



Katri Koskivuo

# Reunalaskenta valmistavassa teollisuudessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Älykäs teollisuus

Opinnäytetyö

4.2.2022

## Tiivistelmä

Tekijä(t): Katri Koskivuo  
Otsikko: Reunalaskenta valmistavassa teollisuudessa  
Sivumäärä: 86 sivua + 1 liitettä  
Aika: 4.2.2022

Tutkinto: Insinööri (YAMK)  
Tutkinto-ohjelma: Älykäs teollisuus  
Suuntautumisvaihtoehto:  
Ohjaaja(t): Yliopettaja Jarno Varteva  
Osaamisaluepäällikkö Jari Olli

---

Tässä opinnäytetyössä määritetään kirjallisuuskatsauksen avulla, mitä reunalaskennalla tarkoitetaan, sen keskeisimmät taustalla olevat teknologiat, yleisimmät implementointitavat, motiivit ja haasteet. Tutkittava kohde rajautui valmistavan teollisuuden ympäristöön ja sovelluksiin.

Reunalaskennan motiivit liittyvät tietoliikennemäärän kasvuun. Erityisesti valmistavan teollisuuden ympäristössä datan määrä on IoT-teknologian yleistymisen myötä kasvanut merkittävästi, eivätkä pilvipalvelut pysty vastaamaan viiveherkkien sovelluksien reaaliaikavaatimuksiin. Reunalaskenta tuo pilvipalvelut fyysisesti lähemmäksi käyttäjiä lyhentäen toimintoihin kuluva viivettä samalla keventäen päätelaitteiden ja pilven kuormitusta. Haasteina ovat puutteelliset toimintamallit, standardit ja infrastruktuuri sekä tietoturvaan liittyvät tekijät.

Osana tutkimusta tehtiin selvitys tuotannon digitalisaation nykytilasta Suomen valmistavassa teollisuudessa ja sen valmiudesta reunalaskennan käyttöönotolle. Havaintoaineisto hankittiin kyselyllä, jonka perusteella 75 % yrityksistä on käytössä jokin teollisen internetin teknologia, ja 67 % arvioi viiden vuoden aikana ottavansa käyttöön jonkin uuden teknologian. Tämän perusteella tehtiin johtopäätös, että digitalisaatio on omaksuttu osana tuotantomenetelmien kehittämistä. Kyselyn vastaukset tukivat tämän tutkimuksen lähtökohtaista oletusta, että reunalaskenta on Suomen valmistavassa teollisuudessa käsitteenä vieras, eikä sitä tunnisteta osana tuotannon digitalisaatiota. Selvityksen perusteella tekninen valmius reunalaskennan käyttöönotolle on osittain olemassa, mutta ongelmia saattavat aiheuttaa yritysten sisäiset haasteet uuden teknologian käyttöönotossa.

Reunalaskentaa ei ole toistaiseksi otettu laajamittaisesti käyttöön. Se tarvitsee standardeja sekä vakiintuneet protokollat ja arkkitehtuurin. Kehitystyötä tehdään standardointijärjestöjen toimesta, ja erityisesti 5G-teknologian kanssa reunalaskentaan liittyy paljon odotuksia. Rohkeimmat jopa ennustavat sen mullistavan valmistavan teollisuuden toimintatavat.

Avainsanat: Reunalaskenta, pilvilaskenta, IoT, valmistava teollisuus, digitalisaatio

## Abstract

Author(s): Katri Koskivuo  
Title: Edge Computing in Manufacturing Industry  
Number of Pages: 86 pages + 1 appendices  
Date: 4 February 2022

Degree: Master of Engineering  
Degree Programme: Intelligent Industrial Solutions  
Specialisation option:  
Instructor(s): Jarno Varteva, Principal Lecturer  
Jari Olli, Head of School

---

In this thesis edge computing and its most important underlying technologies are defined through a literature review. The research was limited to the manufacturing industry and its applications.

Main reason for introduction of edge computing is the increasing amount of data traffic. Especially in the field of manufacturing industry, expansion of IoT technology has increased the amount of data significantly, and cloud services are no longer able to meet the real-time requirements of delay-sensitive applications. Edge computing brings cloud services closer to end users, reducing the latency and the traffic load on end user devices and in cloud. Thus, in addition to numerous motives, it also presents challenges: lack of operating models, standards, and infrastructure, as well as security issues.

As additional part of this thesis a survey about the status and future insights of digitalization in production processes, as well as the readiness for implementing edge computing, was made for Finnish manufacturing industry enterprises. Based on the survey, 75 % of companies already use some industrial internet technology and 67 % estimate that they will adopt some new technology in the period of next five years. It was observed that digitalization is widely being identified as a method of developing production processes. The survey supported the assumption, triggered by this study, that edge computing is not yet a well-known concept in the Finnish manufacturing industry and is not identified as part of the digitalization methods. According to the survey, technical readiness for the implementation of edge computing does partially exist, but difficulties may be the internal challenges of the enterprises in adoption of new technologies.

Edge computing has not yet been widely implemented. It needs standards as well as protocols and architecture. Development work is already done by standardization organizations, and there are high expectations for edge computing, especially in conjunction with 5G technology. Some even predict edge computing to revolutionize the manufacturing industry operations.

Keywords: edge computing, cloud computing, IoT, manufacturing industry

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Keskeisimmät taustalla olevat teknologiat	5
2.1	Esineiden internet	8
2.2	Pilvi	12
2.2.1	Pilvilaskentaan liittyviä haasteita	13
2.2.2	Projekti GAIA-X	16
2.3	5G-teknologia	17
2.4	Verkon virtualisointi	20
3	Reunalaskennan määrittäminen	22
3.1	Ekosysteemi ja infrastruktuuri	24
3.2	Implementointitavat	30
3.2.1	Cloudlet	30
3.2.2	Sumulaskenta	33
3.2.3	Multi-access edge computing (MEC)	34
3.2.4	Mikrodatakeskukset	37
3.2.5	Implementointitapojen vertailu	38
3.3	Reunasolmujen optimointi	41
3.4	Hybridimalli	42
3.5	Reunalaskennan motiivit	45
3.6	Haasteita reunalaskentaan liittyen	48
4	Reunalaskennan käyttö valmistavassa teollisuudessa	54
4.1	Optimaalinen toteutustapa	55
4.2	Soveltaminen	58
4.3	Case-esimerkki: ONCITE	61
5	Reunalaskennan tulevaisuuden näkymät	63
6	Selvitys: Tuotannon digitalisaation nykytila Suomen valmistavasan teollisuuden yrityksissä	65
6.1	Lähtökohdat ja tavoitteet	65
6.2	Kyselyn kohderyhmä	66
6.3	Kyselylomake	67
6.4	Kyselyn tulokset	69

6.4.1	Vastaajien lähtötiedot	69
6.4.2	Valmistavan teollisuuden tuotannon digitalisaation nykytilanne 71	
6.4.3	Kehityksen kohteena olevat tuotantoprosessit	72
6.4.4	Reunalaskenta	72
6.4.5	Haasteet	73
6.4.6	Henkilöstön kehittäminen ja tiedon hankinta	74
6.5	Havainnot ja johtopäätökset	74
6.5.1	Muut tutkimukset	79
7	Johtopäätökset	82
	Lähteet	84
	Lyyti-kyselylomakkeen kysymykset	87

## Käsitteet

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AI	Artificial Intelligence, tekoäly
AR	Augumented Reality, lisätty todellisuus
AWS	Amazon Web Services
Big data	Massadata
eMBB	Enhanced Mobile Broadband, parannettu mobiililaajakaista
EaaS	Edge-as-a-Service, reunalaskenta palveluna
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
Gateway	Yhdyskäytävä
GEC	German Edge Cloud
IaaS	Infrastructure-as-a-Service, infrastruktuuri palveluna
IoT	Internet of Things, esineiden tai asioiden internet
IP	Internet Protocol, internetprotokolla
ITU	International Telecommunication Union
LTE	Long Term Evolution, langaton tiedonsiirtotekniikka
M2M	Machine to Machine, koneiden välinen kommunikaatio
MEC	Multi-access Edge Computing, reunalaskennan implementointimenetelmä
MIMO	Multiple Input Multiple Output, moniantennitekniikka
mMTC	Massive Machine Type Communication, massiivinen koneiden välinen kommunikaatio
MTP	Motion-to-Photon, aika joka laitteella kuuluu liikkeeseen vastatessa
NFV	Network Function Virtualization, verkkotoimintojen virtualisointi
PaaS	Platform-as-a-Service, sovellusalusta palveluna
RAN	Radio Access Network, radioliitännätverkko
RTT	Round Trip Time, vasteaika
SaaS	Software-as-a-Service, ohjelmisto palveluna
SDN	Software-Defined Network, ohjelmistollisesti määritetty verkko
uRLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication, luotettava ja matalaviiveinen yhteys
VR	Virtual Reality, virtuaalitodellisuus

# 1 Johdanto

Digitalisaation ja erityisesti IoT-tekniikan myötä tietoliikenteen määrä teollisuusympäristössä kasvaa. Raakadata itsessään ei ole kovin arvokasta, ellei sitä jatkojalosteta ja tallenneta liiketoimintaa hyödyntävää käyttöä varten. Tämä on johtanut pilvipalveluiden sekä pilvessä tapahtuvan analytiikan, eli pilvilaskennan yleistymiseen. Datan asema liiketoiminnan resurssina on nykyään niin merkittävä, että sitä voidaan kutsua uudeksi valuutaksi. Erityisesti prosessoitu data on arvokasta ja se mahdollistaa yritysten liiketoiminnan kehittymisen. Mikäli yritys ei pääse omistamaansa dataan käsiksi, on se äärimmäisen haavoittuvainen ja jokainen hetki, kun data ei ole käytettävissä aiheuttaa yritykselle suoria tai välillisiä kuluja.

Datan keräämisen ja tallentamisen lisäksi sen reaaliaikaisesta prosessoinnista on tullut monien sovelluksien toiminnan kannalta tärkeää. Laitekannan kehittyminen sekä uuden sukupolven tekniikan mahdollistavat sovellukset, kuten videoanalytiikka, VR ja AI ovat hyvin aikakriittisiä ja toimiakseen reaaliaikaisesti vaativat minimaalisen viiveen sekä nopean ja toimivan verkkotekniikan. Valmistavan teollisuuden tuotantoprosessit voivat sisältää kriittisiä vaiheita, joiden toiminta perustuu tällaiseen reaaliaikaista prosessointia vaativaan tekniikkaan eikä viivettä datan saannissa tai siihen liittyvässä laskennassa saa esiintyä. Lisäksi datan turvallisuus ja saatavuus tulee olla taattu joka tilanteessa.

Vaikka pilvipalvelut tarjoavat monia hyötyjä, laskennan suorittaminen keskitetyksi kokonaan pilvipalveluiden varassa on monille sovelluksille liian hidasta. Data ei voi liikkua valonnopeutta nopeampaa, joten kaukana keskitetyssä kone-saliympäristössä tapahtuva datan louhinta aiheuttaa viivettä tiedonsiirtoon. Lisäksi IoT-sensorien tuottamien valtavien tietoliikennemäärien siirtäminen suoraan sensorilta pilveen vaatii verkolta paljon kaistaa, jonka toteutuminen lisää kustannuksia.

Ratkaisuna muun muassa edellä mainittuihin haasteisiin datan keräys- sekä laskentaresurssit on tuotu lähemmäksi datan lähdeä, kuten IoT-sensoreita ja muita päätelaitteita. Edge computing, eli reunalaskenta, josta toisinaan käytetään termiä hajautettu laskenta tai lähilaskenta, sijaitsee nimensä mukaan verkon reunalla, eli fyysisesti lähempänä laitetta, jolla data kerätään sekä paikkaa, jossa prosessoitua dataa tarvitaan ja käytetään. Reunakerros, eli reunalaitteet sijaitsevat arkkitehtuurissa loppukäyttäjän ja pilvilaitteiden välissä. Reunalaskenta ei sulje pois pilvipalveluita, tai toisinpäin. Itse asiassa reunalaskenta vaatii rinnalleen pilvipalvelut ja pääpalvelimen, joka esimerkiksi suorittaa vaativampaa laskentaa sekä big datan käsittelyä, ja jonne reunalla prosessoitu data voidaan loppusijoittaa pitkäaikaista tallentamista varten. Reunalaskennan tarkoitus on paikata pilvipalveluihin liittyviä heikkouksia ja tuoda pilvipalvelut lähemmäksi käyttäjää. Sen merkittävimmät tehtävät ovat vasteajan lyhentäminen sekä tiedonsiirtokuormituksen ja samalla pilvipalveluiden ja -laitteiden kuormituksen keventäminen. Näillä ominaisuuksilla on myös positiivisia vaikutuksia energian kulutukseen sekä datan siirrosta kertyviin kustannuksiin. Paras hyöty saadaan, kun reuna- ja pilviteknologia toimivat symbioosissa niin, että ne täydentävät toisiaan ja paikkaavat toisen teknologian heikkoja kohtia. Valmistavan teollisuuden ympäristössä reunalaskentaa voidaan hyödyntää esimerkiksi ennakoivassa huollossa, simulointiteknologiassa ja materiaalivirran hallinnassa.

Tämä opinnäytetyö käsittelee reunalaskentaa valmistavassa teollisuudessa, ja se tehdään yhteistyössä Rittal Oy:n kanssa. Rittal on vuonna 1961 Saksassa perustettu perheyrittäjä ja se kuuluu Friedhelm Loh Groupiin. Globaalisti Rittalilla on kymmeniä tytäryhtiötä, mukaan lukien Suomen toimipiste Rittal Oy Vantaalla, missä se on aloittanut toimintansa vuonna 1990. Rittal tarjoaa asiakkailleen kokonaisvaltaisia teollisuus- ja IT-kaappijärjestelmiä. Tuoteperheeseen kuuluu kaappi- ja kotelojärjestelmien lisäksi jäähdytys, virranjakelu sekä automaattioratkaisuja. Osa IT-infrastruktuuri -tuoteryhmää on kaappimekaniikan lisäksi kattavat konesali- ja palveluratkaisut. Näihin lukeutuu mm. Rittal ONCITE -reunalaskentaratkaisu, joka esitellään tutkimuksessa tarkemmin kappaleessa 4.3 Case-esimerkki: ONCITE.



Tutkimuksen tavoitteena on selvittää kirjallisuuskatsauksen avulla mitä reunalaskennalla tarkoitetaan, mitkä ovat valmistavan teollisuuden kannalta sen keskeisimmät teknologiat, mitä hyötyjä ja haasteita se pitää sisällään pilvipalveluihin verrattuna sekä mitkä ovat kirjallisuudessa kolme yleisemmin esitettyä implementointimenetelmää. Näiden tietojen pohjalta tutkitaan reunalaskennan soveltamista valmistavan teollisuuden tuotantoympäristössä ja esitetään neljä sovellusesimerkkiä.

Tutkimustarpeen laukaisijana toimii valmistavassa teollisuudessa vallitseva epä-tietous reunalaskennan määritelmästä ja mahdollisuuksista. Reunalaskenta samoin kuin yleisesti teollisen internetin digitalisaatoratkaisut sekoitetaan toisi-naan perinteiseen teollisuusautomaatioon. Tämä on käynyt ilmi mm. Rittalin IT-myyntitiimin tekemistä kenttähavainnoista. Yleinen tiedonpuute sekä väärinkäsi-tykset saattavat hidastaa tai jopa estää yrityksen toiminnan kehittämistä ja päi-vittämistä, ja vaarantaa kilpailukykyä.

Tutkimus jakautuu kahteen osaan, missä ensimmäinen, laajempi osa pitää si-sällään kirjallisuuskatsauksen siitä, mitä reunalaskenta tarkoittaa. Lähteinä käy-tetään tieteellisiä julkaisuja, alan kirjallisuutta, artikkeleita sekä teknologia-alan yritysten tuottamaa materiaalia. Lopputulosta voidaan käsitellä oppaana, joka johdattaa lukijan reunalaskennan perusteisiin, kohderyhmänä valmistava teolli-suus. Toinen osio on selvitys, jonka havaintoaineisto hankitaan suomalaisen valmistavan teollisuuden yrityksille lähetetyn kyselyn avulla. Selvityksen tarkoi-tuksena on saada käsitys Suomen valmistavan teollisuuden digitalisaation nyky-tilasta, ymmärtämisestä ja lähitulevaisuuden tavoitteista. Kyselystä saatujen vastauksien perusteella tehdään päätelmä yritysten valmiudesta soveltaa reu-nalaskentaa toiminnassaan.

Reunalaskentaa voidaan soveltaa laajasti eri toimialoilla, mutta tutkimuksen ra-jaamiseksi tämä tutkimus kohdennetaan valmistavan teollisuuden tuotantoym-päristöön ja sovelluksiin. Tutkimuksen kirjallisuuskatsaus ei kuitenkaan sulje pois muita toimialoja, sillä reunalaskentaa voidaan hyödyntää muuallakin kuin valmistavassa teollisuudessa, esimerkiksi sairaalaympäristössä, liikenteessä,

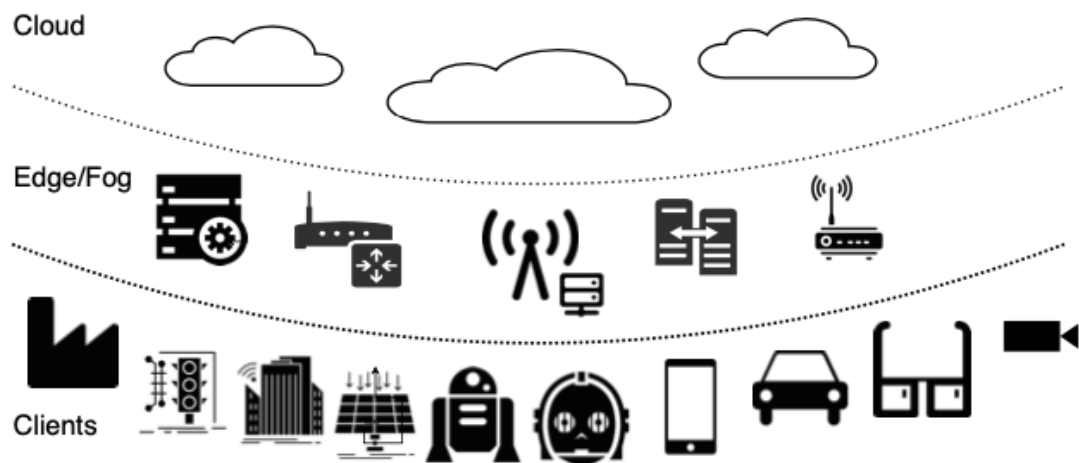
kaupunkiympäristössä, vähittäiskauppaympäristössä ja kuluttajien mobiilisovelluksissa.

## 2 Keskeisimmät taustalla olevat teknologiat

Tässä kappaleessa käydään läpi keskeisimmät teknologiat, jotka mahdollistavat reunalaskennan, erityisesti valmistavan teollisuuden ratkaisuksista puhuttaessa. Tämän kappaleen tarkoitus on johdatella lukija tässä opinnäytetyössä myöhemmin esiteltäviin reunalaskennan motiiveihin ja haasteisiin sekä kappaleessa 4.2 esiteltäviin sovellusesimerkkeihin.

Reunalaskentaympäristö voidaan arkkitehtuurin näkökulmasta jakaa kolmeen kerrokseen: asiakas (engl. client), reuna (engl. edge) ja pilvi (engl. cloud). Kerrokset on esitetty kuvassa 1. Alimmassa kerroksessa, eli asiakaskerroksessa ovat sensorit ja päätelaitteet, eli loppukäyttäjät. Näitä voivat olla esimerkiksi IoT-sensorit, teollisuuskoneet ja -laitteet, itseohjautuvat ajoneuvot ja mobiililaitteet. Nämä laitteet sekä tuottavat että käyttävät dataa. Tässä kerroksessa tuotetaan suuria määriä dataa, joka siirretään ylemmille kerroksille prosessoitavaksi ja tallennettavaksi. Vastaavasti prosessoitu data virtaa ylemmiltä kerroksilta takaisin asiakaskerrokseen. Toinen, eli välikerros on reunakerros, joka sijaitsee nimensä mukaisesti verkon reunalla. Tässä kerroksessa sijaitsevat reunalaskentaan liittyvät laskenta- ja verkkolaitteet, joita ovat esimerkiksi yhdyskäytävät, reitittimet, pienet palvelimet sekä mikrodatakeskukset. Reunalaitteille tyypillisiä ominaisuuksia ovat edistynyt datan laskenta- ja tallennuskapasiteetti, jotka vastaavat loppukäyttäjien reaaliaikavaatimuksiin. Jotkut tehtävät eivät välttämättä vaadi lainkaan pilvessä tapahtuvaa laskentaa, vaan ne voidaan suorittaa täysin reunakerroksessa, jolloin prosessointiin liittyvä viive laskee. Kolmannessa, eli ylimmässä kerroksessa ovat pilvipalvelut ja datakeskukset. Tässä kerroksessa sijaitsevat tehokkaat laitteet reunakerroksesta tai suoraan asiakaskerroksesta virtaavan datan lopullista tallentamista ja sellaista datan prosessointia varten, joka ei reunalaitteilta onnistu tai ei ole niillä kannattavaa toteuttaa. Asiakaskerroksen ja pilven välinen etäisyys verkossa on yleensä pitkä, puhutaan satojen millisekuntien viiveestä. Tyypillisesti sovelluksesta riippuen viiveelle asetetut vaatimukset vaihtelevat kymmenistä vain muutamiin millisekunteihin, joten useissa tapauksissa suorassa yhteydessä asiakaskerroksesta pilvikerrokseen on viiveeseen kuuluva aika auttamatta liian suuri. (Zavodovski 2020: 15.) Reunakerroksen

tarkoitus on olla fyysisesti lähellä asiakkaita, jolloin viive asiakaskerroksessa, eli käyttäjän näkökulmasta laskee. Toisin sanoen, reunakerros tuo pilven hyödyt lähemmäksi asiakaskerrosta paikaten samalla esimerkiksi pilven etäisyydestä johtuvia heikkouksia ja vähentäen laskentakuormaa datakeskuksilta. Reunalaskennan hyötyjä käydään myöhemmin tässä tutkimuksessa läpi.



Kuva 1 Reunalaskennan kolme kerrosta alhaalta ylös: Asiakas, reuna ja pilvi (kuva lainattu: Zavodovski 2020: 3)

Sekä reuna- että pilvilaskennassa keskeisessä roolissa on data. Datan arvo on muuttunut vuosien varrella sitä mukaan, kun teknologia on kehittynyt. Lisäksi mielenkiintoista on havaita, kuinka datan fyysinen käsittelypaikka on vaihdellut ja lopulta ikään kuin palannut takaisin juurilleen reunalaskennan myötä – eli lähemmäksi sen keräyspaikkaa.

Ensimmäistä kertaa dataa on valmistavassa teollisuudessa alettu keräämään teollisuusautomaation myötä, kun 1960-luvun lopussa teollisuusautomaatiossa alettiin hyödyntämään elektroniikkaa, ohjelmoitavaa logiikkaa sekä tietotekniikkaa. Suhde dataan on perinteisessä teollisuusautomaatiossa hyvin erilainen mitä se on tänä päivänä. Antureiden ja mittareiden tuottamaa sensoridataa on kerätty sisäisillä verkkoyhteyksillä automaation piirissä olevilta koneilta ja laitteilta. Käytetty data on lähinnä tilannedataa, jota on kerätty ja käytetty prosessin ohjauksen takia. Datan antamasta yksittäisistä arvoista on voitu tehdä oletuksia ja päätelmiä koneen sen hetkisestä tilasta, jonka seurauksena on voitu tehdä

koneen tai laitteen ohjaukseen liittyviä toimintoja. Kyseinen data kuitenkin katoaa uuden datan tieltä eikä sillä nähdä itsessään lisäarvoa eikä sitä kerätä tulevaa käyttöä ja analysointia varten. (Collin & Saarelainen 2016: 48-49.)

Todellinen datan läpimurto tapahtui digitalisaation ja ICT-tekniikan myötä alkaneen teollisen internetin aikakaudella. Suhde dataan muuttui radikaalisti verrattuna teollisuusautomaatioon. Teollisen internetin keskiössä on data, josta pyritään jalostamaan tietoa ja liiketoimintahyötyjä. Teollisuusautomaatio antaa teolliselle internetille pohjan, jonka päälle on hyvä lähteä rakentamaan, eikä teollisuusautomaation tuottamien antureiden raakadatan arvoa sovi vähätellä. Teollisen internetin sovelluksia ja teknologiaa tukevien antureiden vaatimukset ovat kuitenkin merkittävästi korkeammat kuin perinteisen teollisuusautomaation ympäristössä. Niiden kautta virtaa entistä isompia määriä dataa, mutta siinä missä teollisuusautomaatio hyödyntää raakaa tilannedataa, on teollisen internetin keskiössä datan kerääminen, tallentaminen ja erityisesti jalostaminen käyttökelpoiseen muotoon. Tämän seurauksena ovat teollisen internetin aikakauden anturit älykkäämpiä kuin aikanaan perinteisen teollisuusautomaation käyttöön valmistetut, koska niiden on pystyttävä keräämään valtavia määriä dataa mahdollisimman hyödynnettävässä muodossa. (Collin & Saarelainen 2016: 48-19.)

Toimialasta riippumatta digitalisaatio on osa yhä useamman yrityksen liiketoimintastrategiaa. Sen hyötyjä koetaan olevan muuan muassa ketterämpi liiketoiminta, toiminnan tehostaminen, edistynyt analytiikka sekä prosessien automatisointi. Lisäksi ketteryyden ansiosta pystytään paremmin reagoimaan asiakkaiden muuttuviin ja räätälöityihin tarpeisiin. Teknologiatrendejä, jotka ovat osaltaan edistäneet digitalisaatiota, ovat esimerkiksi pilvipalvelut, etähallinta ja -huolto sekä virtualisointi. (Miller 2020: 7-8.)

Datan kerääminen ei suinkaan rajoitu pelkästään valmistavan teollisuuden ympäristöön. Datan arvo on kasvanut niin merkittävästi, että sitä voi melkein verrata uuteen valuuttaan. Toisinaan yrityksen keräävät dataa varmuuden vuoksi ilman, että sille on kyseisellä hetkellä tiedossa edes lopullista käyttötarkoitusta.

Data on valtaa, joka tuo liiketoimintahyötyjä ja auttaa yrityksiä kehittämään toimintaansa. Samanaikaisesti data tekee yrityksistä erittäin haavoittuvia tilanteissa, jossa niillä ei ole pääsyä omistamaansa dataan tai pahimmassa tapauksessa data päätyy ulkopuolisiin käsiin. Jokainen hetki, jolloin data on yrityksen ulottumattomissa, aiheutuu yritykselle suorita tai välillisiä kuluja. Suoria kuluja ovat liiketoimintakulut, kuten ylityöt, myöhästymissakot, laaturvirheet sekä järjestelmien korjaamiseen koituvat kulut. Välillisiä kuluja ovat esimerkiksi asiakkaiden menetys ja maineen tahriintuminen.

IoT-sensoreiden ja -laitteiden yleistyttyä, alettiin niiden avulla kerättyä dataa siirtämään keskitetysti pilvipalveluihin tai konesaleihin. Vuosien mittaan pilvipalvelusta on tullut oletusarvo datan tallentamisen ja analysoinnin välineenä, koska analytiikan oletetaan vaativan raskasta suorituskykyä. Datan prosessointia tai analysointia pilvessä kutsutaan pilvilaskennaksi. Datan siirtäminen IoT-laitteelta pilveen vaatii nopean verkon ja yhteyden. Lisäksi edistyneempi teknologia, kuten konenäkö, VR tai videoanalytiikka ovat hyvin viivekriittisiä, mikä on osoittautunut ongelmaksi pilven etäisen sijainnin aiheuttaman viiveen kannalta. Muun muassa näistä edellä mainituista syistä datan siirtämistä keskitetysti pilveen tai konesaliin on alettu kyseenalaistamaan. Pienempien palvelimien sijoittaminen erilleen pääpalvelimesta lähemmäksi käyttäjää koettiin olevan toisinaan tehokkaampaa ja se mahdollistaa useiden teknologiasovelluksien käytön. Tämän seurauksena dataa on jälleen alettu keräämään ja prosessoimaan lähempänä sen syntypaikkaa ja päätelaitetta. Tätä laskentamenetelmää kutsutaan reunalaskennaksi.

## 2.1 Esineiden internet

Internet of Things, eli IoT, josta käytetään suomenkielistä käännöstä esineiden tai asioiden internet, on lukuisien älykkäiden laitteiden verkosto, jossa laitteet kommunikoivat keskenään internetin välityksellä. Perinteinen internet on laajentunut esineiden internetiin yhdistämällä siihen fyysisen maailman objektit ja esineet, jotka on varustettu esimerkiksi sensoreilla, toimilaitteilla tai RFID-tageilla.

Laitteet keräävät sensoridataa ympäristöstään tarjoten skaalautuvan infrastruktuurin datan välittämiseen, prosessointiin ja tallennukseen. Dataa voidaan kerätä esimerkiksi olosuhteista, lämpötilasta, tärinästä, sähkövirrasta, nopeudesta, asennosta ja säteilystä. (Al-Turjman 2020: 1; Bilal et al. 2017: 1.) Hyödyntämällä koneiden välistä kommunikointia, eli M2M (Machine-2-Machine) -kommunikointia, IoT-tarjoaa lukuisia mahdollisuuksia hallinnointiin, ohjaukseen ja automatisointiin ilman ehdotonta tarvetta ihmisen väliintulolle. Jyrki T.J. Penttinen (2019: 51) kirjoitti IoT:sta seuraavasti:

IoT on objekti, joka digitaalisesti esiintyy jonain suurempana tai kuin objekti itsessään. Objekti on yhteydessä sekä muihin ympärillä oleviin objekteihin että tietokantaan muodostaen näin kokonaisen ympäristön. Tämä on kiehtovaa, sillä suuren joukon tällaisia objekteja kommunikoidessa samanaikaisesti, niille muodostuu ympäröivä älykkyys.

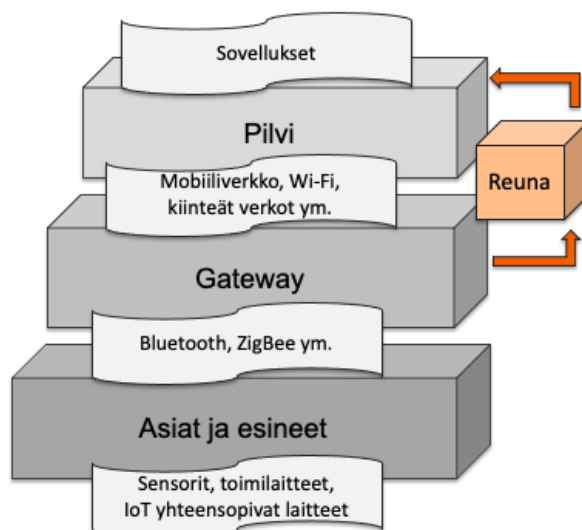
Käytännössä Penttisen mainitsevat objektit yhdistyvät yhdyskäytävän (engl. gateway) avulla IoT-sovellusalustaan, joka puolestaan koostuu ohjelmistotyökaluista ja -palveluista, jotka keräävät dataa sensoreilta, ohjaimilta ja muilta laitteilta. (Links et al. 2021: 4.) Laitteiden kirjo on laaja, ja niitä hyödynnetään muun muassa sairaala- ja hyvinvointiteknologiassa, älykotien ja älykkään ympäristön teknologiassa, turvallisuusteknologiassa, liikenteen ohjauksessa kuin myös valmistavassa teollisuudessa. Teollisuuden IoT-ratkaisuille on vakiintunut termi IIoT, Industrial Internet of Things, eli teollisuuden esineiden internet. Ne mittavat esimerkiksi lämpötilaa, tärinää, ääntä tai ilmankosteutta antaen näin tärkeää tietoa tuotantoprosesseista. On arvioitu, että vuoden 2020 lopussa verkkoon oli kytketty 26 miljardia IoT-laitetta. Tämän myötä myös laitteiden tuottama ja verkossa virtaava datan määrä on jo viimeisien vuosien aikana kasvanut eksponentiaalisesti ja kasvaa edelleen. (Al-Turjman 2020: 2.)

IoT-teknologialle ei ole vakiintunutta arkkitehtuuria. Riippuen lähteestä IoT:n arkkitehtuuri ja sen eri elementit on yleensä esitetty tasoissa, joita on tyypillisesti kolmesta seitsemään. Ensimmäisessä tasossa, jota voidaan kutsua laitetasoksi, ovat sensorit ja toimilaitteet sekä päätelaitteet, eli loppukäyttäjät. Sensorit muuttavat sähköiseen muotoon ilmiöt ja informaation, jotka eivät luonnostaan ole sähköisiä, eli informaatio muutetaan analogisesta digitaaliseen muotoon.

Toisessa tasossa on tiedonsiirto ja IoT-gateway, eli yhdyskäytävä. Tähän tasoon kuuluvat myös reunalaitteet. Kerätty data on tarkoitus siirtää internetin välityksellä sovellusalustalle, eli pilveen ja tiedonsiirtotapa riippuu laitteen tiedonsiirto-ominaisuuksista. Joillakin laitteilla voi olla ominaisuus yhdistyä suoraan internetiin esimerkiksi mobiiliverkon tai Wi-Fi:n välityksellä. Etäisyys laitteelta suoraan sovellusalustalle on pitkä ja siitä johtuen datan siirrossa esiintyy viivettä, eikä tilanne ole ihanteellinen viivekriittistä teknologiaa käytettäessä. Useat laitteiden käyttämä protokollat ovat kuitenkin sellaisia, etteivät ne pysty olemaan suorassa yhteydessä internetiin, joten väliin tarvitaan gatewaylaite. Tällöin tietoliikenne siirretään keskitetysti jonkin protokollan, kuten Bluetoothin, LoraWAN:in tai Zigbeeen avulla yhteen tai useampaan solmukohtaan, eli gateway-laitteelle, joka puolestaan on laajakaistareitittimen kautta yhteydessä internettiin ja edelleen sovellusalustaan. Gatewaylaite kääntää datan tukemaan sovellusalustan käyttämää protokollaa. Gatewaylaite voi ajaa pelkästään reitityslogiikkaa, kerätä ja suodattaa raakadataa tai vaihtoehtoisesti suorittaa raskaampaa analytiikkaa. Jälkimmäistä kutsutaan älykkääksi gatewayksi tai toisinaan edge gatewayksi, eli reuna gatewayksi. Näiden tyypillisiä etuja ovat reaaliaikainen tiedonkäsittely sekä säästö verkkoliikenteessä ja kaistanleveydessä. Tämä voi toimia väliaikaisena tallennuspaikkana tai toisinaan tietoa ei ole tarve siirtää lainkaan seuraavalle tasolle, eli pilveen. (Collin & Saarelainen 2016: 191; Links et. al. 2021: 4, 16; Navveen 2021.)

Kolmannessa tasossa on sovellusalusta, eli pilvi, jossa prosessoidaan, analysoidaan, turvataan ja tallennetaan ensimmäisessä tasossa kerätty data. Viimeisessä tasossa sijaitsevat sovellukset, jotka ohjaavat ja tulkitsevat IoT-laitteiden tuottamaa dataa sekä sen pohjalta lähettää komentoja IoT-laitteille, toisinaan jopa reaaliajassa. (Links et. al. 2021: 4, 16.) Edellä listatut tasot sekä IoT-laitteiden ja pilvipalveluiden yhteinen arkkitehtuuri on havainnollistettu kuvassa 2.





Kuva 2 Esimerkki IoT-arkkitehtuurista

Uusimpia tiedonsiirtoteknologioita ovat ultra-wideband, eli UWB, 5G sekä Wi-Fi6/6E, jotka mahdollistavat myös uusia IoT-sovelluksia. Käytännössä IoT-laittevalmistaja määrittää käytettävän standardin riippuen datan vaatimuksista ja kantamasta. Eri standardien laajan valikoiman seurauksena IoT-tekniikalle tyypillinen haaste on järjestelmien, sovelluksien ja palveluiden yhteentoimivuus. Lisäksi verkkoturvallisuutta ja yksityisyyttä on vaikea kontrolloida, johtuen niin ikään käytettyjen protokollien ja teknologioiden moninaisuudesta.

Lisääntyneiden IoT-laitteiden myötä tietoturvariski kasvaa. Laitteiden kautta pilveen kulkevan datan määrä kasvaa jatkuvasti ja sen tulisi olla turvassa ja suojattu koko prosessin alusta loppuun asti. Mitä enemmän laitteita on yhdistetty internetiin, sitä suurempi tietoturvariski. Edullisimmat IoT-laitteet saattavat olla heikosti salattuja tai niistä voi löytyä takaportteja, jotka mahdollistavat luvattoman käytön. Haavoittuvuus kasvaa myös siitä syystä, että identtisiä, mahdollisesti heikosti suojattuja laitteita saattaa olla useita kerrallaan käytössä. Lisäksi IoT-laite saattaa kerätä halutun datan lisäksi dataa, josta sen käyttäjä ei välttämättä ole tietoinen. (AI-Turjman 2019: 9-10.) Myös julkiset viestintäteknologiat, kuten Bluetooth, Wi-Fi ja ZigBee lisäävät tietoturvariskiä (AI-Turjman 2020: 2.)

## 2.2 Pilvi

Pilvellä tarkoitetaan suurella tallennuskapasiteetilla varustettua palvelinta, joka sijaitsee käyttäjän näkökulmasta syrjäisessä paikassa. Pilvi tarjoaa verkkoon kytketyille datalle tallennus- eli varastointitilaa. Pilvilaskennalla tarkoitetaan laitteistojen, sovelluksien tai ohjelmistojen hallintaa etäyhteyden välityksellä internetin ylitse. (AI-Turjman 2019, 52). National Institute of Standards and Technologyn määritelmä pilvilaskennalle (engl. cloud computing) on seuraava:

Pilvilaskenta on oletusarkkitehtuuri (framework), jolla pääsee käsiin jaettuun dataan mahdollistaen kaikkialla saatavilla olevat laske-  
ntaresurssien tilauspalvelut, kuten tallentaminen, palvelimet ja verkkoliikenne, joita voidaan hallita ja käsitellä mahdollisimman pienellä vaivalla. (AI-Turjman 2020: 200.)

Pilvi toimii alustana laitteiden sekä koneiden ja ihmisten välisessä kommunikaatiossa ja siihen liittyvän datan hallinnassa. Pilvilaskennassa tietojenkäsittelyresurssit on keskitetty pilvipalvelimille, jotka sijaitsevat keskitetyissä konesaleissa, joissa myös pilvipalvelut tuotetaan. Konesalit ovat tyypillisesti sijoitettu maantieteellisesti etäälle asuinalueista. 2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen voidaan todeta olevan pilven nousukausi ja siitä onkin tullut oletusarvoisin datan tallentamisen, prosessoinnin ja analysoinnin väline. Yritykset hyötyvät pilvipalveluiden käytöstä mm. minimoimalla omien palvelinlaitteiden hallintaan ja ylläpitoon liittyvät kustannukset sekä turvaamalla tärkeän datan olemassaolon tilanteessa, jossa omat paikalliset palvelimet kaatuvat. Lisäksi data on saatavilla kaikkialla, jossa on toimiva internetyhteys. Pilvipalvelut myös mahdollistavat korkeamman käyttöasteen lisäämättä investointeja tai heikentämättä suorituskykyä. Tyypillisesti pilvipalveluntarjoajat laskuttavat asiakasta käytön mukaan tai vaihtoehtoisesti vuosisopimuksella, jossa pilvipalveluntarjoaja on sitoutunut sovittuun kapasiteettiin sopimusajanjakson ajan. Yritykset voivat keskittää resurssinsa IT-osaamisen sijaan ydinliiketoimintaansa. Muita pilvipalveluiden hyviä ominaisuuksia ovat rajaton tallennuskapasiteetti, edistynyt analytiikka, big datan käsittely sekä skaalautuvuus. (AI-Turjman 2019: 3.)

Pilvi voidaan jakaa neljään käyttöönottomalliin. Palvelumallin määrittää mm. miten pilvi-infrastrukturi on otettu käyttöön sekä palvelun käyttäjän, omistajan ja fyysisen infrastruktuurin sijainnin välisen suhteen. Käyttöönottomallit ovat julkinen pilvi, yksityinen pilvi, hybridi pilvi, joka on julkisen ja yksityisen pilven yhdistelmä; sekä yhteisöpilvi.

Lisäksi pilvipalvelut voidaan jakaa useampaan pilvipalvelumalliin. Näiden palveluiden kirjo on nykyisin laaja, mutta kirjallisuudessa pääluokat ovat SaaS (Software-as-a-Service), IaaS (Infrastructure-as-a-Service) ja PaaS (Platform-as-a-Service). (AI-Turjman 2019: 52.)

### 2.2.1 Pilvilaskentaan liittyviä haasteita

Vaikka pilvipalvelut tarjoavat paljon mahdollisuuksia, on niissä myös omat haasteensa. Tässä kappaleessa käydään läpi tyypillisiä pilvipalveluihin sekä pilvilaskentaan liittyviä haasteita ja heikkouksia. Tarkoitus on johdatella lukija ymmärtämään myöhemmin tässä työssä läpikäytäviä reunalaskennan motiiveja, joiden tarkoitus on muun muassa paikata pilveen liittyviä heikkouksia.

#### **Maantieteellinen sijainti**

Konesalit, joissa pilvipalvelimet tyypillisesti keskitetysti sijaitsevat, ovat pääasiassa sijoitettu maantieteellisesti kauas isoista kaupungeista ja asutuksesta. Fyysinen etäisyys aiheuttaa kuitenkin viivettä datansiirrossa ja tästä kärsivät erityisesti viiveherkät sovellukset. Samoin liikkuvat päätelaitteet tuottavat pilvipalvelimille haasteita. Viive datansiirrossa vaikuttaa suoraan käyttäjäkokemukseen ja tuottaa haasteita vastata palveluntarjoajien ja loppukäyttäjien asettamiin suorituskykyvaatimuksiin.

Maantieteellinen sijainti luo lisäksi haasteita lakien ja säädösten kanssa. Pilvipalveluiden tarjoajiin vaikuttaa paikallinen lainsäädäntö, mikä voi poiketa merkittävästi käyttäjän kohdemaan lainsäädännöstä. Mahdollisesti kansallisten lakien vuoksi edes EU-säädökset eivät päde. Tämä puolestaan aiheuttaa epäselvyyksiä ja kiistoja liittyen datan yksityisyyteen ja sen suojaan. Lisäksi ilmiöön liittyy

riski, että arkaluontoinen data päätyy väärin käsiin. Konflikteja voi esiintyä esimerkiksi rikostutkintaan liittyvissä tapauksissa, kun fyysisesti eri maassa sijaitsevaan dataan ei päästä käsiksi. Tällä hetkellä Yhdysvalloissa sijaitsevan palveluntarjoajilla, liittyen esimerkiksi sähköposti-, datan tallennus-, pilvi- tai video-palveluihin, ei ole velvollisuutta toimia yhteistyössä EU:n viranomaisien kanssa ja tietojen jakaminen perustuu vapaaehtoisuuteen (Euroopan Komissio 2019). Vastaavasti taas Yhdysvaltojen Cloud Act -säädos velvoittaa joidenkin suurien pilvipalvelutarjoajien hallussa olevan datan luovuttamisen USA:n viranomaisille erikseen määritetyissä tilanteissa, vaikka datan fyysiset palvelimet sijaitsisivatkin EU:n alueella. Muun muassa edellä mainittujen epäkohtien seurauksena on luotu EU tietosuojalainasetus GDPR. Haastavaa tilanteesta tekee se, että GDPR-asetus on ristiriidassa USA:n Cloud Act -asetuksien kanssa. Tällä hetkellä tilanne on se, että tietosuojalausekkeet, jolla EU on tähän asti pyrkinyt turvaamaan EU:n alueella sijaitsevaan dataan liittyvän yksityisyydensuojan, voidaan mahdollisesti lähitulevaisuudessa kumota SCHREMS II -tuomion perusteella. Tämä luonnollisesti aiheuttaa toimittajille, kuten SaaS-yrityksille haasteita käyttäjien tietojen turvaamiseen liittyen. Monien yritysten asettama ehto toimittajilleen on, että datan tulee sijaita EU:n alueella eikä sitä saa luovuttaa sen ulkopuolelle missään tilanteessa. Mikäli SCHREMS II -tuomio mitätöi edellä mainitut tietosuojalausekkeet, ei tietosuojaa pystytä takaamaan GDPR:n vaatimassa laajuudessa, joten valvetuneimmat toimittajat ovat jo proaktiivisesti laatineet jatkuvuussuunnitelmia tilannetta varten, jossa datan yksityisyyttä ei voida taata. Jatkuvuussuunnitelma voi pitää sisällään esimerkiksi vaihtoehtoisen eurooppalaisen pilvipalveluntarjoajan EU:n alueelta, jolla nykyinen Cloud Actin piirissä oleva palveluntarjoaja korvattaisiin.

### **Tietoliikenteestä aiheutuva ruuhka ja resurssien allokointi**

IoT-laitteiden suorastaan räjähdysmäisen yleistymisen myötä, vaatimukset pilvipalveluille ovat kasvaneet. Yksittäinen teollisuuslaitos saattaa pitää sisällään tuhansia IoT-sensoreita, joista jokainen kerää suuria määriä dataa. IoT-laitteiden pilvipalveluille tuottama datan, eli tietoliikenteen määrä on merkittävä ja aiheuttaa ruuhkaa verkkoliikenteessä. Käyttäjät kuitenkin odottavat matalaa viivettä

datan prosessoinnissa, eli palvelun suorittamisessa, mikä luo kovat paineet sekä pilvipalvelutarjoajille kuin myös verkolle. Kun tietoliikenteen määrä kasvaa, ei kaistanleveys täytä kaikille palveluille asetettuja vaatimuksia ja aiheuttaa lisää viivettä, mikä voi osoittautua ongelmalliseksi erityisesti reaaliaikavaatimuksen sisältäviä palveluita suorittaessa. Lisäksi nopeampi verkkoyhteys aiheuttaa merkittäviä lisäkuluja. Haasteita luo myös datan allokointi, sillä oletettavasti kaikki data, jota yksittäinen IoT-laite syöttää, ei ole kriittistä tai merkityksellistä ja tämän prosessointi ja tallentaminen tuhlaa resursseja. Toistaiseksi turhan ja merkityksettömän datan suodattamiseen merkityksellisestä datasta ei ole kovin paljon panostettu. (AI-Turjman 2019: 2; Qi & Tao 2019: 3.)

## **Viive**

Tyypillinen latenssi, eli viive päätelaitteen ja pilven välillä on kymmenistä jopa useampaan sataan millisekuntiin. Viive johtuu maantieteellisestä sijainnista (kts. kohta Maantieteellinen sijainti) eikä data voi kulkea valonnopeutta nopeampaa. Viiveeseen vaikuttavat myös useat verkkohypyt, joita datan siirtymän aikana tyypillisesti tulee vastaan sekä riittämätön kaistanleveys. Pilvipalveluiden aiheuttama viive on reaaliaikavaatimuksen alaisille sovelluksille auttamatta liian pitkä, mikä näkyy loppukäyttäjällä palvelun heikkona suorituskykynä. Reaaliaikaisille visuaalisille palveluille suositeltava vasteaika on 25-50 ms.

## **Datan saatavuus**

Pilveen tallennetun datan etuja on, että se on saatavilla mistä tahansa ja milloin tahansa, kunhan käytössä on toimiva internetyhteys. Käyttäjät ovat kuitenkin täysin internetyhteyden sekä palvelimien varassa. Mikäli verkko-ongelmien takia dataan ei päästä käsiksi, ei pilvipalveluistakaan ole tällöin hyötyä.

## **Tietoturvariskit**

Kohdassa Maantieteellinen sijainti kerrottiin lakien ja säädösten aiheuttamasta tietoturvariskistä. Näiden lisäksi eri hyökkäysvektoreiden, kuten palvelunesto-

hyökkäykset ja viestintäkanavista johtuvat hyökkäykset, aiheuttavat tietoturvariskejä. Käyttäjän tietoliikenne täytyy siirtää etäällä sijaitsevaan konesaliin, jota etähallitaan palveluntarjoajan toimesta. Siirtymän ja hallinnan aikana dataan kohdistuu tietovuotoriski. Korkeatasoisista tietoturvajärjestelyistä huolimatta ovat pilvipalvelukeskukset alttiita joutua esimerkiksi taloudellista motiiveista johtuvien hyökkäyksen kohteeksi. (Zhang 2021: 4).

### **Konesalien energiankulutus**

Pilvipalvelutarjoajien merkittävä menoerä on datakeskuksien energiankulutus. Energian osuus toimintakuluissa on jopa 25–40 %. Energiankulutukseen vaikuttaa muun muassa konesalien jäähditys. Lisäksi käyttöikänsä loppuun ajatut, alkikäytöllä olevat sekä käyttämättömät palvelimet, joiden virrankulutusta ei katkaista, nostavat turhaan energiankulutusta. (Al-Turjman 2019: 6.) Konesalien tuottamaa hukkalämpöä voidaan ottaa talteen ja hyödyntää esimerkiksi rakennuksien lämmittämisessä. Toistaiseksi konesalien hyödyntäminen lämpövoimalaitoksina ei ole yleisesti käytössä, mutta hyvä uutinen on, että konesaleja kehitetään ja rakennetaan energiatehokkuus huomioiden.

#### **2.2.2 Projekti GAIA-X**

GAIA-X on Euroopan laajuinen projekti, jonka tavoite on luoda avoin ekosysteemi, joka määrittää eurooppalaiseen arvopohjaan perustuvan datan jakamisen standardit ja infrastruktuurin. Hankkeen tarkoitus on luoda datalle eurooppalainen pilvi, jossa yritykset voivat turvallisesti käyttää ja jakaa sisältöä. Saksan ja Ranskan valtiot toimivat vuonna 2019 hankkeen aloitteen tekijöinä ja sittemmin mukaan on lähtenyt yli 300 organisaatiota eri maista. Suomesta hankkeessa ovat mukana mm. VTT, Business Finland, Sitra, TEM, ja LVM. Hankkeen tavoite on vahvistaa Euroopan kansainvälisen kilpailukyvyn asemaa. (GAIA-X, luettu: 16.5.2021; Vahti 2020.)

GAIA-X-hankkeen arkkitehtuurille on määritelty seuraavat ydinarvot: avoimuus ja läpinäkyvyys, yhteentoimivuus, keskenään liittoutuneet järjestelmät sekä luotettavuus. Lisäksi hankkeen visioihin ja periaatteisiin perustuvat arkkitehtuurin

tekniset suuntaviivat ovat seuraavat: sisäänrakennettu suojaus ja yksityisyys; hajauttamisen, jakamisen ja liittämisen mahdollistaminen; käyttäjäystävällisyys ja helppous; koneprosessoitavuus sekä semanttinen esitysmuoto. Nämä kaikki osa-alueet sekä arkkitehtuuriehdotus on esitetty GAIA-X-hankkeen heinäkuussa 2020 julkaistussa raportissa GAIA-X: Technical Architecture. (GAIA-X 2020: 3-4.)

Edellä mainitussa raportissa GAIA-X:lle ehdotettu alustava infrastruktuurikosysteemi koostuu seuraavista elementeistä: pilvipalvelutarjoajista, korkean suorituskyvyn tietojenkäsittelystä, alakohtaisista pilvipalveluista (esim. lääketieteeseen tai teollisuusautomaatioon erikoistunut palveluntarjoajat), reunakerroksesta, yhteen liittämiseen erikoistuneista palveluntarjoajista sekä verkkopalveluista. (GAIA-X 2020: 25-26.)

Hankkeen tarkoituksena on rakentaa useita, maantieteellisesti hajautettuja reunadatakeskuksia. Tähän ovat Friedhelm Loh Groupiin kuuluvat German Edge Cloud ja Rittal yhdessä Fraunhofer Institutin ja Boschin kanssa esitelleet ja lanseeranneet ratkaisun nimeltään ONCITE. Kyseessä on ensimmäinen avaimet käteen -mallinen reunadatakeskus. (German Edge Cloud, luettu: 16.5.2021.) ONCITE ratkaisusta kerrotaan lisää kappaleessa 4.3 Case-esimerkki ONCITE.

## 2.3 5G-teknologia

5G-verkolla tarkoitetaan mobiilitekniiikan viidennen sukupolven datayhteyttä ja langattoman verkon standardia. Seuraavaa sukupolvea, eli 6G-verkkoa kehitetään jo kovaa vauhtia. 5G-teknologian ennustetaan olevan edistyneen, erityisesti latenssiherkän teknologian mahdollistaja. Sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi puettavassa teknologiassa, älykotiratkaisuissa, tekoälyssä, itseohjautuvissa autoissa sekä VR-teknologiaa tai videoanalytiikkaa käyttävissä sovelluksissa. Verrattuna edelliseen sukupolveen, eli 4G-teknologiaan, 5G tarjoaa datansiirtoon huomattavasti enemmän nopeutta sekä matalamman viiveen. Yhteysnopeuksien kasvu saavutetaan siirtymällä entistä korkeammille taajuuksille.

Tarkemmin ottaen 5G-verkko tulee todennäköisesti rakentumaan kolmelle eri taajuusalueelle. (Jokinen et al. 2019: 3.)

Vaikka datansiirtoon liittyvä merkittävä kehitys on yksi 5G-tekniikan tärkeimmistä motiiveista ja ominaisuuksista, on IoT-laitteiden räjähdysmäisellä kasvulla myös avainrooli 5G:n kehitystyössä. Jyrki T.J. Penttinen toteaa kirjassaan *5G explained: Security and Deployment of Advanced Mobile Communications*, että 5G:n aikakausi ei edusta ainoastaan korkean suorituskyvyn omaavaa mobiiliverkkoa, vaan ominaisuudellaan yhdistää lukuisia aina päällä olevia IoT-laitteita, se mahdollistaa langattoman, uudenlaisen yhteiskunnan, jossa kaikki, eli ihmiset, esineet, data, sovellukset, kulkuvälineet ja jopa kokonaiset kaupungit voidaan yhdistää keskenään. (Penttinen 2019: 697p-697r, 697v.)

Verrattuna 4G:en, 5G:n tavoitteelliset suorituskykyä mittaavat ominaisuudet ovat suurempi kaistanleveys, moninkertainen tuettujen laitteiden määrä, moninkertainen teoreettinen nopeus sekä merkittävästi pienempi viive. Tämä tarkoittaa, että 4G:n käyttämän 700 MHz taajuuden lisäksi 5G verkon taajuudet nousevat 3,5 GHz:iin tai jopa 26 GHz:iin asti, joka mahdollistaa kaistanleveyden kasvun. 4G:n avulla voidaan tukea kerrallaan noin 2000 aktiivista laitetta neliökilometrillä, kun taas 5G -tekniikan avulla vastaava luku on ainakin 100 000, ja tavoitelaitemäärä on jopa miljoona laitetta neliökilometrillä. 4G:lle tyypillinen viive on noin 30-40 ms ja 5G:lle tavoitearvo on 1 ms. 4G:n keskimääräinen tiedonsiirtonopeus on vastaanoton osalta 5-300 Mbit/s ja lähetyksen osalta 5-30 Mbit/s ja tavoitearvo 5G:lle on 10 Gb/s. (Jokinen et al. 2019: 14-16.)

5G:n standardeja edistää 3GPP. 3GPP eli 3rd Generation Partnership Project on seitsemän televiestinnän standardeista vastaavan organisaation yhteenliittymä, joka kehittää protokollia mobiiliteleviestintäteknologiaa varten. Verrattuna edellisiin sukupolviin, 5G tuo mukanaan uusia, 3GPP:n määrittelemiä toiminnollisuuksia, jotka eivät aikaisempien sukupolvien datayhteyksillä ole olleet esimerkiksi arkkitehtuurisista syistä mahdollisia. Näistä mainittakoon verkon viipalointi (network slicing), verkkotoimintojen virtualisointi (network function virtualization), avoin lähdekoodi (open source), mobiilireunalaskenta (mobile-edge computing),



palvelupohjainen arkkitehtuuri (service-based architecture) sekä all-IP -teknologia. (Penttinen 2019: 3c, 3h, 4, 5.)

5G-teknologian kehittämisen korkeimpana auktoriteettina toimii ITU, eli International Telecommunications Union, joka muun muassa määrittää 5G-teknologiaan liittyvät yleiset ja yhteensopivat vaatimukset. ITU on määrittänyt keskeisimmät ominaisuudet, jotka toimivat 5G:n suorituskyvyn vaatimuksen perustana. Nämä ominaisuudet ovat muun muassa teoreettinen maksiminopeus (peak data rate), kaistanleveys (bandwidth), energiatehokkuus (energy efficiency), viive (latency), tuettujen laitteiden määrä neliökilometrillä (connection density), alueellinen liikennekapasiteetti (area traffic capacity), toimintavarmuus (reliability) sekä käyttäjän kokema tiedonsiirtonopeus (user experience data rate) (Penttinen 2019: 4c, 4g-6.)

5G koostuu muun muassa seuraavista teknologiainnovaatiosta, jotka tukevat korkeaa verkkokapasiteettia vastaamaan käyttäjämäärien kasvua:

- Moniantennitekniikka, eli MIMO (multiple input multiple output). Langattomassa verkossa käytetään useita antennia lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Mahdollistaa jokaiselle antennille eri datavirran lähettämisen, lisäämällä näin tukiasemamaston ja käyttäjälaitteen suoritusnopeutta ja minimoi häiriöitä. (Sundhar & Miller 2017: 14.)
- Millimetriaaltoteknologia (mm Wave technology). Perustuu korkeisiin taajuuskaistoihin (noin 26-28 GHz) ja tarjoaa korkeaa kaistanleveyttä. Millimetriaallot eivät läpäise seiniä.
- Pienisolut (small cell concept): Korkeat taajuudet mahdollistavat langattoman verkon nopean ja viiveettömän kapasiteetin. Siirtyminen korkeammille taajuuksille tarkoittaa siirtymistä pienempiin mobiiliverkon solukokoihin, sillä korkeilla taajuuksilla signaalin kantavuus, peitto ja läpäisykyky heikkenee. Pieni solukoko mahdollistaa omalta osaltaan latenssin pienentämisen.
- Verkon viipalointi: Verkkoon voidaan luoda erillisiä virtuaalisia verkkoja käyttökohde- tai käyttäjäkohtaisesti, jolloin jokaiselle viipaleelle on omistettu oma, käyttäjäkohtaisen tarpeen mukainen nopeus ja kapasiteetti. Tämä lisää myös tietoturva, sillä päätelaitteiden välinen tietoliikenne kulkee omassa virtuaalisessa verkossa.
- Laitteiden välinen kommunikointi (device-to-device communication): Tekniikka, jossa verkko valtuuttaa kahden vierekkäisen laitteen välisen suoran kommunikoinnin keskenään. Tämä mahdollistaa käyttä-

jien tai laitteiden välisen kommunikoinnin jatkumisen myös tilanteissa, jossa verkko ei ole käytettävissä. Kommunikointi tapahtuu suoran langattoman linkin kautta ilman tukiaseman tai core-verkon läpi kulkemista. Tätä hyödynnetään erityisesti IoT-laitteiden kanssa. (Hazelcast 2019: 3; Jokinen et al. 2019: 14.)

5G mahdollistamista uusista käyttökohteista ITU on määrittänyt kolme tärkeintä, joista erityisesti kaksi ensimmäistä tukee IoT-tekniologiaa ja sen kehittymistä:

- mMTC (Massive Machine Type Communication): 5G-verkkotekniologialle on ominaista, että samassa solussa voidaan liittää moninkertainen määrä laitteita verkkoon.
- uRLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication): 5G tarjoaa luotettavan verkkoyhteyden matalalla viiveellä. Sen myötä langattomien verkkojen luotettavuus ja viive ylettyvät valokuidun tasolle.
- eMBB (Enhanced Mobile Broadband): Perustuu 5G:n nopeaan ja suureen kapasiteetin verkkoyhteyteen. (Jokinen et al. 2019: 13.)

Maat, joissa on paljon valmistavaa teollisuutta, tulevat todennäköisesti hyötymään 5G-tekniologiasta eniten. Mitä nopeammin 5G-tekniologia otetaan käyttöön, sitä nopeammin on mahdollista hyödyntää sen edistyksellisyyttä mm. juuri valmistavassa teollisuudessa. Oletettavasti korkeamman tulotason maat ovat niitä, jotka tulevat olemaan 5G:n käyttöönnotossa edelläkävijöitä.

## 2.4 Verkon virtualisointi

Virtualisoinnilla tarkoitetaan tietokoneohjelmiston suorittamista ohjelmallisesti toteutetun rajapinnan päällä, eli suoritettava toiminto erotetaan suorittavasta laitteesta. Verkkolaitteiston ja verkkotoimintojen eriyttämisestä käytetty termi on NFV eli network functions virtualization. Kun virtualisoitu ohjelmisto kattaa koko käyttöjärjestelmän, kutsutaan tätä virtuaalikoneeksi. Virtuaalikone pystyy käsittelemään suuria määriä tietoliikennettä tarjoten joustavan, automatisoidun ja skaalautuvan verkkoliikenteen. Virtualisointi mahdollistaa laitteiston resurssien jakamisen usean virtuaalikoneen kesken. Virtuaalikoneet on eristetty muusta järjestelmästä ja toisista virtuaalikoneista, mutta mahdollistavat reunasolmun resurssien jakamisen eri palveluiden välillä. (Vene 2018: 11-12.)

Reunalaitteet on hajautettu maantieteellisesti ja hallinnollisesti, jolloin laitteiden hallinnointiin ja huoltoon kohdistuvat kustannukset kasvavat. SDN (software-defined network), eli ohjelmistollisesti määritetty verkko on verkkoympäristön paradigma, joka muun muassa helpottaa verkon hallintaa ja implementointia, parantaa verkon skaalautuvuutta, laskee ylläpitokustannuksia, mahdollistaa verkkoliikenteen eristämisen ja tehostaa kulunvalvontaa ja verkon jakamista. (Al-Turjman 2019: 177.)

Myös 5G:lle ominainen verkon viipalointi toteutetaan virtualisoinnin avulla, jolloin jokaiselle käyttäjälle voidaan sovittaa sopiva nopeus, kapasiteetti ja kattavuus. Esimerkiksi matalan energiankulutuksen omaavalla IoT-sensorilla on hyvin erilaiset vaatimukset verkolta kuin itseohjautuvalla autolla, jonka täytyy tarvittaessa pystyä reagoimaan reaaliajan vaaratilanteisiin. (Sundhar & Miller 2017: 26-27.)

Verkon virtualisointitekniikka mahdollistaa yritysten ja palveluntarjoajien siirtämään verkkotoimintansa pois kalliilta patentoiduilta laitteilta ns. "white box" -laitteille. White box -laitteilla tarkoitetaan merkitöntä palvelinta tai laitetta, jotka ovat räätälöitävissä, mutta huomattavasti edullisempi kuin nimekkäiden laitevalmistajien laitteet ja lisäksi niiden valmistuksessa käyttävät samoja laadukkaita komponentteja kuin kalliimman luokan laitteissa.

### 3 Reunalaskennan määrittäminen

Termiä reuna (engl. edge) on käytetty ensimmäisen kerran 2000-luvun alkupuolella sisällönjakeluverkon (engl. Content Delivery Network, eli CDN) yhteydessä, kun palvelimet siirrettiin lähemmäksi asiakasta palvelun laadun parantamiseksi. Sisällönjakeluverkolla tarkoitetaan maantieteellisesti hajautettua verkkoa. Lähempänä asiakasta sijaitsevien palvelemien tarkoitus oli toimia välimuistina ja nimitys reunalaskenta (engl. edge computing) tuli sen sijainnista verkon topologiassa. 2000-luvun ensimmäinen vuosikymmen muistetaan kuitenkin ensisijaisesti keskitettyjen, suurien datakeskusten sekä pilvilaskennan yleistymisen aikakautena. (Zavodovski 2020: 1.)

Vuonna 2009 Satyanarayanan et al. ehdottivat reunalaskentaa, tarkemmin cloudlet-laskentaa (kts. kappale 3.2.1 Cloudlet), ratkaisuna vahvistamaan mobiililaitteiden sovelluksia, sillä pilvipohjaisien datakeskusten kaukaisesta sijainnista johtuva viive ei täyttänyt interaktiivisten mobiiliapplikaatioiden vaatimuksia. Reunalaitteiden tärkein tehtävä oli laskentaan liittyvät tehtävät, eikä enää suinkaan toimia pelkkänä välimuistina, kuten sisällönjakeluverkon yhteydessä 2000-luvun alussa. (Zavodovski 2020: 1.)

Teollisuusympäristössä IoT-teknologiaa hyödyntävien teollisen internetin ratkaisujen myötä vaatimukset nopeampaan teollisuuslaitteiden ohjaukseen, itseohjautuvuuteen ja optimointiin ovat kasvaneet. Tarve on saada IoT-laitteiden avulla kerätty data analysoituna käyttöön ilman merkittävää viivettä. Jos kerätty data lähetetään pilveen tai konesaliin analysointia varten, syntyy väistämättä viivettä ennen kuin analysoitu ja puhdistettu data saadaan käyttöön siellä missä sitä tarvitaan. Viive datan saannissa tai pahimmassa tapauksessa yhteyden katkeaminen pilvipalveluun voivat olla viivekriittiselle prosessille haitallista, ja tästä voi seurata suoraa tai välillisiä kustannuksia. Lisäksi IoT-laitteiden ja sovellusten yleistymisen myötä verkossa liikkuvan datan määrä on kasvanut merkittävästi. Verkon ja tallennusjärjestelmien kuormittaminen datalla, josta valtaosa on merkityksetöntä, on ensinnäkin turhaa ja toisekseen kallista. Tärkeintä kuitenkin

on saada tieto mahdollisista poikkeamista ja reagoida niihin. (Collin & Saarelainen 2016: 29-36.)

Pilveen virtaavan datan määrää hillitsemään ja sitä kautta verkon kuormitusta keventämään on otettu käyttöön reunalaskenta. Reunalaskenta on hajautettu laskentamalli, jossa datan analysointi tapahtuu lähellä sen keräys- ja käyttöpaikkaa. Läheisyydellä voidaan tarkoittaa fyysistä läheisyyttä. Siinä missä pääpalvelin tai pilvi voivat sijaita fyysisesti eri mantereella, voidaan reunalaitteet sijoittaa jopa samaan tilaan, jossa dataa kerätään tai käytetään. Eli yksinkertaistettuna reunalaskenta tuo verkkopalvelut lähemmäksi käyttäjää lyhentäen näin toimintoihin kuluva viivettä. Arkkitehtuurisesta näkökulmasta katsottuna reunalaskennassa datan prosessointi tapahtuu kirjaimellisesti verkon reunalla. Reunalla viitataan nimenomaan paikkaan, ei niinkään yksittäiseen teknologiaan. Toisin sanoen reunalaskenta voi olla mikä tahansa toiminto, joka tapahtuu datan lähteen, kuten IoT-sensoreiden ja pilvipalvelimen välissä. Tässä tapauksessa IoT on reunalaskennan käyttötapa. Suoritettavia toimintoja voivat olla esimerkiksi datan liittyvää laskentaa, tallentamista, välimuistina toimiminen, prosessointi tai jakelupyynnö (AI-Turjman 2019: 54.) Reunalaskennassa ei ole kyse yksittäisestä teknologiasta vaan ennemminkin yhdistelmä eri yhteen toimivia teknologioita. Reunalaskenta soveltuu ratkaisuksi pilvipalveluihin liittyviin haasteisiin. Reunalaitteet mahdollistavat joustavan, nopean sekä ennakoitavan liiketoimintaympäristön. (Miller 2020: 4.)

Data voi olla aikakriittisyyden perusteella reaaliaikavaatimuksilta vaativaa, maltillista tai ei lainkaan reaaliaikaista. Reunalaskenta soveltuu nimenomaan reaaliaikavaatimuksiltaan vaativan datan ja sovelluksien käsittelyyn. Sellaisen datan prosessointi, jonka reaaliaikavaatimukset ovat maltillisia, voidaan suorittaa reunalaitteilla, mikäli viive loppukäyttäjälaitteen ja pilven välillä on pidempi, kuin sen toiminnallisuus sallii. Muussa tapauksessa tehtävä voidaan suorittaa pilvessä kuten myös tapauksessa, jossa datalla tai sitä käyttävällä sovelluksella ei ole reaaliaikavaatimuksia. Tietyt toiminnallisuudet, kuten vaativamman tason laskenta tai big datan käsittely on reunalaitteiden sijaan kannattavampaa suorittaa pilvessä. Tällaista reunalaitteen ja pilven yhteistoimintaa kutsutaan hybridimalliksi.

(Najmul et al. 2016: 2.) Hybridimallista kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.4 Hybridimalli.

Reunalaskennalle ei ole toistaiseksi standardoitua määritelmää tai arkkitehtuuria. Näin ollen reunalaskennan arkkitehtuurin toteuttamiseen ei ole vain yhtä vaihtoehtoista tapaa ja siihen vaikuttavat esimerkiksi käytetty implementointitapa ja lisäksi sekä fyysinen että virtuaalinen infrastruktuuri. Tätä tukee tässä tutkimuksessa käytetty kirjallisuus, jossa säännöllisesti todetaan, että standardin mukaista määritelmää ei ole, joten useissa lähteessä on oma epävirallinen määritelmänsä reunalaskennalle. Esimerkiksi Illsley toteaa Omdian julkaisemassa raportissaan, että vuosien tutkimustyöstä huolimatta reunalaskennalle ei pystytäkään määrittämään yleisesti hyväksyttyä määritelmää tai selkeää luokittelua. Omdian oman määritelmän mukaan reuna on paikka, jossa loppukäyttäjän tai koneen vasteaika (engl. round trip time, RTT) on maksimissaan 20 millisekuntia. (Illsley 2021: 3.) State of the Edge 2020 -raportissa yleinen reunalaskennan määritelmä on kuvattu seuraavasti:

Laskentakyvyn toimittamista verkon loogisiin ääripäihin sovellusten ja palveluiden suorituskyvyn, käyttökustannusten ja luotettavuuden parantamiseksi. Lyhentämällä laitteiden ja niitä palvelevien pilviresurssien välistä etäisyyttä sekä vähentämällä verkon hyppyjä, reunalaskenta vähentää tämän päivän internetin viive- ja kaistanleveysrajoituksia ottamalla käyttöön uusia sovellusluokkia. Käytännössä tämä tarkoittaa uusien resurssien ja ohjelmistopinojen jakamista nykypäivän keskitettyjen datakeskuksien ja yhä kasvavan laitemäärän välillä, keskittyen erityisesti, mutta ei yksinomaan, tilaa- ja yhteyden infrastruktuuriin ja laitteiden läheisyyteen. (State of the Edge 2020: 58)

### 3.1 Ekosysteemi ja infrastruktuuri

Reunalaskenta on hajautettu laskentamalli, joka tarkoittaa sitä, että työkuormat ovat hajautettu dynaamisesti laitteiden, reunan ja pilven välillä. Reunalaskennan infrastruktuuri voidaan jakaa virtuaaliseen ja fyysiseen infrastruktuuriin, jotka yhdessä muodostavat reunalaskennan ekosysteemin. Näiden lisäksi tässä luvussa käydään erikseen läpi tietoliikenne. Fyysisen infrastruktuurin muodostavat palvelimet sekä muut laitteet, joita käytetään reunalla laskennassa ja muissa

toiminnoissa. Virtuaalisen infrastruktuurin muodostavat ohjelmistoalustat ja -komponentit, protokollat sekä yleiset standardit. (Zavodovski 2020: 3) State of Edge 2021 -raportissa on listattu kriittisiä infrastruktuurin elementtejä, joiden tulee toimia saumattomasti yhteen, jotta reunalaskenta on ylipäättään mahdollista. Kuten kyseisessä raportissa osuvasti mainitaan, sanonta ”ketju on vain niin vahva kuin sen heikoin lenkki” pätee hyvin myös reunalaskentaan ja internet-pohjaiseen infrastruktuuriin. Nämä infrastruktuurin elementit ovat datakeskukset, langattomat mastot ja kaapelipäätteet, maanpäällinen yhteys (kuitu), ei-maanpäällinen yhteys (satelliitti), verkot ja tietoliikenneyhteydet, palveluntarjoajat sekä kaikkien edellä mainittujen elementtien väliset kumppanuudet. (State of Edge 2021: 18.)

Reunakerros sijaitsee keskellä arkkitehtuurihierarkiaa ja koostuu maantieteellisesti hajautetuista reunasolmuista. Se tarjoaa käyttäjilleen hajautettua, älykästä ja langattomia toimintoja, kuten laskentaa. Reunasolmu koostuu fyysisestä laitteistosta sekä sen toiminnallisuudesta. Reunasolmut voidaan ottaa käyttöön verkkoinfrastruktuurissa, kuten tukiasemilla, tienvarsiyksiköissä, mobiililaitteissa, gateway-laitteissa ja vastaavissa paikoissa, jotka on varusteltu tallennus- ja laskentakapasiteetilla. Reunasolmun toiminnallisuus sisältää toimintoja, jotka mahdollistavat reunasovelluksien suorittamisen. Tällaisia ovat esimerkiksi virtualisointialusta tai tietoliikenteen reitittäminen. Päätelaitteiden viiveherkät ja laskentaresursseja vaativat tehtävät voidaan siirtää lähellä sijaitsevalle reunasolmulle suoritettavaksi. Reunasolmulle tyypillisiä käytössä olevia resursseja ovat kommunikointitoiminnot, välimuisti sekä laskentaan liittyvät toiminnot, ja nämä resurssit voivat vaihdella reunasolmukohtaisesti. Kommunikointitoimintoja ovat esimerkiksi kaistanleveyden ja lähetystehon säädöt. Lähetystehon säädöllä pienennetään verkon häiriötasoa, parannetaan yhteyden laatua ja säästetään päätelaitteen akkua. Reunalaitteiden tallennus- ja laskentatoiminnot ovat useimmiten rajalliset. (Vene 2018: 5-6; Zhang 2021: 11.)

## **Fyysinen infrastruktuuri**

Fyysisen infrastruktuurin toteuttamiseen on Zavodovski esittänyt kolme eri mallia. Ensimmäinen on MEC, joka on toistaiseksi vielä pilottivaiheessa, mutta siihen liittyvien asennustöiden odotetaan alkavan 5G:n käyttöönoton myötä. Toinen malli on pilvipalvelutarjoajien infrastruktuurin laajentuminen reunalle. Microsoft, Amazon Web Services (AWS) ja Google ovat tehneet jo toimenpiteitä tämän eteen. Tämän hetken haasteena on, että pilvipalveluntarjoajilla ei ole paikallisia palvelimia reunalaskentaa varten, joten asiakkaiden täytyy itse hankkia ja ylläpitää yhteensopivia laitteita. Vastareaktiona tähän ongelmaan Google on ehdottanut yhteistyötä paikallisten operaattoreiden kanssa palvelimien käyttöönottoon liittyen ja omaa teknologiaansa hyödyntäen. AWS on esitellyt ratkaisun, jossa paikallisesti kattavat datakeskukset sijoitettaisiin tiheästi asutetuille alueille tarjoten alueen asukkaille ja toimijoille reunalaskennan kaltaisia hyötyjä, kuten matalaa viivettä. Kolmas malli on lohkoketjuteknologiaan (engl. blockchain) perustuva joukkoistaminen (engl. crowdsourcing), joka on ilmiönä tuttu erityisesti kryptovaluutan louhintaan liittyen. Joukkoistaminen ilmiönä on reunalaskennalle kiinnostava erityisesti siksi, että kuluttajien tietokoneet sijaitsevat siellä, missä laskentakapasiteettia eniten tarvitaan, eli verkon reunalla. (Zavodovski 2020: 3-5.) Myös AI-Turjman ehdotti lohkoketjuteknologiaa infrastruktuurimuodoksi IoT-ratkaisujen ja pilvipalveluiden välille ratkaisten näin IoT:n tietoturva-asteet.

Fyysisen infrastruktuurin haasteena on, että edistyneen reunalaskennan saavuttamiseksi, sen tulisi kattaa laajoja maantieteellisiä alueita ja reunapalvelimien tulisi sijaita lähellä käyttäjää paikasta riippumatta. Toisaalta taas isojen datakeskusten taloudellinen etu on, esimerkiksi huoltoon tai tukeen liittyvien kulujen kannalta, että laskentaan tarvittavat laitteet sijaitsevat kaikki yhdessä paikassa. Tämä taas ei ole maantieteellisesti ja hallinnollisesti hajautettujen reunalaitteiden kanssa mahdollista. (Zavodovski 2020: 5.)

Reunalaskennan laitteistoon (engl. hardware) liittyviä rajoitteita asettavat esimerkiksi olosuhteet, laitteiston sijainti, käyttökohteen asettamat vaatimukset sekä reunalaitteiden toteutusympäristö, joita voi olla esimerkiksi kontti tai teolli-



suuskaappi. Käyttökohteen asettamia vaatimuksia voivat olla esimerkiksi tekoälysovellusta varten tehokas grafiikkaprosessori tai alhainen virrankulutus akun kestävyuden varmistamiseksi. Reunalaitteiden skaala on laaja aina useiden palvelimien räkkikaapista tuotantolinjastolla sijaitsevaan älykameraan. Yksi reunalaitteelle asetettu kriteeri erityisesti liiketoimintaympäristössä on sen kyky tuoda pilvipalvelut ja pilvipohjaiset sovellukset verkon reunalle. Tätä laitteiston ja ohjelmiston yhdistämistä kutsutaan hybridipilvi-infrastruktuuriksi. Tällaisia ovat esimerkiksi Google Anthos, AWS Outposts sekä Azuren Stack Edge ja Private Edge Zone. Nämä palveluntarjoajat tarjoavat laitteistoja, joiden palveluiden ja ohjauksen taso sekä käyttökokemus ovat kuten julkisella pilvellä. Toisinaan se, kuinka hyvin laite tukee 5G-yhteyttä, voi olla yritykselle ratkaiseva ominaisuus. (State of the Edge 2021: 26, 31.)

### **Virtuaalinen infrastruktuuri**

Reuna-alusta (engl. edge platform) tarjoaa rajapinnan reunasovelluksien suorittamista varten. Tämän lisäksi reuna-alusta suorittaa tietoliikenteen ohjausta sekä muita hallinnollisia tehtäviä, esimerkiksi virtuaalikoneisiin liittyen. Reuna-alusta voi myös itsessään tarjota palveluita, kuten väylän laitteiden välistä kommunikointia varten. (Vene 2018: 6.)

Reunasovellus (engl. edge application) on reunasolmulla suoritettava yksittäinen ohjelmisto, joka tarjoaa reunapalveluita. Kuluttaja voi olla joko toinen reunasovellus tai loppukäyttäjä. (Vene 2018: 7.)

Ohjelmistot (engl. software) ovat vastuussa sovelluksien toiminnasta, laitteistojen hallinnasta sekä työkuorman siirtämisestä verkossa. State of the Edge 2021 -raportissa (2021: 46-47) reunapino jaetaan kolmeen kerrokseen seuraavasti:

- Alin kerros on järjestelmäkerros, jossa sijaitsee esimerkiksi laiteohjelmistot, käyttöjärjestelmät ja virtualisointialustat. Nämä mahdollistavat suoran toiminnan reunalaitteiden kanssa.
- Toinen kerros kattaa toteutuksen ja hallinnan. Tässä kerroksessa toimivat ohjelmistot ja työkalut, kuten Microsoft AKS, Kubernetes ja OpenStack, joiden tarjoamat palvelut tukevat moderneja sovelluksia.

- Ylimmässä kerroksessa sijaitsee työkalut, joiden avulla otetaan käyttöön ja hallitaan sovelluksia.

## Tietoliikenne

Verkon sekä reunalaskennan toimintaan liittyy joitakin avaintermejä, jotka käydään aluksi läpi:

- Viive, latenssi: Reunalaskennassa viiveellä tarkoitetaan verkon tiedonsiirrossa tapahtuvaa aikaa, joka datalla kuluu siirtyessä sen alkuperäisestä laitteesta aiottuun kohteeseen. Toisin sanoen aika, joka kuluu stimulaation ja vasteen välillä. Siitä käytetty yksikkö on millisekunti, eli ms. Vastaukseen kuluva viive muodostuu tiedonsiirtoon kuluva viiveestä, laskentaan kuluva viiveestä sekä etäisyydestä johtuvasta viiveestä. Pilvipalveluille tyypillinen viive on useimmiten vähintään 80 ms. Verkkodata ei voi kulkea valonnopeutta nopeampaa, jonka vuoksi pitkillä fyysisillä etäisyyksillä viive kasvaa.
- Värinä: Värinä tai viivevaihtelu viittaa viiveen vaihteluun ajan kuluessa.
- Verkkohyppy: Viiveeseen ja värähtelyyn vaikuttavat myös verkkohyppyjen (engl. hop) määrä. Verkkohyppyt voivat olla laitteita, kuten reititin tai kytkin, jonka läpi data kulkee. Koska verkkolaitteilla saattaa sijaita prosessointia vaativa puskurimuisti, on niillä taipumusta lisätä tiedonsiirtoon kuluva viivettä, joka puolestaan vaikuttaa viivevaihteluun eli värähtelyyn. Mitä enemmän hyppyjä, sitä korkeampi viive ja laajempi värähtely. (State of the Edge 2021: 35.)

IoT-laitteiden kommunikointivaatimukset vaihtelevat laajasti: toisinaan sensorilla saattaa olla vaatimuksena hyvin matala akun kulutus ja dataa siirretään vain harvakseltaan, kun taas ääripään esimerkki on laite, joka kerää jatkuvasti dataa ympäristöstään ja jonkin poikkeaman havaittuaan vaatii reaaliaikaista reagoimista. Perinteiset radioyhteydet kuluttavat paljon virtaa sekä niihin tarvittavat komponentit ovat kalliita, ja toisinaan IoT-laitteet ovat WLAN-verkon kantaman ulkopuolella. Ratkaisuna muun muassa näihin ongelmiin on kehitetty useita IoT-laitteiden tiedonsiirtoon optimoituja LPWAN (Low Power Wide Area Network) -teknologioita, jotka tukevat suurta laitemäärää, pienien datamäärien siirtämistä ja

pitkää akun kestoa. Tällaisia ovat LoRa, Sigfox ja Weightless. Näiden verkohallintaan liittyy kuitenkin haasteita: ne saattavat vaatia alueellista ylläpitoa verkko-operaattorilta tai käyttäjän tulee itse pystyttää verkko laitteitaan varten. Näiden lisäksi astetta edistyneisempiä ovat NB-IoT (NarrowBand IoT) ja LTE-M (Long Term Evolution for Machines), jotka toimivat 4G-verkossa, mahdollistavat virransäästötoimenpiteillään jopa kymmenen vuoden akunkeston IoT-sensoreille ja ulottuvat haastavimpiinkin kohteisiin, kuten maan alle. Koska datan siirtämisessä on käytössä matkapuhelinpuolen taajuudet ja standardit, altistuu tiedonsiirtoliikenne vähemmille häiriöille ja uhille. (Sundhar & Miller 2017: 22-23.) Muita IoT- ja reunalaitteiden välisessä kommunikoinnissa käytettyjä langattomia ja lyhyemmän kantavuuden omaavia verkkoteknologioita ovat esimerkiksi BLE (Bluetooth Low Energy), WLAN eli Wi-Fi sekä IEEE 802.15.4 -standardiin pohjautuva ZigBee, sekä tiedonsiirron standardit MQTT, CoAPP ja AMQP. (Collin & Saarelainen 2016: 165-185; Sundhar & Miller 2017: 22-23.)

Muun muassa energiansäästösyistä monet IoT-laitteet eivät tue IP-pohjaista tietoliikenneteknologiaa ja tästä syystä kommunikoinnissa käytetään jotakin muuta langatonta protokollaa, kuten Bluetoothia. Tiedon keräämistä ja ohjaamista varten tarvitaan esimerkiksi IP-yhdyskäytävä, jota voidaan käyttää reunasolmuna. Reunasolmu puolestaan jakaa keräämänsä tiedon verkkoyhteyden välityksellä pilvipalvelimen kanssa. (Buyya et al. 2019: 14-15.)

Vaikka 5G-yhteys onkin monien reunalaskentaa hyödyntävien sovelluksien edellytys, se ei ainakaan toistaiseksi ole vaatimus suurimalle osalle reunasovelluksista. Monet yrityksille suunnatut reunasovellukset käyttävät langallista verkkoyhteyttä ja langattomista yhteyksistä 4G-LTE ja sen eri variantit, kuten edellä mainitut LTE-M ja NB-IoT ovat usein riittäviä. Tänä päivänä käyttöön otettujen LTE-pohjaisten ratkaisujen arvioidaan pysyvän toiminnassa seuraavan vuosikymmenen tai sitä pidemmän ajan. (State of the Edge 2021: 42.)

Reunalaskennan näkökulmasta 5G:n mielenkiintoinen ominaisuus on, että se on itsessään reunalaskennan käyttötapaus. Monet 5G:n sovellukset ovat riippu-

vaisia reunalaskennasta, jotta reaaliaikainen vuorovaikutus, riittävä tiedonsiirtonopeus ja datan saatavuus toteutuu. Hyöty on kuitenkin molemminpuolinen.

5G:n ominaisuuksia, jotka tukevat reunalaskentaa ovat:

- SDN, software-defined networking
- NFV, network-function virtualization
- MIMO
- Dynaaminen liitäntä langattomiin verkkoteknologioihin, kuten WiFi-verkkoon.
- Device-to-device kommunikaatio, eli laitteiden välinen kommunikointi. (Najmul et al. 2016: vi.)

## 3.2 Implementointitavat

Loppukäyttäjien laitteiden sekä pilven välillä oleva reunakerros voidaan implementoida eri tavoin käytössä olevien laitteiden, viestintäprotokollan, verkkoliikenteen sekä reunakerroksessa tarjottavien palveluiden suhteen (Dolui & Datta 2017: 1.) Tässä kappaleessa esitellään lähdemateriaalien perusteella kolme yleisintä menetelmää reunalaskennan implementointiin sekä neljäntenä yksi hieman harvemmin lähdemateriaaleissa mainittu menetelmä. Nämä ovat cloudlet, sumulaskenta (fog computing), MEC (multi-access edge computing) sekä mikrodatakeskus (micro data center). Näiden lisäksi verkkoyhtiö Cisco listaa ”emergency response unitsin” omaksi implementointimenetelmäkseen. Tätä menetelmää ei tämän opinnäytetyön kirjallisuuskatsausta varten käytetyissä lähteissä ole muualla tullut vastaan, joten se rajataan tämän opinnäytetyön ulkopuolelle. Kun tässä opinnäytetyössä käsitellään reunalaskentaa, toimii se ns. sateenvarjoterminä, jolla tarkoitetaan reunalaskentaa käsitteenä yleisesti eikä mitään tiettyä implementointitapaa, ellei toisin mainita.

### 3.2.1 Cloudlet

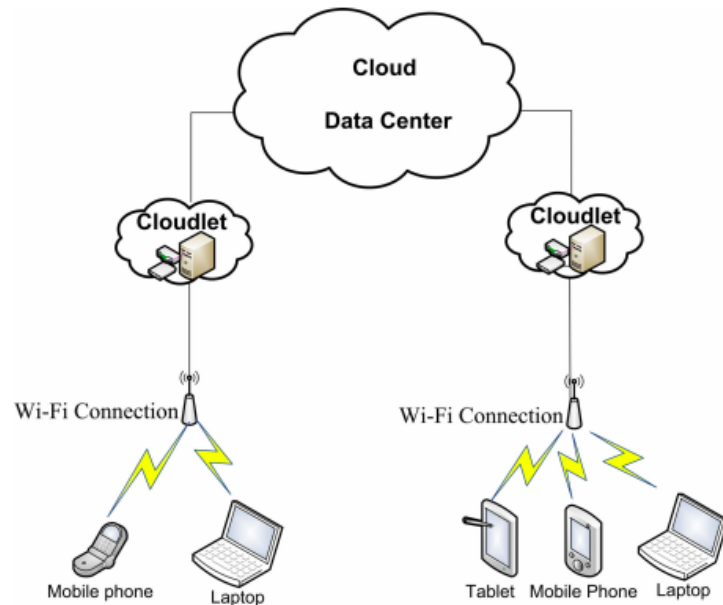
State of the Edge 2020 -raportissa cloudlet on määritelty seuraavasti:

Akateemisissa piireissä tämä termi viittaa liikkuvuudella tehostettuun yksityiseen tai julkiseen pilveen infrastruktuurin reunalla. Se on

synonyymi termille Edge Cloud (reunapilvi). Sitä on myös kirjallisuudessa käytetty vaihtokelpoisesti Edge Data Centerin (reunadakeskus) ja Edge Noden (reunasolmun) kanssa. Kolmikerroksisessa laskenta-arkkitehtuurissa termi cloudlet viittaa keskimmäiseen kerrokseen, ensimmäisen kerroksen ollessa pilvi ja kolmannen kerroksen ollessa älypuhelin, puettava laite, älysensori tai muu vastaava painon, koon tai tehon puolesta rajoitettu kokonaisuus. Sisällönjakeluverkon yhteydessä cloudlet viittaa käytäntöön ottaa käyttöön itsepalvelusovelluksia sisällönjakeluverkkosolmussa. (State of the edge 2020: 56.)

Englanninkieliselle cloudlet-termille ei löytynyt vakiintunutta suomenkielistä vastinetta. Tässä opinnäytetyössä käytetään termiä cloudlet, cloudlet-malli tai cloudlet-laskenta. Englanninkielisellä termillä cloudlet, eli pilvenhattara, viitataan ikään kuin pienempään versioon pilvestä ja käytännössä cloudlet voi olla pieni datakeskus. Cloudletin laitteilla on datakeskukselle ominainen kapasiteetti, mutta huomattavasti pienemmässä mittakaavassa ja fyysisesti lähempänä käyttäjää, eli mobiililaitetta. Se mahdollistaa loppukäyttäjän laitteen laskentaprosessien siirtämisen cloudlet-laitteelle, jonka resurssitarjonta on samankaltainen kuin konesalilla. Cloudlet-laskennalle tyypillinen toteutustapa onkin ”data center in a box”, eli konesali yksittäisessä kotelossa. Cloudlet koostuu ryhmästä moniydintietokoneita nopealla internetyhteydellä sekä suuren kaistanleveyden langattomasta lähiverkosta, jota lähellä sijaitsevat mobiililaitteet voivat hyödyntää. Paikoissa, jossa ei voida varmistaa fyysisien laitteiden olevan turvassa ulkopuolisilta, on cloudletit sijoitettu suojattuihin koteloihin, eli ”in a box”. Kotelo, eli reunalaitteet voidaan sijoittaa esimerkiksi yrityksen omiin tiloihin kuten tuotantolaitokseen tai kuluttajien saataville esimerkiksi kahvilaan tai ostoskeskukseen. Motiivi cloudletin takana on parantaa mobiilisovellusten interaktiivista suorituskykyä erityisesti latenssiherkissä sovelluksissa. (Bilal et al. 2017: 101; Ren ym. 2019: 125:8.) Cloudletit käyttävät tyypillisesti WiFi-yhteyttä parantaen suoritusnopeutta ja säästävät mobiililaitteiden akkua, kun vaativampi laskenta voidaan siirtää mobiililaitteen sijaan cloudletille suoritettavaksi. Cloudlet on myös yhteydessä pilveen ja voi näin tarjota käyttäjilleen pilvipalveluiden hyötyjä. Ne pystyvät prosessoimaan kerätyn datan paikallisesti, jolloin pilveen siirrettävän tietoli-

kenteen määrä vähenee, kaistanleveyttä ja tallennuskapasiteettia tarvitaan vähemmän ja viive pienenee. (Babar ym. 2019: 29611.) Kuvassa 3 on esitetty cloudletin yksinkertaistettu arkkitehtuuriesimerkki.



Kuva 3 Cloudlet-laskennan yksinkertaistettu kolmikerroksinen arkkitehtuuriesimerkki (kuva lainattu Babar et al. 2019: 29610)

Käytännössä cloudlet on reuna-alustaratkaisu, joka voi hyödyntää virtuaalikooneita resurssien tarjoamiseen päätelaitteille ja loppukäyttäjille reaaliajassa WLAN-verkon kautta. Tämä vastaa mobiilisovelluksien ja palveluiden korkean laskentaresurssitarpeen ja matalan viiveen vaatimuksiin. (Dolui & Datta 2017: 3).

Zavodovski (2020: 19-20) on tutkimuksessaan laajentanut cloudlet-mallin ylettymään pilvipalveluntarjoajien toimesta kehitteillä oleviin pienempiin datakeskuksiin, eli ns. reunadatakeskuksiin, josta kerrotaan lyhyesti kappaleen 3.1 Ekosysteemi ja infrastruktuuri kohdassa fyysinen infrastruktuuri. Cloudlet-laskennan on tarkoitus hyödyntää perinteistä pilviteknologiaa reuna- ja pilvilaskennan yhteensovittamisen parantamiseksi. Cloudlet-mallin virtuaalinen infrastruktuuri on edistynyt ja useilla pilvialustoilla ja teknologioilla on jo olemassa laajennus tai muu yhteensovittamismenetelmä reunaympäristön kanssa. Zavodovskin tutkimuk-

sessä cloudlet-laskennan todetaan soveltuvat parhaiten sovelluksille, joissa optimaalinen latenssi on noin 40 ms. Tällaista latenssia vaativat esimerkiksi reaaliajassa tapahtuva online pelaaminen sekä videoiden toistaminen.

### 3.2.2 Sumulaskenta

Vuonna 2014 verkkoyhtiö Cisco loi käsitteen Fog Computing, josta käytetään suomennosta sumulaskenta. Nimitys tulee siitä, että sumu toimii ikään kuin pilven jatkeena, sumulle tyypilliseen tapaan lähelle maata laskeutuneena, eli tässä tapauksessa lähelle loppukäyttäjää. Arkkitehtuurissa ne voivat sijaita missä tahansa päätelaitteen ja pilven välissä. Kyseessä on hajautettu laskentakonsepti, jossa laskenta- ja tiedontallennusresurssit sekä sovellukset ja niiden sisältämä data on sijoitettu optimaalisimpaan paikkaan arkkitehtuurissa, tavoitteena parantaa suorituskykyä ja varmennusta. Useissa tutkimuksissa sumulaskentaa tarkastellaan irrallaan reunalaskennasta omana toteutusparadigmana. Tämä tarkoittaa sitä, että samassa arkkitehtuuriratkaisussa voi sijaita sekä reunakerros että sumukerros erikseen. Tässä opinnäytetyössä reunalaskentaa käytetään sateenvarjoterminä, jonka alle sumulaskenta lukeutuu yhtenä implementointimenetelmänä. (State of the Edge 2020: 59.)

Sumulaskenta on laskentainfrastruktuuri, joka perustuu sumusolmuihin (Fog Computing Nodes, FCN). Tämän menetelmän avainroolissa olevat sumusolmut ovat luonteeltaan heterogeenisiä ja ne voivat olla joko fyysisiä solmuja, kuten langaton reititin, kytkin ja M2M- tai IoT-yhdyskäytävä tai virtuaalisia solmuja. Niitä käytetään datan laskennassa ja tallentamisessa ennen tiedon edelleen lähettämistä pilveen. Heterogeenisyydellä tarkoitetaan kykyä tukea monipuolisesti eri laitteita ja ohjelmistoja. Sumusolmujen heterogeenisyyden ansiosta ne tukevat sekä eri protokollakerroksien laitteita, ja suorittavat tarvittaessa protokollasta toiseen kääntämistä, kuin myös ei-IP -pohjaista liitäntäteknologiaa sumusolmujen ja päätelaitteiden välisessä kommunikaatiossa. Solmujen heterogeenisyys on piilotettu päätelaitteilta paljastamalla yhtenäisen sumuabstraktikerroksen, joka pitää sisällään erilaisia toimintoja resurssien allokointiin, ohjaukseen, suojaukseen ja laitehallintaan liittyen kuten myös laskenta- ja tallennuspalveluita.

Näitä toimintoja hyödyntää palveluiden orkestrointikerros (engl. Service Orchestration Layer), joka saa käskyjä päätelaitteelta, jonka pohjalta kohdistetaan resursseja käskyjen vaatimuksien mukaan. (Dolui & Datta 2017: 1, 3.)

Sumulaskenta yhdistetään erityisesti IoT-laitteiden avulla kerätyn datan prosessointiin. Useissa tapauksissa IoT-sovellukset eivät ole kovin viivekriittisiä, koska tärkein tehtävä on kerätä ja prosessoida dataa. Toisaalta taas osa IoT-sovelluksista voivat olla herkkiä viiveen laajalle vaihtuvuudelle, jolloin sen toleranssi tulisi olla matala. (Zavodovski 2020: 21.)

Sumulaskennan ultimaattinen muoto on usvalaskenta (engl. mist computing), jossa IoT-sensorit tai toimilaitteet itsessään suorittavat rajoitetussa määrin laskentaan liittyviä tehtäviä, lähinnä esiprosessointia. Paikallisen tiedonkäsittelyn avulla saadaan pienennettyä liityntäverkon kuormaa. (Zavodovski 2020: 21; Kumar 2020: 32.)

### 3.2.3 Multi-access edge computing (MEC)

Multi-access edge computing (MEC), on European Telecommunication Standards Instituten (ETSI) ehdottama ja kehittämä toteutusmenetelmä. ETSI:n perustaman toimialan standardointiryhmä kehittää määritelmää standardoitua ja avointa MEC-ympäristöä varten. Ryhmän jäseniä ovat mm. Nokia, Huawei, Intel ja Vodafone. (Ren et al. 2019: 125:6.) Tästä menetelmästä on käytetty termiä mobiilireunalaskenta (eng. mobile edge computing), mutta menetelmän liittyvä tutkimus laajennettiin ylettymään mobiiliverkkojen ulkopuolelle huomioiden muitakin liityntäteknologioita, kuten Wi-Fi ja kiinteät yhteydet, joten nimeksi vaihdettiin multi-access edge computing, jonka vapaa käänös on moniliityntä reunalaskenta. MEC ehdottaa tallennus- ja prosessointiominaisuuksilla varustettujen välisolmujen käyttöönottoa solukoverkkojen tukiasemilla tarjoten näin pilvilaskentapalveluita RAN-verkon sisällä. MEC pyrkii täydentämään langattomia 4G- ja 5G-tukiasemia standardoidulla ohjelmistoalustalla, ohjelmointirajapinnalla ja ohjelmointimallilla tavoitteena mahdollistaa ja käyttöönottaa sovelluksia langat-



tomien verkkojen reunalla, eli lähempänä tilaajaa. Tämän ansiosta käyttäjäkokemus paranee matalan viiveen, paikkatietoisuuden, verkon sisältötietoisuuden sekä käytettävissä olevan kaistanleveyden myötä. Palvelun tarjonnan hallinta siirtyy näin mobiiliverkkojen operaattoreille. (Al-Turjman 2019: 34; Dolui & Datta 2017: 1; State of the Edge 2020: 62.)

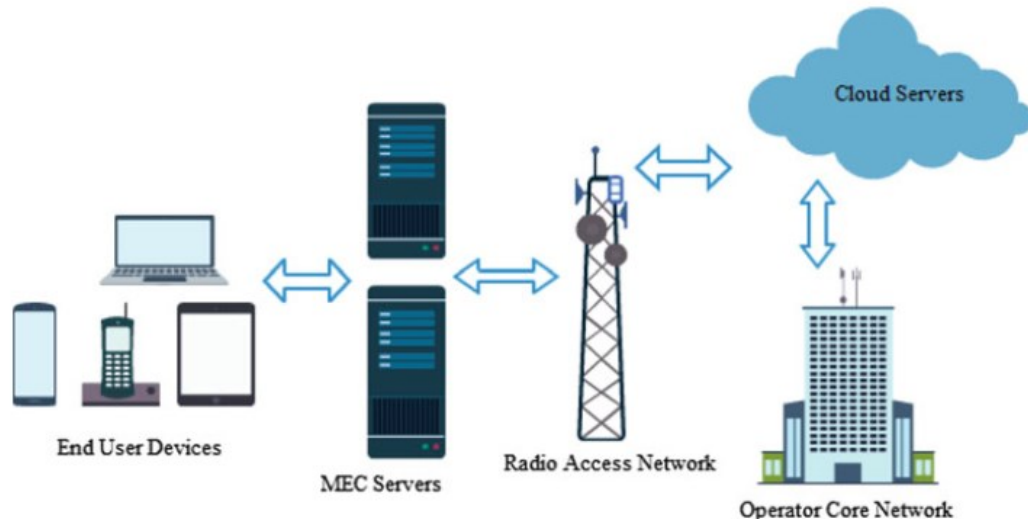
Arvioidaan, että 5G:n myötä MEC:n toteutukseen liittyvät asennustyöt voitaisiin aloittaa, vaikka teknologia ei varsinaisesti vaadi 5G-yhteyttä tai ole siitä riippuvainen. Toistaiseksi MEC on pilottivaiheessa. MEC-menetelmän ennustetaan olevan optimaalisin infrastruktuuriratkaisu kaikkein latenssikriittisempien, liikkuvien sovelluksien käyttöön, kuten videoanalysointi, ajoneuvojen välinen kommunikatio, lisätty todellisuus (AR) ja virtuaalitodellisuus (VR), koska sovellukset suoritetaan verkon reunalla, eikä kaukana konesalissa tai pilvessä. Tämä mahdollistaa loppukäyttäjälle nopean ja tehokkaan datankäsittelyn, lisää energiatehokkuutta ja tallennuskapasiteettia sekä lisäksi tukee liikkuvuutta. Verkon reunalla sijaitseva datan käsittely- ja tallennuskapasiteetilla varustettu hajautettu arkkitehtuuri voi suorittaa algoritmeja sovelluksille reaaliaikaisesti, esimerkiksi kasvojentunnistusta ja näin vähentää pilveen siirrettävän datan määrää. (Zavodovski 2020: 17; Al-Turjman 2019: 35.)

MEC-teknologian yksinkertaistettu arkkitehtuuriesimerkki on esitetty kuvassa 4. Se koostuu seuraavista elementeistä, kuvaa vasemmasta laidasta oikealle:

- Loppukäyttäjien laitteet (end user devices) tai päätelaitteet: Näitä ovat esimerkiksi tietokoneet, mobiililaitteet (älypuhelimet tai tablettitietokoneet), ajoneuvot, sekä IoT-laitteet. Päätelaitteet toimivat palveluiden kuluttajina. Ne yhdistyvät arkkitehtuurin seuraavaan vaiheeseen, eli reunapalvelimiin langattoman verkon avulla. Resursseiltaan rajalliset laitteet voivat siirtää laskentakapasiteettia vaativia tehtäviä reunalaitteille suoritettavaksi.
- MEC-palvelimet. Reunakerros sijaitsee loppukäyttäjien ja pilvikerroksen välissä. Tämä kerros alkaa asiakaslaitteen yhteyspisteestä. Pilvipalveluiden avulla reunakerros tukee ja parantaa tilaajien (loppukäyttäjien) suorituskykyä.
- RAN (radio access network), langaton liityntäverkko

- Pilvipalvelimet (cloud servers). Monipuolisilla ja edistyneellä tallennus-, prosessointi- ja laskentakapasiteetilla varustetut palvelimet sijaitsevat tyypillisesti keskitetyssä konesalissa. Pilvipalveluiden avulla voidaan myös hallita reunalaitteita turvallisen yhteyden avulla.
- Operaattorin core-verkko (operator core network)

MEC-palvelimet ovat laskentalaitteita, jotka sijoitetaan tukiasemalle tai sen välittömään läheisyyteen, ja niitä hallinnoivat verkko-operaattorit. Ne voivat olla myös tienvarsiyksiköitä, langattomia liityntäyksiköitä, yhdyskäytäviä tai muita laskentaresursseja omaavia laitteita, kuten mobiililaitteet tai ajoneuvot. MEC-laitteet on varustettu rajallisella laskenta- ja tallennuskapasiteetilla. MEC-palvelimien laskentaresurssit on virtuaalisoitu ja paljastuvat sovellusrajapintojen kautta. Näin ne ovat sekä loppukäyttäjän että operaattorin käytettävissä, ja tarjoavat lisäksi virtuaalikoneita palvelemaan mobiililaitteiden laskentatarpeita, sekä muita toimintoja, kuten sisällön välimuistia, liikkeenseuranta- ja paikannuspalvelua. (AI-Turjman 2019: 36-38; Zhang 2021: 11.)



Kuva 4 Esimerkki MEC arkkitehtuurista (kuva lainattu: AI-Turjman 2019: 37)

ETSI:n mukaan MEC voidaan luonnehtia seuraavilla ominaisuuksilla:

- Paikallisverkko: MEC-alustat voivat toimia erillään muusta verkosta säilyttäen samalla pääsyn paikallisiin resursseihin. Tämä ominaisuus

on tärkeää koneiden välisessä (M2M) kommunikoinnissa, kuten turvajärjestelmissä ja muissa joustavuutta vaativissa toiminnoissa.

- Läheisyys: MEC palvelimet sijaitsevat tyypillisesti lähellä mobiilikäyttäjää. Tästä on hyötyä esimerkiksi tiedon keräämisessä analytiikkaa tai big dataa varten tai nopeaa laskentatehoa vaativien sovelluksien käytössä.
- Matala viive: Palvelimien läheisyydestä johtuen käyttäjät pääsevät nauttimaan matalasta viiveestä. Tämä vaikuttaa muun muassa reaktioaikaan, käyttökokemukseen sekä verkon ruuhkan vähentämiseen.
- Paikkatietoisuus: Läheisyyden ansiosta MEC hyödyntää reunalaitteilta saatua signaalitietoa kunkin kytketyn laitteen sijainnin määrittämisessä. Tämä mahdollistaa reaaliaikaisen vuorovaikutuksen ja päätöksenteon.
- Verkon sisältötiedot: Verkkotietoja, kuten kaistan ja solun alueen ruuhkautumista voidaan ennakoida ja sen perusteella tehdä älykkäitä päätöksiä palvelun parantamiseksi. (Zhang 2021: 6.)

### 3.2.4 Mikrodatakeskukset

Kolme edellä mainittua implementointitapaa ovat erityisesti tuoreemmassa kirjallisuudessa selvästi yleisimmin esitellyt reunalaskentamenetelmät. Tästä huolimatta esitetään mikrodatakeskukset vielä neljäntenä implementointimenetelmänä.

Microsoft Research on esitellyt mikrodatakeskusten konseptin ikään kuin laajenuksena valtavan mittakaavan pilvdatakeskuksille. Toisin kuin perinteinen datakeskus, mikrodatakeskus koostuu yhdestä kotelosta tai IT-kaapista ja pitää sisällään kaikki datan laskentaan ja varastointiin tarvittavat laitteet sekä verkkolaitteet, mukaan lukien palvelimet, virtuaalikoneet, jäähdytysyksikkö, verkkoyhteys, katkeamaton teholähde (UPS) sekä turvallisuus- ja kulunvalvontayksiköt. Se on suunniteltu vastaamaan sellaisten sovelluksien tarpeisiin, jotka vaativat matalaa viivettä tai kohtaavat rajoituksia akun käyttöiän suhteen. Mikrodatakeskukset soveltuvat aloille, joissa vaaditaan reaaliaikaista tai lähes reaaliaikaista tietojen käsittelyä. Tästä esimerkkinä teollisuusautomaation ratkaisut sekä ympäristön seuranta. Mikrodatakeskusten käyttö ei suinkaan rajoitu pelkästään edellä mainittuihin esimerkkikohteisiin. (Al-Turjman 2019: 114; Bilal et al. 2017: 95.)

Mikrodatakeskukset voidaan toteuttaa esimerkiksi tienvarsikaappina tai rahtikonttina, joka sulkee sisälleen rajoitetun määrän palvelininfraa. Pienen koon ansiosta ne on helppo ottaa käyttöön tai tarvittaessa siirtää. Niitä voidaan käyttää varajärjestelminä tai tukemaan viiveherkkiä palveluita. Ne voidaan sijoittaa paikkoihin, joissa normaalisti ei konesalia saataisi toteutettua, kuten rakennusten katolle, metroasemille, parkkihalleihin, urheilustadioniin, yrityspuistoihin tai koulukampuksiin. Alan toimittajat tarjoavat eri toimialoille, kuten valmistavaan teollisuuteen, kokoonpanotehtaisiin ja kaivosteollisuuteen, valmiiksi koottuja ratkaisuja, jotka voidaan helposti konfiguroida ja ottaa käyttöön asiakkaan tarpeen mukaan. (Al-Turjman 2019: 114; State of the Edge 2021: 20.)

### 3.2.5 Implementointitapojen vertailu

Yhteenvedon kolme yleisintä implementointitapaa voidaan kuvata seuraavasti:

- Cloudlet on laskentaresurssi, jonka tyypillinen toteutusmuoto on "data center in a box", joka virtuaalikoneita (VM) hyödyntämällä tarjoaa lähellä oleville mobiililaitteiden käyttäjille WLAN-verkon välityksellä tukea, kuten laskentaa, välimuistia ja tallennusta. Cloudlet-laskenta tarjoaa suuremman kaistanleveyden, joka puolestaan pienentää sovelluksien viivettä, parantaa suoritusnopeutta ja säästää päätelaitteen akkua.
- Sumulaskenta on hajautettu laskentaresurssi, joka voidaan sijoittaa arkkitehtuurissa minne tahansa päätelaitteen ja pilven välille. Sumulaskenta perustuu heterogeenisiin sumusolmuihin, joita voivat olla esimerkiksi reititin tai IoT-yhdyskätävä. Heterogeeninen ympäristö mahdollistaa eri protokollakerroksissa olevien laitteiden ja ei-IP-pohjaisten teknologioiden kommunikoinnin sumusolmujen ja päätelaitteiden välillä.
- MEC eli multi-access edge computing viittaa reunalaskennan malliin, joka on toteutettu langattomassa liityntäverkossa (RAN). Kyseessä on ETSI:n määrittelemä standardoitu reunalaskennan malli, jossa langattomia 4G- ja 5G-tukiasemia on täydennetty standardoidulla ohjelmistoalustalla, API:lla ja ohjelmointimallilla mahdollistaen näin sovellusten toteuttamisen ja käyttöönoton langattoman verkon reunalalla. Mobiiliverkon lisäksi MEC kattaa myös muut liitântäteknologiat.

Taulukkoon 1 on kerätty yhteen eri implementointimenetelmien teknisiä ominaisuuksia selkeämpää vertailua varten. Vertailussa on fyysinen infrastruktuuri,

reunasolmun sijainti, etäisyys päätelaitteesta ja tietoliikenneyhteystekniikka. Etäisyys on mitattu verkkohyppyinä.

Taulukko 1 Implementointimenetelmien vertailu

	<b>Cloudlet</b>	<b>Sumulaskenta</b>	<b>MEC</b>
<b>Solmu-/palvelin-laitte</b>	"Data center in a box"	Reititin, kytkin, gateway	Tukiasemalla toimiva palvelin
<b>Reunasolmun sijainti</b>	Paikallinen/ulkoasennus	Vaihtelee päätelaitteen ja pilven välillä	Radioverkko-ohjain (RNC)/makrotukiasema
<b>Etäisyys (verkkohyppy)</b>	Yksi	Yksi tai useampi	Yksi
<b>Tietoliikenneyhteys</b>	Wi-Fi	Bluetooth, Zig-Bee, Wi-Fi, matkaviestinverkko	Matkaviestinverkko

Dolui & Datta (2017: 5) vertaili julkaisussaan eri implementointimenetelmien (cloudlet, sumulaskenta ja MEC) keskeisimpiä parametreja. Parametrit ovat seuraavat:

- Etäisyys (proximity): Etäisyydellä tarkoitetaan reunakerroksen ja päätelaitteen välistä loogista tai fyysistä etäisyyttä. Loogisella etäisyydellä tarkoitetaan tässä yhteydessä verkkohyppyjen määrää, eli mitä useampi hyppy, sitä suurempi riski on tietoliikenteen ruuhkaantumiselle, häiriöille ja viiveelle. Fyysisellä etäisyydellä tarkoitetaan päätelaitteen fyysistä etäisyyttä korkeimman tason laskennasta vastuussa olevasta reunalaitteesta. Fyysisellä etäisyydellä on vaikutusta laskennassa tapahtuvaan viiveeseen ja pahimmillaan se voi häiritä reaaliajassa tapahtuvien sovelluksien toiminnassa.
- Tietoliikenneyhteys: Tietoliikenneyhteydellä tarkoitetaan tässä kohtaa tapaa, jolla yhteys luodaan reunakerroksen ja päätelaitteen välille. Käytössä oleva yhteys vaikuttaa muun muassa käytettävissä olevaan kaistanleveyteen sekä laitevalikoimaan, joita kyseinen teknologia tukee.

- **Toimintaympäristötietoisuus:** Toimintaympäristötietoisuudella tarkoitetaan tässä tapauksessa paikkatietoisuutta sekä verkon sisältötietoisuutta.
- **Energiankulutus:** Energiankulutus on suurempi radioverkkoa tai LTE-teknologiaa hyödyntävillä laiteilla verrattuna esimerkiksi WiFi-yhteyteen. Energiankulutus kiinnostaa erityisesti siinä tapauksessa, jos päätelaitteella on käytettävissä rajoitetut resurssit.
- **Laskenta-aika:** Laskenta-ajalla tarkoitetaan aikaa, joka kuluu reuna-kerroksessa sille annettuja tehtäviä suorittaessa ja näiden pohjalta saatujen tuloksien lähettämisessä loppukäyttäjälle.

Taulukkoon 2 on kerätty implementointimenetelmien parametrejä ja tehty vertailua näiden välillä. Ne ominaisuudet, jotka on korostettu vihreällä, ovat oletusarvoisesti suotuisia ominaisuuksia reunalaskennassa verrattuna punaisella korostettuihin ominaisuuksiin.

Taulukko 2 Implementointimenetelmien parametrien vertailu

	<b>Cloudlet</b>	<b>Sumulaskenta</b>	<b>MEC</b>
<b>Fyysinen etäisyys</b>	Matala	Matala	Korkea
<b>Energiakulutus</b>	Matala	Matala	Korkea
<b>Laskenta-aika</b>	Matala	Korkea	Matala
<b>Toimintaympäristötietoisuus</b>	Matala	Matala	Korkea
<b>Non-IP -tuki</b>	Ei	Kyllä	Ei

Fyysinen etäisyys on MEC-teknologiassa tyypillisesti korkeampi verrattuna sumulaskentaan ja cloudlettiin johtuen siitä, että MEC reunalaitteet sijaitsevat tyypillisesti tukiasemalla tai sen välittömässä läheisyydessä, jolloin etäisyys voi olla satoja metrejä, toisin kuin kahdessa muussa menetelmässä laitteet voivat sijaita jopa samassa tilassa päätelaitteen kanssa. Myös energiakulutus on MEC-teknologiassa korkeampaa muihin menetelmiin verrattuna. LTE- ja radioverkkoteknologia kuluttaa enemmän energiaa verrattuna cloudletin käyttämään WiFiin tai yleisimpiin sumulaskennassa käytettyihin tietoliikenneyhteyksiin.

Laskenta-aika on sumulaskennassa mahdollisesti korkeampi kuin muissa menetelmissä, johtuen useista verkkohypyistä sekä lisäksi sumulaskennassa käytettyjen reunalaitteiden laskenta- ja tallennuskapasiteetit ovat tyypillisesti matalia, joka johtaa pidempään käsittelyaikaan. MEC- ja cloudlet-menetelmien käyttämä virtualisointitekniologia yhdessä dynaamisen resurssien hallinnan kanssa mahdollistaa nopean laskenta-ajan. Penttinen (2019: 38t) kuitenkin huomauttaa, että MEC:in infrastruktuurissa tulee huomioida, että core-verkon solmu saa sijaita maksimissaan 150 km päässä päätelaitteesta, jotta alle 1 ms viive voi edes teoriatasolla toteutua. Tämä tulee huomioida erityisesti viiveherkkien sovellusten kanssa.

Toimintaympäristötietoisuus on MEC-menetelmässä korkea, johtuen sen sijainnista radioverkossa. Palvelimet saavat tietoa laitteiden sijainnista, verkon kuormituksesta ja kapasiteetista. Sumulaskentalaitteilla ja cloudlet-laitteilla toimintaympäristötietoisuus on tyypillisesti matala tai olematon. Toisaalta taas Ren et al. (2019: 125:7) mainitsee, että sumulaskennan motiivi on nimenomaan paikkatietoisuus ja nopea vasteaika IoT-tekniologian langattoman yhteyden ja liikkuvuuden tukena.

Non-IP -tuki liittyy käytettävissä oleviin tietoliikenneyhteystekniologioihin, jotka ovat sumulaskennan heterogeenisyydestä johtuen kattavampia kuin muilla menetelmillä. Sumulaskenta mahdollista tiedonsiirron laitteilta, joilla ei ole internetiyhteyttä, hyödyntäen muita kommunikointiprotokollia kuten Bluetooth tai Zigbee. (Dolui & Datta 2017: 5-6.)

### 3.3 Reunasolmujen optimointi

Al-Turjman (2019: 24, 26) esittää kirjassaan Edge Computing From Hype to Reality tavan optimoida reunasolmujen käyttöä. Ihanteellisessa tilanteessa käytössä on useampi kuin yksi reunasolmu, jotka voidaan jakaa eri sovelluksien ja niiden vaatimuksien mukaisesti tehtäviin riippuen laitteen laadusta ja resursseista. Al-Turjmanin kirjassa on eri reunasolmuilla suoritettavat toiminnot jaettu

sen mukaan, minkälaisia vaatimuksia on asetettu laskennassa tapahtuvaan viiveeseen ja luotettavuuteen sekä sovelluksien tuottamien käskyjen tiheyteen liittyen. Suoritettavia tehtäviä voivat olla esimerkiksi kuva- ja videotunnistaminen, data-analytiikka tai muu kriittinen toiminto, joka vaatii nopeaa päätöksentekoa eikä viivettä saa esiintyä. Tällainen toiminto tulee suorittaa tehokkaalla palvelimella, joka sijaitsee lähellä datan lähdettä viiveen minimoimiseksi ja pystyy hallitsemaan useita toistuvia käskyjä. Kun taas matemaattista laskentakykyä vaativissa tehtävissä vaatimukset palvelimelle eivät ole yhtä suuret, eikä matalan tason tehtävillä kannata kuormittaa kriittisiä toimintoja suorittavaa palvelintä. Tarvittaessa reunasolmut voivat siirtää keskenään käskyjä solmulta toiselle ja poikkeustilanteissa, jossa esimerkiksi solmu ei ole käytettävissä, voidaan käsky siirtää pilvipalvelimelle suoritettavaksi.

Myös State of Edge 2021 -raportissa (2021: 33, 48) korostettiin laitteiston sijoittelun tärkeyttä, mutta samalla laitteistojen välisen työkuorman jakamisen haastavuutta. Orkestrointitekniikan, kuten avoimeen koodiin perustuva Kubernetes järjestelmän avulla pystytään hallinnoimaan työkuormaa, esimerkiksi työkuorman sijoittelua ja automatisoida reaaliaikaista päätöksentekoa huomioiden samalla reunalle tyypillisiä määritteitä, kuten maantieteellinen sijainti, viive, kaislanleveys tai vaatimukset laitteiston suhteen. Muita tyypillisiä hallintaan liittyviä määreitä ovat prosessori, muistin ja käyttöjärjestelmän vaatimukset. Orkestrointitekniikka ottaa myös huomioon sen, mitkä toiminnot ovat tehokkainta suorituskyvyn kannalta suorittaa reunalla tai pilvessä, mitkä toiminnot ovat loppukäyttäjän akun keston kannalta hyvä suorittaa reunalaitteella päätelaitteen sijaan, mitkä toiminnot ovat viiveherkimpä ja tulisi tästä syystä suorittaa lähellä loppukäyttäjää, ja vaihtoehtoisesti mitkä toiminnot voidaan sijoittaa kauemmaksi vaarantamatta infrastruktuurin suorituskykyä.

### 3.4 Hybridimalli

Reunan ja pilven ominaisuuksista on vertailtu taulukossa 3. Taulukko on samalla yhteenveto näiden kahden laskentamallin ominaisuuksista. Vertailtavat



ominaisuudet ovat resurssit, jotka ovat tässä tapauksessa ensisijaisesti laskenta- ja tallennusresurssit; palvelimien tai laitteiden sijainti, tiedonsiirtoetäisyys päätelaitteelta, arkkitehtuuri sekä kyseiselle laskentamenetelmälle sopivien sovelluksien ominaisuudet.

Taulukko 3 Reunan ja pilven ominaisuuksien vertailua

	<b>Reuna</b>	<b>Pilvi</b>
<b>Resurssit</b>	Rajalliset	Laajat
<b>Palvelimien/laitteiden sijainti</b>	Tukiaseman, yhdyskäytävän tms. yhteydessä, myös esim. IoT-laite itsessään	Keskitetyt konesalit
<b>Tiedonsiirtoetäisyys</b>	Lyhyt, tyypillisesti kymmenistä satoihin metreihin	Pitkä, tyypillisesti sadoista jopa tuhansiin kilometreihin
<b>Arkkitehtuuri</b>	Hajautettu	Keskitetty
<b>Sovelluksen ominaisuuksia</b>	Reaaliaikaista laskentaa ja tiedonsiirtoa vaativa	Viivettä sietävä, korkean tason laskentaa vaativa

Reunalaskennan ei ole tarkoitus toimia itsenäisenä teknologiana eikä varsinkin pilven korvaajana. Reuna toimii pilven täydentäjänä, kirjaimellisesti pilven reunalla, paikaten pilven heikkouksia ja tuomalla palvelut lähemmäksi käyttäjää. Niiden pääasialliset tehtävät ovat tarjota laskenta- ja tallennuskapasiteettiä sekä tiedon jako- ja verkkotoimintoja, tosin näitäkin rajallisesti johtuen rajoitetusta kapasiteetista. Näitä ominaisuuksia täydentää pilvipalvelut käytännössä rajatto-

malla tallennuskapasiteetilla, big datan luhinnalla tai muulla vaativan tason laskennalla, joilla ei ole kannattavaa kuormittaa reunapalvelimia. Tällaista reunalaitteen ja pilven yhteistoimintaa kutsutaan hybridimalliksi. Reunalaitteet ovat hyvä turva tilanteissa, jolloin yhteys pilvipalveluun on jostain syystä poikki. Tällaisessa tilanteessa reunapalvelin pystyy ylläpitämään toimintaa niin, ettei kriittinen toiminta vaarannu. Toisinaan jotkut toiminnot ovat sellaisia, etteivät ne tarvitse lainkaan pilvipalveluita. Vastaavasti pilvipalvelu turvaa reunalaitteiden selustan siinä tapauksessa, jos reunapalvelimet eivät jostain syystä ole käytössä tai reunalaitteiden ylikuormittuessa voidaan niille suunnatut toiminnot siirtää pilvipalvelulle suoritettavaksi. Hybridimalli ei myöskään rajoitu pelkästään yhden pilvipalvelun ja reunan välille. Hybridimalli voi hyödyntää reunan lisäksi sekä julkista pilveä että yksityistä pilveä.

Hyödyntämällä verkon reunaa esimerkiksi IoT-sensorilta kerätyn raakadatan analysointiin ja siirtämällä pilveen ainoastaan reunalla puretut tiedot sekä metadatan, säästyy huomattava määrä kaistanleveyttä. Kun data saadaan prosessoitua reunalaitteella, maksavat yritykset ainoastaan merkityksellisen datan tiedonsiirrosta, prosessoinnista sekä tallennuksesta. Tämä vaikuttaa verkon hallintaan sekä pilvipalveluihin liittyviin kustannuksiin suotuisasti. Lisäksi datamäärä pilvessä vähenee, mikä parantaa laskennan tehokkuutta ja siten palvelun laatua. (Satyanarayanan 2017: 3.)

Ihannetilanteessa reuna ja pilvipalvelut toimivat tiiviissä yhteistyössä tarjoten organisaatiolle joustavan ja sopivan ratkaisun datan keräämistä, prosessointia ja turvallista tallentamista varten. Reunan vahvuutena on reaaliaikaisen datan kerääminen ja prosessointi sekä välimuistina toimiminen, kun taas pilvi tarjoaa keskitetyn tallennusalustan edistyneemmälle analytiikalle. Organisaation näkökulmasta sekä reaaliaikainen reagointi että pitkän ajan datan kerääminen onnistuvat ja molempia toiminnot ovat toiminnan kannalta kriittisiä. (Miller 2020: 5.)

### 3.5 Reunalaskennan motiivit

Yksinkertaistettuna reunalaskennan ajatuksena on suorittaa datan käsittelyyn liittyvät prosessit lähellä sen keräyspaikkaa tai loppukäyttäjää tuomalla samalla verkkopalvelut lähemmäksi käyttäjää. Verrattuna pilvilaskentaan, fyysinen läheisyys madaltaa tiedonsiirrosta aiheutuvaa viivettä sekä mahdollistaa reaaliaikaista dataa hyödyntävän sovelluksen tasaisemman ja varmemman toiminnan. Tämän ansiosta reunalaskenta toimii monien uudenlaisien sovelluksien ja teknologian mahdollistajana. Tässä kappaleessa käydään reunalaskentaan liittyviä motiiveja, eli hyötyjä ja mahdollisuuksia tarkemmin läpi. Hyödyiksi nähdään asioita, jotka ovat tehokkaampia tai jollain mittarilla mitattuna parempia kuin pelkästään keskitettyä pilvipalvelua käytettäessä. Vertaus tehdään pilvipalveluihin sen vuoksi, että se on oletusarvoisin tapa toteuttaa datan laskentapalveluita.

Omdian tekemän tutkimuksen mukaan merkittävin syy reunalaskennan käyttöönotolle yrityksissä on matala viive. Toiseksi merkittävimmät tekijät ovat tietosuoja (datasuvereniteetti) sekä datan tiheys. Muita tekijöitä olivat esimerkiksi (järjestys on suosituimmasta vähemmän suosittuun) edistyneempi käyttäjäkokeemus, edistyneempi tietoturva, säästö kaistanleveydessä, prosessien automatisointi, uudenlaisien ominaisuuksien mahdollistaminen, uudenlaiset tulomahdollisuudet, etäoperointi sekä kehittyneempi laadunvalvonta. Tuloksien perusteella motiivit liittyivät teknisiin ominaisuuksiin, uusien asioiden mahdollistamiseen sekä yksityisyyden suojan parantamiseen (Illsley 2021: 5).

#### **Matala viive ja säästö tiedonsiirtokapasiteetissa**

Kaikilla teollisuuden aloilla on tarpeet liiketoiminnan optimointiin sekä tuotannon tehostamiseen. IoT mahdollistaa datan keräämisen, mutta datalla ei ole sellaisenaan juurikaan arvoa, vaan se tulee saada hyödynnettävään muotoon mahdollisimman tehokkaasti ja nopeasti. Reunalaskenta mahdollistaa datan keräämisen sekä analysoinnin fyysisesti lähempänä datan keräyspaikkaa, tarjoten matalan viiveen, säästöä kaistanleveydessä sekä matalan värinän. Sijoittelusta

johtuen sekä laskentaan kuluva viivettä että etäisyydestä johtuvaa viivettä saadaan pienennettyä, kun dataa ei tarvitse lähettää kauas pääpalvelimelle tai pilveen analysointia ja prosessointia varten. Nämä ominaisuudet pienentävät vasteeseen kuluva viivettä ja ovat tärkeitä viivekriittisille, reaaliaikavaatimuksilla varustetuille sovelluksille. (Satyanarayanan 2017: 3.)

Reunalaskenta tarjoaa tarvittavan tiedon sinne missä sitä tarvitaan mahdollistaen reaaliaikaisen päätöksenteon sekä nopeat toimenpiteet. Reunalaskennan ansiosta datan analysoinnin seurauksena todetut mahdolliset ongelmat, esimerkiksi tuotantolaitteen toiminnassa, voidaan havaita nopeasti sekä korjata ilman, että tuotannon tehokkuus ehtii siitä merkittävästi kärsimään. (Miller 2020: 1.) Tätä käytetään muun muassa ennakoivassa huollossa, jossa ongelmat ehditään havaita hyvissä ajoin, jonka ansiosta huolto ja niihin liittyvät katkokset voidaan suunnitella ja toteuttaa hallitusti sekä kustannustehokkaasti.

Kuten tässä tutkimuksessa on todettu, IoT-laitteet tuottavat valtavia määriä dataa, jonka siirtäminen suoraan pilvipalvelimelle vaatii huomattavan paljon kais-tanleveyttä ja verkon nopeuden lisääminen on kallista. Lisäksi suurin osa tästä datamassasta on täysin merkityksetöntä, jolloin sen siirtäminen pilveen kalliilla verkkoyhteydellä on yritykselle täysin turha kustannus. Prosessoimalla data ensin verkon reunalla ja siirtämällä pelkästään merkityksellinen data verkon yli pilveen voi yritys varmistaa, että se todella maksaa vain liiketoimintahyötyä tuovan datan siirrosta ja tallentamisesta säästään samalla verkkoyhteyden kuluissa.

### **Päätelaitteen ja pilven kuormituksen keventäminen sekä energiasäästö**

IoT-sensorit keräävät ja prosessoivat valtavia määriä dataa ja siirtävät sitä eteenpäin infrastruktuurin seuraavaan vaiheeseen. Monet IoT-sensorit toimivat langattomasti eivätkä ole kiinni verkkovirrassa, eli niiden toiminta on akkujen varassa. Suuresta datan määrästä huolimatta tulee laitteille taata mahdollisimman pitkä akun kesto. Sen sijaan että data siirretään sen keräyspaikalta pitkiä matkoja keskitettyyn datavarastoon, tässä tapauksessa pilvipalveluun, voidaan väli-

varastoinnilla keventää sensoreiden kuormaa ja säästää niiden akkuja. Tällä tavoin akkuja ei tuhlaata datan prosessointiin ja siirtämiseen, vaan ne kestävät pidempään niiden tärkeintä tehtävää, eli datan keräämistä varten. Rajallisilla resursseilla varustetuille sensoreille turhat työvaiheet voidaan siirtää reunalaitteille suoritettavaksi. Reunalaite toimii tässä pilvipalvelun jatkeena, jolloin se ylettyy lähemmäksi IoT-laitetta. Data virtaa molempiin suuntiin – reunalaite välittää IoT-laitteelta keräämänsä datan pilveen sekä palauttaa pilvessä prosessoidun big datan ja vaativamman tason laskennan läpikäyneen datan takaisin IoT-laitteelle. Tätä samaa resurssien siirtämistä (engl. offloading) voidaan soveltaa esimerkiksi mobiililaitteen ja reunalaitteen välillä, jolla säästetään mobiililaitteen akunkestoa ja rajallista laskentakapasiteettia. Offloading tarkoittaa yksinkertaistettuna toimintojen keventämistä tai kokonaan siirtämistä pois laitteelta, jolla on rajallisemmin resursseja käytössä. (Gusev & Dustdar 2018: 6.)

Bilal et al. (2017: 100) mainitsi tutkimuksesta, jossa oli tutkittu internetin toimintojen energiakulutusta. Tutkimuksessa kävi ilmi, että 14 % energiakulutuksesta johtuu datansiirrosta. Sovelluksien datakuorma ja energiakulutus oli merkittävä silloin, kun ne ovat reaaliaikaisesti yhteydessä pilvipalveluihin. Tutkimuksessa ehdotettiin, että osa pilvipalveluiden tehtävistä voitaisiin siirtää sumulaskennan nanopalvelimille suoritettavaksi, jolloin syntyisi energiasäästöä datan siirron vähentymisestä.

Toisaalta myös pilvipalveluiden resurssien optimointi voidaan nähdä energiasäästönä. Kun esimerkiksi IoT-laitteiden sensoridata virtaa sellaisenaan suoraan pilveen, on valta osa tästä datasta turhaa, joten resursseja kuluu valtavasti merkityksellisen datan suodattamiseen datamassasta. Kun väliin asennetaan reunalaite, joka prosessoi ja analysoi datan sen alkulähteessä niin, että vain merkityksellinen data lopulta siirretään pilveen, säästyy pilvilaitteiden resurssit siihen, missä ne ovat parhaimmillaan, kuten korkeamman tason analytiikkaan ja datalouhintaan sekä merkittävän tiedon pitkäaikaiseen tallentamiseen. Tämän optimoinnin ansiosta myös palvelun laatu paranee. (Najmul et al. 2016: 7.)

## **Datan saatavuus**

Kolmannen osapuolen palveluissa, tässä tapauksessa pilvipalveluissa, on olemassa riski, että yhteys katkeaa tai hidastuu haitallisesti esimerkiksi verkko-ongelmista, palveluntarjoajan omista teknistä haasteista tai verkkohyökkäyksistä johtuen. Lisäksi joillakin maantieteellisillä alueilla verkkoyhteys voi katketa sää- ja luonnonilmiöiden tai terrorismin seurauksena. Reunan tehtävä on toimia väli-muistina, joten tällaisissa tilanteissa reunalaskenta pystyy parhaimmassa tapauksessa paikkaamaan ja takaamaan kriittisen toiminnan ainakin hetkellisesti. (Satyanarayanan 2017: 8.)

## **Tietoturvaan liittyvät tekijät**

Reunalaitteet toimivat kerätyn, toisinaan myös arkaluontoinen datan ensimmäisenä kontaktina ja ne voivat valvoa omistajansa tietosuojakäytäntöjä ennen tietojen luovuttamista eteenpäin pilveen (Satyanarayanan 2017: 3.) Reunalaitteet suojaavat myös käyttäjän yksityisyyttä prosessoimalla ja analysoimalla dataa sen alkulähteellä, jolloin tunnistettavissa olevaa arkaluontoista tietoa ei tarvitse lähettää pilveen. Arkaluontoista tietoa voivat olla esimerkiksi paikannustiedot, henkilötiedot tai liiketoiminnan kannalta kriittinen tieto. Vaihtoehtoisesti reunalaitetta voidaan käyttää tiedon muuttamiseksi salattuun muotoon ennen sen lähettämistä pilvipalvelimille. (Bilal et al. 2017: 100.) Pilven tietoturva- haasteista on kerrottu kappaleessa 2.2.1 Pilvilaskentaan liittyviä haasteita. Siinä missä reunalaskenta lisää tietoturvallisuutta, se myös samanaikaisesti heikentää sitä. Tästä kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.6 Haasteita reunalaskentaan liittyen.

### **3.6 Haasteita reunalaskentaan liittyen**

Koska reunalaskenta on vasta hiljattain yleistynyt laskentamalli, liittyy siihen hyötyjen ja mahdollisuuksien lisäksi myös haasteita. Omdian tutkimuksessa todettiin, että reunalaskennan käyttäjät kokevat suurimmaksi haasteeksi reunalaskentaekosysteemin hallinnan. Tämä pitää sisällään sovellukset, verkon, datan sekä IT-infrastruktuurin. Toiseksi yleisimmäksi haasteeksi koettiin osaamisen ja tiedon puute sekä kolmanneksi yleisin haaste on tietoturvaan liittyvät tekijät.

Muita haasteita koettiin olevan keskeneräiset integraatoratkaisut, kaupallisten avoimien ratkaisujen puuttuminen, kustannuksiin liittyvät tekijät, IT-laitteistojen hallintaan liittyvät tekijät (tila, virta, jäähdytys, melu) sekä suunnittelumallien puuttuminen. (Illsley 2021: 7-8.)

### **Puutteelliset standardit, toimintamallit ja infrastruktuuri**

Reunalaskennan ekosysteemi tarvitsee käytäntöjä, standardeja sekä hallintamekanismeja, jotta reunalaskentaa voitaisiin kehittää ja käyttää tehokkaasti. Yleisesti hyväksytyjä infrastruktuuri- ja toimintamalleja on toistaiseksi vähän, joka ajaa yritykset käyttämään keskeneräisiä teknologiapinoja ja toimintamalleja. Gartnerin julkaisemassa tutkimuksessa arvioitiin, että vuoteen 2022 mennessä jopa 85 % yrityksistä ottavat käyttöön useita keskenään yhteentoimimattomia teknologiapinoja. Tämä ilmiö johtuu puutteellisista standardeista sekä arkkitehtuurimalleista, joita ei ole laajasti hyväksytty. (Gill 2020.) Lisäksi jos yrityksen käyttöönotettava standardi on suljettu jää asiakas toimittajaloukkuun eikä yhteentoimivuutta muiden laitteiden tai järjestelmien kanssa voida taata. (Collin & Saarelainen 2016: 182.)

Usein uudet, käyttöönotettavat teknologiat rakennetaan vanhan laitekannan päälle. Tämä tarkoittaa, että taustalla saattaa olla valmiiksi useita standardeja ja protokollia eivätkä kaikki laitteet sellaisenaan tue verkkoyhteyksiä. Monet laitevalmistajat saattavat tarjota tuotteita, joilla mahdollistetaan vanhan laitekannan liittäminen internetiin. Todennäköisesti käytössä on useita eri protokollia, joita joudutaan yhdenmukaistamaan protokollamuuntimella. Esimerkiksi jotkin sumusolmut tarjoavat tällaista protokollakäännöstä. Teoriassa on kuitenkin olemassa muunnosvirheiden riski tai datan eheys ja luetettavuus voi kärsiä. (Collin & Saarelainen 2016: 182-183.)

Virtuaalisen infrastruktuurin haasteena on yhteentoimivuuden puute laajassa mittakaavassa. Esimerkiksi pilvipalveluntarjoajien isännöimät reunapalvelimet toimivat saumattomasti vain, kun taustalla on pilvipalvelut. Ja tapauksessa,

jossa palvelimet ovat vajaakäytöllä, ei niitä voida käyttää kilpailevien pilvipalveluntarjoajien reunakuorman käsittelyssä. Lisäksi suurin osa pilvipohjaisista työkaluista ei ole suunniteltu hajautetulle arkkitehtuurille. Saumattomammin toimiva virtuaalinen infrastruktuuri voisi rohkaista ja vauhdittaa reunalpalveluntarjoajia palveluiden kehittämisessä ja niiden leviämistä täysimittaiseksi laskentaparadigmaksi. (Zavodovski 2020: 7.)

Reunalaitteiden hallinnassa tulee huomioida laitteiden skaalautuvuus, tietoturva, heterogeenisyys sekä infrastruktuurin suorituskyky. On tapoja minimoida tarve ihmisen väliintulolle, kuten orkestrointitekniikka. Orkestrointi on kuitenkin vielä kehityksen alla oleva tekniikka, vaikka palveluntarjoajia markkinoilta jo löytyy. Lisäksi monet reunalaitteet liikkuvat, kuten ajoneuvot ja mobiililaitteet, joka tuo mukanaan omat haasteensa laitteiden hallinnassa ja datan keruussa.

Laskentainfrastruktuuri uusien reunasovellusten tai -palveluiden käyttöönotto-  
miseksi on toistaiseksi hyvin rajallinen. Viitteitä siitä, että teleoperaattorit sekä pilvipalvelutarjoajat olisivat perustamassa laitteistojaan lähelle reunaa, on Zavodovskin (2020: iii-iv) mukaan olemassa. Tästä esimerkkinä MEC.

Standardointijärjestöjen tehtävä on luoda yleisesti hyväksytyt säännöt reunalaskentaympäristöä varten. Tähän liittyy kuitenkin haasteita. Ensinnäkin toimittajien erilaisten ratkaisujen valikoima on laaja, joten niiden joukosta on haastavaa löytää ja valita yksittäistä standardia. Toisekseen heterogeenisillä päätelaitteilla on käytössä laajasti eri rajapintoja ja protokollia reunan välisessä kommunikoinnissa. Muun muassa ETSI tekee standardointityötä näiden ongelmien ratkaisemisen eteen. ETSIn työn tavoite on, että heterogeeniset päätelaitteet voivat kommunikoida reunalpalvelimien kanssa ja eri kerrokset sekä laskentaparadigmat voivat toimia yhdessä myös usean eri toimittajan ympäristössä. (Najmul et al. 2016: 13.)



## Tietoturva

Kyberturvallisuus on yksi digitalisaation haasteista. Verkon useista sisääntuloväylistä johtuen reunalaskenta toisinaan heikentää turvallisuutta ja lisää haavoittuvuutta tunnistautumiseen ja salaukseen liittyvistä heikkouksista johtuen. Vaikkakin kappaleessa 3.5 Reunalaskennan motiivit todettiin tietoturvan olevan yksi reunalaskentaan liittyvistä motiiveista, sillä reuna ei altistu pilvipalveluille kohdistuville tietoturvahille, voidaan tämän ominaisuuden todeta olevan hyödyn lisäksi myös uhka. Al-Turjman (2019: 182-183) listasi kirjassaan *Edge Computing From Hype to Reality* muun muassa seuraavat reunalaskentaan liittyvät tietoturva-uhat:

- Koska reunalaitteilla on rajalliset resurssit, eivät suojausohjelmat saisi kuluttaa merkittävästi laskenta- tai tallennuskapasiteettia.
- Reunalaitteet käyttävät välimuistin hallintatekniikkaa, joka altistaa hyökkäyksille. Yksityinen ja arkaluontoinen data tulisi saada turvattua.
- Suuresta laitemäärästä johtuen yleistä pääsynvalvontapolitiikkaa on vaikea toteuttaa. Myös laitteiden liikkuvuus tulee ottaa huomioon.
- Ympäristössä, jossa sovelluksia ja resursseja jaetaan ison käyttäjämäärän kesken, on yksityisyyden, valvonnan, suorituskyvyn, tietoturvan ja sisältä päin tulevien uhkien huomioon ottaminen haastavaa.
- Virtuaalisten palvelujen käytön myötä reunalaskenta tarjoaa liityntämahdollisuuden useille sovelluksille samanaikaisesti, jolloin ohjelmistorajapinta on useiden käyttäjien käytettävissä, joka puolestaan altistaa sisäpiirihyökkäyksille ja tietomurroille.
- Tietosuojan varmistamiseksi ja käyttäjien datan turvaamiseksi reuna-alustan tietosuojakäytännön ja pilvi-infrastruktuurin tulee olla synkronoidut keskenään. Tämä voi kuitenkin olla haastavaa, sillä eri infrastruktuurien tarjoajien tietosuojakäytäntöjen välillä voi olla eroavaisuuksia.

Suurilla pilvipalvelutarjoajilla on tietoturva korkealla tasolla, joka on useille palvelun käyttäjille merkittävä ehto palveluntarjoajaa valittaessa. Tämä pilvipalveluiden tietoturva ei ylety pilven reunalle ja reunalla oleva data jää pilvipalveluiden järeän tietosuojauksen ulkopuolelle. Pilvipalveluiden tietoturvamenetelmien

soveltaminen reunalaskentaympäristössä on näiden kahden laskentamenetelmän ominaisuuksien eroista johtuen haastavaa. Hankaloittavia eroavaisuuksia ovat muun muassa reunalaskennan maantieteellisesti hajautettu arkkitehtuuri, matala viive, heterogeenisyys sekä liikkuvuus. Lisäksi reunalaitteet voivat altistua fyysiselle peukaloinnille, riippuen kuinka laitteet on sijoitettu ja suojattu. Reunapalvelimet sijaitsevat fyysisesti lähellä datan lähdettä, jolloin palvelimet voivat sijaita esimerkiksi tehdasrakennuksessa tai sen välittömässä läheisyydessä, kuten kontissa tai käyttökohteesta riippuen jopa julkisella paikalla. Näin ollen ne eivät välttämättä ole yhtä turvallisesti sijoitettu kuten tarkkaan valvotut konesalit.

### **Reunasolmujen rajalliset resurssit ja niiden hallinta**

Reunasolmut ovat varustettuja rajallisilla resursseilla. Valmistavassa teollisuudessa syntyvän datan määrä kasvaa, mikä voi olla rajallisella muistilla ja laskentakapasiteetilla varustetuille reunalaitteille merkittävä haaste. Rajallisten resurssien optimoimiseksi ja tehokkaampaa hyödyntämistä varten on kuitenkin käytössä joitakin tekniikoita. Näistä esimerkkeinä kehitteillä oleva orkestrointitekniikka sekä virtualisointi. Yhtenäisen, heterogeenisen laitearkkitehtuurin käyttöönotto on kuitenkin haastavaa. Erilaisten reunasolmujen, joilla kaikilla on keskenään erilainen suorituskyky sekä resurssit, yhdistäminen yhtenäiseksi tai useaksi kerrokseksi on vaativaa ohjelmiston ja laitteiston näkökulmasta. Tarjolla oleva laitekanta on laaja, joten näiden yhdistäminen keskenään vaatii yhteensä, yhteentoimivuutta tukevien standardien kehittämistä. Tähän ei voida soveltaa samoja standardeja kuin pilvessä, jossa isolla määrällä laskentaresursseja on sama arkkitehtuurimalli. Tällöin sovellukset ja palvelut olisi suoritettava tavalla, joka ei huomioi taustalla olevaa laitteistoa. Tämän hetken tutkimusnäyttö, joka mahdollistaisi yhteentoimivuuden virtualisoinnin avulla ei sovellu kaikille laitteistoarkkitehtuureille. (Buyya & Srirama 2019: 41.)

## Dynaamisuus

Toisin kuin pilvipalvelukeskukset, jotka pystyvät maantieteellisesti palvelemaan isoja alueita, on reunapalveluiden tavoittama asiakasmäärä rajallinen. Kustannustehokkuuden edellytyksenä on, että palveluntarjoajat voivat palvella mahdollisimman kattavasti isoa määrää asiakkaita, joka tarkoittaa, että palveluvalikoimaan tulee kuulua kaikki mahdolliset reunasovellukset, joita asiakkaat tarvitsevat ja vaativat. Asiakkaiden liikkuvuus ja muutokset IoT käyttöön otossa huomioiden lista tarvittavista sovelluksista voi vaihdella dynaamisesti. Lisäksi asiakkaan liikkeessä ja siirtyessä alueelta toiselle, voi vaihto reunapalveluntarjoajalta toiselle tuottaa yhteentoimivuushaasteita. Käyttöympäristön dynaamisuudesta huolimatta palvelun ja käyttökokemuksen laadusta ei saisi tinkiä. (Zavodovski 2020: 7.)

## 4 Reunalaskennan käyttö valmistavassa teollisuudessa

State of the Edge 2020 -raportissa todettiin, että valmistavan teollisuuden alalla vallitsevat kovat paineet johtuen lisääntyneestä markkinakilpailusta sekä asiakkaiden räätälöidyistä tarpeista. Perinteisillä keskitetyillä ja hierarkkisilla, hallintarakenteisiin perustuvilla tuotannonohjausjärjestelmillä voi olla haasteita sopeutua tuotantolinjastotason muutoksiin tai häiriötekijöihin, jotka vaativat nopeaa päätöksentekoa. Teollisen internetin teknologiaratkaisut, kuten kyberfyysiset järjestelmät, pilvilaskenta, tekoäly, koneoppiminen ja IoT, tarjoavat toiminnallista ketteryyttä ja niiden keskeinen ominaisuus on keskitetyn tuotannonohjausjärjestelmän sijaan hajautettu koordinointi ja valvonta. Edistyneet, digitalisoidut ratkaisut auttavat reagoimaan asiakkaiden räätälöityihin ja muuttuviin tarpeisiin sekä kehittämään turvallisempia, energiatehokkaampia sekä kestävämpiä valmistavan teollisuuden prosesseja. Digitalisaatio parantaa yrityksen kilpailukykyä sekä saumatonta ja läpinäkyvää tiedonsiirtoa koko partneriverkoston kesken. (Heilala et al. 2020: 3; Protner et al. 2021: 832; State of the Edge 2020: 39-40.)

Älytehtaalla tarkoitetaan teollisuusympäristöstä, jossa laitteet ovat yhteydessä internetiin ja tuotantoprosessi tuottaa sen eri vaiheista IoT-sensoreiden avulla suuria määriä dataa, jonka pohjalta tehdään älykkäitä päätöksiä tuotannon hyväksi. Perinteinen tapa hallita tuotantoresursseja sekä IoT-arkkitehtuuria on keskittää kaikki tuotantoprosessin data pilvipalveluille. Pilven etuja on vahva prosessointikapasiteetti ja rajaton tallennustila, joka samalla säästää yrityksen omien laitteiden laskenta- ja tallennuskapasiteettia. Pilvipalvelut tarjoavat laadukkaita palveluita edulliseen hintaan. Kuten tässä tutkimuksessa on todettu, pilvipalveluiden heikkous on niiden huono reaaliaikainen suorituskyky, joka voi olla este tuotantoprosesseja tukevan teknologian luotettavassa toiminnassa. Lisäksi älytehdas tuottaa valtavia määriä dataa, jotta sen hyödyt eri teknologian sovelluksista olisivat mahdollisimman suuret. Mitä enemmän dataa, sitä enemmän tarvitaan kaistanleveyttä tämän datan syöttämisessä pilveen. Ratkaisuna muun muassa reaaliaikaisiin haasteisiin, tietoliikennemäärän vähentämiseen kuten myös datan saatavuuteen tilanteessa, jossa yhteys pilvipalvelimeen on

syystä tai toisesta poikki, ehdotetaan reunalaskentaa. Sen lisäksi, että reunalaskenta on vastaus edellä mainittuihin haasteisiin, mahdollistaa se tarkan resurssienhallinnan ja -suunnittelun jokaisella reunasolmulla erikseen. Valmistava teollisuus on yksi reunalaskentaratkaisujen merkittävimmistä kohderyhmistä ja reunalaskentaratkaisuilla on avainrooli teollisen internetin ratkaisujen käyttöönotossa. Ennusteen mukaan vuoteen 2025 mennessä teollisuusalan yritykset panostavat erityisesti reunaratkaisuihin, jotka tukevat automaation toiminnallisuutta, etähallintaa sekä logistiikka- ja varastointihallintaa. (Qi & Tao 2019: 86769-86770; State of the Edge 2020: 39-40.)

Omdian julkaisemassa raportissa todetaan, että valmistavassa teollisuudessa vallitsee yleinen turhautuminen tämän hetken IoT-teknoologiaan ja sen suorituskykyyn. Vain pieni osa IoT-laitteista ovat IIoT-laitteiksi soveltuvia, eivätkä ne vastaa toiminnan kannalta kriittisiin datan reaaliaikavaatimuksiin. Teollisuuden 5G-teknologian odotetaan tuovan ratkaisuja valmistavassa teollisuudessa vallitsevaan turhautumiseen. Lisäksi reunalaskenta tarjoaa teollisuuden ympäristölle ratkaisun tämän hetken haasteeseen. IIoT-laitteet voidaan yhdistää reunalaitteeseen, joka pystyy suorittamaan datan analytiikkaa sekä rajoitetusti tallentamista, ja näin saavutetaan vaadittu suorituskyky. (Illsley 2021: 6.)

## 4.1 Optimaalinen toteutustapa

### **Implementointimenetelmä**

Tämän kirjallisuuskatsauksen pohjalta voidaan todeta, että sumulaskenta reunalaskennan implementointimenetelmänä tukee hyvin IoT-teknoologiaan perustuvia teollisuusprosesseja. Sumulaskennan etuja on, että sumusolmut tukevat laajasti eri laitteita eikä sen toiminta rajoitu yksittäisen verkkoliikenneteknologian käyttöön. Päinvastoin sumusolmut tukevat useita tietoliikenneyhteyksiä sekä toimivat tulkkina kahden eri protokollan välillä. Monet teknologiapäivitykset on rakennettu vanhan laitekannan päälle, joka tekee eri standardien ja käytössä olevien protokollien kirjosta laajan. Sumulaskennan heikkoutena on sen looginen

etäisyys, eli tyypillisesti verkkohyppyjä on useampi kuin yksi. Ja kuten kappa-leessa 3.1 Ekosysteemi ja infrastruktuuri todettiin, hyppyt lisäävät viivettä sekä laajentavat värähtelyä. Lähes kaikki IoT-teknoologiaan perustuvat sovellukset eivät kuitenkaan ole äärimmäisen viivekriittisiä, jolloin sumulaskenta tukee useampia sovelluksia.

Qi & Tao (2019: 86772-86774) on antanut sumulaskennan toiminnasta kattavan esimerkin tutkimuksessa Smart Manufacturing Service System Based on Edge Computing and Cloud Computing. Siinä reunalaskenta ja sumulaskenta on eroteltu kahdeksi eri laskentakerrokseksi. Tässä opinnäytetyössä on aikaisemmin todettu, että reunalaskenta ja sumulaskenta voidaan erotella kahdeksi omaksi laskentamenetelmäksi tai kerrokseksi arkkitehtuuritasolla, mutta tässä reunalaskentaa käytetään sateenvarjoterminä, jonka alle sumulaskenta kuuluu yhtenä implementointimenetelmänä. Seuraavaksi esitellään reunalaskennan eri tehtävät sovellettuna valmistavaan teollisuuteen Qi & Taon tutkimuksen pohjalta:

- Sensorit, älykkäät robotit ja tietokoneohjatut työstökoneet keräävät dataa tuotanto- ja ympäristöolosuhteisiin liittyen. Toisinaan nämä päätelaitteet saattavat myös suorittaa alkeellista analytiikkaa tai dataprosessointia itsessään.
- Reunalaitteet, kuten gateway tai teollisuus-PC keräävät datan. Käsittämättä ja sitä kautta tietoliikenteestä koituvien kulujen säästämiseksi, vain merkityksellinen data siirretään reunalaitteilta eteenpäin. Reunalaitteilla on kyky suorittaa yksinkertaista analytiikkaa ja prosessointia, suodattamista, hylkäämistä, salaamista tai tehokkaammin koota dataa edelleen lähetystä varten. Reunalaitteilla voi olla rajallinen tallennuskapasiteetti, johon tallennetaan esimerkiksi tietoa koneen reaaliaikaisesta tilasta, hälytyksistä ja virhetiloista. Analysoinnin perusteella voidaan reaaliaikaisesti havaita mahdolliset poikkeavuudet tuotantoprosessien toiminnassa tai saada tietoa yksittäisen laitteen sillä hetkellä suorittamasta vaiheesta. Laitteita voi olla hyvin laaja, joten reunalaitteiden tärkeä tehtävä on myös suorittaa rajapinta- ja protokollakäännöstä, eli kääntää eri dataformaatteja ja kommunikaatioprotokollia yhdenmukaiseen muotoon, joka mahdollistaa datan vuorovaikutuksen.
- Sumusolmut muodostavat toisiinsa yhdistetyn verkoston. Sumusolmuja voivat olla edellä listattujen reunalaitteiden lisäksi esimerkiksi reitittimet, palvelimet ja kytkimet, joiden lisäksi jokaista sumuverkosto sisältää yhdyskäytävän sekä hallintasolmun (fog management node). Eri tietojen yhdistämisen perusteella voidaan suorittaa hallin-

tasovelluksia esimerkiksi inventaarion hallintaan tai prosessien optimointiin. Hallintasolmu on yhteydessä pilvipalveluun ulkoisen verkon välityksellä.

- Pilvi suorittaa esimerkiksi big data analysointia sekä pitkäaikaista tallentamista. Yritys voi hyödyntää pilven suorittamaa laskentaa raskaampaa laskentaa vaativissa tehtävissä tai esimerkiksi riskiarvioinnissa tai markkina-analyysissa. Pilven välityksellä voidaan myös vastaanottaa ja lähettää dataa yhteistyökumppaneiden välillä, kuten materiaalityöntekijöiden tai asiakkaiden, esimerkiksi materiaalihankintaan tai tilauksiin liittyen. Tätä dataa hyödynnetään tuotannonsuunnittelussa sekä resurssienhallinnassa.

## Reunalaskenta palveluna

Useat pilvipalveluntarjoajat tarjoavat IoT-pohjaisia ratkaisujaan laskentalaitteiston muodossa, jonka asiakkaat voivat ottaa käyttöön omissa toimitiloissaan. IoT-teknologiapinoa tukeva laite on hallittavissa kuten muut pilvipalveluntarjoajan palvelut ja on saumattomasti integroitavissa pilvipohjaisten sovelluksien kanssa. Ratkaisu luo hybridiympäristön reunan ja pilven välille, joka yksinkertaistettuna laajentaa pilvipalveluiden ominaisuuksia asiakastiloihin, tarjoten paikallisesti esimerkiksi tietojenkäsittelyä, IoT-koneoppimista, analytiikkaa sekä muita viiveelle herkkiä palveluita. Tällaisia ratkaisuja ovat esimerkiksi Azure Stack ja AWS Outposts. (Zavodovski 2020: 21.)

Lisäksi kehitysasteella on EaaS, Edge-as-a-Service, eli reuna palveluna. Kyseessä on alustamalli, jonka tarkoituksena on helpottaa sopivan reunalaskentamallin löytämistä ja implementointia. EaaS-alusta toimii kolmella tasolla: pilvessä, reunasolmuissa ja päätelaitetasolla. Alusta tarvitsee isäntäsolmun, jonka hallintaohjelma kommunikoi reunasolmujen kanssa. Isäntäsolmu voi olla laskentatehtäviin soveltuva verkkolaite tai erillinen hallintaprosesseja suorittava solmu. Hallinnolliset ohjauspaneelit ovat käytettävissä isäntäsolmussa yksittäisten reunasolmujen valvontaa varten. Tämä palvelumalli on vasta kehitysasteella ja sitä on toistaiseksi sovellettu vain peliympäristössä, eikä näyttöä valmistavan teollisuuden ympäristöstä tässä kirjallisuuskatsauksessa käytetyn lähteen mukaan vielä ole. (Buyya & Srirama 2019: 37.)

## 4.2 Soveltaminen

Tässä kappaleessa esitetään muutamia esimerkkejä sovelluksista, joita reunalaskenta mahdollistaa valmistavan teollisuuden ympäristössä. Nämä ovat ennakoiva huolto, materiaalivirran hallinta, laadunseuranta sekä digitaalinen kaksoinen. Annetut esimerkit edustavat vain yksittäisiä, lähdemateriaalien pohjalta esitettyjä tapoja toteuttaa kyseiset sovellukset.

### **Ennakoiva huolto**

Ennakoiva huolto perustuu koneoppimiseen ja ennakoivaan analytiikkaan, eli data-analyysia käytetään tulevien tulosten ennustamiseen. Reunalaitteet voivat suorittaa paikallisesti tekoäly- ja koneoppimisen malleja. Datan lähteinä ovat kymmenet tai jopa tuhannet IoT-sensorit. Seuraamalla sensorien tuottamaa sekä mennyttä että reaaliaikaista dataa voidaan tunnistaa kuvioita ja poikkeavuuksia, jotka voivat johtaa vikoihin ja häiriöihin tuotteessa tai prosessissa. Tätä tietoa hyödynnetään ongelmien ratkomisessa ennen kuin ongelmat ilmenevät. Ennakoimalla huoltotarpeita pystytään vähentämään suunnittelemattomista tuotantokatkoksista johtuvia kustannuksia ja ennustamaan laitteiden huoltotarpeita. Näin laitteiden käyttöikä pystytään optimoimaan ja huollot hoitamaan hallitusti ilman pitkiä tuotantokatkoksia tai yllättäviä kuluja. (AI-Turjman 2019: 123.) Esimerkiksi Azure tarjoaa reunalaskentaa hyödyntäviä, koneoppimista käyttävää ennakoivan huollon ratkaisuja, kuten Azure IoT Edge ja Azure Machine Learning.

Ennakoivan huollon hyötyjä ovat kustannusten säästö, jotka koostuvat esimerkiksi varastointikustannusten, korjaus- ja varaosakustannusten, tuotantokatkoksista koituvien kustannusten sekä verkkokustannusten säästöistä; etähallintamahdollisuus; lisäarvon tuottaminen asiakkaalle; laitekannan käyttöiän pidentäminen; laitteen tilan reaaliaikainen paikannus sekä tietoturvan lisääminen, kun data käsitellään paikallisesti. (AI-Turjman 2019: 123.)

### **Materiaalivirran hallinta**



Taboada & Shee (2020: 1) on esittänyt materiaalivirran hallinta seuraavasti:

Sellaisen verkoston suunnittelu ja koordinointi, jonka kautta organisaatiot ja yksilöt saavat, käyttävät, toimittavat ja hävittävät aineellisia hyödykkeitä, hankkivat ja jakavat palveluita sekä tuovat tarjottavansa markkinoiden ja asiakkaiden saataville.

Materiaalivirran integraatio, eli kaikkien osa-alueiden ja toimijoiden yhteensovittaminen, pitää sisällään sekä ulkoista että sisäistä (toimittaja ja asiakas) integrointia koko toimitusketjun läpi yhteistyön ja kommunikoinnin avulla. Toimitusketjun prosesseja ovat suunnittelu, hankinta, valmistus, toimitus, palautus ja käyttöönotto. Materiaalivirran integraatiossa ovat tyypillisesti mukana toimittajat, valmistajat, varastot, jälleenmyyjät ja kuljettajat. Ihannetilanteessa nämä tekevät keskenään yhteistyötä edistääkseen tavaran siirtymistä ketjun alkupäästä loppupäähän tavoitteena asiakaspalvelun parantaminen. Suorituskykyä voidaan mitata kustannuksilla, laadulla, toimitusajalla ja joustavuudella. Toimitusketjun vahvuus perustuu materiaali- ja palveluvirran sekä tiedonsiirron tehokkuuteen. (Taboada & Shee 2020: 4.)

Toimintaketjun kumppaneiden välisen koordinoinnin ja yhteistyön toimivuuden avainasemassa on logistiikkaketjun ja prosessien läpinäkyvyys aina asiakkaan tilauksesta tavaran vastaanottamiseen asti. 5G -tekniikan yhdessä reunalaskennan kanssa ennustetaan parantavan integraatiota toimittajien, asiakkaiden ja organisaation sisäisten logistiikkaprosessien välillä. IoT-tekniikan avulla saadaan kerättyä raakadataa perustoimintoja varten ja 5G:n nopeaa tiedonsiirtoa hyödyntämällä jaettua sitä toimitusketjun kesken. Datan reaaliaikaiseen prosessointiin tarvitaan reunalaskentaa. Tämä antaa yrityksille mahdollisuuden hallita toimitusketjua ja reagoida oikea-aikaiseen liiketoimintatietoon pohjautuen. 5G:n arvioidaan helpottavan organisaatioiden välistä sekä sisäistä tietoliikennettä. Se tarjoaa suorituskyvyn parannuksia kaikkiin toimitusketjuun liittyviin osa-alueisiin ja prosesseihin, mahdollistaen nopean reagoinnin muutoksiin sidosryhmien välisen tietoliikenteen kautta. Tämä johtaa tehokkaampaan, nopeammin reagoivaan ja joustavampaan tavaravirtaan. 5G sopii myös logistiikkatoiminnan tukemiseen. (Taboada & Shee 2020: 5, 11.)

5G:n ominaisuus, joka erityisen hyvin tukee valmistavan teollisuuden materiaalivirran hallintaa, on mMTC, eli sen kyky tukea useita laitteita samanaikaisesti, mahdollistaen reaaliaikaisen tiedonsiirron ja paikantaen laitteiden sijainnin säästämällä kuitenkin laitteiden akkuja. Tuotteiden paikannukseen liittyvään tietoturvan hallintaan liittyen on ratkaisuksi ehdotettu lohkoketjuteknologiaa. 5G-tekniikkaan pohjautuvan reunalaskennan hyödyntämisessä materiaalivirran hallinnassa nähdään paljon potentiaalia, mutta siihen liittyvää tutkimusta ja näyttöä on vielä vähän. Esimerkiksi edellä kuvattu IoT-tekniikkaan pohjautuva, 5G-tekniikkaa hyödyntävä koko toimitusketjun hallintaa ohjaava prototyyppiä ei ole Taboada ja Sheen mukaan alan tutkimuksissa toistaiseksi esitetty. Toinen selvä puute on tietoturvaan liittyvät ratkaisut, vaikka siihen joitakin ehdotuksia onkin annettu, kuten edellä mainittu joukkoistaminen. (Taboada & Shee 2020: 9, 11.)

### **Laadunvalvonta**

Yhdistämällä reunalaskennan ja tekoälyn voidaan tuotantolinjalla toteuttaa reaaliaikaista, konenäköpohjaista laadunvalvontaa. Konenäöllä tarkoitetaan videoavusteista analytiikkaa. Laadunvalvonnassa kamerat tunnistavat poikkeamat, jonka jälkeen tekoälyavusteinen ohjelma analysoi kameran keräämän datan. Kamerat voivat olla esimerkiksi infrapuna- tai hyperspektrikameroita tai vaihtoehtoisesti kameroiden tilalla voidaan käyttää sensoreita, jotka tunnistavat esimerkiksi värähtelyä. Tieto mahdollisesta poikkeamasta saadaan reaaliajassa, joka voi nopeasti toimivalla tuotantolinjalla olla välttämätöntä ja virheeseen pystytään reagoimaan heti. Tilanne voisi olla toinen, jos analysointi tapahtuisi reunalaitteen sijaan pilvessä ja pitkästä viiveestä johtuen virhe pääsee linjastolla pitkän matkaa eteenpäin ennen mahdollisuutta väliintulolle. (Advian, luettu: 16.12.2021)

### **Digitaalinen kaksonen**

Digitaalinen kaksonen on hyvä esimerkki kyberfyysisestä integraatiosta, joka mahdollistaa valmistavassa teollisuudessa älykkäät tuotantoprosessit. Digitaal-

nen kaksonen edustaa älykkään valmistuksen konseptia, jolla luodaan fyysisestä objektista tai isommasta kokonaisuudesta erittäin tarkka virtuaalinen malli mahdollistaen sen käyttäytymisen tai toiminnan simuloinnin sekä reaaliaikaisen hallinnan. Valmistavassa teollisuudessa digitaalinen kaksonen voidaan luoda esimerkiksi tuotantolinjasta, jonka avulla mahdollistetaan tuotantolinjan hallinta, päätöksenteko sekä optimointi suljetussa kierrossa. Yksinkertaistettuna digitaalinen kaksonen koostuu fyysisestä tuotantolinjasta, virtuaalisesta tuotantolinjasta, palvelujärjestelmistä sekä tuotantolinjan digitaalisen kaksonen datasta. Digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää esimerkiksi tuotannon suunnittelussa ja se mahdollistaa kommunikoinnin tuotannonohjauksen kanssa. Paikallisilta sensoreilta kerätty data hyödynnetään keskenään yhteydessä olevilla reunasolmuilla, jotka prosessoivat, analysoivat ja tekevät päätöksiä jaetussa verkossa. Reunalaskenta mahdollistaa reaaliaikaisen seurannan sekä tarvittaessa nopean reagoinnin. (Protner et al. 2021: 833.)

### 4.3 Case-esimerkki: ONCITE

Case-esimerkkinä teollisuuden reunalaskentaratkaisuna käytetään ONCITE -reunaratkaisua. Aiheeseen johdateltiin jo kappaleessa 2.2.2 Projekti GAIA-X, jossa kerrotaan Euroopan yhteistyöprojektista GAIA-X. Projektin tavoitteena on luoda avoin tietoekosysteemi, joka määrittää datan jakamisen standardit ja infrastruktuurin. Yhtenä GAIA-X säätiön perustajajäsenenä toimii Friedhelm Loh Groupiin kuuluva German Edge Cloud (GEC). German Edge Cloud ja Rittal yhdessä Fraunhofer Institutin ja Boschin kanssa ovat lanseeranneet ensimmäisen asennusvalmiin pilvipohjaisen reunaratkaisun nimeltään ONCITE, joka on tarkoitettu ensisijaisesti valmistavan teollisuuden ympäristöön. Kyseessä on ”all-in-one” -ratkaisu, joka sisältää räätälöidyt laitteistot, ohjelmistot, alustat sekä sovellukset. Yritys pystyy itse päättämään, mitä tuotantoprosessin dataa ja prosesseja he haluavat käsitellä paikallisesti ja mitä taas puolestaan pilvessä.

ONCITE on pilvipohjainen, skaalautuva teknologia- ja infrastruktuurialusta. Taustalla oleva integroitu ohjelmoinnin tukiympäristö pitää sisällään:

- Alustariippumattoman, avoimeen lähdekoodiin perustuvat Kubernetes-pohjaisen arkkitehtuurin (IaaS). Soveltuvia alustoja ovat mm. AWS Outposts, Microsoft AZURE Stack sekä Red Hat OpenShift.
- Platform-as-a-Service -palvelun, joka tukee useampaa datan tallennusmenetelmää. Sovelluksen käyttötarkoituksesta riippuen sovellus tukee joko SQL tai NoSQL tietokantaa.
- GEC:n ylläpitämän Operations Center -ohjelmiston, jota käytetään tietoverkon toimintaan ja hallintaan. Se mahdollistaa sekä reuna- että pilvi-infrastruktuurin hallinnan. Lisäksi sen avulla voidaan hallita käyttöjärjestelmiä, virtuaalikoneita, verkkoa, tallennustilaa, varmuuskopiointia, alustaa sekä SaaS -komponentteja, kuten tietokantoja ja sovelluspalvelimia. Käyttäjakohtaisesti räätälöidyn, selainpohjaisen käyttöliittymän avulla voidaan sekä luoda että hallita esimerkiksi koneita ja sovelluksia.
- Yhdessä skaalautuvan laitteisto- ja ohjelmistoinfrastruktuurin (SaaS) ja teollisen IoT-pinon kanssa ONCITE luo perustan teollisuuteen tarkoitetulle ONCITE INDUSTRIAL -reunalaitteelle.
- 5G verkon tuen.

ONCITE suorittaa reunalaskentaa reaaliaikaisen hallinta-alustan kautta. Esimerkiksi tuotannossa tuotettu data prosessoidaan ja tallennetaan paikallisesti ONCITEssa, jonka lisäksi valikoitu data voidaan siirtää julkiseen pilveen. Näin ollen ONCITE toimii myös alustana hybridi- ja monipilvihallinnassa. ONCITEa ja sen alustaa voidaan hyödyntää teollisuudessa IoT-laitteita tukevien reuna- ja sumulaskentasovelluksien kehittämisessä. Standardoitu ratkaisu tarjoaa avoimen integrointialustan monipuolisilla kommunikointiprotokollilla, teknologioilla, yhdyskäytävillä sekä adapterit IIoT- ja teollisuusratkaisuja varten. (German Edge Cloud, luettu: 4.12.2021.)

## 5 Reunalaskennan tulevaisuuden näkymät

Reunalaskenta ei tule korvaamaan pilvilaskentaa, vaan se toimii pilven laajenuksena, ja täyttää muun muassa reaaliaikavaatimuksia omaavien sovelluksien tarpeet. Big datan analysointiin, resursseja vaativia tehtäviä sekä pitkäaikaista tallentamista varten pilvipalvelut ovat edelleen ainoa järkevä ratkaisu (Bilal et al. 2017: 95). Gartnerin julkaisemassa raportissa kuitenkin ennustetaan, että datan määrä, joka tullaan prosessoimaan datakeskuksien ulkopuolella, kasvaa räjähdysmäisesti, ja vuoteen 2023 mennessä 50 % yrityksiä tuottamasta datasta prosessoitaisiin datakeskuksien ulkopuolella. (Gill 2020.) State of the Edge 2021 raportissa puolestaan arvioidaan, että vuoteen 2025 mennessä jopa 75 % yrityksiä, teollisuuden, sairaaloiden, vähittäiskauppojen ja kaupunkien tuottamasta datasta tullaan käsittelemään reunalaskennan avulla. (State of the Edge 2021: 28.)

Reunalaskenta toimii edistyksellisen teknologiansa ansiosta mahdollistajana uusille, hajautetuille, ulkoisen maailman kanssa vuorovaikutuksessa oleville ratkaisuille. Näin tarkastellen reunalaskenta on topologia, jota täydennetään erilaisilla teknologioilla, kuten IoT- ja pilviratkaisuilla, mahdollistaen näin uusia sovelluksia. (Gill 2020.)

Kuten tässä opinnäytetyössä on tuotu ilmi, ovat laajasti hyväksytyt infrastruktuuri- ja toimintamallit edelleen puutteelliset, mistä johtuen yritykset saattavat käyttää keskeneräisiä ja kehityksen alla olevia teknologiapinoja sekä toimintamalleja. Ratkaisuna tähän voi olla Edge as a Service -palvelumalli, eli reunalaskenta palveluna. Tässä mallissa palveluntarjoaja hoitaa kaiken tarvittavan infrastruktuurin osalta, jonka reunasovellus toimiakseen vaatii. Näin palvelua käyttävä yritys voi keskittyä infrastruktuurin rakentamiseen ja hallinnoinnin sijaan liiketoiminnan kehittämiseen. (Gill 2020.) Lisäksi Zavodovski (2020: iv) ehdottaa tutkimuksessaan reunalaskennan infrastruktuurin ja ekosysteemin haasteisiin avoimen infrastruktuurin reunalaskentaa OpenIE. Se määrittelee joukon yleisiä käytäntöjä ja yhdistettyjä tekniikoita luoden yhtenäisen ympäristön heterogeenisistä ja hallinnollisesti jaetuista reunalaskentaresursseista.

Reunalaskennan markkinat kasvavat ja uusia käyttäjiä tulee jatkuvasti lisää. The Linux Foundationin vuonna 2021 julkaisemassa The State of the Edge 2021 -raportissa ennustetaan, että vuosina 2019-2028 tullaan käyttämään 800 miljardia USD pelkästään uusiin ja korvaaviin IT-palvelimiin sekä reunalaitteisiin. Tämä viittaa siihen, että reunalaskentaan soveltuvia laitteita, ohjelmistoja ja palveluja tullaan jatkossakin aktiivisesti kehittämään. Samassa raportissa kerrotaan, että vuoteen 2028 mennessä 6,2 % globaalista reunalaskennan infrastruktuurista tukee valmistavan teollisuuden ratkaisuja. (The State of Edge 2021: 9, 15.)

Reunalaskennan arvioidaan mullistavan erityisesti valmistavan teollisuuden prosessit, missä sitä käyttävät tekoälyyn tai koneoppimiseen pohjautuvat sovellukset aikaansaavat merkittäviä hyötyjä. Rohkeimmat puhuvat jopa seuraavasta teollisesta vallankumouksesta. Haaste on siinä, miten yritykset pystyvät hyödyntämään tämän saatavilla olevan potentiaalin.

## 6 Selvitys: Tuotannon digitalisaation nykytila Suomen valmistavassa teollisuuden yrityksissä

Jouni Tuomi (2007: 70-71) on kirjassaan Tutki ja lue – Johdatus tieteellisen tekstin ymmärtämiseen määritellyt tutkimuksen ja selvityksen erot seuraavasti:

Tärkein käytännöllinen ero selvityksen ja tutkimuksen välillä on selvityksestä puuttuva viitekehys. Tyypillisesti selvityksessä ei ole mitään teoreettista taustaa, vaan ne tehdään antamaan vastauksia johonkin käsillä olevaan käytännölliseen ongelmaan, --. Selvityksen tavoitteena on käsillä olevan ongelman kartoittaminen. Siinä selvitetään niitä asioita, joiden katsotaan kuuluvan kyseisen ongelman piiriin. Selvityksen ongelmat ja kysymykset eivät ole teoreettisesti perusteltuja. Niiden perustelu on käytännöllinen. Tutkimuksessa ongelmat ja kysymykset ovat aina teoreettisesti perusteltuja (= viitekehys).

Tätä opinnäytetyötä varten tehty kysely ei täytä tutkimuksen määritelmää, ja tutkimustarpeen laukaisijana toimivat käytännön havainnot. Näin ollen sen sijaan, että tästä opinnäytetyön osiosta käytettäisiin esimerkiksi termiä kyselytutkimus, sopivampi nimitys on opinnäytetyön osana tehtävä selvitys.

### 6.1 Lähtökohdat ja tavoitteet

Osana opinnäytetyötä oli tarve lisätä ymmärrystä tuotannon digitalisaation nykytilasta ja sen tavoitteista Suomen valmistavassa teollisuudessa. Selvityksen havaintoaineisto hankitaan kyselyn avulla.

Päätös selvityksen tekemisestä syntyi valmistavassa teollisuudessa vallitsevasta epätietoudesta reunalaskennan määritelmästä, sen käyttökohteista sekä hyödyistä. Sekä reunalaskenta että yleisesti teollinen internet sekoitetaan helposti perinteiseen teollisuusautomaatioon, kuten on käynyt ilmi Rittalin IT-myyn-tiimin kentällä tekemistä havainnoista. Väärinkäsitykset sekä epätietous hidastavat ja jopa estävät yritysten toiminnan kehittämistä ja päivittämistä, mikä saattaa ennemmin tai myöhemmin vaikuttaa kilpailukykyyn. Vaikka havainto koskee lähinnä reunalaskentaa, päätettiin selvitys laajentaa kattavammin tuotannon di-

gitalisaatioon ja sen mahdollistaviin teknologioihin. Näin tehtiin siksi, että reunalaskennan todettiin olevan usean eri teknologian summa, joka vaatii rinnalleen ja toimiakseen muita teknologioita, ratkaisusta riippuen esimerkiksi IoT ja pilvipalvelut. On myös luontevaa, että yritykset ottavat ensin käyttöön tunnetumpia ja jo standardoituja teknologiaratkaisuja. Reunalaskenta on tässä suhteessa melko uusi ja tuntemattomampi käsite. Voidaan todeta, että monet teollisen internetin teknologiat voidaan toteuttaa ilman reunalaskentaa, mutta reunalaskentaa ei ilman muita teknologioita. Käsitys siitä, millä tasolla ymmärrys muista teknologioista sekä niiden käyttöasteesta on, antaa tietoa yrityksien valmiudesta reunalaskennan käyttöönotolle.

Tuotannon digitalisaatio on terminä laaja ja monitulkinnallinen. Yleisesti digitalisaatiolla tarkoitetaan prosessien tai palveluiden toteuttamista tieto- ja viestintätekniikan avulla. Selvityksessä digitalisaatiolla viitataan teollisuuden digitalisaatioon ja siihen liittyvään verkkoon kytkettyyn teknologiaan. Tämä selvitys keskittyy tuotannon prosessien digitalisoimiseen, jossa älykästä dataa kerätään tuotannon eri prosesseista ja jalostetaan sellaiseen muotoon, että sitä voidaan soveltaa teollisen internetin teknologioiden avulla ja näin saavuttaa lisäarvoa. Teollisen internetin avulla älykkäät verkkoon kytketyt koneet ja tuotantoprosessit toimivat yhteen reaaliajassa parantaen toimitusketjun hallintaa. Sovellusalueita ovat esimerkiksi etähallinta, analytiikka, optimointi, ennakoiva huolto ja arvoketjun hallinta. (Collin & Saarelainen 2016: 37.)

## 6.2 Kyselyn kohderyhmä

Kyselyn kohderyhmäksi valittiin yrityksiä, joiden toimialana on valmistava teollisuus ja joilla on valmistusta Suomessa. Yrityksiä, joille kysely lähetettiin, valittiin yhteensä 126 kappaletta kohdennetusti Rittalin asiakasrekisteristä sekä Talouselämän verkkosivuilta löytyvän TOP500-listan avulla. Yrityksien nimiä, tai muita tunnistettavia tietoja ei tässä opinnäytetyössä julkaista, vaan ne ovat ainoastaan opinnäytetyön tekijän sekä opinnäytetyön toteutukseen osallistuvan Rittal Oy:n



tiedossa. Yritykset on valittu satunnaisesti eikä niillä ole mitään muuta tiedostettua yhdistävää tekijää kuin toimialana valmistava teollisuus sekä vähintään yksi Suomessa sijaitseva tuotantolaitos.

Pyrkimyksenä oli löytää jokaiselta yritykseltä henkilöedustaja, jolle kysely lähetetään sähköpostilla. Henkilöt valittiin ensisijaisesti tehtävänimikkeen mukaan ja heidän toimenkuviaan olivat pääasiassa tuotantopäällikkö, tuotantojohtaja, tehdaspäällikkö tai teknologiajohtaja. Lähteinä käytettiin yrityksiä verkkosivuilta löytyviä julkisia tietoja sekä Rittalin asiakasrekisteriä. Oikean yhteyshenkilön löytäminen osoittautui haastavaksi, ja joukkoon valikoitui myös muita toimenkuvia edustavia yhteyshenkilöitä. Lisäksi joukossa oli 11 yritystä, joille ei löytynyt lainkaan yhteyshenkilöä käytetyistä lähteistä ja näille kysely lähetettiin yrityksiä verkkosivuilta löytyvän yleissähköpostin kautta. Kyselyn saatesähköpostissa oli pyyntö välittää kysely oikealle henkilölle organisaation sisällä, mikäli vastaanottaja ei kokisi olevansa oikea henkilö vastaamaan kyselyyn.

### 6.3 Kyselylomake

Kysely toteutettiin Lyyti-tapahtumahallintajärjestelmän kyselylomakkeella. Kyselyyn valmisteltiin yhteensä 12 kysymystä, joista osa oli monivalintakysymyksiä, osa ”kyllä/ei”-kysymyksiä ja osa avoimia kysymyksiä, joihin oli mahdollista jättää sanalliset vastaukset. Vastaajan oli mahdollista täyttää kyselylomake täysin anonymisti. Lähtötiedoiksi vaadittiin yrityksen toimiala, henkilöstömäärä sekä liikevaihto, joihin oli kyselyssä annettu valmiit vastausvaihtoehdot Tilastokeskuksen määritelmien mukaisesti. Toimialalistan lähteenä käytettiin Tilastokeskuksen Toimialaluokitus 2008 C:n mukaista luokittelua, josta yksittäisiä alatoimialoja jätettiin pois. Pois jättäminen perusteltiin sillä, ettei yksikään valituista yrityksistä edustanut kyseistä toimialan alaluokkaa ja listan koettiin olevan käyttäjälähtävämpi, mitä vähemmän siinä olisi vaihtoehtoja. Lähtötietojen vastausvaihtoehdot on esitetty liitteessä 1. Henkilöstömäärän ja liikevaihdon vastausvaihtoehtoihin sovellettiin sekä Tilastokeskuksen että Business Finlandin määrittelemiä yritysten kokoluokituksia, erotellen lisäksi pienyritykset ja pien- ja kes-

kisuuret, eli pk-yritykset omiksi vaihtoehtoisiksi. Mikroyritykseksi lasketaan yritys, jonka palveluksessa on alle 10 työntekijää ja vuosiliikevaihto enintään kaksi miljoonaa euroa. Pienyrityksen henkilöstömäärä on enintään 50 työntekijää ja liikevaihto korkeintaan kymmenen miljoonaa euroa. Pk-yrityksen palveluksessa on enintään 250 työntekijää ja vuosiliikevaihto korkeintaan 50 miljoonaa euroa. Midcap-yrityksen vuosiliikevaihto on enintään 300 miljoonaa euroa ja henkilöstömäärä on sama kuin pk-yrityksellä, enintään 250 työntekijää. Suuren yrityksen henkilöstömäärä on 250 tai yli ja liikevaihto yli 300 miljoonaa euroa.

Yhteystiedot oli mahdollista jättää kyselyn lopussa, jos vastaaja antoi suostumuksen ottaa yhteyttä vastauksiinsa liittyvien mahdollisten lisäkysymyksien varalta, tai jos vastaaja halusi lisätietoja Rittalin tuotannon digitalisaation ratkaisuihin tai muihin Rittalin tuotteisiin liittyen.

Kyselyn kysymykset valittiin Rittalin intresseihin pohjautuen. Vastauksia haettiin seuraaviin kysymyksiin:

- Mikä on Suomen valmistavan teollisuuden tuotannon digitalisaation nykytilanne?
- Millaisia tulevaisuudennäkymiä valmistavan teollisuuden digitalisatiolla on?
- Onko reunalaskenta käsitteenä yrityksille tuttu?
- Missä tuotantoprosessin vaiheissa reunalaskentaa hyödynnetään tai mahdollisesti tullaan tulevaisuudessa hyödyntämään?
- Millaisia haasteita yritykset kokevat tuotannon digitalisaatioon liittyvän?

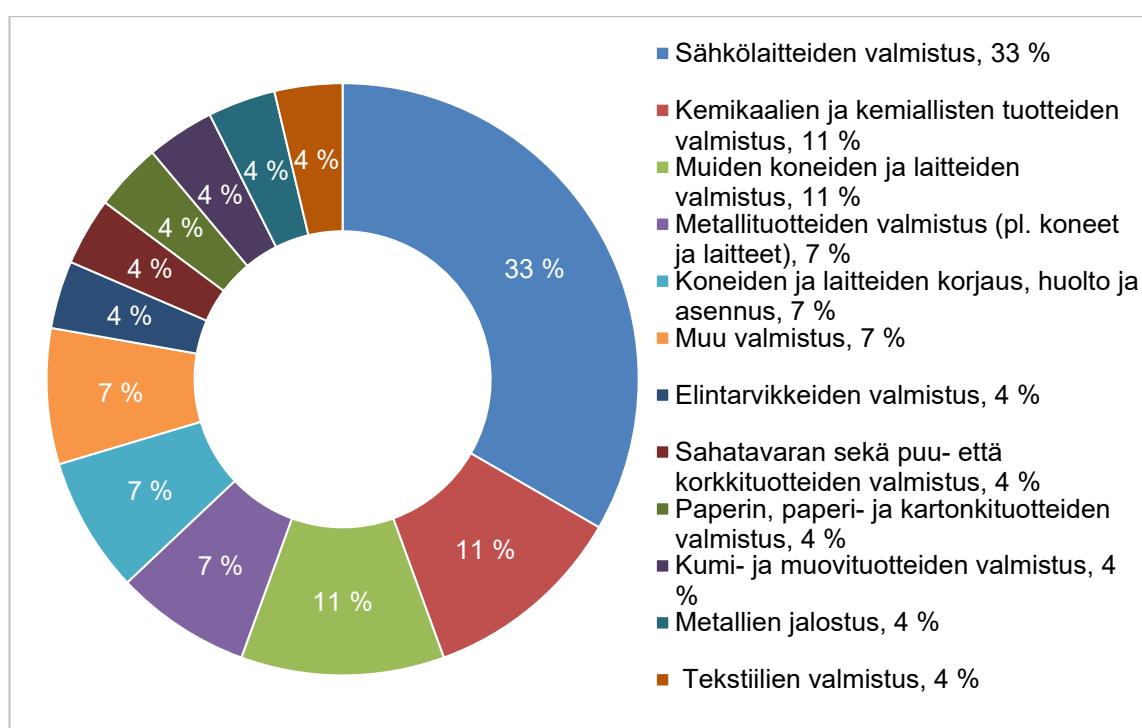
Tulevaisuuden näkymien aikajanaksi mainittiin kyselyssä viisi vuotta tästä hetkestä eteenpäin. Kysely lähetettiin vastaanottajille maaliskuussa 2021. Kysymysten laadinnassa ja valinnassa hyödynnettiin alalla tehtyjen kyselyiden raportteja, kuten Startus Edge Computing trend -raporttia sekä Management events State of automation: Manufacturing in Industry 4.0 -raporttia. Kaikki kyselylomakkeen kysymykset sekä vastausvaihtoehdot on esitetty liitteessä 1.

## 6.4 Kyselyn tulokset

Kyselyyn tuli yhteensä 27 kpl vastauksia, joten vastausprosentti oli 21,4 %. Vastaukset esitetään prosentteina pyöristettyinä lähimpään kokonaislukuun.

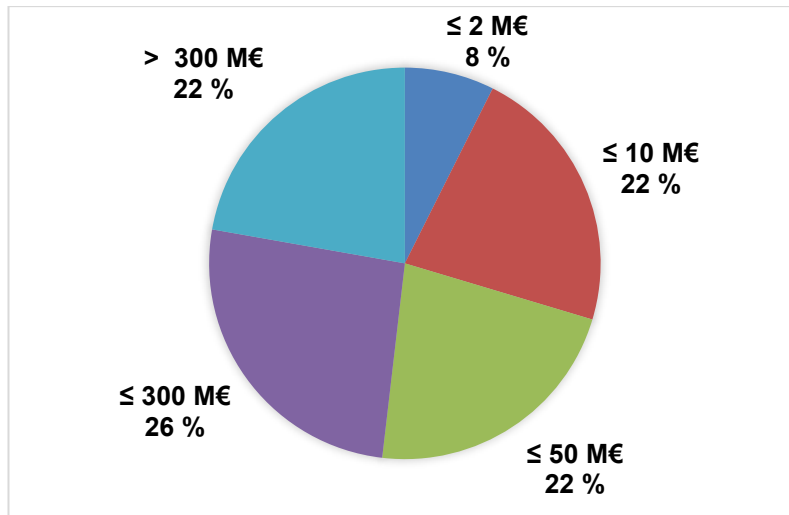
### 6.4.1 Vastajien lähtötiedot

Vastajien lähtötiedot on esitetty kuvioissa 1-3. Kuviossa 1 on esitetty vastajien toimialat. 33 % eli kolmannes vastanneista yrityksistä edusti teollisuuden toimialaa sähkölaitteiden valmistus.



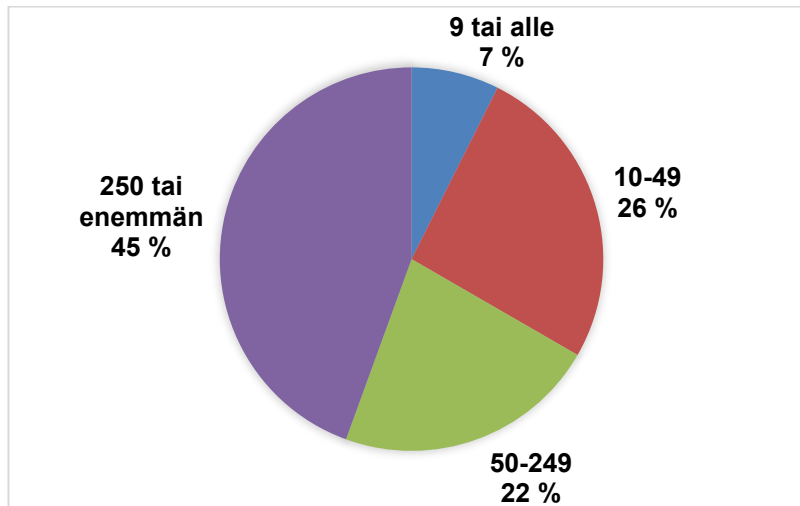
Kuvio 1 Kyselyyn vastanneiden yritysten toimialajakauma

Kuviossa 2 on esitetty kyselyyn vastanneiden yritysten liikevaihto. Jokainen vaihtoehdoista oli edustettuna, vähiten kuitenkin mikroyritykset eli yritykset, joiden liikevaihto on enintään kaksi miljoonaa euroa.



Kuvio 2 Kyselyyn vastanneiden yritysten liikevaihtojakauma

Kuviossa 3 on esitetty kyselyyn vastanneiden edustamien yritysten henkilöstömäärät. 45 % yrityksistä edusti henkilöstömäärältään suuryrityksiä, eli yrityksessä on työntekijöitä 250 tai sitä enemmän. Tässäkin olivat mikroyritykset, alle kymmenen työntekijän yritykset vähiten edustettuina.



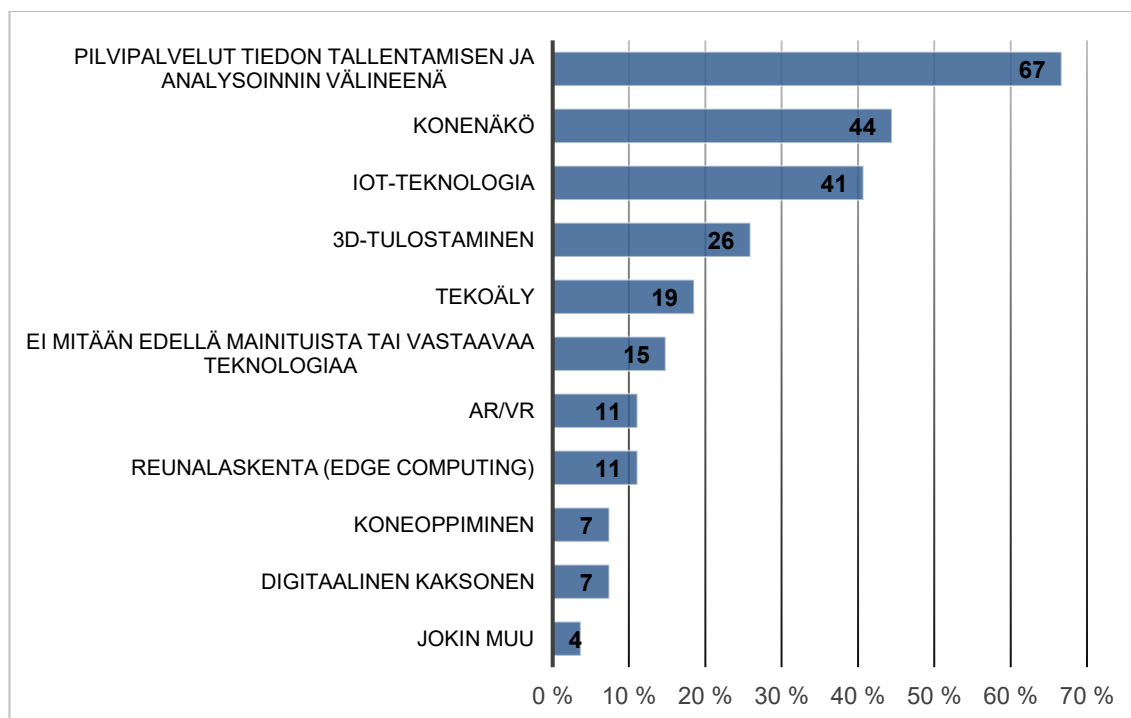
Kuvio 3 Kyselyyn vastanneiden yritysten työntekijämäärä

Yhteenvetona voidaan todeta, että keskivertovastaaja edustaa toimialan sähkölaitteiden valmistuksen suuryritystä. Tulokset eivät kerro eri yrityskokojen edustajien vastausinnokkuudesta, sillä on mahdollista, että kyselyyn on valikoitunut

vähemmän mikroyrityksiä kuin suurempia yrityksiä. Yritysten, joille kysely lähetettiin, koko- tai toimialaluokituksista ei ole erillistä tilastoa.

#### 6.4.2 Valmistavan teollisuuden tuotannon digitalisaation nykytilanne

Kysymykseen nro 1 noin 66 % vastaajista ilmoitti yrityksen käytössä olevan pilvipalvelut tiedon tallentamisen ja analysoinnin välineenä. 44 % käyttää konenäköteknologiaa, 41 % IoT-teknologiaa ja 26 % kertoi käytössä olevan 3D-teknologiaa. Reunalaskenta oli käytössä 11 % kyselyyn vastanneista yrityksistä. 15 % vastaajista kertoi, ettei yrityksellä ole käytössä mitään listatuista tai vastaavista teknologioista. Tulokset on esitetty kuviossa 4. Yleisimmät hyödyntämiskohteet käytössä oleville teknologioille on protot, laadunvalvonta sekä kunnonvalvonta.



Kuvio 4 Yrityksissä jo käytössä olevat teknologiat

Kaksi yritystä kolmesta vastasi kysymykseen nro 2, että tulevan viiden vuoden aikana on suunnitelmissa ottaa käyttöön jokin kohdan 1 tai vastaava tuotannon-tehostamismenetelmä. Tarkennuksena annettuun vastaukseen liittyen mainittiin mm. koneoppiminen, pilvipalvelut, IoT, AR/VR sekä digitaalinen kaksonen.

Vastaajat, jotka vastasivat kysymykseen nro 2, että seuraavan viiden vuoden aikana ei ole suunnitelmissa ottaa käyttöön mitään kohdan yksi tai vastaavista tuotannotehostamismenetelmistä, tarkensivat valitsemaansa vastaustaan, ettei ole tarvetta, ei ole tällä hetkellä suunnitelmissa, tai kehityshankkeet jäävät yrityksessä yksilön vastuulle eivätkä tästä syystä etene.

#### 6.4.3 Kehityksen kohteena olevat tuotantoprosessit

Vastauksia kysymykseen nro 3 ”Mikä tuotantoprosessin vaiheista erityisesti on ollut tai tulee lähitulevaisuudessa olemaan kehityskohteena?” vastauksista nousi erityisesti materiaalivirran hallinta sekä erilaiset huoltoon ja kunnossapitoon liittyvät vaiheet. Lisäksi laadunvalvontaan ja prosessin optimointiin liittyvät tehtävät toistuivat vastauksissa. Myös simulointi, logistiikka ja tuotannon automatisointi tulivat mainituiksi.

48 % yrityksistä vastasi, että ennakoivaan huoltoon liittyvät toimenpiteet ovat ajankohtaisia. Tämä on toteutettu esimerkiksi eri prosessin vaiheissa mitattavilla parametreilla, joista oppimalla pystytään ennakoimaan kulumaa ja laiterikkoja.

59 % vastasi, että materiaalivirran hallinta digitaalisin keinoin on ajankohtaista. Vastauksien perusteella useissa yrityksissä varastonhallinta ja materiaalivirran ohjaus on automatisoitu ja ohjaus tapahtuu digitaalisin keinoin. Osalla yrityksistä tämä on vasta suunnitelma-asteella, ja materiaalivirran hallintaan liittyvät prosessit ovat lähitulevaisuudessa kehityskohteina.

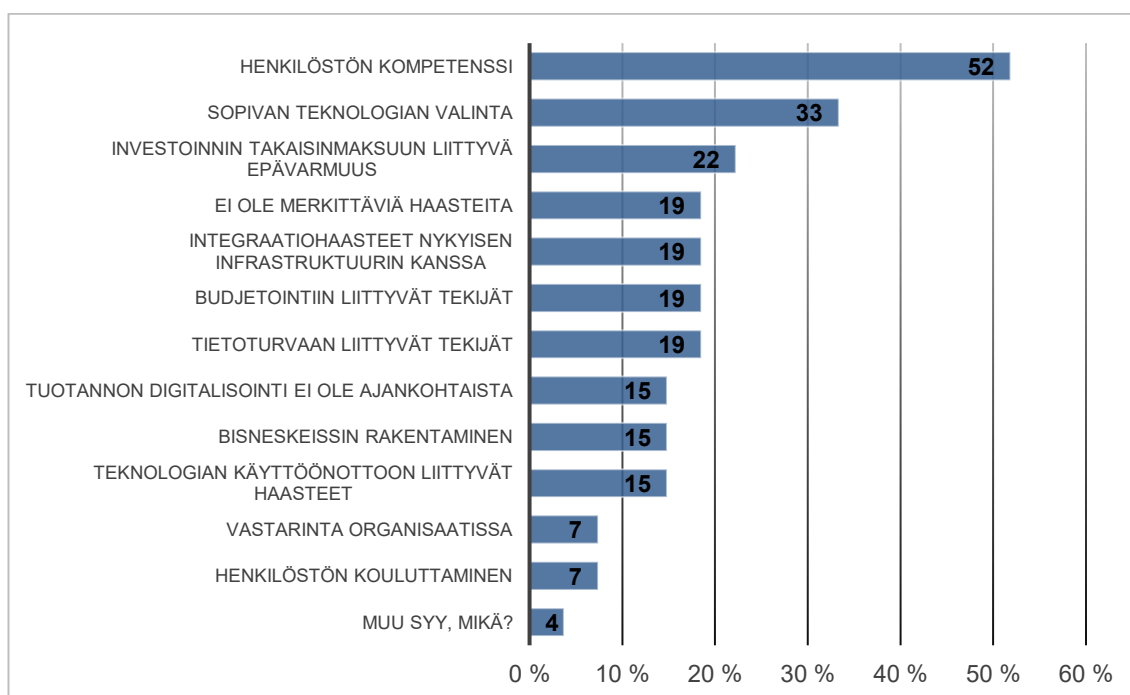
#### 6.4.4 Reunalaskenta

Kysymykseen nro 6 ”Onko reunalaskenta (edge computing) käsitteenä tuttu?” jopa 70 % yrityksistä vastasi, että se ei ole tuttu. Noin 15 % vastasi, että on tuttu ja loput 15 % vastasivat tietävänsä asiasta jonkin verran.

Kysymykseen nro 7 ”Oletteko hyödyntäneet tai suunnitelleet hyödyntävänne reunalaskentaa tuotannossanne” 93 % vastaajista vastasi ”ei”. 7 % vastasi ”kyllä”.

### 6.4.5 Haasteet

Kysymykseen nro 8 ”Mitkä ovat suurimmat haasteet tuotannon digitalisaation edistämiseksi sekä uuden teknologian käyttöönotolle?” 52 % vastaajista valitsi vastausvaihtoehdon henkilöstön kompetenssi, 38 % valitsi sopivan teknologian valinnan ja 22 % investoinnin takaisinmaksuun liittyvän epävarmuuden. 19 % vastasi, ettei ole merkittäviä haasteita. Vastauksissa tulee huomioida, että oli mahdollista valita useampi kuin yksi vastausvaihtoehdoista. Vastaukset on esitetty kuviossa 5.



Kuvio 5 Haasteet tuotannon digitalisaation edistämiseen ja uuden teknologian käyttöönottoon liittyen

Muita syitä valmiiksi annettujen vaihtoehtojen lisäksi oli resurssien puuttuminen. Vastaajat perustelivat antamiaan vastauksia muun muassa koko yhtiön kattavan arkkitehtuurin puuttumisella, keskusorganisaation tietoturvalinjauksilla sekä epävarmuudella investointikustannuksien tuomasta lisäarvosta asiakkaan näkökulmasta.

#### 6.4.6 Henkilöstön kehittäminen ja tiedon hankinta

Kysymykseen nro 9 ”Kehityksen ja uuden teknologian käyttöönoton mahdollistamiseksi henkilöstöä on..” enemmistö, 59 % vastaajista vastasi, että henkilöstöä on koulutettu ja 15 %, että henkilöstöä on rekrytoitu. Toiseksi eniten, 37 % vastasi, että yrityksessä ei ole vielä tehty mitään edellä mainituista toimenpiteistä, ja 33 % vastasi, että yritys käyttää ulkoisia toimijoita. Vastaajat kertoivat käyttävänsä teknologiaan liittyvissä kehityshankkeissa konsultteja, partneriverkostoa ja toimittajia sekä tekevänsä yhteistyötä paikallisten korkeakoulujen kanssa. Vastauksissa tulee huomioida, että vastaaja on voinut valita useamman kuin yhden vastausvaihtoehdoista.

Avoimeen kysymykseen nro. 10 ”Mistä hankit tietoa liittyen tuotannon digitalisaation mahdollisuuksiin?” vastattiin google, toimittajat ja partnerit, messut ja muut alan tapahtumat, oma organisaatio sekä alan julkaisut.

Kysymykseen nro. 11 ”Digitalisaatioon liittyvän ajankohtaisen tiedon ylläpitäminen ja henkilöstön osaamisen päivittäminen” 4 % vastasi helppoa ja vaivatonta; 48 % vastasi toisinaan vaativaa, mutta hallittavissa; 26 % vastasi vaativaa ja 22 % vastasi ei ole ajankohtaista.

### 6.5 Havainnot ja johtopäätökset

Kyselyn otanta on hyvin pieni, joten tuloksiin on suhtauduttava varauksella. Vastaamatta jättäminen ja syy siihen ovat voineet myös rajata tietyn tyyppiset vastaukset kokonaan pois. Esimerkiksi jos aihe on kyselyn vastaanottaneelle henkilölle tai yritykselle täysin vieras eikä se liity henkilön toimenkuvaan, tai aihe muutoin ei ole ajankohtainen, ei tällöin ehkä ole koettu tarpeelliseksi vastata kyselyyn lainkaan. Kapea otanta ja siitä johtuva tuloksien epäluotettavuus olivat kuitenkin selvitystä laadittaessa tiedostettuja tekijöitä. Korkeamman vastausprosentin hankkimista harkittiin kyselyn vastausajan loputtua, mutta todettiin, että ensinnäkin selvityksen oli tarkoitus olla vain pieni osa tämän opinnäytetyön kokonaisuudesta, ja toisekseen vastauksien määrä ja laatu riittivät alkupe räiseen tavoitteeseen, joka oli tilannekuvan saaminen. Kyselyn tuloksien ei ole



tarkoitus tuottaa aineistoa tutkimustiedoksi. Aihe on kuitenkin varsin ajankohtainen, ja vastaava selvitys olisi mielenkiintoista tehdä jatkotutkimuksia varten esimerkiksi 1-2 vuoden sisällä laajemmassakin mittakaavassa.

Muutamista avoimista vastauksista oli havaittavissa, että vastaaja saattoi sekoittaa älykkään teknologian perinteisen teollisuusautomaation kanssa. Tätä havaintoa ja yleistä väärinkäsitystä tukee myös tässä opinnäytetyössä aineistona käytetty kirjallisuus. Tästä voinee tehdä johtopäätöksen, että kyselyn aihe oli vastaajalle osittain tai täysin vieras.

Kappaleessa 6.5.1 Muut tutkimukset esitellään kaksi hiljattain Suomessa julkaistua tutkimusta valmistavan teollisuuden digitalisaatiosta. Niissä saadut tulokset ovat monilta osin hyvin samankaltaiset kuin tässä selvityksessä saadut tulokset esimerkiksi käytössä olevien teknologioiden sekä merkittävimpien haasteiden osalta.

Kappaleessa 6.3 esiteltiin alkuperäisten tavoitteiden pohjalta laaditut kysymykset, joihin haluttiin tämän selvityksen avulla saada vastauksia. Seuraavaksi esitellään kyselyn tulosten pohjalta tehtyjen havaintojen perusteella vastaukset näihin alkuperäisiin kysymyksiin.

## **Yrityksien digitalisaation nykytila**

75 % vastaajista kertoi, että yrityksen tuotantoprosesseissa on käytössä jokin teollisen internetin teknologia, joista yleisimmät ovat pilvipalvelut, IoT ja kone näkö. Teknologiaa hyödynnetään monipuolisesti esimerkiksi laadunvalvonnassa, kunnonvalvonnassa sekä protojen valmistuksessa. Lisäksi ennakoiva huolto sekä materiaalivirran hallinta digitaalisin keinoin ovat ajankohtaista keskimäärin joka toisessa yrityksessä. 15 % vastaajista ilmoitti, ettei tuotannon digitalisointi ole ajankohtaista.

Koska data toimii polttoaineena älykkäiden järjestelmien toiminnassa, on IoT-teknologia useiden edistyneiden teollisuussovelluksien mahdollistaja. Kuitenkin

59 % vastaajista vastasi, että IoT-teknologiaa ei ainakaan toistaiseksi ole käytössä. Tämä luo rajoitteita edistyneiden sovelluksien, kuten reunalaskennan käyttöönotolle.

Tilastokeskuksen teettämän tutkimuksen *Tietoliikenteen käyttö yrityksissä* tulos on joiltakin osin melko yhdenmukainen tämän kyselyn tuloksien kanssa. Sen mukaan 48 % yrityksistä käyttää IoT-teknologiaa, 85 % käyttää pilvipalveluita ja 17 % tekoälyteknologiaa (Suomen virallinen tilasto 2021: 1, 14, 18). Vastaavasti tämän opinnäytetyön kyselyn mukaan 41 % yrityksistä käyttää IoT-teknologiaa, 67 % pilvipalveluita ja 19 % tekoälyteknologiaa. Tilastokeskuksen tutkimus on esitelty kappaleessa 6.5.1 Muut tutkimukset.

Vastauksista on pääteltävissä, että aiheena tuotannon digitalisaatio ja siihen liittyvä teknologia kiinnostaa yrityksissä ja suurimmassa osassa on käytössä yksi tai useampi teknologia. Osa vastaajista kommentoi kyselyn aiheen olevan ajankohtainen ja tärkeä kehityskohde yrityksessä. Useampi vastaaja myös kommentoi sen olevan haastava aihe, jota on vaikea lähestyä ilman case-esimerkkejä. Muutama vastaaja myös kommentoi, ettei digitalisaatio ole yrityksessä ajankohtaista, kustannustehokasta tai toistaiseksi kannattavaa.

VTT:n Suomen valmistavan teollisuuden yrityksille teettämän tutkimuksen mukaan digitalisaatiolla on positiivinen korrelaatio liiketoiminnan tulokseen ja se parantaa kilpailukykyä. Vaikka digitalisaatio on vain yksi kilpailukykyä parantava tekijä, on se VTT:n mukaan merkittävä osa-alue. Digitalisaatio lisää toiminnan ketteryyttä ja kestävyyttä sekä mahdollistaa reagoinnin asiakkaiden nopeisiin muutoksiin ja räätälöityihin tarpeisiin. Lisäksi digitalisaatio mahdollistaa saumatoman, läpinäkyvän ja reaaliaikaisen tiedonsiirron koko partneriverkoston kesken. Tutkimuksessa todettiin, että Suomen valmistavan teollisuuden digitalisaatiotaso on parannettava, jotta valmistava teollisuus pysyisi kilpailukykyisenä ja säilyisi Suomessa. (Saari et al. 2021: 1, 11.)

## **Yrityksien tulevaisuuden näkymät digitalisointiin liittyen**

Monet vastaajista olivat mitä ilmeisemmin tietoisia teollisen internetin tuomista hyödyistä, ja digitalisaatio on monissa yrityksissä osa tuotannon kehittämissuunnitelmaa. 67 % vastaajista arvioi, että tulevan viiden vuoden aikana jokin tai joitakin teollisen internetin teknologioita otettaisiin käyttöön. Tähän viittaavat myös vastaukset, joiden mukaan toimenpiteitä henkilöstön osaamistason kehittämiseksi on tehty. Huomionarvoista kuitenkin on, että kolmannes yrityksistä ei ole suunnitellut uusia hankkeita tuotannon digitalisaatioon liittyen seuraavan viiden vuoden aikana. Tuloksessa ei ole eritelty yrityksiä, jotka ovat hiljattain tehneet investointeja tuotannon digitalisointiin eikä uusia hankintoja ole tästä syystä tiedossa.

## **Reunalaskenta käsitteenä ja käytännössä, sekä valmiudet sen käyttöönottoon**

Kyselyn kysymyksen nro 6 vastaukset tukivat hyvin tämän opinnäytetyön tutkimusosuuden käynnistänyttä olettamusta ja Rittal Oy:n kentällä tekemiä havainnointoja siitä, että reunalaskenta on toistaiseksi käsitteenä vieras. Jopa 70 % vastanneille reunalaskenta ei ollut käsitteenä lainkaan tuttu.

Joukossa oli yksittäisiä yrityksiä, joiden tuotannossa käytetään reunalaskentaa. Sitä hyödynnetään nopeassa tiedonsiirrossa sekä edistyksellisten sovelluksien käytössä. Yritykset, jotka käyttävät reunalaskentaa, hyödyntävät monipuolisesti eri teknologiaa, kuten tekoälyä, konenäköä ja IoT-teknologiaa. Koska valtaosalle vastanneista reunalaskenta oli käsitteenä vieras, jää vastaus kysymykseen ”missä tuotantoprosessin vaiheissa reunalaskentaa hyödynnetään tai mahdollisesti tullaan tulevaisuudessa hyödyntämään” vain muutaman vastaajan varaan. Vastauksien perusteella reunalaskentaa ei ainakaan toistaiseksi osata yleisesti tunnistaa osana tuotannon digitalisointia.

Kyselyn perusteella osassa yrityksissä on jo nyt käytössä jokin reunalaskennan kannalta suotuisa teknologia, kuten pilvipalvelut ja IoT-teknologia. Lisäksi yrityk-

set hyödyntävät nykyisin käytössä olevaa teknologiaa sovelluksissa, joita voitaisiin tehostaa reunalaskennan avulla. Vaikka reunalaskenta olikin yleisesti käsitteenä vieras, teknisiä valmiuksia sen käyttöönotolle voidaan todeta olevan osassa yrityksiä olemassa. Lisäksi kyselyssä esiin nousseet lähitulevaisuuden kehityskohteet, kuten huoltoon liittyvät ennakoivat toimenpiteet sekä varaston ja materiaalivirran hallinta voidaan toteuttaa reunalaskennan keinoin. Sopivaa ratkaisua valittaessa saattavat reunalaskennan ratkaisut olla monessakin tapauksessa potentiaalinen vaihtoehto.

Yrityksien listaamat sisäiset haasteet yhdistettynä reunalaskennan ratkaisuihin, joiden laajasti hyväksytyt infrastruktuuri- ja toimintamallit ovat edelleen puutteelliset, voi tehdä reunalaskennan käyttöönotosta haastavaa. Riskinä on myös, että yritykset ottavat käyttöön keskeneräisiä teknologiapinoja, tai ajavat itsensä tiedostamattaan usean eri toimittajan loukkuun. Toisaalta useat yritykset ilmoittivat käyttävänsä jo nyt ulkoisia toimijoita teknologian kehittämisessä ja käyttöönotossa. Suomessa on useita teknologia-alan yrityksiä, jotka tarjoavat reunalaskennan palveluita ja siihen liittyvää konsultointia.

## **Haasteet**

Kyselyn perusteella merkittävimmät haasteet kehittämisen ja uuden teknologian käyttöönottoon liittyen ovat erityisesti henkilöstön kompetenssi, sopivan teknologian valintaan liittyvät haasteet sekä investoinnin takaisinmaksuun liittyvät epävarmuus. Lisäksi 26 % vastaajista totesi, että ajankohtaisen tiedon ylläpitäminen ja henkilöstön osaamisen kehittäminen on vaativaa. Kyselyn tulos on yhdenmukainen VTT:n julkaiseman tutkimuksen kanssa, jossa yrityksien merkittävimpien haasteiden todettiin olevan riittämätön ymmärrys, riittämättömät resurssit sekä toteutuksen haasteet. VTT:n tutkimuksesta kerrotaan tarkemmin kappaleessa 6.5.1 Muut tutkimukset. VTT:n mukaan resurssirajoitukset sekä puutteellinen teknologiaymmärrys hidastavat digitalisaatiotoimia ja investointeja. Resursseilla tarkoitetaan aikaa, kustannuksia ja takaisinmaksuaikaa sekä ammattitaitoista henkilöstöä. (Saari et al. 2021: 12.)

Yritykset tarvitsevat teknologia-alan ammattilaisien ja alan osaajien tukea sopivan teknologian valinnassa sekä käyttöönotossa. Lähtötason kartoittamista varten VTT on laatinut valmistavan teollisuuden yrityksille ManuMaturity -itsearviointityökalun sekä lisäksi DigiSiirto-matriisin, jolla tunnistetaan yrityksen nykyinen digitalisaatiotaso sekä mahdollinen kehitystarve.

### 6.5.1 Muut tutkimukset

#### **VTT: Digitalisaation Suomen valmistava teollisuuden pk-yrityksissä (2020) ja Digitalisaatio parantaa yrityksen kannattavuutta (2021)**

VTT tutkimuskeskus julkaisi vuonna 2020 tutkimuksen digitalisaatiosta Suomen valmistavan teollisuuden pk-yrityksissä. Tutkimuksessa tarkasteltiin muitakin digitalisaation osa-alueita kuin valmistusprosessit, kuten hallinnolliset tehtävät. Tutkimuksessa digitalisaatioaste jaettiin eri tasoihin sen mukaan, kuinka yritykset ovat hyödyntäneet digitalisaatiota valmistusprosesseissaan tai sitä tukevissa toimissa, kuten logistiikassa. Tutkimuksen mukaan Suomen valmistavan teollisuuden yritykset ovat usealla eri tasolla, mutta yleisesti digitaalisten sovelluksien ja teknologian hyödyntämisessä kaikissa eri valmistusprosessin vaiheissa on vielä parannettavaa. Joukossa on yrityksiä, joiden digitalisaatioaste on jo korkealla tasolla, mutta myös yrityksiä, joiden toiminta on toistaiseksi pitkälti manuaalista ja erilaisien digitaalisten työkalujen ja taitojen hyödyntäminen puuttuu kokonaan. Tuotannon automaatiossa, jota mitataan käyttöönotettujen automatisoitujen robottien avulla, Suomi on ollut globaalissa mittakaavassa edelläkävijä ja on edelleen kehittyneellä tasolla. (Heilala et al. 2020: 3-5.)

Tutkimuksessa listattiin kolme yleisintä haastetta, joita yritykset digitalisoinnin kanssa kohtaavat. Nämä ovat:

- Riittämätön ymmärrys: Yritykset ovat riippuvaisia johtajan intohimosta ja kiinnostuksesta ICT ratkaisuja kohtaan, ei ymmärretä ICT:n liiketoimintahyötyä ja pelätään sitoutumista toimittajaan.
- Riittämättömät resurssit: Ei ole aikaa tutustua tarjolla oleviin digitalisaation mahdollisuuksiin, kustannuksiin ja investoinnin takaisinmak-

suun liittyä epäselvyyksiä ja on pulaa ammattitaitoisesta henkilöstöstä, joka voisi suunnitella, toteuttaa tai hankkia digitaalisia ratkaisuja.

- Toteutuksen haasteet: Kustannustehokkaan ja riskittömän muutoksen toteuttaminen on käytännön tasolla vaikeaa, kokonaistoimitusta ei osata jakaa useaan toteutuskerrokseen ja sopivan ratkaisun tarjoaja on vaikea valita. (Saari et al. 2021: 3.)

Vuonna 2021 VTT julkaisi tutkimuksen, jossa edellä esitetyn tutkimuksen lähtötietoja ja siinä esitettyä DigiSiirto-matriisia hyödyntämällä tutkittiin valmistavan teollisuuden pk-yrityksien digitalisaatiotasoa ja sen vaikutusta liiketoiminnan tulokseen. Tasot, joihin yritykset jaettiin, olivat yleinen taso, kehittynyt, integroitunut, edelläkävijä ja tulevaisuuden mahdollisuus. Tutkimustuloksen perusteella valmistaminen, tuotantohenkilön digitaaliset taidot sekä asiakasrajapinta olivat valtaosalla yrityksistä alimmalla, eli yleisellä tasolla. Tuotteet ja palvelut, ennakointi sekä hallinnolliset toimet olivat kehittyneellä tasolla. (Saari et al. 2021: 7.)

Tutkimustuloksien perusteella tehtiin seuraavat havainnot:

- Suomen valmistavan teollisuuden pk-yrityksissä digitaalisatio on jo alkanut, mutta se on vielä kesken valtaosassa yrityksissä.
- Yritysverkostossa tiedonkulku heikkenee kolmannella ja neljännellä alihankintatasolla, joka heikentää verkoston kokonaistuottavuutta.
- Digitalisaatioon tehdyillä investoinneilla on positiivinen korrelaatio liiketoiminnan tuloksen kanssa. (Saari et al. 2021: 12.)

### **Tilastokeskus 2021: Tietoliikenteen käyttö yrityksissä**

Tilastokeskus julkaisi vuonna 2021 tilaston Tietoliikenteen käyttö yrityksissä.

Toisin kuin tätä opinnäytetyötä varten tehty selvitys, Tilastokeskus ei rajoitu pelkästään tuotantoon ja sen prosesseihin. Tämän tilaston mukaan Suomen teollisuusalan yritykset, jotka työllistävät vähintään kymmenen henkilöä, käyttävät pilvipalveluita, esineiden internetiä ja tekoälyteknologiaa seuraavasti:

- 85 % yrityksistä käyttää pilvipalveluita. Yleisimmät käyttötarkoitukset ovat sähköposti (74 %), toimisto-ohjelmat (64 %), tiedostojen tallennus (63 %) ja tietoturva (54 %).

- 48 % yrityksistä käyttää esineiden internetiä. Yleisimmät käyttötarkoitukset ovat toimitilojen turvallisuuden valvonta (38 %), energiakulutuksen hallinta (17 %), tuotantoprosessit (17 %) sekä kuntoon perustuva huolto (13 %).
- 17 % yrityksistä käyttää tekoälyteknologiaa. Yleisin tekoälyn käyttötarkoitus on tuotantoprosessit (7 %). Yleisimmät käytössä olevat tekoälyteknologiat ovat tekoälyä käyttävä ohjelmistorobotiikka (10 %), koneoppiminen (6 %), kuvan tunnistus ja käsittely (4 %) sekä text mining (4 %). Lisäksi 19 % yrityksistä on harkinnut tekoälyteknologian käyttöönottoa. (Suomen virallinen tilasto 2021: 15, 18, 20, 22, 29-32.)

Tilastokeskuksen mukaan yleisimmät tekoälyohjelmien- ja järjestelmien hankintatapa teollisuusalan yrityksissä on käyttövalmiin kaupallisen ohjelman tai järjestelmän ostaminen (56 %), tekoälyn kehittämisen tai muokkaamisen ostaminen ulkopuoliselta palveluntarjoajalta (40 %), ohjelman tai järjestelmän ostaminen, jota oma henkilöstö muokkasi (38 %), yrityksen oma henkilöstö kehitti ne (22 %) sekä avoimen lähdekoodin ohjelman tai järjestelmän hankkiminen, jota oma henkilöstö muokkasi (10 %). (Suomen virallinen tilasto 2021: 33.)

Syitä sille, miksi teollisuusalan yritykset eivät käyttäneet vuonna 2021 tekoälyteknologiaa ovat tarpeellisen osaamisen puute yrityksessä (66 %), yhteensopivuusongelmat nykyisten välineiden, ohjelmien tai järjestelmien kanssa (52 %), ongelmat tarvittavan datan saatavuudessa tai laadussa (46 %), kuluihin liittyvät tekijät (43 %) sekä huoli tietosuojasta tai yksityisyyden suojasta (26 %). (Suomen virallinen tilasto 2021: 34.)

## 7 Johtopäätökset

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin kirjallisuuskatsauksen avulla, mitä reunalaskenta tarkoittaa, mitkä ovat sen taustalla olevat merkittävimmät teknologiat, mitkä ovat kirjallisuudessa eniten esitetyt implementointimenetelmät, minkälaisia elementtejä reunalaskennan ekosysteemiin ja infrastruktuuriin kuuluu, sekä lisäksi käytiin läpi joitakin reunalaskentaan liittyviä, kirjallisuudessa eniten toistuvia motiiveja sekä haasteita. Lopuksi tätä tietoa sovellettiin valmistavan teollisuuden ympäristöön ehdottamalla optimaalisinta implementointimenetelmää, esittämällä neljä sovellusesimerkkiä sekä markkinoilla tarjolla oleva teollisuusympäristöön soveltuva reunalaskentaratkaisu. Opinnäytetyön loppuosassa esiteltiin työn ohessa tehty kysely, joka lähetettiin suomalaisille valmistavan teollisuuden yrityksille tavoitteena lisätä ymmärrystä tuotantoprosessien digitalisaation statuksesta ja lähitulevaisuuden näkymistä.

Vaikka referenssiarkkitehtuureja on tarjolla, ei reunalaskentajärjestelmiä ole otettu laajamittaisesti käyttöön. Reunalaskentaan liittyen on julkaistu useita tutkimuksia ja tätäkin kirjallisuuskatsausta tehdessä julkaistiin jatkuvasti uutta materiaalia. Toistaiseksi reunalaskentateknologia on vielä kehitysvaiheessa eikä sille ole standardoitua määritelmää, arkkitehtuuria tai protokollaa. Tämä näkyi erityisesti laajan kirjallisuusaineiston eriävissä määritelmässä liittyen esimerkiksi implementointimenetelmien toteutukseen ja arkkitehtuuriin, monien esitettyjen ratkaisujen ollessa toistaiseksi teoria-asteella. Tässäkin opinnäytetyössä esitetty kokonaisvaltainen määritelmä on vain yksi olemassa olevista, jota tukemaan hankittiin useita lähdemateriaaleja.

Haasteiden lisäksi reunalaskennasta on monia hyötyjä, erityisesti uusien soveluksien mahdollistajana. Paljon voidaan odottaa 5G:n ja reunalaskennan yhteisistä hyödyistä, erityisesti MEC-implementointimenetelmällä toteutettuun reuna-arkkitehtuuriratkaisuun liittyen. MEC on kirjallisuuskatsauksen pohjalta ainoa reunalaskennan arkkitehtuurimalli, jota tällä hetkellä kehitetään standardointijärjestöjen toimesta.



Ottamatta kantaa käytettyyn implementointimenetelmään, reunalaskennan hyödyistä löytyy jo käytännön esimerkkejä. Lisäksi reuna-alustapalveluita tarjoavia yrityksiä löytyy useita. Myös alan ammattilaisten keskuudessa järjestetään aktiivisesti tapahtumia, joita myös hyödynnettiin tätä opinnäytetyötä tehdessä tiedon hankkimiseksi. Reunalaskentaan liittyvät tutkimukset kohdistuivat useille toimialoille aina kuluttajatuotteista liikenteen ohjaukseen, mutta soveltaminen valmistavan teollisuuden ympäristössä herättää erityisen paljon kiinnostusta.

Tässä opinnäytetyössä tutkittava kohde, eli reunalaskenta, rajattiin valmistavan teollisuuden ympäristöön ja sovelluksiin. Jatkotutkimukseen soveltuva aihe on reunalaskennan soveltaminen muilla toimialoilla. Erityisesti 5G:n käyttöönoton myötä reunalaskennan soveltaminen liikenteessä tuntuu kiinnostavan tutkijayhteisöjä. Lisäksi reunalaskennan infrastruktuurin käyttöönotto sekä siihen liittyvät kustannukset rajattiin kokonaan tämän tutkimuksen ulkopuolelle, joten sitä voidaan soveltaa jatkotutkimuksena jossakin käytännön kehitysprojektissa.

Opinnäytetyön ohella tehdyn selvityksen tulokset tukivat hyvin tutkimusosuuden käynnistänyttä olettamusta, että reunalaskenta on Suomen valmistavan teollisuuden yrityksissä käsitteenä vieras eikä sitä sen takia osata tunnistaa osaksi tuotannon digitalisaatiota. Reunalaskennan käyttö Suomen valmistavan teollisuuden yrityksissä on vielä melko harvinaista. Tekninen valmius osalta yrityksistä löytyy jo, sillä selvityksessä havaittiin, että erilaisia teollisen internetin teknologioita ja sovelluksia on jo useimmissa yrityksessä otettu käyttöön ja digitalisaation hyödyt tiedostetaan ja tunnistetaan osana tuotantomenetelmien kehittämistä. Uutta teknologiaa käyttöönottaessa todellinen kompastuskivi saattaa olla yrityksen sisäiset haasteet. Kyselyn tuloksilla ei ole tarkoitus tuottaa aineistoa tutkimustiedoksi. Aihe on kuitenkin varsin ajankohtainen, ja vastaava selvitys olisi mielenkiintoista toteuttaa jatkotutkimuksena esimerkiksi 1-2 vuoden sisällä laajemmassa mittakaavassa. Tutkimuksen voisi rajata kuten nyt, eli kattamaan yleisesti kaikki teollisen internetin teknologia tai pelkästään reunalaskentaan liittyen.

## Lähteet

Advian. Smart Factory – tehosta tuotantoa Edge AI:n avulla, ja miten pääset alkuun jo tänään. Luettu: 16.12.2021.

Al-Turjman, F. 2020. Trends in Cloud-based IoT. Springer.

Al-Turjman, F. 2019. Edge Computing – From hype to reality. Springer.

Babar, M. Khan, M.S., Ali, F., Imran, M., Shoaib, M. 2021. Cloudlet Computing: Recent Advances, Taxonomy, and Challenges. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 29609-29622, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3059072.

Bilal, K., Khalid, O., Erbad, A., Khan, S. 2018. Potentials, trends, and prospects in edge technologies: Fog, cloudlet, mobile edge, and micro data centers. *Computer Networks* 130 (2018) 94-120. DOI: 10.1016/j.comnet.2017.10.002

Buyya, R., Srirama S. 2019. Fog and Edge Computing: Principles and Paradigms. John Wiley & Sons, Inc.

Collin, J. & Saarelainen, A. 2016. Teollinen internet. Helsinki: Talentum Media Oy.

Dolui, K. & Datta, S.K. 2017. Comparison of edge computing implementations: Fog computing, cloudlet and mobile edge computing. 2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS). Doi: 10.1109/GIOTS.2017.8016213.

Euroopan Komissio. 2019. Neuvoston päätös luvan antamisesta aloittaa neuvottelut sopimuksen tekemiseksi Euroopan unionin ja Amerikan yhdysvaltojen välillä oikeudelliseen yhteistyöhön rikosasioissa liittyvästä rajat ylittävästä pääsystä sähköiseen todistusaineistoon. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019PC0070&from=EN>>. Luettu 3.9.2021.

GAIA-X. 2020. GAIA-X: Technical Architecture. Berliini, Saksa: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

GAIA-X. <<https://www.data-infrastructure.eu/GAIA-X/Navigation/EN/Home/home.html>>. Luettu: 16.5.2021.

German Edge Cloud. <<https://gec.io/company/gaia-x/>> Luettu: 16.5.2021.

German Edge Cloud. ONCITE. <<https://gec.io/en/industrial-solutions/industrial-edge-appliance/oncite-powered-by-kubernetes/>>. Luettu: 4.12.2021.

Gill, B. 2020. 2021 Strategic Roadmap for Edge Computing. Gartner. Luettu 9.10.2021.

Gusev, M. & Dustdar, S. 2018. Going back to the roots—the evolution of edge computing, an IoT perspective. *IEEE Internet Computing*, 22(2):5–15

- Heilala, J., Helaakoski, H., Kuivanen, R., Kääriäinen, J., & Saari, L. 2020. A review of digitalisation in the Finnish manufacturing SME companies. VTT Technical Research Centre of Finland.
- Illsley, R. 2021. Understanding the Key Requirements for Deploying Edge Computing. Omdia.
- Jokinen, O., Piuva, J., Mäkipää, M., Riihentupa, L. 2019. 5G Väylävirasto toiminnassa. Väylävirasto. Väyläviraston julkaisuja 52/2019.
- Kumar, T. 2020. Secure edge services for future smart environments. Väitöskirja. Oulun yliopisto, tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta.
- Links, C., Testa, T., Anderton, J., ym. 2021. Internet of Things for Dummies®, Qorvo 2nd Special Edition. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Miller, L. 2020. Edge Computing for Dummies, Stratus Special Edition.
- Najmul, H., Kok-Lam, A. & Celimuge, W. 2016. Edge Computing in 5G: A Review. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127276-127289, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2938534.
- Navveen, B. 2021. What is Internet of Things. <<https://cloudsolutions.academy/how-to/what-is-internet-of-things/>>. Luettu 27.11.2021.
- Penttinen, J. 2019. 5G explained: Security and Deployment of Advanced Mobile Communications. Atlanta, USA: John & Wiley & Sons Ltd. ProQuest Ebook Central, <<http://ebookcentral.proquest.com/lib/metropolia-ebooks/detail.action?docID=5721174>>
- Protner, J., Pipan, M., Zupan, H., Resman, M., Simic, M. & Herakovic, N. 2021. Edge Computing and Digital Twin Based Smart Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 54-1 (2021) 831-836. doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.098.
- Qi, Q. & Tao, F. 2019. A Smart Manufacturing Service System Based on Edge Computing, Fog Computing, and Cloud Computing. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 86769-86777. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923610.
- Ren, J., Zhang, D., He, S., Zhang, Y. & Li, T. 2019. A Survey on End-Edge-Cloud Orchestrated Network Computing Paradigms: Transparent Computing, Mobile Edge Computing, Fog Computing, and Cloudlet. *ACM Comput. Surv.* 52, 6, Article 125. <https://doi.org/10.1145/3362031>
- Saari, L., Kuivanen, R. & Poikkimäki, J. 2021. Digitalisaatio parantaa yrityksen kannattavuutta. VTT Technical Research Center of Finland.
- Satyanarayanan, M. 2017. The emergence of edge computing. DOI: 10.1109/MC.2017.9
- State of the Edge. 2021. State of the edge 2021: A Market and Ecosystem Report for Edge Computing. The Linux Foundation Projects.

State of the Edge. 2020. State of the edge 2020: A Market and Ecosystem Report for Edge Computing. The Linux Foundation Projects.

Sundhar, K., Miller, L. 2017. 5G for Dummies. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

Suomen virallinen tilasto (SVT): Tietotekniikan käyttö yrityksissä [verkköjulkaisu]. ISSN=1797-2957. 2021, Laatuseloste: Tietotekniikan käyttö yrityksissä 2021 . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 5.12.2021].  
<[http://www.stat.fi/til/ict/2021/ict\\_2021\\_2021-12-03\\_laa\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ict/2021/ict_2021_2021-12-03_laa_001_fi.html)>

Taboada, I. & Shee, H. 2020. Understanding 5G technology for future supply chain management. International Journal of Logistics Research and Applications. DOI: 10.1080/13675567.2020.1762850.

Tuomi, J. 2007. Tutki ja lue – Johdatus tieteellisen tekstin ymmärtämiseen. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi.

Vahti, J. 18.11.2020. Sitra mukaan Euroopan digitulevaisuutta rakentavaan GAIA-X-projektiin. Sitra. <<https://www.sitra.fi/uutiset/sitra-mukaan-euroopan-digitulevaisuutta-rakentavaan-gaia-x-projektiin/>>. Luettu: 16.5.2021.

Zhang, Y. 2021. Mobile Edge Computing. In: Mobile Edge Computing. Simula SpringerBriefs on Computing, vol 9. Springer, Cham.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-83944-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83944-4_2).

Zavodovski, A. 2020. Open Infrastructure for Edge Computing. Väitöskirja. Helsingin yliopisto, matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta.  
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-51-6651-7>.

## **Lyyti-kyselylomakkeen kysymykset**

Toimiala:

- Elintarvikkeiden valmistus
- Juomien valmistus
- Sahatavaran sekä puu- että korkkituotteiden valmistus
- Paperin, paperi- ja kartonkituotteiden valmistus
- Koksen ja jalostettujen öljytuotteiden valmistus
- Kemikaalien ja kemiallisten tuotteiden valmistus
- Lääkeaineiden ja lääkkeiden valmistus
- Kumi- ja muovituotteiden valmistus
- Muiden ei-metallisten mineraalituotteiden valmistus
- Metallien jalostus
- Metallituotteiden valmistus (pl. koneet ja laitteet)
- Tietokoneiden sekä elektronisten ja optisten tuotteiden valmistus
- Sähkölaitteiden valmistus
- Muiden koneiden ja laitteiden valmistus
- Mootoriajoneuvojen, perävaunujen ja puoliperävaunujen valmistus
- Tekstiilien valmistus
- Muiden kulkuneuvojen valmistus
- Koneiden ja laitteiden korjaus, huolto ja asennus
- Muu valmistus
- Jokin muu toimiala

Henkilöstömäärä:

- 9 tai alle
- 10-49
- 50-249
- 250 tai enemmän

Liikevaihto:

- ≤ 2 M€
- ≤ 10 M€
- ≤ 50 M€
- ≤ 300 M€
- > 300 M€

1. Onko tuotannossanne käytössä jokin seuraavista teknologiaratkaisuista:

- Pilvipalvelut tiedon tallentamisen ja analysoinnin välineenä
- Reunalaskenta (edge computing)
- IoT-teknologia
- AR/VR
- Tekoäly
- Digitaalinen kaksonen
- Koneoppiminen
- Konenäkö
- 3D-tulostaminen
- Muu, mikä? + vapaan tekstin kenttä
- Ei ole käytössä mitään edellä mainituista tai vastaavaa teknologiaa

Mikäli vastaaja valitsi yhden tai useamman kohdan yhdeksästä ensimmäisestä vaihtoehdosta, avautuu lisäkysymys ”Tarkentaisitko, missä kyseistä teknologiaa hyödynnetään:” sekä vapaan tekstin kenttä.

Mikäli vastaaja valitsi viimeisen vaihtoehdon, avautuu lisäkysymys ” Mikä on suurin syy, este, haaste tai hidaste sille, ettei tuotannon digitalisaatiota ole kehitetty?” sekä vapaan tekstin kenttä.

2. Onko suunnitelmissa ottaa käyttöön jotakin kohdan 1., tai vastaavista tuotannon tehostamismenetelmistä seuraavan 5 vuoden aikana?

- Kyllä

- Ei

Mikäli vastaaja valitsi vaihtoehdon ”Kyllä”, avautuu lisäkysymys ”Kertoisitko mitä?” sekä vapaan tekstin kenttä.

Mikäli vastaaja valitsi vaihtoehdon ”Ei”, avautuu lisäkysymys ”Kertoisitko miksi?” sekä vapaan tekstin kenttä.

3. Mikä tuotantoprosessin vaiheista erityisesti on ollut tai tulee lähitulevaisuudessa olemaan kehityskohteena? Esimerkiksi ennakoiva huolto, materiaalivirran hallinta, arvoketju jne.

4. Onko ennakoivaan huoltoon liittyvät toimenpiteet teille ajankohtaisia?

- Kyllä
- Ei

Mikäli vastaaja valitsi vaihtoehdon ”Kyllä”, avautuu lisäkysymys ”Kertoisitko hie-  
man lisää” sekä vapaan tekstin kenttä.

Mikäli vastaaja valitsi vaihtoehdon ”Ei”, avautuu kysymyksen perään seuraava teksti ennakoivan huollon määritelmästä:

Ennakoivassa huollossa hyödynnetään analytiikkaa, jonka avulla etsitään koneelta tai laitteelta kerätystä datasta poikkeamia. Sen pyrkimyksenä on vähentää odottamattomia tuotantokatkoksia ja lyhentää suunniteltuja huoltoseisokkeja.

5. Onko materiaalivirran hallinta digitaalisin keinoin teille ajankohtaista?

- Kyllä
- Ei

Mikäli vastaaja valitsi vaihtoehdon ”Kyllä”, avautuu lisäkysymys ”Kertoisitko hie-  
man lisää” sekä vapaan tekstin kenttä.

Mikäli vastaaja valitsi vaihtoehdon ”Ei”, avautuu kysymyksen perään seuraava teksti digitaalisen materiaalivirran hallinnan määritelmästä:

Tuotannon tilannetietojen seuraamista reaaliaikaisesti. Päämääränä on materiaalivirtojen läpimenoaikojen lyhentäminen esimerkiksi paikannusteknologian tai/ja analytiikan avulla.

6. Onko reunalaskenta (edge computing) käsitteenä tuttu?

- Kyllä
- Tiedän asiasta jonkin verran
- Ei ole tuttu

Mikäli vastaaja valitsi vaihtoehdon ”Tiedän asiasta jonkin verran” tai ”Ei ole tuttu”, avautuu kysymyksen perään seuraava teksti reunalaskennan määritelmästä:

Reunalaskennalla tarkoitetaan datan tallentamista, prosessointi ja analysointia lähellä paikkaa, jossa se kerätään. Eli kaikkea kerättyä dataa ei viedä suoraan keskitetysti pääpalvelimelle tai pilvipalveluun, vaan reunapalvelimet toimivat näiden tukena. Reunalaskennan etuja ovat mm. matala viive datan siirrossa ja laskennassa sekä kriittisen datan saatavuus tilanteessa, jossa pääsy pilvipalveluun ei jostain syystä onnistu. Reunalaskentaa voidaan hyödyntää esimerkiksi IoT-tekniikan kanssa. Sen sovellettavuuskohteita ovat esimerkiksi materiaalivirran hallinta sekä ennakoiva huolto.

7. Oletteko hyödyntäneet tai suunnitelleet hyödyntävänne reunalaskentaa tuotannossanne?

- Kyllä
- Ei
- Haluan kuulla lisää Rittalin ratkaisuihin reunalaskentaan liittyen (jättäthän yhteystietosi kyselyn lopussa)



Mikäli vastaaja valitsi vaihtoehdon ”Kyllä”, avautuu lisäkysymys ”Kertoisitko hie-  
man lisää” sekä vapaan tekstin kenttä.

8. Mitkä ovat suurimmat haasteet tuotannon digitalisaation edistämiseksi sekä  
uuden teknologian käyttöönotolle? Voit valita useita vaihtoehtoja.

- Henkilöstön kompetenssi
- Henkilöstön kouluttaminen
- Tietoturvaan liittyvät tekijät
- Budjettiin liittyvät tekijät
- Sopivan teknologian valinta
- Teknologian käyttöönottoon liittyvät haasteet
- Investoinnin takaisinmaksuun liittyvä epävarmuus
- Bisneskeissin rakentaminen
- Integraatiohaasteet nykyisen infrastruktuurin kanssa
- Vastarinta organisaatiossa
- Muu syy, mikä?
- Ei ole merkittäviä haasteita
- Tuotannon digitalisointi ei ole ajankohtaista

Lisäksi kysymyksen jälkeen on vapaan sanan kenttä saatesanoilla ”Halutessasi  
voit kertoa aiheesta lisää”.

Mikäli vastaaja vastasi ”Muu syy, mikä?”, avautuu lisäkysymys ”Muu syy, mikä?  
Voit antaa useampia vastauksia”.

9. Kehityksen ja uuden teknologian käyttöönoton mahdollistamiseksi henkilös-  
töä on

- Koulutettu
- Rekrytoitu
- Käyttätte ulkoisia toimijoita
- Ei vielä edellä mainittuja toimenpiteitä

Mikäli vastaaja vastaa ”Käytätte ulkoisia toimijoita”, avautuu lisäkysymys ”Kertoisitko tarkemmin” sekä vapaan tekstin kenttä.

10. Mistä hankit tietoa liittyen tuotannon digitalisaation mahdollisuuksiin?

11. Digitalisaatioon liittyvän ajankohtaisen tiedon ylläpitäminen ja henkilöstön osaamisen päivittäminen on

- Helppoa ja vaivatonta
- Toisinaan vaativaa, mutta hallittavissa
- Haastavaa
- Ei ole ajankohtaista

12. Haluatko kertoa lisää tähän aiheeseen liittyen? Kuulisimme mielellämme lisää mitä ajatuksia tuotannon digitalisaatio herättää. Sana on vapaa.

Voiko sinuun olla yhteydessä

- Antamiisi vastauksiin sekä mahdollisiin lisäkysymyksiin liittyen?
- Rittalin tuotannon digitalisaatoratkaisuihin liittyen?
- Muihin Rittalin tuotteisiin liittyen?
- En halua, että minuun ollaan yhteydessä.

Mikäli vastaaja valitsi jonkun kolmesta ensimmäisestä vaihtoehdosta, avautuu lisäkysymys ”Yhteystiedot (nimi, sähköposti, puhelinnumero)” sekä vapaan tekstin kenttä.

