

# **Reunalaskenta arkkitehtuurit**

Lauri Vene

Pro gradu -tutkielma  
UNIVERSITY OF HELSINKI  
Department of Computer Science

Helsinki, March 6, 2018

Tiedekunta — Fakultet — Faculty		Laitos — Institution — Department	
Faculty of Science		Department of Computer Science	
Tekijä — Författare — Author			
Lauri Vene			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Reunalaskenta arkkitehtuurit			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Computer Science			
Työn laji — Arbetets art — Level		Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages
Pro gradu -tutkielma		March 6, 2018	16
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
Tiivistelmä.			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
reuna, pilvi, tietojenkäsittelytiede			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Additional information			

## Contents

<b>1</b>	<b>Huomioita</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Reunalaskennan perusteet</b>	<b>1</b>
3.1	Motivaatio . . . . .	1
3.2	. . . . .	2
<b>4</b>	<b>Suurimmat osatoimijat</b>	<b>4</b>
4.1	eNodeB . . . . .	4
4.2	Asiakaslaite . . . . .	4
4.3	Edge cloud . . . . .	4
4.4	Cloud . . . . .	4
4.5	Reunasolmu . . . . .	4
4.6	SDN ja NFV . . . . .	4
<b>5</b>	<b>Ominaisuudet</b>	<b>4</b>
5.1	Etälaskenta . . . . .	5
5.2	Etäinstanssi . . . . .	6
5.3	Migraatio . . . . .	6
5.4	Integraatio mobiiliverkkoihin . . . . .	7
5.5	IP-verkko . . . . .	7
5.6	Kommunikaatio asiakaslaitteen Reunasolmun kanssa . . . . .	7
5.7	Hallinta . . . . .	7
<b>6</b>	<b>Reunan rakenne</b>	<b>7</b>
<b>7</b>	<b>Esitetyt ratkaisut</b>	<b>8</b>
7.1	Cloudlet . . . . .	8
7.2	FMC – Follow me cloud . . . . .	9
7.3	Small Cell Cloud . . . . .	9
7.3.1	Kommunikointi reunapalveluun . . . . .	10
7.4	SMORE ja MobiScud . . . . .	11
7.4.1	MobiScud . . . . .	12
7.5	Concert . . . . .	13
7.6	ETSI MEC . . . . .	13
7.6.1	Vaatimukset . . . . .	13
7.6.2	Viitekehys ja referenssiarkkitehtuuri . . . . .	14
7.7	Yhteenvedo . . . . .	15
	<b>Lähteet</b>	<b>15</b>

# 1 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

## 2 Johdanto

## 3 Reunalaskennan perusteet

### 3.1 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, mobiililaitte 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

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 vietyä 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 palveluita. Tämä laite tarvisi reunaklusterilta avustusta ainoastaan joissain tapauksissa. Viimeisenä toimijana olisi kokonaan itsenäinen asiakaslaite, joka tarvitsisi reunalta ainoastaan palveluita täydentäviä ominaisuuksia. Tämä laite saattaisi turvautua reunalaskentaan esimerkiksi jos akku on vähissä, tai laitteella itsellään ei ole kaikea tarvittavaa tietoa laskennan suorittamiseksi.

### 3.2

- 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 johtaisiin 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 arkkitehtuuriratkaisut tukevat toisia palveluita paremmin kuin toiset, kompromisseilta on siis vaikea välttyä.

## 4 Suurimmat osatoimijat

### 4.1 eNodeB

eNodeB on televerkossa tukiasemakontekstin kokonaisuus. Sen tehtäviin kuuluu teleradiotoiminnan järjestäminen. Mukaan lukien puhelinkeskuksien kanssa kommunikointi.

### 4.2 Asiakaslaite

UE (User Equipment) on yleisnimitys asiakaslaitteelle, joka hyödyntää pilven (cloud) ja reunan (edge) palveluita tietoliikenneyhteyksien avulla. Usein käyttäjälaitteen esimerkkinä toimii jokin mobiililaitte kuten puhelin, mutta myös esimerkiksi auto.

### 4.3 Edge cloud

Edge cloud on yleisnimitys reunapalveluiden tarjoamiseen tarkoitettuille toimijoille. Riippuen arkkitehtuurista reunapilvi koostuu yksittäisistä toimijoista tai reunaa lähellä olevista klustereista. Edgen on mahdollista tarjota palveluita pienemmillä viiveillä ja suuremmilla tiedonsiirtokapasiteeteilla verrattuna perinteisiin pilvipalveluihin.

### 4.4 Cloud

### 4.5 Reunasolmu

Tässä tutkielmassa reunasolmulla viitataan yksittäiseen reunalla sijaitsevaan palvelinklusteriin, joka tuottaa asiakkaille reunapalveluita. Edge Cloud koostuu reunasolmujen joukosta.

Asiakaskohtaiselle reunainstanssille ei ole mitään vakiintunutta nimeä. Cloudlet on yksi ehdotettu toteutustekniikka tällaiselle asiakaskohtaiselle reunalla sijaitsevalle virtuaali-instanssille [Satyanarayanan et al., 2009].

### 4.6 SDN ja NFV

SDN ja NFV ovat keskeisiä toimijoita reunalaskennan toteuttamisessa.

## 5 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 pienemisen seurauksena monet reaaliaikaisuutta 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.

## 5.1 Etälaskenta

Etälaskennan toteuttamiseksi tarvitaan vastaukset seuraaviin kysymyksiin. Mitä siirretään ja minne siirretään?

MOCAssa oli selitetty kuinka muodostetaan yhteys in-network cloudiin.

Etälaskenta voidaan karkeasti jakaa kahteen tyyppiin: Binääriseen ja osittaiseen [Mao et al., 2017]. *Onkohan ok lainata surveytä?* Binäärisessä ohjelmasta suoritetaan selkeitä kokonaisuuksia joko reunasolmulla tai asiakaslaitteella. Osittaisessa etälaskennassa suoritusta siirretään dynaamisesti reunasolmulle.

Offloading on varmaan samankaltainen termi. Reunalla suoritettava etälaskenta saattaa siirtää ohjelman suorituksen kokonaan tai osittain asiakaslaitteelta reunasolmulle. Laskennan tulos lähetetään takaisin asiakaslaitteelle ja sitä käytetään osana muuta laskentaa. Laskennan hallinta suoritetaan asiakaslaitteella. Etälaskentaa motivoi raskaiden operaatioiden siirtäminen asiakaslaitteelta reunalle. Erityisesti mobiililaitteilla akkuvirran säästäminen on keskinen tekijä. Etälaskennan kannattavuus puhtaasti akkuvirran näkökulmasta muuttuu kannattavaksi, kun suoritettavan ohjelman lähettäminen ja tuloksen vastaanottaminen kuluttavat vähemmän akkua kuin ohjelman suorittaminen paikallisesti asiakaslaitteella. Todellisuudessa pelkästään akkuvirran säästäminen ei riitä, sillä muuten laskentaa voitaisiin siirtää pilveen. QoS kuitenkin heikkenee, mikäli laskennan suorittamiseen kuluva aika pitenee huomattavasti. Reunalle on teoriassa nopeampi yhteys ja nopeampi vastaus. Voituaisiin siis laskea että suoritusajassa mitaten ohjelman siirtäminen reunalle on kannattavaa kun suoritettavan ohjelman lähettäminen palvelimelle, sen suorittaminen ja tuloksen vastaanottaminen kestävät vähemmän aikaa kuin ohjelman suorittaminen paikallisesti. Ongelmana on että suorituksien aikavaatimus ei ole eksakti vaan ainoastaan arvioitavissa. Lisäksi suoritusaikainen aika-arvion tekeminen vie myös aikaa. Ajan ja akkuvirran säästämiseksi tehtävät toimet ovat siis keskeisimmät haasteet etälaskentaa toteutettaessa. Näiden käsittelyä ei tämän enempää tässä



tutkielmassa käsitellä niiden monimutkaisuuden vuoksi.

## 5.2 Etäinstanssi

Etäinstanssissa asiakaslaitteella on yhteys reunalle. Asiakaslaitteelle tulee ainoastaan näkymä palvelun tilasta omalle laitteelleen. Vastaavasti kuin ottaisi SSH tai VNC yhteyden toiselle laitteelle.

-Tarkista oliko jossain järkevää lähdettä tähän

## 5.3 Migraatio

Reunalaskennan migraatiolla tarkoitetaan asiakaslaitteeseen liittyvän tilan tai laskennan siirtämistä reunasolmulta toiselle. Handoff/-over on mobiiliverkoissa yleisesti ilmenevä tilanne jossa, mobiililaitteen yhteys siirtyy tukiasemalta toiselle. Reunalaskennassa handover tehdään reunasolmulta toiselle. Reunalaskennan toteutustavasta riippuen, saatetaan tarvita niin sanottu live migraatio. Live migraatiossa suorituksen alla oleva sovellus tai virtuaalikone siirretään suoritusalueelta toiselle. Tavallisesti live migraatiota käytetään palvelinkeskusympäristössä virtuaalikoneiden siirtämiseen suorituksen aikaiseen siirtämiseen. Live migraation tavoitteena on minimoida virtuaalikoneen käyttöön kohdistuva käyttökatkon kesto. Live migraatio toimii siten, että siirrettävää virtuaalikonetta aletaan kopioimaan kohdelaitteelle. Koska kyseessä on suoritusaikainen kopiointi, tilan kopiointi sisältää tallennustilan ja muistin kopiinnin. Mikäli palvelinkeskuksessa on jaettu levypalvelin, riittää ainoastaan muistin kopiointi. Tämä huomiona lähinnä siksi, että voidaan olettaa että reunasolmuilla ei ole jaettua levypalvelinta, jolloin joudutaan kopioimaan myös tallennustila. Kun virtuaalikoneen tila on saatu kopioitua uudelle alustalle, joudutaan kopioimaan kopiinnin aikana virtuaalikoneen tilaan tapahtuneet muutokset. Kopiointia jatketaan iteroiden, kunnes päästään tilaan, jossa muutoksien määrä kopio-iteraatiota kohden ei enää pienene. Tällöin alkuperäinen virtuaalikone pysäytetään ja viimeisten muutoksien kopiinnin aikana virtuaalikone ei ole käytettävissä. Tämän jälkeen migratoitu virtuaalikoneinstanssi on käytettävissä uudella alustalla. [Ha et al., 2015]

Reunalaskennan ja perinteisen palvelinympäristön vaatimukset live migraatiota kohtaan ovat hieman erilaiset. Päällimmäisenä erona on migraatioon käytettävän kaistan suuruus. Palvelinsaleissa yhteysnopeudet ovat suuria ja etäisyydet verrattain lyhyitä. Lisäksi palvelinsaliympäristössä migraatioita on mahdollista tehdä koordinoitusti ilman aikarajoitteita. Reunasolmujen välillä olevien yhteyksien nopeudet saattavat vaihdella suuresti. Pitkä kopiointiaika johtaa pidempään käyttökatkokseen ja täten palvelun laadun heikkenemiseen. Kopiointiajan minimoimiseksi on pyrittävä pitämään siirrettävän datan määrä mahdollisimman pienenä. Reunasolmujen migraatiotarpeeseen vaikuttaa suuresti käyttäjien liikkuminen verkossa. Voidaan

kuvitella tilanne jossa aamulla kaupungin keskustaan saapuvat työmatkailijat aiheuttavat "migraatiotulvan", joka ruuhkauttaa reunasolmujen käytössä olevat kaistat.

Virtuaalikone-aihioiden perustuvassa järjestelmässä ainoastaan virtuaalikoneeseen tehdyt muutokset siirretään [Satyanarayanan et al., 2009]. Näin säästetään migraation aikana siirrettävän datan määrä. Mikäli on tiedossa, minne käyttäjä on siirtymässä, voitaisiin migraatio tehdä suoraan kohteena olevalle reunasolmulle. Palvelun laadun takaamiseksi migraation ennakointi on tärkeää. Mitä aikaisemmin aie siirtyä toiselle reunasolmulle tiedetään sen paremmin siihen keretään valmistautumaan. Migraation kesto on riippuvainen siirrettävän datan määrästä, sekä Mikäli käyttäjä haluaa keskeyttää reunapalvelun käytön saatetaan tila tai laskenta siirtää käyttäjän laitteelle tai jättää reunalle odottamaan.

[Ha et al., 2015] Tukivat että migraatio virtuaalikone-aihoilla + muutoksien siirroilla aiheuttaa noin 1s downtimen hitaahkolla verkolla. Tavoitteena oli minimoida siirrettävän datan määrä ja tutkia handoff+ migraation aiheuttaman käyttökatkoksen pituutta. Testi tehtiin cloudleteillä.

MobiScudissa ja SMOREssa esitetään että käytetään livemigraatiota, mutta ei sen tarkemmin pureuduta ongelmaan. Todetaan vain että käytetään live migraatiota

## 5.4 Integraatio mobiiliverkkoihin

MEC ratkaisut ovat jakautuneet kahteen erilliseen ratkaisumalliin. SMOREssa ratkaisu on että SMORE nuuskii/monitoroi LTE/EPC kommunikointia ja injektoidaan väliin.

## 5.5 IP-verkko

Service discovery IP-verkossa.

## 5.6 Kommunikaatio asiakaslaitteen Reunasolmun kanssa

## 5.7 Hallinta

Sisältää palveluiden etsimisen (Service Discovery) ja palveluihin ohjauksen esim Software Defined Networkingin avulla (SDN).

# 6 Reunan rakenne

Rakenteeseen vaikuttaa ehkä eniten seuraavat kaksi valintaa

- Kerroksittain
- Lähelle vähän vai kauemmaksi enemmän

Molempiin ratkaisuihin liittyy omat haasteensa. Etenkin voidaan olettaa että lähelle hajalleen aiheuttaisi huomattavasti enemmän ylläpitotyötä.

## 7 Esitetyt ratkaisut

Reunalaskennasta löytyy valtavasti artikkeleita, joissa esitetään reunalaskentaan liittyvien haasteiden ratkaisuja. Ratkaisut ovat yksittäisi tapauksia eivätkä sinällään arkkitehtuuriratkaisuja.

### 7.1 Cloudlet

Minkä ongelman cloudlet ratkaisee? Miten cloudlet toimii? Mitkä ovat cloudletin ongelmat?

Cloudlet on reunasolmulla suoritettava virtuaalikone-teknologiaan perustuva ratkaisu. [Satyanarayanan et al., 2009] Virtuaalikoneisiin pohjautuva cloudlet on yksi tunnetuimmista reunapalveluiden tuottamisen konsepteista. Cloudletin ideana on hyödyntää muokattuja virtuaalikone-instansseja, joita voidaan suorittaa reunasolmussa. Cloudletillä tarkoitetaan järjestelmää, joka suorittaa reunasolmulla virtuaalikoneiden hallintaan liittyviä toimia. Yhdellä reunasolmulla voidaan siis suorittaa usean eri käyttäjän virtuaalikoneita.

Reunan luonteesta johtuen cloudletin oletetaan ylläpitävän ainoastaan sellaisia palveluita jotka käyttävät reunaa hetkellisesti tai väliaikaisesti [Satyanarayanan et al., 2009]. Cloudlettiä ei ole siis tarkoitettu pidempiaikaiseen tallennukseen, vaan ennemminkin suoritusajakaisten tarpeiden täyttämiseen.

Cloudletin keskeisimmäksi rakennuspalikaksi on valittu virtuaalikone. Verrattuna prosessi tai sovellus tason virtualisointiin, virtuaalikoneiden käyttö ei aseta rajoitteita palvelun toteuttamiseen käytettävään ohjelmointikieleen [Satyanarayanan et al., 2009]. Lisäksi virtuaalikoneiden käyttö cloudlettien perustana mahdollistaa helpon tavan jakaa reunasolmun resursseja ja pitää asikaskohtaiset instanssit toisistaan erillään.

Tavallisen virtuaalikone-kuvan suuruus tallennettuna on noin 8 gigatavua. Koska reunasolmujen pääasiallinen idea on tarjota suoritusympäristö palveluille, ei näin suuren tiedoston tallentaminen reunasolmulle jokaista käyttäjää kohden ole tarkoituksenmukaista. Ja kuten jo aiemmin mainittu, reunasolmujen resurssit oletetaan rajallisiksi verrattuna palvelinsaliympäristöön. Täten pidempiaikainen tiedostojen tallennus on parempi tehdä keskitettyihin ratkaisuihin. Sen lisäksi että tallentaminen reunasolmuille ei ole mahdollista, kokonaisen virtuaalikoneen siirtäminen verkon yli olisi huomattavan hidasta ja se tukkisi verkon. Siirrettävyys korostuu etenkin tilanteessa jossa siirrettäviä virtuaalikoneita olisi useita.

Cloudletin keskeisimpiä oivalluksia onkin käyttää virtuaalikoneissa yhteistä pohjaa. Yhteisen pohjan käyttäminen mahdollistaa sen että jokaisesta virtuaalikoneesta voidaan tallentaa vain pohjaan tehdyt muutokset. Muutokset sisältävää tiedostoa kutsutaan pinnoitteeksi (VM overlay). Pinnoitteen ja

pohjan yhdistämiseen käytetään dynaamista virtuaalikone synteesiä. Dynaamisuudella tarkoitetaan sitä, että käyttäjän alkaessa käyttämään cloudlet infrastruktuuri rakentaa käyttäjän muutokset sisältävästä pinnoitteesta ja virtuaalikone-pohjasta, suoritettavan virtuaalikoneen. Dynaaminen virtuaalikoneiden syntetisointi edellyttää että cloudletiltä löytyy oikeanlainen virtuaalikonepohja. Kun virtuaalikone halutaan sulkea cloudlet tallentaa virtuaalikoneeseen tehdyt muutokset pinnoitteeksi ja pakkaa tiedoston. Satyanaran ensimmäisessä cloudletteja käsittelevässä julkaisussa [Satyanarayanan et al., 2009] muutoksien tallentaminen pinnoitteeksi tuottaa noin 100-200 megatavun kokoisen tiedoston. Tämän kokoinen tiedosto on nykyisillä tiedosiirtonopeuksilla siirrettävissä inhimillisessä ajassa, jopa langattomien yhteyksien yli.

Cloudlettejä voi olla useita erilaisia, siisä cloudlet toiminta edellyttää että jokaisella reunasolmulla tulee olla oikean cloudlet-pohja saatavilla ja käyttäjien cloudlettien on pohjauduttava johonkin rajalliseen määrään erilaisia cloudlet pohjia.

\*Hallinta

RAW – Migraatio

Cloudlettien välinen migraatio ja handoff. Cloudlettien väliselle migraatiolle voi olla useita eri syitä. Migraatio tilanteessa jossa virtuaalikone siirretään paikasta toiseen odottamaan käyttöönottoa on keskeisin. Pelkän pinnoitteen siirtäminen riittää, mikäli tarvittava virtuaalikonepohja löytyy kohteena olevasta cloudletistä. On kuitenkin huomattava että pinnoiteen(VM overlay) tallettamiseen voi olla kannattavaa käyttää myös asikkaan laitetta, mikäli se vain on mahdollista. Perusteluina asiakaslaitteen käyttölle tallennusmediانا voisi olla tapaus, jossa asiakas matkustaa ulkomaille ja pinnoite tulisi siirtää hyvin kaukana sijaitsevalta palvelimelta kohteena olevalle cloudletille. Tällöin saattaisi olla nopeampaa siirtää pinnoite suoraa asiakaslaitteelta.

\*RAW – Handoff

## 7.2 FMC – Follow me cloud

### 7.3 Small Cell Cloud

Small Cell Cloud (SCC, pienisoluinen pilvi?) perusidea on reunapalveluiden integroiminen osaksi LTE-verkkoinfrastruktuuria. Reunapalveluita 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 re-

unalaskentapalvelut 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. Normaalisti LTE verkossa keskeinen hallinnasta 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 klustereiden 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 migraatiopäätöksen tekeminen on SCM tehtävä.

Koska SCC:n tapauksessa palveluiden tuottamiseen käytettäisiin matkapuhelinverkkoa, rajaisi se myös asiakaslaitteet älypuheliin 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 miettiä, 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.)

### 7.3.1 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. Paket-

tien reitittämiseksi SCeNBce joutuu päättämään, 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 kommunikaatioväylän selvittämiseksi joudutaan tekemään TEID (Tunnel endpoint IDentifier) ja DRB-ID (Data Radio Bearer ID) muunnos.

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

## 7.4 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 liittymisen verkkoon ja asikkaan liikkuminen verkossa.

SMORE monitori tarkkailee asiakaslaitteen ja LTE/EPC:n välistä liikennettä. Asiakaslaitteen liittyessä mobiiliverkkoon, asiakaslaite ja LTE/EPC:n sisäiset komponentit 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 monitori 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 monitori 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 monitori poimii reitityksen muutosta koskevan tiedon ja välittää ne SMORE kontrollerille. Tämän tiedon pohjalta SMORE kontroller voi tehdä SDN muutokset siten että vanhat reititykset voidaan poistaa ja korvata uusilla.

#### 7.4.1 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 Virtualisationin (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 hajautettuna 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 palvelin-

resursseja, 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 hoidetaan SDN reititysmuutoksilla. Kun PVM:n livemigraatio on saatu suoritettua alkuperäisen sijainnin MC ilmoittaa tästä kohdesijainnin MC:lle, joka puolestaan päivittää SDN reititykset 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.

## **7.5 Concert**

## **7.6 ETSI MEC**

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

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

### **7.6.1 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, 2016b].

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



(application lifecycle), reunapalvelun sovellusympäristöstä (application environment) 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 sulkemisesta. 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, 2016b]. Mobiiliverkkojen ollessa kyseessä, asiakaslaitteiden liikkuminen tukiasemalta toiselle, on keskeinen käyttötapa. 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, 2016b] 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).

## 7.6.2 Viitekehys ja referenssiarkkitehtuuri

ETSI on esittänyt MEC viitekehysten ja MEC referenssiarkkitehtuurin [ETSI, 2016a]. Viitekehyksessä (Lisää kuva) on esitetty ohjelmatasen toimijat. Viitekehysten mukaan reunalaskennan toimijat voidaan jakaa kolmeen toimialueeseen: system, host ja network (olisko sovellus, isäntä ja verkko?).

Referenssiarkkitehtuurissa on esitetty funktionaaliset entiteetit. Funktioonaalisten 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) tarkoitetaan 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.

## 7.7 Yhteenveto

### Lähteet

- [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, 2016a] ETSI (2016a). 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](http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC/001_099/003/01.01.01_60/gs_MEC003v010101p.pdf). [Verkkoaineisto, Luettu 2018-02-23].
- [ETSI, 2016b] ETSI (2016b). Mobile edge computing (mec); technical requirements. [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/MEC/001\\_099/002/01.01.01\\_60/gs\\_MEC002v010101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC/001_099/002/01.01.01_60/gs_MEC002v010101p.pdf). [Verkkoaineisto, Luettu 2018-02-23].
- [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*.
- [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 Calvanese, 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.
- [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.

- [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.
- [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.
- [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.
- [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.