakkaan siirtyessä tukiasemalta toiselle PVM:n siirto aloitetaan livemigraationa kohteena olevalle "pilvelle". Livemigraation ollessa käynnissä kohteena olevan pilven MC huolehtii että asiakaslaitteella on edelleen yhteys alkuperäiseen sijaintiinsa. Tämä hoidentaan SDN reititysmuutoksilla. Kun

PVM:n livemigraatio on saatu suoritettua alkuperäisen sijainnin MC ilmoittaa tästä kohdesijainnin MC:lle, joka puolestaa päivittää SDN reitityksset ohjaamaan siirretylle PVM:lle.

MobiScudin testeissä livemigraation ja SDN reitityksien avulla RTT (round trip time) saatiin pidettyä pienenä. Kuitenkin yhteyksissä aiheutui noin kahden sekunnin mittaisia katkoksia sillä hetkellä kun livemigraation viimeiset muutokset lähetetään. Yhteyskatkoksen pituuteen vaikuttavat monet asiat ja artikkelissa huomautetaankin että nykyinen toteutus oli optimoimaton ja vaatii jatkotutkimuksia.

6.5 CONCERT

Nykyinen LTE televerkko koostuu joukosta laitteita, joilla on hyvin spesifit tehtävät. CONCERT [Liu et al., 2014] pyrkii seuraavan sukupolven televerkkoihin keskittyvässä ratkaisussaan vähentämään tehtäväspesifien laitteiden tarvetta. CONCERT arkkitehtuuri koskee siis pääasiassa seuraavan sukupolven televerkkoja, vaikkakin sen ratkaisut mahdollistavat tuen myös vanhemmille teknologioille. CONCERT esittää uudenlaista toiminnallisuuksien toteuttamismallia, joka korvaisi valmistajakohtaisia telelaitteita (kuten tukiasemat) virtualisoiduilla ja ohjelmistopohjaisilla ratkaisuilla. NFV ja SDN käyttöönotto toimii siis tämänkin ehdotuksen selkärankana. Verkon toimintojen virtualisointi mahdollistaa laitteiston siirtämisen kauemmaksi reunasta, joka osaltaan vähentää hajautettavan laitteiston määrää. CONCERTin ideana on, että hajautetuksi jäisi telelaitteistosta ainoastaan välttämättömin osa, eli radiorajapinnan mahdollistava RIE (Radio Interfacing Equipment) ja hierarkisesti jaetut reunalaskentayksiköt. Televerkon muita toiminnallisuuksia voitaisiin keskittää ja tarjota virtuaalisina ohjelmistoteutuksina.

Conductor on CONCERT arkkitehtuurissa hallinnollisessa keskiössä ja se vastaa päällysverkon hallinnasta. CONCERT arkkitehtuurissa control ja data planet on erotettu toisistaan ja Conductorin tehtävänä esittää data planella esiintyvät fyysiset resurssit virtuaalisina resursseina. Reunalaskentayksiköiden resurssien jakaminen sekä niiden välisten SDN kytkimien kautta muodostettujen yhteyksien hoitamisesta vastaa conductor. Conductorin toiminta on toistaiseksi kuvattu vain korkealla tasolla, joten sen toteutustekniset ratkaisut ovat avoimia.

Vaikka laitteiston virtualisointi ja palveluiden keskittäminen kustannuksien säästämiseksi kuulostaakin houkuttelevalta, on kesittämisessä myös omat ongelmansa. Etenkin liiallinen keskittäminen siirtää verkon toiminnallisuuksia kauemmaksi reunasta, joka osaltaa johtaa korkeampiin latensseihin ja heikentää palvelun laatua. Vaikka conductor onkin esitetty yksittäisenä loogisena entiteettinä, sen toiminnallisuuksia on mahdollista porrastaa ja hajauttaa paremman skaalautuvuuden ja pienempien latenssien tavoittamiseksi.

CONCERTin ratkaisu reunapalveluiden tuottamiseksi on hierarkinen kolmeen tasoon jaettu arkkitehtuuri. *Paikalliset* reunalaskentaresurssit sijait-

sevat kaikkein lähimpänä verkon reunaa, esimerkiksi RIE:n kanssa samassa sijainnissa sijaitseva palvelin. Paikallisen reunalaskentayksikön laskentaresurssit ovat rajalliset ja sen tehtävänä onkin suorittaa ainoastaan kaikkein tiukimman aikavaatimuksen laskentaa. *Alueelliset* reunalaskentaresurssit kattavat jonkin pienen alueen reunalaskenta tarpeita ja korkeimman tason *keskus* reunalaskentaresurssit kattavat jonkin suuremman alueen resurssi intensiivistä reunalaskentaa. CONCERT:ssa reunalaskentaresurssien jakamisesta vastaa conductorin sisäinen komponentti LCM (Location-aware computing management).

Reunalaskennan osalta CONCERTissa resurssit on jaettu hierarkisesti kolmeen tasoon, siten että lähimpänä käyttäjää on *paikalliset* palvelimet, jotka on tarkoitettu kaikkein tiukimman aikavaatimuksen sovelluksille. Seuraavat kaksi tasoa, *alueellinen* ja *keskus (central)*, kasvattavat palvelinresurssien määrää, mutta ovat kauempana reunasta. Reunalaskentayksiköt voivat olla yhteydessä toisiinsa, jolloin ne mahdollistavat nopeat M2M (Machine-to-Mahcine) yhteydet. Tämä mahdollistaisi muunmuassa autojen välisen kommunikaation reunaverkon välityksellä.

Toistaiseksi CONCERT on korkean tason suunnitelma ja se käyttää hyväkseen vielä olemassa olemattomia teknologisia ratkaisuja kuten tukiasemien virtualisointia. Arkkitehtuuri mahdollistaa erilaisien ratkaisujen toteuttamisen, eikä aseta tiukkoja rajoitteita resurssien tai hallinnon sijoittelun suhteen.

6.6 ETSI MEC

ETSI (European Telecommunications Standards Institute) on eurooppalainen telealan standardointijärjestö. ETSI on aloittanut reunalaskennan arkkitehtuurin, sekä sen touteuttamiseksi vaadittavien toimintojen standardoimisen.

ETSIn MEC spesifikaatio määrittelee reunapalvelun tuottamiseksi vaadittavat ominaisuudet, jotka reunainfrastruktuurin tulee toteuttaa. Spesifikaatio listaa myös mahdollisia, mutta ei vaadittuja toimintoja. Listaamalla vaaditut toiminnot stanrardi pyrkii yhtenäistämään reunalaskennan konsepteja.

6.6.1 Vaatimukset

Vaatimukset on jaettu kategorioihin sen mukaan mihin toiminnallisuuteen vaatimus liittyy. Vaatimuksien kategoriat ovat yleiset vaatimukset (generic requirements), palvelu vaatimukset (service requirements), hallinta vaatimukset (operation and management requirements) ja viimeisenä kategoriana on kokoelma vaatimuksista, joiden teemoina ovat turvallisuus, sääntely ja veloitus (Security, regulation, charging requirements)[ETSI, 2016c].

Yleiset vaatimukset ovat luonteelta korkean tason kuvauksia reunainfrastruktuurin toiminnallisuuksista. Yleiset vaatimukset kategorisoitu seuraaviin luokkiin: viitemallista, reunapalvelun sovelluksien elinkaaresta (applica-

tion lifecycle), reunapalvelun sovellusympäristöstä (application enviroment) sekä liikkuvuuden tuesta (support of mobility). Viitemallin tulee vaatimuksien mukaan hyödyntää mukaan NFV ratkaisuja hallinnollisten toimien toteuttamiseen, mikäli mahdollista. ETSI:n vaatimuksen mukaan reunapalvelun tulee voida sijaita käytännössä missä tahansa kohdassa radiomaston runkoverkon reunan välillä. Sijainnin vapaus myös tarkoittaa että reuna-alusta(?) ei voi olla riippuvainen alla olevasta infrastruktuurista. Reunapalvelun sovelluksien elinkaareen liittyvät vaatimukset koskevat pääasiassa reunapalvelun toimijoiden oikeuksia päättää reunan sovelluksien käynnistämisestä ja sulkemista. Reunapalveluiden sovellusympäristöä koskevissa vaatimuksissa esitetään, että sovelluksien autenttisuus ja eheys pitää pystyä varmentamaan. Sovellusympäristön täytyy myös mahdollistaa reunasovelluksen käyttöönotto toisella reuna-isännällä, ilman erikoisempaa mukautusta (without specific adaptation) [ETSI, 2016c]. Mobiiliverkkojen ollessa kyseessä, asiakaslaitteiden liikkuminen tukiasemalta toiselle, on keskeinen käyttötapaus. Tämä heijastuu myös vaatimukseen liikkuvuuden tukemisesta reunapalveluissa. Vaatimuksena on että asiakaslaitteen ja reunapalvelun välisen yhteyden tulee säilyä, vaikka asiakaslaite siirtyisi solusta toiseen tai asiakaslaite siirtyisi sellaiseen soluun joka on toisen reuna-isännän vastuualuetta.

Palveluvaatimukset on joukko vaatimuksia, jotka keskittyvät takaamaan reuna-infrastruktuurin perimmäiset palveluperiaatteet. Lista palveluvaatimuksista on pitkä, joten tähän tutkielmaan on poimittu ainoastaan osa vaatimuksista. Täydellinen lista löytyy [ETSI, 2016c] julkaisusta. Palveluvaatimukset kuvaavat toiminnallisuuksia, joiden avulla reunapalveluita voidaan tuottaa. Tällaisesta esimerkkinä tietoliikenteen reitittämiseen liittyvät vaatimukset, joiden keskeinen tehtävä on kuvata mahdolliset tietoliikennereitit reunapalveluun ja ulos reunapalvelusta. Yksi ehkä keskisimmistä palveluvaatimuksista on reuna-alusta mahdollisuus suodattaa ja muokata verkkoliikennettä. Lisäksi kuvataan että reunapalveluiden toimintaa ei haluta rajoittaa pelkästään asiakas-palvelu tyyppisen toimintamalliin. Reunapalveluiden tuottamiselle onkin annettu mikropalvelu -tyyppinen (microservice) kuvaus, jossa palveluntuottajat voivat toimia myös toisten reunapalveluiden kuluttajana (consumer).

6.6.2 Viitekehys ja referenssiarkkitehtuuri

ETSIn esittämän viitekehys esittää reunalaskentaan liittyvät korkean tason entiteetit. Nämä entiteetit on jaettu kolmeen tasoon: järjestelmä, isäntä ja verkko(system, host ja network). Verkkokerros sisältää verkkoyhteyksistä vastaavat entiteetit. MEC:n tapauksessa verkkokerros koostuu ainakin kolmesta osasta: sisäverkko, ulkoverkko ja televerkko. Isäntäkerros koostuu reunapalveluiden virtualisointiin ja reunapalvelun hallinointiin keskittyvistä entiteeteistä. Järjestelmäkerros koostuu korkeamman tason hallinnosta vastaavista elementeistä.

Taulukko 1: Reunalaskenta-arkkitehtuurien ominaisuudet

Referenssiarkkitehtuurissa on esitetty funktionaaliset entiteetit. Funktionaalisten entiteettien toiminta on kuvattu Referenssiarkkitehtuurissa reuna-isännällä (edge-host) tarkoitetaan entiteettiä, joka tarjoaa virtualisointi-infrastruktuurin, sekä reunalaskennan toteuttamiseen vaadittavat resurssit (laskenta, tallennus ja verkko). Reuna-alustalla (Mobile edge platform) tarkoiteen sitä entiteettiä joka mahdollistaa reunapalveluiden käyttämisen. Reuna-alusta siis mahdollistaa reunapalveluiden saavuttamisen, eli käytännössä tarjoaa rajapinnan asiakaslaitteen suuntaan. Tähän kuuluu siis palvelurekisterin ylläpitäminen, reitityssääntöjen ylläpitäminen, sekä liikenteen välittäminen reunapalveluille. Reuna-alusta voi myös itse tarjota palveluita. Esimerkkinä tällaisesta voisi olla tunnistautumispalvelu. Reuna-applikaatioilla tarkoitetaan reuna-alustalla suoritettavia virtuaalikoneita, jotka suorittavat reunapalveluiden tuottamiseksi tarkoitettuja ohjelmistoja.

6.7 Vertailu

Lähteet

[Armbrust et al., 2010] Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., Joseph, A. D., Katz, R., Konwinski, A., Lee, G., Patterson, D., Rabkin, A., Stoica, I., et al. (2010). A view of cloud computing. *Communications of the ACM*, 53(4):50–58.

[Bonomi et al., 2012] Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J., and Addepalli, S. (2012). Fog computing and its role in the internet of things. In *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing*, pages 13–16. ACM.

[Cho et al., 2014] Cho, J., Nguyen, B., Banerjee, A., Ricci, R., Van der Merwe, J., and Webb, K. (2014). Smore: software-defined networking mobile offloading architecture. In *Proceedings of the 4th workshop on All things cellular: operations, applications, & challenges*, pages 21–26. ACM.

[ETSI, 2012] ETSI (2012). Network functions virtualisation. `https://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf`. [Verkkoaineisto, Luettu 2018-03-19].

[ETSI, 2016a] ETSI (2016a). Lte; evolved universal terrestrial radio access (e-utra) and evolved universal terrestrial radio access network (e-utran); overall description; stage 2. `http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136300/14.05.00_60/ts_136300v140500p.pdf`. [Verkkoaineisto, Luettu 2018-03-13].

[ETSI, 2016b] ETSI (2016b). Mobile edge computing (mec); framework and reference architecture. http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC/001_099/003/01.01.01_60/gs_MEC003v010101p.pdf. [Verkkoaineisto, Luettu 2018-02-23].

[ETSI, 2016c] ETSI (2016c). Mobile edge computing (mec); technical requirements. http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC/001_099/002/01.01.01_60/gs_MEC002v010101p.pdf. [Verkkoaineisto, Luettu 2018-02-23].

[ETSI, 2017a] ETSI (2017a). Lte; evolved universal terrestrial radio access network (e-utran); architecture description (3gpp ts 36.401 version 14.0.0 release 14). http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136400_136499/136401/14.00.00_60/ts_136401v140000p.pdf. [Verkkoaineisto, Luettu 2018-03-14].

[ETSI, 2017b] ETSI (2017b). Network functions virtualisation. http://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper_5G.pdf. [Verkkoaineisto, Luettu 2018-03-19].

[Farris et al., 2017] Farris, I., Taleb, T., Iera, A., and Flinck, H. (2017). Lightweight service replication for ultra-short latency applications in mobile edge networks. In *Communications (ICC), 2017 IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE.

[Firmin, 2017] Firmin, F. (2017). The evolved packet core. http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core. [Verkkoaineisto, Luettu 2018-03-14].

[Gambetti et al., 2015] Gambetti, F., Fogliuzzi, F., de Marinis, E., Pascual, A., Muñoz, O., Lagén, S., Agustín, A., Puente, M. A., Barbarossa, S., and Sardellitti, S. (2015). Distributed computing, storage and radio resource allocation over cooperative femtocells. https://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/4/318784/080/deliverables/001-D61Ares20152101644.pdf. [Verkkoaineisto, Luettu 2018-04-03].

[Ha et al., 2015] Ha, K., Abe, Y., Chen, Z., Hu, W., Amos, B., Pillai, P., and Satyanarayanan, M. (2015). Adaptive vm handoff across cloudlets. *Technical report, Technical Report CMU-C S-15–113, CMU School of Computer Science*.

[Ha et al., 2017] Ha, K., Abe, Y., Eiszler, T., Chen, Z., Hu, W., Amos, B., Upadhyaya, R., Pillai, P., and Satyanarayanan, M. (2017). You can teach elephants to dance: agile vm handoff for edge computing. In *Proceedings of the Second ACM/IEEE Symposium on Edge Computing*, page 12. ACM.

[Ha et al., 2013] Ha, K., Pillai, P., Richter, W., Abe, Y., and Satyanarayanan, M. (2013). Just-in-time provisioning for cyber foraging. In *Proceeding of the 11th annual international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 153–166. ACM.

[Jammal et al., 2014] Jammal, M., Singh, T., Shami, A., Asal, R., and Li, Y. (2014). Software defined networking: State of the art and research challenges. *Computer Networks*, 72:74–98.

[Kreutz et al., 2015] Kreutz, D., Ramos, F. M., Verissimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., and Uhlig, S. (2015). Software-defined networking: A comprehensive survey. *Proceedings of the IEEE*, 103(1):14–76.

[Liu et al., 2014] Liu, J., Zhao, T., Zhou, S., Cheng, Y., and Niu, Z. (2014). Concert: a cloud-based architecture for next-generation cellular systems. *IEEE Wireless Communications*, 21(6):14–22.

[Lobillo et al., 2014] Lobillo, F., Becvar, Z., Puente, M. A., Mach, P., Presti, F. L., Gambetti, F., Goldhamer, M., Vidal, J., Widiawan, A. K., and Calvanesse, E. (2014). An architecture for mobile computation offloading on cloud-enabled lte small cells. In *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, pages 1–6.

[Malandrino et al., 2016] Malandrino, F., Kirkpatrick, S., and Chiasserini, C.-F. (2016). How close to the edge?: Delay/utilization trends in mec. In *Proceedings of the 2016 ACM Workshop on Cloud-Assisted Networking*, pages 37–42. ACM.

[Mao et al., 2017] Mao, Y., You, C., Zhang, J., Huang, K., and Letaief, K. B. (2017). A survey on mobile edge computing: The communication perspective. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, PP(99):1–1.

[Nguyen and Cheriet, 2016] Nguyen, K. K. and Cheriet, M. (2016). Virtual edge-based smart community network management. *IEEE Internet Computing*, 20(6):32–41.

[Puente et al., 2015] Puente, M. A., Becvar, Z., Rohlik, M., Lobillo, F., and Strinati, E. C. (2015). A seamless integration of computationally-enhanced base stations into mobile networks towards 5g. In *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5.

[Samdanis et al., 2012] Samdanis, K., Taleb, T., and Schmid, S. (2012). Traffic offload enhancements for eutran. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(3):884–896.

[Satyanarayanan, 2001] Satyanarayanan, M. (2001). Pervasive computing: vision and challenges. *IEEE Personal Communications*, 8(4):10–17.

[Satyanarayanan et al., 2009] Satyanarayanan, M., Bahl, P., Caceres, R., and Davies, N. (2009). The case for vm-based cloudlets in mobile computing. *IEEE Pervasive Computing*, 8(4):14–23.

[Soni and Kalra, 2013] Soni, G. and Kalra, M. (2013). Comparative study of live virtual machine migration techniques in cloud. *International Journal of Computer Applications*, 84(14).

[Taleb and Ksentini, 2013] Taleb, T. and Ksentini, A. (2013). Follow me cloud: interworking federated clouds and distributed mobile networks. *IEEE Network*, 27(5):12–19.

[Taleb et al., 2017] Taleb, T., Samdanis, K., Mada, B., Flinck, H., Dutta, S., and Sabella, D. (2017). On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5g network edge cloud architecture and orchestration. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(3):1657–1681.

[tarkista tarkista, 2017] tarkista tarkista, G. (2017). 3rd generation partnership project; technical specification group services and system aspects; local ip access and selected ip traffic offload (lipa-sipto). `TARKISTAhttp://www.3gpp.org/DynaReport/23829.htm`. [Verkkoaineisto, Luettu 2018-03-14].

[Tong et al., 2016] Tong, L., Li, Y., and Gao, W. (2016). A hierarchical edge cloud architecture for mobile computing. In *INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, IEEE*, pages 1–9. IEEE.

[Tuovinen, 2017a] Tuovinen, A.-P. (2017a). Luentokalvot: Ohjelmistoarkkitehtuurin suunnittelu.

[Tuovinen, 2017b] Tuovinen, A.-P. (2017b). Luentokalvot: Ohjelmistoarkkitehtuurin suunnitteluperiaatteita.

[Wang et al., 2015] Wang, K., Shen, M., Cho, J., Banerjee, A., Van der Merwe, J., and Webb, K. (2015). Mobiscud: A fast moving personal cloud in the mobile network. In *Proceedings of the 5th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications and Challenges*, pages 19–24. ACM.

[Yousaf and Taleb, 2016] Yousaf, F. Z. and Taleb, T. (2016). Fine-grained resource-aware virtual network function management for 5g carrier cloud. *IEEE Network*, 30(2):110–115.