

Henri Kosonen

**TEOLLINEN INTERNET – TEKNISET
PERUSTEET JA SOVELTAMINEN
KAIVOSYMPÄRISTÖSSÄ**

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta (ITC)
Tarkastaja: Prof. Mikko Valkama
Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Henri Kosonen: Teollinen internet – Tekniset perusteet ja soveltaminen kaivosympäristössä
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2021

Teollisen internetin käyttö tehtaissa ja tuotantolaitoksissa on teollisuuden seuraava iso askel digitalisaatiossa. Tässä työssä tehdään kirjallisuuskatsaus teollisen internetin teknisiin perusteisiin sekä tarkastellaan sen soveltuvuutta kaivosteollisuuden käyttöön. Aineistona käytettiin alan tutkimuksia sekä verkkolaitte valmistajien standardeja ja julkaisuja. Työn tavoitteena on selvittää, millaisia mahdollisuuksia teollisen internetin käytöllä voidaan saavuttaa sekä millaisia teknisiä ratkaisuja tulisi käyttää.

Työn ensimmäisessä luvussa tarkastellaan teolliseen internetiin liittyviä peruskäsitteitä sekä tarkastellaan siihen liittyviä ongelmia sekä sen tuomia hyötyjä. Teollisen internetiin liittyvistä termeistä käydään läpi teollinen laitteiden internet, kyberfyysinen järjestelmä sekä Industry 4.0. Seuraavassa luvussa käydään läpi konnektiviteettiin liittyviä ratkaisuja. Konnektiviteetillä tarkoitetaan menetelmiä, joilla laitteet voidaan yhdistää toisiinsa ja teolliseen internet verkkoon. Nämä menetelmät on tässä työssä jaettu kahteen osaan: langallisiin ja langattomiin menetelmiin. Molemmista kategorioista otettiin tarkempaan tarkasteluun kolme käytettyä menetelmää. Langallisista menetelmistä tarkasteluun valittiin EtherNET/IP, PROFINET ja EtherCAT. Nämä valittiin suoraan niiden suuren markkina-arvon perusteella. Langattomista valittiin tarkasteluun ZigBee, LoRaWAN sekä 5. generaation matkapuhelinverkot. ZigBee ja LoRaWAN valittiin tarkasteluun niiden laajan käytön kuluttajien esineiden internetin sovelluksissa. 5. sukupolven matkapuhelinverkot valittiin tarkasteluun, koska niitä kätetään laajasti kuluttajien esineiden internetin sovelluksissa. Viimeisessä luvussa tarkastellaan teollisen internetin mahdollistavia sovelluksia kaivosteollisuuteen sekä siihen, millaisia hyötyjä ja ongelmia teollisen internetin käyttö synnyttää.

Työssä todetaan, että teollisen internetin avulla voidaan saavuttaa aivan uudenlaisia tehtaita ja tuotantolaitoksia. Teollisella internetillä voidaan esimerkiksi nostaa laitoksen automaatioastetta ja parantaa laitoksen turvallisuutta. Erityisesti kaivosteollisuudessa turvallisuuteen liittyvät ongelmat ovat olleet jo vuosisatoja tiedossa, mutta niiden ratkaisemiseksi ei ole ollut työkaluja. Teollinen internet tarjoaa tähän ratkaisun ja tuo etuja myös muille osa-alueille.

Avainsanat: Teollinen internet, IIoT, kyberfyysinen järjestelmä, Industry 4.0, kaivosteollisuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto	1
2. Teollisen internetin perusteet	2
3. Konnektiviteetti	10
3.1 Langalliset menetelmät	13
3.2 Langattomat menetelmät.	16
4. Teollinen internet kaivosteollisuudessa	20
5. Yhteenveto	23
Lähteet	25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3GPP	3rd generation partnership project, standardointijärjestöjen yhteistyöorganisaatio tietoliikenteessä
ARP	Address resolution protocol, siirtokerroksen protokolla
BLE	Bluetooth low-energy, lyhyen matkan langaton verkkotekniikka
CIP	Common industrial protocol, laitteiden ohjaukseen tarkoitettu protokolla
CPS	Cyber-physical-system, kyber-fyysinen-järjestelmä
CSS	Chirp spread spectrum, modulaatiotekniikka
EtherCAT	Ethernet protokollaan perustuva protokolla teollisuuden sovelluksiin
EtherNet/IP	Ethernet/Industrial protocol, Ethernet protokollaan perustuva protokolla teollisuuden sovelluksiin
FSK	Frequency shift keying, modulaatiotekniikka
HTTP	Hypertext transfer protocol, sovelluskerroksen protokolla
I2C	Inter-Integrated Circuit, tiedonsiirtoväylä
IEC	Electrotechnical commission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers, standardointijärjestö ja tiedejulkaisija
IIoT	Industrial Internet of Things, teollisten laitteiden internet
Industry 4.0	Saksassa kehitetty konsepti älykkäille tehtailla
IoT	Internet of Things, asioiden internet
IP	Internet protokolla
IPv4	Internet protokollan 4. versio
IPv6	Internet protokollan 6. versio
ISO	Kansainvälinen standardointiorganisaatio
LoRa	LoRaWAN verkkojen käyttämä standardi
LoRaWAN	Pitkän matkan langaton verkkotekniikka
LTE	Long term evolution, pitkän matkan langaton verkkotekniikka

MAC	Verkkosovittimien yksilöllinen tunnus
NB-IoT	Pitkän matkan langaton verkkotekniikka
OPC UA	Open platform communications unified architecture, koneiden väli- seen kommunikointiin tarkoitettu protokolla
OSI	Open systems interconnect, viitemalli tiedonsiirtojärjestelmien pro- tokollapinoille
PLC	Ohjelmoitava logiikka
PROFINET	Ethernet protokollaan perustuva protokolla teollisuuden sovelluksiin
RT	Reaaliaikainen
Sigfox	Pitkän matkan langaton verkkotekniikka
SMTP	Simple mail transfer protocol, sovelluserroksen protokolla
SPI	Serial Peripheral Interface, synkroninen sarjaliikennepiiri
TCP	Transmission control protocol, kuljetuserroksen protokolla
UADP	Unified access data plane
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter, asynkroninen sarja- liikennepiiri
UDP	User datagram protocol, kuljetuserroksen protokolla
WiFi	Lyhyen matkan langaton verkkotekniikka
ZigBee	Lyhyen matkan langaton verkkotekniikka

1. JOHDANTO

Viime vuosien aikana IoT eli internet of things laitteiden määrä verkossa on lisääntynyt huomattavasti. Ericssonin julkaiseman tutkimuksen mukaan laitteita on tällä hetkellä kytkettynä hieman alle 2 miljardia. Vuonna 2015 arveltiin verkkoon olevan kytkettynä alle puoli miljardia IoT laitteita. Viidessä vuodessa on siis tapahtunut huomattavaa nousua laitteiden määrässä, ja Ericsson ennustaa nousun vain kasvavan, ja arvelee, että vuonna 2026 verkkoon olisi kytkettynä lähes 6 miljardia laitetta. [1]

IoT tavoitteena on saada lisättyä perinteiset laitteet verkkoon internetin välityksellä, mikä mahdollistaa datan keräyksen, sen analysoinnin sekä laitteiden optimoinnin. Tätä samaa ajattelua pyritään tuomaan teollisuuden käyttöön teollisen internetin ja teollisen IoT:n avulla. Tämä mahdollistaa esimerkiksi laitteiden ennakoivan huollon, kun laitetta voidaan analysoida sen lähettämien tietojen perusteella. Teollinen internet pyrkii luomaan digitaalisen vastineen fyysisestä toimintaympäristöstä [2].

5G teknologia tulee todennäköisesti vauhdittamaan teollisen internetin yleistymistä entisestään. Edeltävät generaatiot eivät ole pystyneet tarjoamaan riittävän laadukasta yhteyttä suurelle määrälle laitteita. Tämä oli yksi syy, joka on ohjannut 5G kehitystä. Nokia, Telia ja Sandvik ovatkin rakentaneet Sandvikin testikaivokseen 5G testiverkon. Verkon ansiosta Sandvikin valmistavat koneet voivat kommunikoida keskenään reaaliajassa. [3]

Työssä tehdään kirjallisuuskatsaus teollisen internetin perusteisiin taloudellisesta ja korkeamman tason arkkitehtuurisesta näkökulmasta sekä sen alakäsitteisiin IIoT eli Industrial Internet of Things, CPS eli cyber-physical-system ja Industry 4.0. Tämän jälkeen tutustutaan laitteiden väliseen konnektiviteettiin ja millaisia metodeja on mahdollista käyttää laitteiden yhdistämiseen. Lopuksi selvitetään, kuinka näitä teknologioita voitaisiin hyödyntää kaivosteollisuudessa, sekä millaista arkkitehtuuria tulisi käyttää.

Kaivosteollisuus valikoitui tarkemman tarkastelun kohteeksi, sillä kaivokset ovat perinteisesti olleet vaarallisia paikkoja työskennellä. Teollisen internetin ja automaation avulla voidaan tulevaisuudessa ohjata koneita ja muuta kaivoksen toimintaa täysin etänä ja välittää ihmishenkien menettämistä.

2. TEOLLISEN INTERNETIN PERUSTEET

Käsitteenä teollinen internet on ensimmäisen kerran esiintynyt jo vuonna 2000 konsulttiyhtiö Frost & Sullivanin raportissa. Tämän jälkeen käsite unohdettiin puutteellisen ja kalliin tekniikan vuoksi. Käsite nousi uudestaan esille General electricin julkaisemassa raportissa vuonna 2012. [4]

Raportissa esiteltiin teollisen internetin mullistavan teollisuuden ja lisäävän tuottavuutta samaan tapaan, kuin teollinen vallankumous aikanaan teki. Raportissa esiteltiin teollisen internetin keskiössä olevat elementit, jotka ovat älykkäät koneet, kehittynyt data-analytiikka ja työntekijöiden "yhdistäminen". Yhdistämällä nämä elementit ja kytkemällä ne toisiinsa saavutetaan uudenlaisia mahdollisuuksia. Tämä toteutetaan liittämällä sensorit ja muut toimilaitteet samaan verkkoon. Tällöin laitteista voidaan kerätä suuret määrät dataa, jonka avulla voidaan tehdä päätöksiä. Raportissa esitetään, että data voi olla älykästä ja ohjelmistot voivat tehdä ratkaisun itsenäisesti datan pohjalta. GE ennusti vuonna 2012, että näillä voidaan saavuttaa jopa 32,3 biljoonan dollarin hyöty suoraan sovellettavissa kohteissa ja vuoteen 2025 mennessä säästöt voivat nousta jopa 82 biljoonaan dollariin. GE:n maltillisempi ennuste oli, että teollinen internet toisi 1 %:n hyödyn. Tämäkin on merkittävä ja taulukossa 2.1 on esiteltynä, kuinka suuria raha määriä tämä tarkoittaisi teollisuus kohtaisesti. [5]

IIoT tarkoittaa teollista esineiden internettiä. Sitä onkin käytetty usein synonyyminä teolliselle internetille. Teollinen internet onkin oikeastaan melkein sama asia kuin teollinen esineiden internet, mutta siitä on vain jätetty pois itse esineet verkossa [4]. IIoT:ssa keskiössä on teollisuuden laitteiden ja koneiden välinen kommunikointi. Nämä voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: valvonta, suljetun piirin ohjaus ja keskeytykset sekä hallinta. Näiden kategorioiden vaatimukset yhteydelle eroavat toisistaan huomattavasti. Valvontaan liittyvät aplikaatiot sietävät hyvin viivettä ja pakettihäviöitä. Suljetun piirin ohjauksessa sekä sen keskeyttämisessä ja hallinnassa tarvitaan erittäin luotettavia yhteyksiä ja todella lyhyitä viiveitä (10–100 ms). [6] Alunperin IIoT:ta ei tarkoitettu korvaamaan perinteistä teollisuusautomaatiota, joka ohjaa prosesseja suurten viiveiden takia, vaan ymmärtämään systeemiä keräämällä dataa, analysoimalla sitä ja tekemään vähemmän aikakriittisiä operaatioita datan perusteella [2]. Tämä on kuitenkin muuttumassa 5G-teknologian mahdollistaessa suurempia nopeuksia ja pienempiä viiveitä entistä suuremmalle määrälle laitteita.

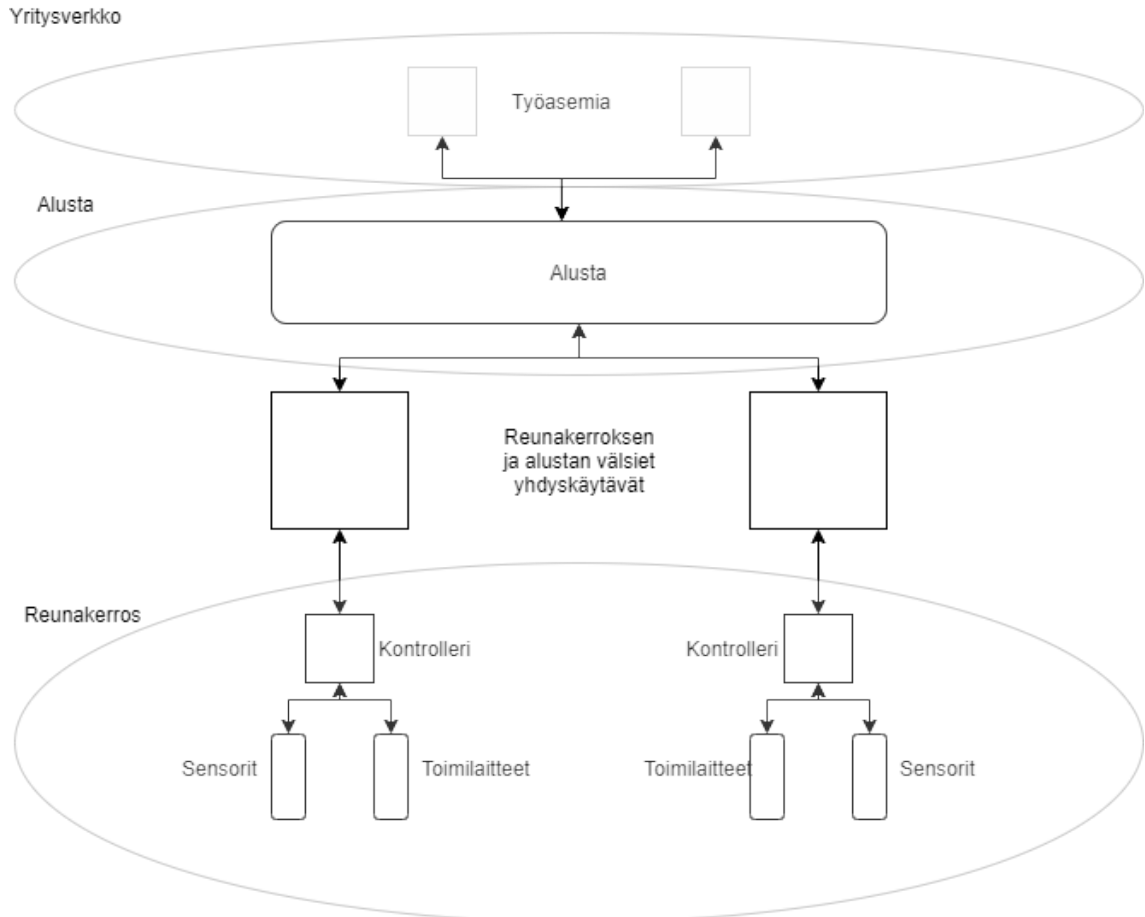
Taulukko 2.1. GE:n ennustamat säästöt 1 % parannuksella

Teollisuuden ala	Segmentti	Säästön tyyppi	Säästönarvo 15 vuoden ajalta
Ilmailu	Kaupallinen	1 % säästö polttoainekuluissa	30M \$
Sähköntuotanto	Kaasun käyttö	1 % säästö polttoainekuluissa	66M \$
Terveydenhuolto	Järjestelmän laajainen	1 % vähennys järjestelmän epätehokkuudessa	63M \$
Rautatiet	Rahti	1 % vähennys järjestelmän epätehokkuudessa	27M \$
Öljy & Kaasu	Etsintä ja kehitys	1 % säästö pääomakuluissa	90M \$

IloT-arkkitehtuurissa tärkeimmät ominaisuudet ovat laajennettavuus, skaalautuvuus, modulaarisuus ja yhteensopivuus erilaisten laitteiden. IloT:lle on esitetty useita referenssiarkkitehtuureja, jotka täyttävät nämä ehdot. Esimerkiksi kansainvälinen televiestintäliitto suosittelee viisitasoista mallia jotka koostuvat havainnointi-, pääsy-, verkko-, väli- ja aplikaatiokerroksesta. Vaihtoehtona on esitetty myös kolmi- ja nelikerroksisia malleja. Kolmikerroksisessa mallissa kerrokset muodostuisivat havainnointi-, verkko ja applikaatiokerroksesta. Nelikerroksiseen malliin on kerroksiksi esitelty fyysinen-, kuljetus-, väli- ja applikaatiokerrokset. Laajaa suosiota on kerännyt kolmitasoinen suunnittelumalli. Siinä IloT-järjestelmä jaetaan kolmeen tasoon. Alin kerros on nimeltään reunakerros, jossa sensorit ja muut toimilaitteet toimivat omassa verkossaan. Laitteet muodostavat domainin, jossa toimivat. Näiden yläpuolella toimii alusta, joka hoitaa sensorien datan käsittelyä ja jakamista ylemmälle kerrokselle. Nämä ovat yhdistetty toisiinsa yhdyskäytävän kautta. Alustaan voidaan yhdistää useita eri verkkotunnuksilla toimivia reunakerroksia. Ylimpänä kerroksena toimivat yritysverkot, joista on pääsy alustan kautta sensorien ja toimilaitteiden toimintaan. [2] Kuvassa 2.1 arkkitehtuuria on esitelty kuvan avulla.

IloT:n standardisointi ei ole edennyt kovin pitkälle, kuten huomataan erilaisten referenssiarkkitehtuurien määrästä. Suurin ongelma IloT:n standardisoinnissa on useat kilpailevat toimijat, jotka toimivat IloT:n eri osa-alueiden parissa. Lopputuloksena on ristiriitaisia ja epä johdonmukaisia vaatimuksia standardeille, jotka aiheuttavat haittaa IloT standardien kehittymiselle. Olemassa olevat IloT-ratkaisut on kehitetty jonkun tietyn toimijan mukaan, mikä on vastaan kaikkia IloT arkkitehtuurin tärkeimpiä ominaisuuksia. [2]

5G:n kehityksen ja standardisoinnin edistyminen todennäköisesti tulee hyödyttämään myös IloT:n standardien kehittymistä, kun 3GPP keskittyy 5G:n kehityksessä suurien laitemää-



Kuva 2.1. Kolmitasoinen arkkitehtuuri [2]

rien tukeen sekä pienien viiveiden aikaansaamiseen. Näiden kehitys on elintärkeää IloT:n kannalta, sillä tulevaisuudessa tarvitaan parempia langattomia yhteyksiä IloT:n yleisty-
miseksi. Suurimman työn IloT:n standardoinnissa on tehnyt Internation Electrotechnical
Commission (IEC), joka on perustanut useita tutkimusryhmiä ja komiteoita aiheeseen liit-
tyen ja julkaissut artikkeleita IloT:sta, älykkäistä tehtaista ja millaisia hyötyjä näiden avulla
voitaisiin saavuttaa. [2]

Industry 4.0 on Saksassa syntynyt konsepti, joka hyödyntää IloT ajattelua ja yhdistää sen
ajatukseen niin sanotuista kyber-fyysisistä-järjestelmistä. Järjestelmään yhdistettyjen lait-
teiden avulla voidaan luoda fyysiselle maailmalle digitaalinen kaksonen, jonka avulla voi-
daan tarkastella järjestelmän tilaa. [2] Esimerkiksi tehtaasta tai tuotantolaitoksesta luotua
mallia voidaan tarkastella ohjelmiston avulla ja ohjata kentällä toimivia toimilaitteita.

Industry 4.0 nimi kuvaa sitä teollisuuden neljäntenä vallankumouksena [7]. Yleisesti tun-
nettu ensimmäinen teollinen vallankumous tapahtui höyrykoneen keskikymmenen myötä, joka
mullisti muun muassa tekstiiliteollisuuden ja logistiikan. Toisena vallankumouksena pi-
detään sähköenergian hyödyntämistä teollisuudessa. Sähkön käyttö lisäsi tuottavuutta
ja paransi kommunikointia radion ja lennättimen avulla. Kolmantena vallankumouksena
voidaan pitää digitalisaation alkamista. Digitalisaation kautta valmistusprosessien ohjaus

muuttui entistä helpommaksi, mikä kiihdytti tuottavuuden kasvua.

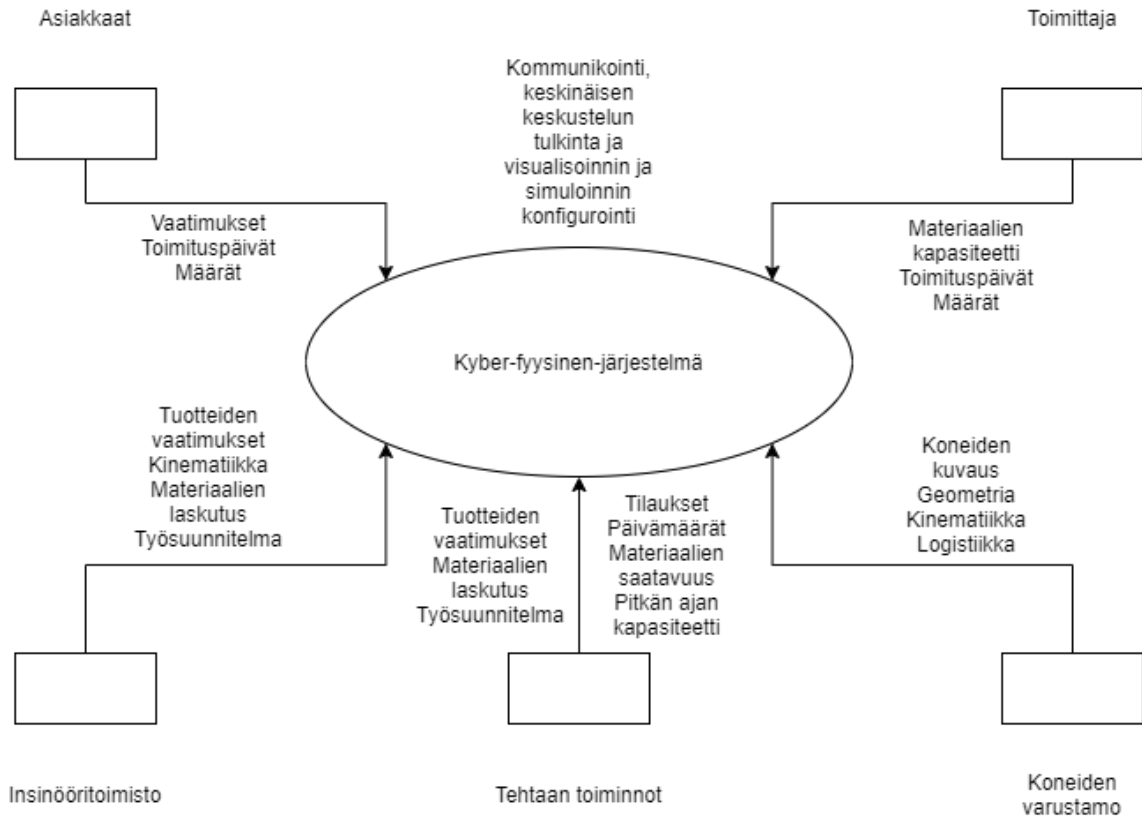
Digitalisaation kehittyminen ja älykkäiden laitteiden markinoille tulo on muuttanut valmistavan teollisuuden paradigmaa valmistusprosessia kohtaan. Tulevaisuuden tuotantoprosessissa halutaan painottaa tehokasta tuotantoa, jossa tuotteet hallitsevat omaa tuotantoprosessiaan. Näiden odotuksien pohjalta kehitettiin konsepti Industry 4.0. [7]

Industry 4.0 pitää sisällään useita termejä, joista tärkeimpiä ovat:

- Älykkäät tehtaat: Älykkäillä sensoreilla ja toimilaitteilla varustetut tehtaat yhdistettyinä digitaalisiin malleihin tuotteista ja laitoksesta, jotka ovat automaattisesti ohjautuvia.
- Kyber-fyysinen-järjestelmä: Digitaalisen ja fyysisen maailman yhdistävä järjestelmä. Tarkoituksena kattaa koko tuotanto, jolloin luotua digitaalista kaksosta ei voida erottaa fyysisen maailman vastaavasta. Voidaan hyödyntää ennaltaehkäisevässä huollossa.
- Itseorganisaatio: Klassisen tuotantohierarkian hajotessa siirrytään kohti hajautettua itseorganisaatiota.
- Uudet järjestelmät jakelussa ja hankinnassa: Jakelu ja hankinta ovat yhä enemmän yksilöllisiä. Yhdistetyt prosessit hoidetaan käyttämällä eri kanavia.
- Uudet järjestelmät tuotteiden kehityksessä ja palveluissa: Tuotteet ja palvelut ovat yhä yksilöllisempiä. Avoin innovaatio, tuotemuisti ja tuotetieto ovat erittäin tärkeitä tässä yhteydessä.
- Ihmisten tarpeisiin sopeutuminen: Uusien järjestelmien tulisi olla suunniteltu ihmisten tarpeisiin eikä laitteiden.
- Yritysten sosiaalinen vastuu: Kestävä kehitys ja resurssitehokkuus ovat entistä tärkeämmässä asemassa tuotantolaitosten suunnittelussa. [7]

Industry 4.0 keskeinen ajatus on myös jakaa toimitusketju erillisiksi osiksi, jossa osat ovat riippuvaisia vain tuotantolaitoksen kyber-fyysisestä-järjestelmästä [7]. Tuotantolaitoksen kyber-fyysinen-järjestelmä toimisi alustana, jonka rajapintoja eri toimijat käyttävät. Kuvassa 2.2 on visualisoitu kyber-fyysisen-järjestelmän roolia jakeluketjun hallinnassa.

Tärkeässä roolissa Industry 4.0 konseptissa on rajapinnat eri tieteenalojen välillä. Erityisen kiinnostava on liiketalouden ja tietojenkäsittelytieteen välinen rajapinta [7]. Historiasa nämä tieteenalat ovat olleet teollisuudessa usein keskittyneitä omaan toimintaansa [8]. Viime vuosikymmenien aikana näiden alojen välille on muodostunut vahva side, joka on johtanut integroituihin tietojärjestelmiin joiden parantamiseen pyritään Industry 4.0 konseptilla. Näiden alojen rajapintoihin liittyviä tärkeitä lähtökohtia Industry 4.0 konseptin integroinnissa ovat:



Kuva 2.2. Kyber-fyysisen-järjestelmän käyttö jakeluketjun hallinnassa [7]

- Fyysisen järjestelmän ja ohjelmiston integrointi: Uudet vaihtoehdot ja reaaliaikainen sensoridata mahdollistavat edistyneen integroinnin erilaisiin järjestelmiin.
- Integraatio eri osastojen ja haarojen välillä: Integroinnin pohdinta eri osastojen välillä on välttämätöntä. Suunnittelussa tulisi ottaa huomioon jokaisen osaston toiveet.
- Integraatio muun teollisuuden ja teollisuudenalojen välillä: Vaikka tietojenkäsittelyn ja liiketalouden puolella tunnustetaan erilaiset teollisuudentoimijat, on epäselvää, kuinka tietojenkäsittelyn näkökulmasta erilaiset teollisuuslaitokset yhdistettäisiin.
- Integrointi dynaamiseen arvonluonti verkostoon: Arvonlisäys prosessiin tulee uusi elementti, jos tuotanto tapahtuu dynaamisessa verkossa koko tuotteen elinkaaren ajan. Tässä tilanteessa on tärkeä ottaa huomioon vaihtuvat tuotteen valmistukseen liittyvät kumppanit. [7]

Nämä luovat uudenlaisia ongelmia tietojenkäsittelyn ja liiketalouden väliseen toimintaa. Muita asioita, jotka vaikuttavat näiden alojen välillä ovat:

- Mallintaminen ja referenssimallit: Industry 4.0 uudet konseptit aiheuttavat tarpeen uusille mallintamisen metodeille ja tarkoille referenssimalleille.
- Innovatiiviset toiminnanohjausjärjestelmän lähetymistavat.
- Bisnesäly: Kvantitatiivisten metodien ja mallien käyttö.

- Digitaalinen tuotemuisti: Tällaisissa systeemeissä kerätään dataa tuotteesta sen kaikissa elinkaaren vaiheissa.
- Menetelmien kehitys: Industry 4.0 vaatii uusia innovatiivisia malleja suunnitteluun ja kehitykseen.
- Innovatiiviset alusta arkkitehtuurit: Tarvitaan alusta arkkitehtuureja, jotka hoitavat tuotteiden datan ja palveluiden hoidosta ja pitää ne jatkuvasti käyttökelpoisina.
- Datamallit: Uudet valmistusmenetelmät asettavat uusia vaatimuksia datan mallinukseen ja sen vaihtamiseen muiden järjestelmien kesken. [7]

Kyber-fyysinen-järjestelmä on yksi tärkeimmistä osista industry 4.0 konseptissa. Sen avulla voidaan kerätä ja analysoida dataa, jota voidaan hyödyntää päätöksien teossa esimerkiksi kuvan 2.2 mukaisesti jakeluketjun hallinnassa. Tällaiset järjestelmät ei kuitenkaan ole sidottu pelkästään valmistavaan teollisuuteen vaan käyttökohteita löytyy lähes kaikilta sektoreilta, esimerkiksi maataloudesta, lääketieteestä, älykkäistä sähköverkoista, logistiikasta, koulutuksesta, ympäristöasioissa sekä älykkäistä kaupungeista [9].

Kyber-fyysisten-järjestelmien suunnittelu voidaan jakaa fyysisten aspektien suunnitteluun sekä loogisten aspektien suunnitteluun. Näiden lisäksi tulee ottaa huomioon myös laitteiden ja laskentayksiköiden välisen kommunikoinnin suunnittelu. [9]

Näiden järjestelmien fyysisiin osiin lasketaan sellaiset asiat, joita ei voida ratkaista tietokoneilla. Näihin kuuluvat esimerkiksi erilaiset mekaaniset osat esimerkiksi sensorit ja toimilaitteet sekä biologiset tai kemialliset prosessit riippuen järjestelmän tarkoituksesta. Näihin kuuluvat esimerkiksi:

- Laitteiden I/O rajapinnat. Tällaisia rajapintoja ovat esimerkiksi UART, SPI ja I2C
- Verkon rajapinta
- Erilaiset muisti- ja tallennustilat
- Ääni- ja videoliitännät [9]

Loogisten aspektien suunnitteluun kuuluvat kaikki tietokoneilla tehtävät operaatiot. Näihin kuuluvat esimerkiksi datan analysointi ja erilaisten ohjelmallisten toimintojen toteuttaminen saatujen tietojen perusteella. Tämän lisäksi tähän lasketaan applikaatiokerroksen yhteyden muodostamiset. [9]

Kyber-fyysisten-järjestelmien halutaan usein myös itse säätelevän omaa tilaansa. Valmistavassa teollisuudessa näissä järjestelmissä on laitteita, joilla on monesti tiukkoja reaaliaika vaatimuksia. Tämän vuoksi kyber-fyysisiin-järjestelmiin kuuluu usein yksi tai useampi laskentayksikkö joissa käytetään reaaliaikaista käyttöjärjestelmää. Nämä ohjaavat toimilaitteita sensoreilta saatujen arvojen mukaan. [9]

Koska kyber-fyysisiä-järjestelmiä voidaan rakentaa useisiin eri toimintaympäristöihin, jo-

ten yhden kaikille sopivan geneerisen arkkitehtuurin käyttö hankalaa. Järjestelmien halutaisiin kuitenkin pystyvän keskustelemaan toistensa kanssa. Tällaisia ongelmia voitaisiin ratkaista käyttämällä kontekstietoista tietojenkäsittelyä, jossa suoritettava funktio valittaisiin järjestelmän kontekstin mukaan [9].

Ihmiset ovat hyviä tulkitsemaan toistensa tunteita ja käyttämään tilannetajua. Perinteisesti ihmisten kanssakäymisessä koneiden kanssa näitä asioita ei ole otettu huomioon. Kontekstin määrittely on hieman hankalaa ja sille löytyy useita eri tulkintoja. Schilit & Theimer määrittivät kontekstin siten, että se on esineiden tai asioiden paikkaan, niiden läheisyydessä oleviin asioihin tai esineisiin ja muutoksiin liittyvää tietoa [10]. Anind K. Dey määritteli kontekstin siten, että konteksti on kaikki sellainen tieto, joka antaa informaatiota jonkin entiteetin tilasta [11]. Tällainen tulkinta sopii paremmin kyber-fyysisten järjestelmien kanssa toimittaessa, sillä erilaisia järjestelmiä on paljon ja järjestelmät sisältävät monimutkaisia asiayhteyksiä.

Tämän perusteella kontekstietoinen järjestelmä voidaan määritellä sellaiseksi, joka ottaa huomioon järjestelmän kontekstin ja tarjoaa sellaisia palveluita, joita käyttäjän suorittama tehtävä ja toimintaympäristö vaatii. Tällaista toimintamallia noudattamalla voidaan esimerkiksi lääkärin asiakkaalle määräämää lääkettä käsitellä terveydenhuollon järjestelmissä lääkkeenä ja tulkita mahdollisia sivuvaikutuksia potilaaseen ja saman lääkkeen entiteettiä apteekissa tai lääketehaassa tuotteena ja tarkastella sen varastointia tai hintoja [9].

Kyber-fyysisten järjestelmien kasvanut määrä on aiheuttanut huolta niiden tietoturvaan liittyen. Perinteisesti kyberhyökkäysten kohteena ovat olleet erilaiset tietojärjestelmät, joista on voitu varastaa esimerkiksi henkilötietoja ja muita abstraktimpia asioita. Kyber-fyysiset järjestelmät mahdollistavat, että kyberhyökkäyksillä voidaan vaikuttaa myös fyysisen maailman osiin.

Kyber-fyysisten järjestelmien turvallisuuteen liittyviä haasteita ovat:

- Fyysinen turvallisuus: Kyber-fyysisiin järjestelmiin kuuluu useita erilaisia laitteita. Nämä tarjoavat hyökkääjille useita eri reittejä päästä käsiksi järjestelmään. Hyvin vartioituissa ympäristöissä tällaiset riskit ovat hyvin pieniä.
- Reaaliaikaisuus: Kyber-fyysisiin järjestelmiin liittyy usein komponentteja joilla voi olla tiukkoja reaaliaika vaatimuksia. Nämä vaatimukset voivat asettaa rajoitetta käytettäville kryptograafisille menetelmille joita käytetään laitteiden kommunikaatiossa.
- Sisäpiirin uhka: Sisäpiiriläinen voi tahallaan tai vahingossa kytkeä esimerkiksi saastuneen USB-tikun järjestelmään tai ladata muun saastuneen tiedoston järjestelmään. Usein järjestelmien sisäistä liikennettä ei juurikaan valvota, jolloin näistä voi aiheutua haittaa kaikille järjestelmään kytketyille laitteille.
- Haavoittuvainen ekosysteemi: Järjestelmien luonteen takia sen suojaamiseen tarvi-

taan monenlaisia ratkaisuja. Uhkia on pystyttävä torjumaan tietoteknisistä näkökulmista, fyysisiin prosesseihin liittyvistä näkökulmista, sekä IIoT:hen ja fyysiseen turvallisuuteen liittyvistä näkökulmista. Teollisuudelle näiden ratkomisen voi olla hankalaa, sillä käytössä on paljon laitteita, joita ei ole suunniteltu ympäristöön jossa on olemassa tällaisia uhkia.

- Protokollat: Yleisesti käytetyt laitteet käyttävät kommunikoinnissaan protokollia, jotka eivät tarjoa riittävää suojaa kyberhyökkäyksiä vastaan.
- Tietoturva päivitykset: Tietoturvan päivittäminen useille laitteille jotka voivat olla vaikeasti saavutettavia on hankalaa. Myös järjestelmän komponentit jotka suorittavat aikakriittisiä toimintoja joutuvat päivittämään tietoturvan siten, että siitä ei aiheudu haittaa prosessin ohjaukselle.
- Turhat toiminnot: Monet teollisuuden laitteet sisältävät käyttämättömiä toimintoja, sillä niiden on tarkoitus soveltua useisiin eri käyttökohteisiin. Nämä voivat mahdollistaa takaportteja hyökkääjille. [9]

Verkkotasolla kyberturvallisuuden ongelmia voidaan ratkaista sallimalla pääsy vain todennetuilta käyttäjiltä, sekä käyttämällä kryptografisia salausmenetelmiä. Laitetasolla ongelmia voitaisiin ratkaista käyttämällä jokaiselle laitteelle uniikkia ja muuttumatonta tunnistetta, joka olisi säilötty laitteen pysyvään muistiin. [9] Tällöin voitaisiin varmistua, että yhteydessä oleva laite on sellainen, johon halutaan olla yhteydessä.

Järjestelmien arkkitehtuuria suunniteltaessa tulee ottaa siis erityisesti huomioon järjestelmän operatiivinen- sekä kyberturvallisuus. Kyber-fyysisten-järjestelmien luonteen vuoksi tunkeutumalla jompaan kumpaan järjestelmän osaan, myös toisen asema vaarantuu. Kyberhyökkäyksessä tunkeutajat voivat tehdä haittaa järjestelmän laitteille käyttämällä niitä väärin ja tunkeutumalla laitteiden läheisyyteen päästään käsiksi järjestelmään. [9]

3. KONNEKTIVITEETTI

Konnektiviteetti on tärkeässä roolissa, kun suunnitellaan IIoT:hen pohjautuvia järjestelmiä. Konnektiviteetillä tarkoitetaan tapoja joilla laitteet keskustelevat ja ovat yhteydessä toisiinsa. Tämä käsittää seitsemän kerroksiseen OSI-malliin (Open Systems Interconnect) pohjautuen kerrosmallisen protokollapinon mukaisten protokollien käyttämisen. OSI-mallin mukaan, joka on esitelty kuvassa 3.1, jokainen kerros keskustelee vastinlaitteessa vastaavan kerroksen kanssa. Jokainen kerros myös keskustelee myös ylemmän ja alemman kerroksen protokollan kanssa sovittuja rajapintoja käyttäen. Lopuksi fyysinenkerros yhdistää laitteet toisiinsa ja lähettää halutun tiedon.



Kuva 3.1. OSI-malli

OSI-malli on kuitenkin lähinnä filosofinen malli, jota voidaan hyödyntää erilaisten protokollapinon suunnittelussa. Nimensä mukaisesti IIoT konsepti pohjautuu laitteiden yhdistämiseen internetin välityksellä. Internet liikenteessä käytetään pohjana nelikerroksista protokollapinoa, joka on esitelty kuvassa 3.2. Tämäkään malli ei kuitenkaan sovi kaikkiin IIoT-järjestelmien osien väliseen kommunikointiin. Erityisesti aikakriittiset komponent-

tit tarvitsevat omanlaisiaan ratkaisuja liikkennöintiin.



Kuva 3.2. Internetin protokollapino

Sovelluskerroksella ohjelmisto valitsee millä protokollalla haluaa lähettää tietoa. Sovelluskerrokselta löytyy useita erilaisia protokollia joista tunnetuimpia ovat esimerkiksi Hypertext Transfer Protocol HTTP ja Simple Mail Transfer Protocol SMTP. Näiden lisäksi viestit voidaan sovelluskerroksella salata esimerkiksi käyttämällä Transport Layer Security protokollaa. Sovelluskerroksella toimiva ohjelma muodostaa protokollan mukaisen viestin lähetettävästä datasta ja siirtää sen protokollapinossa alempana olevalle protokollalle.

Kuljetuskerroksella käytetään useimmiten TCP:tä (Transmission Control Protocol) tai UDP:tä (User Datagram Protocol). TCP on yhteydellinen protokolla, joka muodostaa yhteyden keskustelevien laitteiden välille ja varmistaa, että lähetetyt paketit vastaanotetaan sekä sulkee yhteyden kommunikoinnin päätyttyä. Tarvittaessa TCP voi suorittaa pakettien uudelleen lähetyksiä, jos viestinnässä on ongelmia. UDP on yhteydetön protokolla, jolloin ei voida varmistaa pakettien vastaanottamista. UDP on TCP:tä nopeampi protokolla vähäisempien toimintojensa vuoksi. Molemmat protokollat lisäävät sovelluskerrokselta saamaansa viestiin omat otsikkonsa ja siirtävät muodostamansa segmentin verkkokerrokselle.

Verkkokerroksella käytetään yleensä Internet protokollaa eli IP:tä. Se lisää kuljetuskerrokselta saamaansa segmenttiin omat otsikot, joista tärkeimpänä IP osoite, jolla verkossa yleensä määritellään lähettäjä ja vastaanottaja. IP:stä on olemassa kaksi yleisesti käytössä olevaa versiota; IPv4 ja IPv6. Uudempaan IPv6 ollaan siirtymässä siitä syystä, että se käyttää 128 bittisiä IP-osoitteita. Tähän ollaan siirrytty IPv4 32-bittisistä osoitteista, jotka olivat käymässä vähiin, kun laitteiden määrä verkossa alkoi kasvaa. IoT-teknologia

on lisännyt verkossa toimivien laitteiden määrää ja on yksi syy IP-osoitteiden vähenemiselle [12]. Protokolla lisää kuljetuskerrokselta saamaansa segmenttiin omat otsikkonsa ja muodostaa siitä datagrammin, jonka se siirtää kerrosta alemmaksi siirtokerrokselle.

Siirtokerroksella toimivat laitteiston ajurit, jotka lähettävät saamansa datagrammin IP-osoitetta vastaavaan laitteeseen. OSI-mallin mukaisesti internet protokollapinon siirtokerros toimii OSI-mallin siirto- ja fyysiselläkerroksella. Erilaisiin vaihtoehtoihin perehdytään tarkemmin luvuissa 3.1 ja 3.2.

Nämä tekniikat luovat hyvän pohjan IIoT-laitteiden väliseen kommunikointiin. Näitä ei voida kuitenkaan suoraan soveltaa käsittämään koko IIoT-järjestelmän ja järjestelmien välistä kommunikointia niiden hajautetun luonteen ja verkon heterogeenisyyden takia[2]. Erityisesti ratkaisuja tarvitaan verkkokerroksen ylempiin ja alempiin protokollisiin.

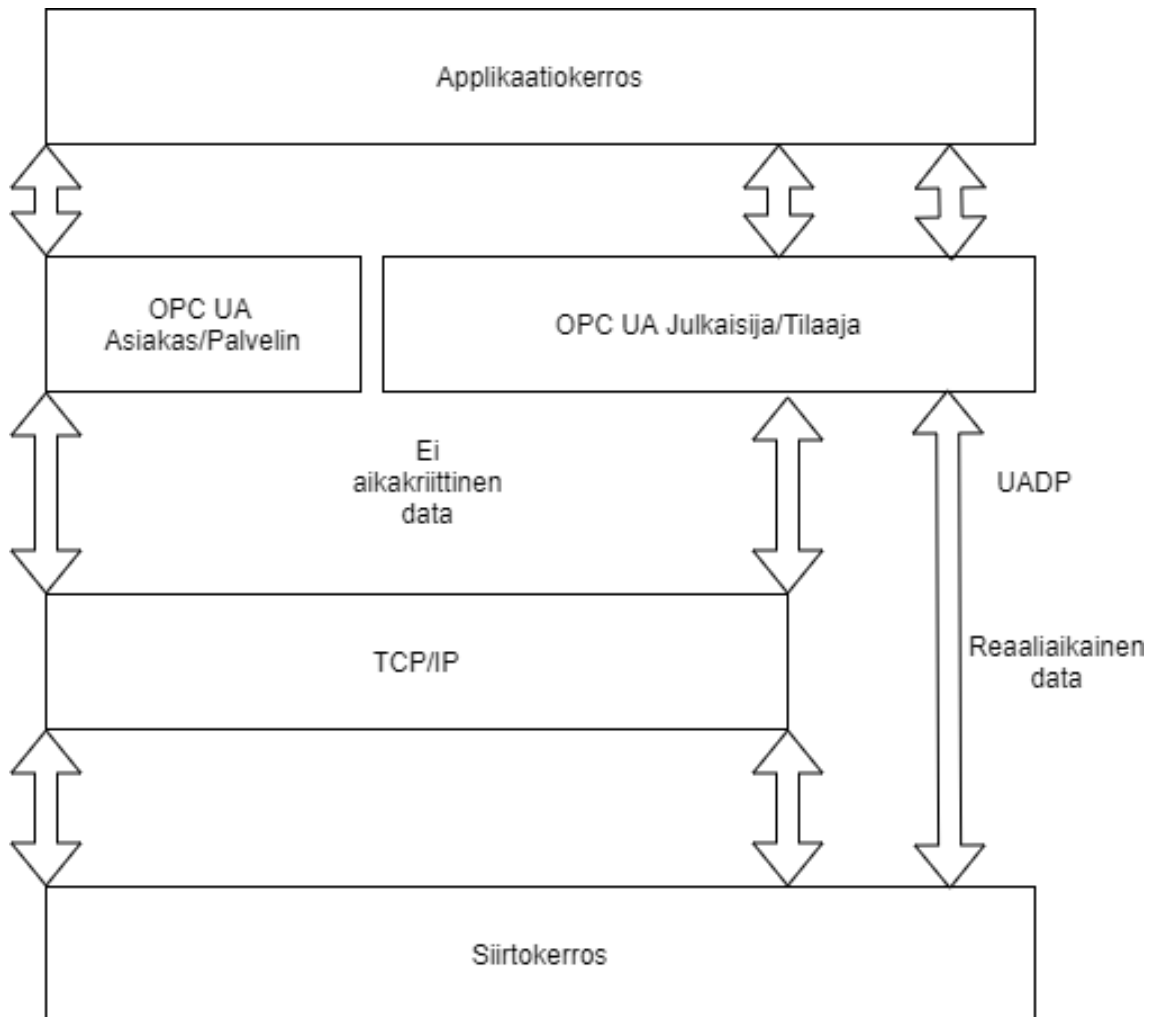
Verkon heterogeenisuus tarkoittaa sitä, kuinka paljon eroja on verkkoon kytketyissä laitteissa ja protokollissa. Suurempi määrä laitteita ja protokollia vastaa suurempaa heterogeenisuutta ja pienempi määrä pienempää heterogeenisuutta. IIoT-järjestelmissä on paljon erilaisia laitteita, joka muodostaa protokollapinon paljon heterogeenisuutta verkkokerroksen molemmille puolille. Kuvassa 3.3 on kuvattu protokollapinon aiheutuva heterogeenisuus. Leveämmät kerrokset kuvaavat suurempaa heterogeenisuutta.



Kuva 3.3. Kuvaus IIoT-järjestelmien aiheuttamasta heterogeenisyydestä protokollapinos-
sa [2]

Yksi ratkaisu ylempien kerrosten protokollien heterogeenisuuteen olisi käyttää OPC UA (OPC Unified Architecture) protokollan aikasensitiivisiä ominaisuuksia aplikaatio- ja kulje-

tuskerroksen välissä [13]. OPC UA sisältää mahdollisuuden käyttää niin sanottua julkaisija-tilaaja-menetelmää, jossa jokin laite toimii julkaisijana ja julkaisee dataa sisältävän viestin. Muut laitteet toimivat tilaajana ja voivat tilata jonkin tietyn julkaisijan viestejä tai tilata tietyn tyyppisiä viestejä. [14] Aikakriittisistä prosesseista ilmoittaviin viesteihin käytetään UADP (Unified Access Data Plane) protokollaa [15]. Tämän avulla laitteet voisivat kommunikoida aikakriittisistä prosesseistaan ja käyttää normaaleja internetin protokollia muuhun liikenteeseen.



Kuva 3.4. OPC UA:n toiminta välikerroksena [13]

Kuvassa 3.4 on kuvattu, kuinka OPC UA protokolla toimii eri tilanteissa. OPC UA tukee myös perinteistä asiakas-palvelin-mallia. Asiakas-palvelin-malli on hyvin yleisesti käytetty malli, jota käytetään esimerkiksi internet liikennöinnissä. Sillä on kuitenkin huonot edellytykset reaaliaikaiseen liikennöintiin.

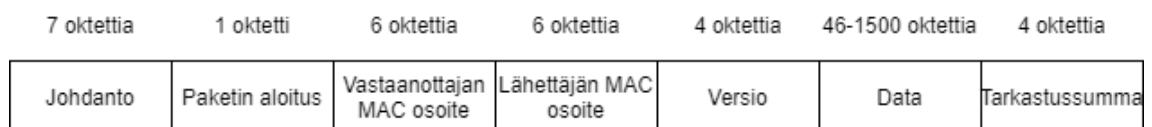
3.1 Langalliset menetelmät

Perinteisesti teollisissa verkoissa on käytetty langallisia ratkaisuja laitteiden yhdistämiseksi, niiden luotettavuuden, alhaisten viiveiden ja suurien nopeuksien vuoksi. Vielä vuonna

2020 langallisilla verkoilla oli noin 94 % osuus kaikista verkoista, joista 64 % oli internet pohjaista ja 30 % erilaisia kenttäväyliä [16]. Laitteiden fyysiselle yhteydelle ei ole kovin-kaan monia erilaisia vaihtoehtoja, vaan IloT-järjestelmissä yhteydet muodostetaan joko kuparisilla verkkokaapeleilla tai optisilla kuiduilla.

Langalliset internet pohjaiset järjestelmät ovat viime vuosien aikana korvanneet perinteisesti käytettyjä kenttäväyliä, joiden yhteensopivuus yrityksen sisäiseen verkkoon oli huono. Internet pohjainen liikenne on hyvä idea, jolla saataisiin yhtenäisiä protokollia yritysten sisäisen verkon ja laitteiden hallinnan välille. Tässä ei kuitenkaan olla onnistuttu vaan markkinoille on tullut useita kymmeniä erilaisia internettiin pohjautuvia protokollia, joiden toiminta on kuitenkin melko samanlaista. [13] Näistä yleisesti käytetyimpiä ovat EtherNet/IP, PROFINET ja EtherCAT [16]. Kaikki näistä perustuvat alimmalla kerroksella Ethernet protokollalle.

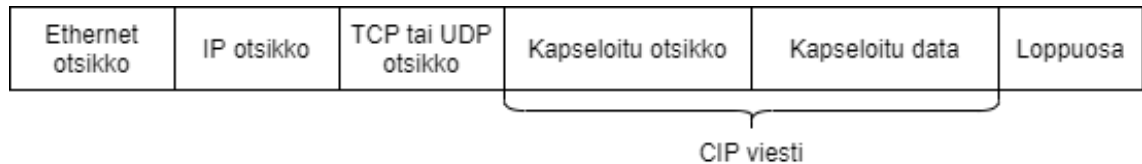
Ethernet protokolla on yleisesti internetissä käytetty protokolla. Sillä lähetetään viestejä laitteiden yksilöllisten MAC (Medium Access Control) osoitteiden avulla. IP-protokollan kanssa käytettynä käytetään protokollaa, jolla voidaan yhdistää IP-osoite laitteen kanssa. Tällaisia protokollia ovat esim ARP (Address Resolution Protocol) protokolla. Ethernet kehys alkaa 7 oktetin johdanto osiolla, jossa vuorotellaan 1 ja 0 bittejä, jotta vastaanotettava laite voi synkronoitua viestin vastaanottamiseen. Tämän jälkeen tulee kehyyksen alkamisesta ilmoittava tavu. Varsinainen kehys alkaa 6 oktetin pituisella MAC osoitteella, joka kuuluu lähettävälle laitteelle, jonka perään tulee 6 oktetin pituinen osoite, joka kuuluu vastaanottavalle laitteelle. Tätä seuraa 2 tavun kenttä, jossa kerrotaan käytettävän Ethernet protokollan versio. Seuraavana tulee ylempiltä protokollilta saatu data kuormana, johon Ethernet ei ota kantaa. Lopuksi on 4 tavun pituinen tarkastussumma. Vastaanottava laite laskee vastaanottamistaan tavuista tarkastussumman ja vertailee sitä viestissä lähetettyyn tarkastussummaan ja tämä perusteella päättää, onko viesti tullut samanlaisena perille, kuin se on lähetetty.



Kuva 3.5. Ethernet kehys

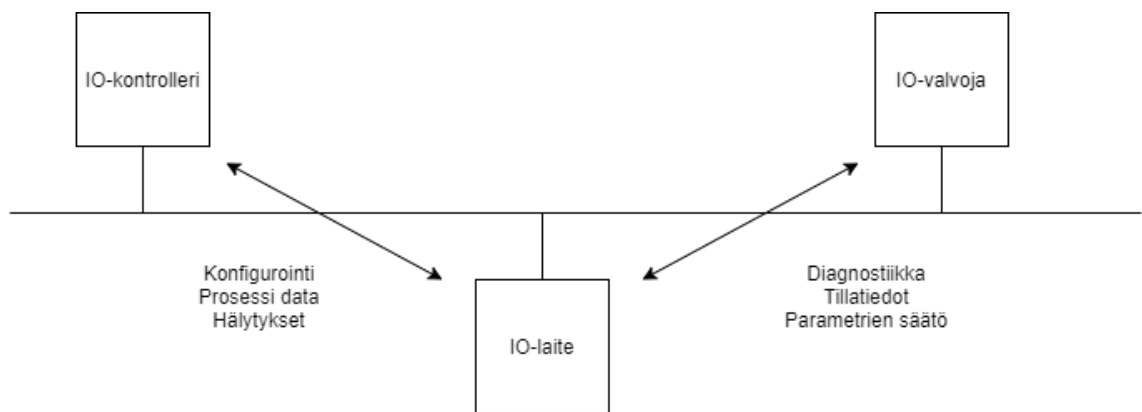
EtherNet/IP käyttää pakettien lähetykseen normaaleja internetin protokollia, millä voidaan lähettää CIP (Common Industrial Protocol) protokollan mukaisia viestejä [17]. CIP on yleinen teollisuus automaatioon tarkoitettu protokolla, joka tarjoaa kirjastoja ja palveluita teollisuuden laitteiden ohjaukseen ja datan hallitsemiseen. Ethernet/IP protokollaa käyttämällä voidaan myös käyttää yleisesti käytettyjä protokollia, kuten HTTP:ta tai SMTP:tä sekä kuljetus- ja verkkokerroksella tavallisesti käytettyä TCP/IP protokollia [18]. Näiden ansiosta EtherNet/IP on helppo yhdistää muihin verkkoihin.

EtherNet/IP:llä voidaan lähettää joko eksplisiittisiä viestejä tai I/O viestejä. Eksplisiittisten viestien lähettämiseen käytetään TCP/IP protokollia, joille on laitteista varattu portti 0xAF12. I/O viestien lähettämiseen käytetään UDP/IP protokollia, joille on varattu portti 0x08AE. CIP protokollan viestit kapseloidaan tavallisen ethernet paketin aplikaatiodatan osaan. [18]



Kuva 3.6. Ethernet/IP paketti [18]

PROFINET verkon toiminta eroaa Ethernet/IP verkoista erityisesti aikakriittisissä sovelluksissa. Verkon laitteet on jaettu IO-valvojaan, IO-kontrolleriin ja IO-laitteeseen. IO-laite on jokin kenttälaitte, jonka arvoja halutaan tarkkailla tai säätää esim. robotti. IO-kontrolleri kommunikoi IO-laitteen kanssa ja hoitaa laitteen konfiguroinnin, hälytykset ja prosessidatan. IO-kontrollerina toimii yleensä PLC (Programmable Logic Controller). IO-valvoja kommunikoi IO-laitteen kanssa ja tarkastelee sen diagnostiikkaa ja muita tilatietoja. IO-valvoja hoitaa myös IO-laitteen parametrien säädön. IO-valvojana toimii ohjelmoiva laite esimerkiksi PC. [19]



Kuva 3.7. PROFINET verkon rakenne [19]

Verkossa voidaan käyttää normaalia TCP/IP mukaista liikennettä. Reaaliaikadatan, kuten hälytyksien ja prosessin säätöön käytetään RT (Real Time) kehyksiä, joissa ei käytetä ollenkaan kuljetus- tai verkkokerroksen protokollia. Kehyksien lähetyksessä Ethernet kehyksen versio kohdassa käytetään 0x8892 arvoa. Tämä on varattu PROFINET verkkojen I/O liikenteeseen, joka priorisoi RT kehykset, jolloin muut UDP/IP lähetykset eivät aiheuta viivettä RT kehyksille. [18] TCP/IP liikenne priorisoidaan automaattisesti alemmaksi, niiden ruuhkanhallinta ominaisuuden vuoksi. UDP ei sisällä tällaisia ominaisuuksia, joten niiden prioriteetin laskeminen on täytynyt tehdä PROFINET protokollan avulla. Erityisen kovia reaaliaika vaatimuksia

varten PROFINET verkossa on mahdollista varata kaistaa vain tiettyä liikennettä varten [19].

EtherCAT toimii protokollapinin näkökulmasta hyvin samalla tavalla kuin PROFINET. Molemmissa reaaliaikadataa lähetetään suoraan Ethernet kehyksiin lisättynä ilman verkko- tai kuljetuskerroksen protokollia. EtherCAT verkkojen topologia ja viestien välitys toimivat kuitenkin eri tavalla.

EtherCAT verkoissa käytetään isäntä-orja-periaatetta. Isäntä lähettää viestejä, joko yhdelle tai usealle laitteelle. Ensimmäinen laite vastaanottaa viestin ja päättää täytyykö sen lisätä viestiin omia tietojaan. Tämän jälkeen viesti lähetetään eteenpäin seuraavalle laitteelle, joka lisää omat datansa kehykseen. Lopulta viesti palautetaan isäntälaitteelle, ja laite voi lukea orjalaitteiltaan pyydettyjä tietoja. Periaate estää verkon ruuhkautumista, kun yhdessä syklistä liikkuu vain yksi viesti. Ei aikakriittistä liikennettä voidaan myös lähettää käyttämällä TCP/IP ja muita normaalin ethernetin protokollia. [20]

Näiden tehokkuuksien arviointi on hankalaa, sillä tekniikoiden tehokkuuteen vaikuttaa paljon, millaisessa ympäristössä niiden on tarkoitus toimia. Eräässä simulaatiossa on todettu, että EtherCAT verkolla saadaan pienimmät viiveet [21]. Tämä riippuu kuitenkin paljon verkon topologiasta ja muista parametreista. Samaisessa simulaatiossa Ethernet/IP verkkojen todettiin aiheuttavan eniten viivettä [21]. Kuitenkin Ethernet/IP protokollan täysi yhteensopivuus normaaliin Ethernet liikenteeseen tekee siitä varteenotettavan vaihtoehdon järjestelmissä, joissa voidaan toimia hieman suuremmilla viiveillä.

Langalliset menetelmät ovat tiedonsiirtoon liittyvien ominaisuuksiensa puolesta hyviä valintoja konnektiviteetti ongelman ratkaisemiseen. Kuitenkin järjestelmän laajennettavuuden puolesta ne eivät ole optimaalisia. Verkkojen rakennukseen vaaditaan kaapeleita, joiden hankkimisesta ja asentamisesta aiheutuu kuluja ja suurien verkkojen rakennus myös kuluttaa aikaa. Toimintaympäristöjen runkoverkoiksi langallinen menetelmä on kuitenkin hyvä valinta.

3.2 Langattomat menetelmät

Vaikka vuonna 2020 langattomien verkkojen osuus teollisissa verkoissa oli vain 6 % [16], tutkimusten määrä aiheesta on kasvanut viime vuosien aikana. Tällä hetkellä ei ole saatavilla sellaista langatonta teknologiaa, jolla voitaisiin saavuttaa kaikki teollisuuden asettamat vaatimukset. Erilaisia hybridiverkkoja kuitenkin on rakennettu jo pidemmän aikaa, joissa aikakriittiset ja suuria nopeuksia vaativat yhteydet on rakennettu käyttämällä langallisia menetelmiä ja näiden päälle on lisätty erilaisia langatonta verkkoa käyttäviä aliverkkoja [22]. Langattomien menetelmien etuna langallisiin menetelmiin on niiden helppo laajennettavuus, sekä verkon rakennuksesta säästetyt kustannukset.

Langattomien menetelmien käyttö vaatii erilaista suhtautumista verkon suunnitteluun, kuin

langallisten menetelmien käyttö. Langattoman tietoliikenteen viiveisiin ja datanopeuksiin vaikuttaa kanavasta aiheutuvat vaimentumiset ja häipymiset. Langattomia verkkoja jaotellaan yleisesti kahdella tapaa, niiden kantaman ja niiden kuluttaman tehon mukaan [23]. Erilaisia tekniikoita on markkinoilla valtavasti, mutta näistä tunnetuimpia matalan tehon kulutuksen tekniikoita lyhyille kantamille ovat esimerkiksi BLE (Bluetooth low-energy) ja ZigBee. Pitkille kantamille tunnetuimpia ovat esimerkiksi LoRaWAN (Low Power Wide Area Network), NB-IoT (Narrowband IoT) ja Sigfox. Korkeamman tehonkulutuksen tunnetuimpia sovelluksia ovat lyhyellä kantamalla erilaiset WiFi-verkot ja pitkällä kantamalla LTE-verkot. Tulevaisuudessa kehitteillä oleva 5G-teknologia kuuluu korkean tehonkulutuksen ja pitkän kantaman luokkaan. Erilaisia tekniikoita on kuitenkin todella paljon, joten tässä kappaleessa esitellään näistä ZigBee, LoRaWAN ja 5G-teknologian ominaisuuksia ja käyttökohteita.

Zigbee on lyhyen kantaman ja alhaisen tehon kulutuksen langattoman tietoliikenteen protokolla, joka noudattaa standardia IEEE 802.15.4. Se toimii 868/915 MHz ja 2.4 GHz taajuuksilla. 868MHz taajuus on käytössä Euroopassa ja 915 MHz Amerikassa ja Australiassa. 2.4 GHz taajuus on käytössä maailmanlaajuisesti. [24] Sen maksimi datan lähetysnopeus on 250 kbps. ZigBee on tarkoitettu sovelluksiin, joissa tarvitaan alhaista virrankulutusta ja halpaa hintaa. Se sopii hyvin patterikäyttöisiin laitteisiin, joissa halutaan maksimoida patterin elinikä. ZigBee sisältää virransäästötilan, johon lähetin tai vastaanotin menee, kun lähetettäviä tai vastaanotettavia viestejä ei ole. [25]

Zigbee-verkoissa voidaan käyttää joko tähtitopologiaa tai vertaisverkko topologiaa. Vertaisverkko topologiassa verkon laitteet voivat vapaasti keskustella toisten laitteiden kanssa. Tähtitopologiassa laitteet voivat keskustella ainoastaan verkon koordinaattori laitteelle. Vertaisverkko topologiaan voidaan vapaasti asettaa myös rajoituksia laitteiden välille, joiden ei haluta keskustelevan keskenään. Laitteiden välisiä viestejä voidaan hypyttää verkon yli toisten laitteiden kautta. [25]

LoRaWAN on pitkän kantaman ja alhaisen tehonkulutuksen tietoliikenne protokolla, joka perustuu LoRa-alliance:n kehittämälle LoRa-standardille. LoRa käyttää modulaationaan CSS (Chirp Spread Spectrum) modulaatiota, vanhojen langattomien järjestelmien käyttämän FSK (Frequency Shift Keying) modulaation sijaan. Tämän ansiosta LoRa järjestelmien virrankulutus on alhaista, mutta sillä voidaan saavuttaa laajojen alueiden kattavuus. LoRaWAN-verkon laitteet keskustelevat yhdyskäytävän kanssa, mikä välittää viestin toiselle verkon laitteelle tai muuntaa viestin IP-paketiksi ja lähettää sen internet pohjaiseen verkkoon. Yhdyskäytävä myös muuntaa IP-paketteja LoRaWAN verkon mukaisiksi paketeiksi ja välittää näitä eteenpäin verkon laitteille. [26]

LoRaWAN verkkojen käyttämä taajuus vaihtelee alueittain. Euroopassa verkoille käytetään taajuuksia väliltä 867-869 MHz samoin kuin ZigBee-verkoissa. Euroopassa käytetään 125/250 kHz kaistanleveyttä ylälinkissä ja 125 kHz kaistanleveyttä alalinkissä. Datano-

peuksissa tällä päästään ylimmillään 50 kbps nopeuksiin. Verkossa on käytössä kymmenen kanavaa, joista 8 on hitaampia nopeudeltaan 250 bps - 5.5 kbps, yksi korkean datanopeuden kanava nopeudella 11 kbps ja yksi FSK kanava nopeudella 50 kbps. Samoin kuin ZigBee LoRaWAN soveltuu alhaisen virrankulutuksen sovelluksiin, mutta tarjoaa suuremman peittoalueen verkolle. [26]

5G-teknologia eroaa huomattavasti edellä esitellyistä teknologioista. Aikasempiin soluverkko generaatioihin verrattuna, 5G:n suunnittelussa on otettu huomioon koneiden välinen kommunikointi ja IIoT verrattuna aikasempiin koneiden ja ihmisten väliseen kommunikaatioon. Tämä edellyttää, että lähetettyjen viestien viiveet ovat pieniä ja verkko tukee suuria määriä laitteita. 5G-teknologia on edellä esitelyihin teknologioihin verrattuna korkean tehonkulutuksen teknologia [23]. 5G on tarkoitettu tuottamaan 3 erilaista palvelua; ultra luotettavia ja alhaisen latenssin yhteyksiä, suuren määrän koneelta koneelle yhteyksiä sekä suuren datanopeuden yhteyksiä [27].

Ultra luotettavien ja alhaisten latenssien yhteyksien tavoitteena on saada latenssi alle 1 ms:iin ja luotettavuus 99.999 %:iin. Tämän saavuttamiseksi 5G:n tarkoituksena on lähettää pieniä paketteja, jolloin ylä- ja alalinkin vaihtelu nopeutuu ja pakettien lähetyksessä oleva aika pienentyy ja paketit vastaanotetaan oikein suuremmalla todennäköisyydellä. Luotettavuutta voidaan parantaa myös käyttämällä robusteja kanavakoodaus menetelmiä esimerkiksi turbo-koodausta. Se on suunnattu erityisesti teollisuuden tarpeisiin ja koneiden väliseen kommunikointiin. [27] Verkko liikenteessä tällaiset yhteydet voidaan priorisoida tai varata niille erillinen kaista [28].

Suurten datanopeuksien tavoitteena on saavuttaa 20 GB/s alalinkissä ja ylälinkissä 10 GB/s. Tämä saavutetaan suurilla kaistanleveyksillä, massiivisilla moniantennitekniikoilla ja korkean asteen modulaatioilla. 5G-teknologioissa voidaan käyttää, jopa 400 MHz levyisiä kaistanleveyksiä ja modulaationa voidaan käyttää 256-QAM, joka mahdollistaa 8 bitin lähettämisen yhdellä symbolilla. Kaistan rajallisuuden ja suurien kaistanleveyksien vuoksi, 5G on tarkoitus tukea 1 - 86 GHz taajuisia kantoaaltoja. [27] Tällä hetkellä 5G-standardi tukee taajuuksia 50 GHz:iin asti, mutta taajusalueita olla nostamassa 70 GHz:iin asti.

Suurten määrien koneelta koneelle yhteyksien tavoitteena on saavuttaa kattavuus 1 000 000 laitteelle neliökilometrillä [29]. Näiden yhteyksien tarkoitus on myös pystyä kommunikoidaan alhaisella tehonkulutuksella ja parantaa laitteiden käyttämien pattereiden ja akustojen elinikää. Tarkoituksena on pitää laitteet yksinkertaisina, jolloin niiden hinnat pysyvät alhaisina. Kaistanleveys pyritään pitämään alle 1 MHz, jolloin tällaisilla yhteyksillä datanopeus jäisi muutamaan sataan kilobittiin sekunnissa. [27]

5G-verkkojen ongelmana on tällä hetkellä kaupallisten tuotteiden puute, sekä standardointiin liittyvä ongelmat. 5G tavoitteiden puolesta voisi olla ratkaisu kaikkiin IIoT:hen liittyviin ongelmiin. Vaikka 5G ratkaisun käyttäminen tuotannollisissa sovelluksissa on vielä

haastavaa, asian kanssa on tapahtunut merkittävää edistystä viime vuosien aikana. Kesällä 2020 Nokia avasi maailman ensimmäisen 5G-kaivosverkon Sandvikin testausluolaan, jossa testataan kuinka verkko soveltuu teollisen internetin tarpeisiin [3].

Käytettävä teknologia riippuu vahvasti siitä millaiseen sovellukseen sitä ollaan käyttämässä ja millaisessa ympäristössä. ZigBee soveltuu hyvin käytettäväksi suljetuissa tiloissa teollisuuden mittaus- ja säätösovelluksiin. LoRaWAN-verkot soveltuvat monenlaisiin vaikeisiin ympäristöihin sen suuren kattavuuden vuoksi. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi sensorien etälukuun ja joihinkin etäohjaus sovelluksiin. 5G-verkot sopivat myös monenlaisiin ympäristöihin ja niitä voidaan käyttää älykkäässä valmistuksessa ja etäohjaus sovelluksissa. [23]

4. TEOLLINEN INTERNET KAIVOSTEOLLISUUDESSA

IIoT-teknologia mahdollistaa uudenlaisia toimintapoja ja parannuksia prosesseihin useilla teollisuuden aloilla. Tässä työssä on esimerkkinä käytetty kaivosteollisuutta. Kaivosteollisuudessa IIoT:n ansiosta voidaan parantaa kaivosten tuottavuutta suuremman automaatioasteen avulla, sekä parantaa kaivoksen turvallisuutta poistamalla ihmisiä vaarallisista työskentely-ympäristöistä ja käyttämällä puettavaa teknologiaa sellaisissa ympäristöissä, joissa ihmisen täytyy toimia. Etenkin turvallisuus näkökulma on kaivosten toiminnassa tärkeää, sillä pelkästään Yhdysvalloissa loukkaantui 3926 ja kuoli 27 ihmistä kaivostapaturmissa vuonna 2019[30].

Kaivoksien luonteen ja moninaisten sovellusten vuoksi, ei ole yhtä verkkoratkaisua, joka toimisi jokaiseen sovellukseen. Tämän vuoksi kaivoksissa voidaan joutua käyttämään useita erilaisia teknologioita. Runkoverkkona tulisi käyttää teknologiaa, jolla saavutetaan suuria nopeuksia ja voidaan lähettää suuria määriä dataa. Erilaisiin käyttökohteisiin voidaan rakentaa erilaisia aliverkkoja, jotka ovat yhdistetty runkoverkkoon yhdyskäytävän kautta [31].

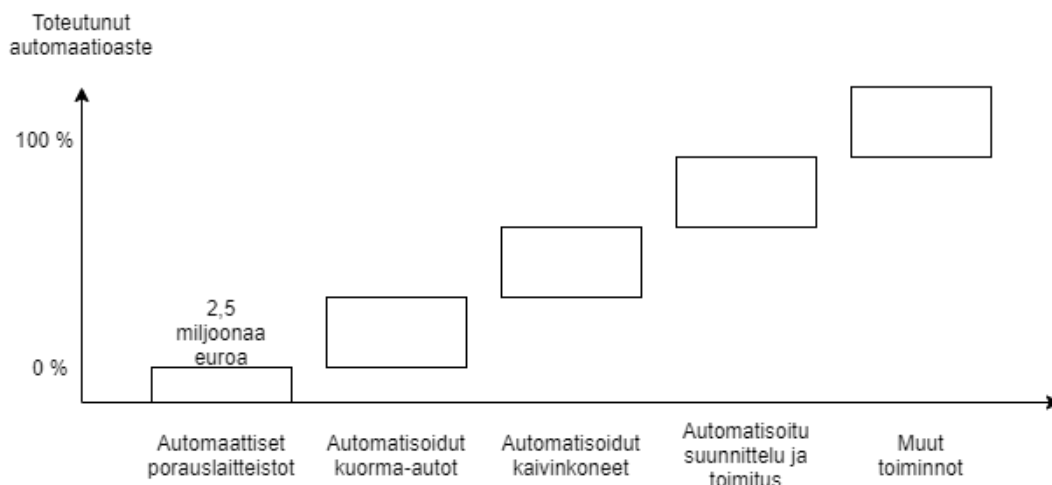
Turvallisuuteen liittyvissä sovelluksissa tulisi käyttää paikallista silmukkaverkkoa [32], joka on yhteydessä yhdyskäytävän kautta muuhun verkkoon. Silmuverkko topologiaa käyttämällä dataa voidaan lähettää vaikka jokin verkon laite olisikin vikatilassa, sillä silmukkaverkon laitteet voivat vapaasti olla yhteydessä toisiinsa ellei niitä erikseen ole rajoitettu. Tällaisiin sovelluksiin voitaisiin käyttää esimerkiksi ZigBee-verkkoa. ZigBeeen lyhyen kantaman vuoksi sillä voidaan tehdä vain pienen alueen verkkoja. Tällaisella ratkaisulla voidaan asentaa kaivoksen olosuhteita mittaavia sensoreita jotka kommunikoivat ZigBee protokollan mukaisesti mikrokontrollerin kanssa [33]. Mikrokontrolleri voi tehdä mittausten perusteella säätötoimenpiteitä laitteille ja/tai lähettää mittausten arvot tietokantaan, josta dataa voidaan käyttää data-analyysiin.

Puettavan teknologian avulla ihmiset ja koneet voidaan yhdistää toisiinsa. Tällöin vaaratilanteen sattuessa kone voidaan pysäyttää jos se aiheuttaa vaaraa lähellä olevalle ihmiselle. Ihmiselle puettava laite voi olla esimerkiksi kypärä, joka kertoo reaaliajassa ihmisen sijainnin [34]. Kaivoksissa etäisyydet voivat olla pitkiä, jolloin lyhyen kantaman ZigBee-verkko soveltuu huonosti tällaiseen sovellukseen. Tällöin täytyy käyttää jotain pitkän kantaman verkkoa esimerkiksi LoRaWAN verkkoa tai soluverkkoja esimerkiksi WiFi tai

5G verkkoa.

Tuottavuuden ja automaatioasteen kannalta koneiden automaattinen toiminta kaivoksessa helpottuu. Kaivuskoneita valmistava Sandvik on toimittanut automaattisia tai etäohjattavia automine järjestelmiä jo vuodesta 2004 [3]. Niiden toiminta kuitenkin perustuu ennalta määriteltyyn malliin, jota kone noudattaa. Kaivoksessa olevien laitteiden avulla, koneelle voidaan muodostaa malli kaivoksesta ja sen toimijoista sen ollessa toiminnassa. Automatisoimalla porauslaitteistoa voidaan säästää vuodessa jopa 5000-7000 työtuntia vuodessa. Tämän lisäksi voidaan karsia ylimääräistä henkilöstöä, huoltoasemia, parkkipaikkoja, logistiikkaa ruuhkaisilla teillä sekä henkilöstölle vaaraa aiheuttavaa kuljetusta kaivoksessa. [35]

Ruotsalaisyhtiö Boliden arvioi, että sen suorittama porauslaitteiston automatisointi Aitikin kaivokseen on tuonut sille 1 % säästön vuotuisiin kustannuksiin, joka tarkoittaa 2,5 miljoonan euron säästöä vuosittain. Seuraavaksi kaivoksessa on tarkoitus automatisoida kuorma-autot, jotka aiheuttavat 95 % kaivoksen polttoaineen kulutuksesta. Automatisoimalla kuorma-autojen liikkuminen kaivoksessa ne voivat liikkua tasaisemmalla nopeudella, jonka ansiosta niiden polttoaine kustannukset pienenevät. Ericsson arvioi raportissaan, että tämän ansiosta voitaisiin säästää 10 % polttoainekustannuksissa. Suuren rahallisen arvon lisäksi ilmastonmuutoksen kannalta oleelliset hiilidioksidi päästöt vähenyvät. Ericsson arvioikin, että automatisoinnin päästöt vähenisivät 9400 tonnia vuodessa. [35] Kuvassa 4.1 on esitelty, kuinka kaivostoiminnan automatisointi tulee etenemään tulevaisuudessa ja hahmotelma säästöjen suuruudesta.



Kuva 4.1. Ericssonin näkemys automatisoinnin kehityksestä [35].

Parempien verkkojen ollessa saatavilla voidaan myös kerätä laitteista suurempia määriä dataa. Dataa analysoimalla voidaan päätellä millaisessa kunnossa kone on ja tarvitseeko sitä huoltaa. Data-analyysillä voidaan myös päätellä kaivoksen vaaralliset alueet tutkimalla kaivoksen olosuhteita lämpötilan, kosteuden, melun, ilmavirran, ilmassa olevien kaasujen ja ilmassa olevan pölyn perusteella [33].

IloT tuo myös mukanaan siihen liittyviä ongelmia. Näihin ongelmiin kuuluvat yleisesti IIoT:hen liittyvät ongelmat turvallisuuden ja verkkojen yhteensopivuuden kanssa. Kaivosteollisuudessa haasteita aiheuttavat myös kaivoksien ankarat olosuhteet [36]. Kaivoksissa on paljon pölyä ja kosteutta, joka vaatii laitteilta kestävästä suunnittelusta. Kaivosten rakenteista aiheutuu langattomissa verkoissa signaaleille monimutkaisia etenemismalleja, jotka täytyy ottaa verkon suunnittelussa huomioon [37].

5. YHTEENVETO

Teolliseen internettiin liittyvistä ongelmista huolimatta, sen potentiaali markkinoilla on valtava. Tuotantoprosesseja voidaan tehostaa ja työntekijöiden turvallisuutta parantaa. 5G teknologian kehittyessä laitteita voidaan entistä paremmin kytkeä toisiinsa langattomilla menetelmillä. Konnektiviteetti ongelman ratkomisen jälkeen voidaan keskittyä entistä paremmin ratkaisemaan teollisen internetin aiheuttamia ongelmia, joista suurimpana järjestelmien turvallisuus.

Työssä luotiin katsaus teollisen internetin eri osa-alueisiin, joista teollinen internet koostuu. Työssä tarkasteltiin myös laitteiden välistä konnektiviteettiä sekä teollisen internetin soveltumista kaivosympäristöön. Teolliseen internettiin liittyvistä käsitteistä käytiin läpi teollinen asioiden internet IIoT, teollisuuden 4. vallankumous Industry 4.0 sekä kyberfysiset-järjestelmät. Näiden kaikkien tavoitteet ovat samat; tehostaa tuotantoa sekä parantaa työskentely-ympäristöä. Ongelmat näissä liittyvät järjestelmän turvallisuuteen, laitteiden väliseen konnektiviteettiin sekä arkkitehtuurien valintaan. Erilaisten teollisuuden alojen vuoksi ei ole olemassa yhtä arkkitehtuuria, joka sopisi jokaiseen käyttötapaukseen. Erilaisten järjestelmien yhteensopivuus voitaisiin ratkaista käyttämällä kontekstittöistä tietojenkäsittelyä.

Laitteiden välistä konnektiviteettiä tutkittiin tarkastelemalla jo käytössä olevia verkkoja, sekä tarkastelemalla 5. generaation matkapuhelinverkkojen tavoitteita. Konnektiviteetti menetelmät jaettiin tässä työssä kahteen pääkategoriaan; langallisiin ja langattomiin menetelmiin.

Langallisilla verkoilla voidaan saavuttaa suuret datanopeudet, sekä alhaiset latenssit käyttämällä reaaliaikaisia, ethernetiin pohjautuvia protokollia. Työssä tarkasteltiin EtherNet/IP, PROFINET sekä EtherCAT teknologioiden soveltuvuutta teollisuuden sovelluksiin. Langallisten menetelmien ongelmana on niiden työläs ja kallis laajennettavuus.

Langattomat menetelmät jaettiin kahden eri ominaisuuden perusteella; tehon kulutuksen ja verkon kantaman perusteella. Monet teollisen internetin sovellukset vaativat alhaista tehon kulutusta, joten tarkempaan tarkasteluun otettiin yksi lyhyen kantaman teknologia ja yksi pitkän kantaman teknologia alhaisen kulutuksen kategoriasta. Lyhyen kantaman verkoista tarkasteltiin ZigBee-verkkojen ominaisuuksia ja mahdollisia käyttökohteita. Pitkän kantaman teknologioista valittiin tarkasteluun LoRaWAN-verkot ja tarkasteltiin niiden

ominaisuuksia, sekä käyttökohteita.

Lopuksi pohdittiin teollisen internetin vaikutusta kaivosteollisuuden näkökulmasta. Kaivosten vaaralliset ja vaikeat olosuhteet luovat suuren kysynnän IIoT-sovelluksille. Niillä voidaan merkittävästi parantaa kaivoksen turvallisuutta, sekä tehostaa toimintaa. Kappaleessa 4 tutustuttiin myös kaivoksen mahdolliseen verkkoarkkitehtuuriin ja verkkoteknologioiden valintaan.

Työ luo yleiskatsauksen teollisen internetin nykytilaan ja sen mahdollisuuksiin ja siitä seuraaviin ongelmiin. Viime vuosien aikana teollinen internet on ottanut harppauksia eteenpäin ja 5G-tekniikan kehittyminen tulee kiihdyttämään teollisen internetin kehitystä ja yleisyyttä entisestään.

LÄHTEET

- [1] Ericsson. Ericsson Mobility Report (2020). viitattu 26.2.2021. URL: <https://www.ericsson.com/4adc87/assets/local/mobility-report/documents/2020/november-2020-ericsson-mobility-report.pdf>.
- [2] Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U. ja Gidlund, M. Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions. eng. *IEEE transactions on industrial informatics* 14.11 (2018), s. 4724–4734. ISSN: 1551-3203.
- [3] Lähteenmäki. Tampereelle tuli maanalainen superverkko – Tältä näyttää, kun automaattiset kaivoskoneet nauttivat Nokian, Telian ja Sandvikin 5g:stä: "Oikeasti maailman etunenässä" (2021). viitattu 26.2.2021. URL: <https://www.talouselama.fi/uutiset/tampereelle-tuli-maanalainen-superverkko-talta-nayttaa-kun-automaattiset-kaivoskoneet-nauttivat-nokian-telian-ja-sandvikin-5gsta-oikeasti-maailman-etunenassa/fd23f3d4-56af-403d-be18-259b07824584>.
- [4] Collin, J. *Teollinen internet*. fin. Helsinki: Talentum, 2016 - 2016. ISBN: 978-952-14-2851-7.
- [5] Evans, P. C. ja Annuziata, M. Industrial Internet: Pushing the boundaries of minds and machines (2012), s. 3.
- [6] Akerberg, J., Gidlund, M. ja Bjorkman, M. Future research challenges in wireless sensor and actuator networks targeting industrial automation. eng. *2011 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics*. IEEE, 2011, s. 410–415. ISBN: 1457704358.
- [7] Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T. ja Hoffmann, M. Industry 4.0. eng. *Business information systems engineering* 6.4 (2014), s. 239–242. ISSN: 1867-0202.
- [8] Hasenkamp, U., Hasenkamp, U., Stahlknecht, P. ja Stahlknecht, P. Wirtschaftsinformatik – Evolution of the Discipline as Reflected by Its Journal. eng. *Business information systems engineering* 1.1 (2009), s. 14–24. ISSN: 1867-0202.
- [9] *Smart cyber physical systems : advances, challenges and opportunities*. eng. Boca Raton, FL, 2021.
- [10] Schilit, B. ja Theimer, M. Disseminating active map information to mobile hosts. eng. *IEEE network* 8.5 (1994), s. 22–32. ISSN: 0890-8044.
- [11] Dey, A. K. Understanding and Using Context. eng. *Personal and ubiquitous computing* 5.1 (2001), s. 4–7. ISSN: 1617-4909.
- [12] Emad-ul-Haq, Q., Aboalsamh, H., Belghith, A., Hussain, M., Abdul, W., Dahshan, M. H. ja Ghouzali, S. Challenges and solutions for internet of things driven by IPv6.

- eng. *KSI transactions on Internet and information systems* 9.12 (2015), s. 4739–4758. ISSN: 1976-7277.
- [13] Scanzio, S., Wisniewski, L. ja Gaj, P. Heterogeneous and dependable networks in industry – A survey. eng. *Computers in industry* 125 (2021), s. 103388–. ISSN: 0166-3615.
- [14] *OPC UA Online Reference*. standard. [viitattu 8.4.2021]. OPC Foundation, 2021. URL: <https://reference.opcfoundation.org/v104/>.
- [15] Pfrommer, J., Ebner, A., Ravikumar, S. ja Karunakaran, B. Open Source OPC UA PubSub Over TSN for Realtime Industrial Communication. eng. *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Vol. 1. IEEE, 2018, s. 1087–1090. ISBN: 1538671085.
- [16] Industrial network market shares 2020 according to HMS Networks (2020). viitattu 9.4.2021. URL: <https://www.hms-networks.com/news-and-insights/news-from-hms/2020/05/29/industrial-network-market-shares-2020-according-to-hms-networks>.
- [17] Kalappa, N., Acton, K., Antolovic, M., Mantri, S., Parrott, J., Luntz, J., Moyne, J. ja Tilbury, D. Experimental Determination of Real Time Peer to Peer Communication Characteristics of EtherNet/IP. eng. *2006 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. IEEE, 2006, s. 1061–1064. ISBN: 9780780397583.
- [18] Zurawski, R. *Industrial Communication Technology Handbook, 2nd Edition*. eng. 2. painos. CRC Press, 2017. ISBN: 9781138071810.
- [19] PROFINET Technology and Application - System Description (2018). viitattu 10.4.2021. URL: <https://www.profibus.com/download/profinet-technology-and-application-system-description>.
- [20] EtherCAT - the Ethernet Fieldbus (2020). viitattu 10.4.2021. URL: https://www.ethercat.org/download/documents/ETG_Brochure_EN.pdf.
- [21] Wu, X. ja Xie, L. Performance evaluation of industrial Ethernet protocols for networked control application. eng. *Control engineering practice* 84 (2019), s. 208–217. ISSN: 0967-0661.
- [22] Cena, G., Valenzano, A. ja Vitturi, S. Hybrid wired/wireless networks for real-time communications. eng. *IEEE industrial electronics magazine* 2.1 (2008), s. 8–20. ISSN: 1932-4529.
- [23] Wang, W., Capitaneanu, S. L., Marinca, D. ja Lohan, E.-S. *Comparative Analysis of Channel Models for Industrial IoT Wireless Communication*. eng. Tampere University, 2019-07-08.
- [24] *ZigBee Specification*. standard. [viitattu 11.4.2021]. ZigBee Alliance, 2015. URL: <https://zigbeealliance.org/>.
- [25] Farahani, S. *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. eng. 1. painos. Burlington, Mass: Newnes, 2011. ISBN: 9780750683937.

- [26] What is LoRaWAN (2015). [viitattu 11.4.2021]. URL: https://loro-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/.
- [27] 5G-ACIA. 5G for Connected Industries and Automation (2019).
- [28] Markova, E., Moltchanov, D., Pirmagomedov, R., Ivanova, D., Koucheryavy, Y. ja Samouylov, K. *Priority-based Coexistence of eMBB and URLLC Traffic in Industrial 5G NR Deployments*. eng. Tampere University, 2020-10.
- [29] *Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*. report. [viitattu 11.4.2021]. International Telecommunication Union, 2017. URL: <https://www.itu.int/>.
- [30] *Number and rate of occupational mining fatalities by year, 1983 - 2019*. URL: <https://www.msha.gov/>.
- [31] Feng, X. ja Qian, J. Architecture of Wireless Multimedia Mesh Network Nodes for Longwall Coal Mine Automation. eng. *2010 Third International Conference on Information and Computing*. Vol. 2. IEEE, 2010, s. 42–45. ISBN: 9781424470815.
- [32] McNinch, M., Parks, D., Jacksha, R. ja Miller, A. Leveraging IIoT to Improve Machine Safety in the Mining Industry. eng. *Mining, metallurgy exploration* 36.4 (2019), s. 675–681. ISSN: 2524-3462.
- [33] Henriques, V. ja Malekian, R. Mine Safety System Using Wireless Sensor Network. eng. *IEEE access* 4 (2016), s. 3511–3521. ISSN: 2169-3536.
- [34] Monk, A. How IIoT Is Changing Mining. eng. *Industry Week* (2018). ISSN: 0039-0895.
- [35] Ericsson. The next generation of mining (2018). viitattu 24.4.2021. URL: <https://www.ericsson.com/>.
- [36] Zhou, C., Damiano, N., Whisner, B. ja Reyes, M. Industrial Internet of Things: (IIoT) applications in underground coal mines. eng. *Mining engineering* 69.12 (2017), s. 50–56. ISSN: 0026-5187.
- [37] Zhou, C., Plass, T., Jacksha, R. ja Waynert, J. A. RF Propagation in Mines and Tunnels: Extensive measurements for vertically, horizontally, and cross-polarized signals in mines and tunnels. eng. *IEEE antennas propagation magazine* 57.4 (2015), s. 88–102. ISSN: 1045-9243.