

Miika Mikkonen

# Älykäs infrastruktuuri: käyttö & teknologiat



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA  
2021

## TIIVISTELMÄ

Mikkonen, Miika

Älykäs infrastruktuuri: käyttö & teknologiat

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2021, 39 s.

Tietojärjestelmätiede, kandidaatin tutkielma

Ohjaaja: Kyppö, Jorma

Viime vuosina kestävä kehitys ja kaupungin älyllistäminen ovat olleet merkittävässä roolissa kaupunkikehityksestä. Tämän takia älykaupunkihankkeiden määrä on kasvanut viimeisen vuosikymmenen aikana. Älykaupunki perustuu informaatio- ja viestintäteknologian hyödyntämiseen kaupungin eri osa-alueilla. Yksi näistä osa-alueista on infrastruktuuri. Älykäs infrastruktuuri on olennaisessa osassa kaupunkikehitystä ja kaupungin älyllistämisessä sillä älykkään infrastruktuurin pohjalta voidaan kaupunkiympäristöstä luoda tehokkaampi, turvallisempi, miellyttävämpi sekä kestävä kehityksen periaatteiden mukainen. Voidaan siis sanoa, että älykäs infrastruktuuri toimii älykaupungin selkärangana. Tämä kandidaatintutkielma keskittyy selvittämään mitä on älykäs infrastruktuuri, miten älykästä infrastruktuurihanketta voi arvioida, mitä teknologioita sen toteuttamisessa voidaan hyödyntää sekä minkälaisia älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja kaupungin infrastruktuuriin on mahdollista toteuttaa. Tutkielma on toteutettu systemaattisena kirjallisuuskatsauksena, jonka lähteinä on pääasiassa käytetty ajankohtaisia ja aiheeseen liittyviä tieteellisiä artikkeleita ja raportteja. Tutkielma pyrkii vastaamaan ensiksi tutkimuskysymyksiin: *"Mitä älykäs infrastruktuuri on?"*, *"Millä teknologioilla älykäs infrastruktuuri mahdollistetaan?"*, jonka jälkeen vastataan kysymykseen *"Minkälaisia älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja voidaan toteuttaa"*. Tässä tutkielmassa tutkitaan, minkälaisia makrotason teknologioita voidaan hyödyntää älykkään infrastruktuurin toteuttamisessa sekä miten nämä teknologiat liittyvät erinäisiin älykkäisiin infrastruktuuriratkaisuihin. Tutkielman tarkoituksena ei ole opastaa miten älykäs infrastruktuurijärjestelmä toteutetaan vaan esittää teknologiat, joiden avulla toteuttaminen on mahdollista.

Avainsanat: älykäs infrastruktuuri, älykaupunki, esineiden internet, IoT, massadata

## ABSTRACT

Miika Mikkonen

Smart infrastructure: usage & technologies

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2021, 39 pp.

Information Systems, Bachelor's Thesis

Supervisor: Kyppö, Jorma

In recent years, sustainable development and the intellectualization of the city have played a significant role in urban development. As a result, the number of smart city projects has increased over the last decade. The smart city is based on the utilization of intelligent information and communication technology in different parts of the city. One of these areas is infrastructure. Smart infrastructure is an integral part of urban development and in the intellectualization of the city, smart infrastructure can be used to make the urban environment more efficient, safer, more pleasant and in line with the principles of sustainable development. It can be said that smart infrastructure serves as the backbone of a smart city. This bachelor's thesis focuses on clarifying what smart infrastructure is, how a smart infrastructure project can be evaluated, what technologies can be utilized in its implementation, and what smart infrastructure solutions can be implemented. This paper is a systematic literature review and the sources used in this paper are the most relevant scientific articles and reports. The paper seeks to answer the following research questions: *"What kind of smart infrastructure solutions can be implemented?"*, *"What is smart infrastructure?"*, *"What technologies enable smart infrastructure?"*. This paper examines what kind of macro-level technologies can be utilized in the implementation of smart infrastructure and how these technologies are related to various smart infrastructure solutions. The purpose of this paper is not to guide how a smart infrastructure system is implemented, but to present the technologies that make implementation possible.

Keywords: smart infrastructure, smart city, internet of things, IoT, big data

## KUVIOT

Kuvio 1 Älykkään infrastruktuurin tasot, arvot, periaatteet .....	11
Kuvio 2 IoT-järjestelmän elementit .....	17
Kuvio 3 Massadatan määritelmät online-kyselyn perusteella.....	20

## TAULUKOT

TAULUKKO 1 Älykkäät infrastruktuuriratkaisut ja niissä käytettävät teknologiat mukailleen. ....	23
TAULUKKO 2 Perinteisen ja älykkään sähköverkon erot. ....	24
TAULUKKO 3 Suomen kaupunkien älykkäät infrastruktuuriratkaisut.....	29

## SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ .....	2
ABSTRACT .....	3
KUVIOT .....	4
TAULUKOT .....	4
1 JOHDANTO .....	6
2 ÄLYKÄS INFRASTRUKTUURI JA SEN KEHITTÄMINEN .....	8
2.1 Älykkään infrastruktuurin tarve .....	8
2.1 Älykkään infrastruktuurin määritelmä .....	9
2.2 TAP-viitekehys .....	10
2.2.1 Tasot .....	11
2.2.2 Arvot .....	12
2.2.3 Periaatteet .....	13
3 ESINEIDEN INTERNET JA MASSADATA .....	14
3.1 Esineiden internet .....	14
3.1.1 Arkkitehtuurit .....	15
3.1.2. Teknologiat .....	16
3.2 Massadata .....	18
3.2.1 4V malli (määritelmä) .....	19
3.2.2 Käyttökohteet .....	21
3.3 Data ja laskenta .....	21
4. TEKNOLOGIAT MAHDOLLISTAMASSA ÄLYKKÄÄN INFRASTRUKTUURIN .....	23
4.1 Älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja .....	23
4.2.1 Älykäs sähköverkko ja energia .....	24
4.2.1 Älykäs vesihuolto .....	25
4.2.1 Älykäs jätehuolto .....	25
4.2.1 Älykäs liikenteen hallinta .....	25
4.2.1 Älykkäät rakennukset .....	26
4.2 Älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja Suomessa .....	27
5 YHTEENVETO .....	30
6 LÄHTEET .....	33

# 1 JOHDANTO

Infrastruktuurin merkitys ihmisen elämän kannalta on valtava. Tavallinen ihminen, joka ei ole kiinnostunut infrastruktuurista ollenkaan, helposti pitää ympärillään olevia infrastruktuurijärjestelmiä itsestäänselvyyksinä. Ajattelutapa on varsinkin kolmannen maailman maissa tyypillistä. Kaupunkilainen saattaa pitää esimerkiksi veden saantia hanasta tai sähkön saantia pistorasiasta oletuksena. Kuitenkin infrastruktuurin ylläpitämiseen, monitoroimiseen ja hallinnoimiseen kuluu paljon resursseja koska lähestulkoon kaikki fyysisen infrastruktuurin monitoroiminen tehdään manuaalisesti. Vähäisten resurssien tehokas käyttö tulee tulevaisuudessa kaupunkimuuton mukana entistä tärkeämmäksi.

Vuonna 2008 kaupunkialueella asuvan väestön määrä ylitti 50 %, koko maailman väestöstä (United Nations, 2008). Tämän määrään oletetaan ylittävän yli 68 % vuoteen 2050 mennessä. Tämä tarkoittaisi yli 6.6 miljardin ihmisen asuvan kaupunkialueilla (United Nations, 2018). Näiden lukujen takia viime vuosikymmenen aikana alkaneilla älykaupunki ja samalla älyinfrastruktuurihankkeilla pyritään täyttämään kaupunkikehityksen kasvavia vaatimuksia ja luomaan tehokkaampia ja kestäväen kehityksen mukaisia kaupunkeja.

Älykkään infrastruktuurin mahdollisuuksia julkisen infrastruktuurin kehittämiseksi on tutkittu jo 1990-luvun alusta mm. Feng, Suzuki ja Yokoi (1995), ovat esittäneet sensori teknologian hyödyntämistä, kansalaisinfrastruktuurissa. Nämä tutkimukset kuitenkin keskittyivät enemmän fyysisen infrastruktuurin rakenteellisen kunnon seurantaan. Nykyään älykkään infrastruktuurin nähdään mahdollistavan myös esimerkiksi energiatehokkuutta, liikenteenseurantaa, kasvihuonepäästöjen alentamista sekä vedenkäytön optimointia.

Kirjallisuudessa puhutaan paljon enemmän älykkään kaupungin hyödyntämisestä kuin älykkään infrastruktuurin hyödyntämisestä, vastatessa kaupunkimuuton lisääntymisen haasteisiin. Kuitenkin älykäs infrastruktuuri on olennainen osa älykkään kaupungin kehittämistä ja esimerkiksi Ogien, Perezin ja Dignummin (2017) mukaan Alkandari ym., (2012) on kuvaillut älykästä infrastruktuuria älykaupungin selkärankana. Tässä tutkielmassa on tästä syystä pyritty tutki-

maan älykkään infrastruktuurin mahdollistamia ratkaisuja ja niiden hyödyntämiä makrotason teknologioita. Makrotason teknologioita ovat mm. pilvilaskenta (eng. Cloud Computing), esineiden internet (eng. Internet of things, IoT), massadata (eng. Big data) ja erilaiset kommunikointi teknologiat (Rice & Martin, 2020). Tutkielmassa kasataan yhteen kirjallisuudesta löytyvää tietoa: älykkäästä infrastruktuurista, älykkäistä kaupungeista, esineiden internetistä, massadatasta ja älykkäistä infrastruktuuriratkaisuista, joita voidaan hyödyntää infrastruktuurin eri osa-alueilla.

Ensiksi tutkielmassa käymme läpi älykkään infrastruktuurin määritelmää ja sen piirteitä. Piirteiden valossa pyrimme luomaan kuvaa siitä, mitkä ovat tärkeitä huomioitavia asioita älykkästä infrastruktuuria kehittäessä. Kolmannessa luvussa syvennymme esineiden internettiin, massadataan ja siihen miten nämä teknologiat mahdollistavat älykkään infrastruktuurin kehittämisen. Neljännessä luvussa pyrimme esittelemään älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja ja niiden hyödyntämiä teknologioita.

Tutkielman tutkimuskysymyksinä toimivat seuraavat:

- Mitä älykkäs infrastruktuuri on?
- Millä teknologioilla älykkäs infrastruktuuri mahdollistetaan?
- Minkälaisia älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja voidaan toteuttaa?

Tutkimuskysymyksiin pyritään vastaamaan perehtymällä aiheisiin liittyvään tieteelliseen kirjallisuuteen. Aihe on monialainen, joten vastauksia etsitään myös aihetta sivuavista tieteenaloista.

Tutkimus toteutetaan systemaattisena kirjallisuuskatsauksena. Tämän kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on tuottaa selkeä, akateeminen kokonaisuus aiheesta. Lähdemateriaalia haetaan pääasiassa Scopus, Google Scholar sekä Jyväskylän yliopiston JYKDOK-tietokannasta käyttämällä AND-OR-hakulauserakenteita. Lähdemateriaalina toimii lähinnä tieteelliset artikkelit, konferenssijulkaisut sekä muista luotettavista sähköisistä lähteistä löydettävät julkaisut. Artikkeleiden ja konferenssijulkaisujen luotettavuutta tarkastellaan kriittisesti sekä tarkistetaan julkaisujen julkaisufoorumin mukaiset luokitukset.

Vaikka aihealue on poikkitieteellinen, niin pyritään tutkielmassa pääasiallisesti tarkastelemaan aihetta informaatio- ja viestintäteknologian (ICT) hyödyntämisen kautta.

## 2 ÄLYKÄS INFRASTRUKTUURI JA SEN KEHITTÄMINEN

Tässä luvussa käsitellään tavallista ja älykästä infrastruktuuria. Älykkään infrastruktuurin kehittämisen syitä avataan, jonka jälkeen esitellään älykkäälle infrastruktuurille esiintyviä määritelmiä kirjallisuudesta. Lopuksi käsitellään älykkään infrastruktuurihankkeen arvioimisessa huomioitavia asioita, jotta ymmärretään minkälaisia asioita älykkään infrastruktuurin kehittäminen, vaatii älykkäältä infrastruktuurijärjestelmältä.

### 2.1 Älykkään infrastruktuurin tarve

Infrastruktuurin ikääntyminen on ollut vuosikymmenten ajan kaupunkikehityksen pitkäaikaisena haasteena (Morimoto, 2013). Jatkuvan kaupunkimuuton mukana tulevat ihmismäärät vaikuttavat, suorasti ja epäsuorasti, infrastruktuurin kulumiseen. Kiihtyvän infrastruktuurin kulumisen mukana tuo infrastruktuurin huoltaminen, monitoroiminen ja kehittäminen omat haasteensa. National academy of engineeringin (2017) mukaan yksi suurimmista 2100-luvun haasteista on infrastruktuurin uudelleenrakentaminen ja kehittäminen. Infrastruktuuri määritellään kirjallisuudessa monella eri tavalla. Rinaldin, Peerenboomin ja Kellyn (2001) tutkimuksessa huomataan että, "infrastruktuuri"-termi on vuosien varrella kehittynyt ja laajentunut. Lähes kaikissa määritelmissä nousee kuitenkin esiin, että infrastruktuuri koostuu rakenteista, jotka mahdollistavat tavaran, tiedon ja palveluiden kierron, kaupunki- ja alueellisessa ympäristössä (Rinaldi, Peerenboom & Kelly, 2001; Morimoto, 2010; Ogie, Perez & Dignum, 2017).

Kuluvan infrastruktuurin huoltamisen ja kehittämisen haasteisiin on mahdollista vastata kehittämällä älykästä infrastruktuuria. Älykäs infrastruktuuri voi mahdollistaa tulevaisuuden kaupungit, ja näiden kautta saatavat innovaatiot ja ratkaisut kaupungistumisen haasteisiin. Ratkaisuja voivat olla mm. älykäs liikenteenseuranta, älykkäät sähköverkot sekä älykäs vesi- ja jätehuolto. Älykkäillä ratkaisuilla on mahdollistaa vähentää energian kulutusta sekä mahdollistaa turvallisempi kaupunki ymmärtämällä, milloin rakenteiden ongelmat voivat olla riskitekijöinä ihmisille. Älykkästä infrastruktuurista saatavalla datalla voidaan kehittää kaupungin palveluita ja lisätä innovaatioiden määrää avaamalla tätä dataa julkisuuteen (The Standing Committee on Infrastructure: Transport and Cities, 2016).

Teknologian kehittyessä ja uusien innovaatioiden syntyessä haasteisiin vastaavia älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja on mahdollista kehittää. Älykkään infrastruktuurin laaja-alainen implementoiminen vaatii yleensä koko kaupungin infrastruktuurin älyllistämisen. Ongelmana esiintyy, että näin suuren infrastruktuurin hankkeeseen tarvitaan paljon resursseja, joten tämä ei ole käytännössä mahdollista. Tämän takia pienempiä älykkäitä infrastruktuurihankkeita, joiden tavoitteena on älyllistää tietty kaupunginosa tai infrastruktuurin osa-alue, on



aloitettu. (Mourshed, Bucchiarone & Khandokar, 2016). Esimerkkinä kaupungin osan äylyttämisestä voidaan käyttää Jyväskylän Kangas aluetta, jonka kehittäminen aloitettiin vuonna 2010. Kankaan alueen infrastruktuurissa hyödynnetään mm. älykästä sähköverkkoa ja älykästä jätehuoltoa. (Jyväskylän kaupunki, 2018b)

Tavallisen eli ”tyhmän” infrastruktuurin ja älykkään infrastruktuurin välillä olevat erot voivat olla tavalliselle kaupungin asukkaalle vaikeita huomata. Tyhmällä infrastruktuurilla tarkoitetaan sellaista infrastruktuuria, joka ei osaa kommunikoida, mukautua ympäristöön eikä muodostamaan yhteyttä suurempaan verkkoon. Älykkään infrastruktuurin etu tulee siinä, että infrastruktuurin rakenteisiin asennettavat laitteet pystyvät kommunikoimaan keskenään. Näin älykäs infrastruktuuri pystyy kommunikoimaan laajemman laite verkoston kanssa ja hyödyntämään kerättyä dataa mukautumalla muuttuvaan ympäristöön. (Ogie, Perez & Dignum, 2017).

## 2.1 Älykkään infrastruktuurin määritelmä

Tyhmän ja älykkään infrastruktuurin määritelmä erot selkeytyvät, kun aletaan tutkimaan aiheista kirjallisuutta. Älykkään infrastruktuurin ajatellaan yleisesti koostuvan fyysisestä infrastruktuurista sekä siihen rakennettavasta ICT:stä. ICT mahdollistetaan laitteilla, esimerkiksi sensoreilla ja aktuaattoreilla, jotka asennetaan fyysiseen infrastruktuuriin. Nämä laitteet yhdistetään verkkoyhteydellä ja niistä luodaan ns. ”esineiden internet”, jossa sensoreiden keräämä data kulkee.

Kirjallisuutta älykkäästä infrastruktuurista on paljon ja älykkään infrastruktuurin toiminnan edellytykset tiedetään. Älykkäälle infrastruktuurille ei kuitenkaan löydy kirjallisuudesta yhtä yhtenäistä määritelmää. Määritelmän puuttuminen hankaloittaa älykkään infrastruktuurin kehittämistä sekä näiden hankkeiden onnistumista/onnistumisen arviointia. Hankkeita täytyy pystyä arvioimaan sekä valvomaan, sillä infrastruktuurin toiminta on kriittistä kaupungin toiminnalle ja kehittymiselle.

Yhtenä määritelmänä älykkäälle infrastruktuurille voidaan esittää, että se on, yhteen kytkettyjen palveluiden ja laitteiden muodostama rakenne, jota ajaa teknologia. (Soyinka, Siu & Adeniji, 2016). Kardos, Suter, Mullican, Nicol, Line, York ja Salman (2020) taas määrittelevät älykkään infrastruktuurin älykkäästi yhteydessä olevina energia järjestelminä, rakennuksina ja teollisuutena, jotka mukautuvat ihmisten työskentelyyn ja elämään. Yksi kattavimmista määritelmistä on kuitenkin Mehmoodin, Seen, Katibin ja Chlamtacin (2020, s. vi) kirjassa ”Smart infrastructure and applications: Foundations for Smarter Cities and Societies”, jossa he määrittelevät älykkään infrastruktuurin seuraavasti:

Määrittelemme älykkään infrastruktuurin olevan tietoon ja yhteistyöhön perustuva, lähentyvä, kaikkialla läsnä oleva, itsetietoinen, mukautuva, kestävä, digitaalinen ja itsehallinnollinen perustava rakenne, joka käsittää kovat, pehmeät, virtuaaliset ja digitaaliset palvelut ja järjestelmät sekä henkisen ja sosiaalisen pääoman. Mahdollista-

essaan sosiaalisen, ympäristöllisen ja taloudellisen kestävyuden mahdollistamalla innovaatiot ja kilpailukyvyyn helpottaessaan yksilöllistämistä kaikilla elämän osa-alueilla nykyaikana ja tulevaisuudessa, mukaan lukien kuljetuksen, terveydenhuollon, viihteen, työn teon, liiketoiminnan, sosiaalisen vuorovaikutuksen ja hallinnon; vastaamaan organisaatioiden, kaupunkien tai maiden yhteiskunnallisiin, taloudellisiin ja muihin vaatimuksiin. (Mehmood, See, Katib ja Chlamtac, 2020, s.vi)

Älykkään infrastruktuurin määritelmät erot koostuvat pääasiassa tutkimusten näkökulmista ja niiden tavoitteiden eroista. Morimoton (2010) ja Soyinkan, Siun ja Adenijin (2016) määritelmät painottuvat älykkään infrastruktuurin laitteisiin ja palveluihin, jotka mahdollistavat älykkään infrastruktuurin rakentamisen ja hyödyntämisen. Taas, Mehmoodin ym. (2020) sekä Kardosin ym. (2020) määritelmät painottuva enemmän älykkään infrastruktuurin merkittävyyteen ihmisille. Kaikissa määritelmissä kuitenkin esiintyy viisi asiaa, joiden avulla voidaan luoda ymmärrys älykkäästä infrastruktuurista. Älykäs infrastruktuuri on ympäristöön mukautuva järjestelmä, jossa on verkostoituneita esineitä, jotka ovat älykkäästi yhteydessä toisiinsa, ne keräävät reaaliaikaista dataa sekä osaavat tehdä päätöksiä tämän jalostetun datan perusteella. (Morimoto, 2010; Kardos ym., 2020; Chu, Wang & Lecklie, 2012).

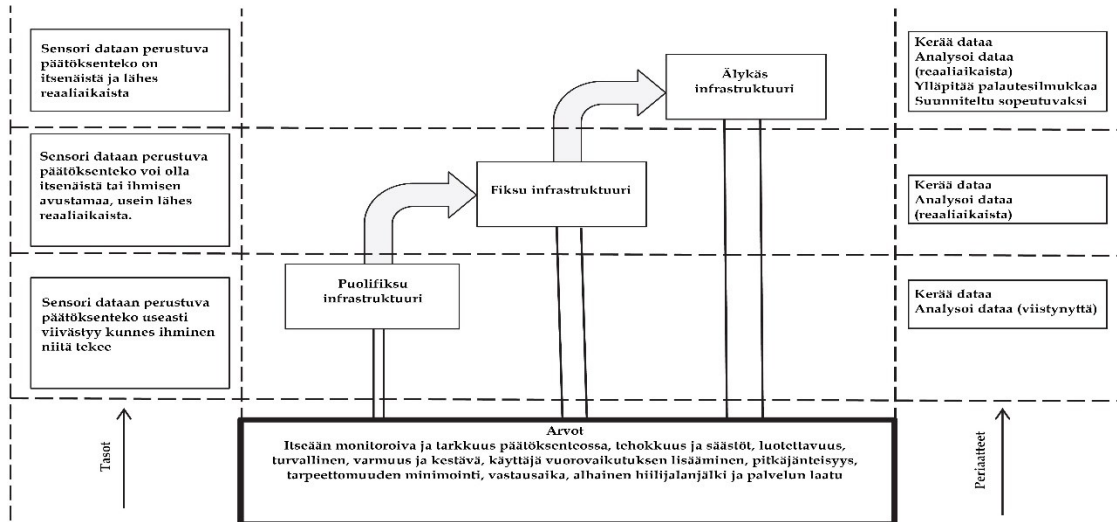
Tässä tutkielmassa älykäs infrastruktuuri nähdään koostuvan Angelidoun (2014) määrittelemästä ”kovaan” infrastruktuuri strategiaan kuuluvista alueista (liikenne, vesihuolto, jätehuolto, sähköverkko), joissa hyödynnetään älykästä teknologiaa.

## 2.2 TAP-viitekehys

Älykkään infrastruktuurin mitattavuutta ja hankkeiden onnistumisen arviointia hankaloittaa yhtenäisen määritelmän puuttuminen. Älykkään infrastruktuurin hyödyntäminen, vanhan ja tyhmän infrastruktuurin kehittämisessä voi auttaa ratkaisemaan ikääntyvän ja kuluvan infrastruktuurin ongelmia. Älykkäät infrastruktuurihankkeet tulevat näin ollen olemaan oleellisessa osassa kaupunkikehitystä, joten näiden älykkäiden infrastruktuurijärjestelmä ratkaisujen onnistuminen on kriittistä.

Kirjallisuudessa älykkäiden infrastruktuurihankkeiden onnistumista ei ole juurikaan kuvattu. Moni tutkimus kuvaa yleensä ohimennen tutkimuksen ratkaisujen onnistumisen ehtoja, mutta selkeää keskustelua älykkään infrastruktuurin kehittämisen arvioimisesta ei ole kirjallisuudessa käyty.

Ogie ym. (2017) ehdottavat TAP-viitekehystä älykkäiden infrastruktuurihankkeiden kehittämiseen. Viitekehys koostuu infrastruktuurin tasosta (L, eng. ”levels”), arvoista (V, eng. ”values”) sekä periaatteista (P, eng. ”principles”). Jokainen viitekehysten osista antaa selityksen siitä, mikä pitäisi olla tyyppillistä älykkäälle infrastruktuurille (kuvio 1).



Kuvio 1 Älykkään infrastruktuurin tasot, arvot, periaatteet. (Ogie ym., 2017)

### 2.2.1 Tasot

Ogie ym. (2017) määrittelevät älykkään infrastruktuurijärjestelmän tasoiksi, puolifiksu (eng. "semi-intelligent"), fiksu (eng. "intelligent") ja älykäs (eng. "smart"). Tasot perustuvat The Royal Academy of Engineeringin (2012) raportissa esitettävään "älykkään järjestelmän" tasoihin. "Smart" ja "intelligent" termien käyttö on huonosti määriteltyä aiheen kirjallisuudessa. Mitä pidemmälle 2010-lukua päästään sitä enemmän "smart" sanan käyttö on lisääntynyt, kun taas "intelligent" sanaa on käytetty ennen "smart" sanan yleistymistä laajalti, kun on määritelty älykkästä infrastruktuuria. Tasojen määrittelemisen nimeämistä vaikeuttaa myös se että, aiemmassa kirjallisuudessa "intelligent" sanaa on käytetty älykkäämpänä versiona "smart" sanasta. (Ogie ym., 2017). Tässä kirjallisuuskatsauksessa älykkyyden (eng. "smartness") pyritään ja fiksuus (eng. "intelligence") on alempana älykkyyden tasolla.

- *Puolifiksu infrastruktuuri:* Tällä tarkoitetaan infrastruktuuria, joka kerää dataa itsestään, rakenteen kunnosta, ympäristöstä jne. Tämän datan avulla tuleva uusi infrastruktuurin kehittäjä voi luoda uusia ratkaisuja datan pohjalta, kuitenkin tällä tasolla järjestelmä itsessään ei vielä osaa tehdä päätöksiä. (Ogie ym., 2017) Morimoton (2010) määritelmä älykkästä infrastruktuurista menisi tälle tasolle. Sillä tämä määritelmä ei kata kuin datan keräämisen rakenteen kunnosta.
- *Fiksu infrastruktuuri:* Fiksulle infrastruktuurille tyypillistä on että, järjestelmä kerää ja prosessoi saanutta dataa ja luo tämän pohjalta informaatiota ja mahdollisesti myös ratkaisuja, kuten ilmoittaa autoa ajaville reiästä tiessä. (Ogie ym., 2017)
- *Älykäs infrastruktuuri:* Älykkäällä infrastruktuurijärjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, joka toimii täysin autonomisesti ja dynaamisesti sekä osaa mukautua ympäristöön. Esimerkkinä älykkästä infrastruktuurista on älykkäät sähköverkot, jotka osaavat mukautua energian vientiin ja on-

nettomuuden koittaessa osaavat katkaista virransyötön ongelma kohdassa. Myöhemmissä kappaleissa puhutaan enemmän mitä älykäs infrastruktuurijärjestelmä on käytännössä. (Ogie ym., 2017)

### 2.2.2 Arvot

Älykkään infrastruktuurin arvot ovat älykkään infrastruktuurihankkeen ympärillä pyöriviä arvoja, jotka ohjaavat hankkeen etenemistä sekä sen kehittymistä korkeammalle älykkyyden tasolle. Älykkään infrastruktuurin arvot perustuen (Ogie ym., 2017):

- *Itseään monitoroiva:* Älykäs infrastruktuuri osaa monitoroida omaa kuntoaan. Tällä tarkoitetaan infrastruktuurijärjestelmän kykyä huomioida ja enustaa esimerkiksi huollon tarvetta ongelmallisessa osassa.
- *Tehokkuus ja kulujen vähentäminen:* Älykkään järjestelmän odotetaan vähentävän turhaa työn määrää, vähentämällä infrastruktuurin monitorointi kuluja, optimoimalla rakenteiden huollon tarvetta sekä tehostamalla suunnittelua.
- *Luotettava:* Järjestelmän täytyy kannustaa palveluvikojen vähentämistä ja häiriöiden minimointia. Älykkään infrastruktuurin odotetaan myös pysyvän vähentämään häiriöiden aikoja suorittamalla rutiinin omaisia korjauksia.
- *Turvallinen ja kestävä:* Järjestelmän käyttöönotossa on huomioitava, että järjestelmä on turvallinen (eng. secure, safe). Tällä tarkoitetaan, että järjestelmän tietoturvaan ja toimintaan täytyy luottaa ilman pelkoa, jos järjestelmä pettää niin ei saa syntyä huolia yksityisyyden menettämisestä.
- *Käyttäjän vuorovaikutus:* Älykkäällä järjestelmällä pyritään tuomaan myös asiakkaalle lisää mahdollisuuksia palveluiden muodossa. Palveluita voivat olla esimerkiksi avoimen datan tarjoaminen, enemmän valtaa sähkön alkuperän hyödyntämiseen tai älykkään rakennuksen ilmanvaihtoon vaihtaminen.
- *Kestävyys:* Kestävän kehityksen haasteisiin vastaaminen on kirjallisuudessa esitetty syyksi älykkäiden teknologioiden käyttämiseen, hyödyntämällä tehokkaasti vähäisiä resursseja.
- *Tarpeettomuuden minimointi:* Älykkään järjestelmän komponenttien optimointi. Tavoitellaan sellaista tilaa, että järjestelmässä ei olisi yhtäkään turhaa komponenttia.
- *Vastausaika:* Älykkään järjestelmän odotetaan osaavan vastaamaan käyttökatkoihin nopeasti, joko korjaamalla syntyneen ongelman tai ilmoittamalla asiasta ihmiselle. Älykkään järjestelmän korkein taso olettaa myös älykkään järjestelmän osaavan ennustaa katkojen syntymisen ja ilmoittavan näistä ajoissa.
- *Alhainen hiilijalanjälki:* Hiilijalanjäljen alentaminen on yksi suurimmista kestävä kehityksen haasteista. Tähän haasteeseen pyritään kehittämään

järjestelmiä, jotka vähentävät kaupungin toimintaan liittyvää hiilijalanjäljen syntyä.

- *Palvelun laatu:* Älykkään infrastruktuurin kuuluu parantaa kaupungin palveluita, mahdollistamaan innovaatioiden syntyä sekä varmistamaan paremman elämänlaadun kaupunkialueella.

### 2.2.3 Periaatteet

Älykkään infrastruktuurihankkeen periaatteet kannustavat älykkään järjestelmän toimivuutta. Periaatteita nähdään esimerkiksi esineiden internetin järjestelmissä ja perustuvat älykkään infrastruktuurin tasoihin. Ilman näitä periaatteita ei älykästä infrastruktuuria ole mahdollista kehittää. Periaatteita ovat seuraavat (Ogie ym., 2017):

- *Datan hankinta:* Datan hankinta toimii älykkään infrastruktuurin pohjana. Dataa saadaan esimerkiksi sensoreista, kameroista ja muista havaitsemislaitteista, joita infrastruktuuriin on sijoitettu. Sensoreista saadun datan avulla, on mahdollista saada tietoa infrastruktuurin tilasta ja sen tulevaisuudesta.
- *Datan analysointi:* Jotta infrastruktuurista saadusta datasta on mitään hyötyä. Tulee dataa pystyä analysoimaan. Merriam-Webster määrittelee analysoinnin seuraavasti, ”tutkia tai määrittää osan (osien) luonne ja suhde analyysin avulla”. Datasta pyritään siis luomaan informaatiota, jota ihminen voi hyödyntää päätöksenteossa. Informaatio voi olla esimerkiksi ennustavia kaavioita, infrastruktuurin kunnon etenemisestä tehty raportti tai infrastruktuurin tilan esittämistä.
- *Palautesilmukan ylläpito:* Älykkään infrastruktuurin mukautuvuus mahdollistetaan jatkuvalla datan kierrolla järjestelmässä. Järjestelmä tuottaa koko ajan lisää dataa, jota se jatkuvasti prosessoi. Tästä prosessoidusta datasta syntyvä informaatio syötetään takaisin järjestelmään, jotta järjestelmä osaa tehdä parempia päätöksiä reaaliaikaisen informaation pohjalta.
- *Sopeutuvuus suunnittelu:* Infrastruktuuri on alituisesti muuttuva kehitysalue, joten älykkään infrastruktuurijärjestelmän on oltava valmis mukautumaan ympäristön muutoksiin. Infrastruktuurin upotettuiden laitteiden on oltava mukautuvia, eli niitä täytyy olla mahdollista uudelleen konfiguroida ja hyödyntää erilaisen datan hankintaan

### 3 ESINEIDEN INTERNET JA MASSADATA

Tässä luvussa tarkastellaan älykkään infrastruktuurin toteuttamiseen tarvittavia teknologioita. Ilman näitä teknologioita, tutkielman kirjoittamisen hetkenä, olisi erittäin haastavaa onnistuneesti kehittää älykästä infrastruktuuria.

#### 3.1 Esineiden internet

IoT eli Esineiden internet on viestintäparadigma, jota ohjaa kommunikaatio, esineiden välinen yhteistyö sekä datan kerääminen. Esineiden internetin nimi tulee siinä esiintyvistä esineistä tai asioista (Things) ja niiden synnyttämästä verkosta (internet). Nämä verkostoituneet esineet luovat ns. "esineiden internetin". IoT:lle ei löydy kirjallisuudesta yhtä yksittäistä määritelmää (Miorandi, Sicari, De Pellegrini & Chlamtac, 2012). IoT:tä kuitenkin voidaan ajatella verkkona, joka koostuu jokapäiväisistä esineistä, jotka ovat luettavissa, tunnistettavissa, paikannettavissa, osoitettavissa ja/tai hallittavissa internetin kautta (Rao, Saluia, Sharma, Mittal & Sharma, 2012).

Atzori, Iera, Motabito (2010) ovat esittäneet paradigmalle kolme erilaista näkökulmaa, joista esineiden internet koostuu. Nämä ovat: esine (eng. Things-oriented), internet (eng. Internet-oriented) ja semanttinen (eng. Semantic-oriented) näkökulma. Ensimmäinen esineiden internetin määritelmä on peräisin esineiden näkökulmasta, jossa esineet ovat yksinkertaisia tunnistamislaitteita kuten RFID-tageja ja RFID-lukijoille (eng. Radio Frequency Identification), joiden avulla siirretään dataa järjestelmässä eteenpäin. Tätä dataa voidaan hyödyntää palvelujen tuottamista varten (Miorandi ym., 2012; Gubbi, Buyya, Marusic & Palaniswami, 2013; Jin, Gubbi, Marusic & Palaniswami, 2014). Internet näkökulmaa vievät eteenpäin erityisesti IPSO (IP for Smart objects) alliance, jotka näkevät IP-protokollan olevan kommunikoinnin mahdollistava tekijä valtavien kommunikointilaitte verkostojen sisällä. Kommunikointilaitteet toimivat pääasiassa pienillä, paristokäyttöisillä sulautetuilla laitteilla.

Semanttisella näkemyksellä keskitytään IoT:n tuottaman tiedon hallintaan. Semanttisen näkemyksen perusidea on, että kun internetissä olevien laitteiden määrä kasvaa niin tulee IoT:n tuottaman tiedon hallitsemisesta erittäin haastavaa. Tällöin semanttiset teknologiat, kuten XML (Extensible Markup Language) ja JSON (JavaScript Object Notation) kielet, esiintyvät keskeisinä tekijöinä IoT-järjestelmissä. (Atzori ym., 2010).

IoT eroaa myös tavallisesta Human-to-Human (H2H) eli ihmisten välisestä internetistä niin että sen verkossa vuorovaikutusta ei tapahdu pelkästään H2H, vaan pääasiassa Machine-to-Human (M2H) ja Machine-to-Machine (M2M) eli ihmisen ja laitteen sekä pelkästään laitteiden välillä.

### 3.1.1 Arkkitehtuurit

IoT-arkkitehtuurit jaetaan kirjallisuudessa neljällä eri tavalla: 3-kerroksiseen, väliohjelmisto painotteiseen, palvelu painotteiseen sekä 5-kerroksiseen malliin. Vaikka IoT:lle on yritetty määrittää yhteistä arkkitehtuuria projekteissa kuten Euroopan unionin (EU) IoT-A (Internet of Things - Architecture) projekti, jossa referenssi mallia IoT-arkkitehtuurista kehitettiin luomalla sille alimalleja (Cordis EU, 2015). Ehdotetuista malleista 3-kerroksinen malli on silti kirjallisuudessa yleisimmin käytetty. 3-kerroksinen arkkitehtuurimalli koostuu: havainnointi, verkko ja sovellus kerroksesta. (Al-Fuqaha ym., 2015)

- *Havainnointikerros*: Voidaan kuvailla myös sensorikerrokseksi. Se koostuu niin sanotusti "oikean maailman esineistä" (eng, real-life objects) (sensorit, aktuaattorit, RFID-tagit), joiden kanssa havainnointikerros on vuorovaikutuksessa. Havainnointikerroksen tavoitteena on kerätä dataa esineiltä ja kiinnittää laitteet IoT-verkkoon sekä siirtää kerätty data verkkokerrokselle. (Al-Fuqaha ym., 2015; Lin ym., 2017)
- *Verkkokerros*: Kuvailtaan useasti tärkeimpänä kerroksena IoT-arkkitehtuurissa. Verkkokerroksessa siirretään ja prosessoidaan dataa sekä päätetään mitä kautta ja mihin dataa ja siitä syntynyttä informaatiota siirretään. Verkkokerroksessa dataa lähetetään ns. "osoitteeseen", jonka omistaa kaikki esineet IoT-verkossa. Näiden osoitteiden avulla jokainen laite kyseisessä verkossa pystytään tunnistamaan ja osoittamaan. Ilman osoitteiden määrittämistä IoT-esineet eivät voisi kommunikoida toistensa kanssa. Data lähetetään verkossa määriteltyjen yleisten kommunikointi teknologioiden (Bluetooth, Wi-Fi, LTE ym.) ja protokollien (IPv4, IPv6) avulla. (Al-Fuqaha ym., 2015; Jin ym., 2014; Lin ym., 2017)
- *Sovelluskerros*: Tarkoituksena on tuottaa verkkokerrokselta tulleen datan perusteella palveluita käyttäjälle. Saadun datan perusteella voidaan rakentaa malleja, joita on mahdollista analysoida hyödynnettäväksi päätöksenteossa. Palvelut määräytyvät täysin halutun käytön seurauksena. Tällä tarkoitetaan, että palvelut, joita esineiden internet tuottaa tällä kerroksella ovat riippuvaisia siitä mikä sensorien haluttu käyttötarkoitus on. Älykäs

infrastruktuuri voidaan ajatella sovelluskerroksessa tarjottavana palveluna kaupungille. Älykäs infrastruktuuri ei kuitenkaan ole pelkästään palvelu, vaan se on kokonaisuus, jonka avulla voidaan seurata kaupungin infrastruktuurin tilaa ja sen kehittymistä.

Kirjallisuutta tutkiessa huomataan, että kyseinen kokonaisuuden hallitseminen ja seuranta yhdistetään 3-kerros arkkitehtuurissa tarjottavien palveluiden kanssa. Tämä ei monissakaan tilanteissa luo selkeää erittelyä, tarjottavien toimintojen sekä niiden seurannan välillä. 3-kerros arkkitehtuuria on myös kritisoitu sen abstraktion puutteesta (Al-Fuqaha ym., 2015). Tällä tarkoitetaan, että tämä arkkitehtuurimalli ei kuvaa tarpeeksi sen kerroksissa, esiintyviä teknologioita ja toimintoja.

Tämän takia kirjallisuudessa on viimeisen vuosikymmenen aikana aloitettu käyttämään 5-kerros arkkitehtuurimallia. 5-kerros arkkitehtuurimallin etuna on, että siinä kuvatut liiketoiminta-, sovellus- ja palvelukerros korvaavat 3-kerros arkkitehtuurimallissa kuvatun sovelluskerroksen. Tämä mahdollistaa sovelluskerroksen toimintojen erittelyn omille kerroksilleen. Tässä arkkitehtuurimallissa palvelukerroksen tehtävänä on yhdistää palvelunhakija (esine, sovellus ym.) ja palvelu turvallisesti toisiinsa. Tämä mahdollistaa myös ohjelmoijien työskentelyn heterogeenisten eli monenlaisten laitteiden kanssa.

Sovellus- ja liiketoimintakerros 5-kerros arkkitehtuurissa hoitavat palvelut ja niiden käyttämisen. Sovelluskerros tuottaa käyttäjille heidän pyytämänsä datan. Data voi olla esimerkiksi: rakennusten sisälämpötila, ilmankosteus jne. Sovelluskerrokseen osuvat myös älykkäät infrastruktuuriratkaisut, kuten älykäs sähköverkko, jätehuolto, vesihuolto jne.

Liiketoimintakerroksen tarkoituksena on hallinnoida koko IoT-järjestelmän tilaa ja toimintaa. Liiketoimintakerroksessa hyödynnetään sovelluskerrokselta välittyneitä dataa, jonka avulla voidaan rakentaa malleja, avustamaan liiketoimintapäätöksiä, sekä kehittämään liiketoimintamalleja. Liiketoimintakerros on tärkeä varsinkin massadatan (eng. Big data) käsittelyssä, sillä siellä hoidetaan kyseisen massadatan analysointi. (Al-Fuqaha ym., 2015)

### 3.1.2. Teknologiat

IoT:lle on kirjallisuudessa määritetty tärkeitä elementtejä/tukipilareita, jotta IoT-järjestelmää voidaan täysimittaisesti hyödyntää. Miorandi ym. (2012) esittävät että IoT-järjestelmän älykkäiden esineiden täytyy olla tunnistettavissa, kommunikoiivia ja interaktiivisia. Kirjallisuudessa muita esiintyviä näkemyksiä ovat mm. Al-Fuqahan ym. (2015), jossa esineiden internet koostuu tunnistamisesta, havaitsemisesta, viestinnästä, laskennasta, palveluista ja semantiikasta (kuvio 2). Esineiden internet on teknologia pohjainen ratkaisu, jonka käyttömahdollisuudet ovat käytännössä rajattomat. Erinäiset teknologiat mahdollistavat esineiden internetin olemassaolon ja tehokkaan hyödyntämisen. Vaikka esineiden internetissä hyödynnettäviä teknologioita on paljon. On olemassa kuitenkin, muutamia teknologioita, joihin viitataan alan kirjallisuudessa jatkuvasti.





Kuvio 2 IoT-järjestelmän elementit (Al-Fuqaha ym. 2015).

**Älykäs esine** (eng. smart object) nähdään IoT-järjestelmässä, laitteena tai ns. ”esineenä”, jolla on kykyä prosessoida dataa ja/ tai toimittaa käskyjä. Älykkäät esineet rakentavat vankan pohjan IoT-järjestelmän toiminnalle. Älykkäät esineet voivat olla esimerkiksi: sensoreita, aktuaattoreita, puhelimia tai mitä tahansa laitteita, jotka osaavat tehdä päätöksiä datan perusteella. Jotta älykäs esine olisi älykäs ei sen tarvitse kuitenkaan täyttää kaikkia älykkään järjestelmän ominaisuuksia kuten palautesilmukan ylläpito tai täysi autonomisuus. Järjestelmän periaatteet toimivat niin että vastuutehtäviä jaetaan IoT-järjestelmässä älykkäille esineille ja näiden pohjalta älykkään järjestelmän toiminta saadaan varmistettua.

Jotta älykästä järjestelmää voidaan kehittää, tulee älykkäillä esineillä olla tiettyjä ominaisuuksia. López, Ranasinghe, Harrison ja McFarlane (2011) ja Miorandi ym. (2012) esittävät että esineellä täytyy olla uniikki tunniste, sen täytyy pystyä kommunikoimaan muiden älykkäiden esineiden kanssa, vähintäänkin olla löydettävissä sekä pystyä vastaanottamaan ja lähettämään viestejä. Esineiden kuuluu myös pystyä tunnistamaan fyysisiä tapahtumia sekä toteuttamaan vähintäänkin minimaalista prosessointia, esimerkiksi tunnistamaan sille lähetettyjen viestien lähettäjät.

Vähintäänkin älykkäiden esineiden täytyy pystyä toteuttamaan Al-Fuqahan, ym. (2015) elementeistä viisi: tunnistaminen, havaitseminen, viestintä, laskenta ja semantiikka. IoT-järjestelmässä täytyy kuitenkin olla myös esineitä, jotka voivat yhdessä tai yksin toteuttaa palvelujen mahdollistamisen loppukäyttäjälle, jotta IoT-järjestelmän elementit täyttyvät.

**RFID** (Radio frequency identification) eli radiotaajuinen etätunnistus on yksi ensimmäisistä etätunnistus teknologioista, joita esineiden internetissä on käytetty. RFID-järjestelmä koostuu RFID-lukijasta ja RFID-tagista (eng. RFID-tag). RFID-tagin on yksinkertainen sulautettu etätunnistelaite. Se voi olla pieni mikrosiru, joka kiinnitetään esimerkiksi antenniin. Tagilla on oma tunnistettava osoite, jonka avulla laite, johon RFID-tagin on kiinnitetty, voidaan tunnistaa. RFID-lukija pystyy tunnistamaan RFID-tageja niiden osoitteen kautta ja pyytämään tagiin liittyvät tiedot. RFID-teknologian tärkeimpinä etuina on sen pieni koko, nopea skannaus sekä tehokkuus ja vähäinen energian tarve. (Jin ym., 2014; Lin ym., 2017) RFID-järjestelmät voidaan edelleen jakaa passiivisiin ja aktiivisiin.

Passiivisessa RFID-järjestelmässä, RFID-tagit eivät vaadi erillistä voimälähdettä, vaan ne saavat virtansa lukijan lähettämästä signaalista. Tällöin RFID-tagin aktivoituu ainoastaan silloin kun siltä kysytään jotain, esimerkiksi silloin kun RFID-lukija pyytää tietoa laitteen tilasta.

Aktiivisessa RFID-järjestelmässä taas RFID-tagit ovat aktiivisia ja ne tarvitsevat suuremman voimanlähteen esimerkiksi paristot. Aktiiviset RFID-tagit ilmoittavat jatkuvasti tilastaan ja sijainnistaan ympärillä oleville lukijoille. (Atzori ym., 2010; Al-Fuqaha, ym. 2015)

WSN (Wireless Sensor Network) eli langaton sensori verkko on tärkeä tunnistamis- ja viestintäteknologia, jota voidaan hyödyntää IoT-järjestelmän sisäisessä kommunikoinnissa. WSN osaa monitoroida ja seurata laitteiden tilaa sekä lähettää dataa keskitettyihin prosessointi keskuksiin (Lin ym., 2017). WSN koostuu solmuista, joilla on prosessointi voimaa, ja sensoreista/ muista tunnistuselementeistä (kamerat, mittarit jne.), jotka havainnoivat ympäristöään. WSN:n etu muihin teknologioihin johtuu siitä että se on skaalautuva, dynaaminen ja halpa sekä sillä on alhainen energian kulutus (Hoult ym., 2009). Tämä tarkoittaa, että WSN sopisi lähestulkoon täydellisesti älykkään infrastruktuurin toteuttamiseen, jossa esineitä on erittäin paljon ja joita käytetään monilla infrastruktuurin osa-alueilla tekemään erilaisia asioita. (Weigel, Renner, Turau & Ernst, 2014).

RFID ja WSN-teknologiat ovat ratkaisuja, IoT-järjestelmän sisäiseen kommunikaatioon ja tunnistamiseen. Etenkin WSN, mahdollistaa datan jakelun ja sen prosessoinnin. WSN kuitenkin tarvitsee, kommunikaatio standardin, jonka avulla voidaan kommunikaatio solmujen ja muiden laitteiden välillä mahdollistaa. Tällaisia mahdollistavia teknologioita ovat esimerkiksi ZigBee (IEEE 802.15.4) ja 6LoWPAN, jotka ovat laajalti käytettyjä IoT-ratkaisuissa (Botta, de Donato, Persico & Pescapé, 2016). ZigBeeen etuina nähdään sen yksinkertaisuus sekä sen muokattavuus ja luotettavuus. 6LoWPAN (Low-power Wireless Personal Area Network) on matalatehoinen langaton lyhyen kantaman kommunikointi teknologia, jolla on alhainen energian kulutus ja, johon on yhdistetty IPv6-tunnistaminen paketteihin. 6LoWPAN on myös yhteensopiva IEEE 802.15.4 protokollan kanssa ja on näin sopiva käytettäväksi IoT-järjestelmässä. (Lin ym., 2017).

Muita laajan kantaman verkkoteknologioita, joiden avulla RFID- ja WSN-järjestelmät liitetään internettiin ovat esimerkiksi Wifi, WiMax, WLAN, LTE-A, joiden avulla voidaan verkossa käytetty data siirtää, internetin välityksellä muualle (Mehmood ym., 2017).

## 3.2 Massadata

Älykkäässä infrastruktuurissa esiintyvät datamäärät, ovat todella suuria. Dataa kerääntyy kaikkialta infrastruktuuriin rakennetuista sensoreista. Älykkään infrastruktuurin sisältämät älykkäät sensorit ovat moneen käyttötarkoitukseen hyödynnettäviä laitteita. Tämän takia myös niiden keräämä data on heterogeenistä. Heterogeenisellä datalla tarkoitetaan monimuotoista dataa, joka on eri näköistä aina, riippuen sensorien käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi älykkästä sähköverkosta kerättävä data mittaa erilaisia arvoja kuin älykkäässä vesilaitoksessa esiintyvät sensorit. Datan heterogeenisyys vaikeuttaa erityisesti datan lajittelemista,

sillä tällöin dataa ei välttämättä voida järjestää järkevästi hyödynnettäväksi. (Hashem ym., 2015).

Älykkäässä infrastruktuurissa datan määrän ajatellaan kasvavan kovalla vauhdilla. Vaikka massadata on liitetty älykkäseen infrastruktuuriin vahvasti, ovat Sinaeepourfard, Garcia, Masip-Bruin ja Marín-Tordera (2015) julkaisussaan, jossa tutkittiin älykaupungin tuottamaa datan määrää päivässä, huomanneet että dataa kertyi vain 8 gb:tä (8,583,503,168 bittiä), jokaiselta päivältä 320,925,019 sensorista. Dataa kerättiin energiamonitoroinnista, kaupunkiympäristöstä, äänentasosta, jätteenkeräyksestä sekä parkkipaikoilta. Datan määrä itsessään on todella pieni. Määrää voidaan verrata, esimerkiksi Facebookin keräämään yli 10 pb:n (Peta tavua), loki dataan joka kuukausi (Chen, Mao & Liu, 2014). Tämä on n. 350-kertaa enemmän dataa kuin mitä kaupungissa kerättäisiin yhdessä kuukaudessa. Täytyy älykästä infrastruktuuria rakentaessa kuitenkin huomioda miten datan kasvu tulee kerääntymään infrastruktuurin kehittyessä ja esineiden määrän kasvaessa vuosien aikana. Huomioitavaa on myös, että data määrät oli kerätty rajatulla määrällä sensoreita ja vain kyseisistä kaupungin alueista. Data oli myös kerätty vain sensoreista eikä muita data lähteitä esimerkiksi videokamera-kuvaa otettu huomioon. (Sinaeepourfard ym., 2015)

Massadata (eng. Big data) on siis kirjallisuudessa esitetty käsite näiden suurien data määrien kasvuun ja niiden hallintaan. Massadatalle yleisesti viitataan niin suureen määrän tietoa, että sitä ei voida käsitellä eikä analysoida perinteisillä tietojärjestelmillä, vaan datan hyödyntämiseen tarvitaan teknologioita, jotka ovat erityisesti suunniteltu massadatan hallintaan ja analysointiin. Massadatalle on myös tyypillistä, että sen data on rakenteetonta. Rakenteettomalla datalla tarkoitetaan, että sille ei ole määritetty formaattia tai ei ole määritetty minkälaisesta datasta (päivämääristä, numeroista, lauseista jne.) se koostuu.

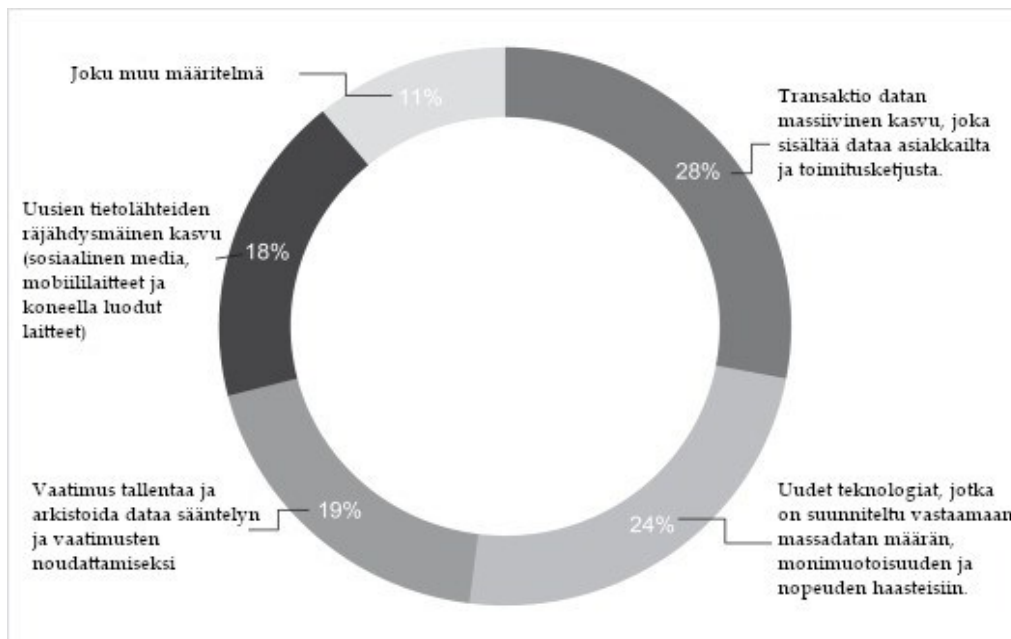
Massadata ja data ovat arvokkaimpia asioita nykyaikana ja niistä informaation jalostaminen mahdollistaa monella tapaa ihmiskunnan kehittämisen. Massadataa käytetään laajalti nykyään jo markkinoinnissa, sosiaalisessa mediassa ja tapahtumien ennustamisessa eri tieteenaloilla. Massadatan tärkeys ei kuitenkaan esiinny pelkästä datan määrän suuruudesta vaan on hyvinkin tärkeää, että datasta voidaan jalostaa käytettävää informaatiota ja sen pohjalta luoda ennustuksia ja ratkaisuja ongelmiin.

### 3.2.1 4V malli (määritelmä)

On hyvin tärkeää, että massadata käsitteenä erotellaan suuresta data määrästä. Massadata ei pelkästään pohjaudu suuriin data määriin. Massadatan määritelmä kirjallisuudessa ei kuitenkaan ole kovin selkeä. Eräänä määritelmänä esitetään, että ”massadatalle tarkoitetaan aineistoja, joita perinteiset informaatioteknologiat ja ohjelmistot/laitteet eivät voi havaita, hankkia, hallita ja prosessoida” (Chen ym., 2014).

Yhteisen linjan löytäminen massadatan määrittelemisessä on haastavaa. Gandomin ja Haiderin (2015) mukaan Harris Interactive toimitti vuonna 2012 globaalin online-kyselyn yritysten johdoille, josta selviää, että massadatan määritelmien

erot ovat valtavat. Kuviossa 3 näkyy selvästi jakautumisen massadatan määritelmässä.



Kuvio 3 Massadatan määritelmät online-kyselyn perusteella (Gandomi & Haider, 2015)

Massadatan määrittämisen selkeyttämiseksi kirjallisuudessa on luotu 4 V:n määritelmä. Nämä neljä V:tä ovat volume (määrä), variety (monimuotoisuus), velocity (kiihtyvyys) ja value (Arvo). (Hashem ym., 2015). Kirjallisuudessa V-mallin kirjainten määrä vaihtelee. Alunperäinen määritelmä sisälsi vain kolme V:tä, jotka olivat volume (määrä), variety (monimuotoisuus), velocity (kiihtyvyys) (Marjani ym. 2017). Tätä määritelmää on kuitenkin kritisoitu siitä, että siinä ei oteta huomioon datan merkitystä. Muita ominaisuuksia on myös esitetty, joita ovat mm. veracity (todenmukaisuus) ja variability (vaihtelevuus). Tässä tutkielmassa keskitymme kuitenkin neljän V:n malliin, sillä se on yleisimmin hyväksytty. Neljä V:tä määriteltynä: (Chen ym., 2014; Hashem ym., 2015; Gandomi & Haider, 2015)

- *Volume (määrä)*: Viitataan kaikenlaisen kerätyn datan määrään. Datan määrä yleensä ilmoitetaan tera-/petatavuina. Gandomin ja Haiderin (2015) mukaan IBM:n (2012) kyselyn mukaan yli puolet vastaajista pitivät yli teratavun data määrää massadatana.
- *Variety (monimuotoisuus)*: Viitataan kerätyn datan erilaisuuteen. Dataa voidaan kerätä sensoreista, älypuhelimista, sosiaalisesta mediasta jne. Tämän takia data voi olla monimuotoista esimerkiksi: videota, kuvia, ääntä, kirjoitettuja lokeja. Liiketoiminnassa monesti hyödynnetään monia data lähteitä, joten esiintyvä data on eri muodoissa. Datan rakennetta monimuotoistaa myös erilaiset merkintätavat kuten XML, JSON jne.

- *Velocity (kiihtyvyys)*: Viitataan tiedon siirron kasvuun. Tiedonsiirtoa tapahtuu, silloin kun data muotoja järjestelmässä muutetaan tai dataa lähetetään ja/tai vastaanotetaan. Kiihtyvyys tarkoittaa siis sitä, että sisään tulevan datan määrä kasvaa, joka sekunti/minuutti/tunti sekä sen kerääntymisnopeus kiihtyy.
- *Value (arvo)*: Viitataan kerätyn datan merkitykseen. Datalla on yleensä keräys vaiheessa alhainen arvon tiheys. Tällä tarkoitetaan sitä, että laitteilta vastaanotettu data alkuperäisessä muodossaan ei varsinaisesti ole arvokasta. Vasta kun dataa on käsitelty ja analysoitu kasvaa datan arvon tiheys.

### 3.2.2 Käyttökohteet

Massadatan analysoimiselle on useita käyttökohteita, niin liiketoiminnassa kuin kaupunginkin toiminnassa. Tällä hetkellä massadatan suurimmat käyttökohteet kuitenkin liittyvät organisaatioiden liiketoiminnan kehittämiseen. Esimerkkinä Helsingin kaupunki hyödyntää massadataa julkisen liikenteen reittien optimointiin. Suurimmat massadatan hyödyntäjät ovat tällä hetkellä pääasiassa sosiaalisen median yritykset kuten Facebook ja Twitter, jotka tallentavat käyttäjien lokitietoja, kuvia, viestejä, videoita jne. tietokantoihinsa.

Gandomin ja Haiderin (2015) mukaan massadata ei ole hyödyllistä itsessään, vaan massadatan potentiaalinen hyöty tulee sen hyödyntämisestä päätöksen teossa. Esimerkkinä datan hyödyntämisen arvosta on Chenin ym. (2014) mukaan Googlen suorittama massadata analyysi vuonna 2009, jossa Googlen analyytikot löysivät korrelaatiota Googlen hakukoneiden käytöstä ja 2009 vuoden influenssan leviämisestä. Googlen analyytikot hyödynsivät tämän jälkeen matemaattisia regressiomalleja ennustamaan influenssan leviämistä ympäri maailmaa. Vuoden 2020 COVID-19 virusta vastaan on myös taisteltu big datan avulla (<https://www.the-scientist.com/news-opinion/big-data-and-collaboration-seek-to-fight-covid-19-67759>).

### 3.3 Data ja laskenta

Data toimii pohjana IoT:lle ja ilman datan havaitsemislaitteita, ei IoT-järjestelmän avulla voida tuottaa palveluita. Gandomin ja Haiderin (2015) mukaan, jotta dataa voidaan hyödyntää, päätöksenteossa täytyy massadataa prosessoida hyödynnettäväksi informaatioksi. Tämä näkyy myös massadatan määritelmässä, jossa yksi neljästä massadatan ominaisuudesta oli arvo, joka tarkoitti, että datan täytyy tuottaa arvoa, jotta se voidaan laskea massadataksi.

ICT-järjestelmissä datan analysointi mahdollistetaan laskentateknologioiden ja eri tilastollisten menetelmien avulla. Jotta järjestelmästä tulevaa dataa voidaan analysoida niin, täytyy sisään tuleva data pyrkiä siivoamaan ja analysoi-

maan. Suurien data määrien analysointi ja siivoaminen vie erityisen paljon prosessointi tehoa. Näin ollen datan analysointi IoT-järjestelmässä voidaan hoitaa pilvilaskennan avulla. Pilvilaskennalla tarkoitetaan, verkon yli ”pilvestä” jaettuja laskenta kykyä/tallennustilaa ja palveluita (Rao ym., 2012).

Pilvilaskennalla yleensä viitataan isoihin datakeskuksiin, joissa on paljon koneita ja näin ollen paljon laskentatehoa. Tällöin laskenta suoritetaan keskitetysti datakeskuksissa eli pilvessä. Kyseisessä ratkaisussa haasteena kuitenkin älykkään infrastruktuurin kannalta esiintyy datan siirtonopeudet suurien datamäärien takia (Yi, Li & Li, 2015). Viiveet datan analysoimisessa vaikeuttavat reaaliaikaisen datan ja informaation tarjoamista loppukäyttäjille, joka on osa älykkään infrastruktuurin periaatteita. Laskentaa voidaan myös suorittaa itse IoT-järjestelmän laitteissa. Kuitenkin pienten sensori solmujen laskenta mahdollisuudet ovat hyvin rajalliset, sillä niillä ei ole resursseja (tehokkaita järjestelmiä, suurta määrää muistia ym.), joiden avulla tehokasta laskentaa voidaan tehdä. Solmuja ja prosessointiyksiköitä voidaan kuitenkin hyödyntää jakamalla laskenta monien eri solmujen ja älykkäiden esineiden kesken.

Ratkaisuna toimii kyseisellä periaatteella toimiva, pilvilaskennan jatkuma, sumulaskenta. Sumulaskenta vie pilvilaskennan mahdollisuudet lähelle loppukäyttäjää ja esineitä. Tällä tarkoitetaan, että verkon reunan ja pilven välillä voidaan suorittaa datan prosessointia järjestelmän älykkäissä esineissä. (Al-Fuqaha ym., 2015; Yi ym., 2015) Reunalla viitataan verkon ”reunalla” oleviin esineisiin kuten sensoreihin ja WSN-järjestelmän solmuihin. Järjestelmän prosessointi jaetaan siis verkon laitteiden kesken, jolloin laskenta tapahtuu hajautetusti ympäri järjestelmää. Näin ollen koska suuret datamäärät jaetaan pienempiin osiin ja prosessoidaan verkon sisällä, ei datansiirto nopeuksien rajoitteet synnytä enää ongelmia. Näin mahdollistetaan reaaliaikaisen datan ja informaation saaminen. Reaaliaikaisen informaation saaminen on erityisen tärkeää muun muassa liikenteen hallintaa tarjoavissa järjestelmissä kuten ruuhkanseuranta tai älykäs parkkipaikka, joissa ajankohtainen tieto, ruuhkista ja parkkipaikkojen saatavuudesta on tärkeää optimaalisen palvelun tarjonnan kannalta.

Sumulaskennan avulla voidaan myös tarjota palveluita. Tällöin data palvelut siirretään tarjottavaksi pilvestä lähemmäksi palvelunkäyttäjiä ja palvelut voidaan siirtää IoT-verkon esineisiin. Koska sumulaskennan tarkoituksena on hyödyntää palvelun/sensoreiden lähellä olevia esineitä, ei laskenta teho ole kuitenkaan rajaton, joten sumulaskenta toimii parhaiten pienemmissä järjestelmissä. Älykkään infrastruktuurin IoT-järjestelmä ei ole pieni, joten ratkaisuna tähän on, että IoT-järjestelmä jaetaan osa-alueisiin, joissa mahdollinen palvelujen tuotto tapahtuu. Järjestelmä voidaan jakaa esimerkiksi sijainnin tai esineiden tarkoituspöran mukaan. Tämä mahdollistaa sumulaskennan täyden hyödyntämisen älykkäissä infrastruktuurijärjestelmässä. Sumulaskenta ei kuitenkaan korvaa pilvilaskentaa vaan auttaa datan prosessoimisessa ja lokaalien palveluiden tarjoamisessa. Tämän takia on tärkeää hyödyntää myös perinteisen pilvilaskennan palveluita.

## 4. TEKNOLOGIAT MAHDOLLISTAMASSA ÄLYK- KÄÄN INFRASTRUKTUURIN

Tässä luvussa käydään läpi, minkälaisia infrastruktuuriratkaisuja on ja miten ne mahdollistetaan aiemmin käydyillä teknologioilla. Rajataan infrastruktuuriratkaisut kovaan infrastruktuuriin Angelidou (2014) määritelmän mukaan. Luvussa käydään myös läpi mitä tämänhetkisiä Suomessa esiintyviä älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja on.

### 4.1 Älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja

Älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja on monenlaisia riippuen siitä, miten infrastruktuuri käsitteenä määritellään. Joihinkin pehmeän infrastruktuurin määritelmiin liittyvät esimerkiksi: terveydenhuolto ja koulutus. Taulukossa 1 näemme kovaan infrastruktuuriin kuuluvia älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja, joita tässä tutkielmassa käsitellään. Mukailen (Gungor, Lu & Hancke, 2010; Gungor ym., 2011; Fang ym., 2012; Khan ym., 2014; Rathore, Ahmad, Paul & Rho, 2016; Lin, Wang & Ma, 2017; Marjani ym., 2017; Mehmood ym., 2017; Sharma & Kumar, 2019).

TAULUKKO 1 Älykkäät infrastruktuuriratkaisut ja niissä käytettävät teknologiat mukailen.

Infrastruktuurin osa	Kommunikaatio teknologiat	Datan hankinta	Tunnistamisteknologiat
Älykäs sähköverkko	WLAN, WiMax, 6LoWPAN, Zigbee	älykkäät sähkömittarit	WSN
Älykäs vesiverkko	GSM, Zigbee,	sensorit, älykkäät vesimittarit	WSN,
Älykäs jätteenhallinta	GSM, Wifi, Bluetooth	sensorit	RFID, viivakoodit
Älykäs liikenteenhallinta	Wifi, satelliitti kommunikaatio, WLAN	sensorit, kamerat, älyautot, RFID	RFID, kamerat, GPS, WSN
Älykkäät rakennukset	Wifi, 3g, 4g, LTE	Sensorit, kamerat, älylaitteet	RFID, WSN

#### 4.2.1 Älykäs sähköverkko ja energia

Älykäs sähköverkko on tutkituimpia älykkään infrastruktuurin osa-alueita. Tuballan & Abundon (2016) mukaan pelkästään ScienceDirect tietokannasta älykkääseen sähköverkkoon viittaavia julkaisuja vuosilta 2000–2016 on 10,983 ja kirjoja 144.

Energian säästö ja hyödyntäminen on noussut vuosikymmenten aikana keskustelun aiheeksi. Suurimpia huolia aiheuttavat mm. ilmastonmuutos, jota fossiilisiin polttoaineisiin pohjautuva energian luominen kiihdyttää. Myös energian kasvava tarve tietotekniikan ja digitaalisten laitteiden ja palveluiden takia vaatii, että energian hyödyntämisen täytyy kehittyä vastaamaan kasvavaa energian tarvetta. (Tuballa & Abundo, 2016).

Älykästä sähköverkkoa voidaan kuvailla Dileepin (2020) osoittamalla tavalla. Älykäs sähköverkko on läpinäkyvä, saumaton, välittömäksi kaksisuuntaiseksi energian/tiedon jakeluksi ja mahdollistaa sähköteollisuudelle paremman hallinnan energian toimitukseen ja siirtoon sekä antaa kuluttajille enemmän hallintaa energiapäätöksissä. Älykäs sähköverkko on siis kehittynyt älykästä mittarointia hyödyntävä sähköverkko, joka mahdollistaa optimaalisen energian hyödyntämisen sähköverkossa, hyödyntämällä älykkäiden sensorien tuottamaa dataa energia tarpeiden arvioimiseen eri puolilla sähköverkkoa. Älykäs sähköverkko, kuten muutkin älykkäät infrastruktuurin ratkaisut, osaa monitoroida omaa kuntoaan ja hyödyntämään sitä päätöksenteossa. Esimerkiksi älykäs sähköverkko osaa lopettaa virransyötön, jos generaattori vioittuu ja ilmoittaa vioituneesta generaattorista työntekijöille, jos älykäs sähköverkko ei osaa sitä itse korjata. Alla olevassa taulukossa (taulukko 2) esitellään älykkään sähköverkon eroa normaaliin sähköverkkoon mukaillen (Xue-song, Li-qiang & You-jie, 2010; Fang ym., 2012; Dileep, 2016; Tuballa & Abundo, 2016):

TAULUKKO 2 Perinteisen ja älykkään sähköverkon erot.

<b>Perinteinen sähköverkko</b>	<b>Älykäs sähköverkko</b>
Yksisuuntainen	Kaksisuuntainen
Keskitetty energiantuotanto	Jaettu energian tuotanto
Vähän sensoreita	Paljon sensoreita
Manuaalinen monitorointi	Automaattinen monitorointi
Manuaalinen palauttaminen	Automaattinen palauttaminen
Rajattu kontrolli	Laaja kontrolli
Rajatut asiakas mahdollisuudet	Laajat asiakas mahdollisuudet
Hidas ongelman selvitys	Nopea/automaattinen ongelman selvitys
Vähän dataa	Paljon dataa



#### 4.2.1 Älykäs vesihuolto

Älykäs vesiverkosto viittaa älykkääseen veden hallintaan ja jakeluun sekä vesihuollon suunnitteluun ja monitorointiin (Robles ym., 2015). Vesihuollon tärkeys tulee esiin, kun tutkitaan infrastruktuurin kulumista. Esimerkiksi Suomessa vesiverkoston ikääntyminen esitetään suurena haasteena. Katkon ja Pietilän (2017) mukaan Suomessa vesihuollon arvioitu rahoitusvaje on n.6,5 miljardia dollaria (n. 5,44 miljardia euroa). Vesiverkostojen ikääntyminen ja rappeutuminen on riskitekijöinä vedenlaadun heikkenemiselle sekä vedenjakelun katkeamiselle (Lee, Sarp, Jeon & Kim, 2015; Katko & Pietilä, 2017).

Näitä haasteita vastaan älykkään vesihuollon rakentaminen on elin tärkeää. Älykkään vesiverkoston ansiosta on mahdollista seurata vesiverkoston toimintaa ja sen kuntoa (Lee ym., 2015; Hoult ym., 2009). Vesiputkien kunnan seuranta on tällä hetkellä manuaalista, joka vaikeuttaa taas vesiverkoston saneerauksien tekemistä. Älykkään vesiverkon etuina ovat vesiverkon etäseuranta, ongelma-kohtien paikantaminen sekä vedenlaadun seuranta.

#### 4.2.1 Älykäs jätehuolto

Suomessa yhdyskuntajätteen tuotto oli vuonna 2019, n. 3.122 miljardia kiloa (Suomen virallinen tilasto (SVT): Jätetilasto, 2020). Koko maailmassa kiinteän jätteen tuotto on Esmaeilianin ym. (2018) mukaan 1.7–1.9 miljardia tuhatta kiloa jätettä joka vuosi. Tämä määrä oletetaan tuplaantuvan jatkuvan kaupunkimuuton seurauksena kymmenessä vuodessa. Jätteen määrä vaikuttaa suorasti ympäristön miellyttävyyteen sekä ympäristön ja ihmisen terveyteen (Shyam, Manvi & Bharti, 2017). Ongelmana jätteen kasaantumisessa esiintyy, myös julkisen jätteen kierrätyksen haasteellisuus.

Älykkäällä jätehuollolla voidaan vaikuttaa jätteen käsittelyyn ja kerääntymiseen. Älykkääseen jätehuoltoon kuuluu esimerkiksi sensoreiden upottaminen julkisiin roska-astioihin. Tämä mahdollistaa roska-astioiden täyttymisen seurannan ympäri kaupunkia. Data-analytiikalla mahdollistetaan myös jätteiden kerääntymisen ennustaminen astioihin, joka auttaa jätehuoltoa toteuttavia organisaatioita tarkastelemaan jätteen kertymistä ja ennakoimaan roska-astioiden tyhjennys tarpeen (Shyam ym., 2017). Jätehuolto mahdollistaa myös esimerkiksi roska-astioiden lukitsemisen niiden täytyessä. Älykäs jätteenhuolto mahdollistaa tällöin ympäristön säästämisen vähentämällä ajoneuvojen turhaa liikkumista sekä jätteen kerääntymistä ja päätymistä luontoon. (Shyam ym., 2017; Esmaeilian, ym., 2018)

#### 4.2.1 Älykäs liikenteen hallinta

Älykkäät liikenteen hallintajärjestelmät (ITS, Intelligent Transportation Systems) voidaan määritellä kontrollointijärjestelmiksi, jotka kommunikoivat tieverkon ja ajoneuvojen kanssa varmistamaan turvallisen ja tehokkaan tieverkon käytön. (Nkoro & Vershinin, 2014) ITS:n on mahdollista helpottaa esimerkiksi ajo-

neuvoja välttämään ruuhkia, kertomalla ajoneuvoille nopeimmat reitit reaaliaikaisen liikennedatan perusteella (Kostakos, Ojala, & Juntunen, 2013; Ota, Kumrai, Dong, Kishigami, & Guo, 2017). Älykäs liikenteenhallinta mahdollistetaan tiessä olevien sensoreiden ja tiekameroiden avulla. Sensorit voivat esittää dataa esimerkiksi: teiden aktiivisuudesta (ruuhkista) sekä teiden kunnosta (The Standing Committee on Infrastructure: Transport and Cities, 2016). Datalla mahdollistetaan myös teiden huoltotoimenpiteiden tarve, ruuhkien kertymisen ennustamista (mitkä alueet ruuhkautuvat milloinkin) sekä optimaalisia reitti valintoja.

Älykkään liikenteenhallintajärjestelmän isona etuna on, että sillä voidaan mahdollistaa kommunikaatio ajoneuvojen kanssa. Esimerkiksi hätäajoneuvojen (poliisiautot, ambulanssit, paloautot) lähestymistä voidaan tarkkailla, jolloin älykkäiden liikennevalojen huomatessa hälytysajoneuvon on sen mahdollista vaihtaa valot punaisiksi ja pysäyttää liikenne tai esimerkiksi lähettää tilannekuvia tapahtuneesta hälytysajoneuvoille (Piro, Cianci, Grieco, Boggia, & Camarda, 2014; Airaksinen & Kokkala, 2015). Seurannalla vähennetään turhaa liikenteen ruuhkautumista, joka vähentää onnettomuus vaaraa sekä ajoneuvojen päästöjen kertymistä optimoimalla ajoneuvojen kulkua.

Kommunikaatio ajoneuvojen kanssa mahdollistaa myös älykkään pysäköinnin hallinnan, joka mahdollistetaan pysäköintipaikoilla olevilla sensoreilla ja tietokannalla, johon asiakkaalla on pääsy. Asiakas voi tietokannan avulla esimerkiksi nähdä parkkipaikkojen saatavuuden kohdealueella. (Piro ym., 2014; Turun kaupunki, 2021)

#### 4.2.1 Älykkäät rakennukset

Älykkäillä rakennuksilla viitataan rakennuksen mahdollisuuden hallita rakennuksessa tapahtuvaa toimintaa toivotulla tavalla. Rakennuksille yleensä annetaan preferenssit, joiden mukaan rakennus hallitsee rakennuksen: ilmankiertoa, lämpötilaa, ilmankosteutta sähkönkulutusta ja vedenkäyttöä. (Minoli, Sohraby & Occhiogrosso, 2017; Ogie ym., 2017) Nämä mahdollistetaan rakennuksen toimintoihin liitetyillä sensoreilla, jotka seuraavat aktiivisesti rakennuksen tilaa (Airaksinen & Kokkala, 2015).

Ihmisen rooli on suuri älykkäiden rakennusten hyödyntämisessä. Rakennusten tila määräytyy suurilta osin siinä asuvien ihmisten halujen pohjalta. Esimerkiksi rakennus voi asettaa lämpötila tavoitteita mihin se pyrkii tiettyinä aikoina päivästä/viikosta/kuukaudesta jne. Rakennuksen on myös mahdollista tunnistaa asukkaiden poissaoloja sekä toiminnallisia ongelmia rakennuksessa (Minoli ym., 2017). Toiminnallisina ongelmina voidaan pitää esimerkiksi vesiputkien tai sähköjohtojen vioittuminen. Älykäs rakennus osaa näissä tilanteissa katkaista sähkön/veden viennin eteenpäin sekä ilmoittamaan tästä eteenpäin huolto yrityksille, jos sen ei ole mahdollista sitä ongelmaa korjata.

## 4.2 Älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja Suomessa

Suomi on Euroopan kärkimaista älykkäiden kaupunkien ja infrastruktuurien toteuttamisessa ja suunnittelussa. European Unionin Publications Office of the Europeanin (2014) *Mapping smart cities in the EU*, selvityksessä havainnoitiin 50 älykaupunki hanketta, joista kolme oli suomalaisia kaupunkeja (Helsinki, Oulu, Tampere) ja joista Helsinki valittiin top 6 onnistuneimpaan älykaupunki hankkeeseen Euroopassa. Helsinki valittiin myös vuonna 2019 Euroopan älykkään turismin pääkaupungiksi (European Capital of Smart Tourism, 2019).

Tämän tutkimuksen jälkeen Suomessa on aloitettu monia uusia älykaupunki projekteja, joista suurin on 6Aika-projekti, joka osallistaa Suomen kuusi suurinta kaupunkia (Helsinki, Espoo, Vantaa, Tampere, Turku, Oulu) kehittämään älykkäitä kaupunkiratkaisuja. Toinen merkittävä projekti on Jyväskylän Kankaan älykkään kaupunginosan kehittäminen.

6Aika-hankeen tarkoituksena on tuoda älykkäämpiä ja avoimempia kaupunkeja, uutta liiketoimintaa yrityksille sekä tehdä suomalaisesta kaupunkikehittämisestä ns. "benchmark" eli standardi kansainvälisille verkostoille. Tämä tarkoittaa mm. data avoimuutta ja älykkään infrastruktuurin rakentamista kaupunkeihin. (6Aika, 2021)

Jyväskylän Kangas hankeen tarkoituksena on luoda älykäs kaupunginosa, joka mahdollistaa älykkään energian tuotannon, jätteidenkäsittelyn ja yritysysteistyön Kankaan alueella. Kankaan hankkeen tavoitteena on ylläpitää 2100 työpaikkaa sekä 5000 asukasta vuoteen 2040 mennessä. (Jyväskylän Kangas, 2018b)

Suomessa on myös muita älykkään infrastruktuurin kehittämisprojekteja kuten Rovaniemen tien kunnon seuranta Roadscanner teknologian avulla. (Cartaxo, Castilla, Dymet & Hossain, 2021) Tässä luvussa, käydään läpi esimerkkejä älykkäistä infrastruktuuriratkaisuista Suomen kaupungeissa, joissa laajempia toteutuksia on jo tehty.

**Helsingissä** ja muissa 6Aika-hankkeen kaupungeissa on hyödynnetty julkista ja avointa dataa palveluiden sekä uusien innovaatioiden mahdollistamisessa. Dataa hyödyntäen Helsingin Kalasatamassa on myös tehty älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja. Älykäs sähköverkko mahdollistaa Kalasataman alueella sähköautoilua tukevan infrastruktuurin sekä rakennusten tehokkaan energian käytön. Kalasataman alueella älykäs sähköverkko tukee myös paikallisen tuulivoiman ja aurinkosähkön hyödyntämistä. (Helsingin kaupunki, 2021; 6Aika, 2021)

**Oulun** älykkään infrastruktuurin edistämistä on auttanut panOulu verkko. PanOulu verkko on WSN verkko, joka kattaa koko kaupunkialueen ja tarjoaa avoimen WLAN verkon kaikille käyttäjille. PanOulu verkko on Suomen suurin julkinen avoin verkko. (Gil-Castineira, ym., 2011) Tämä helpottaa Oulun kaupunki infrastruktuurin älyllistämistä sillä WSN verkko on jo paikoillaan. Oulun varsinaisia infrastruktuuria on tällä hetkellä kehitetty älykkäiden rakennuksien avulla (Airaksinen & Kokkala, 2015). Älykkäät rakennukset ovat pohjoisessa kaupungissa erittäin tärkeässä roolissa mm. energiasäästöjen takia.

**Turun** ”Smart and Wise Turku”-hanke on kaupungin kärkihanke, jossa tavoitteena on luoda hiilineutraali seutu vuoteen 2029 mennessä ja samalla ottaa käyttöön älykkään kaupungin konseptia. Tutkielman kirjoittamisen aikaan älykkäät infrastruktuuriratkaisut ovat vielä kehitys vaiheessa. Kuitenkin Pysäköinnin kehittäminen-hankkeessa on älykästä pysäköinninhallintaa kehitetty Turun keskustan alueella, jossa pysäköintidataa siirretään HUB-tietovarastoon. Dataa voi yksityiset palveluntarjoajat hyödyntää, vaikka kaupungilla ei vielä itsessään ole palvelua, joka hyödyntää dataa julkiseen käyttöön. (Turun kaupunki, 2021)

**Tampereen** kaupungin visiona on luoda Tampereesta hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä. Tampere on edelläkävijä älyliikenteeseen ja liikkumiseen liittyvissä ratkaisuisa. Kaupunki testaa Tampereen alueella ITS-ekosysteemiä, jossa ITS-järjestelmän tarkoituksena on kehittää julkisen liikenteen ja sen palveluiden seuraamista, mahdollistamalla reaaliaikaisen datan. Datan avulla Tampereen alueella voi esimerkiksi seurata liikenteen ruuhkautumista, kerätä dataa valojen vaihtumisesta ja antaa reaaliaikaista tietoa julkisen liikenteen kulkemisesta. (Tampereen kaupunki, 2021)

Toinen älykkään infrastruktuurin osa-alue, jota Tampereella kehitetään, on älykäs rakentaminen. Älykästä rakentamista pyritään tuomaan julkisen ja yksityisen sektorin rakentamishankkeisiin, joissa rakennuskohteista luodaan IoT-järjestelmän avulla seurattavia ja kommunikoiivia. (Tampereen kaupunki, 2021)

Tampereella Viinikan alueella on myös testausympäristönä otettu käyttöön älykäs katuvalaistus järjestelmä, joka toimii alueella menevässä kuituverkossa. Järjestelmän avulla voidaan valvoa katuvalotolppien toimintaa sekä myös antureiden avulla havainnoida liikenteessä esiintyviä onnettomuuksia. (Tampereen kaupunki, 2021)

Viimeisenä merkittävänä älykkään infrastruktuurin toteuttajana on **Jyväskylässä** rakennettava Kangas alue. Kangas alue on älykäs kaupunginosa, jonka keskeisimpänä teemana on luoda kyberturvallista älykaupunkia, jonka kehittämistä ohjaa kestävä kehityksen periaatteet. (Jyväskylän kaupunki, 2018b) Kankaan alueen älykäs infrastruktuurijärjestelmä toimii älykkään sähköverkon sekä jätehuollon ympärillä. Kankaalla älykäs sähköverkko mahdollistaa esimerkiksi älykkäiden pistorasioiden hyödyntämisen rakennuksissa. (Jyväskylän kaupunki, 2018b) Älykkäät pistorasiat toimivat energiatehokkaasti ja turvallisesti, katkaissamalla ja ohjaamalla virran muualle haluttuina aikoina.

Jätehuolto on myös merkittävässä osassa Kankaan alueen toimintaa. Alueen jätesäiliöihin on kiinnitetty sensoreita mittaamaan jätesäiliöiden tyhjennystarvetta. Jätesäiliöissä on myös älykäs lukitus, joka avautuu asuin tunnisteella. Ratkaisulla voidaan mitata jätemääriä taloutta kohti ja luoda esimerkiksi laskutus systeemi jätetietojen pohjalta. (Jyväskylän kaupunki, 2018a) Alla vielä näkyy älykkäät infrastruktuuriratkaisut muutamissa Suomen kaupungeissa (taulukko 3).

TAULUKKO 3 Suomen kaupunkien älykkäät infrastruktuuriratkaisut.

<b>Kaupunki</b>	<b>Älykäs infrastruktuuri</b>
<b>Helsinki</b>	- Älykäs sähköverkko - Avoin data
<b>Tampere</b>	- Avoin data - ITS-järjestelmä - Älykäs rakentaminen - Älykäs katuväläistus
<b>Turku</b>	- Avoin data - Älykäs pysäköinti (HUB-tietovarasto)
<b>Oulu</b>	- Avoin data - Älykkäät rakennukset - panOulu-verkko
<b>Jyväskylän Kangas</b>	- Älykäs sähköverkko - Älykäs jätehuolto

Suomen älykkäät infrastruktuuriratkaisut ovat kehitteillä ja Suomen sisäinen yhteistyö kaupunkien sekä yksityisen sektorin välillä on edellä muita Euroopan maita. Älykkäitä kaupunkeja ja älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja nähdään useasti enemmän vasta 500,000 asukkaan ylittävissä kaupungeissa mutta Suomi on onnistunut pienellä väkimäärällä luomaan alustan, jonka pohjalta pienemmätkin kaupungit voivat kehittää kaupunki infrastruktuuria. (European Union Publications Office of the European, 2014)

## 5 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintutkielman tarkoituksena oli selvittää, minkälaisia älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja voidaan mahdollistaa sekä mitä teknologioita tarvitaan näiden ratkaisujen mahdollistamiseksi. Tutkielma pyrki tuomaan selkeän kuvan älykkäästä infrastruktuurista ja sen tarjoamista mahdollisuuksista ymmärtämällä, minkä teknologioiden avulla näitä mahdollistetaan. Älykäs infrastruktuuri on laajalti tutkittu aihe, ja sen mahdollisuuksia sekä tarpeita on tutkittu pitkälle. Näitä kirjallisuudessa esiteltäviä ratkaisuja on tärkeää tuoda yhteen sekä luoda kokonaisvaltaisempaa kuvaa älykkäiden infrastruktuuriratkaisujen yhteensopivuudesta. Tutkimuksen tavoitteena oli vastaamalla tutkimuskysymyksiin: *"Mitä älykäs infrastruktuuri on?"*, *"Millä teknologioilla älykäs infrastruktuuri mahdollistetaan?"*, *"Minkälaisia älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja voidaan toteuttaa?"*.

Tutkielman toisessa luvussa vastattiin tutkimuskysymykseen *"Mitä on älykäs infrastruktuuri?"*, käsittelemällä älykkään infrastruktuurin määritelmää ja sen kehittämiseen liittyviä huomioitavia asioita. Luvussa käytiin läpi älykkään infrastruktuurin määritelmää, sen eroa tyhmään infrastruktuuriin sekä älykkään infrastruktuurihankkeen tasot, arvot ja periaatteet. Älykäs infrastruktuuri on informaatio- ja viestintäteknologialla vahvistettua infrastruktuuria, joka osaa mukautua ympäristöön, ja jossa on verkostoituneita älykkäitä esineitä yhteydessä toisiinsa. Esineet keräävät reaaliaikaista dataa ja tekevät tämän jalostetun datan pohjalta päätöksiä. Älykästä infrastruktuuria voidaan myös ajatella, älykaupungin selkärankana.

Kolmannessa luvussa avattiin esineiden internettiä, massadataa sekä laskeita mahdollisuuksia esineiden internetissä ja pyrittiin vastaamaan tutkimuskysymykseen *"Millä teknologioilla älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja mahdollistetaan?"*. Luvun tarkoituksena oli käydä esineiden internetissä käytettyjä teknologioita läpi, joiden avulla älykäs infrastruktuuri voidaan mahdollistaa. Luvussa esiteltiin esineiden internetin määritelmää, arkkitehtuuria ja sen sisältämiä teknologioita. Tiivistäen IoT-järjestelmä, jonka päälle älykäs infrastruktuuri rakentuu, on verkosto älykkäitä esineitä, jotka osaavat kommunikoida keskenään.

Tämän jälkeen esiteltiin massadatan määritelmää, sen merkitystä älykkäälle infrastruktuurille ja sen käyttökohteita nykyään. Lopuksi esiteltiin laskennan ja datan korrelaatiota esineiden internetissä, käyttämällä pilvi- ja sumulaskentaa mahdollisina ratkaisuinä toteuttamisessa.

Neljännessä luvussa pyrittiin vastaamaan tutkimuskysymykseen ”*Minkälaisia älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja voidaan toteuttaa?*”, avaamalla älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja ja esittämällä ratkaisuja mahdollistavia viestintä- ja kommunikaatioteknologioita. Älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja ovat mm. älykäs sähköverkko, älykäs vesihuolto, älykäs jätehuolto ja älykkäät rakennukset. WSN-järjestelmät ja RFID-tunnistaminen olivat kaikissa ratkaisuissa olennaisena tekijänä.

Tutkielman tarkoituksena ei ollut käydä läpi järjestelmiä kuten BIM (Building Information Modeling), VANET (Vehicular ad hoc network) tai RSU (Road Side Unit), joilla voidaan suunnitella älykkäitä infrastruktuurijärjestelmiä sekä mahdollistaa vain yhden teknologian hyödyntämistä ratkaisujen mahdollistamisessa. Tutkielmassa ei myöskään käyty läpi vaatimuksia erilaisten ratkaisujen mahdollistamiseen vaan yleisiä vaatimuksia älykkään infrastruktuurin arvioimiseen ja hyödyntämiseen. Tutkimuksessa kuitenkin koostettiin kirjallisuuden avulla kokonaiskuva älykkään infrastruktuurin toteuttamiseen tarvittavista teknologioista ja minkälaisia ratkaisuja voidaan toteuttaa.

Tiivistettynä voidaan sanoa, että ratkaisevina teknologisina tekijöinä älykkään infrastruktuurin mahdollistamisessa ovat:

- IoT (älykäs esine, RFID, WSN)
- massadata
- pilvi-/sumulaskenta

Kyseiset teknologiat mahdollistavat älykkääseen infrastruktuurijärjestelmään tarvittavat periaatteet. Teknologiat toimivat näin ollen pohjana erilaisille älykkäille infrastruktuuriratkaisuille. Tutkielmassa esitettiin myös kovaan infrastruktuuriin liittyvät ratkaisut, joita olivat:

- älykäs sähköverkko
- älykäs vesihuolto
- älykäs jätehuolto
- älykäs liikenteenhallinta
- älykkäät rakennukset

Älykkään infrastruktuuriratkaisujen yhdistäminen on aihe, jota kirjallisuudessa ei ole juurikaan käyty läpi. Aihe on tärkeä, sillä vaikka erillisiä älykkäitä infrastruktuuriratkaisuja mahdollistetaan, on tärkeää, että ne täydentävät toisiaan ja luovat yhtenäisen verkon, joka palvelee kaupunkia ja sen asukkaita saumattomasti eri elämän osa-alueilla. Olennaisena osana esiintyy myös tietoturva älykkäisiin infrastruktuurijärjestelmiin liittyen. Jatkotutkimusaiheet aiheeseen liit-

tyen voisivat käsitellä esimerkiksi: älykkäiden infrastruktuurijärjestelmien yhdistämistä, infrastruktuurijärjestelmän teknologioiden standardoimista tai älykkään infrastruktuurijärjestelmän tietoturvastandardin kehittämistä.



## 6 LÄHTEET

- 6Aika (2021). Älykaupungit tehdään yhdessä. Haettu 23.02.2021 osoitteesta <https://6aika.fi/>
- Airaksinen, M., & Kokkala, M. (2015). *Smart City: Research highlights*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Highlights No. 12
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M. & Ayyash, M. (2015). *Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications* doi:10.1109/COMST.2015.2444095
- Alkandari, A., Alnasheet, M. & Alshaiqli, I. F. T. 2012. Smart cities: a survey. *Journal of Advanced Computer Science and Technology Research (JACSTR)*, 2. 79-90
- Angelidou, M. (2014). Smart city policies: A spatial approach. *Cities*, 41, S3-S11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cities.2014.06.007>
- Atzori, L., Iera, A. & Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787-2805. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Botta, A., de Donato, W., Persico, V. & Pescapé, A. (2016). Integration of cloud computing and internet of things: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 56, 684-700. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.future.2015.09.021>
- Cartaxo, T. d. M., Castilla, J. M., Dymet, M. & Hossain, K. (2021). Digitalization and smartening sustainable city development: An investigation from the high north european cities. *Smart Cities and Regional Development (SCRD) Journal*, 5(1), 83-101. Haettu 10.01.2021 osoitteesta <http://scrd.eu/index.php/scrd/article/view/98>
- Chen, M., Mao, S. & Liu, Y. (2014). Big data: A survey. *Mobile Networks and Applications*, 19(2), 171-209. doi:10.1007/s11036-013-0489-0
- Chen, Y. & Han, D. (2018). Water quality monitoring in smart city: A pilot project. *Automation in Construction*, 89, 307-316. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.autcon.2018.02.008>
- Chu, T., Wang, J. & Leckie, J. O. (2012). An ontology-based service model for smart infrastructure design. (s. 17-24) doi:10.1109/CSC.2012.11

- Cordis EU (2015). Project final report: Internet of Things – Architecture. Günter Külzhammer, VDIVDE-IT. Haettu 20.10.2020 osoitteesta <https://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/1/257521/080/reports/001-257521IoTAPFRrenditionDownload.pdf>
- Dileep, G. (2020). A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*, 146, 2589-2625. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.renene.2019.08.092>
- Esmaeilian, B., Wang, B., Lewis, K., Duarte, F., Ratti, C. & Behdad, S. (2018). The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper. *Waste Management*, 81, 177-195. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.wasman.2018.09.047>
- European Capital of Smart Tourism. (2019). 2019 European capitals of smart tourism. Haettu 23.02.2021 osoitteesta <https://smarttourismcapital.eu/cities>
- European Union, Publications Office of the European. (2014). *Mapping smart cities in the EU*. Haettu 23.02.2021 osoitteesta <http://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/78882e80-fc4a-4a86-9c39-2ad88ab89f9b>
- Fang, X., Misra, S., Xue, G. & Yang, D. (2012). *Smart grid – the new and improved power grid: A survey* doi:10.1109/SURV.2011.101911.00087
- Feng, M. Q., Suzuki, H. & Yokoi, I. (1995). Development of optical sensing systems for smart civil infrastructure. *Smart Materials and Structures*, 4. doi: <https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1088/0964-1726/4/1A/014>
- Gandomi, A. & Haider, M. (2015). Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*, 35(2), 137-144. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007>
- Gil-Castineira, F., Costa-Montenegro, E., Gonzalez-Castano, F., López-Bravo, C., Ojala, T. & Bose, R. (2011). *Experiences inside the ubiquitous oulu smart city* doi:10.1109/MC.2011.132
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. & Palaniswami, M. (2013). Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Gungor, V. C., Lu, B. & Hancke, G. P. (2010). *Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid* doi:10.1109/TIE.2009.2039455

- Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C. & Hancke, G. P. (2011). *Smart grid technologies: Communication technologies and standards* doi:10.1109/TII.2011.2166794
- Hashem, I. A. T., Yaqoob, I., Anuar, N. B., Mokhtar, S., Gani, A. & Ullah Khan, S. (2015). The rise of "big data" on cloud computing: Review and open research issues. *Information Systems*, 47, 98-115. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.is.2014.07.006>
- Helsingin kaupunki (2021). Älykkäät energiaratkaisut. Haettu 23.02.2021 osoitteesta <https://fiksukalasadama.fi/fiksu-kalasadama/alykkaat-energiajarjestelmat/>
- Hoult, N., Bennett, P. J., Stoianov, I., Fidler, P., Maksimović, Č, Middleton, C. & Soga, K. (2009). Wireless sensor networks: Creating 'smart infrastructure'. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 162(3), 136-143. doi:10.1680/cien.2009.162.3.136
- Jin, J., Gubbi, J., Marusic, S. & Palaniswami, M. (2014). *An information framework for creating a smart city through internet of things* doi:10.1109/JIOT.2013.2296516
- Kardos, P., Suter, B., Mullican, D., Nicol, J., Kline, M., York, E. & Salman, A. (2020). Smart infrastructure: Solutions to improve privacy and security. (s. 1-6) doi:10.1109/SIEDS49339.2020.9106650
- Katko, T. S. & Pietilä, P. (2017). Vesihuolto kaupungistuvissa yhteiskunnissa. *Alue Ja Ympäristö*, 46(1), 32-39. Haettu 10.11.2020 osoitteesta [https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/vesihuolto-kaupungistuvissa-yhteiskunnissa\(87c76edb-594e-48b9-9f2f-5bbf81e1b47c\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/vesihuolto-kaupungistuvissa-yhteiskunnissa(87c76edb-594e-48b9-9f2f-5bbf81e1b47c).html)
- Khan, M. F., Jain, A., Arunachalam, V. & Paventhan, A. (2014). Communication technologies for smart metering infrastructure. (s. 1-5) doi:10.1109/SCEECS.2014.6804427
- Kostakos, V., Ojala, T. & Juntunen, T. (2013). *Traffic in the smart city: Exploring city-wide sensing for traffic control center augmentation* doi:10.1109/MIC.2013.83
- Lee, S. W., Sarp, S., Jeon, D. J. & Kim, J. H. (2015). Smart water grid: The future water management platform. *Null*, 55(2), 339-346. doi:10.1080/19443994.2014.917887
- Lin, J., Yu, W., Zhang, N., Yang, X., Zhang, H. & Zhao, W. (2017). *A survey on internet of things: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications* doi:10.1109/JIOT.2017.2683200

- Lin, Y., Wang, P. & Ma, M. (2017). Intelligent transportation system (ITS): Concept, challenge and opportunity. (s. 167-172) doi:10.1109/BigDataSecurity.2017.50
- López, T. S., Ranasinghe, D. C., Harrison, M. & McFarlane, D. (2011). Adding sense to the internet of things. *Personal and Ubiquitous Computing*, 16(3), 291-308. doi:10.1007/s00779-011-0399-8
- Jyväskylän kaupunki. (2018a). Circwaste - kankaan vanhan paperitehdasalueen älykkäät jätehuoltoratkaisut. Haettu 23.02.2021 osoitteesta <https://www.jyvaskyla.fi/hankkeet/circwaste/circwaste-kankaan-vanhan-paperitehdasalueen-alykkaat-jatehuoltoratkaisut>
- Jyväskylän kaupunki. (2018b). Kangas. Haettu 23.02.2021 osoitteesta <https://www.jyvaskyla.fi/en/kangas-jyvaskyla/about-kangas>
- Marjani, M., Nasaruddin, F., Gani, A., Karim, A., Hashem, I. A. T., Siddiqa, A. & Yaqoob, I. (2017). *Big IoT data analytics: Architecture, opportunities, and open research challenges* doi:10.1109/ACCESS.2017.2689040
- Mehmood, Y., Ahmad, F., Yaqoob, I., Adnane, A., Imran, M. & Guizani, S. (2017). *Internet-of-things-based smart cities: Recent advances and challenges* doi:10.1109/MCOM.2017.1600514
- Mehmood, R., See, S., Katib, I. & Chlamtac, I. (2020). Smart Infrastructure and Applications Foundations for Smarter Cities and Societies: Foundations for Smarter Cities and Societies. 10.1007/978-3-030-13705-2.
- Merriam-Webster (2021). Analyze. In Merriam-Webster.com dictionary. Haettu 10.03.2021 osoitteesta <https://www.merriam-webster.com/dictionary/analyze>
- Minoli, D., Sohraby, K. & Occhiogrosso, B. (2017). *IoT considerations, requirements, and architectures for smart Buildings – Energy optimization and next-generation building management systems* doi:10.1109/JIOT.2017.2647881
- Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F. & Chlamtac, I. (2012). Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad Hoc Networks*, 10(7), 1497-1516. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>
- Morimoto, R. (2010). Estimating the benefits of effectively and proactively maintaining infrastructure with the innovative smart infrastructure sensor system. *Socio-Economic Planning Sciences*, 44(4), 247-257. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.seps.2010.07.005>

- Morimoto, R. (2013). A socio-economic analysis of smart infrastructure sensor technology. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 31, 18-29. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.trc.2013.02.015>
- Mourshed, M., Bucchiarone, A. & Khandokar, F. (2016). SMART: A process-oriented methodology for resilient smart cities. (s. 1-6) doi:10.1109/ISC2.2016.7580872
- National Academy of Engineering (2017). NAE Grand challenges for engineering. Haettu 20.10.2020 osoitteesta <http://www.engineeringchallenges.org/File.aspx?id=11574&v=34765dff>
- Nkoro, A. B. & Vershinin, Y. A. (2014). Current and future trends in applications of intelligent transport systems on cars and infrastructure. (s. 514-519) doi:10.1109/ITSC.2014.6957741
- Ogie, R. I., Perez, P. & Dignum, V. (2017). Smart infrastructure: An emerging frontier for multidisciplinary research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 170(1), 8-16. doi:10.1680/jsmic.16.00002
- Ota, K., Kumrai, T., Dong, M., Kishigami, J. & Guo, M. (2017). *Smart infrastructure design for smart cities* doi:10.1109/MITP.2017.3680957
- Piro, G., Cianci, I., Grieco, L. A., Boggia, G. & Camarda, P. (2014). Information centric services in smart cities. *Journal of Systems and Software*, 88, 169-188. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.jss.2013.10.029>
- Rao, B. B. P., Saluia, P., Sharma, N., Mittal, A. & Sharma, S. V. (2012). Cloud computing for internet of things & sensing based applications. (s. 374-380) doi:10.1109/ICSensT.2012.6461705
- Rathore, M. M., Ahmad, A., Paul, A. & Rho, S. (2016). Urban planning and building smart cities based on the internet of things using big data analytics. *Computer Networks*, 101, 63-80. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.comnet.2015.12.023>
- Rice, J. & Martin, N. (2020). Smart infrastructure technologies: Crowdsourcing future development and benefits for Australian communities. *Technological Forecasting and Social Change*, 153, 119256. doi:<https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.techfore.2018.03.027>
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P. & Kelly, T. K. (2001). *Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies* doi:10.1109/37.969131

- Robles, T., Alcarria, R., Martín, D., Navarro, M., Calero, R., Iglesias, S. & Lòpez, M. (2015). *An iot based reference architecture for smart water management processes*
- Weigel, A., Renner, C., Turau, V. & Ernst, H. (2014). Wireless sensor networks for smart metering. (s. 722-729) doi:10.1109/ENERGYCON.2014.6850506
- Shyam, G. K., Manvi, S. S. & Bharti, P. (2017). Smart waste management using internet-of-things (IoT). (s. 199-203) doi:10.1109/ICCCT2.2017.7972276
- Sharma, R. & Kumar, V. (2019). The multidimensional venture of developing a smart city. (s. 1-7) doi:10.1109/ICBDCI.2019.8686101
- Sinaeepourfard, A., Garcia, J., Masip-Bruin, X. & Marín-Tordera, E. (2015). Estimating Smart City Sensors Data Generation: Current and Future Data in the City of Barcelona. Haettu 15.01.2021 osoitteesta [https://www.researchgate.net/profile/E-Marin-Tordera/publication/304580274\\_Estimating\\_Smart\\_City\\_Sensors\\_Data\\_Generation\\_Current\\_and\\_Future\\_Data\\_in\\_the\\_City\\_of\\_Barcelona/links/5834684908ae138f1c0d6cf6/Estimating-Smart-City-Sensors-Data-Generation-Current-and-Future-Data-in-the-City-of-Barcelona.pdf](https://www.researchgate.net/profile/E-Marin-Tordera/publication/304580274_Estimating_Smart_City_Sensors_Data_Generation_Current_and_Future_Data_in_the_City_of_Barcelona/links/5834684908ae138f1c0d6cf6/Estimating-Smart-City-Sensors-Data-Generation-Current-and-Future-Data-in-the-City-of-Barcelona.pdf)
- Soyinka, O., Siu, K. W. M., Lawanson, T. & Adeniji, O. (2016). Assessing smart infrastructure for sustainable urban development in the lagos metropolis. *Journal of Urban Management*, 5(2), 52-64. doi:[https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.jum.2017.01.001](https://doi.org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.jum.2017.01.001)
- Suomen virallinen tilasto (SVT): Jätetilasto (2020). Yhdyskuntajätteet 2019. Helsinki: Tilastokeskus. Haettu 23.02.2021 osoitteesta [https://www.stat.fi/til/jate/2019/13/jate\\_2019\\_13\\_2020-12-09\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/jate/2019/13/jate_2019_13_2020-12-09_tie_001_fi.html)
- Tampereen kaupunki. (2021). Smart Tampere. Haettu 23.02.2021 osoitteesta <https://www.tampere.fi/smart-tampere.html>
- The Royal Academy of Engineering (2012). Smart infrastructure: the future. The Royal Academy of Engineering. Haettu 20.11.2020 osoitteesta <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/smart-infrastructure-the-future>
- The Standing Committee on Infrastructure: Transport and Cities. (2016). *Smart ICT report on the inquiry into the role of smart ICT in the design and planning of infrastructure*. Parliament of Australia.

Tuballa, M. L. & Abundo, M. L. (2016). *A review of the development of Smart Grid technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59. 710-725. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.011>.

Turun kaupunki (2021). *Smart and Wise Turku*. Haettu 23.02.2021 osoitteesta <https://www.turku.fi/smart-and-wise>

United Nations (2008). *The 2007 Revision: World Urbanization Prospects*. Department of Economic and Social Affairs (DESA). Haettu 20.02.2021 osoitteesta <https://www.un.org/en/development/desa/population/events/pdf/expert/13/Heilig.pdf>

United Nations (2018). *2018 Revision of World Urbanization Prospects*. Department of Economic and Social Affairs (DESA) Haettu 20.02.2021 osoitteesta <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>

Yi, S., Li, C. & Li, Q. (2015). *A survey of fog computing: Concepts, applications and issues*. (s. 37-42). New York, NY, USA: Association for Computing Machinery.

Xue-song, Z., Li-qiang, C. & You-jie, M. (2010). *Research on smart grid technology*. (s. V3-603) doi:10.1109/ICCASM.2010.5620576