

**Mauno Pasanen**

# **Sumulaskennan hyödyntäminen esineiden internetissä**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

14. joulukuuta 2021

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

**Tekijä:** Mauno Pasanen

**Yhteystiedot:** mjpasane@jyu.fi

**Ohjaaja:** Timo Tiihonen

**Työn nimi:** Sumulaskennan hyödyntäminen esineiden internetissä

**Title in English:** Use of Fog Computing in the Internet of Things

**Työ:** Kandidaatintutkielma

**Opintosuunta:** Teknis-matemaattisen mallintamisen ja päätösanalytiikan opintosuunta

**Sivumäärä:** 45+0

**Tiivistelmä:**

Esineiden internet on muuttamassa tapaa, jolla ihmiset toimivat ja kommunikoivat fyysisessä ympäristössä olevien älykkäiden laitteiden kanssa. Laitteiden määrän ennustetaan kasvavan nopeammin kuin Internetin käyttäjien, ja käytön laajentuvan yhä enemmän alueille, joissa vaaditaan suurien tietomassojen reaaliaikaista käsittelyä. Perinteinen datakeskusvetoinen keskitetty pilvilaskenta törmää tällöin haasteisiin, joita ratkomaan on syntynyt pilvilaskennan osa-alue, josta käytetään kattokäsitettä reunalaskenta. Se tuo tiedon käsittelyn joko laitteeseen tai laitteen lähelle. Reunalaskennan synonyyminä käytetään monissa yhteyksissä sumulaskentaa. Sumulaskenta yrittää asettaa esineiden internetin laitteiden ja pilven väliin hyödyntämällä molempien tärkeimmät edut.

Tutkielmassa toteutetaan kirjallisuuskatsaus, jossa eritellään esineiden internetin vaatimukset, niiden aiheuttamat haasteet keskitetylle laskennalle, ja sumulaskennan tarjoamat mahdollisuudet ratkaista näitä ongelmia. Katsauksessa tunnistetaan sumulaskennan erityispiirteet ja edut, jotka tukevat sekä esineiden internetiä että pilvilaskentaa. Niiden myötä todetaan, että sumu- ja pilvilaskennan yhdistelmää hyödynnetään erityisesti kaupallisissa ja teollisissa sovelluksissa, jotka edellyttävät sekä sumulaskennan paikallisuutta (esimerkiksi ympäristötietoisuutta ja reaaliaikaista toimintaa) että pilven globaalia laskentakykyä (esimerkiksi massadatan ja analytiikan osalta).

**Avainsanat:** esineiden internet, IoT, sumulaskenta, reunalaskenta, pilvilaskenta

**Abstract:**

The Internet of Things is changing the way people operate and communicate with smart devices in a physical environment. The number of devices is projected to grow faster than Internet users, and the use will expand to areas where real-time processing of large amounts of data is required. Traditional datacenter-driven centralized cloud computing encounters then requirements and challenges that it cannot meet. Umbrella concept of edge computing, a subset of cloud computing, has emerged to serve these challenges. It brings data processing either to or near the device. In many contexts, fog computing is used as a synonym for edge computing. Fog computing attempts to settle between the Internet of Things devices and the cloud, taking advantage of the main benefits of both.

This thesis reviews the literature that specifies the requirements of the Internet of Things, the challenges they cause to centralized computing, and the possibilities offered by fog computing to solve these problems. The review identifies the fog computing special features and advantages, which support both the Internet of Things and cloud computing. Based on those, it is stated that the combination of fog and cloud computing is beneficial especially in commercial and industrial applications, that require both the localization of fog computing (e.g., environmental awareness and real-time operation) and the global computing capability of the cloud (e.g., for mass data and analytics).

**Keywords:** Internet of Things, IoT, fog computing, edge computing, cloud computing

## **Esipuhe**

Palasin yliopiston kirjoille melkein 30 vuoden työuran jälkeen – lähdin gradua vaille valmiina maisterina ja palasin ”hieman” kokeneempaan tekemään kandidaatin tutkielmaa. Työelämässä olen nähnyt haasteita esineiden internetin sovittamisessa yhteen pilvi- ja reunapalvelujen kanssa. Tutkielman aiheeksi valikoitui siis ammatillisesta ja henkilökohtaisesta kiinnostuksesta kumpuava esineiden internetin ja reunaratkaisuihin valitun sumupalvelun yhdistelmä.

Kiitän tässä yhteydessä ohjaajaani Timoa hyvästä sparrauksesta, työnantajia ja työkavereita hienoista opeista ja kokemuksista, sekä perhettä kestämisestä, tukemisesta ja kannustuksesta.

Kangasalla 14. joulukuuta 2021

Manu

## **Kuviot**

Kuvio 1. Sumulaskenta ja muut käsitteet vertailussa (Yousefpour ym. (2019) mukaellen).	18
Kuvio 2. Sumulaskennan ja pilven rooli esineiden internetin palvelussa (Kassab ja Darabkh (2020) ja Yousefpour ym. (2019) mukaellen). .....	20
Kuvio 3. Sumulaskennan hierarkkinen rakenne (Puliafito ym. (2019) mukaellen). .....	22
Kuvio 4. Sumulaskennan arkkitehtuurin komponentit (Naha ym. (2018) mukaellen). .....	26
Kuvio 5. Sumulaskennan edut (Yousefpour ym. (2019) mukaellen). .....	31

## **Taulukot**

Taulukko 1. Sumun ja pilven tekniset erot (Naha ym. (2018) mukaellen). .....	24
--	----

# Sisällys

1	JOHDANTO .....	1
2	ESINEIDEN INTERNET .....	3
2.1	Esineiden internetin synty ja määritelmä .....	3
2.2	Esineiden internetin tyypillisiä sovellusalueita ja vaatimuksia laskennalle ....	4
2.2.1	Sovellusalueet .....	5
2.2.2	Esineiden internetin vaatimuksia laskennalle .....	8
3	PILVI- JA REUNALASKENTA .....	10
3.1	Pilvilaskenta .....	10
3.2	Reunalaskenta kehittyi esineiden internetin tarpeisiin .....	13
3.3	Reunalaskenta yleiskäsitteenä .....	13
3.4	Reunalaskennan termistöä .....	15
4	SUMULASKENTA .....	19
4.1	Sumulaskenta käsitteenä .....	19
4.2	Sumulaskennan arkkitehtuuri ja teknologia .....	22
4.3	Sumulaskennan tarjoamat edut pilvilaskentaan .....	27
5	YHTEENVETO .....	32
	LÄHTEET .....	35

# 1 Johdanto

Viimeisten vuosien aikana olemme nähneet valtavan muutoksen muun muassa ihmisten tavassa kommunikoida, tehdä työtä ja ylläpitää sosiaalisia suhteita. Taustalla on kaksi avainteknologiaa: älypuhelimet ja pilvilaskenta. Älypuhelinien nousu suosituimmaksi tavaksi käyttää internetiä on pitkälti pohjautunut pilvipalveluihin, jotka ovat vähentäneet laskentatehon ja tallennuskapasiteetin tarvetta itse laitteissa. Samanaikaisesti olemme todistaneet esineiden internetin nousua. Esineiden internet on viime vuosina kasvanut merkittävästi teknologian ja verkkopalvelujen kehittymisen myötä. Vuotuisessa Internet-raportissaan Cisco (2020) ennustaa laitteiden määrän kasvavan nopeammin (10% vuotuinen kasvu) kuin maapallon väestön (1%) tai internetin käyttäjien (6%). Saman ennusteen mukaan verkottuneita laitteita tulee olemaan yli 29 miljardia vuoteen 2023 mennessä. Teknologiavisiossaan Huawei (2018, p.6) ennustaa vuonna 2025 maailmassa olevan 40 miljardia älylaitetta, joiden välillä olisi 100 miljardia yhteyttä. Yhteys-, sovellus- ja käsiteltävän tietomäärän jatkaessa kiihtyvää kasvua on esineiden internetin ekosysteemi jatkuvassa muutoksessa.

Kasvaneista kyvykkyyksistä huolimatta perinteinen datakeskusvetoinen pilvilaskenta törmää haasteisiin, esimerkiksi kun siirrettävänä on suuria tietomassoja miljardeista laitteista, tai on käsiteltävä tietoa ilman merkittävää viivettä. Näitä ja muita haasteita palvelemaan on syntynyt pilvilaskennan osa-alue reunalaskenta, joka käsitteenä tuo tiedon käsittelyn laitteeseen tai laitteen lähelle. Reunalaskennan markkinan arvioitiin kasvavan vuotuisesti yli 29% noin 11 miljardiin dollariin vuoteen 2026 mennessä (ReportLinker 2021).

Reunalaskenta on kattokäsite, jonka synonyyminä käytetään usein sumulaskentaa. Termit poikkeavat toisistaan, vaikka sisältävätkin määritelmässään reunan yleiskäsitteen. Sumulaskenta on Naha ym. (2018) mukaan pohjimmiltaan tarkoitettu tukemaan esineiden internetintekniikoita prosessoinnin suorittamiseksi reunatasolla. Sumulaskenta yrittää asettua esineiden internetin laitteiden ja pilven väliin hyödyntämällä molempien tärkeimmät edut, ja on suunniteltu käsittelemään sovelluksia ja palveluita, jotka eivät sovi hyvin pilven paradigmaan (Bellavista ym. 2019).

Tutkielman tavoitteena on löytää ja koota yhteen esineiden internetin ongelmakentät keski-

tetyssä pilvilaskennassa, käsitellä mahdollisuuksia ja parannuksia, joita erityisesti esineiden internetin käyttöön suunniteltu sumulaskenta tarjoaa, ja tarkastella pilvi- ja sumulaskennan yhteistoimintaa esineiden internetin ekosysteemissä.

Tutkielman pääkysymykseksi muotoituin

- **Miten sumulaskenta täydentää pilvilaskentaa esineiden internetissä.**

Tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena perustuen pääasiassa tieteellisissä julkaisuissa julkaistuihin artikkeleihin ja standardeihin. Keräämisessä on hyödynnetty pääasiallisena hakukoneena Google Scholar -hakukonetta ja verkossa sijaitsevia sähköisiä tietokantoja ja kirjastoja, kuten JYKDOC, IEEE Xplore Digital Library ja AIS Electronic Library. Lähdeaineiston hakusanoina on käytetty seuraavia: cloud computing, edge computing, reunalaskenta, fog computing, sumulaskenta, sekä näiden yhdistelmiä seuraavien hakusanojen kanssa: IoT, benefits, review, survey, opportunities, suitability ja possibilities. Lähdeaineisto on pyritty rajaamaan laadukkaisiin ja luotettaviin tietojenkäsittelyn julkaisuihin viimeisten 5-7 vuoden ajalta ottaen huomioon lähteen viittausten määrän. Lisäksi taustoittamiseen on käytetty erilaisia markkinatutkimuksia ja yritysten tutkimuspapereita.

Tutkielma koostuu johdannosta, kolmesta sisältöluvusta ja yhteenvedosta. Luvussa 2 käsitellään esineiden internet esittelemällä sen määritelmiä, tyypillisimpiä sovelluksia ja niiden tuottamia haasteita tiedon käsittelylle. Luvussa 3 läpikäydään pilvi- ja reunalaskennan perusta, reunalaskennan kehitys esineiden internetin tarpeisiin ja reunalaskenta yleiskäsitteenä. Luku paneutuu myös reunalaskennassa käytettävään termistöön, ja toteaa reunalaskennan synonyyminäkin käytetyn sumulaskennan olevan vain yksi monista. Sumulaskenta läpikäydään luvussa 4 esitellen sen käsite, ominaispiirteet arkkitehtuurin ja teknologian avulla, sekä tiivistetään sumulaskennan keskeisimmät piirteet ja edut perinteiseen pilvilaskentaan verrattuna. Yhteenvedossa tiivistetään tutkimuskysymykseen löydetty vastaukset, ja pohditaan mahdollisia jatkotutkimusaiheita.



## 2 Esineiden internet

Kaikkialla läsnä oleva verkko (Internet) koskettaa nykyisin elämää ympäri maailman, ja verkon palvelujen kehityksestä puhuttaessa yhdeksi keskeiseksi käsitteeksi on noussut esineiden internet (Internet of Things, IoT). Esineiden internetille on olemassa monenlaisia määritelmiä, eikä yksiselitteistä määritelmää tutkijoiden keskuudessa tunnu löytyvän. Luvussa läpikäydään lyhyesti esineiden internetin synty ja sen määritelmiä, ja tarkastellaan kirjallisuudesta löytyviä sovellusalueita, sovelluksia ja niiden aiheuttamia vaatimuksia laskennalle. Tutkielman kannalta esineiden internetin määrittely ja käyttökohteiden ymmärtäminen on olennaista vertailtaessa sumulaskentaa perinteisempään keskitettyyn pilvilaskentaan.

### 2.1 Esineiden internetin synty ja määritelmä

Konseptina esineiden internet juontaa juurensa vuoteen 1982, jolloin Carnegie Mellonin yliopistossa tarkistettiin ensimmäisen kerran Internetin yli ovatko kokisautomaatin juomat kylmiä. Itse termiä esineiden internet ehdotti MIT:n Kevin Ashton vuonna 1999 kutsuen esineiden internetiä ”yksilöllisesti tunnistettaviksi yhteentoimiviksi yhdistetyiksi kohteiksi, joissa on radiotaajuustunnistus (RFID) tekniikkaa”. (Shancang, Li ja Shanshan (2015).)

Esineiden internetin peruskäsitteet eivät ole uusia. Radiotaajuustunnistus- ja sensoriverkkojen kaltaisia tekniikoita on jo vuosia käytetty teollisuus- ja valmistusympäristöissä esimerkiksi tuotteiden seurantaan. Ajatus suorasta koneiden välisestä kommunikoinnista ei myöskään ole uusi, vaan Internetin perusidea, jossa asiakkaat, palvelimet ja reitittimet kommunikoivat keskenään.

Esineiden internet edustaa näiden olemassa olevien tekniikoiden käytön kehitystä laitteiden lukumäärän, tyyppien ja niiden välisten verkkojen yhteistoiminnan suhteen. Suurin osa verkossa olevista laitteista on alun perin suunniteltu osaksi Internetiä, ja niissä on integroitua käsittely-, tallennus- ja verkkotoimintoja. Näitä laitteita ovat esimerkiksi palvelimet, pöytätietokoneet, kannettavat tietokoneet, tabletit ja älypuhelimet. Esineiden internetillä tarkoitetaan vastaavan tekniikan liittämistä jokapäiväisiin laitteisiin, kuten audio-/videovastaanottimet, palohälyttimet, kodinkoneet tai kellot, ja niiden liittämistä verkkoon, vaikka niitä ei

alun perin suunniteltu näitä ominaisuuksia ajatellen. Toinen merkittävä esineiden internetin lupaama kehitysmuutos on näitä laitteita sisältävien verkkojen yhdistäminen, jolloin jokainen laite on suoraan tavoitettavissa Internetin kautta. (Whitmore, Anurag ja Xu (2015).)

Esineiden internetille löytyy monenlaisia määritelmiä, ja yksiselitteisen määritelmän löytäminen sille on vaikeaa. Uusi, 2021 julkaistu Goumagias ym. (2021) tutkimus keräsikin lumipallonäytteenoton avulla 164 vuosina 2005–2019 julkaistua esineiden internetiä käsittelevää artikkelia. Analyysin tuloksena oli 100 erilaista esineiden internetin määritelmää, jotka vaihtelivat hyvinkin käytännöllisistä "laitteiden verkostosta", erittäin abstrakteihin, kuten "visio alastomasta maailmasta".

Esineiden internetin pohjimmaisena ajatuksena voitaneen kuitenkin pitää pyrkimystä yhdistää fyysisiä ja digitaalisia komponentteja – reaali- ja virtuaalimaailmaa – jotta uusia tuotteita ja liiketoimintamalleja saataisiin luotua (Wortmann ja Flüchter 2015). Televiestinnän standardointisektorin ehdotus määrittelee asian näin: ”Tietoyhteiskunnan maailmanlaajuinen infrastruktuuri, joka mahdollistaa kehittyneet palvelut yhdistämällä (fyysiset ja virtuaaliset) asiat olemassa olevien ja kehittyvien asioiden perusteella, käyttäen yhteentoimivia tieto- ja viestintäteknikoita” (ITU-T (2012), suomennos kirjoittajan).

Goumagias ym. (2021, sivu 15) tekemää määritysten yhteenvetoa mukaellen tämän tutkielman kannalta esineiden internetiä pidetään ekosysteeminä, joka muodostuu objekteihin tai kohteisiin liitetystä verkkolaitteista, jotka voivat kerätä tietoja esineiden tai kohteiden sisäisistä ja ulkoisista muuttujista, analysoida niitä, lähettää niitä, ja toimia tietojen analysoinnin perusteella vuorovaikutuksessa, ottaen huomioon olemassa olevat rajoitukset, toteuttaakseen ennalta määrättyjä arvoja luovia tavoitteita.

## **2.2 Esineiden internetin tyypillisiä sovellusalueita ja vaatimuksia laskennalle**

Esineiden internet pyrkii yhdistämään fyysisiä ja digitaalisia komponentteja uusien tuotteiden ja liiketoimintamallien luomiseksi. Alaluku käsittelee esineiden internetin tyypillisiä sovellusalueita, niiden käytännön sovelluksia, ja niiden aiheuttamia vaatimuksia laitteista tulevan tiedon käsittelylle.

## 2.2.1 Sovellusalueet

Esineiden internetin määritelmän perusteella vain mielikuvitus, ja mahdollisesti resurssien rajallisuus, rajoittaa esineiden internetin käyttöä uusien tuotteiden, palveluiden tai liiketoiminnan luomiseksi. Kenties tästä johtuen kirjallisuudesta ei myöskään löydy vain yhtä pääsovellusalueiden luetteloa, vaan tutkimuksen painotuksesta riippuen lista vaihtelee huomattavasti. Yhteisiä alueita kuitenkin löytyy. Shancang, Li ja Shanshan (2015) tutkimuksen mukaan pääsovellusalueita ovat muun muassa älykäs infrastruktuuri, terveydenhuolto, toimitusketjut/logistiikka ja sosiaaliset sovellukset. Giri ym. (2017) nimeävät listauksessaan alueiksi muun muassa terveydenhuollon, kuljetuksen, ympäristön seurannan, henkilökohtaiset ja sosiaaliset sovellukset, älykkään kaupungin ja teollisen valvonnan. Atzori, Iera ja Morabito (2010) puolestaan ryhmittelevät sovellukset neljään alaan: kuljetus- ja logistiikka, terveydenhuolto, älykäs ympäristö (koti, toimisto, tehdas) ja henkilökohtainen ja sosiaalinen.

Pohjautuen pääasiassa alan perusteoksen Atzori, Iera ja Morabito (2010) ryhmittelyyn seuraavaan listaan on tiivistetty yhteiseksi tulkittavia sovellusalueita, niiden sovellusesimerkkejä ja mahdollisia haasteita tiedon käsittelylle ja laskennalle:

- **Älykäs ympäristö.** Älyobjektien integroiminen fyysiseen infrastruktuuriin voi parantaa joustavuutta, luotettavuutta ja tehokkuutta infrastruktuurin käytössä. Parannusten avulla voidaan vähentää kustannuksia ja parantaa turvallisuutta. Älykkäät verkot käyttävät esineiden internetin -tekniikkaa esimerkiksi tietojen keräämiseen energiankulutuksesta, ja asettavat tiedot saataville verkossa. Tiedot sisällytetään tyypillisesti käyttöraportteihin, jotka sisältävät suosituksia energiankulutuksen ja kustannusten vähentämiseksi. Samoja tekniikoita käytetään myös kodeissa ja toimistoissa. Talot ja rakennukset varustetaan sensoreilla ja toimilaitteilla, jotka seuraavat kulutusta, valvovat ja ohjaavat rakennusinfrastruktuuria, kuten valoja ja LVI -järjestelmiä, sekä valvovat turvatarpeita. Jääkaapit ja pesukoneet ovat nyt esineiden internetin kanssa yhteensopivia, ja niitä ohjataan Internetin kautta energian säästämiseksi. Älykäs toimintahäiriöinen jääkaappi lähettää automaattisesti viestin huoltomiehelle ilman käyttäjän väliintuloa. Laajemmassa mittakaavassa esineiden internetin tekniikoita voidaan käyttää kaupunkien toimivuuden tehostamiseksi esimerkiksi parantamalla liikenteenohjausta, seuraamalla pysäköintipaikkojen saatavuutta, mittaamalla ilmanlaatua, tai ilmoittamalla ros-

kakorien täyttymisestä. (Whitmore, Anurag ja Xu (2015).)

Laskennalle tulevia vaatimuksia voidaan arvioida esimerkiksi Kassab ja Darabkh (2020, sivu 37) tutkimuksen viittauksesta älykkään kaupungin palvelumäärittelyyn (Zanella ym. (2014)). Niiden mukaan sovellusten tarpeet vaihtelevat, esimerkiksi datan lähe- tyksessä kerran tunnissa tapahtuvasta roskakorien tarkkailusta, aina parkkeerauksen liikennetilanteen mukaiseen hyvinkin jatkuvaan. Hyväksyttävä viive vaihtelee vastaa- vasti puolen tunnin ja hälytyksille vaadittavan muutaman sekunnin välillä. Laitteiden energianlähteenä toimii yleisemmin paristo tai suora sähkö, ja myös uusiutuvia ener- gialähteitä kuten aurinkopaneeleita käytetään. Puliafito ym. (2019) mukaan mukaan älykkäät verkot vaativat jopa alle 20 millisekunnin viiveitä, ja vastaavasti älytehtail- la on tiukimmat viivevaatimukset ajan vaihdella 250 mikrosekunnin ja 10 millise- kunnin välillä. Älykäs tehdas voi tuottaa yli tuhat teratavua (eli miljoona gigatavua) päivässä, ja älykkäät mittarit Yhdysvalloissa keräävät energiankulutustietoja 53,6 pe- tataavua (eli 53,6 miljoonaa gigatavua) vuodessa.

- **Terveydenhuolto.** Esineiden internetin ehdotetaan parantavan ihmisten elämänlaatua automatisoimalla joitakin ihmisen suoritettavia perustehtäviä. Tässä mielessä valvon- ta ja päätöksenteko voidaan siirtää ihmisiltä koneille. Yksi esineiden internetin tär- keimmistä sovelluksista terveydenhuollossa ovat avustetun elämän skenaariot. Sen- sorit voidaan sijoittaa potilaiden käyttämiin terveydentilan seurantalaitteisiin. Näiden sensorien keräämät tiedot asetetaan hoidon ja sen vasteen parantamiseksi lääkäreiden, perheenjäsenten ja muiden asianosaisten saataville. Lisäksi laitteilla voidaan seurata potilaan nykyisiä lääkkeitä ja arvioida uusien lääkkeiden riskiä allergisten reaktioiden ja haittavaikutusten suhteen. (Whitmore, Anurag ja Xu (2015).) Esineiden internetiä käytetään myös elektrokardiogrammin (EKG) seurannassa reaaliaikaisen tiedon saa- miseksi (Dash ym. 2002). Reaaliaikaisen tiedon siirto ja käsittely, varsinkin tiedon suuren määrän ja mahdollisen viiveettömän reagoinnin osalta, tuottaa vaatimuksia ta- pahtuvalle tiedon käsittelylle ja laskennalle. Laitteiden kulkiessa mukana niiden ener- gialähteinä toimivat lähinnä akut tai patterit, ja energiankulutuksen on oltava mahdol- lisimman pientä. Tiedon ollessa henkilökohtaista sen yksityisyyden ja luotettavuuden suojaaminen on ensiarvoisen tärkeää.
- **Kuljetus ja logistiikka.** Radiotaajuustunnistus (RFID)- ja sensoriverkkoilla on jo va-

kiintunut rooli toimitusketjuissa. Sensoreita on käytetty pitkään tuotantolaitosten kokoonpanolinjoilla, ja radiotaajuustunnistusta käytetään usein tuotteiden seurantaan yrityksen valvomissa toimitusketjun osissa. Vaikka näiden tekniikoiden käyttö toimitusketjuissa ei ole uutta, esineiden internetin lupaama laitteiden levinneisyys ja läsnäolo kaikkialla mahdollistavat näiden tekniikoiden käytön yli organisaatio- ja maantieteellisten rajojen. Erityisesti esineiden internet voi edelleen parantaa logistiikkaa ja toimitusketjun tehokkuutta tarjoamalla nykyistä yksityiskohtaisempia ja ajan tasalla olevia tietoja. (Whitmore, Anurag ja Xu (2015).)

Autoissa on jo 360-asteen tietoa tuottavia sensoreita. Itse ajavalla autolla odotetaan olevan liikennemerkkien tunnistus, hätäjarrutus, jalankulkijoiden havaitseminen, pysäköintitutka ja paljon muuta (Giri ym. 2017). Logistiikkaketjun tiedon lähetysten välit ja viiveet voivat olla hyvinkin suuria (esimerkiksi paikkatieto kerran tunnissa), kun taas itseajavien autojen tutka- tai videokuvan käsittelyn tulee olla reaaliaikaista tietomäärän ollessa suurta. Puliafito ym. (2019) mukaan liikenneturvallisuus ja itsenäiset ajopalvelut edellyttävät viiveitä jotka ovat alle 50 millisekuntia, itse ajavan auton tuottaessa tietoa jopa yhden gigatavun sekunnissa.

- **Sosiaaliset ja henkilökohtaiset sovellukset.** Esineiden internet mahdollistaa useita toimintoja, jotka voivat edistää sosiaalista vuorovaikutusta ja tukea käyttäjiä. Yksi mahdollinen sovellus sosiaalisessa yhteydessä on laitteiden vuorovaikutus olemassa olevien sosiaalisten verkostoitumispalvelujen, kuten Facebook tai Twitter, kanssa. Laitteet voivat käyttäjän ajan säästämiseksi jakaa tietoja henkilön toiminnasta ja sijainnista. Lisäksi sovellukset voivat esimerkiksi ilmoittaa käyttäjille kun he ovat ystävien, sosiaalisten tapahtumien tai muun heitä kiinnostavan toiminnan lähellä. (Whitmore, Anurag ja Xu (2015).) Terveysrannekkeet, kellot ja sormukset voivat välittää henkilökohtaisia terveystietoja tarvittaessa jopa reaaliaikaisesti, yleensä kuitenkin tyyppisemmin pyydettyä, tai esimerkiksi kerran tunnissa. Käsiteltävän tiedon määrä, viivevaatimukset ja henkilökohtaisen tiedon suojausvaatimukset vaihtelevat suuresti. Samalla yleensä patteri- tai akkukäyttöisten laitteiden virrankulutus pyritään pitämään mahdollisimman vähäisenä.

### 2.2.2 Esineiden internetin vaatimuksia laskennalle

Esineiden internetin yleisimmät sovellusalueet ja sovellukset eivät määritä yhtenäisiä vaatimuksia tiedon käsittelylle ja laskennalle. Vaatimukset vaihtelevat perinteisten, harvoin dataa keräävien ja lähettävien tarvitsemasta jälkikäteisestä analyysistä aina käytännössä reaaliaikaiseen suuren tietomäärän keräämiseen, käsittelyyn ja reagointiin saakka. Kortoci (2020) väitöskirjan mukaan monien sovellusten arkkitehtuuri perustuu keskitettyyn pilvipalvelussa tehtävään laskentaan. Alaluvussa käsitelläänkin keskitettyä laskentaa synonyyminä pilvilaskennalle, ja tarkastellaan esineiden internetin tuottamia vaatimuksia ja niiden mukanaan tuomia haasteita tässä yleisimmässä ympäristössä.

Arkkitehtuurin perustuessa pilvipalvelussa tehtävään laskentaan sensoritiedot kerätään ja käsitellään keskitetyissä laskentakeskuksissa. Pilvi tarjoaa suurten tietojen tallennukseen ja käsittelyyn skaalautuvan infrastruktuurin ja tehokkaat käsittelyominaisuudet, vaikka siitä aiheutuu suuri viive. (Kortoci (2020).) Useiden hyppyjen verkko aiheuttaa jonotus- ja reititysviiveitä, ja pilvipalvelut eivät välttämättä aina ole sopivia käsittelemään sovelluksia, jotka vaativat vastauksia muutaman kymmenen millisekunnin kuluessa (Heck ym. 2018). Esimerkkinä aiheutuvasta viiveestä on 66 millisekunnin keskimääräinen menopaluuviive Yhdysvaltain Virginiassa sijaitsevan Amazonin pilvipalvelimen ja Yhdysvaltain Tyynenmeren rannikolla olevan laitteen välillä. Vastaavasti viive on 125 ms päätelaitteen ollessa Italiassa, ja se nousee 302 ms laitteen ollessa Pekingissä. (Puliafito ym. (2019).)

Kassab ja Darabkh (2020) mukaan esineiden internet yhdistää miljoonia älykkäitä objekteja, mikä johtaa suurempaan dataliikenteeseen, ja suurten tietovarastojen ja suuren tietojenkäsittelykapasiteetin tarpeeseen. Laitteiden tuottaman datamäärän edessä jopa suuret pilvipalvelimet voivat saavuttaa rajansa eivätkä tule skaalautumaan. Kun otetaan huomioon yhdistettyjen laitteiden lisääntyvä määrä niin verkkoinfrastruktuurit saattavat kärsiä tarvittavan kaistanleveyden tarpeesta (Heck ym. (2018)).

Pilvipalvelimet tarjoavat 99,9% käytettävyyden, mutta niihin pääsee vain ydinverkon kautta, ja ne ovat siis alttiina yhteyksien ongelmille (Heck ym. 2018). Tästä esimerkkinä on miljardien ihmisten ja palveluiden toimintaan vaikuttaneen Facebookin hallitsemien palveluiden useiden tuntien yhteysongelma lokakuussa 2021. Sen aiheuttajana ei ollut edes kyberhyök-

käys, vaan ylläpitäjien pieni virhe aiheutti suuret maailmanlaajuiset haittavaikutukset liiketoiminnalle ja yksityisille ihmisille.

Heck ym. (2018) ja Sarkar, Chatterjee ja Misra (2018) listaavat ongelmaksi laskentakeskusten ja päätelaitteiden energiankulutuksen. Tietojen siirto useiden hyppyjen yli etäpilvipalvelimille on kallista energiankulutuksen kannalta, ja pilvipalvelukeskukset kuluttavat valtavia määriä energiaa. Esimerkkinä voidaan mainita Hintemann (2020) raportin arvio vuoden 2018 globaalista palvelinkeskusten energiankulutuksesta: se oli noin 400 miljardia kWh tarkoittaen konesalien kuluttavan 1-2% maailmanlaajuisesta sähkönsyönnästä (Mytton 2021). Laskentaintensiivisten tehtävien siirto pois päätelaitteelta säästää sen resurssia, mutta langaton siirto myös kuluttaa energiaa vaikuttaen saavutettavaan toiminta-aikaan (Heck ym. 2018).

Turvallisuus ja yksityisyys nostetaan esiin (Yousefpour ym. 2019; Garrett ym. 2017; Giri ym. 2017) tutkimuksissa. Pilvipalvelukeskusten on kyettävä käsittelemään suurten arkaluontoisten tietomassojen (kuten terveys) suoratoistoa ja digitointia. Vaikka pilvipalvelukeskuksille tarkoitetuissa rakennuksissa ja tiedonsiirtoprotokollissa on asianmukaiset suojaukset, ovat ne silti alttiina keskitetyille tietoturvahyökkäyksille.

Yhteenvedona voidaan todeta, että tutkimuksissa keskitetyn laskennan ja esineiden internetin toiminnalle keskeisiä toiminnallisia vaatimuksia ovat:

- koettu palvelun laatu – viiveet,
- yksityisyys ja turvallisuus,
- palvelukeskusten ja laitteiden energiankulutus,
- saavutettavuus ja
- skaalautuvuus

Millä konsepteilla näihin voidaan vastata?

## 3 Pilvi- ja reunalaskenta

Keskitetty laskenta ei yksin riitä vastaamaan esineiden internetin tarpeisiin. Ongelmakohtiin on kehitetty erilaisia toimintamalleja, kuten pilvi-, reuna- ja sumulaskenta. Ne sijoittuvat esineiden internetin toimintakentän eri osiin, ja ovat erikoistuneet kohdennettuihin käyttötappauksiinsa.

### 3.1 Pilvilaskenta

Historiallisesti pilvilaskennan, tai monesti sen synonyyminä käytetyn pilvipalvelun, käsite ei ole uusi. John McCarthy vuonna 1961 oli ensimmäinen joka ehdotti julkisesti, että tietokoneen laskentatehoa ja jopa tiettyjä sovelluksia voitaisiin myydä kuin vettä tai sähköä. Sen aikaiset laitteistot, ohjelmistot ja tietoliikenneteknologiat eivät olleet vielä valmiita tähän haasteeseen. Määritellessään ensimmäisenä pilvilaskennan Chellappa (1997) kutsui sitä laskennalliseksi paradigmaksi, jossa tietojenkäsittelyn rajat määräytyvät teknisten rajojen sijasta taloudellisten syiden perusteella. Valtavirtaan käsite nousi vuonna 2007 kun sitä esiteltiin hakukoneiden strategiakonferenssissa, Amazonin käyttäessä termiä oman elastisen pilvilaskennan (Elastic Cloud Computing, EC2) yhteydessä, ja IBM:n ja Googlen julkistaessa käsitteen tutkimusaloitteita. (Neto (2011).)

Yhdysvaltain standardoimisinstituutin NISTin (National Institute of Standards and Technology) määritelmä vuodelta 2011 on ehkä eniten referoitu: ”*Pilvipalvelut ovat malli, joka mahdollistaa kaikkialla läsnä olevan, kätevän ja tilattavan pääsyn verkon jaettuun konfiguroitavien tietojenkäsittelyresurssien joukkoon (esimerkiksi verkot, palvelimet, tallennustila, sovellukset ja palvelut), jotka voidaan nopeasti hankkia ja käyttöönottaa minimaalisella hallintotyöllä tai palveluntarjoajan vuorovaikutuksella.*” (Mell, Grance ym. (2011), suomennos kirjoittajan).

Mahmood (2018) esittää kirjassaan pilvilaskennan olevan Internetissä sijaitsevien etäpalvelimien käyttöä tietojen tallentamiseen, hallintaan ja käsittelyyn, paikallisen palvelimen tai henkilökohtaisen tietokoneen sijaan. Se on yleensä laskentatehon keskittymä joka lupaa seuraavat edut:



- Kustannussäästö pääoman käytössä – organisaatiot voivat vuokrata tai joustavasti ottaa käyttöön pilvipohjaisia resursseja, kuten virtualisoituja laitteistoja, ohjelmistoja, tallennustilaa tai muita verkkopalveluja pilvipalvelujen tarjoajilta.
- Kustannussäästö IT-palvelujen kehittämisessä ja ylläpidossa – palvelut (ohjelmistot, laitteistot, verkot, tallennus jne.) ovat jo olemassa ja saatavilla pilviympäristössä.
- Avainhenkilöstö voi keskittyä enemmän tuotantoon ja innovointiin – ylläpito ja palvelujen käyttöönotot ovat palveluntarjoajien vastuulla.
- Liiketoiminnan ketteryys lisääntyy ja yritykset voivat vastata nopeasti markkinoiden muuttuviin tarpeisiin – uusin teknologia voidaan helposti hankkia pilvipalveluntarjoajilta perustuen vain oikeasti tarvittavaan ja käytettyyn resurssiin (maksu-käytön-mukaan konsepti).

Sekä NIST (Mell, Grance ym. 2011) että Mahmood (2018) listaavat pilvipalveluiden perusominaisuudet seuraavasti:

- Tarpeen-mukaan-itsepalvelu: antaa käyttäjille mahdollisuuden käyttää tietokoneominaisuuksia (esimerkiksi sovellukset, palvelimen aika ja verkkotallennus) tarpeen mukaan, ilman tarvetta ihmisten vuorovaikutukseen jokaisen palveluntarjoajan kanssa.
- Resurssien yhdistäminen: mahdollistaa tietojenkäsittelyresurssien (esimerkiksi laitteisto-, ohjelmisto-, käsittely- ja verkon kaistanleveys) käytön palvelemaan useita kuluttajia vuokramallilla, jossa erilaisia fyysisiä ja virtuaalisia resursseja määritellään yhä uudelleen kuluttajien kysynnän mukaan.
- Nopea joustavuus ja skaalautuvuus: Ominaisuudet voidaan joissain tapauksissa joustavasti järjestää ja vapauttaa automaattisesti, skaalautumaan nopeasti ylös ja alas suhteessa kysyntään. Kuluttajille käytettävissä olevat mahdollisuudet näyttävät usein rajoittamattomilta.
- Mitattu palvelu: pilvijärjestelmät ohjaavat ja optimoivat resurssien käyttöä automaattisesti hyödyntämällä mittausmahdollisuuksia resurssien käytön seurantaan, valvomiin ja raportointiin. Mitattu palvelu tarjoaa samalla läpinäkyvyyttä laskutukseen.

Kirjassaan Mahmood (2018) mainitsee kyvykkyyden laajentaa omia paikan päällä olemassa olevia laitteisto- tai sovellusresursseja pilveen, mikä vähentää resurssien lisäämisen kustan-

nuksia. NISTin määritelmässä (Mell, Grance ym. (2011)) puolestaan nimetään ominaisuuslistaan palvelujen saatavuus standardimenetelmillä verkon yli, mikä mahdollistaa palvelujen käytön erilaisilla alustoilla kuten matkapuhelimet, tabletit, kannettavat tietokoneet ja työasemat.

Pilvipalvelut (kuten ohjelmistot, laitteistot, verkko, palvelimet, virtualisointi ja turvallisuus) tarjotaan yleensä useampana variaationa, jotka luokitellaan useimmiten kolmeen tyyppiin: ohjelmistopalvelut, alustapalvelut ja infrastruktuuripalvelut. Näitä kutsutaan yleensä lyhenneillä sanoista Software-as-a-Service (SaaS), Platform-as-a-Service (PaaS) ja infrastruktuuri palveluna (IaaS). (Mahmood (2018).) Pilvipalvelumalleista puhuttaessa käytetään myös lyhennettä XaaS (Anything-as-a-Service), kun tarkoitetaan mitä tahansa palvelua tai niiden yhdistelmää.

Näitä palveluja tuottavat julkisessa pilvessä kaupalliset organisaatiot, esimerkiksi Amazon, Google ja Microsoft. Jokainen omalla tuotemerkillään kuten Amazon Web Services (AWS), Google Cloud Platform (GCP) ja Microsoft Azure. Palveluntuottajien palvelinkeskukset ovat suojattuja fyysisiä rakennuksia ympäri maailmaa, ja niissä on ryhmä verkotettuja tietokonepalvelimia. Palvelinkeskukset pyritään sijoittamaan ympäri maailmaa strategisiin paikkoihin, jotka parhaiten täyttävät asiakkaiden vaatimukset esimerkiksi nopeuden, tietosuojan ja saavutettavuuden suhteen. Nämä fyysiset keskukset (joita esimerkiksi Azurella on yli 200 kappaletta (Microsoft 2021)) järjestetään yleensä maantieteellisesti että käytettävyyksalueiksi, jotka yhdistetään yksityisillä ei-julkisessa Internetissä toimivilla verkoilla toisiinsa. Pyrkimyksenä tarjota korkea käytettävyys, alhainen viive, skaalautuvuus ja aina viimeisimmät parannukset pilven -infrastruktuuriin. Fyysisten palvelinkeskusten määrä ja etäisyys loppukäyttäjistä kuitenkin aiheuttaa ongelmia joita listattiin jo alaluvussa 2.2.2.

Yhteenvedona pilvipalvelun ydinkäsitteenä voidaankin pitää tietoteknisen infrastruktuurin tai datakeskusten omistamisen sijaan niiden vuokraamista kaupallisten pilvipalvelujen tuottajilta. Tällöin palvelu tarjotaan käyttäjien näkökulmasta ”kaukaisesta pilvestä”, jonka teknisiä yksityiskohtia käyttäjät eivät voi nähdä tai hallita muuten kuin juridisten sopimusten kautta. Pilvipalvelu kuvaakin siis tietoteknisten palveluiden tuottamisen, käyttämisen ja toimittamisen mallia, jossa käytetään internetin yli palveluna tarjottuja dynaamisesti skaalautuvia ja virtuaalisia resursseja.

## **3.2 Reunalaskenta kehittyi esineiden internetin tarpeisiin**

Perinteinen keskitetyn laskennan datakeskusmalli on toimiva hyvin suurelle osalle esineiden internetin sovellusalueita ja sovelluksia. Esineiden internetin sovellus- ja tietomäärän kasvu, erityisesti aikaherkkien ja sijaintitietoisten sovelluksien (kuten potilaan seuranta, reaaliaikainen valmistus, itse ajavat autot tai droniparvet) kohdalla, yhdessä pilvipalvelujen verkkoinfrastruktuurin rajoitteiden kanssa, jo yksistään pakottaa etsimään parempia ratkaisuja skaalautuvuuden, paikkatietoisuuden, saavutettavuuden sekä palvelun koetun laadun ja tarvittavan prosessointinopeuden suhteen. Lisäksi ihmisten lisääntynyt tietoisuus ja vaatimukset verkon tietoturvalle (esimerkiksi kuka saa käsitellä ja nähdä videokuvaa), asiaan liittyvä lainsäädäntö (esimerkiksi GDPR), sekä edelleen lisääntyvä ekologinen ajattelu esimerkiksi palvelukeskusten hiilijalanjäljestä ja energiankulutuksesta ovat nousseet viime aikoina yhä enemmän esille.

Vaatimukset vaikuttavat lisääntyvässä määrin palvelujen, sovellusten toimintojen ja arkkitehtuurin suunnitteluun. Reunalaskennan käsite pilveen keskitetyn laskennan tuomisesta lähemmäs itse esineiden internetin laitteita on kehittynyt vastaamaan näihin tarpeisiin.

## **3.3 Reunalaskenta yleiskäsitteenä**

Reunalaskenta on kattokäsite, joka kattaa laskentaresurssien tuonnin päätelaitteiden lähelle. Sen taustalla ovat esineiden internetin laaja käyttöönotto ja päätelaitteiden monipuolistuminen. Laitteita on täydennettävä laskennallisesti, ja vanha pilvilaskennan malli tarvitsee vaihtoehtoja (Baktir, Ozgovde ja Ersoy 2017). On syytä mainita Yousefpour ym. (2019) tutkimuksen perusteella, että käsitteinä reunalaskentaa, reunapilveä/reunapilvipalvelimia (cloudlets), sumulaskentaa ja usvalaskentaa käytetään joissakin yhteyksissä vaihtokelpoisesti, koska niillä kaikilla ”reuna” toimii yleisenä terminä. Tietoliikennealalla käytetty termi reuna viittaa tavallisesti 4G/5G-tukiasemiin, RAN:iin (Radio Access Network) ja ISP:n (Internet Service Provider) pääsy- tai reunaverkkoihin. Esineiden internetin ympäristössä termi reuna kuitenkin viittaa paikalliseen verkkoon, jossa sensorit ja laitteet sijaitsevat. Toisin sanoen reuna on ensimmäinen välitön verkkohyppy itse laitteista, tarkoittaen esimerkiksi WiFi-tukiasemia tai yhdyskäytäviä. Jos laskenta taas suoritetaan itse esineiden internetin laitteil-

la, niin tätä laskentamallia kutsutaan usvalaskennaksi. Tutkimuksen mukaan General Electric huomauttaa, että sumulaskenta keskittyy reunalaitteiden (esimerkiksi mobiiliverkon tukiasemat tai reunareitittimet) väliseen vuorovaikutukseen, kun taas reunalaskenta keskittyy yhdistettyihin asioihin liitettyyn tekniikkaan (esimerkiksi WiFi -tukiasemat). (Yousefpour ym. (2019).)

Tutkimuksessaan Baktir, Ozgovde ja Ersoy (2017) toteavat, että vaikka reunalaskenta ja pilvilaskenta ovatkin tarkoitettu koko verkon eri osiin, ne liittyvät toisiinsa. Artikkelissa on analysoitu eri reunalaskentaehdotusten ominaisuuksia, ja todettu pilvi- ja reunalaskentatekniikoiden välillä seuraavat erot:

Taulukko: Pilvi- ja reunalaskennan erot  
(Baktir, Ozgovde ja Ersoy (2017) mukaellen)

Vaatimukset/ ominaisuudet	Pilvilaskenta	Reunalaskenta
Viive	Korkea	Matala
Verkko	Enimmäkseen laajaverkko (WAN)	Paikallisverkko LAN(WLAN)
Serverin sijainti	Missä tahansa verkossa	Reunalla
Liikkuvuuden tuki	Matala	Korkea
Jakautuminen	Keskitetty	Hajautettu
Tehtävän vaatimukset	Suuri laskentateho	Matala latenssi
Laitteet	Tietokoneet, mobiililaitteet rajoitetusti	Kytketyt äylaitteet
Hallinta	Kaupallinen palveluntarjoaja	Paikallinen liiketoiminta
Servereiden määrä	Suuri	Pieni
Yhteyden tila	Uudistettava/korvattava (soft) ja pysyvä (hard)	Uudistettava/korvattava

Reunalaskenta on siis kehittynyt erityisesti esineiden internetin vaatimuksesta palvelemaan kytkettyjä älylaitteita, ja eroaa sen perusteella keskitetystä pilvilaskennasta. Reunalaskennasta puhuttaessa asiaan liittyy kuitenkin monia toisiinsa sekoittuvia termejä ja määritelmiä, joita käytetään puhuttaessa verkon reunalle, eli lähemmäs esineiden internetin laitteita, tuodusta laskenta- ja käsittelykapasiteetista. Tutkimusaiheen sumulaskenta on vain yksi monista, ja sekoittuu helposti muihin termeihin. Toimintaympäristöjen ja termien rajanvetojen selventämiseksi on syytä läpikäydä niitä lyhyesti.

### 3.4 Reunalaskennan termistöä

Reunalaitteiden leviäminen luo sovelluksille tarpeen, muun muassa palvelun viiveen ja energiankulutuksen minimoimiseksi, käsitellä ainakin osa tiedoista reunalla, vaihtoehtona etätietokeskuksiin toimittamiselle. Reunalaskennan järjestelmien toiminnasta ja arkkitehtuurista on olemassa useita ehdotuksia. Tutkimuksessaan Baktir, Ozgovde ja Ersoy (2017) nostavat esille käsitteet mobiilipilvilaskenta (Mobile Cloud Computing, MCC), reunapilvipalvelin (Cloudlet), sumulaskenta (Fog Computing, FC), reunalaskenta (Edge Computing, EC), mobiilireunalaskenta (Mobile-Edge Computing, MEC) ja usvalaskenta (Mist Computing).

Yllämainittujen lisäksi Naha ym. (2018) listaavat myös käsitteet kastelaskenta (Dew Computing, DC) ja sumu-kastelaskenta (Fog-Dew Computing, FDC).

Kaikki nämä käsitteet määrittelevät erilaisia käytännön toteutuksia reunalaskennalle. Tarkasteltuna näillä lähestymistavoilla on yhteiset perusteet, mutta ne eroavat toisistaan ja ovat erikoistuneet kohdennettuihin käyttötapauksiinsa. Listan käsitteiden sijoittuminen esineiden internetin toimintaympäristöön esitetään kuviossa 1.

- **Mobiilipilvilaskenta (MCC)** määritellään Yousefpour ym. (2019) mukaan infrastruktuuriksi, jossa sekä tietojen tallennus että tietojenkäsittely tapahtuvat mobiililaitteen ulkopuolella, mikä tuo mobiilisovelluksia paitsi älypuhelinikäyttäjille myös paljon laajemmalle joukolle matkaviestintilaaajista. Tutkimuksen mukaan NIST laajentaa tämän määritelmän koskemaan myös mobiililaitteita: pilvilaskenta on esineiden internetin laitteiden, mobiililaitteiden ja pilvipalvelujen välinen synergia, joka mahdollistaa data- ja prosessori-intensiiviset sovellukset esineiden internetin -ympäristöissä. Mobiil-

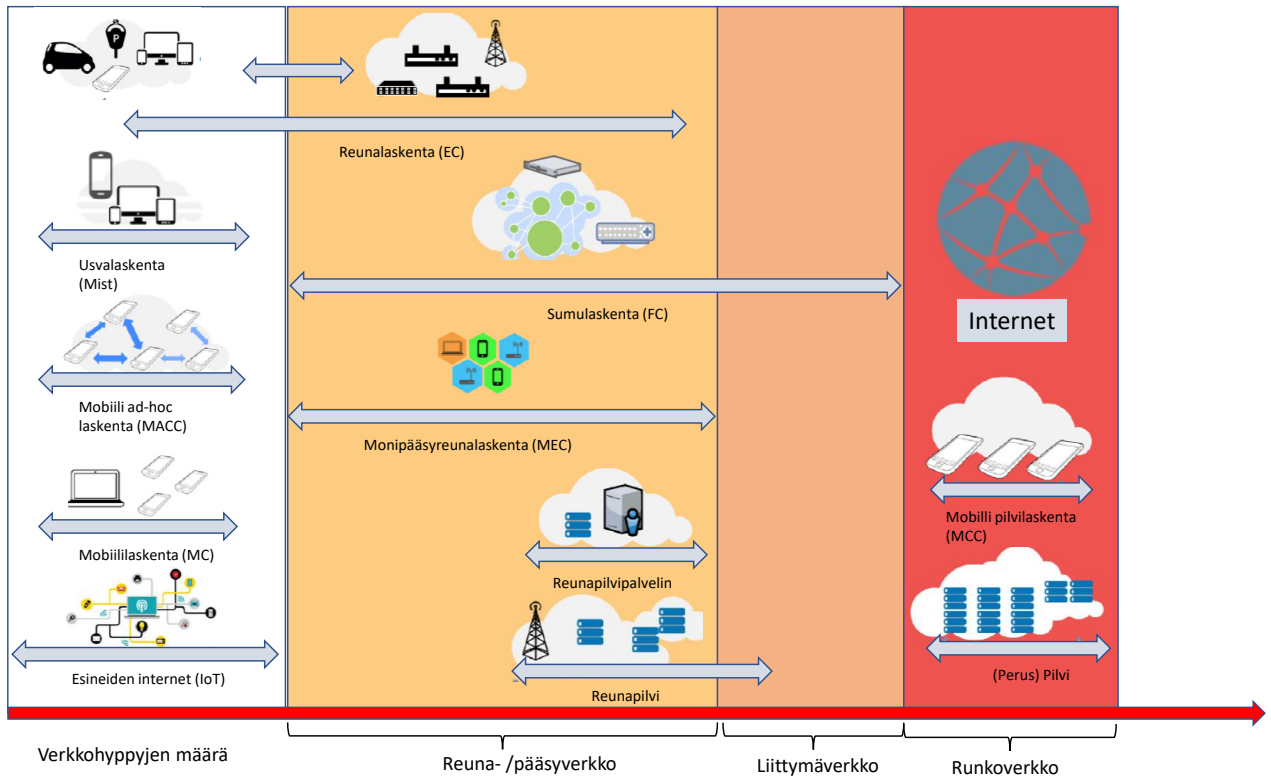
lipilvipalvelun sovellukset sisältävät muun muassa joukkorahoituksen, terveydenhuollon, tehtävien siirron ja sensoritietojen käsittelyn (kuten optisen merkkien tunnistuksen ja kuvankäsittelyn). (Yousefpour ym. (2019).) Mobiilipilvipalvelu on Naha ym. (2018) mukaan yleensä kevyt reunapilvipalvelin, joka on sijoitettu verkon reunaan.

- **Mobiili-ad-hoc-laskenta (MACC)**. Mobiilipilvilaskennan yleisestä luonteesta huolimatta tämä laskentamalli ei aina sovellu skenaarioihin, joissa puuttuu infrastruktuuri, tai keskitetty pilvi. Ad-hoc-mobiiliverkko on verkon hajautetuin muoto ja koostuu solmuista, jotka muodostavat väliaikaisen ja dynaamisen verkon reititys- ja siirtoprotokollien avulla. Ad-hoc-mobiiliverkossa olevat mobiililaitteet muodostavat erittäin dynaamisen verkkotopologian. Laitteiden muodostama verkko on erittäin dynaaminen, ja sen on sopeuduttava jatkuvasti liittyviin ja poistuviin laitteisiin. Ad hoc -laitteet voivat muodostaa väliaikaisia pilviä, joita voidaan käyttää verkottumiseen, tallennukseen ja tietojenkäsittelyyn, esimerkiksi ryhmän suoraan videon toistoon ja miehittämättömien ajoneuvojen järjestelmiin. (Yousefpour ym. (2019).)
- **Monipääsyreunalaskenta (Multi-access Edge Computing, MEC)** tai aiemmin **mobiilireunalaskenta (Mobile-Edge-Computing)** on mobiililaskennan laajennus reunalaskennan kautta. Telealan europpalainen standardoimisjärjestö ETSI (European Telecommunications Standards Institute) määrittelee monipääsyreunalaskennan alustaksi, joka tarjoaa informaatioteknologia- ja pilvipalveluominaisuuksia 4G ja 5G -pääsyverkossa (RAN) matkapuhelintilaajien välittömässä läheisyydessä. (Yousefpour ym. (2019).) Monipääsyreunalaskenta ehdottaakin Naha ym. (2018) mukaan tietojenkäsittelyn ja tallennuksen rinnakkaista sijoittamista matkapuhelinverkkojen tukiasemille. Monipääsyreunalaskentaa kutsuttiin aiemmin ”mobiilireunalaskennaksi”, mutta käsitettä on laajennettu kattamaan laajempi valikoima sovelluksia mobiililaittekohtaisten tehtävien lisäksi. Esimerkkejä monipääsyreunalaskentasovelluksista ovat videoanalytiikka, yhdistetyt ajoneuvot, terveydentilan seuranta ja lisätty todellisuus. (Yousefpour ym. (2019).)
- **Reunapilvipalvelin (minipilvi, cloudlet)** on luotettava ja resurssirikas tietokone tai tietokonejoukko, jolla on vahva Internet-yhteys, ja jota lähellä olevat mobiililaitteet hyödyntävät. Reunapilvipalvelimet ovat pieniä laskentakeskuksia, jotka ovat tyypillisesti yhden verkkohypyn päässä mobiililaitteista. (Yousefpour ym. (2019).)
- **Sumulaskenta (Fog Computing, FC)**, katso alaluku ”4.1 Sumulaskenta käsitteenä”.

- **Usvälaskenta (Mist Computing)** kuvaa hajautettua tietojenkäsittelyä itse esineiden internetin laitteissa, ja sitä on ehdotettu ajatellen itsetietoisia ja autonomisia järjestelmiä. Usvälaskenta voidaan nähdä ensimmäisenä laskentapaikkana esineiden internetin sumupilven jatkumossa, ja sitä voidaan epävirallisesti kutsua termeillä ”esineiden internetin-tietojenkäsittely” tai ”laitteiden tietojenkäsittely”. Laite voi olla esimerkiksi puettava, mobiililaitte, älykello tai älykäs jääkaappi. (Yousefpour ym. (2019).)
- **Reunalaskenta (Edge Computing, EC)** sijaitsee verkon reunalla lähellä esineiden internetin laitteita. Yhden määritelmän mukaan reunalaskenta ei ole itse laitteissa, vaan yhden verkkohypyn päässä tapahtuvaa laskentaa. OpenEdge Computing määrittelee reunalaskennan toiminnaksi, joka suoritetaan verkon laidalla pienissä lähellä käyttäjiä sijaitsevilla datakeskuksissa. (Yousefpour ym. (2019).) NIST määrittää käsitteen päätelaitteet ja niiden käyttäjät kattavaksi verkkokerrokseksi (esineiden internet-verkko), joka tarjoaa paikallisen laskentatoiminnon esimerkiksi sensorissa, mittauslaitteessa tai muissa verkossa käytettävissä laitteissa (Iorga ym. 2018). Esimerkkeinä erilaisesta reunan tulkinnasta Naha ym. (2018) antaa 1) reunapilvipalvelimen sijainin mobiilisovelluksen ja perinteisen pilven välissä, kun taas 2) esineiden internetin yhdyskäytävä on sensorin ja perinteisen pilvipalvelun välinen reuna.
- **Kastelaskenta (Dew Computing, DC)** yhdistää pilvipalvelun pääkonseptin päätelaitteiden ominaisuuksiin. Sitä käytetään parantamaan loppukäyttäjän käyttökokemusta verrattuna pilvipalveluihin. Naha ym. (2018) mukaan kastelaskenta sijaitsee pilven ja sumutietokoneiden ympäristössä, perustuu mikropalveluihin, ja palvelee sensoreita, tabletteja ja matkapuhelimia, jotka ovat saumattomasti yhdistetty verkkoon ad-hoc-pohjaisilla verkkoteknologioilla. Esimerkiksi liikennevalojen välissä sijaitsevat älykkään liikenteenohjausjärjestelmän tiedonkeruu- ja käsittelylaitteet voivat luoda liikennetilanteen kokonaiskuvan, ja välittää sen autoille polttoainevalinnan optimoimiseksi.
- **Sumu-kastelaskenta (Fog-Dew Computing, FDC)**. Sumu-kastelaskennan arkkitehtuurissa esineiden internetin laitteilla ei tarvitse olla aktiivista Internet-yhteyttä, kun ne ovat yhteydessä yhteisöpalvelimelle. Yhteisöpalvelin on vuorovaikutuksessa pilven kanssa ja vastaa palvelujen tarjoamisesta esineiden internetin laitteille. Esimerkkeinä sumu-kastelaskennasta on Google Drive ja Dropbox, joissa käyttäjät voivat poistaa, luoda ja päivittää tiedostoja ja kansioita ilman Internet-yhteyttä, ja synkronoida ne sit-

ten, kun laite on yhdistetty Internettiin. (Naha ym. (2018).)

Kuten listan lainauksista ja esimerkeistä voidaan päätellä, yksikäsitteisiä toisiaan poissulkevia käsitteitä ei löydy, vaan käsitteet ovat useasti päällekkäisiä ja jatkuvasti kehittyviä. Näitä käsitteitä selventää Yousefpour ym. (2019) tekemä kuvio 1, jossa käsitteet on sijoitettu suhteessa niiden paikkaan ja etäisyyteen runkoverkon perinteisistä pilvipalveluista:



Kuvio 1. Sumulaskenta ja muut käsitteet vertailussa (Yousefpour ym. (2019) mukaellen).



## 4 Sumulaskenta

Luvussa keskitytään sumulaskentaan, sen määritelmään ja perusominaisuuksiin, joiden perusteella se erottuu perinteisestä pilvilaskennasta ja muista ”reunan” käsitteistä. Arkkitehtuurin, sovellusesimerkkien ja vertailujen kautta etsitään näkökulmat, joilla sumulaskenta täydentää pilvilaskentaa erityisesti esineiden internetissä.

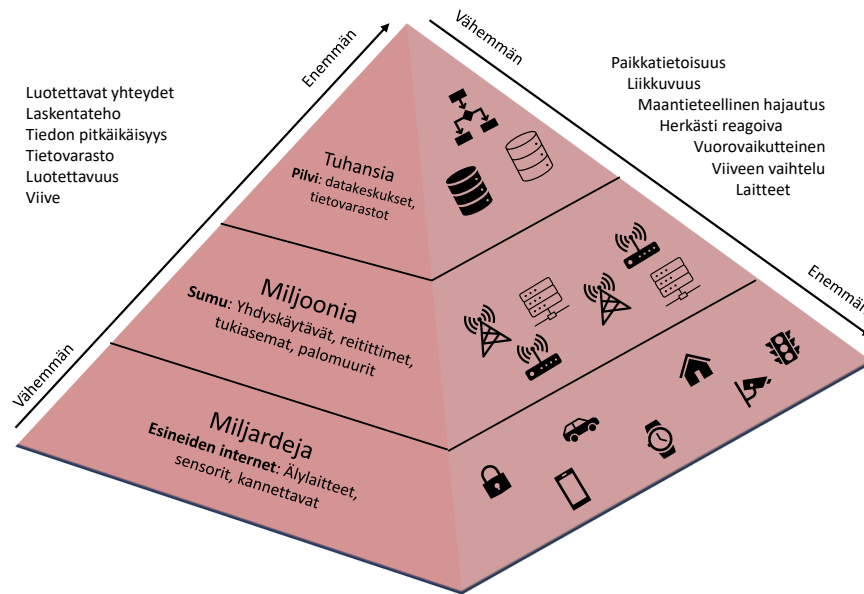
Sumulaskentaa voidaan ajatella pilvilaskentana, joka on laskeutunut lähemmäs verkon reunaan. Analogisesti sumu on kuin pilvi, joka on laskeutunut lähelle maan pintaa (Bonomi ym. 2012). Vastaavasti usva taas on sumua, joka nousee maan pinnasta kuvaten laskentaa, joka tapahtuu itse esineiden internetin laitteissa. Sumulaskenta (Fog Computing), josta käytetään joskus myös termejä sumuverkko (Fog Networking), tai Cisco (2015) mukaan sumuilu (fogging), sijoittuu siis esineiden internetin laitteiden ja runkoverkon pilvipalvelun väliin, kuten kuviossa 1 esitettiin.

### 4.1 Sumulaskenta käsitteenä

Naha ym. (2018) mukaan sumulaskennan termiä ehdottivat ensimmäisinä Cisco Systemsin tutkijat vuonna 2012. Sumulaskennan ensimmäisen määritelmän puolestaan esitteli samaa vuonna Bonomi ym. (2012), kuvaten sitä erittäin virtualisoituna alustana, joka tarjoaa laskenta-, tallennus- ja verkkopalveluja esineiden internetin laitteiden ja perinteisten pilvipalvelutietokeskusten välillä.

Tätä Bonomi ym. (2012) esittämää sumu- ja pilvilaskennan roolia esineiden internetin palveluissa – pilven ja esineiden internetin laitteiden välissä – täydentävät hyvin Kassab ja Darabkh (2020) ja Yousefpour ym. (2019). Tutkimuksista koostetussa kuviossa 2 sumulaskenta yhdistää miljardit esineiden internetin laitteet (kuten sensorit ja älylaitteet), pilvipalvelujen tuhansiin laskentakeskuksiin, tarjoten laitteille palveluja miljoonien sumutoimijoiden (kuten reitittimet ja tukiasemat) avulla.

Sumulaskentaa pidetään useasti synonyyminä reunalaskennalle. Vaikka sumu- ja reunalaskenta siirtävät laskennan ja tallennuksen verkon reunaan ja lähemmäs päätelaitteita, käsitteet



Kuvio 2. Sumulaskennan ja pilven rooli esineiden internetin palvelussa (Kassab ja Darabkh (2020) ja Yousefpour ym. (2019) mukaellen).

eivät ole identtisiä. Yousefpour ym. (2019) mukaan OpenFog konsortio itse asiassa toteaa, että reunalaskentaa kutsutaan usein virheellisesti sumulaskennaksi. OpenFog-konsortio tekee eron siitä, että sumulaskenta on hierarkkinen ja se tarjoaa tietojenkäsittelyyn, verkottumisen, tallennuksen, hallinnan ja nopeuttamisen missä tahansa pilvestä esineisiin, kun reunalaskenta taas rajoittuu laskemiseen yhden verkkohypyn päässä laitteista.

Tutkijat ovat määritelleet sumulaskennan monin eri tavoin. Esimerkiksi monen lähteen koosteessaan Naha ym. (2018) luettelevat muun muassa seuraavia:

- ”Sumulaskenta on erittäin virtualisoitu alusta, joka tarjoaa laskenta-, tallennus- ja verkkopalveluja esineiden internetin laitteiden ja perinteisen pilvipalvelun palvelinkeskusten välillä, tyypillisesti mutta eivät yksinomaan verkon reunalla” (Bonomi ym. 2012).
- ”Sumulaskenta on skenaario, jossa valtava määrä heterogeenisiä (langattomia ja joskus itsenäisiä), kaikkialla läsnä olevia ja hajautettuja laitteita kommunikoivat, ja mahdol-

lisesti tekevät yhteistyötä, niiden ja verkon kanssa suorittaakseen tallennus- ja käsitte-lytehtäviä ilman kolmansiä osapuolia. Nämä tehtävät voivat olla verkkotoimintoja tukevia tai uusia palveluja ja sovelluksia, jotka toimivat omassa hiekkalaatikkoympäristössään. Käyttäjät jotka vuokraavat osan laitteistaan näiden palvelujen isännöimiseksi saavat vastineeksia kannustimia” (Vaquero ja Roderö-Merino 2014).

- ”Termi sumulaskenta (tai reunalaskenta) tarkoittaa toimimista verkon päissä, sen sijaan, että toimisi keskitetystä pilvipalvelusta käsin. Se on termi joidenkin prosessien ja resurssien asettamiseksi pilven reunalle sen sijaan, että käytettäisiin pilven varastoja ja palveluja” (IBM 2016).

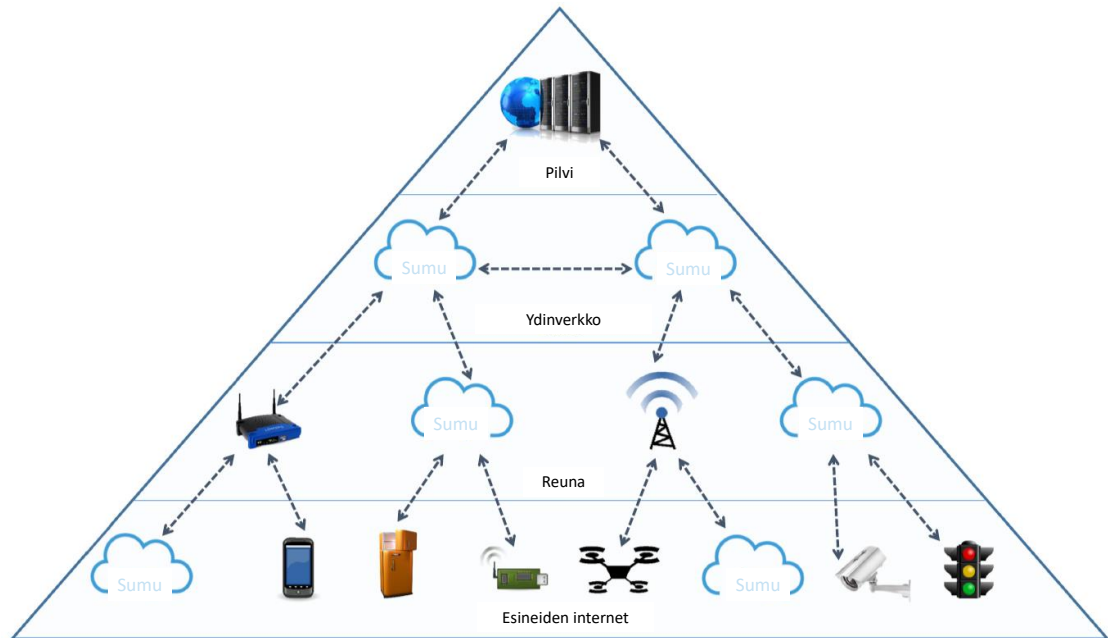
(Naha ym. (2018) - listan suomennokset kirjoittajan.)

Yhtä ainoata yhteisesti sovittua määritelmää ei siis löydy. Tässä kirjoituksessa sumulaskennan määritelmänä tukeudutaan Yhdysvaltain standardoimisviraston NISTin versioon. Se kuvaa sumulaskennan, samalla kun määrittelee termin sumusolmu ja arkkitehtuurimallin, seuraavasti:

*”Sumulaskenta on kerrostettu malli, joka mahdollistaa kaikkialla pääsyn skaalautuvien tietojenkäsittelyresurssien jaettuun jatkumoon. Malli helpottaa hajautettujen, viiveestä tietois-ten sovellusten ja palveluiden käyttöönottoa, ja se koostuu sumusolmuista (fyysisistä tai virtuaalista), jotka sijaitsevat älykkäiden päätelaitteiden ja keskitettyjen (pilvipalvelujen) välillä. Sumusolmut ovat kontekstittietoisia ja tukevat yhteistä tiedonhallinta- ja viestintäjärjestelmää. Sumusolmut ovat joko fyysisiä komponentteja (esimerkiksi yhdyskätävät, kytkimet, reitittimet, palvelimet jne.), tai virtuaalisia komponentteja (esimerkiksi virtualisoidut kytkimet, virtuaalikoneet, reunapilvipalvelimet jne.), jotka on liitetty tiiviisti älykkäisiin päätelaitteisiin tai liityntäverkoihin, ja jotka tarjoavat resursseja näille laitteille. Sumusolmut voidaan järjestää klustereiksi – joko pystysuoraan (eristämisen tukemiseksi), vaakasuoraan (tukemaan yhdistämistä), tai suhteessa sumusolmujen latenssietäisyyteen älykkäistä päätelaitteista. Sumulaskenta minimoi pyyntö-vastausajan tuettujen sovellusten välillä, tarjoaa päätelaitteille paikallisia laskentaresursseja ja tarvittaessa verkkoyhteyden keskitettyihin palveluihin.” (Iorga ym. (2018) mukaellen, suomennos kirjoittajan).*

Tätä NISTin esittämää mallia selventää Puliafito ym. (2019) kuvio 3 sumulaskennan hierar-

kiasta, jossa sumusolmut ovat sekä hajautettuna että yhdistettynä esineiden internetin laite-  
tasolta ydinverkkoon saakka.



Kuvio 3. Sumulaskennan hierarkinen rakenne (Puliafito ym. (2019) mukaellen).

## 4.2 Sumulaskennan arkkitehtuuri ja teknologia

Sumulaskentaa voidaan siis ajatella pilvilaskentana, joka on laskeutunut lähemmäs verkon reunaa. Samankaltaisuudesta huolimatta sumulaskennan lähentyminen loppukäyttäjiä kohti näkyy sekä teknologiapohjassa että arkkitehtuurissa, ja poikkeaa joiltain osin pilvilaskennasta.

Sumulaskennan arkkitehtuuria kuvataan hyvin pilvää vastaavaksi, laajentaen pilvipalvelut verkon reunalle. Sumusolmut ottavat käyttöön ja tarjoavat samantyyppisiä XaaS-palveluja kuin pilvipalvelut. (Mahmood (2018).)

Eroa pilvilaskentaan Mahmood (2018) kuvaa seuraavasti: sumulaskennan arkkitehtuuri käyttää lisäksi yhtä tai useampaa yhteistyössä toimivaa loppukäyttäjäasiakasta tai läheisen organisaation reunalaitetta, jotka suorittavat huomattavan määrän viestintä-, ohjaus-, määrittämis-, mittaus- ja hallintapalveluita. Toisin sanoen erottava ominaisuus on, että kun pilviympäris-

tön käytössä luotetaan voimakkaasti Internetin kaistanleveyteen, palvelujen voidessa sijaita maantieteellisesti kaukana organisaatiosta (joka on usein tietämätön sijainnista), niin sumu- palvelut tarjoavat loppukäyttäjille paremman liikkuvuuden tuen ollessaan maantieteellisesti tiheästi jakautuneena lähemmäs loppukäyttäjiä. (Mahmood (2018, 5).)

Teknisesti pilvi- ja sumulaskenta eroavat toisistaan merkittävästi muun muassa osallistujien yhteyksien, laskentatehon, virrankäytön, erilaisten kyvykkyyksien, käsittelyn viiveen, liikkuvuuden tuen, tilatarpeen ja reaaliaikakäsittelyn mahdollisuuden suhteen. Niiden keskeisimmät tekniset eroavuudet on koottu taulukkoon 1 sivulla 24.

Yhteenvetona näistä eroista – ehkä hieman kärjistetysti – voidaan todeta sumulaskennan osallistujien olevan jatkuvasti vaihtuvia, pienen virrankulutuksen ja tilantarpeen omaavia, halpoja, patterikäyttöisiä, toisiaan lähellä olevia ja langattomia yhteyksiä käyttäviä laitteita, jotka kykenevät reaaliaikalaskentaan. Pilvilaskenta puolestaan pohjautuu keskitettyihin, kaukana käyttäjistä oleviin varastokeskusten kokoisiin rakennuksiin, joissa kalliit, korkean virrankulutuksen ja laskentatehon palvelimet tarjoavat palveluja mahdollistaen ei-viivekriittisten sovellusten toiminnan.

Sumulaskennan yleisestä arkkitehtuurista tuntuu vallitsevan konsensus. Kuten NISTin malli (Iorga ym. 2018) esittää, ja Puliafito ym. (2019) kuviossa 3 selventävät, niin myös Yousefpour ym. (2019) artikkelissaan ja Mahmood (2018) kirjassaan kuvaavat sumulaskennan malliarkkitehtuurin koostuvan kolmesta osa-alueesta:

1. **Laitteet:** Esineiden internetin laitteet ovat yhdistettyjä laitteita, jotka tuottavat ja lähettävät suuria määriä erilaista strukturoitua ja puolittain strukturoitua tietoa.
2. **Sumuverkko:** Vastaanottaa reaaliaikaista tietoa esineiden internetin laitteista käyttämällä erilaisia viestintäprotokollien yhdistelmiä ja suorittaa reaaliaikaisen analyysin.
3. **Pilviympäristö:** vastaanottaa tietoja tallennettavaksi sumusolmuista ja myös suorittaa liiketoimintatiedon analysointia.

Sumulaskennan kehittämiseksi on perustettu yhteistyöelin nimeltä OpenFog-konsortio. OpenFog-konsortio (OpenFog) on julkisen ja yksityisen sektorin yhteinen ekosysteemi, joka on muodostettu nopeuttamaan sumutekniikan käyttöönottoa ratkomaan esineiden internetin, tekoälyn, robotiikan, taktiilisen Internetin ja muiden kehittyneisiin digitalisoidun maailman

Taulukko 1. Sumun ja pilven tekniset erot (Naha ym. (2018) mukaellen).

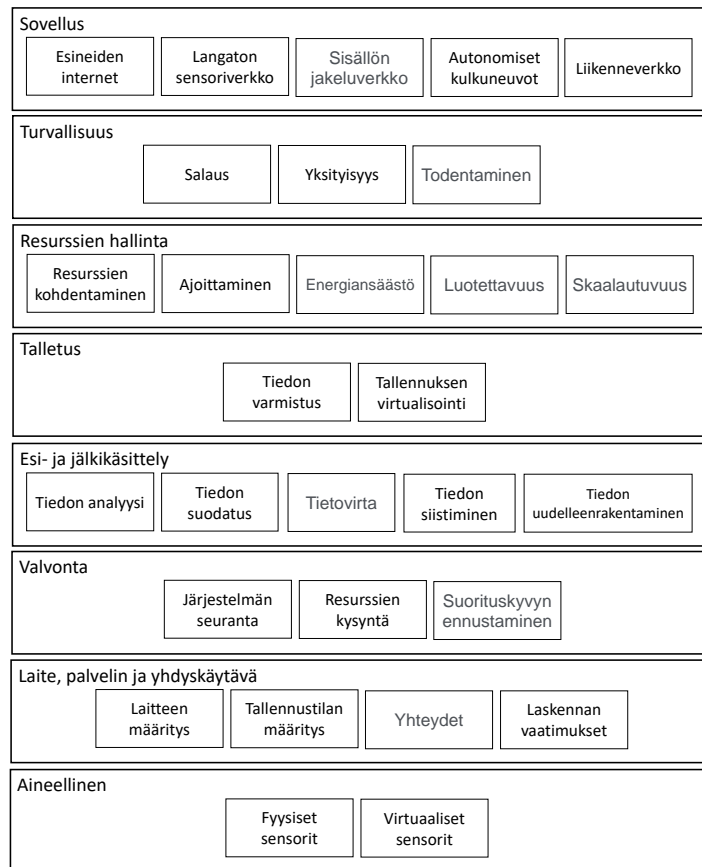
	Sumulaskenta	Pilvilaskenta
Osallistujat	Jatkuvasti vaihtuva	Vaihteleva
Hallinta	Hajautettu/Keskitetty	Keskitetty
Laskentalaite	Mikä tahansa	Voimakkaat palvelimet
Epäonnistumisen luonne	processorivoimaa omaava	
Loppukäyttäjän yhteys	Erittäin vaihteleva	Ennustettava
Sisäinen yhteystapa	Enimmäkseen langaton	Suurnopeus (yhdistelmä langallista ja langatonta)
Virtalähde	Enimmäkseen langaton	Enimmäkseen langallinen
	Patteri/akku/suorasähkö/ aurinkovoima	Suorasähkö
Virrankulutus	Matala	Korkea
Laskentateho	Matala	Korkea
Tallennuskapasiteetti	Matala	Korkea
Virrankulutus	Matala	Korkea
Verkon viive	Matala	Korkea
Liikkuvuus	Korkea	Erittäin matala
Verkkohyppyjen määrä	Yksi/muutama	Usea
Sovellustyypit	Viivekriittiset	Ei-viivekriittiset
Reaaliaikakäsittely	Tehtävissä	Vaikea
Laskentahinta	Alhainen	Korkea
Jäähdytyskustannus	Erittäin alhainen	Korkea
Tilantarve	Vähäinen, mahdollista asentaa ulkotiloihin tai olemassaolevaan infraan	Varastokeskuksen kokoinen rakennus

käsitteisiin liittyviä haasteita. Sen perustivat ARM, Cisco, Dell, Intel, Microsoft ja Princeton University Edge Computing Laboratory marraskuussa 2015. (opcfoundation.org (2021).) Konsortion kehitystyö on johtanut OpenFog-viitearkkitehtuuriin (OpenFog Reference Architecture, OpenFog RA), jonka tarkoituksena on auttaa yritysjohtajia, ohjelmisto- ja järjestelmäsuunnittelijoita sumulaskennassa tarvittavien laitteistojen, ohjelmistojen ja järjestelmäelementtien kehittämisessä ja ylläpidossa. Arkkitehtuurin mukaan sumulaskenta toimii monessa tapauksessa pilven kanssa ja on pilven laajennus, jossa kaikki pilven edut pitäisi säilyttää, mukaan lukien konttitekniologia, virtualisointi, orkestrointi, hallittavuus ja tehokkuus. Referenssiarkkitehtuuri määrittelee peruseräperiaatteet, joihin kuuluvat turvallisuus, skaalautuvuus, avoimuus, itsenäisyys, yhdistelmä luotettavuutta, saatavuutta ja käytettävyyttä (Reliability, Availability, and Serviceability, RAS), ketteryys, hierarkisuus ja ohjelmoitavuus. Peruspilarien lisäksi tässä yhdistetyssä arkkitehtuurissa on kuvattu jokaisen sidosryhmäläisen rooli sumulaskennan arvoketjussa piirilevyvalmistajista ja käyttäjärjestelmän tekijöistä aina sovellusten kehittäjiin saakka. Tämä referenssiarkkitehtuuri on saavuttanut vankan käytännön aseman IEEE:n julkaistua 2018 standardin sen käyttöönotolle. (OpenFog Consortium Architecture Working Group and others (2017), “IEEE Standard for Adoption of OpenFog Reference Architecture for Fog Computing” (2018) ja Mahmood (2018).)

Naha ym. (2018) artikkelin mukaan sumulaskennan arkkitehtuuri koostuu näiden periaatteiden päälle rakennetusta kahdeksasta kerroksesta, jotka on esitelty kuviossa 4.

Näiden kerrosten toimintaa Naha ym. (2018) kuvaavat seuraavasti:

- Aineellisessa kerroksessa sumulaskennan perustietolähteenä ovat sensoreiden lähettämät monimuotoiset tiedot.
- Laite, palvelin ja yhdyskäytäväkerroksessa määritellään muun muassa laitteiden roolit, määrittelyt, liitettävyydet ja niiden hallitsemien laitteiden määrä. Esimerkiksi sumupalvelimella pitäisi olla korkeampi rooli ja määrittely kuin sumulaitteella ja yhdyskäytävällä, koska se hallitsee useita sumulaitteita. Ryhmä fyysisiä ja virtuaalisia sensoreita liitetään sumulaitteeseen. Ryhmä sumulaitteita yhdistetään sumupalvelimeen. Samaan palvelimeen yhdistetyt sumulaitteet muodostavat rykelmän, ja voivat tarvittaessa kommunikoida keskenään.
- Valvontakerros seuraa aina järjestelmän suorituskykyä, resursseja, palveluita ja vas-



Kuvio 4. Sumulaskennan arkkitehtuurin komponentit (Naha ym. (2018) mukaellen).

tauksia. Järjestelmän valvontakomponentit auttavat valitsemaan käytönaikaisia sopivia resursseja.

- Esi- ja jälkikäsitteilyssä hankitut tiedot analysoidaan ja suodatetaan, sekä tietoja siistitään ja tarvittaessa uudelleenmuotoillaan tai kunnostetaan. Käsitteilyn jälkeen tietovirtakomponentti päättää, onko tiedot tallennettava paikallisesti, vai tuleeko ne lähettää pilvipalveluun pitkäaikaista säilytystä varten.
- Talletuskerroksessa tallennuksen virtualisointi vastaa tietojen tallentamisesta, ja varmuuskopiointikomponentti varmistaa tietojen saatavuuden ja vähentää tietojen menetyksiä.



- Resurssienhallinnan komponentit ylläpitävät ja allokoivat resursseja ja aikataulutusta, sekä käsittelevät energiansäästön haasteita. Luotettavuuskomponentti ylläpitää sovelusten ajoituksen ja resurssien allokoinnin luotettavuutta. Skaalautuvuuskomponentti varmistaa sumuresurssien skaalautuvuuden resurssien kysynnän ollessa korkea. Koska laite tai yhteys saattaa vikaantua millä tahansa tasolla, on luotettavuuden hallinta erittäin tärkeää.
- Turvallisuuserros käsittelee kaikki turvallisuuteen liittyvät toiminnot (kuten viestinnän salauksen), tarjoaa tietoturvallisen tallennustilan ja takaa palvelujen käyttäjien yksityisyyden.
- Sovelluserros tarjoaa parempaa palvelun laatua ja kustannustehokkuutta kaikille viivetietaisille sovelluksille, kuten autonomiset kulkuneuvot tai liikenneverkot. Vaikka sumulaskenta kehitettiin palvelemaan esineiden internetin sovelluksia, myös esimerkiksi sisällön jakeluverkkoja (Content Delivery Network, CDN), tai langatonta sensoriverkkoa (Wireless Sensor Network, WSN) hyödyntävät sovellukset hyötyvät sumulaskennasta.

### 4.3 Sumulaskennan tarjoamat edut pilvilaskentaan

Sumulaskenta tarjoaa – pilvilaskennan lailla – tallennustilaa, laskentakapasiteettia ja sovelluksia loppukäyttäjien kulutettaviksi. Erityisesti esineiden internetille suunnitellusta sumulaskennan arkkitehtuurista ja rakenteesta voidaan kuitenkin löytää selkeitä osa-alueita, joissa sumulaskenta poikkeaa keskitetystä pilvilaskennasta ja tuottaa vertailtaessa sekä etuja että täydentää sitä.

Keskitettyyn pilvilaskentaan verrattuna sumulaskenta korostaa läheisyyttä loppukäyttäjiin ja asiakkaiden tavoitteisiin, paikallista resurssien yhdistämistä, viiveen ja kantaverkon kaistanleveyden pienentämistä paremman palvelun laadun saavuttamiseksi, ja reunalla tapahtuvaa analytiikkaa ja tietovirran tulkitsemista, mikä johtaa parempaan käyttäjäkokemukseen. Siten sumulaskenta laajentaa pilvimallin verkon reunaan palveluille ja sovelluksille, jotka eivät sovi pilvimalliin sen teknisten ja rakenteellisten rajoitusten vuoksi, kuten seuraavat:

- pienempää ja ennustettavissa olevaa viivettä edellyttävät sovellukset,

- maantieteellisesti laajalti hajautetut sovellukset ja prosessoinnit,
- nopeampaa liikkuvuutta vaativat ja mobiilisovellukset, tai
- nopeampaa käsittelyaikaa vaativat laajamittaiset hajautetut ohjausjärjestelmät.

(Mahmood (2018, 13).)

Näille – ei pelkästään esineiden internetin – palveluille ja sovelluksille koituvia sumulas-kennan painotuksista johtuvia tyypillisiä piirteitä ja etuja voikin tiivistää (Mahmood 2018; Puliafito ym. 2019; Baktir, Ozgovde ja Ersoy 2017; Heck ym. 2018; Sarkar, Chatterjee ja Misra 2018) tutkimusten perusteella seuraavasti:

- **Matala viive:** vastaus ja analyysi tapahtuvat paljon nopeammin sumusolmujen ollessa lähellä laitteita.
- **Runsas ja monipuolinen loppukäyttäjien tuki:** reunan laitteiden ollessa lähellä las-kentasolmuja.
- **Joustavat yhteydet:** johtuen erittäin virtualisoidun alustan hajautuksesta.
- **Parempi tuki liikkuvuudelle:** jonka mahdollistaa sumusovellusten ja mobiililaittei-den välinen suurempi viestintä.
- **Mahdollisuus reaaliaikaiseen vuorovaikutukseen:** toisin kuin eräkäsittelyssä, esi-merkiksi pilvipohjaisissa sovelluksissa.
- **Ympäristötietoisuus:** (esineiden internetin) laitteilla ja sumusolmuilla on tieto ja ym-märrys ympäristöstä.
- **Maantieteellinen jakauma:** sumuympäristön ollessa maantieteellisesti hajautettu se tukee paremmin muun muassa korkealaatuisten suoratoistopalvelujen toimittamista.
- **Langaton yhteysverkko:** sopii paremmin aikahajautettua analyysiä ja viestintää tar-vitsevien langattomien sensorilaitteiden käyttöön.
- **Monimuotoisuuden tuki:** sumulaitteet ja -solmut tulevat eri muodoissa ja ovat käy-tössä erilaisissa hajautetuissa ympäristöissä.
- **Saumaton yhteentoimivuus ja parempi liitettävyyys:** eri toimittajilta ja toimialoilta tulevien laitteiden välinen yhteensopivuus mahdollistaa paremman viestinnän.
- **Reaaliaikainen analysointi:** lähellä tiedon lähteitä tapahtuva käsittely mahdollistaa reaaliaikaisen toiminnan.
- **Tuki teollisille sovelluksille:** reaaliaikainen prosessointi ja analyysi mahdollistaa tuen

monenlaisille teollisille sovelluksille.

- **Tukee yksityisyyttä ja turvallisuutta:** arkaluontoisia (esimerkiksi terveyteen liittyviä) tietoja ei tarvitse siirtää tuntematonta tiedonsiirtopolkua laitteista kaukaiseen pilvipalveluun.
- **Vihamielisten ympäristöjen hallinta:** kriittisten alojen (kuten liikenne ja hätätilanteiden hallinta) tiedon jatkuva käsittely voidaan taata katkoksitta niin sanotuissa vihamielisissä ympäristöissä (esimerkiksi heikon verkkoinfrastruktuurin, armeijan tai luonnonkatastrofien alueet), joissa pilven suorituskyky on heikko, tai ei yksinkertaisesti ole käytettävissä ollenkaan.
- **Laitteiden pienempi energiankulutus:** tehtävien siirto pois päätelaitteelta vähentää energian kulutusta, ja sumupalvelun käyttö vähentää sitä edelleen verrattuna pilvipalveluun.
- **Laskentakeskusten pienempi energiankulutus:** tietojen siirtäminen useiden hyppujen yli etäpilvipalvelimille on kallista energiankulutuksen kannalta, ja pilvipalvelukeskukset kuluttavat valtavia määriä energiaa.
- **Runkoverkon kaistan tarpeen väheneminen:** sumulaskenta vähentää tarvetta Internetin kaistanleveydelle koostamalla ja käsittelemällä tietoa lähellä käyttäjää, sen sijaan, että lähettäisi kaiken tiedon pilvikanavien kautta. Tämäntyyppinen jaettu strategia puolestaan alentaa myös (pilvipalvelun) kustannuksia, parantaa laskennan tehokkuutta ja siten myös palvelun laatua.
- **Parempi liiketoiminnan ketteryys ja pienemmät käyttökustannukset:** lähellä käyttäjäorganisaatiota tapahtuvan tiedon käsittelyn myötä.

Edellä keskityttiin vertailemaan pilvi- ja sumulaskennan eroja. Markkinoilla on kuitenkin paljon kaupallisia ja teollisia sovelluksia, jotka edellyttävät sekä sumulaskennan paikallisuutta että pilven globaalia laskentakykyä (esimerkiksi massadatan ja analytiikan osalta). Sumulaskenta liittyy pääasiassa kuitenkin esineiden internetin sovelluksiin, joille edut pilvipalveluun verrattuna ovat merkittäviä.

Kirjallisuudessa (Yousefpour ym. 2019; Naha ym. 2018; Mahmood 2018) listaavat joitain käytännön sovellusalueita ja sovelluksia joissa sumulaskenta on jo käytössä ja tarjoaa konkreettisia esimerkkejä edellämainituista eduista:

- **Älykkäät verkot:** Sumulaskenta tarjoaa nopeat koneiden väliset (Mobile to Mobile, M2M) kättelyt ja ihmisten ja koneiden väliset vuorovaikutukset (Human to Machine Interaction, HMI), mikä johtaa tehokkaampaan yhteistyöhön laajemman pilvipalvelun kanssa. Sumulaitteet keräävät paikallisia tietoja ja tekevät yhdessä reaaliaikaisia päätöksiä perustuen 360 asteen näkymään ympäristön tapahtumista.
- **Älykkäät kodit ja kaupungit:** Sumulaskenta mahdollistaa sensoritietojen saamisen asuntojen ja kaupunkien toiminnan kaikilta tasoilta. Yhdistämällä toisistaan riippumattomia verkkoyksiköitä kodeissa ja kaupungeissa luodaan nopeamman käsittelyn avulla mukautuvampia käyttäjäympäristöjä ja parannetaan elämänlaatua.
- **Yhdistetyt ajoneuvot:** Sumulaskenta tarjoaa ihanteellisen arkkitehtuurin ajoneuvojen välisiin (Vehicle to Vehicle, V2V) yhteyksiin autoihin, teihin ja liityntäpisteisiin upotettujen laitteiden läheisyyden vuoksi. Sumulaskennan ympäristötietoisuus tekee reaaliaikaisesta vuorovaikutusta autojen, tukiasemien ja liikennevalojen välillä turvallisempaa ja tehokkaampaa.
- **Itseohjautuvat autot:** Nämä ajoneuvot navigoivat itsenäisesti luottaen täysin automatisoituun tiedonsaantiin. Hidas vaste, ajoneuvojen liikkeessä liikennevirrassa, voi siten olla vaarallinen tai jopa hengenvaarallinen, joten tarvitaan reaaliaikaista käsittelynopeutta ja välittömiä päätöksiä.
- **Liikennevalojärjestelmä:** Sumulaskenta sopii älykkäisiin liikennevalojärjestelmiin, jotka muuttavat valojen ohjausta liikennevirran mukaan estääkseen onnettomuuksia tai vähentääkseen ruuhkia.
- **Terveydenhuollon hallinta:** Terveydenhuollon pilvipalvelumarkkinat ovat jo yli 5,4 miljardia dollaria. Sumulaskenta auttaa nopeuttamaan prosesseja lokalisoimalla laiteyhteydet ja tuomalla laitteet lähelle potilaita ja käyttäjäyhteisöjä.
- **Lääkinnälliset vaatteet:** Terveydenhuollon tarjoajat käyttävät niitä yhä enemmän potilasolosuhteiden seuraamiseen, etälääketieteen tarjoamiseen, ja jopa opastukseen paikan päällä olevalle henkilökunnalle ja roboteille, niinkin herkissä toimenpiteissä kuin leikkaukset. Luotettava reaaliaikainen tietojenkäsittely on ratkaisevan tärkeää tämän tyyppisille sovelluksille.
- **Esineiden internet ja kyberfyysiset järjestelmät (Cyber-Physical Systems, CPS):** Sumulaskennalla on keskeinen rooli kyberfyysisten järjestelmien (fyysisten ja lasken-

nallisten elementtien integrointi) ja esineiden internetin (fyysiset esineet) toiminnassa. Näiden yhdistelmä muuttaa jo maailmaa, joka koostuu tietokonepohjaisista ohjausjärjestelmistä, fyysisestä todellisuudesta ja teknisistä järjestelmistä.

Kaikissa sovellusalueissa tietoja voidaan lähettää pilveen pidemmän ajan analyysia varten.

Etujen ja sovellusalueiden kirjo pelkästään esineiden internetille on mittava. Yousefpour ym. (2019) kuitenkin tiivistää sumulaskennan etuja kuvion 5 yhteenvedossa seuraavasti:



Sumu tuo useita etuja sovelluskehittäjille, sovelluksille ja eri teollisuudenaloille hajauttamalla perustoiminnot

Kuvio 5. Sumulaskennan edut (Yousefpour ym. (2019) mukaellen).

## 5 Yhteenveto

Tutkielmassa esineiden internetiä tarkasteltiin ekosysteeminä, joka muodostuu esineisiin liitettyistä verkkolaitteista, jotka voivat kerätä tietoja esineiden sisäisistä ja ulkoisista muuttujista, analysoida niitä, lähettää niitä, ja toimia tietojen analysoinnin perusteella vuorovaikutuksessa toteuttaakseen ennalta määrättyjä arvoa luovia tavoitteita. Valmistajien pyrkiessä kasvattamaan liiketoimintaa, olemassaolevia teknologioita liitetään yhä enemmän jokapäiväisiin laitteisiin, kuten kodinkoneet ja autot, joita ei alunperin suunniteltu tiedon keräämiseen, tallentamiseen ja käsittelyyn. Samalla laitteiden välinen verkottuminen jatkaa kiihtyvää kasvuaan. Monen yleisimmän esineiden internetin sovellusalueen (älykäs ympäristö, terveydenhuolto, kuljetus ja logistiikka, ja sosiaaliset ja henkilökohtaiset sovellukset) arkkitehtuuri perustuu pilvipalveluun, jonka kapasiteetti ja kyvykyys onkin kasvanut. Sovellus- ja tietomäärän kasvu erityisesti aikaherkkien ja sijaintitietoisten sovelluksien (kuten potilaan seuranta, reaaliaikainen valmistus, itse ajavat autot tai drooniparvet) kohdalla, yhdessä pilvipalvelujen verkkoinfrastruktuurin rajoitteiden kanssa, jo yksistään pakottaa etsimään parempia ratkaisuja skaalautuvuuden, paikkatietoisuuden, saavutettavuuden sekä palvelun koetun laadun ja tarvittavan käsittelyn nopeuden suhteen.

Näitä ja muita haasteita palvelemaan on syntynyt pilvilaskennan osa-alue reunalaskenta, joka käsitteenä tuo tiedon käsittelyn joko laitteeseen tai laitteen lähelle (yhden verkkohypyn päähän). Reunalaskenta on myös kattokäsite, ja tutkimuksen perusteella on selvää, että käsitteinä reunalaskentaa, reunapilveä/reunapilvipalvelimia, sumulaskentaa ja usvalaskentaa käytetään joissakin yhteyksissä vaihtokelpoisesti, ”reunan” toimiessa kaikilla yleisenä terminä. Kaikki nämä käsitteet määrittelevät erilaisia käytännön toteutuksia reunalaskennalle. Tarkasteltuna näillä lähestymistavoilla on yhteiset perusteet, mutta ne eroavat toisistaan ja ovat erikoistuneet kohdennettuihin käyttötapauksiinsa.

Sumulaskentaa voidaan ajatella pilvilaskentana, joka on laskeutunut lähemmäs verkon reunaan tarjoten samantyyppisiä XaaS-palveluja. Näiden lisäksi sumulaskenta käyttää yhtä tai useampaa yhteistyössä toimivaa loppukäyttäjääsiakasta tai läheisen organisaation reunalaitetta, jotka suorittavat huomattavan määrän viestintä-, ohjaus-, määritys-, mittaus- ja hallintapalveluita. Kun pilviympäristön käytössä luotetaan voimakkaasti Internetin kaistanleveyteen,

niin sumupalvelut tarjoavat loppukäyttäjille paremman liikkuvuuden tuen ollessaan maantieteellisesti tiheästi jakautuneena lähemmäs loppukäyttäjiä. Sumulaskenta yhdistää miljardit esineiden internetin laitteet (kuten sensorit ja älylaitteet), pilvipalvelujen tuhansiin laskenta-keskuksiin, tarjoten laitteille palveluja miljoonien sumutoimijoiden (kuten reitittimet ja tukiasemat) avulla.

Sumulaskennan toiminnallinen malli, jossa sumusolmut ovat sekä hajautettuna että yhdistettynä esineiden internetin laitetasolta ydinverkkoon saakka, tarjoaakin tyypillisesti matalan viiveen, ympäristötietoisuuden, mahdollisuuden reaaliaikaiseen analysointiin ja reagointiin, toimimisen pienellä energian kulutuksella ja ilman jatkuvaa Internet yhteyttä.

Sumulaskenta sopii siis parhaiten palveluille ja sovelluksille, jotka:

- edellyttävät pienempää ja ennustettavissa olevaa viivettä, kuten älykäs liikennevalojärjestelmä ja potilaan seuranta,
- ovat maantieteellisesti laajalti hajautettuja, kuten kaupungin jätehuolto ja terveyden seurantajärjestelmät,
- vaativat nopeampaa liikkuvuutta, kuten droniparvet ja logistiikan seuranta, tai
- vaativat nopeampaa käsittelyaikaa, kuten reaaliaikainen valmistus ja itseajavat autot.

Tutkielmassa esiintuoduista sumu- ja pilvilaskennan soveltuvuuseroista huolimatta, monet jo käytössä olevat kaupalliset ja teolliset sovellukset edellyttävät sekä sumulaskennan paikallisuutta että pilven globaalia laskentakykyä. Esimerkiksi liikennevalojärjestelmät hyötyvät tiedon luotettavasta ja viiveettömästä paikallisesta käsittelystä, kun taas liikennevirtojen koosteen pidempiaikainen analyysi on järkevämpää tehdä pilvipalvelussa. Lääkeannostelijat, itseajavat autot tai teollisuuden ohjausjärjestelmät eivät voi luottaa kerätyn sensoritiedon mahdollisesti joskus tapahtuvaan käsittelyyn, vaan vaativat käytännössä luotettavaa reaaliaikaista reagointia. Samaan aikaan palvelut kuitenkin hyötyvät pidempiaikaisen tiedon, kuten henkilökohtainen terveys, oppimisjärjestelmät ja vika-analyysit, keräämisestä ja analysoinnista muualla kuin päätelaitteissa tai niiden lähellä. Tämä sumulaskennan tiedon käsittelyn hajautettu strategia hyödyttää monin tavoin sekä loppukäyttäjiä, päätelaitteita että pilvipalveluja. Energiankulutus alenee kokonaisvaltaisesti, kun tiedon käsittely siirretään pois päätelaitteilta, mutta pois monien hyppyjen päässä olevista massiivisista laskentakeskuksista.

Samalla tarvittava Internetin runkoverkon kaistantarve vähenee, parantaen yleistä pilvipalvelujen laatua. Koettu laatu kohenee myös esineiden internetin loppukäyttäjillä paikallisen käsittelyn toimintavarmuuden ja matalan viiveen myötä. Vastaavasti kaistanleveyttä voidaan säästää ja yksityisyyden suoja taata paremmin, kun esimerkiksi käyttäjien ääntä tai videokuvaa ei siirretä julkiseen verkkoon.

Sumu- ja pilvilaskenta toimivat siis toisiaan tukien eikä poissulkien.

Sumulaskenta liittyy kuitenkin pääasiassa esineiden internetin sovelluksiin, joille edut pilvipalveluun verrattuna ovat merkittäviä. Näihin etuihin keskittyessä unohtuu helposti, että sumulaskenta perii myös pilvilaskennan ongelmia, eikä myöskään aina poista kaikkia esiintuvia haasteita. Kirjallisuuskatsauksessa näitä ongelmakohtia – kenties materiaalin rajauksen takia – ei tuotu laajasti esille, ja alue antaisi aihetta jatkotutkimuksiin, erityisesti turvallisuuden osalta. Reunalaskennan kattokäsitteen alla on myös monia samankaltaisia, erikoistuneita, ja kenties toisiaan täydentäviä määritelmiä ja teknologioita, jotka tarjoaisivat mielenkiintoisia syventäviä tutkimuskohteita. Näistä mainittakoon usva- ja kastelaskenta, sekä 5G:n tarjoamien mahdollisuuksien myötä monipääsyreunalaskenta. Esineiden internetin ekosysteemi jatkaa kasvuaan, ja tulee olemaan tutkimusalueena erittäin kiinnostava.



## Lähteet

Atzori, Luigi, Antonio Iera ja Giacomo Morabito. 2010. "The Internet of Things: A survey". *Computer Networks* 54 (15): 2787–2805. ISSN: 1389-1286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568>.

Baktir, Ahmet Cihat, Atay Ozgovde ja Cem Ersoy. 2017. "How Can Edge Computing Benefit From Software-Defined Networking: A Survey, Use Cases, and Future Directions". *IEEE Communications Surveys Tutorials* 19 (4): 2359–2391. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2717482>.

Bellavista, Paolo, Javier Berrocal, Antonio Corradi, Sajal K. Das, Luca Foschini ja Alessandro Zanni. 2019. "A survey on fog computing for the Internet of Things". *Pervasive and Mobile Computing* 52:71–99. ISSN: 1574-1192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2018.12.007>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574119218301111>.

Bonomi, Flavio, Rodolfo Milito, Jiang Zhu ja Sateesh Addepalli. 2012. "Fog Computing and Its Role in the Internet of Things". Teoksessa *Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing*, 13–16. MCC '12. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. ISBN: 9781450315197. <https://doi.org/10.1145/2342509.2342513>.

Chellappa, Ramnath. 1997. "Cloud computing – emerging paradigm for computing". *INFORMS 1997, Dallas, TX*.

Cisco. 2015. *IoT, from Cloud to Fog Computing*. Saatavilla WWW-muodossa, <https://blogs.cisco.com/perfrom-cloud-to-fog-computing>, viitattu 10.2021.

———. 2020. *Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper*. Saatavilla WWW-muodossa, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>, viitattu 9.3.2020.

Dash, PK, ym. 2002. "Electrocardiogram monitoring". *Indian J. Anaesth* 46 (4): 251–260.

Garrett, Mark, Trinh Le, Vinil Nelaturi ja Liwen Shih. 2017. "GPU-Accelerated Cellular Automata Based Finite-Difference Model for Seismic Wave Propagation with OpenCL". Teoksessa *Proceedings of the Practice and Experience in Advanced Research Computing 2017 on Sustainability, Success and Impact*. PEARC17. New Orleans, LA, USA: Association for Computing Machinery. ISBN: 9781450352727. <https://doi.org/10.1145/3093338.3106738>.

Giri, Arindam, Subrata Dutta, Sarmistha Neogy, Keshav Dahal ja Zeeshan Pervez. 2017. "Internet of Things (IoT): A Survey on Architecture, Enabling Technologies, Applications and Challenges". Teoksessa *Proceedings of the 1st International Conference on Internet of Things and Machine Learning*. IML '17. Liverpool, United Kingdom: Association for Computing Machinery. ISBN: 9781450352437. <https://doi.org/10.1145/3109761.3109768>. <https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1145/3109761.3109768>.

Goumagias, Nikolaos, Jason Whalley, Ozge Dilaver ja James Cunningham. 2021. "Making sense of the internet of things: a critical review of internet of things definitions between 2005 and 2019". *Internet Research*, <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/INTR-01-2020-0013>.

Heck, Melanie, Janick Edinger, Dominik Schaefer ja Christian Becker. 2018. "IoT Applications in Fog and Edge Computing: Where Are We and Where Are We Going?" Teoksessa *2018 27th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCCN.2018.8487455>.

Hintemann, Ralph. 2020. *Data centers 2018. Efficiency gains are not enough: Data center energy consumption continues to rise significantly - Cloud computing boosts growth*, toukokuu. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26033.40800>.

Huawei. 2018. *Huawei's Global Industry Vision 2025*. Saatavilla WWW-muodossa, [https://www.huawei.com/minisite/giv/Files/whitepaper\\_en\\_2018.pdf](https://www.huawei.com/minisite/giv/Files/whitepaper_en_2018.pdf), viitattu 2018.

IBM. 2016. *What is Fog Computing?* Saatavilla WWW-muodossa, <https://www.ibm.com/blogs/cloud-computing/2014/08/fog-computing/>, viitattu 9.2021.

"IEEE Standard for Adoption of OpenFog Reference Architecture for Fog Computing". 2018. *IEEE Std 1934-2018*, 1–176. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8423800>.

Iorga, Michaela, Larry Feldman, Robert Barton, Michael J Martin, Nedim S Goren, Charif Mahmoudi ym. 2018. “Fog computing conceptual model”, <https://doi.org/https://doi.org/10.6028/NIST.SP.500-325>.

ITU-T. 2012. *Recommendation ITU-T Y.2060*. Saatavilla WWW-muodossa, <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11559>, viitattu 6.2012.

Kassab, Wafa’a, ja Khalid A. Darabkh. 2020. “A–Z survey of Internet of Things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations”. *Journal of Network and Computer Applications* 163:102663. ISSN: 1084-8045. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102663>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804520301375>.

Kortoci, Pranvera. 2020. “Enabling Internet of Things applications : an end-to-end approach”. Artikkeliväitöskirjan yhteenveto-osa ja 5 eripainosta. Tohtorinväitöskirja, Väitöskirja : <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-3926-8>.

Mahmood, Zaigham. 2018. *Fog Computing: Concepts, Frameworks and Technologies*. 291. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94890-4>.

Mell, Peter, Tim Grance ym. 2011. “The NIST definition of cloud computing”, <https://doi.org/https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-145>.

Microsoft. 2021. *Azure global infrastructure*. Saatavilla WWW-muodossa, <https://azure.microsoft.com/en-us/global-infrastructure/>, viitattu 10.2021.

Mytton, David. 2021. *How much energy do data centers use?* Saatavilla WWW-muodossa, <https://davidmytton.blog/how-much-energy-do-data-centers-use/>, viitattu 24.9.2021.

Naha, Ranesh Kumar, Saurabh Garg, Dimitrios Georgakopoulos, Prem Prakash Jayaraman, Longxiang Gao, Yong Xiang ja Rajiv Ranjan. 2018. “Fog Computing: Survey of Trends, Architectures, Requirements, and Research Directions”. *IEEE Access* 6:47980–48009. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2866491>.

Neto, Paulo. 2011. “Demystifying cloud computing”. Teoksessa *Proceeding of doctoral symposium on informatics engineering*, 24:16–21. CiteSeer. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.9370&rep=rep1&type=pdf>.

opcfoundation.org. 2021. *OpenFog*. Saatavilla WWW-muodossa, <https://opcfoundation.org/markets-collaboration/openfog/>, viitattu 10.2021.

OpenFog Consortium Architecture Working Group and others. 2017. "OpenFog reference architecture for fog computing". *OPFRA001* 20817:162. [https://www.iiconsortium.org/pdf/OpenFog\\_Reference\\_Architecture\\_2\\_09\\_17.pdf](https://www.iiconsortium.org/pdf/OpenFog_Reference_Architecture_2_09_17.pdf).

Puliafito, Carlo, Enzo Mingozzi, Francesco Longo, Antonio Puliafito ja Omer Rana. 2019. "Fog Computing for the Internet of Things: A Survey". *ACM Trans. Internet Technol.* (New York, NY, USA) 19, numero 2 (huhtikuu). ISSN: 1533-5399. <https://doi.org/10.1145/3301443>. <https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1145/3301443>.

ReportLinker. 2021. *Edge Computing Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 - 2026)*. Saatavilla WWW-muodossa, <https://www.reportlinker.com/p06062848/Edge-Computing-Market-Growth-Trends-COVID-19-Impact-and-Forecasts.html>, viitattu 1.4.2021.

Sarkar, Subhadeep, Subarna Chatterjee ja Sudip Misra. 2018. "Assessment of the Suitability of Fog Computing in the Context of Internet of Things". *IEEE Transactions on Cloud Computing* 6 (1): 46–59. <https://doi.org/10.1109/TCC.2015.2485206>.

Shancang, Li, Da Xu Li ja Zhaor Shanshan. 2015. "The Internet of Things: A Survey." *Information Systems Frontiers* 17 (2): 243–259. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7>.

Vaquero, Luis M, ja Luis Rodero-Merino. 2014. "Finding your way in the fog: Towards a comprehensive definition of fog computing". *ACM SIGCOMM computer communication Review* 44 (5): 27–32.

Whitmore, Andrew, Agarwal Anurag ja Li Da Xu. 2015. "The Internet of Things—A Survey of Topics and Trends". *Information Systems Frontiers* 17 (2): 261–274. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1007/s10796-014-9489-2>.

Wortmann, Felix, ja Kristina Flüchter. 2015. "Internet of Things". *Bus Inf Syst Eng*, numero 57, 221–224. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12599-015-0383-3>.

Yousefpour, Ashkan, Caleb Fung, Tam Nguyen, Krishna Kadiyala, Fatemeh Jalali, Amirreza Niakanlahiji, Jian Kong ja Jason P. Jue. 2019. “All one needs to know about fog computing and related edge computing paradigms: A complete survey”. *Journal of Systems Architecture* 98:289–330. ISSN: 1383-7621. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2019.02.009>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383762118306349>.

Zanella, Andrea, Nicola Bui, Angelo Castellani, Lorenzo Vangelista ja Michele Zorzi. 2014. “Internet of Things for Smart Cities”. *IEEE Internet of Things Journal* 1 (1): 22–32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>.