

Selvitys ICT-alan nousevien teknologioiden vaikutuksista ympäristön- ja ilmastonmuutokseen

Selvitys

Deloitte

Tiivistelmä

Tässä selvityksessä arvioitiin nousevien tieto- ja viestintäteknologia-alan (ICT-alan) teknologioiden aihealueiden ilmasto- ja ympäristövaikutuksia. Selvityksen tavoitteena oli kunkin aihealueen osalta tunnistaa ilmaston- ja ympäristönmuutoksen näkökulmasta merkittäviä teknologioiden sovelluskohteita, tarkastella teknologioiden ilmaston- ja ympäristönmuutosta hillitseviä ja kiihdyttäviä vaikutuksia vuonna 2020 ja 2035, sekä esittää mahdollisia keinoja negatiivisten vaikutusten hillitsemiseksi. Tavoitteena oli myös soveltuvin osin huomioida arvioissa Suomea koskevia vaikutuksia. Selvitys oli osa liikenne- ja viestintäministeriön toteuttamaa ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategian valmistelua.

Selvityksen kohteena oli viisi nousevien ICT-teknologioiden aihealuetta: 1) tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen, 2) lohkoketjut, 3) robotiikka ja autonomiset järjestelmät, 4) kvanttiteknologia ja 5) lisätty ja virtuaalinen todellisuus. Selvityksen toteutustapana oli ICT-alan teknologioiden ilmasto- ja ympäristövaikutusten käsite- ja arviointiviitekehyksen muodostaminen, kirjallisuuskatsaus ja asiantuntija-haastattelut sekä arvioinnin suorittaminen.

Ilmasto- ja ympäristövaikutusten muodostumisessa ICT-alalla yleisesti tunnistettiin viisi komponenttia: 1) elektroniikan tuotanto: raaka-aineiden louhinta; komponenttien tuotanto; elektroniikan rakentaminen, 2) tukiteknologiat: nopea internet (valokuitu ja 5G); pilvipalvelut; esineiden internet, 3) teknologian käyttö: teknologioiden sovelluskohteet, 4) käyttäytymisen ja toiminnan muutokset: toiminta lisääntyy; toiminta vähenee; uusia toimintamalleja syntyy, 5) elinkaaren loppu: uusiokäyttö; kierrätys; kaatopaikka; jätteenpolttu.

Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen -aihealueen tunnistetut sovellusalat ovat älykkäät rakennukset; älykäs sähköverkko; älykäs kiertotalous; ennustaminen ja havainnointi; yksilöiden käyttäytymisen ohjaus; ja älykkäät tuotantojärjestelmät ja prosessit. Lohkoketjut-aihealueen tunnistetut sovellusalat ovat vertaiskaupankäynti; arvoketjujen läpinäkyvyyden hallinta; rahoitusratkaisut; ja kannustinjärjestelmät. Robotiikka ja autonomiset järjestelmät -aihealueen tunnistetut sovellusalat ovat liikenne ja logistiikka; autonomiset tuotantojärjestelmät; havainnointi, arviointi ja korjaus; ja hiilen talteenotto ja -varastointi. Kvanttiteknologia-aihealueen tunnistetut sovellusalat ovat läpimurrot hiili-intensiivisissä prosesseissa; ennustaminen, suunnittelu ja päätöksenteko; ja uudet materiaalit. Virtuaalinen ja lisätty todellisuus -aihealueen teknologioiden tarkastellut sovellusalat ovat viestintä; suunnittelutyön mullistaminen; etäkoulutus, -työ ja -asiointi; ja viihde ja vapaa-aika.

Lyhyellä aikajänteellä etenkin tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen -aihealueen, sekä robotiikka ja autonomiset järjestelmät -aihealueen soveltamisen arvioidaan merkittävästi edistävän kestävä kehityksen siirtymää lisäämällä energiatehokkuutta yhteiskunnan eri osa-alueilla, optimoimalla prosesseja ja toimintoja sekä luomalla yhä tarkempia matemaattisia ennusteita. Lisäksi näiden teknologioiden soveltaminen voi edistää globaalisti energiajärjestelmien digitalisaatiota ja tehokkuutta. Virtuaalinen ja lisätty todellisuus -aihealueen sovellusalojen vaikutuksia on haastavinta todentaa, sillä vaikutusten aikaansaaminen vaatii pääasiallisesti sovelluskohteesta johtuvaa toiminnan ja käytöksen muutosta, mutta aihealueen teknologioiden merkittävyys voi kasvaa huomattavasti vuoteen 2035 mennessä. Lohkoketju- ja kvanttiteknologia ovat selvityksessä tarkastelluista teknologioista vähiten kehittyneitä. Lohkoketjuteknologian merkittävyys on vielä melko kiistanalainen, etenkin ilmaston- ja ympäristön näkökulmasta, mutta mikäli kvanttiteknologian mahdollistaman kvanttietokoneen kehittämisessä edetään seuraavina vuosina suunnitellusti, voi se mullistaa koko ICT-alan energiankäytön vuoteen 2035 mennessä.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

1	Selvityksen tausta ja tavoitteet	4
2	Selvityksen toteutustapa	5
2.1	Käsiteviitekehys ja arviointiviitekehys	5
2.2	Kirjallisuuskatsaus	8
2.3	Asiantuntijahaastattelut	8
3	Tarkasteltavat ICT-teknologioiden aihealueet	10
3.1	Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen	10
3.2	Lohkoketjut	11
3.3	Robotiikka ja autonomiset järjestelmät	12
3.4	Kvanttitekniikka	13
3.5	Lisätty ja virtuaalinen todellisuus	13
4	Ilmasto- ja ympäristövaikutusten muodostuminen	15
4.1	Elektroniikan tuotanto	16
4.2	Tukitekniikat	17
4.3	Tekniikan käyttö	18
4.4	Käyttämisen ja toiminnan muutokset	18
4.5	Elinkaaren loppu	18
5	Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen	20
5.1	Älykkäät rakennukset	21
5.2	Älykäs sähköverkko	21
5.3	Älykäs kiertotalous	22
5.4	Ennustaminen ja havainnointi	23
5.5	Yksilöiden käyttämiseen vaikuttaminen	24
5.6	Älykkäät tuotantojärjestelmät ja -prosessit	24
5.7	Yhteenveto vaikutuksista	25
6	Lohkoketjut	27
6.1	Vertaiskaupankäynti	28
6.2	Arvoketjujen läpinäkyvyyden hallinta	28
6.3	Rahoitusratkaisut	29
6.4	Kannustinjärjestelmät	29
6.5	Yhteenveto vaikutuksista	30
7	Robotiikka ja autonomiset järjestelmät	32
7.1	Liikenne ja logistiikka	32
7.2	Autonomiset tuotantojärjestelmät ja -prosessit	33

7.3	Havainnointi, arviointi ja korjaus.....	34
7.4	Hiilen talteenotto ja varastointi	35
7.5	Yhteenveto vaikutuksista	35
8	Kvanttitekniologia	37
8.1	Läpimurrot hiili-intensiivisissä prosesseissa.....	38
8.2	Ennustaminen, suunnittelu ja päätöksenteko	38
8.3	Uudet materiaalit.....	38
8.4	Yhteenveto vaikutuksista	39
9	Lisätty ja virtuaalinen todellisuus.....	41
9.1	Viestintä.....	42
9.2	Suunnittelutyön mullistaminen.....	42
9.3	Etäkoulutus, -työ ja -asiointi	42
9.4	Viihde ja vapaa-aika.....	43
9.5	Yhteenveto vaikutuksista	43
10	Negatiivisten ympäristö- ja ilmastovaikutusten hillitseminen	45
10.1	Elektroniikan tuotanto ja elinkaaren loppu	45
10.2	Teknologian käyttö ja tukiteknologiat	46
10.3	Käyttäytymisen ja toiminnan muutokset	47
11	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	48
12	Lähteet	51

1 Selvityksen tausta ja tavoitteet

Suomen hallitusohjelmassa on linjattu, että hallituksen tavoitteena on hiilineutraali Suomi vuoteen 2035 mennessä. Liikenne- ja viestintäministeriö on perustanut 1.11.2019 työryhmän tieto- ja viestintäteknologia-alan (ICT-ala) ilmasto- ja ympäristöstrategian valmisteleminen. Työn tarkoituksena on muodostaa yhteinen käsitys ICT-alan ilmasto- ja ympäristövaikutuksista Suomessa sekä ehdottaa toimia negatiivisten ilmasto- ja ympäristövaikutusten vähentämiseksi. Ryhmä myös arvioi ICT-alan roolia Suomen ilmasto- ja ympäristötavoitteiden saavuttamisessa. Ryhmä antaa väliraportin kesällä 2020 ja toimenpide-ehdotuksia sisältävän loppuraportin marraskuussa 2020.

Edellä mainittua strategiatyötä tukemaan Liikenne- ja viestintävirasto Traficom teetti ICT-alan nousevien teknologioiden ilmasto- ja ympäristövaikutuksia koskevan selvityksen. Selvityksen tavoitteena oli arvioida yksilöityjen nousevien ICT-alan teknologioiden ilmasto- ja ympäristövaikutuksia vuonna 2020 ja 2035. Tavoitteena oli myös soveltuvien osin huomioida arvioissa Suomea koskevia vaikutuksia silloin, kun esimerkiksi maantieteellisistä tai taloudellisista syistä sovellusten vaikutusten voidaan arvioida poikkeavan alueellisesti toisistaan.

Selvityksen kohteena oli viisi nousevien ICT-teknologioiden aihealuetta:

1. tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen
2. lohkoketjut
3. robotiikka ja autonomiset järjestelmät
4. kvanttiteknologia
5. lisätty ja virtuaalinen todellisuus.

Selvityksen tavoitteena oli kunkin aihealueen osalta tunnistaa ilmaston- ja ympäristönmuutoksen näkökulmasta merkittäviä teknologioiden sovelluskohteita, tarkastella teknologioiden ilmaston- ja ympäristönmuutosta hillitseviä ja kiihdyttäviä vaikutuksia vuonna 2020 ja 2035, sekä esittää mahdollisia keinoja negatiivisten vaikutusten hillitsemiseksi.

ICT-alan teknologioiden ilmasto- ja ympäristövaikutusten selvityksen avulla pystytään paremmin ymmärtämään teknologioiden ja ilmaston- ja ympäristönmuutoksen liittymäkohtia niin globaalissa kuin myös Suomen kontekstissa. Tämä edistää ICT-alan päätöksenteon kestävyttä ja edesauttaa teknologioiden valjastamista positiivisten vaikutusten maksimoimiseksi ja negatiivisten vaikutusten minimoimiseksi.

2 Selvityksen toteutustapa

Tässä luvussa kuvataan selvityksen toteutustapa ja metodologia.

Traficom hankki selvityksen toimeksiantona ulkopuoliselta asiantuntijataholta. Selvityksen suunnitteli ja toteutti Deloitte maaliskuu-toukokuussa 2020. Selvityksen toteutus jakautui kolmeen päävaiheeseen: arviointiviitekehityksen suunnitteluun, kirjallisuuskatsaukseen ja asiantuntijahaastatteluihin.

2.1 Käsiteviitekehys ja arviointiviitekehys

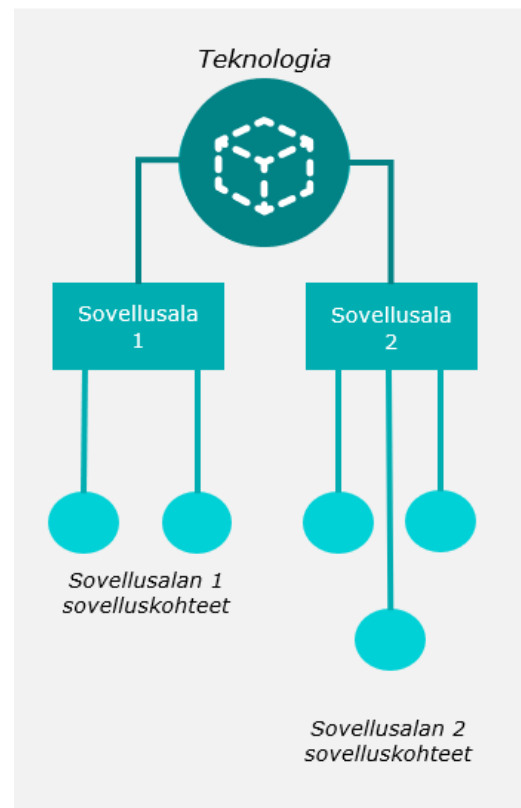
ICT-teknologioiden ilmasto- ja ympäristövaikutusten muodostumisen mallintamista ja systemaattista arviointia varten selvitystyö aloitettiin selvitysmetodologian hahmottamisella ja rakentamisella. Selvityksen tarkastelutasoiksi määriteltiin seuraavat osa-alueet:

- Teknologia-taso: Selvitykseen valittu aihealue, joka koostuu yhdestä tai useammasta ICT-teknologiasta.
- Sovellusala-taso: Ne yhteiskunnan toiminnan osa-alueet, joilla teknologiaa voidaan mahdollisesti hyödyntää.
- Sovelluskohde-taso: Tasmällinen teknologian käyttökohde, jolla teknologiaa on tutkitusti hyödynnetty tai se on tutkitusti hyödynnettävissä.

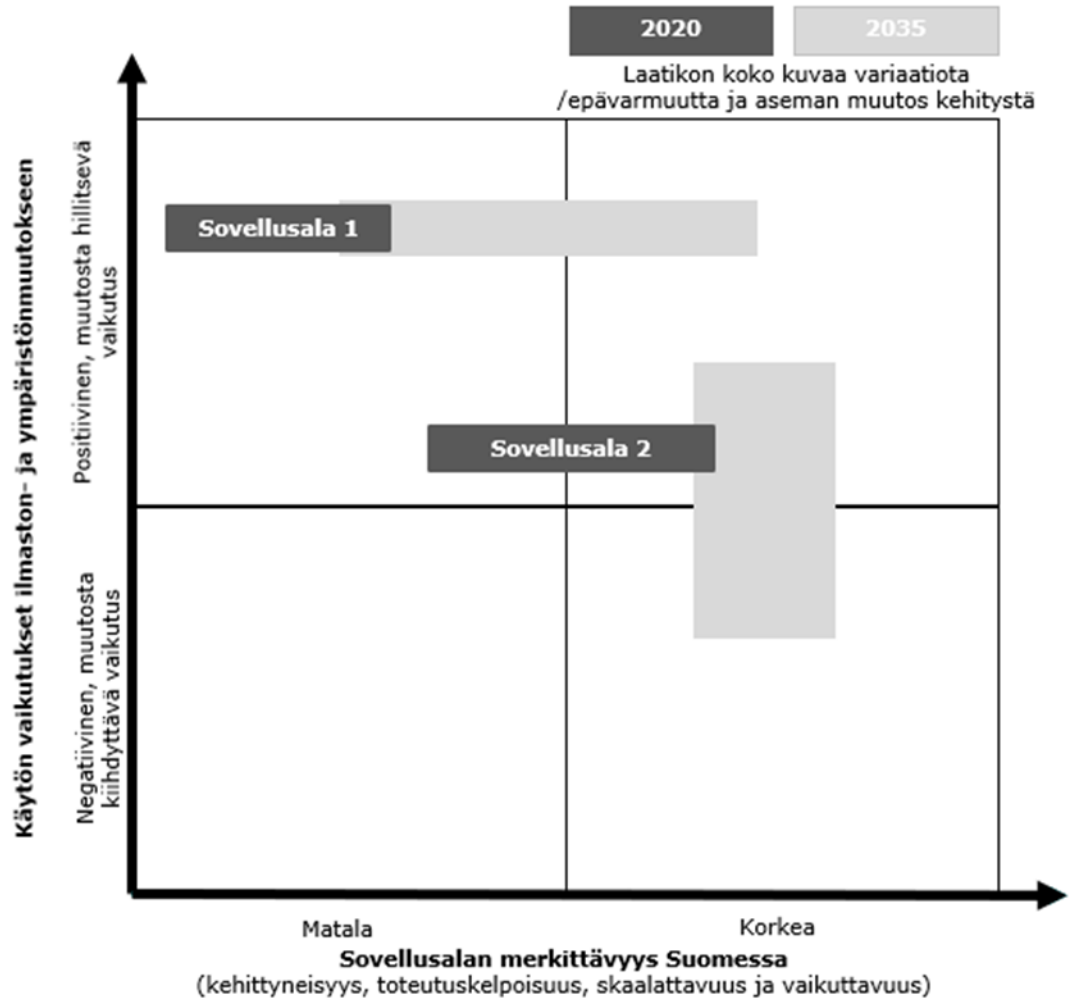
Ymmärrys aihealueiden teknologioiden sovellusaloista rakennettiin sovelluskohteiden kautta. Kaikilla sovelluskohteilla on suoria ja epäsuoria vaikutuksia ilmastoon ja/tai ympäristöön. Tässä selvityksessä on keskitytty niihin sovelluskohteisiin, joilla on selvityksen perusteella arvioitu olevan merkittävä kiihdyttävä tai hillitsevä vaikutus ilmastoon- ja ympäristömuutokseen. Sovelluskohteen tuli täyttää jompikumpi alla olevista kriteereistä, jotta se tunnistettiin merkittäväksi:

1. Sovelluskohteella on potentiaalisesti positiivinen vaikutus ilmastoon- ja/tai ympäristöön siten, että sovelluskohde vähentää ilmastoon- ja/tai ympäristömuutoksen negatiivisia vaikutuksia; tai edistää ilmastoon- ja ympäristön kannalta kestävän kehityksen siirtymää.
2. Sovelluskohteella on potentiaalisesti negatiivinen vaikutus ilmastoon ja/tai ympäristöön siten, että sovelluskohde lisää ilmastoon- ja/tai ympäristömuutoksen negatiivisia vaikutuksia; tai sovelluskohde tukee nykyistä fossiilitaloutta ja täten hidastaa ilmastoon ja ympäristön kannalta kestävän kehityksen siirtymää.

Tunnistetut sovelluskohteet arvioitiin ilmasto- ja ympäristövaikutusten näkökulmasta tätä varten muodostetulla viitekehityksellä (taulukko 1). Lisäksi arvioitiin sovelluskohteiden merkittävyyttä Suomelle vuosina 2020 ja 2035 tätä varten muodostetun viitekehityksen avulla (taulukko 2). Tämän jälkeen sovelluskohteista muodostettiin laajempia kokonaisuuksia eli sovellusaloja. Arvioinnin tuloksena kunkin ICT-teknologian aihealueen osalta on esitetty ilmasto- ja ympäristövaikutusten näkökulmasta tärkeimmät tunnistetut sovellusalat, sekä niiden arvioitu merkittävyys Suomelle nyt ja vuonna 2035. Esimerkki kuvaajasta on esitetty kuvassa 2.



Kuva 1 Käsiteviitekehys tarkastelun eri tasoista



Kuva 2 Havainnollistava esimerkki, miten löydökset teknologioiden ilmasto- ja ympäristövaikutuksista sekä niiden merkittävyydestä kuvataan selvityksessä aihealueittain. Kuvaajan pystyakselilla tarkastellaan aihealueen teknologioiden suoria vaikutuksia ilmastoon- ja ympäristömuutokseen ja vaaka-akselilla sovelluskohteen merkittävyyttä Suomen näkökulmasta. Kuvaajassa on esitetty lisäksi tarkasteluhorisontit 2020 ja 2035. Kuvaajassa laatikon koko kuvaa variaatiota/epävarmuutta ja laatikon aseman muutos kehitystä.

Taulukko 1 Ilmasto- ja ympäristövaikutusten arviointiviitekehys

	Tarkasteltava vaikutus	Esimerkkejä vaikutuksen arviointiperusteista
Vaikutukset ilmastonmuutokseen	Päästöt ilmaan	- Suorat ja epäsuorat päästöt ilmaan - Päästövähennykset/päästöjen liisäntyminen muilla aloilla
	Energian käyttö	- Teknologian valmistamisen ja käytön energiavaatimus - Sovelluskohteesta johtuvat energiankäytön muutokset muilla aloilla
	Hiilivarastot ja -nielut	Suora ja epäsuora vaikutus hiilivarastoihin- ja nieluihin
	Sähköistyminen/kestävän kehityksen siirtymä	- Vaikutus yhteiskunnan sähköistymiseen - Vaikutus tuotantotapoihin ja kulkuskäyttäytymiseen
Vaikutukset ympäristömuutokseen	Maankäyttö	Maankäytön muutokset
	Vedenkäyttö	Vedenkäytön muutokset
	Materiaalien käyttö ja jätteet	- Käytettyjen materiaalien koko elinkaaren ympäristövaikutus - Vaikutus kiertotalouteen
	Päästöt maahan ja vesistöön	Suorat päästöt maahan ja vesistöön
	Luonnon monimuotoisuus	Luonnon monimuotoisuuden muutokset
	Ekosysteemit	Vaikutus ekosysteemeihin maalla ja merellä

Taulukko 2 Sovelluskohteen tai -alan merkittävyys Suomen näkökulmasta – arviointiviitekehys

	Tarkasteltava näkökulma	Esimerkkejä arviointiperusteista
Merkittävyys Suomen näkökulmasta	Kehittyneisyys	Teknologian kehittyneisyys ja käyttö Suomessa
	Toteuttamiskelpoisuus	- Olennaisuus suomalaisten toimialojen kannalta - Säännöstenmukaisuus
	Skaalattavuus	- Skaalattavuus muille maantieteellisille alueille - Skaalattavuus muille toiminta-alueille
	Yhteiskunnallinen vaikuttavuus	Vaikutus Suomen ilmasto- ja ympäristötavoitteisiin

2.2 Kirjallisuuskatsaus

Selvityksen tiedonhankintaa varten toteutettiin kirjallisuuskatsaus. Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena oli kerätä tietoa ICT-alan ja etenkin selvitykseen valikoitujen ICT-alan teknologioiden aihealueiden ympäristö- ja ilmastovaikutuksista, sekä tunnistaa näiden teknologioiden mahdollisia ympäristön- ja ilmastomuutoksen kannalta merkittäviä sovelluskohteita.

Selvitystä varten tunnistettiin ja käytiin läpi useita kestäväään digitalisaation liittyviä tutkimuksia, raportteja tai selvityksiä. Kirjallisuuskatsauksessa painotettiin alan keskeistä kirjallisuutta ja metatutkimuksia kansainvälisiltä organisaatioilta kuten Kansainvälinen energiajärjestö sekä Kansainvälinen televiestintäliitto.

Ne kirjallisuuskatsauksen lähteet, jotka olivat erityisen olennaisia sovellusalojen ja sovelluskohteiden tunnistamisessa on listattu taulukossa 3. Täydellinen lähde-luettelo löytyy selvityksen luvusta Lähteet.

Taulukko 3 Sovelluskohteiden ja -alojen tunnistuksessa käytetyt olennaisimmat tietolähteet

Tekijä	Julkaisu	Vuosi
Global e-Sustainability Initiative (GeSI) & Deloitte	Digital with Purpose – Delivering a SMARTer 2030	2019
Kansainvälinen televiestintäliitto (ITU)	Turning digital technology innovation into climate action	2019
Kansainvälinen energiajärjestö (IEA)	Digitalization and Energy	2017
Machine Learning Community	Tackling climate change with machine learning	2019
Boston Consulting Group	A Quantum Advantage in Fighting Climate Change	2020
Kansainvälinen televiestintäliitto (ITU)	Frontier technologies to protect the environment and tackle climate change	2020

2.3 Asiantuntijahaastattelut

Selvitystä varten haastateltiin asiantuntijoita, jotka työssään käsittelevät digitalisaatiota ja erityisesti selvityksessä tarkasteltavia nousevia ICT-teknologioita, ja/tai digitalisaation ja teknologian suhdetta kestäväään kehitykseen. Asiantuntijahaastattelujen tarkoituksena oli saada lisätietoa selvityksessä tarkastelluista aihe-alueista ja niiden tilasta Suomessa, tunnistaa uusia sovelluskohteita ja niiden mahdollisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia, sekä saada arvioita sovellusalojen ja -kohteiden merkittävyydestä Suomelle. Haastattelut toteutettiin puolistrukturoituina teemahaastatteluina.

Alustava asiantuntijalista muodostettiin Deloitte ja Liikenne- ja viestintävirasto Traficomin yhteistyönä. Lisäksi asiantuntijoita tunnistettiin lisää alkuperäisten haastateltavien suositusten perusteella.

Taulukko 4 Selvitystä varten haastatellut asiantuntijat

Haastateltava(t)	Asiantuntijatausta
Jukka Manner	Aalto-yliopisto - professori, verkkoteknologiat
Teuvo Uusitalo	Teknologian tutkimuskeskus VTT – erikoistutkija, digitalisaatio ja kiertotalous
Matti Pärssinen	Aalto-yliopisto - vieraileva tutkija, kestävä ICT ja koneoppiminen
Kari Hiekkanen	Aalto-yliopisto – tutkija, tietotekniikan strateginen johtaminen
Jari Porras	Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto (LUT) – professori, tietotekniikka
Mikko Möttönen	Aalto-yliopisto – professori, kvanttilaskenta
Toni Ahlqvist	Turun yliopisto – tutkimusjohtaja, tulevaisuuden tutkimuskeskus
Lotta Toivonen	Sitra – asiantuntija, kestävä digitalisaatio
Janne Järvinen	Teknologian tutkimuskeskus VTT – Tutkimusalueen vetäjä, datapohjaiset ratkaisut
Rafi Addlestone ja Ian Rodger	Deloitte UK – johtaja ja johtava konsultti, kestävä digitalisaatio

3 Tarkasteltavat ICT-teknologioiden aihealueet

Tässä luvussa on kuvattu ja määritelty selvityksen kohteena olevat ICT-alan teknologioiden aihealueet.

Selvitykseen valittiin Liikenne- ja viestintävirasto Traficomin toimesta tarkasteltavaksi viisi ICT-alan teknologioiden aihealuetta, jotka esitellään tässä luvussa. Kukin aihealue voi pitää sisällään yhden tai useamman ICT-teknologian tai teknologian komponentteja (esim. tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen). Kutakin aihealuetta käsiteltiin arvioinnissa yhtenäisenä kokonaisuutena.

Yleisellä tasolla valittujen aihealueiden teknologioista voidaan todeta, että ne eivät ole sinänsä uusia, vaan lähes kaikkia teknologioita on määrittelystä riippuen kehitetty jo useiden vuosikymmenten ajan 1900-luvun puolivälistä lähtien. Keskeistä aihealueiden teknologioille kuitenkin on, että niihin liittyvä tutkimus- ja kehitystyö on kasvanut kiihtyvällä vauhdilla viime vuosikymmeninä ja niiden käytännölliset sovelluskohteet mm. teollisuudessa ja kuluttajakäytössä ovat kasvaneet ja arkipäiväistyneet merkittävästi – toisin sanoen teknologioiden voidaan luonnehtia siirtyneen kypsään vaiheeseen. Poikkeuksen tähän muodostaa kvanttitekniikka, joka on vielä tutkimus- ja kehitystasolla ja käytännöllisiä sovelluskohteita odotetaan aikaisintaan lähitulevaisuudessa.

Selvityksessä tarkasteltavia ICT-alan teknologioita pidetään osaltaan digitalisaation keskeisinä teknologioina. **Digitalisaatiolla** on lukuisia määritelmiä, mutta yleisesti sillä tarkoitetaan uusien digitaalisten ICT-teknologioiden yleistymistä ja hyödyntämistä arkielämän sekä organisaatioiden palveluiden ja toiminnan osana. Osa valituista teknologioista muuttakin yhteiskuntaa jo merkittäväällä tavalla ja muihinkin kohdistuu merkittäviä odotuksia.

3.1 Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen

Tekoäly (artificial intelligence, AI) on tietojenkäsittelytieteen osa-alue, joka painottuu sellaisten koneiden tai ohjelmien luontiin, joiden toimintaa voidaan pitää älykkäänä. Tekoäly mahdollistaa järjestelmät, jotka matkivat ihmismäistä ajattelua ja kykenevät joissakin tapauksissa myös päättelyyn ja oppimiseen. Tekoäly perustuu ennalta määrättyjen tehtävien suorittamiseen tekoälyn ohjelmoidun loogiikan perusteella – tällaista tekoälyä kutsutaan kapeaksi tekoälyksi. Yleinen tekoäly viittaa ohjelmistoihin tai koneisiin, jotka osaavat ratkaista minkä tahansa älyllisesti ratkaistavissa olevan ongelman. Yleistä tekoälyä ei ole kuitenkaan toistaiseksi kehitetty, vaan kaikki nykypäivän tekoälyt kuuluvat kapean tekoälyn piiriin.

Algoritmit (algorithm) ovat sääntöjä tai toimintamenetelmiä, joiden perusteella tekoäly toimii. Algoritmi on yksityiskohtainen toimintaohje siitä, miten jokin tehtävä tai prosessi suoritetaan. Algoritmit koostuvat järjestyksessä olevista yksiselitteisistä toiminnoista. Algoritmit ovat usein hyvin monimutkaisia ja pitkiä sekä sisältävät toistoa ja loogista päättelyä. Algoritmien avulla voidaan ohjata tekoäly ratkaisemaan jokin tietty tarkasti määritelty ongelma. Tyypillisiä eri algoritmityyppejä ovat hakualgoritmit, lajittelualgoritmit ja valinta-algoritmit.

Koneoppiminen (machine learning) on yksi tekoälyn keskeisistä osa-alueista. Koneoppimisen tarkoituksena on saada tekoäly toimimaan entistä paremmin käyttäjän toiminnan tai pohjatiedon perusteella. Koneoppimisessa tekoälylle ei tyypillisesti ole määritetty toimintamenetelmää eli algoritmia kaikkiin tilanteisiin, vaan tekoäly oppii itsenäisesti päättämään haluttuun lopputulokseen. Koneoppimisen päämuodot ovat ohjattu oppiminen (tekoälylle annetaan syöte sekä oikea ratkaisu opetusdatasta), ohjaamaton oppiminen (tekoäly ei saa valmiita oikeita vastauksia, vaan se päättää ne datassa olevien säännönmukaisuuksien perusteella) ja vahvistusoppiminen (tekoäly ei saa valmiina oikeita vastauksia, mutta sille annetaan palautetta siitä, kuinka onnistuneesti se toimii). Usein koneoppimisessa

sovelletaan useampaa eri oppimisen muotoa yhtäaikaaisesti. Koneoppimisen ero perinteiseen tekoälyyn on, että koneoppimisessa ei pyritä matkimaan ihmisen älykäästä käytöstä, vaan pyritään löytämään isosta data-aineistosta säännönmukaisuudet, joita ihminen ei löytäisi. Koneoppiminen pohjautuu vahvasti tilastotieteellisiin menetelmiin. Koneoppimisen piiriin luetaan myös syväoppiminen, joka on neuroverkkoihin perustuvaa oppimista ja jäljittelee karkealla tasolla ihmisaivojen tapaa oppia.

Tekoäly oppialana syntyi 1950-luvulla, mutta alkoi saada laajempaa suosiota vasta 1980-luvulta alkaen. Tekoälyn kehittäminen on kiihtynyt viime vuosikymmeninä erityisesti tietokoneiden laskentakapasiteetin kasvaessa ja tullessa yhä useampien saataville.

3.2 Lohkoketjut

Lohkoketju (blockchain) on teknologia, jonka avulla toisilleen tuntemattomat tahot voivat yhdessä tuottaa ja ylläpitää tietokantoja täysin hajautetusti. Lohkoketju toteutetaan teknisesti listana tai lokina transaktioista, joka jaetaan lohkoketjuun osallistujien kesken, jolloin transaktiot voi todentaa monesta lähteestä ja koostaa sen perusteella tietokannan. Lohkoketjussa on siis kyse hajautetusta ja läpinäkyvästä tietokannasta, jota mikään taho ei omista tai kontrolloi yksinään. Hajautuksen ansiosta lohkoketjussa olevaa tietoa on käytännössä mahdoton väärentää.

Lohkoketjussa jokaisen lohkon sisällöstä eli datasta lasketaan tiivistefunktiolla tiiviste. Funktio luo mistä tahansa datasta sekalaisen merkkijonon, ja toimii jokaisella käyttäjällä samalla tavalla eli tietystä datasta syntyy aina samanlainen merkkijono. Jokainen uusi lohko sisältää sitä edeltävän lohkon tiivisteen. Tästä johtuen yksikin muutos lohkon datassa muuttaa kaikkien seuraavien lohkojen tiivisteitä, minkä ansiosta lohkon tallennettua dataa on mahdoton muuttaa huo- maamatta jälkikäteen. Jotta lohkoketjun historiaa voisi muuttaa, pitäisi ensin luoda uudelleen sekä se lohko, johon muutos tulee sekä kaikki sen jälkeiset lohkot.

Lohkoketjun yhtenä keskeisenä hyötynä on, että sen ansiosta transaktioissa päästään eroon erilaisista kolmansista osapuolista puolueettomina varmistajina. Lohkoketjun ansiosta voidaan ylläpitää tietokantoja ilman tietokantoja hallinnoivia tahoja. Lisäksi jokaisella on pääsy katsomaan lohkoketjun sisältö ja jokainen transaktio tallentuu todistettavasti ja turvallisesti lohkoketjuun. Lohkoketjussa tieto on myös jäljitettävissä. Lohkoketjutekniikan ansiosta lohkoketjun jäsenet voivat luottaa toisiinsa, vaikka he eivät tuntisi toisiaan.

Lohkoketjuja voi olla kolmea eri tyyppiä: julkisia, yksityisiä ja konsortiolohkoketjuja. Julkisessa lohkoketjussa jokainen lohkoketjuun osallistuva tietokone tallentaa koko lohkoketjun ja varmistaa kaikki transaktiot. Yksityisessä lohkoketjussa jokin yksittäinen taho toimii välikätenä ja lähettää ja varmistaa kaikki transaktiot. Tämä lisää lohkoketjun suoritustehoa ja kustannustehokkuutta, mutta toisaalta samalla vähentää luottamusta julkiseen lohkoketjuun verrattuna. Yksityiset lohkoketjut soveltuvatkin parhaiten organisaatioiden sisäiseen käyttöön. Konsortiolohkoketju on osittain yksityinen lohkoketju. Konsortiolohkoketjussa ennalta määritellyille tahoille on annettu lupa osallistua transaktioiden varmentamiseen. Konsortiolohkoketju pyrkii yhdistämään julkisen ja yksityisen lohkoketjun parhaat puolet sen ollessa potentiaalisesti yhtä nopea kuin täysin yksityinen lohkoketju ilman, että lohkoketjun hallinto on keskittynyt yhdelle taholle.

Lohkoketjun ensimmäinen merkittävä käytännön sovellus tehtiin vuonna 2009 kryptovaluutta Bitcoinia varten. **Kryptovaluutat** (cryptocurrency) ovat kryptografiaan perustuvia digitaalisia virtuaalivaluuttoja, ja niitä on nykyisin olemassa yli 2000 kappalatta. Lohkoketjuteknologiaa verrataankin usein hajautettuun tilikirjaan ja sen juuret ovat maksamisessa. Kryptovaluuttoihin liittyy niiden ns.

louhinta. Louhinnan tekninen tarkoitus on taata kryptovaluutan transaktioiden pysyvyys ja luoda pysyvä tallenne niiden keskinäisestä järjestyksestä. Louhinta toteutetaan lohkoketjussa teknisesti määrittelemällä kelvollisen lohkon tiivisteelle tietyt ehdot, jolloin ainoa keino löytää kelvollinen lohko on luoda uusia lohkoja ja laskea niille tiivisteitä niin kauan, kunnes ehdot täyttävä lohko löytyy. Ehtoja säättämällä voidaan säätää lohkon löytämiseen tarvittavan laskennan määrää: tätä kutsutaan myös vaikeustasoksi. Lohkoketju säätää lohkoilta vaadittavaa vaikeustasoa aina määritellyin välein – toisin sanoen louhinnan vaikeusaste siis muuttuu louhijoiden yhteenlaskettujen tehojen määrän mukaan. Tämän vuoksi louhinta vaatii hyvin paljon laskentatehoa, minkä vuoksi onkin perustettu suuria määriä tietokoneita sisältäviä louhintafarmeja (vrt. konesali). Louhinta on kuitenkin suosittua, sillä louhimalla käyttäjät voivat ansaita virtuaalivaluutaa palkkiona louhimisesta. Louhintaa varten on perustettu myös pooleja, jossa virtuaalivaluutaa voi louhia kollektiivisesti. Louhinta ei kuitenkaan kaikissa tilanteissa ole enää mielekästä, sillä louhintaan käytetty sähkön kustannus saattaa ylittää louhinnasta saatavat tuotot.

3.3 Robottiikka ja autonomiset järjestelmät

Robottiikka (robotics) on oppiala robottien suunnittelemisesta, rakentamisesta ja käytöstä. **Roboteilla** tarkoitetaan autonomisesti eli osittain tai täysin itsenäisesti ilman ihmisen vuorovaikutusta toimivia laitteita ja koneita, jotka voivat suorittaa perinteisesti ihmisten suorittamia tehtäviä. **Autonomisella järjestelmällä** (autonomous system) viitataan vastaavalla tavalla toimiviin järjestelmiin ja ohjelmistoihin.

Robottiikan ja autonomisten järjestelmien keskeisiä sovellusalueita ovat esim. teollisuusrobotit, yhteistyörobotit, ohjelmistorobotit, liikenteen robotisointi ja kuluttajakäyttöön suunnatut robotit.

Robottiikan vanhin sovellusalue ovat **teollisuusrobotit** (industrial robots), joita alettiin kehittää jo 1960-luvulla ja jotka ovat olleet jo useita vuosikymmeniä laajasti teollisuuden käytössä. Teollisuusrobotti on tietokoneohjattu työkalupala tai työvälineitä käsittelevä yleiskäyttöinen kone, jonka liikkeitä voidaan tuottaa sähköisten, pneumaattisten tai hydraulisten toimilaitteiden avulla. Teollisuusrobotiikan uudempi sovellusalue ovat **yhteistyörobotit** (collaborative robots, cobots), joiden tarkoitus on työskennellä yhdessä ihmisen kanssa tuotannossa. Yhteistyörobotit on tyypillisesti suunniteltu paljon perinteisiä suuria teollisuusrobotteja heremmäksi ja pienemmiksi.

Ohjelmistorobotiikka (robotic process automation, RPA) on teknologia, jolla automatisoidaan tietotyön rutiiniprosesseja, jotka ovat tyypillisesti ihmisen suorittamia kuten manuaalista tiedon syöttämistä eri ohjelmistoihin. Ohjelmistorobotit käyttävät tietojärjestelmiä samalla tavalla kuin ihminen käyttäisi niitä. Ohjelmistorobotti voi perustua ennalta määriteltyyn standardoituun työnkulkuun tai tekoälyn avulla toteutettuun itseoppivaan ohjelmistoon. Ohjelmistorobotin konfiguroiminen on tyypillisesti huomattavasti helpompaa ja halvempaa verrattuna perinteiseen ohjelmistokehitykseen. Ohjelmistorobotiikkaa käytetään jo melko laajasti organisaatioissa.

Liikenteen robotiikka viittaa osittain tai kokonaan autonomisesti toimiviin liikennevälineisiin. Liikenteen robotiikan merkittävimpiä kehitysalueita ovat autonomiset autot ja laivat. Liikenteen robotiikkaan kuuluvaksi voidaan lukea myös droonit eli miehittämättömät ilma-alukset, joiden suosio on kasvanut viime vuosina merkittävästi sekä kuluttaja- että teollisuuskäytössä.

3.4 Kvanttiteknologia

Kvanttiteknologia (quantum technology) tarkoittaa kvanttimekaniikan ilmiöiden kuten superposition ja lomittumisen hallittua hyödyntämistä käytännöllisissä laitteissa, prosesseissa ja laskennassa.

Kvanttiteknologia mahdollistaa **kvanttietokoneiden** (quantum computer) ja **kvanttilaskennan** (quantum computing) kehittämisen. Kvanttietokone on vielä toistaiseksi kehitteillä oleva tietokone, joka hyödyntää kvanttimekaniikan ilmiöitä ja niiden erityisiä mahdollisuuksia. Kvanttietokoneella odotetaan voivan ratkaista tiettyjä laskennallisia ongelmia huomattavasti klassisia tietokoneita nopeammin.

Klassisessa tietokoneessa kaikki tieto ilmaistaan biteillä, joilla voi olla kaksi toisensa poissulkevaa tilaa: 1 tai 0. Klassinen tietokone perustuu transistoreihin, jotka ilmaisevat bitin tilan. Kvanttietokoneessa bittien tilalla ovat kubitit. Kubitina voi toimia mikä tahansa kvanttisysteemi, joka voi olla vain kahdessa eri tilassa – sekä lisäksi superpositiossa eli kahdessa eri tilassa yhtä aikaa. Kubittina voidaan käyttää esimerkiksi elektronia ja sen spiniä. Kvanttietokoneen klassista tietokonetta suurempi teho perustuu siihen, että sen muisti voi olla yhtä aikaa kaikissa mahdollisissa tavallisten bittien yhdistelmissä.

Kvanttietokoneiden kehitystyö eteni nopeasti 2010-luvun lopulla, ja kehitys jatkuu 2020-luvulla. Arviot kvanttietokoneiden saamisesta hyödylliseen käyttöön vaihtelevat: joidenkin arvioiden mukaan kvanttietokoneita voisi olla jo muutamien vuosien päästä ja toisten arvioiden mukaan vasta muutaman vuosikymmenen kuluttua. Ohjelmistoyhtiö Google ilmoitti vuonna 2019 saavuttaneensa ns. kvanttiheruuden, millä viitataan siihen, että kvanttietokone on suoriutunut laskentaoperaatiosta ylivoimaisesti nopeammin kuin klassinen tietokone. Googlen kvanttietokoneelta kesti 200 sekuntia lajitella joukko satunnaisia lukuja tavalla, johon tavalliselta supertietokoneelta olisi kestänyt 10 000 vuotta. Väitetä on tosin myös kritisoitu siitä, että vertailussa ei huomioitu kaikkein edistyneimpiä klassisia tietokoneita. Joka tapauksessa kvanttietokoneen kehittäminen on ottanut merkittäviä harppauksia aivan viime aikoina ja useat eri tutkimustahot ovat tehneet merkittäviä innovaatioita, jotka edistävät kvanttietokoneen kehittämistä.

Kvanttietokoneiden tavoitteena ei ole korvata klassisia tietokoneita, sillä kvanttietokoneet eivät sovellu kaikkeen laskentaan hyvin. Kvanttietokoneita kehitetään kuitenkin tiettyihin laskennallisiin tehtäviin, joissa on yksinkertainen vastaus, mutta läpikäytävänä valtava määrä mahdollisuuksia. Nämä laskennalliset tehtävät liittyvät tyypillisesti optimointiin ja simulointiin esim. materiaalfysiikkaan liittyen.

Käytännössä kvanttietokoneen käyttäminen ja hallitseminen on hyvin vaativaa, sillä lämpö ja laitteen sisäiset vuorovaikutukset vaikuttavat helposti laskentaan. Tämän vuoksi kvanttietokonetta esimerkiksi käytetään tyypillisesti lähellä absoluuttista nollapistettä. Kvanttietokoneiden rakentaminen on myös toistaiseksi hyvin kallista.

3.5 Lisätty ja virtuaalinen todellisuus

Lisätty todellisuus (augmented reality, AR) viittaa siihen, että tietokoneella tuotettua tietoa (esim. kuva, ääni, video, teksti, GPS-informaatio) lisätään näkymään todellisesta ympäristöstä. Lisätyn todellisuuden näyttöteknologiat voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: päässä pidettävä, kädessä pidettävä ja projisoitava. Päässä pidettävä näyttöteknologia jaetaan vielä kahteen tyyppiin: Optisissa näytöissä käyttäjä näkee todellisuuden läpinäkyvän pinnan läpi ja virtuaalinen informaatio liitetään tähän pintaan. Videonäytöissä todellisuus kuvataan päässä pidettävän kameran läpi ja tämä informaatio liitetään virtuaaliseen informaatioon ennen sen esittämistä käyttäjälle näytön kautta. Kädessä pidettävä näyttö voi olla esimerkiksi älypuhelin, jolloin laitteen näytöllä esitetään sen kameran kautta kuvattu ympäristö täydennettynä lisätyn todellisuuden informaatiolla. Projektionäytöt

voivat olla esimerkiksi kannettavia videoprojektoreja, joilla voidaan heijastaa informaatiota mille tahansa pinnalle.

Lisätyssä todellisuudessa tietokone analysoi eri sensoreista saatavan datan kuten GPS-paikkatietodatan, kameran visuaalisen datan sekä kompassin ja kiihtyvyyssantureiden datan ja käyttää sitä reaalisen näkymän ja virtuaalisten elementtien mahdollisimman täsmälliseen yhdistämiseen. Käyttäjä voi usein myös olla vuorovaikutuksessa lisätyn todellisuuden elementtien kanssa esimerkiksi kosketusnäyttöä koskettamalla.

Virtuaalitodellisuus (virtual reality, VR) on tietokonesimulaation tuottamien aistimusten avulla luotu keinotekoinen ympäristö. Virtuaalitodellisuus joko pyrkii simuloimaan todellista ympäristöä tai luomaan täysin kuvitteellisen ympäristön. Tyypillisesti virtuaalitodellisuuden ympäristöt perustuvat kolmiulotteiseen kuvatilaan, joka luodaan näytölle. Kuvatila voidaan pyrkiä tuottamaan katselijalle immersiiivisesti eli siten, että hän kokee olevansa kuvatilassa sisällä. Tällöin näyttönä käytetään tyypillisesti erityistä stereoskooppista katselulaitetta eli ns. virtuaalitodellisuuslaseja tai ns. cave-tilaa, jossa käytetään kolmea tai useampaa projisointipintaa, joiden välissä katselija voi liikkua ja jopa liikuttaa kuvassa olevia objekteja. Joissakin simulointiympäristöissä käytetään lisäksi muita aistiärsyksiä, kuten simuloitua kolmiulotteista äänimaailmaa tai tuntoaistiin perustuvia liikeärsyksiä.

Virtuaalitodellisuudella voidaan myös viitata virtuaalimaailmoihin, jotka ovat kaksi- tai kolmiulotteisella grafiikalla luotuja tietokonesimulaatioita. Käyttäjä voi luoda itseään edustavan simuloitun ja usein ihmisenkaltaisen hahmon (avatar), jonka avulla hän voi tutkia virtuaalimaailmaa. Monen käyttäjän virtuaalimaailmoissa käyttäjät ovat aktiivisessa vuorovaikutuksessa toistensa kanssa ja muovaavat toistensa kokemaa virtuaalitodellisuutta.

Virtuaalitodellisuudeksi voidaan lukea myös sovellukset, joissa käyttäjä voi katella simuloituja panoraamakuvia ja ohjata niitä horisontaalisesti 360 asteen kiertomahdollisuudella sekä (rajoitetusti) vertikaalisesti. Samoin virtuaalitodellisuutena voidaan pitää myös virtuaalisia koulutusympäristöjä ja simulaattoreita, joissa simuloidaan tarkasti esimerkiksi liikennevälineiden tai koneiden toimintaa.

Lisätty ja virtuaalinen todellisuus liittyvät laajempaan **tehostetun (sekoitetun) todellisuuden** (mixed reality) käsitteeseen, joka voidaan nähdä liukuvana jatkumona kevyesti lisätystä todellisuudesta kohti täydellisempää immersiota virtuaalitodellisuuteen.

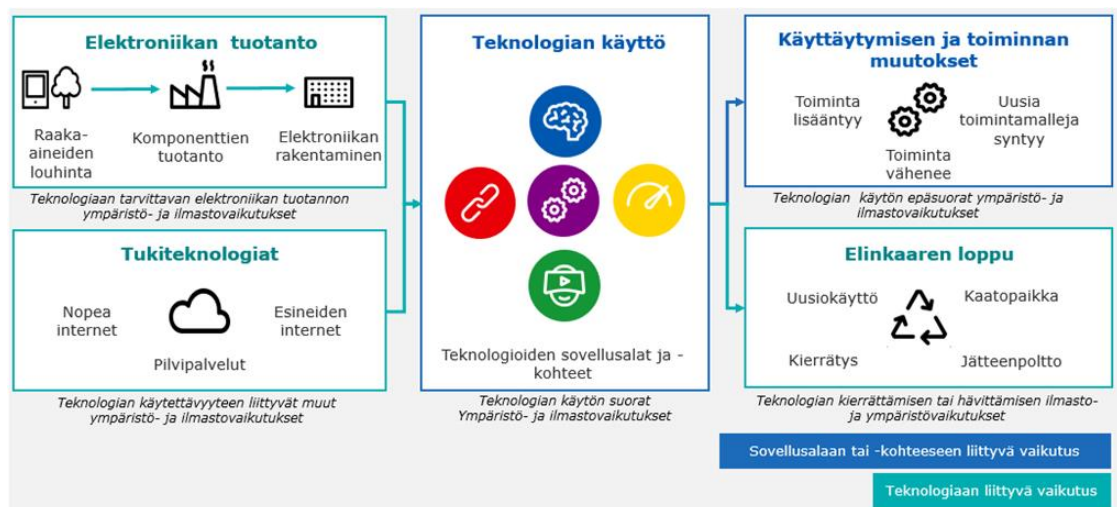
Lisättyä ja virtuaalitodellisuutta on kehitetty määritelmästä riippuen jo 1960-luvulta lähtien. Kehitys ja sovelluskohteiden lukumäärä on kuitenkin kasvanut voimakkaasti viime vuosikymmeninä.

4 Ilmasto- ja ympäristövaikutusten muodostuminen

Tässä luvussa käsitellään ilmasto- ja ympäristövaikutusten muodostumista ICT-alalla etenkin tarkasteltavien nousevien ICT-teknologioiden näkökulmasta. Luvussa kuvataan, miten teknologiaan liittyvien laitteiden ja niiden käytön vaikutukset syntyvät.

ICT-teknologioiden ympäristö- ja ilmastovaikutukset ovat nouseva huolenaihe ja kestävä kehityksen teema. Elektroniikan määrä on lisääntynyt viime vuosina eksponentiaalisesti kasvattaen elektroniikkajätettä. On arvioitu, että globaalisti vain 20 % kaikesta elektroniikasta kerätään asianmukaisesti kierrätystä varten (ITU, 2020). Lisääntynyt elektroniikan määrä kaikilla elämän osa-alueilla on myös nostanut esiin kysymyksen teknologian käytön energiavaatimuksista. ICT-teknologioiden osuus globaalista sähkönkulutuksesta voi arvioiden mukaan olla 20 % vuonna 2025 (Andrae, 2017). On selvää, että ilmastomuutoksen hillitseminen alle 2 celsiusasteen lämpenemiseen Pariisin ilmastositomuksen mukaisesti edellyttää laajoja rakenteellisia muutoksia myös ICT-sektorilla.

Teknologiaan liittyvät ilmasto- ja ympäristövaikutukset voidaan jaotella elektroniikkaan liittyviin vaikutuksiin (teknologian jalanjälki), sekä teknologian soveltamisen vaikutuksiin (teknologian kädenjälki). Elektronisten laitteiden valmistaminen vaatii sekä materiaaleja että energiaa, joiden molempien tuotannolla voi olla merkittäviä negatiivisia ympäristövaikutuksia. Mitä enemmän elektroniikkaa valmistetaan ja käytetään, sitä suuremmaksi muodostuvat materiaalien ja energian tarve. Kuitenkin vasta vertaamalla teknologian jalanjälkeä sen kädenjälkeen, eli elektronisten laitteiden valmistamisen vaikutuksia teknologian käyttötarkoituksen eli sovelluskohteen mahdollisiin positiivisiin vaikutuksiin, voidaan muodostaa laaja-alainen ja tasapainoinen käsitys teknologiaan liittyvistä ilmasto- ja ympäristövaikutuksista. Teknologian vaatimien laitteiden valmistaminen ja käytön volyymi ja toisaalta teknologian sovelluskohteet siis yhdessä ratkaisevat, millainen potentiaali teknologialla on vaikuttaa ympäristön- ja ilmastomuutokseen – ja ovatko nettovaikutukset positiivisia vai negatiivisia. Tässä luvussa kuvatut vaikutukset ovat pääasiassa yleisellä tasolla teknologioihin ja niiden soveltamiseen liittyviä havaintoja. Tarkemmat tässä selvityksessä tarkasteltujen ICT-teknologioiden aihealueiden ja sovellusalojen vaikutusarviointit esitetään luvuissa 5–9. Ilmasto- ja ympäristövaikutusten muodostumisen malli ICT-alalla on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3 Ilmasto- ja ympäristövaikutusten muodostuminen ICT-alalla

4.1 Elektroniikan tuotanto

Teknologiaan liittyy väistämättä elektroniikkaa, joka rakennetaan erilaisista teknisistä komponenteista kuten kaapeleista, sensoreista, mikropiireistä, muistikorteista, akuista, kiintolevyistä ja näytöistä. Lisäksi teknisten komponenttien saattamiseksi yhteen tekniseksi kokonaisuudeksi tarvitaan rakenne, joka koostuu esimerkiksi muoveista ja metalleista. ICT-teknologian materiaalivaatimukset ovat hyvin moninaiset. Siten ICT-teknologian tuotannon ympäristö- ja ilmastovaikutukset ovat vastaavasti monitahoisia, mikä vaikeuttaa niiden mittaamista. Oma roolinsa on elektroniikan kierrätyksellä, jota käsitellään alaluvussa 4.5 Elinkaaren loppu. Teknologian tuotannon ympäristö- ja ilmastovaikutukset liittyvät etenkin materiaalien louhintaan ja tuotannon energian- ja vedenkäyttöön. ICT-teknologian keskeisiin materiaaleihin kuuluvien harvinaisten maametallien, kuparin ja akkumateriaalien louhinta esimerkiksi kuormittaa ympäristöä merkittävästi.

Harvinaisia maametalreja tarvitaan kaikkeen elektroniikkaan ja siksi niiden kysyntä kasvaa kiivaasti elektroniikan määrän lisääntyessä. Koska kyseisiä materiaaleja käytetään hyvin pienissä määrin elektronista laitetta kohti, on niiden talteenotto kierrätetyistä laitteista hidasta ja vaivalloista. Lähes kaikki teknologian tuotantoon käytettävät harvinaiset maametallit louhitaan kaivoksista. Kaivos-toiminta vaikuttaa negatiivisesti ympäröivään luontoon useilla eri tavoilla, esimerkiksi heikentämällä pohjavesien laatua ja tuottamalla radioaktiivista jätettä.

Kuparia käytetään esimerkiksi kaapeleissa ja kuituoptiikassa ja suurin osa globaalisti kuparin käytöstä liittyy nimenomaan sähkönsiirtoon. Kuparin kysyntä on voimakkaassa kasvussa ja sen on arvioitu nousevan 43 % vuoteen 2035 mennessä. Osin kehitys johtuu vihreästä energiateknologiasta (European Copper Institute, 1). Kupari on helppo kierrätettävä, sillä sen laatu ei kärsi uudelleenkäytössä – EU:ssa noin puolet käytetystä kuparista on kierrätettyä (European Copper Institute, 2). Uusiokuparin louhinnan merkittäviä ympäristövaikutuksia ovat mm. maa-aineksesta koostuva louhintajäte (jopa 99 tonnia louhintajätettä yhtä kuparitonni kohden), happamien kaivosvalumiin päästöt pinta- ja pohjavesiin, ja kuparin prosessoinnin vedenkäyttö (SwedWatch, 2019). Lisäksi metallin sulatus voi aiheuttaa ilmansaasteita ja happosateita.

Akut ovat välttämättömiä monien elektronisten laitteiden käytölle. Akkujen kehitys on myös avainasemassa monien tarkasteltavien ICT-teknologioiden sovelluskohteiden toteutumisessa ja niiden ympäristövaikutuksissa – esimerkiksi tekoälyn mahdollistama älykäs vähäpäästöinen sähköverkko edellyttää edistyskäsittelyä energianvarastointijärjestelmiä. Akkuihin käytettävien materiaalien ekotoksisuus, louhintajäte ja louhinnan aikainen vedenkäyttö sekä akkujen tuotannon aikaiset päästöt ovat akkujen kysynnän mukana kasvavia ympäristö- ja ilmastovaikutuksia. Akkuraaka-aineiden louhinta heikentää ympäristön tilaa huomattavimmin kehittyvissä maissa kuten Boliviassa ja Kongossa, joissa louhitaan merkittävässä määrin keskeisiä akkuraaka-aineita kuten litiumia ja kobolttia, mutta joissa lainsäädäntö ja valvonta on puutteellista.

Tarkastelussa olevien teknologioiden materiaalivaatimuksissa on selkeitä eroja. Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen vaativat tietokoneita ja niiden laskentakapasiteettia, kun taas robotiikka ja autonomiset järjestelmät näiden lisäksi myös mahdollista raskaslaitteistoa, joka voi olla kooltaan huomattavankin suuri tai laaja (esimerkiksi droni-laivue). Virtuaalinen ja lisätty todellisuus taas vaatii tietokoneita ja niiden laskentakapasiteettia, sekä virtuaalilaseja. Lohkoketjut eivät suoraan edellytä uutta laitteistoa, vaan teknologiaa käytetään normaalien tietokoneiden kautta, joskin tietokoneiden määrä voi olla hyvin suuri esim. virtuaalivaluut- tojen lohkaketjun louhintaan tarkoitetuilla ns. louhintafarmeilla. Kvanttitekno- logian osalta tarkastellaan etenkin kvanttietokoneita, jolloin niiden materiaalivaati- mukset eivät eroa huomattavasti nykyisistä supertietokoneista. Teknologioiden vaatimat materiaalit ja niiden käyttömäärät vaihtelevat myös sovelluskohteesta ja sen toteutuksesta riippuen, esimerkiksi sen mukaan kuinka paljon jokin

sovelluskohde vaatii sensoreita. Erityisesti robotiikkaan käytettävän materiaalin määrä riippuu täysin sovelluskohteesta, mahdollisten fyysisten robottien koosta ja niiden lukumäärästä. Lähtökohtaisesti kuitenkin kaikkien tarkasteltujen teknologioiden tuotannon aikaisia ympäristö- ja ilmastovaikutuksia voidaan hillitä vastuullisella raaka-aineiden hankinnalla ja erityisesti suosimalla uusioraaka-aineita käytävää laitteistoa. Negatiivisten vaikutusten hillitsemistä on käsitelty yksityiskohteisemmin luvussa 10.

4.2 Tukiteknologiat

Yksi selkeä haaste ilmasto- ja ympäristövaikutusten arvioinnissa teknologiakohtaisesti on eri teknologioiden välinen riippuvuus toisistaan. Teknologioiden käyttö tai tietynlainen soveltaminen voi olla täysin riippuvaista useammasta teknologiasta, tai toiminnan tehostaminen tai skaalaaminen voi edellyttää useiden teknologioiden hyödyntämistä. Esimerkiksi monet tekoälyn sovelluskohteet vaativat rinnalleen nopeat verkkoyhteydet, monien internetiin kytkettyjen laitteiden välistä kommunikointia, sekä modernit, tehokkaat dataratkaisut. Kuvaamme seuraavassa lyhyesti kolme eri teknologiaa, jotka osaltaan epäsuorasti vaikuttavat tarkasteltujen teknologioiden ympäristö- ja ilmastovaikutuksiin: 5G, esineiden internet, ja pilvipalvelut. Nämä teknologiat eivät kuuluneet tämän selvityksen tarkastelun piiriin, mutta niillä voidaan nähdä olevan merkittävä rooli tarkastelun kohteena olleiden teknologioiden ja niiden sovelluskohteiden kehityksessä ja toteutuksessa.

Suurin osa työssä tunnistetuista sovelluskohteista on riippuvaisia nopeasta internetistä, jonka kehitystä mobiiliverkoissa ilmentää tällä hetkellä 5G-teknologia ja kiinteässä verkossa valokuituteknologia. 5G tuo lisätua erityisesti teollisuuteen, jossa sen potentiaali tukea muiden digitaalisten teknologioiden käyttöönottoa on merkittävä. 5G mahdollistaa moninkertaisesti aiempaa tehokkaamman dataliikenteen alhaisella viiveellä ja korkealla luotettavuudella. Nykyisessä kehitysvaiheessaan 5G-tukiasemien energiankulutus on kuitenkin moninkertainen aiempiin 2G/3G/4G-tukiasemiin verrattuna. Vaikka yksittäisen datapaketin siirtäminen 5G-verkossa kuluttaakin aiempaa vähemmän energiaa, datapaketteja siirtyy 5G:n myötä aiempaa moninkertainen määrä, mikä voi johtaa lopulta aiempaa suurempaan energiankulutukseen.

Esineiden internet (Internet of Things, IoT) tarkoittaa fyysisten laitteiden yhdistämistä internetiin. Kuluttajille IoT voi tarkoittaa esimerkiksi älykotia. Teollisuuden puolella IoT mahdollistaa erityisesti tehokkaan datan keräämisen esimerkiksi koneista ja sen analysoinnin, jota hyödynnetään mm. ennakoivassa kunnossapidossa ja älykkäässä dataan perustuvassa päätöksenteossa. Ilmasto- ja ympäristövaikutuksien osalta IoT-laitteissa tulee huomioida niiden koko elinkaari, kuten laitteiston ja sen sisältämän elektroniikan tuotanto, datan analysoinnin ja tietoliikenteen vaatima energiankulutus, suurinta osaa IoT-laitteita koskeva paristonkulutus ja paristojen elinkaari, sekä elinkaaren lopussa laitteiston kierrättämisen haasteet.

Digitalisaation myötä käytetyn datan määrä kasvaa jatkuvasti. Datan käsittely vaatii enenevissä määrin tallennustilaa ja laskentatehoa, jolloin monelle toimijalla helpoin, joustavin ja usein myös kustannustehokkain ratkaisu on hyödyntää datan käsittelyyn pilvipalveluita tarjoavan yrityksen palvelimia, jotka sijaitsevat tyypillisesti konesaleissa. Konesaleilla voi olla merkittäviä ilmasto- ja ympäristövaikutuksia, ja jotkut tutkimukset ovatkin arvioineet niiden päästöjen ohittavan lentoliikenteen päästöt vuoteen 2025 mennessä (Telia, 2019). Kuitenkin, vaikka datan määrä on kasvanut nopeasti, konesalien energiankulutus on ollut vuosia stabiili johtuen laitteiston energiatehokkuuden kehityksestä sekä erittäin suurien ja energiatehokkaiden hyperkonesalien yleistymisestä (Kamiya & Kvarnström, International Energy Agency, 2019). Konesalien koneiden energiankulutuksen lisäksi konesalien jäähdytysratkaisut aiheuttavat edelleen merkittävästi päästöjä. Jäähdytyksestä koituvat ilmanpäästöt ovat erityisen suuri ongelma lämpimissä maissa, joissa ulkolämpötilaa ei pystytty hyödyntämään konesalien jäähdyttämiseen.

4.3 Teknologian käyttö

ICT-teknologioiden kehitystä eivät useinkaan lähtökohtaisesti ohjaa kestävä kehityksen tavoitteet tai ympäristöarvot, vaan esimerkiksi jonkun toiminnan mahdollistaminen, toiminnan tehostaminen ja taloudelliset tavoitteet. Kehittyneissä maissa ollaan pitkälti tilanteessa, jossa ICT-teknologioita sovelletaan jossain muodossa lähes kaikilla yhteiskunnan sektoreilla, kuten terveydenhuollossa, ruoantuotannossa ja päätöksenteossa. Nousevien ICT-teknologioiden moninaiset soveltamismahdollisuudet hahmottuvat usein vasta teknologioiden kehittyessä pidemmälle. Näin myös nousevien teknologioiden potentiaali soveltaa niitä ilmaston- ja ympäristömuutosta hillitseviin kohteisiin muuttuu teknologian kehityksen mukana.

Kaikki ICT-teknologioiden soveltaminen vaikuttaa ilmastoon ja ympäristöön jollakin tavalla. Siksi teknologioiden mahdolliset soveltamisalat ja -kohteet ovat keskeisessä teknologian vaikutusten arvioinnissa. Vaikutusten arviointi on tärkeää, koska resurssirajoitteiden ja teknologioiden välisten riippuvuuksien takia toteutettavien sovelluskohteiden määrä ei ole rajaton. Jos asiaa tarkasteltaisiin ainoastaan ilmaston- ja ympäristömuutoksen näkökulmasta, nousevien ICT-teknologioiden käyttö pitäisi priorisoida niihin sovelluskohteisiin, joilla on todistettua mahdollisimman laaja-alaisia positiivisia vaikutuksia ilmastoon- ja ympäristöön. Huomioon tulisi ottaa myös sovelluskohteen epäsuorat vaikutukset, joita voi syntyä esimerkiksi käyttäytymisen ja toiminnan muutoksen kautta. Teknologioiden kokonaisvaikutusten arvioinnissa sekä sovelluskohteisiin liittyvässä päätöksenteossa on syytä kuitenkin huomioda myös muut yhteiskunnalliset vaikutukset, kuten oikeudenmukainen siirtyminen kohti hiilivapaata yhteiskuntaa sekä esimerkiksi ihmisoi- keuksien toteutuminen teknologioiden arvoketjussa.

4.4 Käyttäytymisen ja toiminnan muutokset

ICT-teknologioiden soveltamisen vaikutukset ilmastoon ja ympäristöön eivät ole aina suoria, minkä vuoksi ilmaston ja ympäristön näkökulmasta merkittävien sovelluskohteiden tunnistaminen ennalta on monesti hankalaa. Uuden teknologian käyttöönotto muuttaa lähes aina yksilöiden tai organisaatioiden käyttäytymistä tai muun yhteiskunnan toimintaa jollakin tavalla, eikä muutos aina ole täysin ennustettavissa. Esimerkiksi yhteiskäyttöisten sähköisten potkulautojen tarkoituksena on ollut vähentää yksityisautoilun määrää kaupungeissa. On kuitenkin huomattu, että potkulaudoilla ei korvata ainoastaan autoilua, vaan myös kävelyä ja pyöräilyä, minkä vuoksi sovelluskohteen liikenteen päästöjä vähentävä vaikutus on voinut jäädä odotettua pienemmäksi. Tällaisia teknologian soveltamisesta johtuvia käyttäytymisen ja toiminnan muutoksia liittyy lähes kaikkiin tarkasteltaviin teknologioihin.

Käyttäytymisen ja toiminnan muutoksilla on suurin merkitys sovelluskohteen kokonaisvaikutuksissa erityisesti niillä sovelluskohteilla, jotka jakavat kuluttajille tietoa tai ovat muuten lähellä kuluttajia, tai jotka radikaalisti muuttavat vakiintuneita toimintatapoja. Esimerkiksi ICT-teknologioiden soveltaminen viestintään ei itsessään luo merkittäviä ilmasto- tai ympäristövaikutuksia, mutta viestin vastaanottavan tahon toiminnassa tapahtuneet muutokset voivat näin tehdä. ICT-teknologian avulla luotu älykäs ja autonominen liikennejärjestelmä taas voi luoda odottamattomia, matkustamiseen tai logistiikkaan liittyviä käyttäytymisen ja toiminnan malleja, joilla puolestaan voi olla merkittäviä ilmasto- ja ympäristövaikutuksia.

4.5 Elinkaaren loppu

ICT-teknologioihin liittyvien laitteistojen ja elektroniikan elinkaaren lopun hallinta ratkaisee osaltaan, millaisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia teknologialla on. Haitallisia ympäristö- ja ilmastovaikutuksia syntyy esimerkiksi kemikaalivuodoista

tai elektroniikkaromun polttamisesta, sekä välillisesti menetettyjen materiaalien kautta, jos niitä ei saada takaisin kiertoon. Euroopan unionissa elektronisen jätteen kierrätysaste oli vuonna 2017 39 % ja Suomessa lähes 50 % (Eurostat, 2020).

Elektroniikan elinkaaren loppuun liittyy myös negatiivisia vaikutuksia aiheuttavia toimintatapoja, kuten vanhan elektroniikan toimittaminen kehittyneistä maista Afrikan kehittyviin maihin kierrätettäväksi. Tällöin laitteet puretaan käsin ja niistä otetaan talteen kaikkein arvokkaimmat materiaalit, mutta jäljelle jäävä elektroniikkajäte päättyy kaatopaikoille tai poltettavaksi. Elektroniikan olennaista onkin sen koko elinkaaren ja arvoketjun kestävä kehityksen mukainen hallinta. Myös kierrätysteknologian käyttämisellä on negatiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia, mm. talteenottolaitteiston käyttäminen vaatii energiaa, sekä sen rakentaminen materiaaleja.

Elektroniikkalaitteet sisältävät valtavan määrän eri materiaaleja, joten materiaalien erottelu ja talteenotto ei vielä laaja-alaisesti toteudu. Materiaalien markkinahinnan suhde talteenoton kustannuksiin vaikuttaa olennaisesti siihen, mitkä materiaalit otetaan talteen kierrätetyistä laitteista. Tällä hetkellä esimerkiksi litiumin talteenotto vanhoista laitteista ei ole kannattavaa (Lebedeva, Di Persio & Boon-Brett, 2017).

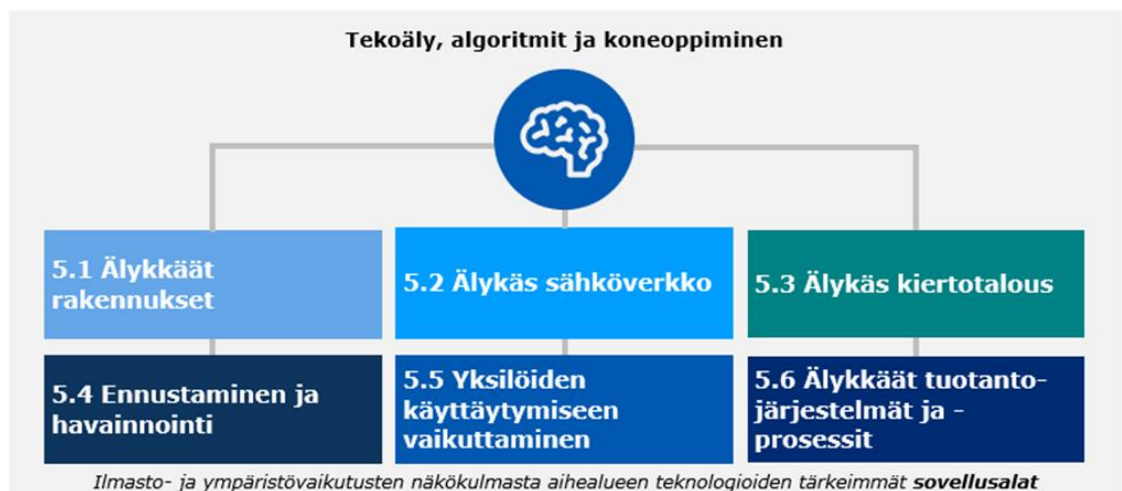
5 Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen

Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen -aihealueen teknologioita hyödynnetään Suomessa jo kohtalaisesti. Aihealueen sovelluskohteita ovat esimerkiksi datan älykäs hyödyntäminen päätöksenteon tueksi, henkilöiden tunnistaminen tai ostokäyttäytymisen seuranta. Edellä mainitut sovelluskohteet hyödyntävät ns. kapeaa tekoälyä, joka on laskennalliselta päättelykyvyltään selkeästi ihmistä tehokkaampi. Ihmismielen kaltainen monimutkaisempi tekoäly, ns. vahva tekoäly, vaikuttaa yhä kaukaiselta, eikä näy tällaisen teknologian kehittymisestä vuoteen 2035 mennessä vielä ole.

Aihealueen teknologioita voidaan hyödyntää, ja melko laajasti jo hyödynnetäänkin, prosessien tehostamiseen esimerkiksi teollisuudessa ja liikenteessä, maataloudessa ja energiantuotannossa. Toiminnan tehostaminen saavutetaan usein tarkentuneen mittauksen ja mallinnuksen sekä prosessien optimoinnin avulla. On hyvin todennäköistä, että aihealueiden teknologioita hyödynnetään yhä enemmän mittausten ja mallinnusten tehokkaampaan toteuttamiseen vuotta 2035 kohti edetessä.

Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen ovat avainasemassa yhteiskunnan älyllistymisessä kaikilla yhteiskunnan osa-alueilla. Sen merkittävimpiin sovellusaloihin kuuluvat älykkäät rakennukset, älykäs sähköverkko ja älykäs kiertotalous, joiden perusideana on toiminnan tehostaminen tekoälyn ohjaaman nopean päätöksenteon avulla. Yhteiskunnan älyllistymistä edistetään Suomessa vahvasti. Koska muutos leikkaa koko yhteiskuntaa, on uudistuksen vaikutuksia ja muutosnopeutta kuitenkin vaikea ennakoita. Aihealueen teknologiat myös mahdollistavat kysynnän entistä edistyneemmän ennustamisen, sekä tarkempien ilmasto- ja säämallinnusten rakentamisen. Tekoälyn tukema päätöksenteko on tietyillä yhteiskunnan osa-alueilla arkipäivää jo tällä hetkellä. Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen -aihealueen ilmasto- ja ympäristövaikutusten näkökulmasta tärkeimmät sovellusalat on esitetty kuvassa 4.

Tekoälyn opettaminen on energiantensiivinen prosessi, ja opetuksen aikainen energiankäyttö on teknologian merkittävä ilmastokysymys. Yhden tutkimuksen mukaan syväoppivan tekoälymallin opettamisen koko elinkaaren hiilijalanjälki voi olla jopa viisinkertainen verrattuna keskimääräisen amerikkalaisen auton elinkaarinaikaisiin päästöihin (Strubell et al., 2019). Tämä yhteiskunnan älyllistymisen varjopuoli on toistaiseksi jäänyt melko vähälle huomiolle. Tämän lisäksi älykkäiseen mittaamiseen tarvitaan paljon erityyppistä elektroniikkaa ja laitteistoa, joista tulee ennen pitkää elektroniikkaromua (ITU, 2018).



Kuva 4 Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen aihealueen teknologioiden osalta selvityksessä tarkasteltavat sovellusalat

5.1 Älykkäät rakennukset

Rakennukset ja kaupunkirakentaminen kattavat 36 % globaalista energiankulutuksesta (International Energy Agency, 2019). Älykkäillä sensoreilla ja IoT-sovelluksilla voidaan lähes reaaliaikaisesti mitata energiankulutusta, optimoida energianjakelua, automatisoida rakennusten toimintoja ja myöhemmin parantaa näiden energiatehokkuutta. Rakennuksissa merkittävin potentiaali energiankäytön vähentämiseksi on **lämmityksessä** (15–50 %), **viilennyksessä ja valaistuksessa** (International Energy Agency, 2017). Kotitalouksissa erilaisilla ICT:n mahdollistamilla monitorointi, mittaus ja ohjausjärjestelmillä voitaisiin kotitalouksien energian kulutusta vähentää 33 % (World Energy Council, 2018).

Älykäs valaistus on etenkin toimistorakennuksissa jo laajasti käytössä oleva sovelluskohde, jolla tarkoitetaan rakennusten valaistuksen hallintaa. Sovelluskohdeella voidaan ohjata valaistusta tilojen käytön mukaan, jolloin esimerkiksi toimistotiloissa ja varastoissa voidaan saavuttaa merkittäviä energiasäästöjä ja täten vähentää valaistuksen energiankulutuksesta johtuvia päästöjä. Sovelluksen avulla voidaan ehkäistä valosaastetta vähentämällä turhaan päällä olevien valojen määrää pimeällä, mikä vähentää rakennuksen negatiivisia vaikutuksia ympäröivään luontoon. Sovelluskohde on jo käytössä ja käytön voi olettaa kasvavan tulevaisuudessa sovelluskohteeseen liittyvän teknologian kehittyessä edelleen.

Toinen merkittävä sovelluskohde ovat **älykkäät lämmitys- ja viilennysjärjestelmät**. Älykkäillä LVI-ratkaisuilla voidaan optimoida energiankulutusta esim. vähentämällä kulutusta käyttämättömillä alueilla ja kasvattaa tarvetta tunnistettuina ruuhka-aikoina. Teknologia myös auttaa optimoimaan rakennusten sisälämpötilan. Sovelluskohteella on näin ollen positiivinen vaikutus lämmityksestä- ja viilennyksestä johtuvien päästöjen vähenemiseen. Laajalle skaalattuna sovelluskohde voi vaikuttaa merkittävästi energiajärjestelmämme muutokseen kohti uusiutuvia energialähteitä. Suomessa älykkäät lämmitysjärjestelmät voivat lisäksi vähentää puulämmityksen tarvetta ja tätä kautta vaikuttaa metsien polttopuuhakkuihin.

Älykkäät energiaratkaisut auttavat optimoimaan rakennusten energiankäyttöä, mutta aktiiviset, verkkoon yhteydessä olevat laitteet myös kasvattavat energiantarvetta. Älykkäiden kontrollijärjestelmien ja verkkoon liitettyjen laitteiden, eli ns. aktiivisten kontrollereiden, energiantensiteetti on tällä hetkellä noin 2 kWh per m². Laitteiden määrän kasvu ja tämän laitteiston käyttämän valmiustilan jatkuva energiankulutus on jo huomattavissa monilla energiamarkkina-alueilla. (International Energy Agency, 2017.) Sovelluskohteen vaikutukset riippuvat vahvasti aktiivisen kontrollijärjestelmän energiantensiteetistä.

Tekoälyä, algoritmeja ja koneoppimista voidaan älykkään valaistuksen, viilennyksen ja lämmityksen lisäksi käyttää esimerkiksi **energiatehokkaampien rakennusmateriaalien kehittämiseen**. Tekoälyllä toteutetun rakennusten ja asunon monitoroinnin avulla voidaan myös **seurata sisäilman laatua** ja varmistua siitä, että sisäilman epäpuhtauksiin tulee mahdollisimman nopeasti puututtua.

Älykkäät rakennusten energiaratkaisut ovat olennainen osa älykästä sähköverkkoa. Ne tukevat uusiutuvan energian käyttöä auttamalla vastaamaan uusiutuvien energialähteiden sähköverkon kuormitusongelmaan. Älykkäät energiaratkaisut voivat mm. vähentää verkon kuormitusta energiankäytön muutoksilla sekä edistää energian varastointia (International Energy Agency, 2017).

5.2 Älykäs sähköverkko

Älykäs sähköverkko on vielä monen sovelluskohteen osalta vasta kehityksensä alussa, mutta sähköverkon älyllistyminen vaikuttaa erittäin todennäköiseltä kehityssuunnalta. Älykkään sähköverkon sovelluskohteilla on suora positiivinen vaikutus yhteiskunnan sähköistymiseen ja uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntymiseen. Pelkkien älykkäiden mittausjärjestelmien avulla saavutettavissa olevat

energiasäästöt ovat kuitenkin kotitalouksissa vaatimattomia, Suomessa vain noin 1–2 % (World Energy Council, 2018).

Energian joustava hinnoittelu käyttöajan mukaan on jo käytössä Suomessa. Joustavuutta voidaan kuitenkin yhä parantaa uudella ICT-teknologialla ja tekoäly mahdollistaa kulutusjouston myös jakeluverkossa. Esimerkiksi tekoälyn avulla toteutettu lämmityskysynnän ennustaminen vallitsevien sääolojen, ihmisten käyttäytymisen ja energiantarpeen mukaan auttaa optimoimaan lämmön tuotantoa ja tarjontaa, joka mahdollistaa energian dynaamisen hinnoittelun. Osana nykyistä energiajärjestelmää joustavan hinnoittelun ympäristö- ja ilmastovaikutus ei ole merkittävä, sillä sen tehokkuus tasapainottaa kysyntää on rajallinen, mutta yhdistettynä esimerkiksi älykkääseen liikennejärjestelmään tai rakennuksiin vaikutukset mahdollisesti kasvavat.

Teknologian avulla voidaan **tasapainottaa energian kysyntää ja tarjontaa sähköverkossa** esimerkiksi älykkäiden latausjärjestelmien ja energianvarastointijärjestelmien avulla. Esimerkiksi sähköautojen älykkäällä lataamisella autot latautuisivat tiettyinä ajankohtina, kun sähkön hinta on matala korkean tuotannon tai matalan kysynnän vuoksi. Kysynnän ja tarjonnan tasapainottaminen edistää uusiutuvan energian mahdollisuutta vastata kysyntäpiikkeihin ja vähentää esimerkiksi hiilivoimaloiden käynnistämisen tarvetta. Sovelluskohteella on siis positiivinen ilmastovaikutus vältettyjen päästöjen kautta. Kysynnän ja tarjonnan tasapainottaminen myös vähentää uuden energiainfran rakennustarvetta (International Energy Agency, 2017). Se ei kuitenkaan vaikuta suoraan energian käyttömääriin. Sovelluskohteelle on välttämätöntä yritysten ja kotitalouksien tahto ja mahdollisuus tuottaa energiaa verkkoon tai varastoida sitä.

Sähköautoilla voi olla merkittävä rooli älykkäässä sähköverkossa **energiavarastona**. Tekoälyllä varustetut sähköautot saattavat tulevaisuudessa toimia myös akkuina, joista tiettyinä ajankohtina, kun sähkön kysyntä on erityisen korkea, voi sähköä tuoda takaisin verkkoon (International Energy Agency, 2017). Tämä toisi merkittävää lisäjoustoa sähköverkkoon. Teknologian kehittäminen on vasta alkuvaiheessa ja sen soveltuvuus vielä epävarmaa (International Energy Agency, 2017). Sovelluskohteella pystyttäisiin tasapainottamaan tieliikenteen sähköistymisestä seuraavaa sähkön kysynnän lisääntymistä ja sen vaikutukset ovat mahdollisesti merkittäviä, vaikka koko tieliikenne ei sähköistyisikään.

Tekoälyä tarvitaan tulevaisuuden uusiutuviin energialähteisiin nojautuvan **energiantuotannon ohjaamisessa**, koska uusi järjestelmä on hajautetumpi ja monimutkaisempi kuin nykyinen energiantuotantomalli. Teknologian avulla yksittäiset energiantuotantojärjestelmät voidaan liittää paremmin osaksi sähköverkkoa. Hajautetun energiantuotannon hallinnan ja koko sovellusalan yhteiskunnallinen vaikuttavuus on merkittävä, sillä se ajaa koko energiajärjestelmän muutosta.

5.3 Älykäs kiertotalous

Tekoälyn, algoritmien ja koneoppimisen mahdollistamat ratkaisut edistävät kiertotaloutta. Teknologialla voidaan tehostaa materiaalien kierrätystä tavaroiden elinkaaren lopussa, mutta myös tukea materiaalien kiertoa uusiokäytön, huollon ja ekosunnittelun edistämisen kautta.

Materiaalien erottaminen ja lajittelu kierrätyskeskuksissa onnistuu entistä paremmin tekoälyn avulla. Uusilla älykkäillä kierrätysjärjestelmillä voidaan entistä tarkemmin ja tehokkaammin tunnistaa ja eritellä materiaaleja koneellisesti (Global e-Sustainability Initiative & Deloitte, 2019). Tekoälyllä varustettuja kierrätysrobotteja on jo markkinoilla ja käytössä Suomessa. Vuonna 2035 tällaiset älykkäät kierrätysjärjestelmät ovat todennäköisesti arkipäiväisiä ja laaja-alaisesti käytössä, mikä voi tarkoittaa monen materiaalin kohdalla kierrätetyn materiaalin osuuden kasvua markkinoilla ja erilaisissa tuotteissa.

Kiertotalouden toteutukseen ja suunnittelun tarvitaan dataa ja tilastoja. Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen voivat tehostaa datan keräämistä ja **edistää mittaamista ja seurantaa** myös kiertotalouden tarpeisiin. Monilla aloilla materiaalien pitäminen kierrossa edellyttää, että saatavilla on dataa tuotteiden sisältämistä materiaaleista. Teknologialla voidaan myös tehdä materiaalikiertojen analysointia. Sovelluskohteen rooli on merkittävä ja varmasti yhteiskunnan älyllistymisen myötä kasvava, mutta sen suoria vaikutuksia on vaikea arvioida.

Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen **tukevat alustataloutta ja erilaisia jakamistalouden malleja**, jotka vähentävät yksittäisten tuotteiden lukumäärää ja täten materiaalien käyttöä. Ilmaston ja ympäristön kannalta erityisen merkittävä jakamistalousmalli liittyy yksityisautoihin. Älykäs jakamistalousmalli yhdessä autoilun täyden automaation kanssa voisi mullistaa liikennejärjestelmän ja radikaalisti vähentää yksityisautojen määrää etenkin kaupungeissa. Vuoteen 2035 mennessä tämä on kuitenkin melko epätodennäköistä, joskin arviot autoilun automaation etenemisvauhdista vaihtelevat runsaasti.

5.4 Ennustaminen ja havainnointi

Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen tuottavat jo nyt ennusteita ja havaintoja yhteiskunnan tarpeisiin. Tulevaisuuden ennakointi auttaa esimerkiksi optimoimaan resurssien käyttöä teollisuudessa ja varautumaan sääilmiöihin koko yhteiskunnassa. Lisäksi ennustemalleja voidaan käyttää sekä yksilöiden että organisaatioiden päätöksenteon tueksi.

Koneoppimisen avulla tehty **kysynnän ennustaminen** voi vähentää tavaroiden ylituotantoa ja ylivarastointia (Rolnick et al., 2019). Verkkokaupankäynnin ja juuri oikeaan tarpeeseen toteutetun tuotannon (Just-In-Time-tuotanto) kasvu nostaa tarvetta tehokkaalle kysynnän ennustamiselle, jotta minimoidaan tuotteiden ylimääräinen kuljettaminen. Sovelluskohteella on myös positiivinen vaikutus materiaalien käyttöön ja jätteen vähenemiseen – kysynnän ennustamisella saadaan optimoitua tuotteiden valmistaminen markkinoiden kysynnän mukaan ja vältettyä ylituotantoa ja hävikkiä. Erityisen merkittävää on **kysynnän ennustaminen ruokahävikin vähentämiseksi**.

Tehokkaalla koneoppimiseen perustuvalla **ilmastomallinnuksella** voidaan reaaliaikaisesti vaikuttaa sähkön jakeluun ja pidempiaikaisesti voimaloiden suunnitteluun ja kehitykseen (Rolnick et al., 2019). Tällä on positiivisia vaikutuksia ilmastoon energiankäytön kautta, mm. sähkönjakelun säätely sääennusteiden mukaan ja uusiutuvan energian voimaloiden asentaminen laskennallisesti tehokkaammille alueille tehokkaampina aikoina.

Älykkään monitoroinnin ja ennustamisen avulla voidaan entistä tehokkaammin tunnistaa alkavat luonnonkatastrofit ja niiden vaikutusalueet, minkä johdosta ehkäisevät toimenpiteet saadaan aiemmin käyntiin ja resurssit optimoitua tarkemmin (Global e-Sustainability Initiative & Deloitte, 2019). Luonnonkatastrofien uhkien ja riskien **ennustamisella ja ehkäisyllä** voi myös olla merkittävä positiivinen vaikutus ilmastomuutoksen hillitsemiseen; esimerkiksi mahdolliset metsäpaloit voidaan tunnistaa jo ennen niiden alkamista, ja jo alkaneiden metsäpalojen leviämisenopeuden, -suunnan ja -laajuuden tarkempi ennustaminen johtaa palojen nopeampaan hillitsemiseen ja tukahduttamiseen. Luonnonkatastrofien uhkien ja riskien ehkäisemisellä on myös positiivinen ympäristövaikutus, esimerkiksi metsäpaloja ehkäisemisellä ja niiden nopealla tukahduttamisella monet ekosysteemit välttyvät tuholta. Suomessa todennäköisyys luonnonkatastrofeille on verrattain pieni, vaikka esimerkiksi tulvien ja myrskyjen odotetaan yleistyvän täälläkin tulevaisuudessa, eikä sovelluskohde ole siksi Suomelle erityisen merkittävä.

Tekoälyä hyödynnetään ja kehitetään Suomessa erilaisiin vesiriskien ja vesivarojen hallintaan liittyviin sovelluskohteisiin. Vesistöjen saastuminen ja puhtaan veden saatavuus ovat globaaleja ongelmia, joita kuivuus ja tulvat tulevaisuudessa

edelleen lisäävät. **Vesitaseiden ja vedenlaadun monitorointia** voidaan tehostaa älykkään mittauksen ja tekoälyn avulla esimerkiksi kaivoksissa. Sovelluskohdeella voi olla olennainen merkitys ympäröivän luonnon ja teollisuuden prosessien hallinnassa, sekä tulvariskien hallinnassa. Teknologiaa voidaan myös hyödyntää esimerkiksi **jäätilanteen arviointiin** tai **jätevedenpuhdistusprosessin ohjaukseen**. Vesien tarkkailu on Suomelle merkittävä sovellusala, joka edistää vesistöjen puhtautta esittämällä tarkkoja havaintoja vesistöjen tilasta ja esimerkiksi ravinnemääristä, jonka avulla puhdistustoimia pystytään tehokkaasti kohdentamaan ongelma-alueille.

5.5 Yksilöiden käyttäytymiseen vaikuttaminen

Tekoälyä, algoritmeja ja koneoppimista voidaan hyödyntää yksilöiden toiminnan ohjaamiseen tarjoamalla heille kohdennettua tietoa erilaisista tuotteista ja palveluista tai esimerkiksi heidän ympäristöstään.

Kuluttajien internet-käyttäytymisen seuranta ja siihen perustuva kohdemarkkinointi on ollut arkipäivää jo pidemmän aikaa, mutta enenevässä määrin kuluttajien käyttäytymistä pyritään seuraamaan myös fyysisesti älylaitteiden GPS-paikantimilla, jonka myötä kuluttajan älylaitteisiin voidaan lähettää myös sijaintiin ja fyysiseen käyttäytymiseen perustuvaa kohdemarkkinointia. **Kohdennetulla mainonnalla** voi mahdollisesti olla merkittävä vaikutus kulutuksen lisääntymiseen ja tätä kautta negatiivinen vaikutus ilmastoon ja ympäristöön. Teknologiaa voidaan kuitenkin käyttää myös kuluttajien kulutuskäyttäytymisen ohjaukseen kestävän kehityksen näkökulmasta. Ilmaston- ja ympäristömuutokseen liittyvää valistamista ja ohjaamista voidaan toteuttaa tekoälyn avulla esimerkiksi kuluttamiseen ja ostokäyttäytymiseen perustuen.

Teknologia mahdollistaa myös **älykkään liikenteenohjauksen**. Älykkäällä liikenteenohjauksella tarkoitetaan älykkäiden sensoreiden ja mittauslaitteiden hyödyntämistä liikenteen sujuvuuden parantamiseksi etenkin suurkaupungeissa. Moskova on hyvä esimerkki tekoälyn soveltamisesta liikenteenohjaukseen: teknologiaa hyödyntämällä kaupungin ruuhkat ovat selvästi pienentyneet ja esimerkiksi parkkipaikkojen etsintään kuluva aika on kaupungissa puolittunut (ITU, 2020). Sovelluskohde vähentää suoraan liikenteen päästöjä vähentämällä matkustusaikoja, ajoneuvojen tyhjäkäyntiä ja matkustusmääriä ja sillä on merkittävä positiivinen vaikutus paikalliseen ilmanlaatuun. Älykkääseen liikenteenohjaukseen koko kaupungin mittakaavassa tarvitaan mittava määrä sensoreita ja teknistä mittauslaitteistoa. Suomessa ei ole toistaiseksi mittakaavaltaan merkittäviä liikenteenohjaukseen liittyviä ongelmia muualla kuin pääkaupunkiseudulla, eikä sovelluskohde ole siten Suomen kontekstissa toistaiseksi erityisen merkittävä. Kaupungistumisen ja liikenteenohjauksen liittyvien ongelmien mahdollisen kasvun myötä sovelluskohteen merkittävyys tulevaisuudessa voi kuitenkin kasvaa. Suomessa liikenteen infrastruktuurissa on jo nykyisellään mittava määrä sensoreita, joita voi olla mahdollista hyödyntää tulevaisuudessa paremmin älykkään liikenteenohjauksen tarpeisiin.

5.6 Älykkäät tuotantojärjestelmät ja -prosessit

Älykkäät tuotantojärjestelmät ovat usein monen eri teknologian summa, mutta erityisesti tekoälyn ja IoT-sensorien avulla tehty keskitetty mittaaminen, diagnostiikka, päätöksenteko ja toteutus tehostavat merkittävästi tuotantoprosesseja esimerkiksi teollisuudessa ja maataloudessa. Maataloudessa tämä voi käytännössä tarkoittaa esimerkiksi maaperän happamuustasojen seurantaa. Maaperädatan kerääminen, analysointi ja tulosten jakaminen maanviljelijöille lähes reaaliaikaisesti on askel kohti ympäristöystävällisempää ja tehokkaampaa maataloutta, jolla on positiivisia vaikutuksia maankäytön muutokseen (ITU, 2019). Vedenkulutukseen ja käyttömääriin perustuvan data-analyysin myötä maanviljelijät voivat puolestaan

tehostaa vedenkäyttöä ja saada säästöjä sekä vedenkulutuksen että kustannusten osalta (ITU, 2019).

Teollisuuden tehostamisessa **digitaalinen kaksonen** mahdollistaa kyvyn hallita, muuttaa ja jakaa fyysiseen tuotteeseen liittyvää tietoa digitaalisesti. Sen avulla voidaan vähentää sekä tuotekehitykseen kuluva aikaa, että tuotteen testaamisen kustannuksia. Tekoälyn avulla tehtävä tehostaminen ei rajoitu vain tuotekehityksen alkupäähän, vaan lisäksi mm. prosessien ja laitteiden ennakoivan huollon ja ylläpidon soveltamiseen.

Tekoälyllä on arveltu olevan merkittävä potentiaali **fossiilisten polttoaineiden louhinnan tehostamisessa ja edistämisessä** mm. analysoimalla kenttien toimintaa ja paikkaamalla ongelmia ja parantamalla varantojen mallintamista (International Energy Agency, 2017). Digitaalisilla ratkaisuilla myös teknisesti louhittavissa olevien öljy- ja kaasuvärien määrää voitaisiin kasvattaa jopa 5 %. (International Energy Agency, 2017). Sovelluskohde mahdollisesti alentaisi tai pitäisi alhaalla fossiilisen energian hintaa ja täten ylläpitäisi fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa energiasysteemiä. Sovelluskohde saattaa vaikuttaa energiamarkkinoihin, mutta Suomen nykyisellä energiapolitiikalla sen vaikutuksen Suomen kannalta on arvioitu olevan matala. Lisäksi teknologiaa voidaan käyttää myös **uusiutuvan energian tuotantoon**, kuten optimaalisten tuotantokenttien määrittämiseen ja suunnitteluun.

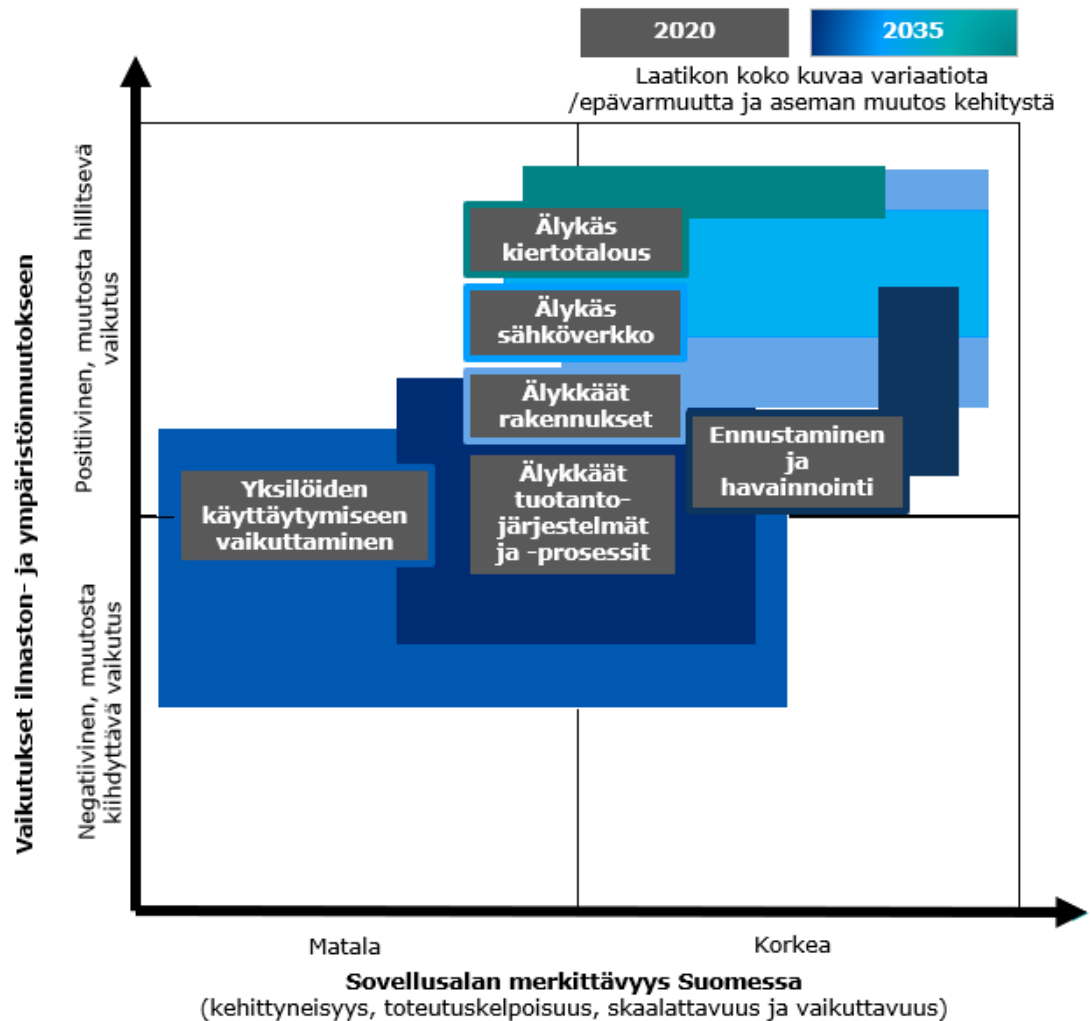
Tuotannon ja prosessien tehostaminen ulottuu myös logistiikkaan. Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen mahdollistavat useita **rahtiliikenteen tehostamistoimia**, kuten rahtikuljetusten kapasiteetin paremman hyödyntämisen ja kuorma-autojen uudelleen reitittämisen tyhjien kuljetusten vähentämiseksi (Rolnick et al., 2019). Sovelluskohteella voidaan suoraan vähentää logistiikan päästöjä.

5.7 Yhteenveto vaikutuksista

Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen -aihealueen teknologiat ovat tärkeässä asemassa yhteiskunnan älyllistymisessä, ihmisten ja luonnon käyttäytymisen ennustamisessa sekä tuotannon ja toiminnan tehostumisessa. Aihealueen teknologioiden sovelluskohteet lisäksi edistävät resurssiviisautta ja hajautettua energiantuotantoa. Aihealueen teknologioita voidaan kuitenkin hyödyntää myös fossiilisten polttoaineiden louhinnan tehostamiseksi. Tekoälymallien opettaminen käyttää myös huomattavasti energiaa. Yhteenveto aihealueen teknologioiden merkittävimmistä ilmasto- ja ympäristövaikutuksista on esitetty taulukossa 5 ja sovellusaloista kuvassa 5.

Taulukko 5 Yhteenveto aihealueen teknologioiden merkittävimmistä positiivisista ja negatiivisista ilmasto- ja ympäristövaikutuksista

Merkittävimmät positiiviset vaikutukset	Merkittävimmät negatiiviset vaikutukset
- Energiankulutuksen optimointi ja uusiutuvien energialähteiden käytön edistäminen (älykkäät rakennukset, sähköverkko) - Neitseellisen materiaalin käytön vähentyminen ja liitännäisvaikutukset (älykäs kiertotalous, kysynnän ennustaminen) - Data edistää resurssiviisautta ja materiaalihokkuutta (älykäs kiertotalous, älykkäät tuotantojärjestelmät ja -prosessit)	- Teknisen mittauslaitteiston materiaali-vaatimukset ja jatkuva energiankulutus (älykkäät rakennukset, älykäs sähköverkko, älykkäät tuotantojärjestelmät ja -prosessit) - Saattaa hidastaa siirtymää pois fossiilisista edistämällä niiden louhintaa (älykkäät tuotantojärjestelmät ja -prosessit) - Tekoälymallien opettamisen energiankulutus (kaikki sovellusalat)



Kuva 5 Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen -aihealueen teknologioiden sovellusalat

Älykkäät rakennukset: Tärkeä sovellusala, mutta toimeenpano vielä alkuvaiheessa – tulevaisuudessa merkittävässä roolissa asumisen ilmasto- ja ympäristövaikutusten vähentämisessä.

Älykäs sähköverkko: Tärkeä sovellusala, mutta toimeenpano sähkön joustavaa hinnoittelua lukuun ottamatta vielä alkuvaiheessa – avainasemassa yhteiskunnan sähköistymisessä ja uusiutuvien energianlähteiden tuotannon lisäämisessä.

Älykäs kiertotalous: Tärkeä sovellusala, mutta toimeenpano on vielä alkuvaiheessa – merkittävyys kasvaa skaalautumisen myötä.

Ennustaminen ja havainnointi: Kysynnän ennustamista tehdään jo Suomessa – merkittävyys kasvaa edelleen skaalattavuuden, ennustemallien kehityksen ja uusien sovelluskohteiden myötä kohti vuotta 2035.

Yksilöiden käyttäytymiseen vaikuttaminen: Tehdään kohdemarkkinan kautta jo nyt, joskin ilmaston- ja ympäristön näkökulmasta vaikutukset ovat ristiriitaisia – tulevaisuudessa merkittävyys kasvaa sovellusalan levitessä uusiin sovelluskohteisiin, joilla arvioidaan kuitenkin pääasiassa olevan pääasiassa negatiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia.

Älykkäät tuotantojärjestelmät ja prosessit: Tärkeä sovellusala, mutta toimeenpano vielä alkuvaiheessa – tulevaisuuden kehityksen suunta arvaamaton, vaikka pääasiassa vaikutusten arvioidaan olevan positiivisia tehostamisesta johtuen.

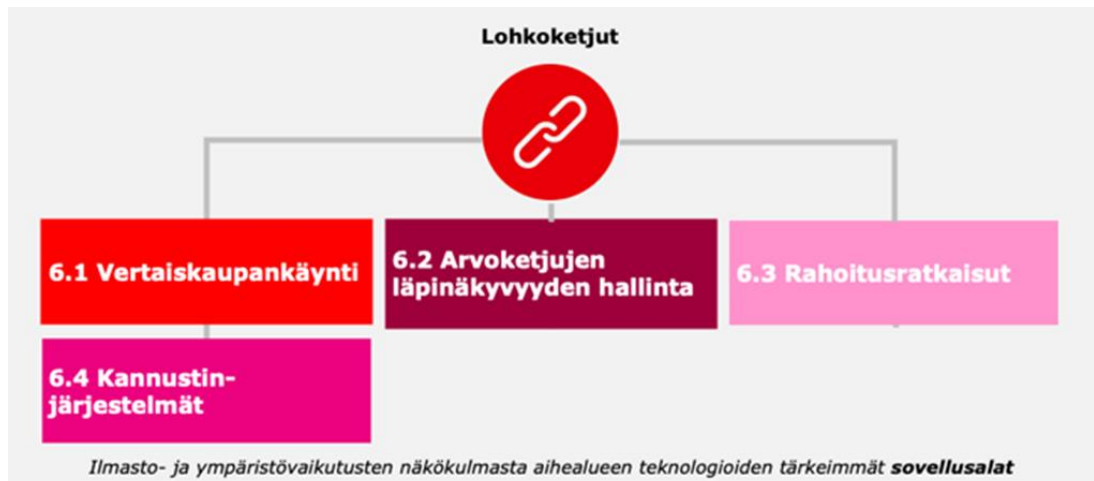
6 Lohkoketjut

Lohkoketjuteknologian kehitys ja hyödyntäminen ovat kasvaneet merkittävästi viime vuosina. Teknologiaa hyödynnetään esimerkiksi pankkisektorilla digitaalisen asunto-osakekaupan palveluissa ja logistiikkatoimialalla tavarankuljetuksen seurannassa. Suomessa on perustettu muutamia suurempia lohkoketjuverkostoja tunnistamaan ja kehittämään lohkoketjuihin perustuvia ratkaisuja eri toimijoiden kesken. Lohkoketjujen yleistyminen Suomessa edellyttää ainakin sekä rakenteellisia muutoksia yhteiskunnan toimintaan ja luottamuksen rakentamiseen, että edellä mainitun lohkoketjujen energiankulutusongelman ratkaisemista.

Lohkoketjuteknologian merkittävimmit sovellusaloiksi on tunnistettu vertaiskaupankäynti, arvoketjujen läpinäkyvyyden hallinta sekä rahoitusratkaisut. Tunnistetuista sovellusaloista erityisesti vertaiskaupankäynti sekä arvoketjujen läpinäkyvyyden hallinta perustuvat älykkääseen sopimiseen ja luottamuksen säilymiseen eri tahojen välillä ilman kolmansia osapuolia. Kryptovaluuttojen suosion kasvaminen ja kurssien tasaantuminen taas mahdollistaa uudenlaisen digitaalisen rahoitusalan, jolla voidaan vauhdittaa innovaatioiden kehitystä globaalisti. Vaikka lohkoketjuteknologiaa voitaisiin käyttää tietokantana lähes mihin tahansa muuhunkin käyttötarkoitukseen, teknologialle ominainen laskentaintensiivisyys ja siten sähkönkulutus ei tee siitä aina kannattavaa. Lohkoketjut aihealueen ilmasto- ja ympäristövaikutusten näkökulmasta tärkeimmät sovellusalat on esitetty kuvassa 6.

Tällä hetkellä lohkoketjuteknologioiden vaikutus ilmaston- ja ympäristömuutokseen on pääosin kiihdyttävä. Erityisesti julkisissa globaaleissa lohkoketjuissa (esim. bitcoin) vaikutuksista suurin osa tulee kryptovaluuttojen louhimiseen käytettyjen tietokoneiden sähkönkulutuksesta. Tämä sähkönkulutus muodostaa sähköverkkoon joustamattoman ja jatkuvan kuorman, joka vaikeuttaa osaltaan sähköverkon vähähiilistymistä. Keskeinen syy transaktioiden määrään nähden suuressa energiankulutuksessa on lohkoketjuteknologian rakenne, jossa ei ole keskitettyä tahoa, vaan transaktioiden varmentaminen on hajautettu lukuisille eri osapuolille. Järjestelmät on suunniteltu toimimaan niin, että mitä enemmän laskentatehoa verkossa on, ts. mitä enemmän louhivia tietokoneita verkossa on, sitä paremmin tietokannan luotettavuus ja eheys säilyy ja käyttäjät eivät pääse muokkaamaan tietokantaa (Korhonen, 2018).

Lohkoketjuteknologiaa voidaan soveltaa julkisten globaalien lohkoketjujen lisäksi käyttämällä yksityisiä lupaan perustuvia lohkoketjualustoja. Näillä alustoilla vain tietyillä oikeuden saaneilla validointisolmuilla on lupa lisätä tai muuttaa lohkoketjun lohkoja. Lupaan perustuvat lohkoketjualustat voivat olla huomattavasti julkisia alustoja energiatehokkaampia, ja voivat osaltaan ratkaista lohkoketjuille tyypillistä energiankulutusongelmaa (Andoni et. al, 2019).



Kuva 6 Lohkoketjuteknologian osalta selvityksessä tarkasteltavat sovellusalat

6.1 Vertaiskaupankäynti

Lohkoketjuteknologia mahdollistaa yksilöiden välisen vertaiskaupan läpinäkyvästi ja luotettavasti ilman välikäsiä. Teknologialla voikin olla merkittävä rooli hajaute-tussa energiantuotantomallissa. Lohkoketjuteknologian hyödyntäminen erityisesti ilmasto- ja ympäristövaikutuksiltaan merkittävään vertaiskaupankäyntiin vaatii vielä erinäisten sosiaalisten ja lainsäädännöllisten esteiden ratkaisemista.

Uusiutuvan energian vertaiskaupankäynnin myötä kotitaloudet ja taloyhtiöt voisivat myydä itse tuottamaansa ylijäämäenergiaa lohkoketjualustan avulla suoraan muille kuluttajille (Jogunola et al., 2019). Tämä voisi lisätä kotitalouksien ja taloyhtiöiden kannustinta rakentaa uusiutuvia energiantuotantoratkaisuja, kuten aurinkopaneeleja, ja täten lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä. Lohkoketjuteknologiaa voitaisiin myös yhdistää esimerkiksi energiajätteen anaerobiseen hajottamiseen perustuvien teknologioiden kanssa, jolloin kotitaloudet voisivat myydä omasta energiajätteestään muodostettua energiaa vertaiskaupan avulla suoraan muille kotitalouksille (PwC, 2018).

Lohkoketjuteknologiaa voitaisiin mahdollisesti käyttää myös **veden vertaiskaupankäyntiin**. Älykkäitä vesimittareita hyödyntämällä ylijäämävedestä voitaisiin käydä kauppaa digitaalisesti, ja jakaa ylijäämävettä suoraan muille kotitalouksille ilman välikäsiä (PwC, 2018). Sovelluskohde on kuitenkin paitsi kaukainen, myös Suomen kannalta suhteellisen merkityksetön runsaiden vesivarojen takia.

Siirtyminen nykyisestä keskitetystä jakelusta vertaisjakeluun energian osalta vaatisi merkittäviä rakennemuutoksia nykyiseen energiajärjestelmään sekä mahdollisesti muutoksia lainsäädäntöön. Nämä muutokset voisivat periaatteessa olla mahdollisia 2035 mennessä, mutta niiden toteutumisesta ei tällä hetkellä ole merkkejä. Näiden esteiden lisäksi vertaiskaupankäynnin toteutuminen vaatisi lohkoketjuteknologiaan liittyvää tietoisuuden lisäämistä ja mahdollisuuksien kansantajuistamista, eikä lohkoketjuteknologian hyödyntämistä energian vertaiskaupankäyntiin nähdä olennaisena lähitulevaisuudessa.

6.2 Arvoketjujen läpinäkyvyyden hallinta

Lohkoketjuteknologialla voidaan merkittävästi edistää läpinäkyvyyttä ja luotettavuutta toimitusketjuissa ja yritysten omassa toiminnassa.

Kestävän kaivostoiminnan edistäminen seurannan ja sertifiointin avulla on mahdollinen sovelluskohde, joka voisi osaltaan vaikuttaa koko teknologia-alan vastuullisuuteen. Kaivoksissa louhituille raaka-aineille voidaan luoda ns. digitaaliset sormenjäljet, jolloin raaka-aineita voidaan lohkoketjun avulla luotettavasti

seurata koko sen toimitusketjun läpi (PwC, 2018). Sovelluskohteella voisi olla merkittävä positiivinen vaikutus kestävään ja vastuulliseen kaivostoimintaan, mutta sen laajamittainen käyttö vuoteen 2035 on hyvin epävarmaa, sillä sovelluskohteen kehitys on vasta alussa.

Lohkoketjuteknologiaa voidaan käyttää **myös uusiutuvan energian sertifikaattien autentikointiin** (PwC, 2018). Lohkoketjuteknologian avulla toteutettu uusiutuvien energian sertifikaattien aitouden varmentaminen lisää ostajien luottamusta ja poistaisi tarpeen kolmansien osapuolten tekemälle sertifioinnille. Myös **yri-tysten vastuullisuusraportoinnin ja -datan varmentaminen** helpottuisi ja tarkentuisi lohkaketjuteknologian käytön myötä. Sovelluskohteen avulla voisi kehittää yritysten vastuullisuusraportointia ja vaikuttaa täten yritysten toimintamalleihin.

Lohkoketjuteknologiaa on suunniteltu hyödynnettäväksi myös **ydinmateriaali-valvonnassa** (Säteilyturvakeskus, 2020). Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen hallinta vaatii luotettavan kirjanpidon ydinmateriaalivalvontaa varten. Korkea-aktiivisen ydinjätteen loppusijoittaminen kallioperään on kansainvälisesti arvioitu turvallisimmaksi tavaksi huolehtia käytetystä ydinpolttoaineesta. Kun käytetty polttoaine lasketaan lähes puolen kilometrin syvyyteen, materiaalin fyysinen varmentaminen ei ole enää mahdollista. Tämä korostaa ydinmateriaalikirjanpidon eheyden, tietoturvan ja säilyvyyden merkitystä, johon lohkaketjuteknologia voi vastata.

6.3 Rahoitusratkaisut

Nykyistä rahoitusmallia suoraviivaisempi rahoitusprosessi voi johtaa kestävien innovaatioiden nopeampaan kehittämiseen ja käyttöönottoon. Onkin arveltu, että yksi ratkaisu voisi olla **kryptovaluutat kestävien kasvuyritysten pääoman lähteenä** (Global e-Sustainability Initiative & Deloitte, 2019).

Initial Coin Offering (ICO) on kryptovaluutoin käytävä joukkorahoituksen muoto, jota voidaan verrata listautumisantiin (Initial Public Offering, IPO). ICO on erityisen tehokas pääomanhankintakeino kasvuyrityksille, jotka voivat tavoittaa suuren määrän sijoittajia helposti ja globaalisti. Lisäksi pääoma vaihtaa omistajaa erittäin nopeasti, sillä kryptovaluuttojen transaktionopeus on lähes reaaliaikainen. Nopea pääoman vaihdanta taas lisää innovaatioita ja talouskasvua. Suoraviivaisempi rahoitusprosessi voi johtaa ilmaston- ja ympäristönmuutoksen kannalta kestävien, mutta myös haitallisten innovaatioiden nopeampaan kehittämiseen ja käyttöönottoon. Tällä hetkellä kryptovaluuttojen sekä lohkaketjun hyödyntäminen ylipäänsä on kuitenkin vielä hyvin rajallista.

6.4 Kannustinjärjestelmät

Lohkoketjuteknologiaa voidaan hyödyntää myös **ilmaston- ja ympäristönmuutokselle suotuisan toiminnan kannustinjärjestelmien toteuttamiseksi**. Tällaisissa kannustinjärjestelmissä yrityksiä, yhteisöjä ja kansalaisia palkitaan ilmaston- ja ympäristönmuutoksen kannalta suotuisasta toiminnasta ja käyttäytymisestä, ja toiminnan todentaminen ja palkkion myöntäminen tehdään läpinäkyväksi ja luotettavaksi lohkaketjuteknologialla.

Maailmalla ja Suomessa on käynnistetty kokeiluja lohkaketjuun ja kryptovaluuttoihin perustuvista kannustinjärjestelmistä: esimerkiksi Barcelonan, Bristolin, Helsingin ja Tampereen kaupungit ovat käynnistäneet kehityshankkeita liittyen paikallisrahaan, jota voi hyödyntää vain kaupungin paikallisiin palveluihin ja joilla siten pyritään kannustamaan kaupunkilaisia paikallisten palveluiden käyttämiseen (Aalto-yliopisto, 2018). Lisäksi on luotu kryptovaluuttoja kuten Hullcoin, joita voi ansaita tekemällä vapaaehtoistyötä ja jotka oikeuttavat alennuksiin paikallisissa yrityksissä (Hullcoin, 2020).

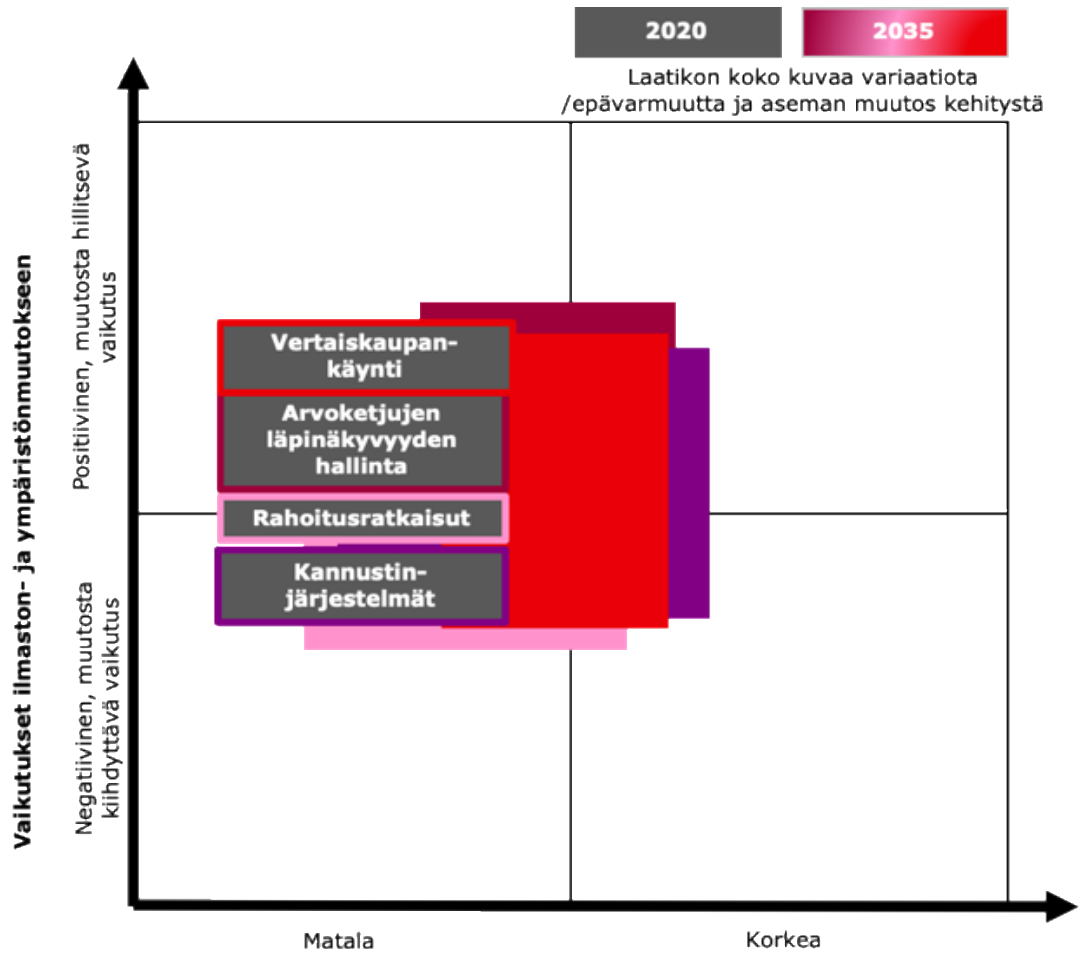
Lohkoketjuteknologiaan perustuvat kannustinjärjestelmät ovat vielä kokeilujen asteella eivätkä ole toistaiseksi maailmalla tai Suomessa saavuttaneet laaja-alaista suosiota. Lohkoketjuun perustuvien ympäristön- ja ilmastonmuutoksen kannustinjärjestelmien toteutuminen vaatisi erityisesti kryptovaluuttojen laaja-alaisempaa käyttöönottoa ja arkipäiväistymistä. Tämän vuoksi sovelluskohde ei ole toistaiseksi globaalisti eikä Suomen näkökulmasta erityisen merkittävä. Sovelluskohteen merkittävyys voi mahdollisesti kasvaa tulevaisuudessa, mikäli kryptovaluuttojen käyttö yleistyy merkittävästi.

6.5 Yhteenveto vaikutuksista

Lohkoketjujen potentiaalisia sovellusaloja ovat vertaiskaupankäynti, arvoketjujen läpinäkyvyyden hallinta ja luotettavuus, rahoitusratkaisut sekä kannustinjärjestelmät, joiden kaikkien vaikutukset ympäristöön ja ilmastoon ovat epäsuoria. Lohkoketjuteknologia perustuu hajautettuun tietokantaan, ja tällaisen hajautetun tietokantajärjestelmän ylläpito ja käyttö on paljon keskitettyä tietokantajärjestelmää energiantensiivisempää. Asiantuntijoiden arvioiden mukaan nykyisellään lohkoketjuteknologian negatiiviset ilmasto- ja ympäristövaikutukset ovat suhteessa paljon merkittävämmät kuin mahdolliset positiiviset vaikutukset. Yhteenveto aihealueen teknologioiden merkittävimmistä ilmasto- ja ympäristövaikutuksista on esitetty taulukossa 6 ja sovellusaloista kuvassa 7.

Taulukko 6 Yhteenveto aihealueen teknologioiden merkittävimmistä positiivisista ja negatiivisista ilmasto- ja ympäristövaikutuksista

Merkittävimmät positiiviset vaikutukset	Merkittävimmät negatiiviset vaikutukset
- Uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntyminen (vertaiskaupankäynti) - Kestävä ja vastuullinen tuotanto ja raportointi (arvoketjujen läpinäkyvyyden hallinta) - Suoraviivaisempi rahoitus voi johtaa kestävien innovaatioiden nopeampaan kehittämiseen ja käyttöönottoon (rahoitusratkaisut) - Ilmaston- ja ympäristömuutokselle suotuisan toiminnan kannustinjärjestelmät	- Lohkoketjujen louhinnan energiankulutus (kaikki sovellusalat). - Suoraviivaisempi rahoitus voi johtaa myös ilmaston- ja ympäristömuutoksen kannalta haitallisten innovaatioiden nopeampaan kehittämiseen ja käyttöönottoon (rahoitusratkaisut)



Kuva 7 Lohkoketjuteknologian sovellusalat

Vertaiskaupankäynti: Sovellusala ei laajamittaisesti käytössä Suomessa - tulevaisuudessa merkittävyys voi kasvaa huomattavasti, mikäli sovellusalaa aletaan käyttämään ja se skaalautuu, ja sen vaikutukset voivat olla maltillisen negatiivisia tai keskiverto positiivisia.

Arvoketjujen läpinäkyvyyden hallinta: Sovellusala ei laajamittaisesti käytössä Suomessa - tulevaisuudessa merkittävyys todennäköisesti kasvaa, mikäli sovellusalaa aletaan käyttämään, ja sen vaikutukset voivat olla maltillisen negatiivisia tai keskiverto positiivisia.

Rahoitusratkaisut: Sovellusala ei laajamittaisesti käytössä Suomessa mutta merkitys ilmastoon- ja ympäristön näkökulmasta on hyvin matala - mikäli sovellusalan käyttö lisääntyy tulevaisuudessa, vaikutukset voivat olla maltillisen positiivisia tai negatiivisia.

Kannustinjärjestelmät: Sovellusala ei laajamittaisesti käytössä Suomessa - tulevaisuudessa merkittävyys voi kasvaa huomattavasti, mikäli sovellusalaa aletaan käyttämään ja se skaalautuu, ja sen vaikutukset voivat olla keskiverto positiivisia.

7 Robottiikka ja autonomiset järjestelmät

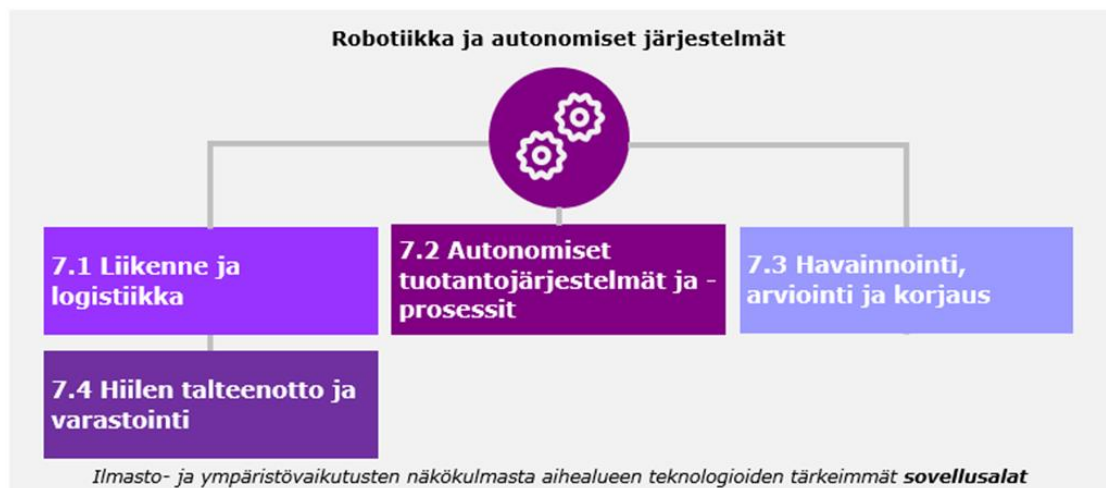
Robottiikka ja autonomiset järjestelmät -aihealueen teknologioita hyödynnetään Suomessa jo laajamittaisesti etenkin teollisuudessa, jossa kyseisiä teknologioita käytetään prosessien tehostamiseen ja hukan vähentämiseen autonomisten tuotantojärjestelmien ja -prosessien avulla. Hyödyntämisen odotetaan yhä yleistyvän kohti vuotta 2035 teknisten tuotantojärjestelmien hintojen tasaantuessa.

Sovellusalan teknologioiden kehityksessä korostuu ihmisten korvaaminen erilaisissa operaatioissa ja palveluissa, joka osaltaan herättävät myös huolta mm. teollisuusalan työpaikoista. Uuden sukupolven robotit hyödyntävät toiminnassaan tekoälyä, mikä mahdollistaa uudet ja yhä monimutkaisemmat sovelluskohteet tulevaisuudessa.

Autonomisten järjestelmien saralla tutkimus- ja kehitystyö keskittyy etenkin liikenteeseen ja logistiikkaan. Teknologiaa voidaan hyödyntää julkisessa liikenteessä, kuten metrojen operoinnissa, mutta myös yksittäisten ajoneuvojen operoinnissa yleisissä tai suljetuissa liikennesysteemeissä. Onkin todennäköistä, että liikenteen ja logistiikan automaatio ottaa suuria harppauksia vuoteen 2035 mennessä.

Teknologian avulla voidaan myös saavuttaa ja saada tietoa paikoista, joihin ihmisten on vaikeaa tai mahdotonta päästä. Satelliitit ovat hyvä esimerkki aihealueen teknologiasta, joka on mullistanut paikantamisen ja havainnoinnin, ja jonka saralla otetaan edelleen huomattavia kehitysaskelia.

Robottiikka ja autonomiset järjestelmät -aihealueen ilmasto- ja ympäristövaikutusten näkökulmasta tärkeimmät sovellusalat on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8 Robottiikka ja autonomiset järjestelmät -aihealueen teknologioiden osalta selvityksessä tarkasteltavat sovellusalat

7.1 Liikenne ja logistiikka

Robottiikan ja autonomisten järjestelmien arvioidaan olevan tulevaisuuden liikennejärjestelmän keskiössä. Teknologia muokkaa melko todennäköisesti yksityisautoilua, rahtiliikennettä, laivaliikennettä ja yritysten sisälogistiikkaa huomattavasti vuoteen 2035 mennessä.

Tieliikenteen automaatiolla vähennetään ihmisten päätöksentekoa liikenteessä. Merkittävimmiä sovelluskohteiksi nähdään etenkin rahtiliikenne ja julkinen liikenne. **Täysin automaattiset ajoneuvot** eivät ole vielä markkinoilla ja sovelluskohteeseen liittyy paljon epävarmuutta. Sovelluskohteen käyttöönotto riippuu

merkittävästi myös politiikasta ja lainsäädännön kehittymisestä. On kuitenkin mahdollista, että täysin automaattiset ajoneuvot yleistyvät suljetuilla alueilla, kuten teollisuusalueilla ja lentokentillä, nopeallakin aikataululla.

On arvioitu, että ilman poliittista ohjausta tieliikenteen automaatio ei todennäköisesti johda vähähiilisempään liikenteeseen (Slowik & Kamakaté, 2017). Sovelluskohteen potentiaali vähentää päästöjä riippuukin vahvasti siitä, toteutuuko automaatio yhdessä tieliikenteen sähköistymisen ja jakamistalouden kanssa. Pelkkä automaatio ja sähköistyminen yhdessä mahdollisesti lisäävät liikenteen kasvihuonekaasuja (International Energy Agency, 2017), sillä automaation tuoma vaivatompampi ja turvallisempi henkilöautoilu voi johtaa yksityisautoilun suosion kasvuun. Joidenkin tutkimusten mukaan lisääntynyt matkustus voisi johtaa jopa 50 % suurempaan energiankäyttöön (Slowik & Kamakaté, 2017). Lisääntyvät ruuhkat voivat samaten potentiaalisesti vaikuttaa negatiivisesti paikalliseen ilmanlaatuun. **Rahtiliikenteen automaatio** taas tekee kuljetustavasta kustannustehokkaamman ja täten houkuttelevamman (International Energy Agency, 2017). Teknologiaa voidaan hyödyntää myös meriliikenteessä tieliikenteen tavoin.

Osittain automaattiset ajoneuvot ovat sen sijaan jo tulleet markkinoille. Niihin liittyy samanlainen arvio tieliikenteen lisääntymisestä, mutta muutoksen mitta-kaava ei kuitenkaan todennäköisesti ole verrattaessa täysin automatisoituihin ajoneuvoihin, koska ajokokemuksen muutos ei ole yhtä radikaali ja vaatii yhä kuljettajan. On myös tutkittu, että sovelluskohteella olisi positiivinen vaikutus ajoneuvojen polttoaineen käyttöön esim. ekoajon ja kolarien minimoimisen myötä (Slowik & Kamakaté, 2017). Semi-autonomisten ajoneuvojen odotetaan yleistyvän lähitulevaisuudessa ja vuonna 2035 ne ovat todennäköisesti arkipäiväisiä.

Automaatio on osa älykkään liikennejärjestelmän ideaalia, ja sillä on synergioita tieliikenteen sähköistymisen kanssa - on esimerkiksi tutkittu, että automaatioteknologia saattaa olla helpompi toteuttaa sähköisiin ajoneuvoihin (drive-to-wire). International Council on Clean Transportationin (2017) mukaan tieliikenteen automaatio ei kuitenkaan automaattisesti johda sähköistymiseen.

Miehittämättömien ja automatisoitujen ilma-alusten eli **droonien hyödyntämisen tavarankuljetukseen** voisi mahdollisesti vähentää tavaraliikennettä etenkin kaupunkialueilla (International Energy Agency, 2017). Droonien käyttö tavaraliikenteessä on alkuvaiheessa ja merkittävänä haasteena on kuljetusten koko- ja painorajoitukset. Sovelluskohde on myös vahvasti riippuvainen lainsäädännöstä ja sen tulevasta kehittymisestä sekä liikenteenohjausjärjestelmän ja tarvittavien viestintäyhteyksien kehityksestä. Tutkimusten mukaan sovelluskohteen positiiviset ilmastovaikutukset, kuten tavaraliikenteen päästöjen väheneminen, ovat rajallisia ja riippuvaisia kontekstista (Goodchild & Toy, 2017): esimerkiksi sillä, toimivatko droonit polttomoottorilla vai akulla on merkittävä vaikutus. Lisäksi droonien ja rahdin varastointijärjestelyt ja reittien suunnittelu ovat avainasemassa tavaraliikenteen päästöjen vähentämisessä, sillä droonien käyttö tavaraliikenteessä vaatisi hajautetun tavaravarastoverkoston (Stolaroff et al., 2018). Tällä hetkellä mm. droonien akunkesto rajoittaa skaalattavuutta kaupunkikeskusten ulkopuolelle. Harvaan asuttuna maana sovelluskohteen ei arvioida olevan Suomelle merkittävä ainakaan ennen akkuteknologioiden merkittävää parantumista.

7.2 Autonomiset tuotantojärjestelmät ja -prosessit

Logistiikkarobotiikkaa voidaan hyödyntää myös pienimuotoisesti **yritysten sisälogistiikan välineenä**. Teknologiaa voidaan korvata perinteistä ihmistyötä, kuten tavarankäsittelyä, vastaanottoa ja lajittelua varastoympäristöissä (Global e-Sustainability Initiative & Deloitte, 2019). Teknologiaa käytetään jo kuvaillusti varsinkin suurissa yrityksissä. Sillä on mahdollisesti positiivinen vaikutus sähköistymiseen, koska se korvaa perinteisiä logistiikkaratkaisuja. Varastotyössä robotiikan suuri energiankulutus kompensoituu mahdollisesti esimerkiksi valaistuksen ja

ilmastoinnin energiatarpeiden vähenemisen kautta. Sovelluskohteen vaikutukset ilmastoon ja ympäristöön ovat kuitenkin maltilliset.

Työkoneiston automatisointia on periaatteessa mahdollista tehdä lähes millä tahansa tuotannon osa-alueella. E erityisen merkittävänä sovelluskohde nähdään maataloudelle, jossa tehdään vielä paljon manuaalisia työvaiheita. Esimerkiksi maatalan tietojärjestelmään linkitetty robottitraktori voisi vähentää manuaalisia työvaiheita.

Robottiikka ja autonomiset järjestelmät -sovellusalueen teknologioiden käyttö ulottuu myös energiantuotantoon. Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen -aihealueella esitettiin sovelluskohteita liittyen energiantuotannon tehostamiseen. On huomiotava, että myös robotiikalla on asiassa osansa. Robotteja voidaan käyttää myös suuremmin **korkeariskisissä työtehtävissä työskentelevän työvoiman korvaamiseen**, esimerkiksi kivihiilientuotannossa energia-alalla. Miehittämättömien hiilikaivoksien on arvioitu olevan mahdollisia ja käytössä 2030 mennessä (International Energy Agency, 2017). Sovelluskohteen merkittävyys on Suomelle matala, mutta nopeasti ja laaja-alaisesti skaalattuna sen vaikutukset globaaliin energijärjestelmään voivat olla merkittävät.

7.3 Havainnointi, arviointi ja korjaus

Robotteja, kuten drooneja, voidaan hyödyntää havainnointiin, arviointiin ja korjaukseen. Niiden avulla on mahdollista tehdä havaintoja paikoista, jotka ovat ihmiselle vaikeasti saavutettavia.

Drooneja voidaan käyttää **tuotantojärjestelmien ja -prosessien tarkastuksiin ja korjaamiseen** esimerkiksi energiantuotannossa (International Energy Agency, 2017). Erityisillä sensoreilla varustettuja droneja voidaan käyttää energiantuotantoinfrastruktuurin, kuten merituulipuistojen ja kaasuputkien, tarkastuksiin ja korjaustoimiin. Sovelluskohteen avulla voidaan mm. tunnistaa energiavuotoja verkossa ja näin ollen vähentää energiansiirrossa tapahtuvaa hävikkiä, jolloin suurempi osa tuotetusta energiasta pystytään hyödyntämään, mikä teoriassa vähentää hieman energiantuotantotarvetta ja täten tuotannon päästöjä. Etänä tehtävät korjaukset myös mahdollisesti vähentävät huoltomatkustamista. Sovelluskohteen merkitys varmasti kasvaa kohti vuotta 2035, sillä se osaltaan tukee hajautetun energiantuotantojärjestelmän ylläpitoa.

Erityisillä sensoreilla varustettujen droonien avulla voidaan myös saada täysin uudenlaista kuvaa luonnosta ja sen tilasta. Droonien ja muiden robottien käyttäminen **ympäristöarvioinnissa ja -valvonnassa** voi tarkoittaa esimerkiksi maankäytön valvonnan tehostamista ja laittomien metsähakkuiden identifioimista, tai jääpeitteen määrän arviointia (International Energy Agency, 2017). Sovelluskohteen käyttö etenkin metsien hiilivarastojen mittaamisen voisi edistää kompensatiotoimintaa ja toiminnan luotettavuutta. Myös esimerkiksi kasvilajiston mittaaminen olisi ympäristön kannalta mahdollisesti hyvinkin vaikuttava sovelluskohde. Robotiikan hyödyntäminen **vedenalaisessa ympäristöarvioinnissa ja -valvonnassa** voi puolestaan tarjota täysin ainutlaatuista tietoa merien tilasta (ITU, 2020).

Arvioinnin ja valvonnan lisäksi droonit mahdollistavat **uudenlaisen ympäristöviestinnän**. Sovelluskohde saattaa vaikuttaa ihmisten kulutuskäyttäytymiseen ja tietoisuuden lisäämiseen ja tätä kautta ympäristön- ja ilmastonmuutokseen. Erään tutkimuksen mukaan 88 % henkilöistä, jotka katsoivat Blue Planet 2 -sarjan (jossa drooneja käytetty laaja-alaisesti luonnon kuvaamiseen) jakson muovista muuttivat kulutuskäyttäytymistään kestävämmäksi (Waitrose & Partners, 2019). Sovelluskohteen vaikutukset ovat mahdollisesti saavuttaneet täyden potentiaalinsa jo nyt, eikä vaikutusten vähenemistä tulevaisuudessa ole syytä olettaa.

7.4 Hiilen talteenotto ja varastointi

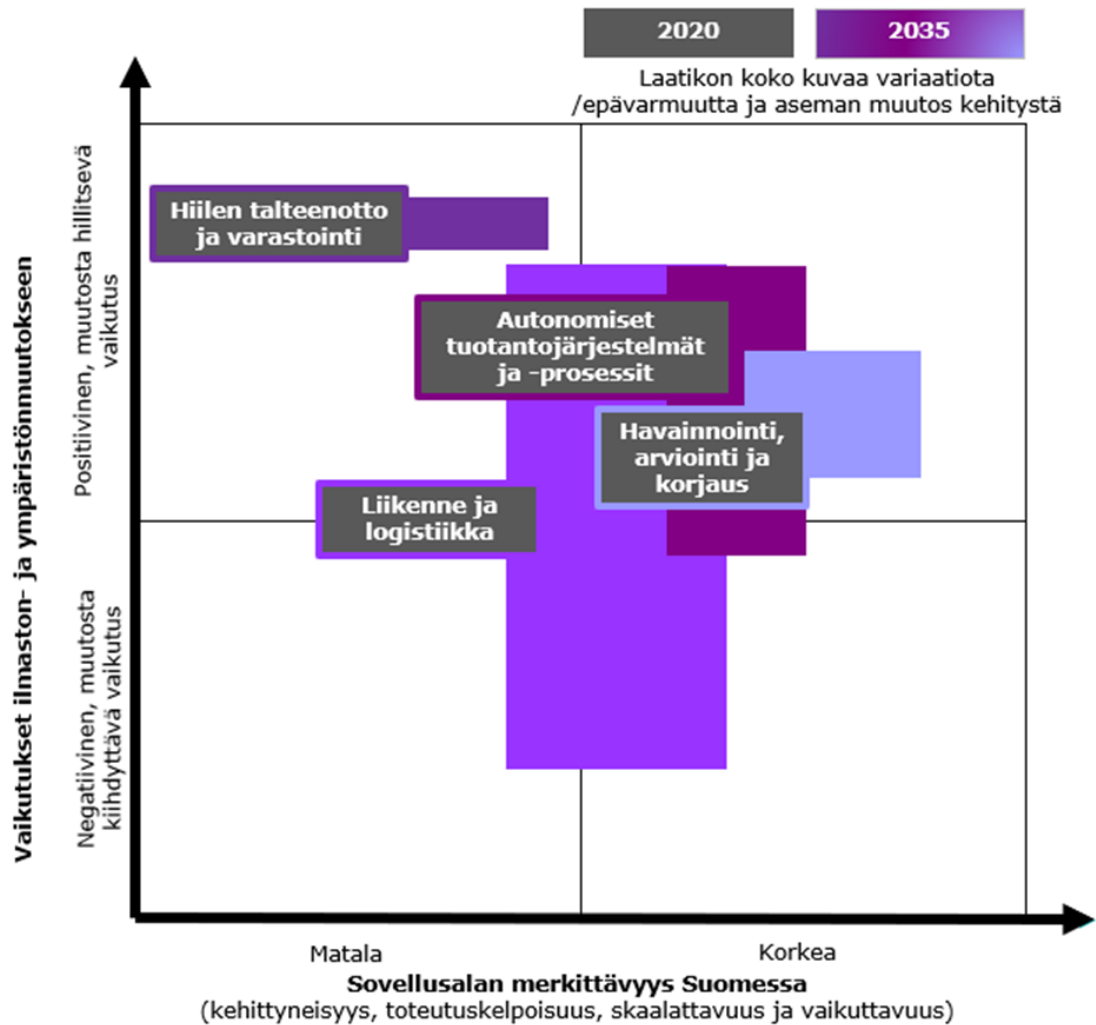
Tällä hetkellä on kehitteillä useita tekniikoita ja laitteita, joilla voidaan **ottaa talteen ja varastoida hiiltä suoraan ilmakehästä**. Yksi tutkimuksen suunta on kehittää puita muistuttavaa robotiikkaa, jotka matkivat fotosynteesiä. Nämä puumaiset robotit voivat poistaa ilmasta hiilidioksidia esimerkiksi mikrolevän avulla ja niitä on jo käytössä esimerkiksi Singaporessa. On hyvin mahdollista, että robotipuut ovat vuonna 2035 merkittävässä roolissa etenkin paikallisten päästokeskittymien ilmasto- ja ympäristövaikutusten hillitsemisessä.

7.5 Yhteenveto vaikutuksista

Robotiikka ja autonomiset järjestelmät -aihealueen teknologioita hyödynnetään jo laaja-alaisesti teollisuudessa ja niiden odotetaan leviävän laajemmalle yhteiskuntaan tulevaisuudessa. Toiminnan ja prosessien tehostaminen, manuaalisen työn väheneminen ja uusien kuvakulmien mahdollistaminen ovat ne menetelmät, joiden kautta myös aihealueen teknologioiden ilmasto- ja ympäristövaikutukset rakentuvat. Robotiikan ja autonomisten systeemien hyödyntäminen ihmisen toiminnan tehostamiseen ja avustamiseen on ilmasto- ja ympäristönäkökulmasta pääasiallisesti positiivinen kehityssuunta, mutta hyvin radikaalisti ihmisten ja yhteiskunnan toimintaa muokkaavien sovelluskohteiden kehittämisen voi olla ennalta arvaamattomia käänteisvaikutuksia. Yhteenveto aihealueen teknologioiden merkittävimmistä ilmasto- ja ympäristövaikutuksista on esitetty taulukossa 7 ja sovellusaloista kuvassa 9.

Taulukko 7 Yhteenveto aihealueen teknologioiden merkittävimmistä positiivisista ja negatiivisista ilmasto- ja ympäristövaikutuksista

Merkittävimmät positiiviset vaikutukset	Merkittävimmät negatiiviset vaikutukset
- Rahtiliikenteen ja sisälogistiikan automatisaatio ja optimointi tekee kuljetuksesta kustannustehokkaampaa ja vähäpäästöisempää (liikenne ja logistiikka) - Etähuolto ja -monitorointi pidentää laitteiden elinkaarta (havainnointi, arviointi ja korjaus) - Ympäristövaikutusten mittaaminen robottien avulla auttaa arvioimaan luonnon tilaa (havainnointi, arviointi ja korjaus) - Hiilen sitominen pois ilmakehästä (hiilen talteenotto ja varastointi)	- Robottien ja autonomisten järjestelmien energiankulutus (kaikki sovellusalat). - Tieliikenteen mahdollinen lisääntyminen täysautomatisaation kautta, johtaa kasvavaan energiankulutukseen (liikenne ja logistiikka) - Louhinnan tehostuminen ja edistäminen saattaa hidastaa siirtymää pois fossiilisista (automaattiset tuotantojärjestelmät ja prosessit)



Kuva 9 Robotiikka ja autonomiset järjestelmät aihealueen teknologioiden sovellusalat

Liikenne ja logistiikka: Liikenteen ja logistiikan automaatio on vielä kehityksen alkuvaiheessa – tulevaisuudessa sovellusalan merkittävyys varmasti kasvaa käytön skaalautuessa, mutta kehityksen vaikutukset eivät ole välttämättä ilmaston- ja ympäristömuutosta hillitseviä.

Autonomiset tuotantojärjestelmät ja -prosessit: Sovellusala on jo laaja-alaisesti käytössä etenkin teollisuudessa ja tehostamisella arvioidaan olevan positiivinen vaikutus ilmastoon ja ympäristöön – tulevaisuudessa uudet sovelluskohteet voivat lisätä sovellusalan käyttöä Suomessa, mutta toisaalta automaatioprosessit saattavat kiihdyttää ilmaston- ja ympäristömuutosta esimerkiksi lisäämällä tuotannon energiatarvetta.

Havainnointi, arviointi ja korjaus: Sovellusala on jo käytössä ja sillä on pääasiassa positiivisia suoria ympäristö- ja ilmastovaikutuksia – tulevaisuudessa vaikutuksissa ei merkittävää muutosta, mutta merkittävyys saattaa lisääntyä esimerkiksi drooni-teknologian yleistyessä.

Hiilen talteenotto ja varastointi: Sovellusala on kehityksensä alkuvaiheessa – Suomen energiapolitiikan valossa sovellusalan merkittävyys on Suomelle matala.

8 Kvanttitekнологia

Kvanttitekнологian soveltamisessa suurin mielenkiinto liittyy kvanttietokoneisiin ja niiden avulla suoritettavaan suurteholaskentaan, mutta ensimmäisten kvanttietokoneiden kehitystyö on vielä kesken. Toistaiseksi kvanttietokoneet ovat samanlaisia kuin perinteiset tietokoneet olivat kehityksensä alkuvaiheessa: erittäin kalliita sekä toiminnoiltaan epävarmoja ja rajallisia. Kvanttitekнологian uskotaan saavuttavan täyden potentiaalinsa vasta vuosikymmenten päästä, mutta viimeaikaisen kehityksen perusteella ensimmäisten kvanttietokoneiden arvioidaan olevan toiminnassa vuoteen 2035 mennessä ja mahdollistavan ilmaston- ja ympäristömuutoksen kannalta merkittävienkin sovellusten käyttöönoton. Kvanttietokoneiden rakentamisen tai ylläpidon ympäristövaikutukset eivät eroa olennaisesti samankaltaisista laitteistoista.

Kvanttietokoneiden keskeinen odotettu hyöty on, että niiden klassisiin tietokoneisiin verrattuna ylivoimainen laskentateho mahdollistaa tehokkaamman laskennan ja siten erilaisten laskentaintensiivisten ongelmien ratkaisun. Lisäksi kvanttitekнологian energiankulutus on perinteisiin supertietokoneisiin verrattuna lähes mitätön. Periaatteessa voidaan ajatella, että toisin kuin muut tässä selvityksessä tarkastellut teknologiat, kvanttitekнологian käytöllä saadaan lähinnä positiivisia vaikutuksia ilmastoon- ja ympäristöön, koska nopeampi ja energiatehokkaampi ongelmanratkaisu vähentää sähkönkulutusta. Kvanttietokoneiden yleistyessä teknologia voisi siis tulevaisuudessa osittain vastata ICT-alan energiankulutuksen ongelmiin. Jotta vaikutus energiankäyttöön ja täten ICT-alan päästöihin olisi positiivinen (suhteutettuna toteutuneiden laskentojen määrään), kvanttietokoneita tulisi kuitenkin käyttää vain sellaisiin sovelluskohteisiin, jotka eivät ole ratkaistavissa normaaleilla tietokoneilla samalla teholla.

Teknologialle on kuitenkin myös tunnistettu tarkempia sovellusaloja, joissa käytettynä kvanttitekнологian ilmasto- ja ympäristövaikutukset korostuvat. Tällaisia sovellusaloja ovat läpimurrot hiili-intensiivisissä prosesseissa sekä ennustaminen, suunnittelu ja päätöksenteko. Läpimurrot hiili-intensiivisissä prosesseissa -sovellusala sisältää sovelluskohteita, joilla nähdään olevan merkittävä rooli ilmaston- ja ympäristömuutoksen hillitsijänä, ja joiden toteuttaminen on riippuvainen kvanttitekнологian mahdollistamasta laskentatehosta. Ennustaminen, suunnittelu ja päätöksenteko -sovellusala taas koostuu sovelluskohteista, jotka eivät ole riippuvaisia kvanttiteknologiasta, mutta joita kvanttitekнологian avulla voidaan optimoida ja tehostaa. Nämä tärkeimmät sovellusalat on esitetty kuvassa 10.

Kvanttietokoneet myös mahdollistavat muiden teknologioiden kehitystä, minkä kautta kerrannaisvaikutukset ilmastoon ovat mahdollisesti vielä merkittävämmät. Tässä selvityksessä tarkastelluista teknologioista vahvin linkki kvanttiteknologialla on tekoälyyn, algoritmeihin ja koneoppimiseen, sillä kvanttitekнологia voisi huomattavasti tehostaa tekoälyn kehittämistä.



Kuva 10 Kvanttitekнологian osalta selvityksessä tarkasteltavat sovellusalat

8.1 Läpimurrot hiili-intensiivisissä prosesseissa

Kvanttitekniologia mahdollistaa huomattavan tehokkaan molekyylihallinnoinnin, joka mahdollisesti johtaa useisiin läpimurtoihin hiili-intensiivisten prosessien kehityksessä jo seuraavan 10 vuoden aikana.

Tekniologia voi mahdollistaa **”vihreän” ammoniakkin tuotannon** ja nykyisen ammoniakkin tuotantoon käytetyn Haber-Bosch-prosessin korvaamisen uudella ”vihreällä” tuotantotekniologialla. Sovelluskohteella olisi erittäin merkittävä positiivinen vaikutus ammoniakkin tuotannon päästöjen vähenemiseen, sillä Haber-Bosch-prosessi on yksi maailman hiili-intensiivisimmistä prosesseista. (Boston Consulting Group, 2020.)

Kvanttilaskenta voi tehostaa myös **vedyn tuotantoa**. Vedyn valmistusprosessin halpeneminen mahdollistaisi erityisesti teollisuuden hiilipitoisten energianlähteiden korvaamisen ”vihreämmällä” vedyllä. Vedyllä on arvioitu olevan olennainen rooli myös uusiutuviin energiamuotoihin perustuvassa energiajärjestelmän murroksessa, sillä uusiutuvalla sähköllä tuotettu vety on erinomainen hiilivapaan energian välittäjä ja energian varastoija. (Boston Consulting Group, 2020.)

Myös **hiilen sitomista** voidaan tehostaa kvanttitekniologialla. Tehokkaammat katalysaattorit vähentävät hiilen sitomiskustannuksia mahdollistaen uusia sovelluskohteita teolliseen hiilen talteenottoon ja varastointiin. Sovelluskohteella voidaan suoraan vähentää hiilidioksidipäästöjä esimerkiksi energiantuotannossa. (Boston Consulting Group, 2020.)

Yllä kuvattujen sovelluskohteiden toteutuminen vuoteen 2035 mennessä on epävarmaa kvanttietokoneen kehityksen keskeneräisyyden takia. Toisaalta sovelluskohteiden toteutuksen on kuitenkin arvioitu olevan mahdollista jo ensimmäisten kvanttietokoneiden myötä. Myös etenkin ”vihreän” ammoniakkin ja vedyn tuotanto olisivat mahdollisesti ympäristö- ja ilmastovaikutuksiltaan erittäin merkittäviä Suomessa.

8.2 Ennustaminen, suunnittelu ja päätöksenteko

Kvanttitekniologian mahdollistamien kvanttietokoneiden ja kvanttilaskennan synergiat tekoälyn, algoritmien ja koneoppimisen kanssa korostuvat etenkin erilaissa systeemien mallinnuksissa, joissa kvanttitekniologian suurteholaskennan avulla voidaan malleja tuottaa entistä tehokkaammin. Suurteholaskenta mahdollistaa esimerkiksi **kehittyneiden päästö- ja ilmastovaikutusmallien laskennan**, joita voitaisiin käyttää niin yritysten kuin valtioidenkin päätöksenteon tukena.

Kvanttilaskentaa voidaan myös hyödyntää **älykkääseen liikennesuunnitteluun**. Kvanttietokoneiden klassisiin tietokoneisiin verrattuna eksponentiaalinen laskentateho mahdollistaa tarkan ennustamisen liikenteen volyymeistä, eri liikkumismuotojen tarpeesta ja kulkuvälinäkohtaisista matka-ajoista. Sovelluskohteen avulla voidaan välttää kaupunkiliikenteen ruuhkautumista, lyhentää odotusaikoja ja tehostaa kulkuvälineiden saatavuutta tarpeiden mukaan. Tämä vaikuttaisi liikenteen hiilidioksidipäästöjen ja ruuhkien vähenemiseen liikenteen odotusaikojen lyhenemisen ja kulkuvälineiden tehokkaamman käytön myötä. Kvanttitekniologia ei kuitenkaan ole välttämätöntä älykkäässä liikennesuunnittelussa vaan samankaltaisia hyötyjä voidaan saavuttaa myös esimerkiksi nykyisten suurteholaskennan ratkaisujen avulla, ja sovelluskohteen merkitys Suomen kontekstissa on suhteellisen matala.

8.3 Uudet materiaalit

Kvanttitekniologian mahdollistamia kvanttietokoneita ja kvanttilaskentaa voidaan hyödyntää materiaaliteieteessä uusien materiaalien kehityksessä ja optimoinnissa.

Atomien ja molekyylien simulointi klassisen tietokoneen laskentateholla on haastavaa, mutta kvanttietokoneiden suuri laskentateho mahdollistaa simuloinnin tehokkaasti ja onkin yksi kvanttietokoneiden keskeisistä sovelluskohteista.

Kvanttilaskennan ansiosta tulevaisuudessa voi olla mahdollista kehittää uusia **kehittyneitä materiaaleja**. Uudet materiaalit voivat olla nykyisiä materiaaleja kevyempiä, vahvempia ja paremmin eristäviä, ja siten mahdollistaa muun muassa tehokkaamman materiaalien logistiikan, kestävämmät rakennusmateriaalit ja rakennusten paremman energiatehokkuuden. Kvanttilaskennan avulla voi olla mahdollista kehittää myös uusia materiaaleja, joiden valmistus vaatii vähemmän hiiltä ja siten vähentää haitallisia päästöjä. (Boston Consulting Group, 2020.)

Uudet kevyemmät ja vahvemmat materiaalit voivat mahdollistaa **liikennevälineiden paremman energiatehokkuuden** eli pienentää liikennevälineen liikkuamiseen tarvittavaa energiaa. Täysin uusilla materiaaleilla voi olla myös mahdollista korvata liikennevälineissä päästö- tai energiantensiivisiä materiaaleja kuten terästä ja alumiinia. (Boston Consulting Group, 2020.)

Uusia materiaaleja voidaan mahdollisesti myös hyödyntää aurinkopaneelien aurinkokennojen sekä akkujen kehittämisessä, mikä mahdollistaisi **luotettavamat ja tehokkaammat aurinkopaneelit**. (Boston Consulting Group, 2020.)

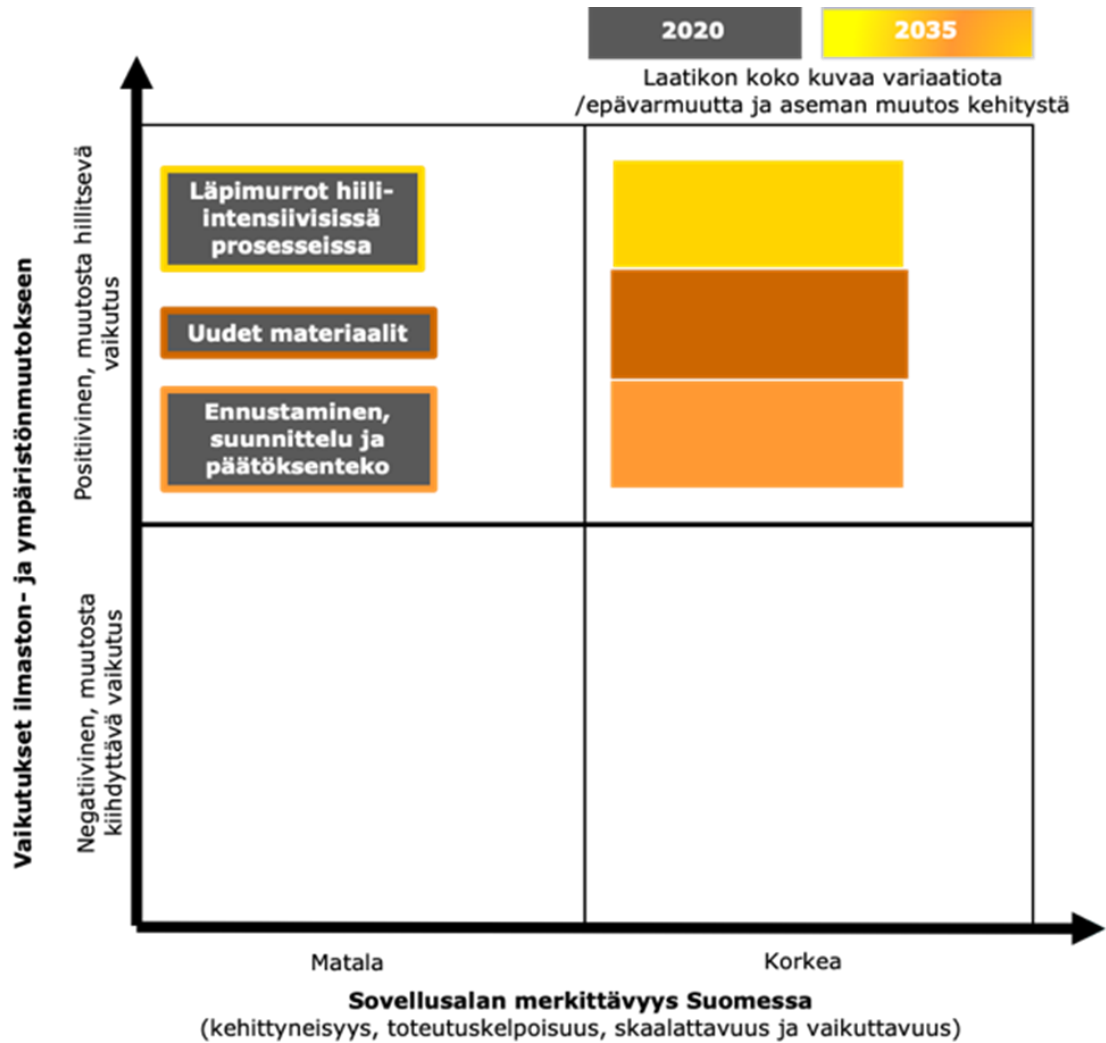
Yllä kuvattujen sovelluskohteiden toteutuminen vuoteen 2035 mennessä on epävarmaa kvanttietokoneen kehityksen keskeneräisyyden takia. Toisaalta uudet materiaalit ovat keskeinen kvanttilaskennan sovelluskohde, jonka saralla tehdään jo nykyisin runsaasti tutkimusta, ja jonka voi olettaa kehittyvän tulevaisuudessa. Suomi on maailmanlaajuisesti tunnettu saavutuksistaan uusien materiaalien tutkimuksessa ja kehittämisessä. Toteutuessaan sovelluskohde voisi muodostua erittäin merkittäväksi sekä globaalisti että Suomessa.

8.4 Yhteenveto vaikutuksista

Kvanttitekniikalla on lähtökohtaisesti positiivinen vaikutus ilmaston- ja ympäristömuutokseen sille ominaisen energiantehokkaan laskennan vuoksi. Teknologia voi mahdollisesti olla käytössä vuonna 2035, mutta sen kehitys on yhä hyvin epävarmaa. Yhteenveto aihealueen teknologioiden merkittävimmistä ilmasto- ja ympäristövaikutuksista on esitetty taulukossa 8 ja sovellusaloista kuvassa 11.

Taulukko 8 Yhteenveto aihealueen teknologioiden merkittävimmistä positiivisista ja negatiivisista ilmasto- ja ympäristövaikutuksista

Merkittävimmät positiiviset vaikutukset	Merkittävimmät negatiiviset vaikutukset
- Hiili-intensiivisten tuotantoprosessien korvaaminen vihreillä ratkaisulla (hiili-intensiiviset prosessit) - Hiilivoimaloiden hiilidioksidipäästöjen väheneminen (hiili-intensiiviset prosessit) - Kehittyneiden mallinnusten rakentaminen (ennustaminen, suunnittelu ja päätöksenteko) - Uudet kehittyneet materiaalit	Saattaa hidastaa siirtymää pois hiilivoimaloista (läpimurrot hiili-intensiivisissä prosesseissa)



Kuva 11 Kvanttiteknologian sovellusalat

Läpimurrot hiili-intensiivisissä prosesseissa: Sovellusala on vasta kehityksensä alussa, mutta sillä on arvioitu olevan merkittäviä positiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia – mikäli kvanttiteknologian käyttö on mahdollista vuonna 2035, on sovellusala mahdollisesti merkittävä Suomen teollisuudelle.

Ennustaminen, suunnittelu ja päätöksenteko: Sovellusala on vasta kehityksensä alussa, mutta sillä on arvioitu olevan positiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia – mikäli kvanttiteknologian käyttö on mahdollista vuonna 2035, on sovellusala mahdollisesti merkittävä Suomelle.

Uudet materiaalit: Sovellusala on vasta kehityksensä alussa, mutta sillä on arvioitu olevan merkittäviä positiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia – mikäli kvanttiteknologian käyttö on mahdollista vuonna 2035, on sovellusala mahdollisesti merkittävä Suomen teollisuudelle.

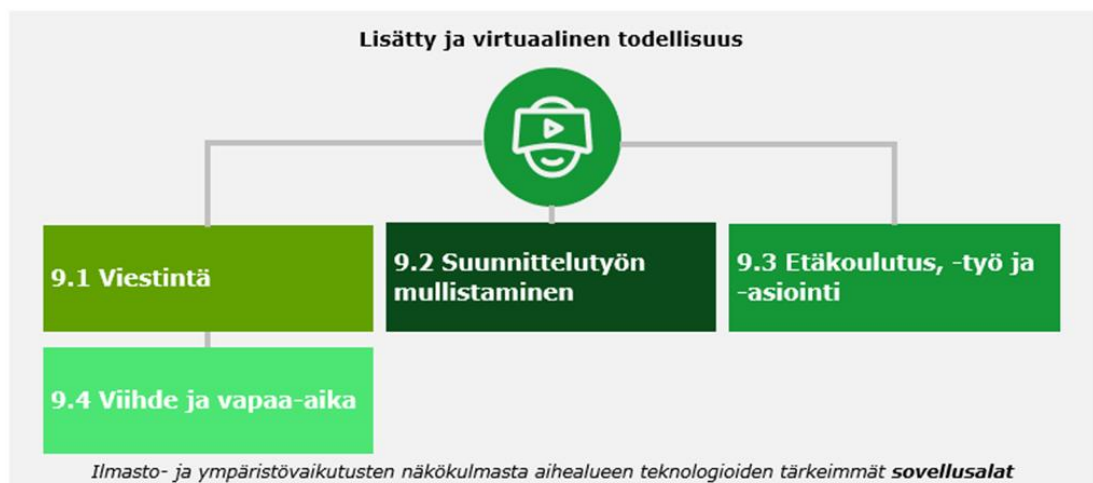
9 Lisätty ja virtuaalinen todellisuus

Lisätty ja virtuaalinen todellisuus -aihealueen teknologiat ovat tällä hetkellä murrosvaiheessa ja tutkimusta sekä kehitystyötä tehdään Suomessakin sekä yliopistoissa, että yritysmaailmassa. Lisättyä todellisuutta hyödynnetään jo paljon eri älypuhelinsovelluksissa ja teknologian odotukset keskittyvät etenkin lisätyn todellisuuden lasien (AR-lasit) yleistymiseen, jotka lisäävät teknologian käytettävyyttä esimerkiksi teollisuuskäytössä. Myös virtuaalisen todellisuuden ratkaisuja on jo markkinoilla sekä teollisuus- että kuluttajakäyttöön, mutta käyttö ei ole vielä laaja-alaista.

Aihealueen teknologioiden merkittävimmät sovelluskohteet liittyvät viestintään, suunnittelutyöhön, koulutukseen ja viihteeseen. Vuoteen 2035 mennessä virtuaalisen ja lisätyn todellisuuden käyttö voi jo levittyä laajalle kaikilla näillä sovellusaloilla. Mahdollisten ilmasto- ja ympäristövaikutusten arvioiminen on kuitenkin vaikeaa, sillä nämä vaikutukset ovat pääasiassa epäsuoria ja riippuvat vahvasti siitä, miten yksilöt ja organisaatiot muuttavat käyttäytymistään esitettyjen sovelluskohteiden myötä. Lisätty ja virtuaalinen todellisuus -aihealueen ilmasto- ja ympäristövaikutusten näkökulmasta tärkeimmät sovellusalat on esitetty kuvassa 12.

Lisätty ja virtuaalinen todellisuus aihealueen teknologioille on ominaista, että samaa elektroniikkaa käytetään yleensä useaan eri sovelluskohteeseen. Esimerkiksi virtuaalitodellisuuselektroniikkaa voidaan käyttää etäoppimisen lisäksi pelaamiseen. Tämän vuoksi aihealueen teknologioiden tuotannon ja elinkaaren lopun negatiiviset ilmasto- ja ympäristövaikutukset tulisi allokoida eri sovelluskohteiden kesken. Toisaalta esimerkiksi etäoppimisella saavutetut positiiviset ilmastovaikutukset voivat vähentyä, jos laitteistolla käytetään mittavissa määrin viihteellisiä palveluja, joiden käyttö vaatii korkean laskentatehon ja paljon energiaa.

Aihealueen teknologioiden käyttö painottuu yksityisiin kuluttajiin ja organisaatioihin. Aihealueen ilmasto- ja ympäristövaikutuksille onkin olennaista, tuleeko esimerkiksi virtuaalitodellisuusteknologiasta jokaisen kotitalouden peruskodinelektroniikkaa, eli miten suureksi teknologiaan liittyvän elektroniikan määrä kasvaa. Mikäli elektroniikka leviää laajasti kaikkiin kotitalouksiin, tulisi sen sovelluskohteilla olla erittäin merkittäviä positiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia, jotta teknologian nettovaikutukset jäisivät positiivisiksi.



Kuva 12 Lisätty ja virtuaalinen todellisuus aihealueen teknologioiden osalta selvityksessä tarkasteltavat sovellusalat

9.1 Viestintä

Virtuaalista ja lisättyä todellisuutta voidaan hyödyntää ilmasto- ja ympäristöviestinnässä. Vakuuttava virtuaalinen teknologia (engl. persuasive virtual technology) on uusi ala, jonka tarkoituksena on kehittää ihmisten asenteita ja käyttäytymistä muokkaavia ohjelmia. On arvioitu, että virtuaalinen todellisuus voi olla erityisen tehokas teknologia tällaiseen viestintään ja **virtuaalinen ilmasto- ja ympäristöviestintä** on yksi sen mahdollinen sovelluskohde. Virtuaalitodellisuus mahdollistaa entistä vaikuttavamman tiedottamisen ilmastomuutoksen vaikutuksista, sillä sen avulla voi simuloida esimerkiksi merenpinnan nousua rannikkoalueen asukkaille (Global e-Sustainability Initiative & Deloitte, 2019). Hyvin suunnitellulla ja toteutetulla simulaatiolla voi olla hyvinkin merkittävä vaikutus ihmisten elämäntapaan ja sovelluskohteen toteuttaminen on jo mahdollista, joskin todellisuuden tarkka jäljittely on hidasta. Vuoteen 2035 mennessä tämän sovelluskohteen osalta on kuitenkin voitu ottaa jo merkittäviäkin edistysaskeleita.

Lisätyllä todellisuudella voidaan **tukea kuluttajien kestävämpää päätöksentekoa**. Teknologian avulla kuluttajille voidaan esimerkiksi näyttää ilmaston- ja ympäristömuutokseen liittyvää tietoa reaaliaikaisesti eri tuotteista ja palveluista ostopäätöstä tehdessä. Sovelluskohteella voidaan sekä lisätä ympäristötietoisuutta, että helpottaa ilmastoystävällisten ostopäätösten tekemistä. Teknologiaa voidaan kuitenkin käyttää myös muunlaisen lisätiedon viestimiseen, joten sovelluskohteen vaikutuksia tulevaisuudessa on mahdotonta arvioida.

9.2 Suunnittelutyön mullistaminen

Lisätty ja virtuaalinen todellisuus voi vaikuttaa merkittävästi suunnittelutyöhön kaikilla yhteiskunnan osa-alueilla. **Teollisuuden tuotantoprosessien virtualisointi** on jo jossain määrin käytössä oleva sovelluskohde (Global e-Sustainability Initiative & Deloitte, 2019). Tämä tarkoittaa käytännössä teollisuuden tuotannossa olevien tuotteiden testausta, visualisointia ja tuotekehitystä simuloidussa ympäristössä niiden täydessä mittakaavassa. Sovelluskohteen avulla suunnittelutyö voidaan toteuttaa globaalisti ja virtuaalisesti eri sidosryhmien kesken, mikä vähentää tuotekehitykseen perinteisesti kuuluvan matkustamisen tarvetta ja tätä kautta tuotekehityksen päästöjä. Simuloiduilla prototyypeillä voidaan lisäksi korvata fyysiset prototyypit, mikä vähentää materiaalien käyttöä prototyyppien koosta riippuen merkittävästikin (Global e-Sustainability Initiative & Deloitte, 2019).

Teknologiaa voidaan hyödyntää myös **kaupunkisuunnittelun virtualisointiin**. Digitaalista todellisuutta käytetään jo nyt kasvavissa määrin kaupunkien suunnittelun, muotoilun ja kehittämisen työkaluna (Global e-Sustainability Initiative & Deloitte, 2019). Virtuaalitodellisuuden avulla voidaan kokea muutokset oikeaa ympäristöä simuloiden jo suunnittelun ja kehityksen aikana. Tällä on selkeä positiivinen vaikutus maankäyttöön, sillä tarkempi ymmärrys muutosten vaikutuksesta jo suunnitteluvaiheessa johtaa parempiin ja kestävämpiin ratkaisuihin rakennusten ja rakenteiden sijoittelussa muuhun ympäristöön soveltuvasti.

9.3 Etäkoulutus, -työ ja -asiointi

Keväällä 2020 koronavirus pakotti Suomen koulut ja monet työpaikat siirtymään digitaalisten etäyhteyksien varaan. Globaalisti koronaviruksesta johtuvat rajoitukset ja toimenpiteet ovat vähentäneet globaaleja hiilidioksidipäästöjä enemmän kuin mikään aikaisempi tapahtuma ihmiskunnan historian aikana, mukaan lukien toinen maailmansota ja 90-luvun lama (Evans, 2020). Virtuaalisen ja lisätyn todellisuuden yleistymisen voi tulevaisuudessa muokata tällaisen etätyöskentelyn kokemusta ja mahdollisuuksia merkittävästi.

Virtuaalitodellisuudessa tapahtuva **opetus ja koulutus** voi tarjota oppilaille ja opettajille mahdollisuuden tehokkaampaan samassa virtuaalisessa tilassa

tapahtuvaan vuorovaikutukseen. Teknologia luo myös uusia mahdollisuuksia erilaisten laitteiden tai prosessien käytännön harjoitteluun, jotka voidaan toteuttaa virtuaalisesti. Ilmaston- ja ympäristön näkökulmasta merkittävämpää on kuitenkin virtuaalitodellisuusteknologian hyödyntäminen tietyissä työtehtävissä **työntekoon ja tapaamisiin**, jolloin sovelluskohteella on selkeä positiivinen ilmastovaikutus vähentyneen työmatkaliikenteen myötä. Myös monet julkisen sektorin organisaatiot pystyisivät tarjoamaan **virtuaalista asiointia** teknologian myötä. Parhaimmassa tapauksessa virtuaalinen todellisuus voisi korvata työmatkaliikenteen tulevaisuudessa kokonaan, jolloin etenkin lentomatkustaminen ja lentoliikenteen päästöt vähenisivät radikaalisti. Tämä on kuitenkin vielä vuoteen 2035 mennessä epätodennäköistä.

9.4 Viihde ja vapaa-aika

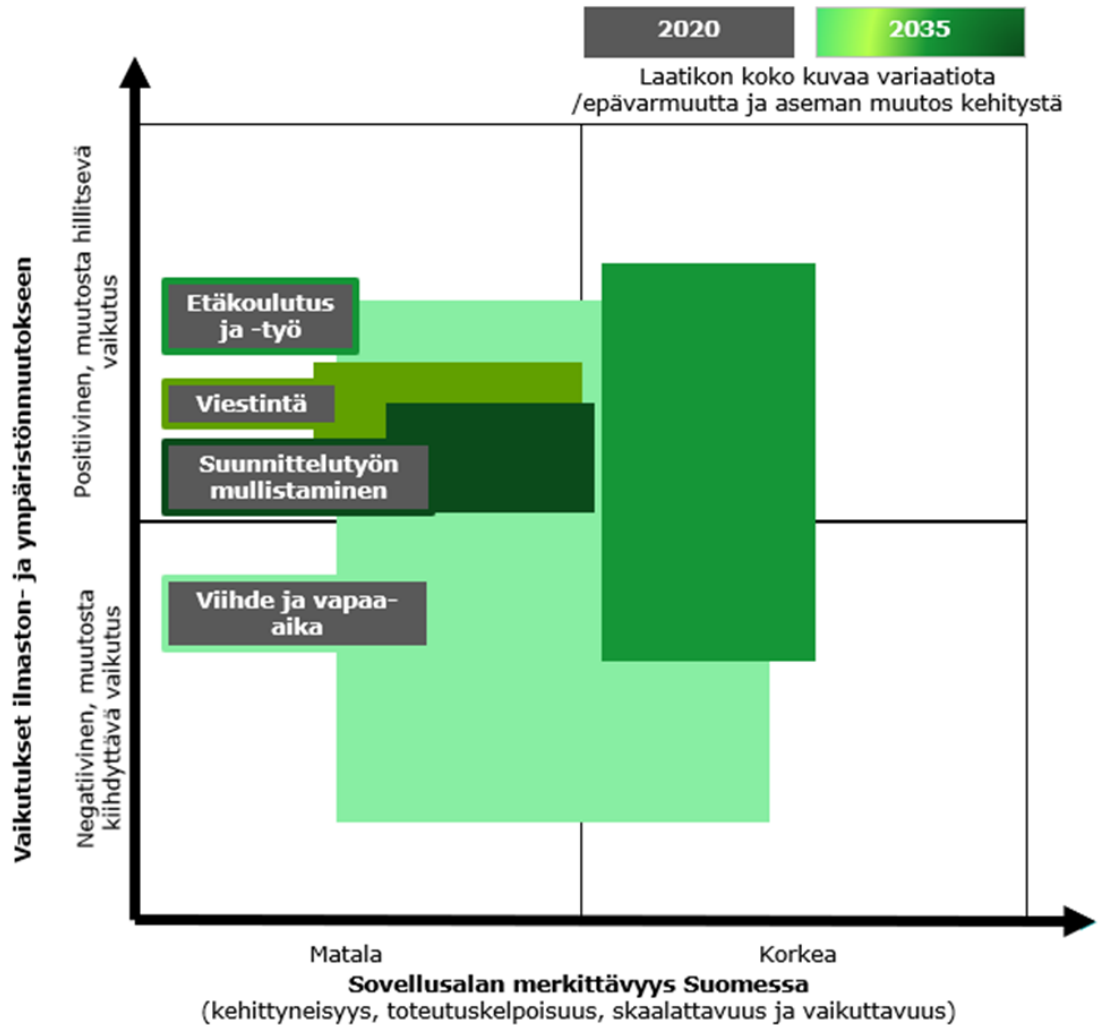
Virtuaalinen todellisuus mahdollistaa **virtuaaliturismin** kehittymisen. Virtuaaliturismi mahdollistaa fyysistä matkustamista vastaavan kokemuksen virtuaalisesti eri puolille maailmaa. Virtuaalimatkaillen avulla on myös mahdollista syventää fyysistä matkailukokemusta, kuten siirtyä historiallisista maisemista aina simuloituun tulevaisuuteen. Nykyisellä realistisuuden tasolla, joka virtuaalisella todellisuudella pystytään tavoittamaan, sovelluskohteella arvioidaan kuitenkin olevan negatiivinen ilmasto- ja ympäristövaikutus. Tämä johtuu siitä, että virtuaalimatkailla ei nykyisellään korvaa perinteistä matkailua vaan sen odotetaan itseasiassa lisäävän sitä. Esimerkiksi monet kaupungit kuten Helsinki ovat kertoneet pyrkivänsä toteuttamaan virtuaalimatkailejoille perinteiseen matkailuun kannustavan matkailukokemuksen. Jos sovelluskohteella ei vaikuta matkailuun mitenkään, sen ilmastovaikutus jää negatiiviseksi, koska suurien virtuaalimaailmojen rakentaminen vaatii paljon laskentatehoa. Mikäli virtuaalitodellisuusteknologia kehittyisi hyperrealistiseksi ja virtuaalimaailmojen rakentamisessa voitaisiin hyödyntää kvanttietokoneen laskentakapasiteettia, voi kuitenkin olla mahdollista, että sovelluskohteella saattaisi aidosti korvata turismia ja sen ilmastovaikutuksia vuonna 2035.

9.5 Yhteenveto vaikutuksista

Lisätty- ja virtuaalinen todellisuus -aihealueen teknologiat liittyvät viestintään ja suunnitteluun. Aihealueen teknologioita käytetään etenkin viihdetarkoituksiin, mutta tulevaisuudessa niiden käyttö etäopiskelun ja -työn tekemiseen varmasti kasvaa. Mikäli virtuaalitodellisuusteknologiaa kuitenkin hankitaan jokaiseen kotitalouteen, on elektroniikan määrän lisääntymisellä huomattava negatiivinen vaikutus ilmastoon- ja ympäristöön, etenkin ilman asianmukaista elektroniikan kierrätystä. Yhteenveto aihealueen teknologioiden merkittävimmistä ilmasto- ja ympäristövaikutuksista on esitetty taulukossa 9 ja sovellusaloista kuvassa 13.

Taulukko 9 Yhteenveto aihealueen teknologioiden merkittävimmistä positiivisista ja negatiivisista ilmasto- ja ympäristövaikutuksista

Merkittävimmät positiiviset vaikutukset	Merkittävimmät negatiiviset vaikutukset
- Ilmasto- ja ympäristötietoisuuden ja kulutustottumuksien muuttaminen (viestintä) - Materiaalien käytön väheneminen ja liitännäisvaikutukset (suunnittelutyön mullistaminen) - Matkustamisen tarpeen vähentymisen vähentää hiilidioksidipäästöjä (viihde ja vapaa-aika; etäkoulutus, -työ ja -asiointi)	- Virtuaalitodellisuuslaitteiston käyttö kuluttaa paljon energiaa (kaikki sovellusalat) - Elektroniikan materiaalivaatimukset (etäkoulutus, -työ ja -asiointi; viihte ja vapaa-aika) - Virtuaaliturismi voi kiihdyttää lentomatkustamista ja sitä myötä kasvattaa hiilidioksidipäästöjä (viihte ja vapaa-aika)



Kuva 13 Lisätty ja virtuaalinen todellisuus aihealueen sovellusalat

Viestintä: Sovellusalan kehittyneisyys vielä matala – käyttö tulevaisuudessa mahdollisesti lisääntyy, mutta sovellusalan ilmasto- ja ympäristövaikutusten arvioidaan olevan parhaimmillaankin maltillisia.

Suunnittelutyön mullistaminen: Sovellusalan kehittyneisyys vielä matala – käyttö tulevaisuudessa mahdollisesti lisääntyy, mutta sovellusalan ilmasto- ja ympäristövaikutusten arvioidaan olevan maltillisia.

Etäkoulutus, -työ ja -asiointi: Sovellusalan kehittyneisyys vielä matala tarkasteltujen teknologioiden osalta – on kuitenkin arvioitu, että tulevaisuudessa sovellusalan merkittävyys kasvaa huomattavasti teknologian yleistyessä, millä voi olla myös ilmastonmuutosta kiihdyttävä vaikutus materiaalien käytöstä johtuen.

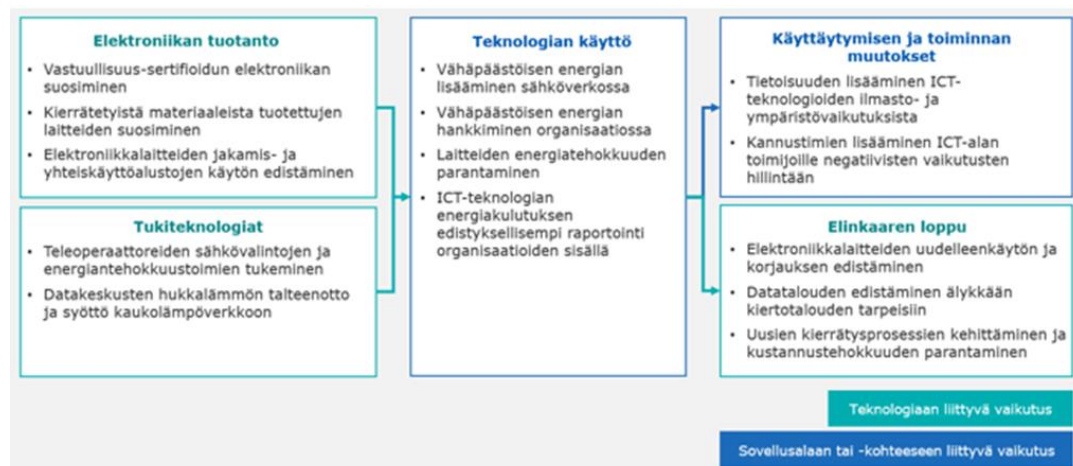
Viihde ja vapaa-aika: Sovellusalan kehittyneisyys vielä matala – käyttö tulevaisuudessa mahdollisesti lisääntyy ja vaikutusten suuntaa on vaikea arvioida, sillä sovelluskohde voi merkittävästi vähentää tai lisätä turismia.

10 Negatiivisten ympäristö- ja ilmastovaikutusten hillitseminen

Tässä luvussa on kuvattu, miten selvityksessä tunnistettuja ICT-alan teknologioiden negatiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia voidaan potentiaalisesti hillitä.

Vaikka ICT-teknologioilla on merkittävästi potentiaalia edesauttaa ilmastomuutoksen ja muiden yhteiskunnan osa-alueiden negatiivisten ympäristövaikutusten hillitsemisessä, on ICT-teknologialla aina myös joitakin negatiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia. Lopullinen vaikutus syntyy positiivisten ja negatiivisten vaikutusten suhteesta. Hillitsemällä teknologioiden negatiivisia ympäristö- ja ilmastovaikutuksia saadaan positiiviset nettovaikutukset paremmin esiin. ICT-teknologioiden suurimmat negatiiviset ilmasto- ja ympäristövaikutukset liittyvät materiaaleihin ja energiankulutukseen. Jotta uusia ICT-teknologioita voidaan käyttää Suomessa mahdollisimman kestävästi nyt ja tulevaisuudessa, tulee teknologioiden negatiivisia ympäristö- ja ilmastovaikutuksia pyrkiä aktiivisesti hillitsemään samalla, kun teknologian käytön positiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia lisätään.

ICT-teknologioiden negatiivisten ilmasto- ja ympäristövaikutusten hillitsemisen keinojen yhteenveto on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14 ICT-teknologioiden negatiivisten ilmasto- ja ympäristövaikutusten hillitseminen Suomessa

10.1 Elektroniikan tuotanto ja elinkaaren loppu

Materiaaleihin liittyvät negatiiviset ilmasto- ja ympäristövaikutukset korostuvat etenkin teknologiaan liittyvän elektroniikan tuotannossa, sekä sen elinkaaren lopun hallinnassa. Kuitenkin myös teknologialle valittu sovelluskohde ja sen toteutus vaikuttavat tarvittavan materiaalin määrään.

Lähtökohtaisesti kaikkien tarkasteltujen teknologioiden tuotannonaikaisia ympäristö- ja ilmastovaikutuksia voidaan hillitä vastuullisella raaka-aineiden hankinnalla ja erityisesti suosimalla kierrätetyistä raaka-aineista tehtyä elektroniikkaa. Kiertotalousajattelulla ja uusilla toimintamalleilla on merkittävä vaikutus elektroniikan tuotannon sekä elinkaaren lopun aikaisten negatiivisten ympäristö- ja ilmastovaikutusten hillitsemiseen. Materiaalien kierrättämisen ja uusiokäytön lisäksi kiertotalousajattelulla voidaan vaikuttaa myös elektroniikan määrään. Erilaiset jakamis- ja yhteiskäyttöalustat mahdollistavat sen, että esimerkiksi kaikkien kotitalouksien ei tarvitse omistaa virtuaalitodellisuuslaitteistoa.

Materiaalien louhiminen olemassa olevasta laitekannasta uusiokäyttöön, ns. urbaani louhintaa, voi merkittävästi vähentää teknologian tuotannon negatiivisia vaikutuksia etenkin ympäristön näkökulmasta. Materiaalien kierrättäminen vaatii energiaa, mutta useimpien tällä hetkellä kiertävien materiaalien osalta kierrätyksen energiantarve on kuitenkin pienempi kuin uusioraaka-aineen louhinnan energijaatimukset. Esimerkiksi kuparin kierrätys vaatii noin 85 % vähemmän energiaa kuin uusioraaka-aineen käyttö (Euroopan Kupari-instituutti, 2). Vanhan elektronisen laitteiston materiaalien saaminen takaisin kiertoon edellyttää sekä uusien kierrätysprosessien kehittämistä, että niiden kustannustehokkuuden parantamista esimerkiksi kierrätyksen energiatehokkuutta lisäävillä toimenpiteillä. Myös laitteiden suunnittelussa ja materiaalivalinnoissa tulisi paremmin huomioida elektronisten laitteiden elinkaaren lopun hallinta ja kierrätettävyys. Kiertotalouden liiketoimintamallien jalkauttamiseksi ICT-alalle erityisen tärkeää on datan saatuus, sillä data on avainasemassa sekä materiaalivirtojen suunnittelussa, että laitteiden kierrätyksessä. Datatalouden edistäminen älykkään kiertotalouden tarpeisiin tukisi näin ollen myös ICT-alan muita kestävyystavoitteita.

Materiaalien kierrätyksen tehostamisen lisäksi materiaalien negatiivisia ympäristö- ja ilmastovaikutuksia voidaan teknologian tuotannossa parhaiten vähentää suostamalla sellaisia ICT-teknologian tuottajia, joiden materiaalitoimittajat on vastuullisuussertifioitu. Tällöin teknologian ostaja saa paremman varmuuden siitä, että materiaaleista on esimerkiksi maksettu reilu markkinahinta, tai että niihin ei sisälly sosiaalisen vastuun ja ympäristön kannalta ongelmallisia konfliktimineraaleja. Materiaalien louhinnan negatiivisia vaikutuksia voidaan merkittävästi vähentää esimerkiksi asianmukaisella kaivospaikkojen valinnalla ja jätteiden hallinnalla, mutta tämä edellyttää sitä, että toimittaja saa työstään reilun korvauksen. ICT-teknologian käyttämät raaka-aineet louhitaan usein kehittyvistä maista, joiden kaivoslainsäädäntö on heikko ja ymmärrys toiminnan ympäristövaikutuksista usein vähäistä, minkä vuoksi toiminnan paikallisia negatiivisia ympäristövaikutuksia on vaikea ennakoida ja torjua. Vastuullisten ICT-laitteiden kysynnän kasvattaminen esimerkiksi regulaation tai ICT-alan yhteissopimusten avulla onkin välttämätöntä sektorin negatiivisten ympäristövaikutusten hillitsemiseksi.

10.2 Teknologian käyttö ja tukiteknologiat

Vähäpäästöisen sähkön osuuden kasvattaminen verkossa, vähäpäästöisen sähkön hankinta sekä laitteiden energiatehokkuuden parantaminen ovat tehokkaita tapoja vähentää teknologioiden käytön negatiivisia ilmastovaikutuksia. Myös uusiutuvan energian paikallistuotannon lisääminen esimerkiksi kotitalouksissa voisi vähentää joidenkin sovelluskohteiden energiankäytöstä johtuvia negatiivisia ilmastovaikutuksia. Lisäksi tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen -aihealueen teknologioiden energiankulutusta voidaan hillitä tekoälymallien jakamisalustojen avulla, jolloin esimerkiksi tekoälyn opettamiseen tarvittavaa energiamäärää voidaan vähentää.

ICT-alan hallintatehtävissä työskentelevillä henkilöillä ei välttämättä ole hyvää näkyvyyttä teknologian käytön todelliseen energiankulutukseen. Laitteiston ja ohjelmistojen energiankulutuksen selkeämpi raportointi voisi siten parantaa energiatehokkuuden parannustoimenpiteiden tehokasta kohdentamista.

Kvanttiteknologian mahdollistamien kvanttietokoneiden yleistymisen voisi mullistaa ICT-alan energiankäytön vähentämällä huomattavasti laskentaan kuluva energiaa. Teknologian kehityksen nopeus on kuitenkin vielä suhteellisen epävarmaa, eikä ole välttämättä realistista odottaa kvanttietokoneiden arkipäiväistymistä vielä vuoteen 2035 mennessä.

Selvityksessä tarkasteltujen teknologioiden taustalla olevat keskeiset tukiteknologiat vaikuttavat paitsi tarkasteltavien teknologioiden kehitykseen, myös niiden ilmastö- ja ympäristövaikutuksiin. Samoin kuin nykyisten 3G- ja 4G-verkon tukiasemien kohdalla, 5G-verkon negatiivisia ympäristö- ja ilmastovaikutuksia voi

hillitä lisäämällä uusiutuvan energian määrää sähköverkossa, mikä vaikuttaa myös 5G-verkon datansiirrosta johtuviin päästöihin. Myös teleoperaattoreiden tekemillä sähkövalinnoilla ja energiatehokkuustoimenpiteillä on suora vaikutus datansiirtoon liittyvien päästöjen vähentämisessä. Vähäpäästöisiä sähkövalintoja sekä energiatehokkuustoimenpiteitä olisikin tärkeä edistää erilaisilla kannustimilla ja ohjaustoimilla.

Palvelinkeskusten negatiivisia ympäristö- ja ilmastovaikutuksia voidaan tehokkaasti hillitä Suomen kaltaisessa viileässä ilmastossa ottamalla talteen palvelinkeskusten tuottama hukkalämpö ja ohjaamalla se kaukolämpöverkkoon. Tutkimusten mukaan jopa 97 % palvelinkeskusten energiankäytöstä pystytään ottamaan talteen hukkalämpönä (Lu et al, 2011). Hukkalämmön hyödyntäminen vähentää tarvetta muiden lämpöenergiälähteiden käytölle ja varsinkin fossiilisia energialähteitä korvattaessa sen ilmastovaikutus on merkittävä.

10.3 Käyttäytymisen ja toiminnan muutokset

Kaikkien tässä luvussa mainittujen hillitsemiskeinojen huomioiminen käytännössä ICT-alalla edellyttää tiedon lisäämistä ICT-teknologian ilmasto- ja ympäristövaikutuksista, sekä konkreettisia kannustimia kestäviin toimintatapoihin. Tietoisuuden lisääminen voisi tarkoittaa esimerkiksi tekoälyn opettamisen eettistä koodistoa ja ylipäättänsä ilmastonäkökulman tuomista kiinteäksi osaksi teknologia-alan opintoja. Ilmasto- ja ympäristötavoitteiden mukaisia kannustimia tulisi myös systemaattisesti lisätä ICT-alalla, jotta organisaatiot alkaisivat entistä enemmän panostaa ilmasto- ja ympäristötehokkuuteen. Myös ICT:n ympäristö- ja ilmastovaikutusten huomioiminen esimerkiksi teknologian hankintakriteereissä olisi hyvä kehityssuunta. Ilmasto- ja ympäristövaikutusten hillitseminen ICT-alalla siis edellyttää kulttuurin muutosta, jonka myötä ilmasto- ja ympäristöajattelu sitoutetaan kiinteäksi osaksi alan toimintaa aina elektroniikan suunnittelusta niiden hankintaan ja käyttöön.

11 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä selvityksessä arvioitiin nousevien tieto- ja viestintäteknologia-alan (ICT-alan) teknologioiden aihealueiden ilmasto- ja ympäristövaikutuksia. Selvityksen tavoitteena oli kunkin aihealueen osalta tunnistaa ilmaston- ja ympäristönmuutoksen näkökulmasta merkittäviä teknologioiden sovelluskohteita, tarkastella teknologioiden ilmaston- ja ympäristönmuutosta hillitseviä ja kiihdyttäviä vaikutuksia vuonna 2020 ja 2035, sekä esittää mahdollisia keinoja negatiivisten vaikutusten hillitsemiseksi. Tavoitteena oli myös soveltuvien osin huomioida arvioissa Suomea koskevia vaikutuksia. Selvitys oli osa liikenne- ja viestintäministeriön toteuttamaa ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategian valmistelua.

Selvityksen kohteena oli viisi nousevien ICT-teknologioiden aihealuetta: 1) tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen, 2) lohkoketjut, 3) robotiikka ja autonomiset järjestelmät, 4) kvanttitekniikka ja 5) lisätty ja virtuaalinen todellisuus. Selvityksen toteutustapana oli ICT-alan teknologioiden ilmasto- ja ympäristövaikutusten käsite- ja arviointiviitekehityksen muodostaminen, kirjallisuuskatsaus ja asiantuntija-haastattelut sekä arvioinnin suorittaminen.

Ilmasto- ja ympäristövaikutusten muodostumisessa ICT-alalla yleisesti tunnistettiin viisi komponenttia: 1) elektroniikan tuotanto: raaka-aineiden louhinta; komponenttien tuotanto; elektroniikan rakentaminen, 2) tukitekniikat: nopea internet (valokuitu ja 5G); pilvipalvelut; esineiden internet, 3) teknologian käyttö: teknologioiden sovelluskohteet, 4) käyttäytymisen ja toiminnan muutokset: toiminta lisääntyy; toiminta vähenee; uusia toimintamalleja syntyy, 5) elinkaaren loppu: uusiokäyttö; kierrätys; kaatopaikka; jätteenpolttu.

Tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen -aihealueen tunnistetut sovellusalat ovat älykkäät rakennukset; älykäs sähköverkko; älykäs kiertotalous; ennustaminen ja havainnointi; yksilöiden käyttäytymisen ohjaus; ja älykkäät tuotantojärjestelmät ja prosessit. Tällä hetkellä ennustaminen ja havainnointi -sovellusala on jo pitkälle kehittynyt ja sillä on merkittävä vaikutus ilmastoon ja ympäristöön esimerkiksi kysynnän ennustamisen kautta. Vuonna 2035 kaikkien aihealueen sovellusalojen arvioidaan olevan tärkeitä Suomelle ilmaston- ja ympäristön näkökulmasta, yksilöiden käyttäytymiseen vaikuttaminen -sovellusalan merkityksen kuitenkin ollessa kaikkein matalin. Aihealueen teknologioiden ominaiset ympäristökyvykset liittyvät tekoälyn opettamisen aikaiseen energiankäyttöön, älykkäiden ratkaisujen vaatimaan elektroniikan määrään, sekä tämän laitteiston jatkuvaan energiankulutukseen.

Lohkoketjut-aihealueen tunnistetut sovellusalat ovat vertaiskaupankäynti; arvoketjujen läpinäkyvyyden hallinta; rahoitusratkaisut; ja kannustinjärjestelmät. Tällä hetkellä mikään näistä sovellusaloista ei ole Suomessa merkittävä ilmaston- ja ympäristön näkökulmasta katsottuna. Lohkoketjuteknologian vaatiman laskennan ja tiedonsiirron kulutus on tämänhetkisessä kehitysvaiheessa niin suurta, että ilmaston ja ympäristön kannalta positiivisimmatkin lohkoketjujen sovelluskohteet voivat jäädä kokonaisvaikutuksiltaan negatiivisiksi. Vuoteen 2035 mennessä on mahdollista, että vertaiskaupankäynti; ja arvoketjujen läpinäkyvyyden hallinta -sovellusalat kehittyvät ja skaalautuvat Suomessakin, mutta niiden valmius luoda positiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia vielä silloinkaan on epävarmaa.

Robotiikka ja autonomiset järjestelmät -aihealueen tunnistetut sovellusalat ovat liikenne ja logistiikka; autonomiset tuotantojärjestelmät; havainnointi, arviointi ja korjaus; ja hiilen talteenotto ja -varastointi. Näistä erityisen merkittäviä ilmaston- ja ympäristön näkökulmasta Suomessa ovat tällä hetkellä autonomiset tuotantojärjestelmät ja prosessit, sekä havainnointi, arviointi ja korjaus. Näiden sovellusalojen merkityksen arvioidaan yhä kasvavan tulevaisuudessa uusien sovelluskohteiden myötä. Tämän lisäksi liikenne ja logistiikka -sovellusala tulee vuonna 2035 todennäköisesti olemaan Suomessakin erityisen merkittävä, mutta sovellusalan kokonaisvaikutus voi olla myös ilmaston- ja ympäristönmuutosta

kiihdyttävä. Aihealue linkittyy vahvasti tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen -aihealueeseen, joten sille ovat olennaisia myös samat ympäristökysymykset.

Kvanttitekнологia-aihealueen tunnistetut sovellusalat ovat läpimurrot hiili-intensiivisissä prosesseissa; ennustaminen, suunnittelu ja päätöksenteko; ja uudet materiaalit. Kvanttitekнологian osalta yksittäisten sovellutusten merkittävyys on kuitenkin pienempi kuin itse tekнологian merkittävyys – kvanttietokone tulee lähtökohtaisesti vaikuttamaan hillitsevästi ilmaston- ja ympäristönmuutokseen vähentämällä merkittävästi laskennan energiankulutusta. Kvanttitietokone on vielä aikaisessa kehitysvaiheessa, mutta ensimmäisten kvanttietokoneiden käytön arvioidaan kuitenkin tapahtuvan ennen vuotta 2035.

Virtuaalinen ja lisätty todellisuus -aihealueen tunnistetut sovellusalat ovat viestintä; suunnittelutyön mullistaminen; etäkoulutus, -työ ja -asiointi; ja viihde ja vapaa-aika. Tällä hetkellä aihealueen tekнологioilla ei ole ilmasto- ja ympäristönäkökulmasta katsottuna sellaisia sovellusaloja, jotka ovat Suomelle erityisen merkittäviä. Tulevaisuudessa virtuaalitodellisuuslaitteiston yleistyessä etäkoulu- tus, -työ ja -asiointi -sovellusalan merkittävyys tulee mahdollisesti kasvamaan, mikä saattaa leikata esimerkiksi työmatkaliikenteen päästöjä huomattavasti. Myös viihde ja vapaa-aika sovellusalan merkittävyyden arvioidaan lisääntyvän, mutta vaikutusten suuntaa on vaikea arvioida. Aihealueen tekнологioita käytetään tänä päivänä pääasiassa viihteellisiin tarkoituksiin ja merkittävimmät ympäristökysymykset liittyvät viihdekäytön energiankulutukseen.

Kaikkiin esitettyihin tekнологioihin liittyy elektroniikkaa, jonka tuotanto ja käyttö vaatii materiaaleja ja energiaa. Tarkasteltujen tekнологioden negatiivisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia voidaan hillitä lisäämällä päästöttömän sähkön määrää sähköverkossa, edistämällä elektronisten laitteiden kierrätystä ja materiaalien uudelleenkiertoa, suosimalla jakamistaloutta ja integroimalla kestävyysajattelu ICT-alan suunnittelutyöhön ja tekнологian käyttöön. Teknologioden soveltaminen vaikuttaa myös aina epäsuorasti ihmisten ja yhteiskunnan käyttäytymiseen ja toimintaan, mikä lisää vaikutusten ennakoimisen epävarmuutta.

Lyhyellä aikajänteellä etenkin tekoäly, algoritmit ja koneoppiminen -aihealueen, sekä robotiikka ja autonomiset järjestelmät -aihealueen soveltamisen arvioidaan merkittävästi edistävän kestäväen kehityksen siirtymää lisäämällä energiatehokkuutta yhteiskunnan eri osa-alueilla, optimoimalla prosesseja ja toimintoja sekä luomalla yhä tarkempia matemaattisia ennusteita. Lisäksi näiden teknologioden soveltaminen voi edistää koko energiasysteemin sähköistymistä. Virtuaalinen ja lisätty todellisuus -aihealueen sovellusalojen vaikutuksia on haastavinta todentaa, sillä vaikutusten aikaansaaminen vaatii pääasiallisesti sovelluskohteesta johtuvaa toiminnan ja käytöksen muutosta, mutta aihealueen teknologioden merkittävyys voi kasvaa huomattavasti vuoteen 2035 mennessä. Lohkoketjuteknologia ja kvanttitekнологia ovat selvityksessä tarkastelluista tekнологioista vähiten kehittyneitä. Lohkoketjuteknologian merkittävyys on vielä melko kiistanalainen, etenkin ilmaston- ja ympäristön näkökulmasta, mutta mikäli kvanttitekнологian mahdollistaman kvanttietokoneen kehittämisessä edetään seuraavina vuosina suunnitellusti, voi se mullistaa koko ICT-alan energiankäytön vuoteen 2035 mennessä.

Koska maapallon ja yhteiskunnan resurssit ovat rajalliset, olisi tärkeää arvioida tarkasti mihin ICT-alan resurssit kannattaa kohdentaa – onko jokin tekнологian sovelluskohde oikeasti tarpeellinen tai välttämätön, eikä sitä pysty toteuttamaan muulla, esimerkiksi vähemmän ilmastoa ja ympäristöä kuormittavalla tavalla. Etenkin lohkoketjuteknologiaan liittyvät sovellusalat nostavat kysymyksiä tekнологian käytön välttämättömyydestä, koska esimerkiksi energian vertaiskaupan käynti on mahdollista myös ilman lohkoketjuteknologiaa. Sellaiset nousevien ICT-teknologioden sovelluskohteet, joilla on positiivinen vaikutus päästöttömän energiantuotannon lisääntymiseen ja kiertotalouteen auttavat osaltaan ratkaisemaan nousevien ICT-teknologioden kestävyysongelmaa. Tällaiset sovelluskohteet

vaikuttavat kestävyyttä edistävän kädenjälkensä lisäksi positiivisesti myös teknologian jalanjälkeen, minkä vuoksi ne ovat merkittäviä koko ICT-alan kestävyydelle.

On tärkeää huomioida, että tässä selvityksessä nousevien ICT-alan teknologioiden sovellusaloja on tarkasteltu yksinomaan ilmasto- ja ympäristövaikutusten näkökulmasta. Teknologioita koskevia päätöksiä tehtäessä, teknologiaa ja sen sovellusaloja on syytä tarkastella laaja-alaisemmin myös sosiaalisten ja yhteiskunnallisten vaikutusten näkökulmasta – siis kaikkien kestävä kehityksen osa-alueiden kautta. Tällöin on mahdollista muodostaa kokonaisvaltainen kuva sovellusalojen vaikutuksista, sekä sovelluskohteiden käytön tarpeellisuudesta.

Selvityksen toteutuksessa ilmeni joitakin haasteita. Ensiksi, tutkimuskirjallisuutta siitä, miten ICT-alan teknologiat vaikuttavat ilmaston- ja ympäristömuutokseen oli vain rajallisesti saatavilla erityisesti pitkää aikaväliä koskien. Toiseksi, selvityksen kohteena olevat nousevat ICT-teknologiat kehittyvät vauhdilla, minkä vuoksi oli haastavaa arvioida niiden kehittymistä ja siten myös ilmasto- ja ympäristövaikutuksia selvityksen kohteeksi valittuna vuonna 2035. Myös kaikki selvitystä varten haastattelut asiantuntijat korostivat, että teknologioiden kehittymisen arviointi pitkällä aikavälillä on äärimmäisen haastavaa. Kolmanneksi, selvitykseen nimetyt teknologioiden aihealueet olivat laajuudeltaan osittain hyvin erilaisia: esimerkiksi lohkoketjut on hyvin selkeästi rajattavissa oleva teknologia verrattuna tekoälyyn, joka on hyvin laaja kokonaisuus. Neljänneksi, teknologioiden aihealueissa oli osittain päällekkäisyyttä ja keskinäisriippuvaisuutta, minkä vuoksi teknologiakoh- taisten vaikutusarvioiden laatiminen oli haastavaa.

12 Lähteet

- Aalto-yliopisto, 2018. Tutkijat suunnittelemassa paikallisrahaa Helsinkiin. <https://www.aalto.fi/fi/uutiset/tutkijat-suunnittelemassa-paikallisrahaa-helsinkiin>.
- Andoni et al., 2019. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184>.
- Andrae, 2017. Presentation: Total consumer power consumption forecast. https://www.researchgate.net/publication/320225452_Total_Consumer_Power_Consumption_Forecast.
- Boston Consulting Group, 2020. A Quantum Advantage in Fighting Climate Change. <https://www.bcg.com/publications/2020/quantum-advantage-fighting-climate-change.aspx>.
- Evans, 2020. Analysis: Coronavirus set to cause largest ever annual fall in CO2 emissions. <https://www.carbonbrief.org/analysis-coronavirus-set-to-cause-largest-ever-annual-fall-in-co2-emissions>.
- European Copper Institute, 1: Europe's demand for copper is increasingly met by recycling. <https://copperalliance.eu/benefits-of-copper/recycling/>.
- European Copper Institute, 2: The structure of Europe's copper industry. <https://copperalliance.eu/about-us/europes-copper-industry/>.
- Eurostat, 2020. Recycling rate of e-waste. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/product?code=cei_wm050.
- Global e-Sustainability Initiative (GeSI) & Deloitte, 2019. Digital with Purpose - Delivering a SMARTer 2030. https://gesi.org/storage/files/DIGITAL%20WITH%20PURPOSE_Summary_A4-WEB_watermark.pdf.
- German Advisory Council on Global Change (WBGU), 2019. Towards our common digital future. https://is-suu.com/wbgu/docs/wbgu_hg2019_en?fr=sM2QyYzU1OTI4OA.
- Goodchild & Toy, 2017. Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO2 emissions in the delivery service industry. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136192091630133X>.
- Hullcoin, 2020. Hullcoin | Unlocking the hidden value in Hull's economy. <http://www.hull-coin.org>.
- Slowik & Kamakaté, International Council on Clean Transportation (ICCT), 2017. New mobility: Today's technology and policy landscape. https://theicct.org/sites/default/files/publications/New-mobility-landscape_ICCT-white-paper_27072017_vF.pdf.
- International Energy Agency (IEA), 2017. Digitalization and Energy. <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>.
- International Energy Agency (IEA), 2019. Global Status Report for Buildings and Construction 2019 - Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>.

ITU (International Telecommunications Union), 2019. Turning digital technology innovation into climate action. <https://www.itu.int/en/publications/Documents/tsb/2019-Turning-digital-technology-innovation-into-climate-action/mobile/index.html>.

ITU (International Telecommunications Union), 2020. Frontier technologies to protect the environment and tackle climate change. <https://www.itu.int/en/acton/environment-and-climate-change/Documents/frontier-technologies-to-protect-the-environment-and-tackle-climate-change.pdf>.

Jogunola, Olamide & Hammoudeh, Mohammad & Adebisi, Bamidele & Anoh, Kelvin, 2019. Demonstrating Blockchain-Enabled Peer-to-Peer Energy Trading and Sharing. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8861525>.

Kamiya & Kvarnström, International Energy Agency (IEA), 2019. Data centres and energy – from global headlines to local headaches? <https://www.iea.org/commentaries/data-centres-and-energy-from-global-headlines-to-local-headaches>.

Korhonen, 2018. Lohkoketjut ja muut hajautetut tietokannat: niiden ideologia, käyttökohteet ja energiankulutus. <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/JulkaisuMetatieto/Documents/EDK-2018-AK-209428.pdf>.

Lebedeva, Di Persio & Boon-Brett, 2017. Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC105010/kj1a28534enn.pdf>.

Lu, Lü, Remes & Viljanen, 2011. Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case study. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778811003847>.

Rolnick et al., 2019. Tackling climate change with machine learning. <https://arxiv.org/pdf/1906.05433.pdf>.

Malmodin, Bergmark, Matinfar, 2018. A high-level estimate of the material footprints of the ICT and E&M sector. <https://easychair.org/publications/open/XvgV>.

Pärssinen, 2019. Towards sustainable data centers and ICT services. <https://aaltoodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/38725/isbn9789526086125.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

PwC, 2018. Building block(chain)s for a better planet. <https://www.pwc.com/gx/en/services/sustainability/building-blockchains-for-the-earth.html>.

Säteilyturvakeskus, 2020. Lohkoketju tuo uusia mahdollisuuksia ydinmateriaalivalvontaan. <https://www.stuk.fi/-/lohkaketju-tuo-uusia-mahdollisuuksia-ydinmateriaalivalvontaan>.

Stolaroff et al., 2018. Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery. <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02411-5>.

Strubell et al., 2019. Energy and Policy considerations for deep learning in NLP. <https://arxiv.org/pdf/1906.02243.pdf>.

SwedWatch, 2019. Copper with a Cost – Human rights and environmental risks in the mineral supply chains of ICT: A case study from Zambia. https://swed-watch.org/wp-content/uploads/2019/05/94_Zambia_190429_enkelsidor.pdf.

The Shift Project, 2019. Lean ICT - Towards digital sobriety. https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/03/Lean-ICT-Report_The-Shift-Project_2019.pdf.

Telia, 2019. Data centres are a forgotten source of emissions: "the emissions are currently level with aviation traffic".

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2017. Suomen tekoälyaika – Suomi tekoälyn soveltamisen kärkimaaksi: tavoite ja toimenpidesuosituksset. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80849/TEMrap_41_2017_Suomen_tekoälyaika.pdf?sequence=4&isAllowed=y.

Valtiovarainministeriö, 2017. Pilkahduksia tulevaisuuteen - Digitalisaation ja robotisaation mahdollisuudet. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79260/Pilkahduksia_tulevaisuuteen.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Waitrose & Partners, 2019. Press release: Food and drink report 2018-2019. https://waitrose.pressarea.com/pressrelease/details/78/NEWS_13/10259.

World Energy Council, 2018. The role of ICT in energy efficiency management. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/20180420_TF_paper_final.pdf.

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

PL 320, 00059 TRAFICOM
p. 029 534 5000

traficom.fi

ISBN 978-952-311-712-9
ISSN 2669-8757 (verkkojulkaisu)

TRAFICOM
Liikenne- ja viestintävirasto