

Olesja Mestsaninova

**DIGITAALISTEN KAKSOSTEN ROOLI KESTÄVÄN
KEHITYKSEN EDISTÄMISESSÄ ÄLYKAUPUNGEISSA**



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA
2024

TIIVISTELMÄ

Mestsaninova, Olesja

Digitaalisten kaksosten rooli kestävän kehityksen edistämässä
älykaupungeissa

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2024, 41 s.

Tietojärjestelmätiede, kandidaatintutkielma

Ohjaaja: Rantanen, Minna

Kaupungistuminen aiheuttaa merkittäviä ympäristövaikutuksia, jotka tuovat mukanaan sekä haasteita että uusia mahdollisuuksia kestävälle kehitykselle. Resurssien, infrastruktuurin ja palveluiden kasvava kysyntä luo merkittäviä paineita kaupunkien ekosysteemeille. Älykaupunkien tavoitteena on tarjota kansalaisille etuja, kuten ympäristön kestävyyttä ja korkeatasoista elämänlaatua. Kestävä kehitys on mahdollista edistää hyödyntämällä innovatiivisia teknologioita. Yksi uusimmista ja merkittävimmistä ratkaisuista näihin kaupungistumisen haasteisiin ovat digitaaliset kaksoset, jotka ovat saaneet uutta huomiota kehittyneiden teknologioiden myötä. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia digitaalisten kaksosten roolia kestävän kehityksen edistämässä älykaupungeissa. Kirjallisuuskatsauksen avulla tarkasteltiin myös muiden teknologioiden, kuten tekoälyn, esineiden internetin ja koneoppimisen, vaikutuksia digitaalisten kaksosten hyödyntämiseen ja niiden kasvavan roolin kaupunkiympäristössä. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että digitaaliset kaksoset tarjoavat monipuolisia mahdollisuuksia kestävän kehityksen edistämiseksi ympäristöllisestä, taloudellisesta ja sosiaalisesta näkökulmasta. Niiden avulla voidaan parantaa kaupunkisuunnittelua, optimoida energiankäyttöä, vähentää ilmastovaikutuksia ja lisätä asukkaiden osallistumismahdollisuuksia. Digitaalisten kaksosten kyky analysoida ja hyödyntää reaaliaikaista dataa tukee päätöksentekoa ja resurssien optimointia. Lisäksi digitaalisten kaksosten yhdistäminen muihin teknologioihin on merkittävästi kasvattanut niiden potentiaalia ja suosiota.

Asiasanat: digitaaliset kaksoset, kestävä kehitys, älykaupunki

ABSTRACT

Mestsaninova, Olesja

The role of digital twins in sustainability development in smart cities

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2024, 41 pp.

Information Systems, Bachelor's Thesis

Supervisor: Rantanen, Minna

Urbanization causes a significant environmental effect, which brings both challenges and new opportunities for sustainable development. The increasing demand for resources, infrastructure and service places a significant pressure on urban ecosystems. The goal of smart cities is to provide citizens with such benefits as environmental sustainability and a high quality of life. It is possible to promote sustainable development by utilizing innovative technologies. One of the newest and most significant solutions to these challenges of urbanizations are digital twins, which have gained new attention with advanced technologies. The aim of this research was to investigate the role of digital twins in promoting sustainable development in smart cities. The literature review also examined the effects of other technologies, such as artificial intelligence, the Internet of Things and machine learning, on the utilization of digital twins and their growing role in urban development. Based on the study results, digital twins provide with range of opportunities for promoting sustainable development from an environmental, economic and social perspective. They can be used to improve urban planning, optimize energy use, reduce climate impacts and increase residents' opportunities for participation. The ability of digital twins to analyze and utilize real-time data supports decision-making and resource optimization. In addition, combining digital twins with other technologies has significantly increased their potential and popularity.

Keywords: digital twins, sustainability, smart cities

KUVIOT

KUVIO 1 Datan kerääminen digitaalisten kaksosten ympäristössä	12
KUVIO 2 Älykaupungin keskeiset piirteet (Silva ym., 2018, s. 699)	22

TAULUKOT

TAULUKKO 1 Digitaalisten kaksosten hyödyt ja haasteet.....	15
TAULUKKO 2 Kestävyytavoitteiden saavuttaminen älykaupungissa	26
TAULUKKO 3 Digitaalisten kaksosten rooli kestävyyden edistämässä.....	32

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIOT JA TAULUKOT

1	JOHDANTO.....	6
2	DIGITAALINEN KAKSONEN	9
2.1	Digitaalisten kaksosten määritelmä ja kehityshistoria.....	9
2.2	Digitaaliset kaksoset ja reaaliaikainen data	11
2.3	Digitaalisen kaksosen rooli infrastruktuurin hallinnassa	14
2.4	Digitaaliset kaksoset kaupunkisuunnittelussa	15
3	KESTÄVÄ KEHITYS JA ÄLYKAUPUNKI.....	19
3.1	Älykaupungin määritelmä ja kehityshistoria.....	20
3.2	Kestävyys ja sen merkitys älykaupungissa.....	23
3.3	Älykaupungin kestävyiden haasteet ja mahdollisuudet	26
4	DIGITAALISET KAKSOSET KESTÄVYYDEN EDISTÄMISESSÄ.....	29
4.1	Digitaalinen kaksonen kestävien ratkaisujen mahdollistajana	29
4.2	Kestävyiden seuranta digitaalisten kaksosten avulla	33
4.3	Rajoitteet digitaalisten kaksosten hyödyntämisessä	34
5	YHTEENVETO	36
	LÄHTEET	38

1 JOHDANTO

Nykyään keskitytään yhä enemmän kestävyteen ja älykaupunkeihin, vaikka kaupungistumisen negatiiviset vaikutukset on tiedostettu jo pitkään ja älykaupunkien kehityksestä on puhuttu vähintään 50 vuoden ajan (Diaz-Sarachaga, 2024). Kaupungistuminen aiheuttaa monia haasteita, kuten liikenteen ruuhkautumista, ilman ja veden saastumista, sekä kasvavaa painetta kaupunkien infrastruktuurille ja palveluille (Karren, Schmitz & Schaffer 2024). Eräs älykaupunkien keskeisimmistä tavoitteista on tukea älykkäitä päätöksiä, jotka edistävät kestävyttä ja vähentävät ympäristövaikutuksia hyödyntämällä dataa tai kaupunkilaisten osallistumista (Major ym., 2021). Kaupunkien monimuotoisen ekosysteemin vuoksi yksittäisten infrastruktuurien optimointi ei riitä kestävien ratkaisujen saavuttamiseen. Päätöksenteossa on otettava huomioon sekä lyhyen että pitkäaikavälin tavoitteet. Pitkäaikaisten tavoitteiden asettaminen tarjoaa paremmat mahdollisuudet varmistaa resurssien kestävää käyttöä ottamalla huomioon tulevien sukupolvien hyvinvoinnin (Rajabifard, 2019, s. 16–18).

Älykaupunki-konsepti on saanut paljon huomiota sekä julkisuudessa että tutkimuksen saralla viime vuosina, mutta yhtenäistä määritelmää siitä, milloin kaupunkia voidaan sanoa älykaupungiksi, ei ole vielä saavutettu (Karren ym., 2024). Tämä saattaa aiheuttaa haasteita älykaupunkien suunnittelulle ja toteutukselle, erityisesti tavoitteiden määrittelyssä ja priorisoinnissa. Toisaalta uusien teknologioiden, kuten esineiden internetin (englanniksi Internet of Things, IoT), tekoälyn ja data-analytiikan ansiosta älykaupunkien kehitys on mahdollistanut kaupunkitoimintojen reaaliaikaisen hallinnan ja optimoinnin. Nämä teknologiat parantavat kestävyttä ja edistävät kansalaisten elämänlaatua. (Awasthi ym., 2024; Ersan, Irmak & Colak, 2024.) Kaupungistumisen haasteet huomioiden älykaupunki pyrkii vähentämään näitä negatiivisia vaikutuksia ympäristöön ja samalla parantamaan asukkaiden elämänlaatua (Barbieri, Coluccia & Natale, 2025; Camero & Alba, 2019; Major ym., 2021; Silva, Khan & Han 2018). Teknologisten ratkaisujen avulla pyritään rakentamaan kestäviä ja toimivia kaupunkialueita.

Digitalisaation kehittyessä, erityisesti neljännen teollisen vallankumouksen myötä, digitaaliset kaksoset ovat nousseet merkittäväksi teknologiaksi, joka yhdistää fyysisten järjestelmien toiminnan ja virtuaalisen maailman (Mihai ym.,

2022). Digitaaliset kaksoset mahdollistavat fyysisten prosessien ja järjestelmien reaaliaikaisen kopioimisen ja simuloinnin digitaalisessa muodossa, hyödyntäen tekoälyä, esineiden internetiä ja pilvipalveluita. Tämä tarjoaa mahdollisuuden testata ja analysoida monimutkaisia järjestelmiä ennen niiden käyttöönottoa ja parantaa päätöksenteon tarkkuutta ja ennustettavuutta. (Mihai ym., 2022.) Näin ollen digitaaliset kaksoset voivat merkittävästi edistää älykaupunkien kestävästä kehityksestä, optimoimalla esimerkiksi energiankulutusta ja liikenteenhallintaa.

Kestävä kehitys kaupunkisuunnittelussa, erityisesti älykaupungeissa, on tärkeä tutkimusaihe. Kestävyysraportointistandardit, kuten ESRS (European Sustainability Reporting Standards), ja maailmanlaajuisesti asettamat ympäristövelvoitteet, kuten SDG (englanniksi Sustainable Development Goals), veloittavat suuryrityksiä ja kaupunkia toimimaan kestävämmällä tavalla (Rajabifard, 2019, s. 185–186; Dovolil & Svitek, 2024). Ongelmana on, kuinka digitaalisia kaksosia voidaan hyödyntää laajamittaisesti kaupunkien kestävä kehityksen edistämiseksi. Kaupunkien tuottamat kasvihuonepäästöt ja aiheuttamat ympäristöhaitat ovat maailmanlaajuisesti merkittävä haaste. Tästä syystä tutkimuksen tavoitteena on vastata kysymykseen:

- Kuinka digitaalisia kaksosia voidaan hyödyntää kestävä kehityksen edistämiseksi älykaupungeissa?

Tutkimus laajentaa aiempia tuloksia keskittymällä siihen, kuinka digitaaliset kaksoset voivat tukea älykaupunkien kestävä kehityksen tavoitteita kaupunkiympäristön eri osa-alueilla. Lisäksi se pyrkii tarkastelemaan, kuinka nykyiset teknologiat ovat vaikuttaneet digitaalisten kaksosten hyödyntämiseen ja roolin laajentamiseen kestävä kaupungin kehityksen edistämiseksi. Näin tutkimus tarjoaa uudenlaisen ja laajemman näkökulman digitaalisten kaksosten merkityksestä älykaupunkien kestävä kehityksen tukemisessa.

Kandidaattitutkielman toisessa luvussa käsitellään digitaalisten kaksosten määritelmää ja teknologian kehityshistoriaa erityisesti niiden keskeisiltä osilta. Lisäksi luvussa tarkastellaan digitaalisten kaksosten roolia data-analytiikassa, infrastruktuurin hallinnassa sekä kaupunkisuunnittelussa. Kolmannessa luvussa avataan kestävä kehityksen ja älykaupungin käsitteet sekä älykaupungin kehityshistoria ja kestävyuden merkitys. Tässä luvussa tarkastellaan myös mahdollisia kestävyteen liittyviä haasteita ja mahdollisuuksia älykaupunkien kontekstissa. Neljännessä luvussa tarkastellaan digitaalisten kaksosten roolia kestävyden edistämiseksi, teknologian hyödyntämistä sekä mahdollisia haasteita kyseisen teknologian käytössä kestävyystavoitteiden saavuttamiseksi. Tutkimuksen yhteenveto esitetään viidennessä luvussa.

Tutkimus on toteutettu kirjallisuuskatsauksena hyödyntäen Scopus-tietokantaa. Tutkimuksen keskeisiin käsitteisiin kuuluvat *digital twins*, *sustainability ja smart city*, joista muodostettiin hakusanoja ja niiden yhdistelmiä. Tiedonhaussa otettiin huomioon hakusanojen variaatioita, kuten *smart city ja smart cities sekä digital twins ja digital twin*. Aineisto rajattiin tieteellisiin, englanninkielisiin artikkeleihin ja kirjoihin, sillä keskeinen tutkimus ja kirjallisuus aiheesta on pääosin saatavilla englanniksi. Lisäksi artikkeleiden lähdeluetteloita käytiin läpi, ja niistä

löytyneitä lisälähteitä, kuten tutkimuksia, kirjoja ja hankkeita, joita hyödynnettiin aineistonkeruussa.

2 DIGITAALINEN KAKSONEN

Viime vuosina digitaalisten kaksosten merkitys on kasvanut eri toimialoilla, alkaen teollisuudesta kiinteistöhallintaan ja kaupunkisuunnitteluun. Tässä luvussa tarkastellaan digitaalisten kaksosten käsitettä, niiden kehityshistoriaa ja eri sovellusalueita. Aluksi käydään läpi digitaalisten kaksosten määritelmiä ja niiden keskeisiä ominaisuuksia, minkä jälkeen tarkastellaan niiden merkitys datan keräämisessä ja analysoinnissa. Luvun lopussa käsitellään digitaalisten kaksosten roolia infrastruktuurihallinnassa sekä niiden tarjoamia hyötyjä ja haasteita. Nämä näkökulmat auttavat ymmärtämään digitaalisten kaksosten roolia nykypäivän datavetoisessa maailmassa ja niiden kasvavaa vaikutusta eri sovelluskohteissa.

2.1 Digitaalisten kaksosten määritelmä ja kehityshistoria

Digitaalisella kaksosella on useita määritelmiä, jotka voivat vaihdella sen mukaan, missä teknologiaa hyödynnetään ja millaisia ominaisuuksia painotetaan. VanDerHornin ja Mahadevanin (2021) tekemän kirjallisuuskatsauksen mukaan digitaalisen kaksosen käsitteelle on löydetty 46 erilaista määritelmää. Näiden perusteella tekijät esittävät yleisen käsityksen, että digitaalinen kaksonen on virtuaalinen esitys järjestelmästä sekä siihen liittyvistä ympäristöistä ja prosesseista, jotka ovat jatkuvassa yhteydessä fyysiseen järjestelmään (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Tämä kattava määritelmä tuo esille digitaalisen kaksosten perusidean.

Lisäksi digitaalinen kaksonen voidaan usein nähdä tietokoneohjelmana, joka mahdollistaa fyysisten kohteiden, prosessien tai palvelujen digitaaliset kopiot (Major ym., 2022). Löcklin ja muut (2021) ovat tuoneet esille selkeän erottelun digitaalisen kaksosen ja älykkään digitaalisen kaksosen välillä, jossa älykäs versio kykenee antamaan palautetta kerätyn datan perusteella. Tämä puolestaan laajentaa niiden teknologista toiminnallisuutta eri sovelluskohteisiin tuotteen elinkaaren eri vaiheissa.

Toisaalta Mihai ja muut (2022) määrittelevät digitaaliset kaksoset edistyneiksi järjestelmien järjestelmiksi, jotka ovat itsekehittyviä, itseohjautuvia, itsevalvovia ja kykenevät itsenäisesti suorittamaan diagnooseja. Nämä järjestelmät pystyvät automaattisesti reagoimaan fyysisen kaksosen ympäristön muutoksiin, pysymään tietoisina sen tilasta ja konfiguraatiosta, sekä arvioimaan omaa tilaansa. Lisäksi digitaalinen kaksos osaa toimia siten, että se ei ylitä fyysisen kaksosen rajoituksia ja ylläpitää jatkuvasti optimaalista toimintakykyä. (Mihai ym., 2022.) Niiden toiminta perustuu reaali maailman ilmiöiden kokonaisvaltaisen analysointiin sekä ymmärrykseen, mukaan lukien niiden nykytila, toiminta ja prosessit (Ersan ym., 2024). Edellä esitetty näkökulma digitaalisten kaksosten itseohjautuvuudesta ja kyvystä reagoida ympäristöön korostaa niiden potentiaalia erilaisissa sovelluskohteissa, joissa ne voivat merkittävästi parantaa päätöksentekoa ja toiminnan tehokkuutta.

Erilaisten digitaalisten kaksosten määritelmien ja teknologisen ymmärryksen perusteella niitä voidaan tarvittaessa kategorisoida niiden roolien mukaan. Vaikka tämä ei ole vakiintunut käytäntö, useat tutkimukset käyttävät kategorisointia korostamaan kaksosten eri rooleja tai toimintatapoja. Esimerkiksi Ersan, Irmak ja Colak (2024) ovat esittäneet neljää pääkategoria, joihin kuuluvat tuotekaksoset, prosessikaksoset, järjestelmäkaksoset ja ihmisten kaksoset. Mihai ja muut (2022) puolestaan mainitsevat pilvipohjaiset kaksoset omana ryhmänään. Näissä kategorioissa voidaan painottaa joko yksittäisen tuotteen ominaisuuksia, prosessin optimointia, järjestelmätason ympäristöjä tai ihmisten ja digitaalisten kaksosten välistä vuorovaikutusta (Ersan ym., 2024). Lisäksi Diaz-Sarachaga (2024) mainitsee kaupungin digitaalisen kaksosen (englanniksi urban digital twin) omana käsitteenä, mikä korostaa niiden roolia kaupunkiympäristössä. Tämän pohjalta voidaan todeta, että kategorisointi ei ole vielä vakiintunut ja kehittyy todennäköisesti digitaalisten kaksosten sovelluskohteiden monipuolistuessa ja teknologian kehittyessä.

Digitaalisten kaksosten konsepti on syntynyt teollisuudessa vuonna 2002 Michiganin yliopistossa, jolloin sitä käytettiin fyysisten tuotteiden virtuaalisten kopioiden luomiseen. Tuolloin esiteltiin tuotteen elinkaaren hallintamalli (englanniksi Product Lifecycle Management, PLM), jossa fyysisen ja virtuaalisen järjestelmän välillä oli jatkuva yhteys. Tämä kehitetty malli perustui ajatukseen, että fyysinen prosessi tai tuote voi olla reaaliajassa kytköksissä digitaaliseen kaksoseseen. Virtuaalinen tila tallentaa kaikki tiedot fyysisestä järjestelmästä ja seuraa sen elinkaaren vaiheita, kuten suunnittelua, valmistusta, ylläpitoa ja käytöstä poistamista. Näiden kahden tilan välillä on linkki, joka mahdollistaa tiedon virtaamisen molempiin suuntiin, mahdollistaen fyysisen järjestelmän optimoinnin ja analysoinnin virtuaalisen kopion avulla. Alun perin tätä konseptia kutsuttiin peilattujen tilojen malliksi, mutta myöhemmin sille annettiin nimi digitaalinen kaksos. (Grieves & Vickers, 2022.) Kuitenkin digitaalisen kaksosen käsite on vakiintunut vasta sen jälkeen, kun sitä on aloitettu hyödyntämään astronautiikassa, esimerkiksi NASA projekteissa (Ferre-Bigorra, Casals & Gangolells, 2022).

Digitaalisen kaksosen perusajatus on säilynyt, mutta se on laajentunut koskemaan monia muita sovellusalueita, kuten älykaupunkeja, tuotesuunnittelua,

rakennusten kunnossapitoa, maataloutta, kierrätyksen seuranta ja monia muita. Rakennusalaalla digitaalisten kaksosten käyttö on yleistynyt vuodesta 2018 lähtien, ja niitä on alettu hyödyntämään sekä suunnittelu- että käyttö- ja kunnossapitovaiheissa. (Ferre-Bigorra ym., 2022.) Tämä kehityssuunta osoittaa, että digitaalisten kaksosten käsitteen laajentuminen ja sen sovelluskohteiden lisääntyminen ovat vasta alkamassa saavuttaa merkittävää vauhtia.

Kaupunkisuunnittelussa digitaalisten kaksosten hyödyntäminen on laajentunut erityisesti vuodesta 2018 alkaen. Ennen digitaalisten kaksosten käyttöönottoa kaupunkimallinnuksessa hyödynnettiin kuitenkin muita teknologioita. Ferre-Bigorra, Casals ja Gangolells (2022) mukaan tietokoneita on aloitettu hyödyntämään kaupunkimallien kehityksessä 1950-luvulla, ja vuodesta 2000 alkaen 3D-kaupunkimallit ovat osittain korvanneet perinteisiä menetelmiä. Myöhemmin nämä mallit yhdistettiin BIM-tekniikkaan (englanniksi Building Information Modeling), jossa 3D kaupunkimallit esitetään digitaalisessa muodossa (Ferre-Bigorra ym., 2022).

3D-kaupunkimallinnuksen ja BIM-tekniikan yhdistelmä ei kuitenkaan mahdollista suoraa vuorovaikutusta kaupungin kanssa, minkä vuoksi painopiste on vähitellen siirtymässä kohti digitaalisten kaksosten teknologioita. Tätä siirtymää tukee myös uusien teknologioiden kehitys, jotka voivat tukea digitaalisia kaksosia data-analytiikassa, laskentatehossa ja datan keräämisessä, mikä laajentaa niiden sovelluskohteita eri aloille, kuten kaupunkisuunnitteluun, terveydenhuoltoon, logistiikkaan ja sähköenergiaan (Ersan ym., 2024).

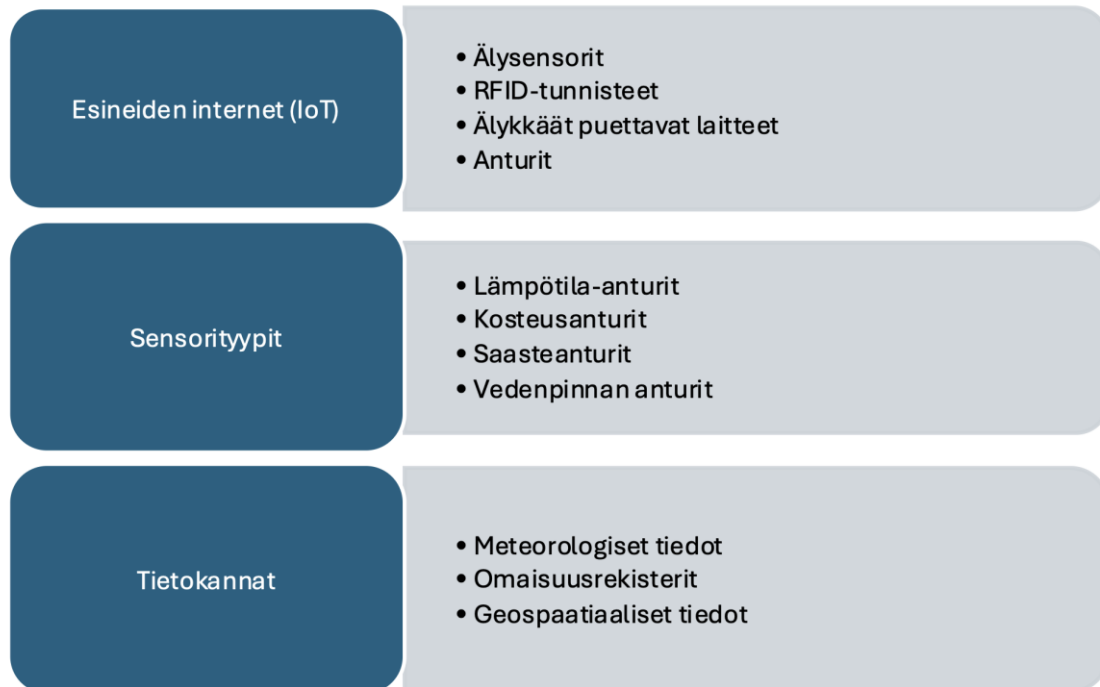
2.2 Digitaaliset kaksoset ja reaaliaikainen data

Digitaaliset kaksoset ovat nousseet esiin teknologiana, joka mahdollistaa kaupunkien fyysisten ympäristöjen visualisoinnin ja simuloinnin, mikä taas parantaa kaupungin suunnittelua, hallintaa ja kestävyyttä. Ersan ja muut (2024) korostavat, että digitaalisten kaksosten tehokkuus perustuu reaaliaikaiseen datakeruun ja analysointiin, joita tukevat teknologiat kuten esineiden internet, tekoäly, pilvipalvelut, metaversumi ja data-analytiikka.

Reaaliaikainen data on keskeisessä roolissa digitaalisten kaksosten hyödyntämisessä, sillä se mahdollistaa jatkuvan yhteyden fyysisen ja virtuaalisen kopion välillä. Ihanteellisessa tilanteessa datan vaihto digitaalisen kaksosen ja fyysisen järjestelmän välillä tapahtuu lähes synkronisesti, mutta käytännössä datan päivitystaajuuden tarve voi vaihdella huomattavasti käyttökohteen mukaan. Usein tiedon päivitystiheys määräytyy käyttötarkoituksen ja tarpeen perusteella, jolloin riittää, että dataa päivitetään tietyin väliajoin. (VanDerHorn & Mahadevan, 2021.)

Reaaliaikainen datan päivitys ja vaihto on erityisen tärkeää kriittisten infrastruktuurien hallinnassa, jossa lähes synkroninen tiedonvaihto voi olla välttämätöntä päätöksenteon tueksi. Esimerkiksi terveydenhuollossa ja hätäpalveluissa teknologian hyödyntäminen edellyttää reaaliaikaisen datan käyttöä, jotta voidaan varmistaa nopean reagoinnin ja riskien hallinnan (Reynoso Vanderhorst,

Heesom & Yennetti, 2024). Ajantasaisen tiedon järjestelmän tilasta ja toimintakyvystä on tällöin olennainen osa digitaalisten kaksosten hyödyntämistä. Kuviossa 1 on esitetty digitaalisten kaksosten hyödyntämä data kaupunkiympäristössä sekä tapoja, joilla dataa kerätään.



KUVIO 1 Datan kerääminen digitaalisten kaksosten ympäristössä

Esineiden internetin avulla digitaaliset kaksokset voivat hyödyntää reaaliaikaista dataa, mikä korostaa niiden soveltuvuutta teknologioiksi, jota voidaan integroida saumattomasti eri järjestelmiin (Diaz-Sarachaga, 2024; Mihai ym., 2022). Esineiden internet teknologian ansiosta älysensoreiden, RFID-tunnisteiden, älykkäiden puettavien laitteiden keräämä data on mahdollista välittää pilvipohjaisille digitaalisille kaksosille. Tekoäly puolestaan parantaa suurten datamäärien analysointia. Reaaliaikainen suurten datamäärien käsittely tehostuu, kun pilvipalvelut integroidaan digitaalisiin kaksosiin lisäämään laskentatehoa. Tällöin pilvipalvelu toimii massadatan tallennusvarastona ja käsittelyalustana, kun taas digitaalinen kaksonen huolehtii fyysisen ja virtuaalisen mallin synkronoinnista (Mihai ym., 2022).

Koneoppimisen integroiminen digitaalisiin kaksosiin mahdollistaa yhä tarkemman datan analysoinnin, mikä vie data-analytiikan uudelle tasolle ja tehostaa tietoturvaa (Mihai ym., 2022). Esineiden internet on tällä hetkellä optimaalinen ja helppo tapa kerätä dataa, sillä älykkäitä antureita ja puettavia laitteita voidaan yhdistää ihmisten kannettaviin laitteisiin, kaupunkien infrastruktuureihin ja sisätiloihin. Tämä mahdollistaa kaupunkien visualisoinnin ja simulaation, mikä puolestaan auttaa turvallisuushaasteiden etähallinnassa ja erilaisten riskitilanteiden ehkäisyssä. Mihai ja muut (2022) korostavat esineiden internetin hyötyjä digitaalisten kaksosten yhteydessä erityisesti sen kyvyssä analysoida ja tulkita dataa eri tietoliikenneprotokollista. Yhdessä nämä teknologiat tarjoavat

tehokkaita keinoja vastaamaan ajankohtaisiin kaupunkisuunnittelun haasteisiin ja parantamaan kaupunkien kestävyyttä mukaan lukien kustannustehokkuutta.

Ferre-Bigorra ja muiden (2022) mukaan digitaaliset kaksoset tarjoavat mahdollisuuksia kerätä ja analysoida dataa kaupunkiympäristöistä, mikä tukee entistä tehokkaampaa suunnittelua ja hallintaa. Tämä kattaa reaaliaikaisen datan keruun fyysisestä ympäristöstä ja voi sisältää esimerkiksi sähköverkon infrastruktuurin, ilmastomallien sekä ilmanlaadun ja melusaasteen analysoinnin. Tällaisen datan saaminen edellyttää monipuolisia sensortyyppisiä, kuten lämpötila-, kosteus-, saaste- ja vedenpinnan antureita (Ferre-Bigorra ym., 2022). Tämä tukee Mihai ja muiden (2022) tutkimuksessa korostettua esineiden internetin hyödyntämistä digitaalisten kaksosten datankeruun tukemiseksi.

Lisäksi digitaalisten kaksosten toiminnassa hyödynnetään julkisten ja kolmansien osapuolten tarjoamia tietokantoja, kuten sähkömarkkina- ja omaisuusrekisteritietokantoja. Tutkimuksessa todettiin, että erityisen hyödyllisiä ovat tietokannat, jotka sisältävät meteorologisia tietoja, omaisuusrekisteritietoja sekä geospaatialista tietoa, jotka yhdessä auttavat kaupunkisuunnittelussa ja optimoinnissa. (Ferre-Bigorra ym., 2022.) Näiden sensoreiden ja tietokantojen ansiosta digitaalinen kaksonen tarjoaa kattavan kuvan kaupunkiympäristön tilasta ja tehostaa data-analytiikkaa.

Virtuaalisen maailman, eli metaversumin, avulla digitaaliset kaksoset voivat toimia vuorovaikutuksessa simuloitun kaupunkiympäristön kanssa reaaliajassa. Virtuaalisen maailman kehitys perustuu dataan pohjautuviin tekoälyjärjestelmiin, joiden keskeisinä elementteinä ovat datan keruu ja mallintaminen. Tämä mahdollistaa paitsi simulaatioiden ja tapahtumien, kuten tulvien, liikenteen ja ilmastomuuttujien, mallintamisen myös näiden tapahtumien ennustamisen datan avulla. (Allam ym., 2022.) Yleistettynä virtuaalisen maailman hyöty on sen kyvyssä luoda kaupunkien 3D-malleja, jotka toimivat osana digitaalisten kaksosten järjestelmää. Toisin sanoen, simulaatiot ja niiden visualisoinnit voivat auttaa ennakoimaan esimerkiksi ilmaston, liikennedynamiikan, energian tuotannon ja kulutuksen muutoksia (Allam ym., 2022).

Merkittävänä erona perinteisiin virtuaalitodellisuuden (VR) teknologioihin on metaversumin kyky tarjota yhteinen alusta, jota eri sidosryhmät voivat muokata samanaikaisesti. VR-teknologia mahdollistaa vuorovaikutuksen ennalta määritellyssä ympäristössä, kun taas metaversumi hyödyntää reaaliaikaista dataa ja tarjoaa joustavamman alustan (Allam ym., 2022). Lisäksi Allam ja muut (2022) korostavat, että tämän metaversumin integrointi digitaalisten kaksosten järjestelmään vie päätöksenteon seuraavalle tasolle ja on kustannustehokkaampi vaihtoehto perinteisiin paikkatietojärjestelmiin (GIS) verrattuna.

Uusien teknologisten mahdollisuuksien myötä digitaaliset kaksoset tehostavat data-analytiikkaa, tarjoamalla lukusia hyötyä ja sovellusmahdollisuuksia eri toimialoilla sekä kaupungin infrastruktuurin kehittämisessä. Ne tukevat kaupunkien taloudellista kestävyyttä ja tarjoavat mahdollisuuden parantaa tehokkuuden ja sopeutumiskyvyn parantamiseen (Ersan ym., 2024).

2.3 Digitaalisen kaksosen rooli infrastruktuurin hallinnassa

Digitaaliset kaksokset tarjoavat uusia mahdollisuuksia kerätä ja analysoida dataa kaupunkiympäristöistä, mikä mahdollista sen infrastruktuurin paremman suunnittelun ja hallinnan. Tämä kattaa fyysisen ympäristön reaaliaikaisen datan keruun. Digitaalinen kaksonen voi mallintaa esimerkiksi rakennuksia, yksittäisiä huoneita, järjestelmiä ja olosuhteita, kuten muita teknisiä järjestelmiä, sääolosuhteita ja ilmanlaatua, jotka vaikuttavat kyseisen ympäristön tai infrastruktuurin suorituskykyyn (VanDerHorn & Mahadevan, 2021).

Ferre-Bigorra ja muut (2022) tunnistavat tutkimuksessa 19 infrastruktuurijärjestelmää, joita digitaaliset kaksokset voivat kattaa. Näihin kuuluvat sähköverkkoinfrastruktuuri, ilmastomalli, ilmanlaadun analysointi ja melusaasteen hallinta (Ferre-Bigorra ym., 2022). Kaikki tämä tieto voidaan integroida ja tallentaa virtuaaliseen malliin, mikä mahdollistaa optimoinnin, simuloinnin ja paremman päätöksenteon infrastruktuurihallinnassa (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Infrastruktuurin hallinnassa geospaatialinen tieto on kriittinen tekijä alueen, ympäristöolosuhteiden, maaston ja ympäröivän infrastruktuurin analysoinnissa, erityisesti suurissa infrastruktuurihankkeissa. Geospaatialisella tiedolla viitataan sijainti- ja ympäristötietoihin, kuten maaston korkeuksiin ja rakennusten sijainteihin, jotka ovat olennaisia kaupunkien 3D-mallien luomiselle. (Ferre-Bigorra ym., 2022.)

Infrastruktuurin hallinnassa on keskeistä myös prosessien seuranta. Tämä koskee erityisesti lyhytaikaisia ja pitkäaikaisia prosesseja, joita voidaan tallentaa digitaaliseen kaksoseen. (VanDerHorn & Mahadevan, 2021.) Tyypillisiä esimerkkejä pitkäaikaisista prosesseista ovat rakennusten ja teiden kulumisen, johon vaikuttavat ulkoiset tekijät, kuten sääolosuhteet ja liikenne. Lyhytaikaisia prosesseja voivat olla esimerkiksi liikennejärjestelyn hallinta, erityisesti silloin, kun teiden kunnostustöitä toteutetaan risteyksissä, jolloin liikenne joudutaan uudelleenohjaamaan. Tällaisissa tapauksissa digitaalisten kaksosten rooli korostuu erityisesti vilkkaissa liikenteen solmukohdissa.

VanDerHorn ja Mahadevan (2021) tapaustutkimus osoittaa, että digitaalisten kaksosten käyttö merialan omaisuudenhallinnassa voi vähentää käyttökuluja ja parantaa riskienhallintaa. Riskienhallinnassa ensisijainen tehtävä oli tarjota ajantasaista tietoa ja reaaliaikaista dataa laivan kunnossapidosta hätätilanteessa sidosryhmille päätöksenteon tueksi. Tämä esimerkki korostaa digitaalisten kaksosten potentiaalia omaisuudenhallinnassa sekä operatiivisen valmiuden parantamisessa, kustannusten vähentämisessä ja käytettävyyden optimoinnista.

Digitaalisten kaksosten rooli ulottuu kiinteistöhallintaan ja kaupungin infrastruktuuriin. Hyödyntämällä esineiden internetiä digitaalisten kaksosten avulla voidaan kerätä sensoreiden tuottamaa dataa, jonka perusteella on mahdollista luoda erilaisia digitaalisia malleja (Mihai ym., 2022). Esimerkiksi Cambridgen yliopiston kampuksella on kehitetty digitaalinen kaksonen, joka integroi reaaliaikaista tietoa rakennusten kunnosta (Vivi ym., 2019). Tämä mahdollistaa ennakoivan kunnossapidon ja rakennusten kunnan arvioinnin, minkä ansiosta

huoltotarpeita voidaan ennakoida. Ratkaisu voi vähentää ylläpitokustannuksia sekä parantaa rakennusten käytettävyyttä ja pitkän aikavälin toimivuutta.

Digitaalisten kaksosten tarjoavat arvokasta tietoa infrastruktuurin kunnosta koko sen elinkaaren ajan, mikä mahdollistaa tehokkaamman kunnossapidon ja resurssien optimoinnin erityisesti ylläpitovaiheessa. Sääolosuhteiden, geospaatialisen tiedon ja muiden ympäristötekijöiden huomioiminen tukee resurssien kohdentamista ja ennakoivaa kunnossapitoa.

2.4 Digitaaliset kaksoset kaupunkisuunnittelussa

Nykyään digitaalisten kaksosten sovelluskohteet ovat laajentuneet merkittävästi. Alun perin teollisuustuotteiden virtuaalisiksi kopioiksi kehitetyt digitaaliset kaksoset ovat siirtyneet laajempiin ympäristöihin, kuten liiketoiminnan päätöksenteon tukeen, kaupunkisuunnitteluun ja infrastruktuurin hallintaan. Niiden manipuolinen potentiaali näkyy erityisesti ennaltaehkäisevässä ongelmaratkaisussa, kriittisen infrastruktuurin valvonnassa ja järjestelmien suorituskyvyn optimoinnissa, mikä lisää tehokkuutta eri toimialoilla (Ersan ym., 2024).

Digitaalisten kaksosten merkitys päätöksenteon tukena kasvaa uusien teknologioiden, kuten tekoälyn, esineiden internetin ja alustojen avulla (Diaz-Sarachaga, 2024; Allam, 2022). Koneoppiminen ja tekoäly tuovat uusia mahdollisuuksia, jotka tukevat kaupunkien kehityksen suunnittelua ja päätöksentekoa entistä tehokkaammin. Teknologian edistyessä digitaaliset kaksoset kehittyvät ja niiden toiminnallisuus laajenee. Digitaalisten kaksosten tuomia hyötyjä ja haasteita kaupunkisuunnittelussa on koottu taulukkoon 1.

TAULUKKO 1 Digitaalisten kaksosten hyödyt ja haasteet

Hyödyt	Haasteet
Reaaliaikainen data ja tilan seuranta elinkaaren aikana (VanDerHorn & Mahadevan, 2021)	Tietoturva- ja tietosuojahaasteet (Grieves & Vickers, 2022; Mihai ym., 2022)
Kustannustehokkuus ja ennaltaehkäisy (Ersan ym., 2024; Grieves & Vickers, 2022; Mihai ym., 2022; Xu & Xu, 2024)	Datan hajautuminen eri toimijoiden kesken (Grieves & Vickers, 2022)
Resurssien käytön optimointi (Grieves & Vickers, 2022; Ersan ym., 2024; Mihai ym., 2022)	Teknologioiden yhteensopivuus ja standardoinnin tarve (VanDerHorn & Mahadevan, 2021; Mihai ym., 2022)
Simulointi ja päätöksenteon tuki (VanDerHorn & Mahadevan, 2021)	Suuri laskentakapasiteetin tarve tietyissä tilanteissa (Grieves & Vickers, 2022; Mihai ym., 2022)
Integrointi muiden teknologioiden kanssa, kuten tekoäly ja esineiden internet (Diaz-Sarachaga, 2024; Allam, 2022)	Eettiset kysymykset, kuten yksityisyyden suoja (Mihai ym., 2022)

Digitaalisten kaksosten hyödyt simulaatioissa tekevät niistä merkittäviä teknologioita kaupunki- ja infrastruktuurisuunnittelussa. Suunnittelun ja simulaation

maailmassa on jo käytössä muita teknologioita, mikä herättää kysymyksen digitaalisten kaksosten lisähyödystä verrattuna olemassa oleviin ratkaisuihin. Eroava tekijä on digitaalisten kaksosten tarjoamat uudet mahdollisuudet. VanDerHornin ja Mahadevanin (2021) tutkimuksessa digitaalista kaksosta verrattiin perinteisiin simulaatioteknologioihin, kuten tietokoneavusteiseen suunnitteluun (englanniksi Computer-Aided Design, CAD), tietokoneavusteiseen tekniseen suunnitteluun (englanniksi Computer-Aided Engineering, CAE) sekä tuotteen elinkaaren hallintaan. Digitaalinen kaksonen eroaa näistä teknologioista jatkuvan reaaliaikaisen päivityksensä ansiosta, mikä mahdollistaa fyysisen järjestelmän muutosten reaaliaikaisen seurannan (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Toisin sanoen se edustaa yksittäistä fyysistä järjestelmää juuri siinä hetkessä.

Simulaatiomalli tai digitaalinen prototyyppi taas, kuten VanDerHorn ja Mahadevan (2021) toteavat, perustuu oletuksiin ja arvioihin siitä, miten fyysinen järjestelmä saattaa toimia riippuen olosuhteista. Nämä mallit eivät kykene seuraamaan reaaliaikaisesti järjestelmän tiloja, kuten digitaalinen kaksonen tekee. Lopullinen tieto päätöksenteon tueksi simulaatiomallien osalta on tehty oletusten pohjalta, mutta digitaalisen kaksosen tieto perustuu reaaliaikaiseen dataan ja fyysisen järjestelmän tilaan. (VanDerHorn & Mahadevan, 2021.)

Grievesin ja Vickersin (2022) mukaan digitaalisten kaksosten käyttö on myös kustannustehokkaampaa verrattuna fyysisen prototyyppien käyttöön. Fyysisen prototyyppien hinnoitteluun vaikuttaa inflaatio, kun taas virtuaalimallien kustannusten odotetaan laskevan ajan myötä. Tämä kustannustehokkuus tukee digitaalisten kaksosten roolia kaupunkisuunnittelussa, jossa kustannustehokkuus on olennainen osa päätöksentekoa. Digitaalisella kaksosella voi olla suuri vaikutus myös hukan vähentämisessä ja resurssien tehokkaassa käytössä koko järjestelmän elinkaaren ajan (Grieves & Vickers, 2022). Tämä puolestaan vaikuttaa positiivisesti ympäristökuormituksen vähentämiseen ja tehokkuuden optimointiin.

Digitaalisten kaksosten hyödyntämisen myötä kustannustehokkuutta on saavutettu myös IBM tapaustutkimuksissa, kuten valmistusprosessien tehostamisessa ja älyrakentamisessa. Esimerkiksi Kalifornian yliopiston sairaalaprojektissa digitaalisten kaksosten teknologian avulla putkistojen diagnosointi- ja korjausaika on saatu lyhentymään 2–3 päivästä muutamaan tuntiin. (Mihai ym., 2022.) Tämä esimerkki ei ainoastaan osoita digitaalisten kaksosten kustannustehokkuuden etuja, vaan myös niiden potentiaalinen resurssien säästämässä.

Digitaalisen kaksosen rinnalla on olemassa teknologioita, jotka hyödyntävät samanlaista datan käyttöperiaatetta. Korvikemallit (englanniksi surrogate models) käyttävät fyysisestä järjestelmästä kerättyä tietoa virtuaalisen mallin luomiseen, mutta ne eivät ylläpidä jatkuvaa virtuaalista mallia järjestelmän elinkaaren aikana. Korvikemallit perustuvat laskennallisiin malleihin, kuten tekoälyyn, ja niitä voidaan käyttää digitaalisen kaksosen tukena. Tämä on erityisen hyödyllistä silloin, kun alkuperäinen mallin kapasiteetti ei tuota tietoa riittävän nopeasti päätöksenteon tueksi. (VanDerHorn & Mahadevan, 2021.)

Digitaalinen kaksonen on ainutlaatuinen teknologia, sillä mikään muu järjestelmä, kuten korvikemalli tai prototyyppi, ei pysty ylläpitämään reaaliaikaista

yhteyttä fyysiseen järjestelmään sen koko elinkaaren ajan. Tämä korostaa digitaalisen kaksosen merkittävää roolia, erityisesti päätöksenteossa, jossa tarvitaan reaaliaikaista dataa koko prosessin tai tuotteen elinkaaren ajan. Sen lisäksi datan käyttö mahdollistaa ajan, energian ja resurssien säästön, mikä on merkittävä etu nykyisessä yhteiskunnassa. Kaikille näille resursseille voidaan antaa rahallinen vastine, mikä helpottaa saavutettujen hyötyjen vertailua ja päätöksentekoa.

Digitaalisten kaksosten hyöty muiden teknologioiden joukossa on huomattava, mutta niiden käyttöönotto perustuu reaaliaikaisen datan hyödyntämiseen. Grieves ja Vickers (2022) sekä Mihai ja muut (2022) korostavat, että digitaaliset kaksoset vaativat massiivisia tietomääriä ja tehokasta laskentakykyä, mikä tuo mukanaan merkittäviä tietoturva- ja tietosuojahaasteita. Lisäksi digitaalinen kaksonen on teknologia, joka yhdistää monia muita teknologioita, kuten tekoälyä, esineiden internetiä ja data-analytiikkaa. Tämä korostaa yhteensopivuuden ja standardisoinnin tärkeyttä, mutta myös niihin liittyviä haasteita. (VanDerHorn & Mahadevan, 2021; Mihai ym., 2022.) Näiden teknologioiden yhteensopivuuden ja dataan liittyvien käyttöoikeuksien sekä tietoturva- ja tietosuojakysymysten varmistaminen on usein aikaa vievä ja monivaiheinen prosessi, mikä hidastaa digitaalisten kaksosten laajamittaista käyttöönottoa.

Seuraava keskeinen haaste digitaalisten kaksosten hyödyntämisessä on datan hajautuminen eri sektoreiden ja organisaation sisäisten toimintojen välillä (Grieves & Vickers, 2022). Yhteistyö ja tiedonkulku näiden eri sektorien ja toimintojen välillä saattaa olla haastavaa tai jopa mahdotonta. Kaupungin infrastruktuurin hallinta edellyttää reaaliaikaisen datan hyödyntämistä, jotta liikennettä voidaan optimoida ruuhka-aikana. Tällöin esimerkiksi joukkoliikenteen aikataulutiedot sekä liikennevalojen toimintaan liittyvät tiedot voisivat olla hyödyllisiä, mutta ne ovat oletettavasti hajautettu eri tietokantoihin ja organisaatioihin. Digitaalinen kaksonen pystyy tässä yhteydessä tarjoamaan arvoa yhdistämällä nämä tiedot liikenteen optimoinnin tueksi.

Grieves ja Vickers (2022) sekä Mihai ja muut (2022) nostavat esiin myös teknologian simuloinnin ja testaamisen haasteet, erityisesti tilanteissa, joissa tarvitaan suuria laskentakapasiteetteja ja monimutkaisia parametreja teknologian ennakoimattomien vaikutusten minimoimiseksi. Esimerkiksi liikennevalojen vuorovaikutuksen simulointi ruuhka-aikana voi edellyttää huomattavaa laskentatehoa. Nykyinen laskentateho ja käytössä olevat teknologiat eivät välttämättä vielä riitä kattavaan testaamiseen, mutta ajan myötä teknologian kehittyminen tarjoaa tähän uusia mahdollisuuksia.

Kuten aikaisemmissa alaluvuissa on todettu, digitaaliset kaksoset perustuvat simulointiin, ennaltaehkäisevään ongelmaratkaisuun ja päätöksenteon tukemiseen, mikä korostaa niiden pitkän aikavälin hyötyjä. Digitaalisten kaksosten tarkoituksena on keskittyä kustannustehokkuuteen ja säästöihin, ei voiton tuottamiseen (Mihai ym., 2022; Xu & Xu, 2024). Tämä saattaa vähentää yksityisen sektorin kiinnostusta investoida kyseiseen teknologiaan, koska suora taloudellinen voitto voi jäädä vähäisemmäksi. Julkisen sektorin näkökulmasta, jossa resurssit ovat usein rajallisemmat, digitaalisten kaksosten kustannustehokkuus ja

kyky parantaa toiminnan ennakoitavuutta voivat kuitenkin tarjota merkittäviä hyötyjä.

Nykyinen teknologian kehitys ja digitaalisten kaksosten yleistymisen tuovat esiin eettisiä kysymyksiä. Digitaaliset kaksoset edellyttävät tiivistä vuorovaikutusta ihmisten, muiden teknologioiden ja eri toimialojen kanssa (Mihai ym., 2022). Niiden tarve reaaliaikaisen datan hyödyntämiseen korostaa yksityisyydensuojan tärkeyttä. Tutkijoiden ja kehittäjien tulee harkita tarkasti, onko tarkoituksenmukaista seurata ihmisten liikkumista tai muita käyttäytymistietoja. Nämä haasteet on otettava huomioon digitaalisten kaksosten käytön laajentamisessa ja suunnittelussa.

Digitaalisten kaksosten hyödyntämisessä kaupunkisuunnittelussa yhdistyvät niiden tarjoama reaaliaikainen data ja päätöksenteon tuki koko elinkaaren ajan. Ennaltaehkäisevä ongelmaratkaisu simuloinnin ja reaaliaikaisen datan avulla, resurssien käytön optimointi ja kustannustehokkuus ovat konkreettisia esimerkkejä teknologian hyödyistä. Laajemman hyödyntämisen haasteina ovat kuitenkin suuret laskentatehovaatimukset ja teknologian integrointi, joka edellyttää yhteensopivuutta ja standardien kehittämistä. Lisäksi tietoturva- ja tietosuojaongelmat voivat rajoittaa digitaalisten kaksosten merkitystä reaaliaikaisen datan käytössä. Näiden tekijöiden tasapainottaminen on keskeistä digitaalisten kaksosten täyden potentiaalin hyödyntämiseksi kaupunkisuunnittelussa.

3 KESTÄVÄ KEHITYS JA ÄLYKAUPUNKI

Kaupungit ovat laajoja ekosysteemejä, joissa yhdistyvät monenlaiset infrastruktuurit, teknologiat ja ihmiset. Kaupungistumisen myötä kaupunkien rooli kestävän kehityksen edistäjinä on korostunut, sillä kaupungit kuluttavat merkittävästi resursseja ja tuottavat suuren osan maailman kasvihuonekaasupäästöistä (Dovolil & Svitek, 2024; UN-SDSN, 2019). Euroopan unionin asettamat kestävyystavoitteet korostavat kaupunkien vastuullisuuden ja kestävän kehityksen periaatteiden merkitystä (Euroopan unionin asetus 2020/852; Komission delegoitu asetus 2023/2772).

Kestävyystavoitteiden suunnittelu ja toteuttaminen edellyttävät monimutkaisia ratkaisuja. Tämä johtuu siitä, että kestävyuden huomioiminen laajassa mittakaavassa on erityisen haastavaa kaupungin teknisessä infrastruktuurissa, johon kuuluvat muun muassa energia-, jäte- ja vesihuolto (Barbieri ym., 2025). Näiden sektorien kehittäminen edellyttää innovatiivisia teknologisia ratkaisuja. Kehitettyjen ratkaisujen kestävyuden vaikutusten seuranta ja arviointi edellyttävät tarkkaa mittaamista ja raportointia.

Kestävyuden mittaamisen ja raportoinnin tärkeys on kasvanut erityisesti vuonna 2024 voimaan tulleiden Euroopan kestävyyttä koskevien raportointistandardien (englanniksi European Sustainability Reporting Standards, ESRS) myötä. Nämä standardit asettavat uusia vaatimuksia sekä yrityksille että julkisille organisaatioille kestävyuden mittaamiselle ja raportoinnille, kuten energiankulutuksen ja ilmanlaadun seuraamiseen ja raportointiin. (Dovolil & Svitek, 2024.) Tässä luvussa käsitellään älykaupungin käsitteen syntyä ja kehitystä, erityisesti korostaen sen teknologisia, sosiaalisia ja taloudellisia näkökulmia. Tämän jälkeen siirrytään tarkastelemaan kestävyuden merkitystä älykaupungissa sekä mahdollisia haasteita ja mahdollisuuksia kestävyuden huomioimisessa.

3.1 Älykaupungin määritelmä ja kehityshistoria

Älykaupunki on kokonaisvaltainen lähestymistapa, johon kuuluvat kaupungin toiminnan suunnittelu ja johtaminen. Tämä lähestymistapa yhdistää tekniset, sosiaaliset, taloudelliset, ympäristölliset ja institutionaaliset näkökulmat kansalaisten elämänlaadun parantamiseksi (Barbieri ym., 2025). Samalla älykaupungin käsite kuvaa ajatusta siitä, kuinka tieto- ja viestintäteknologiat voivat parantaa kaupunkien toimintaa (Camero & Alba, 2019). Molempien ajatusmallien perustana on innovaatioiden hyödyntäminen kestävän kehityksen tavoitteiden saavuttamiseksi, uusien ratkaisujen löytämiseksi ja haasteiden ylittämiseksi.

Yksi älykaupunkien keskeisimmistä tavoitteista on tehdä älykkäitä päätöksiä, jotka edistävät kestävyyttä ja vähentävät ympäristövaikutuksia hyödyntämällä dataa tai kaupunkilaisten osallistumista (Major ym., 2021). Silva, Khan ja Han (2018) tuovat esille laajemman määritelmän, jonka mukaan älykaupungilla tarkoitetaan kaupunkiympäristöä, joka hyödyntää ICT ja muita vastaavia teknologioita kaupungin resurssientehokkuuden ja kaupunkilaisten palveluiden laadun parantamiseksi.

Näin olleen älykaupunkia voidaan hahmottaa kaupunkina, jossa teknologiaa hyödynnetään yhteisten tavoitteiden saavuttamiseksi. Näitä tavoitteita ovat ympäristövaikutusten vähentäminen, kaupunkien toimintojen tehostaminen sekä kaupunkilaisten elämänlaadun parantaminen. (Barbieri ym., 2025; Camero & Alba, 2019; Major ym., 2021; Silva ym., 2018.) Älykaupungin käsitteelle ei ole olemassa yhtä oikeaa tai täysin yhtenäistä määritelmää, sillä älykaupunkikonsepti muovautuu teknologian kehityksen myötä ja uusien kaupunkiympäristöjen kohtaamien haasteiden mukaan.

Ensimmäiset askeleet älykaupunkien kehityksessä sijoittuvat 1950-luvulle, jolloin tietokoneet tulivat markkinoille. Vuonna 1995 CATS-projektissa (englanniksi Chicago Transportation Area Study) kehitettiin ensimmäinen kaupunkimalli. Tämän projektin jälkeen kaupunkimallinnuksen pääpaino siirtyi suunnitteluun sekä poliittisten ja sosiaalisten näkökulmien, kuten liikenteen, maankäytön ja taloudellisen kasvun tukemiseen. Infrastruktuurien kehitys tapahtui kuitenkin myöhemmin eri järjestelmien, kuten tieinfrastruktuurin, vesihuollon, jäteveden käsittelyn ja sähkön siirron ja jakelun järjestelmien kehittyessä. (Ferre-Bigorra ym., 2022.)

Söderström ja Klauser (2014) korostavat, että älykaupunkien käsitteen kehitykseen ovat vaikuttaneet kaksi pääasiallista suuntausta, kuten älykäs kasvukonsepti (englanniksi smart growth) sekä teknologiaan perustuvat älykaupungit. Näiden suuntausten pohjalta on muodostunut käsitys siitä, mitä älykaupungilla tarkoitetaan. Ensimmäiset askeleet otettiin 1990-luvun puolivälissä Australiassa ja Malesiassa toteutettujen pilottihankkeiden myötä. Näissä hankkeissa otettiin käyttöön muun muassa edistynyttä ICT-infrastruktuuria ja automatisoituja järjestelmiä, joiden avulla pyrittiin optimoimaan kaupungin toimintoja ja houkuttelemaan yrityksiä. Hankkeet osoittivat älykaupunkien potentiaalin ja toimivat esikuvana myöhemmille ratkaisuille. (Söderström & Klauser, 2014.) Sharifi ja

muut (2021) puolestaan huomauttavat, että vuonna 1994 Amsterdamissa toteutettiin ensimmäinen merkittävä älykaupunkihanke, jonka tarkoitus oli edistää internetin käyttöä. Tämän jälkeen useat yritykset ovat pyrkineet tarjoamaan omia ratkaisuja digitaalisten infrastruktuurien luomiseksi (Sharifi ym., 2021).

Yllä olevat hankkeet osoittavat, että älykaupunkien kehitys on rakentunut vaiheittain ja yhdistänyt teknologisia ja sosiaalisia näkökulmia. Useimmissa hankkeissa on korostunut erityisesti teknologian, kuten ICT-infrastruktuurin ja internetin, rooli kaupungin kehityksessä (Sharifi ym., 2021; Söderström & Klaus, 2014). Sosiaalisten näkökulmien merkitys, kuten asukkaiden tarpeet, on kuitenkin jäänyt monissa hankkeissa vähemmälle huomiolle, lukuun ottamatta tapauksia, joissa nämä näkökohdat ovat olleet keskiössä (Ferre-Bigorra ym., 2022). Hankkeille yhteistä on ollut yritysten keskeinen rooli innovatiivisten ratkaisujen kehittämisessä ja markkinoille tuomisessa. Yritykset eivät ole ainoastaan edistäneet teknologioiden käyttöä, vaan myös vaikuttaneet merkittävästi älykaupunkikonseptin muotoutumiseen.

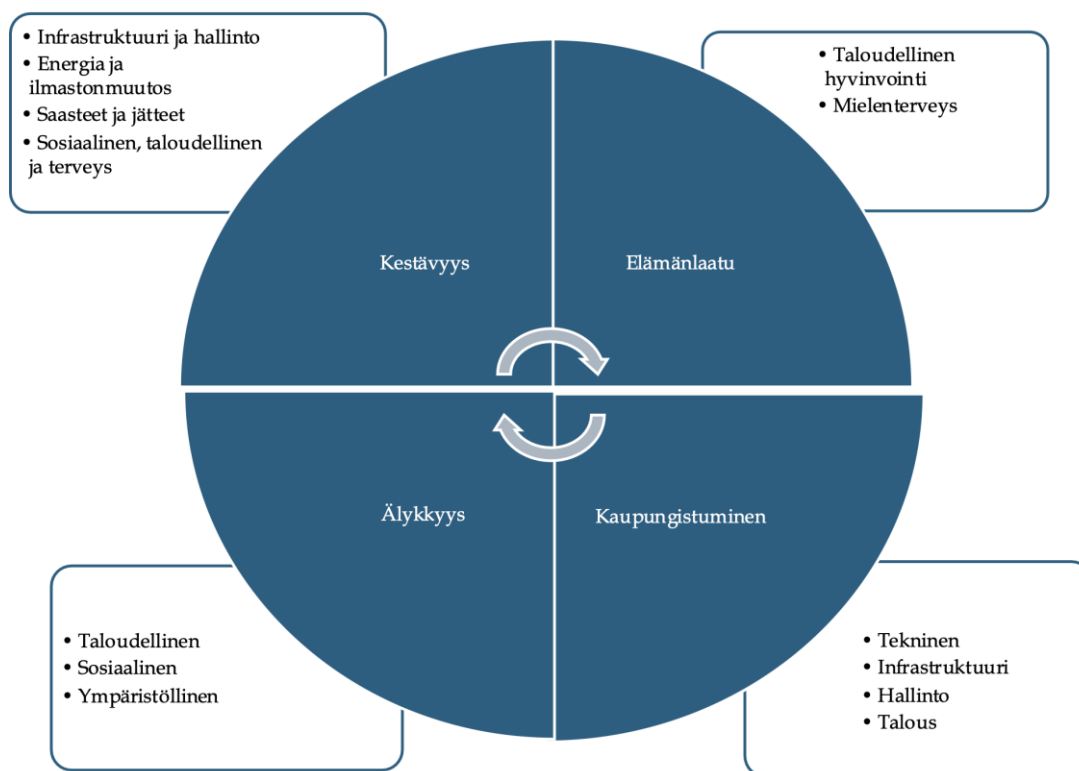
Yksityisen yritysten rooli älykaupunkien kehityksessä korostui erityisesti 2000-luvulla, jolloin IBM käynnisti vuonna 2008 ”Smarter Cities” -kampanjan. Kampanja toi esille, kuinka teknologiset ratkaisut voivat lisätä kaupunkien tehokkuutta ja parantaa asukkaiden elämänlaatua. IBM:n toimitusjohtaja korosti tällöin, että kestävä kehitys ja taloudellisen tehokkuuden saavuttaminen edellyttää, että kaupungeista tulee älykkäitä. (Söderström & Klauser, 2014.) Kampanjan menestys johti siihen, että IBM julkisti seuraavana vuonna 50 miljoonan Yhdysvaltain dollarin kampanjan, jonka tavoitteena oli auttaa kaupungeja saavuttamaan tehokkuutta ja löytämään ratkaisuja olemassa oleviin kaupunkihaasteisiin (Sharifi ym., 2021).

Myöhemmin yritys on asettanut itsensä keskeiseksi toimijaksi älykaupunkien edistämiseksi tarjoamalla konsulttipalveluja kaupungeille ympäri maailmaa, painottaen älykkäiden ratkaisujen välttämättömyyttä tulevaisuuden kaupungeille (Söderström & Klauser, 2014). Vaikka näkökulma on vahvasti yrityslähtöinen, se osoittaa, miten suuryritykset pyrkivät vaikuttamaan kaupunkien kehitykseen ja luomaan itselleen johtavaa markkinaroolia. Toisaalta tässä yhteydessä on syytä ottaa huomioon, että teknologian painottaminen kaupunkien kehityksessä voi liittyä yritysten intressiin tarjota omia palveluita ratkaisuna. Ferre-Bigorra ja muut (2022) ovat havainneet, että 2010-luvulla älykaupunkien konsepti on saavuttanut laajempaa suosiota. Tämän lähestymistavan keskiössä on kaupunginhallinnon ja kansalaisten välinen yhteistyö uusien teknologioiden avulla, pyrkimyksenä luoda turvallisempia, kestävämpiä ja älykkäämpiä kaupungeja.

Nykyään älykkyys nähdään teknologisten ja sosiaalisten rakenteiden yhdistelmänä, jossa sosiaalisiin rakenteisiin kuuluvat muun muassa kansalaisten osallistuminen, tietotalous, sääntely ja tietohallinto (Sharifi ym., 2021). Älykaupunkien kehitys ei enää perustuu ainoastaan teknologisiin ratkaisuihin, vaan edellyttää kaikkien yhteiskunnallisten osa-alueiden yhteistoimintaa. Tämä älykaupunkiajattelu on johtanut uusien käsitteiden syntyyn älykaupungin osana, kuten turvallinen kaupunki tai 15 minuutin kaupunki (Sharifi ym., 2021). Edellä

mainittu 15 minuutin kaupunki viittaa malliin, jossa asukkaiden on mahdollista saavuttaa tarvitsemansa palvelut 15 minuutin kävelymatkan etäisyydellä (Diaz-Sarachaga, 2024). Uudet käsitteet korostavat älykaupungin tavoitetta parantaa kaupunkilaisten elämänlaatua ja sisällyttää kestävä kehityksen näkökulmat osaksi älykaupunkimallia.

Aiemmat älykaupunkimallit ovat kuitenkin suurimmaksi osaksi keskittyneet teknologian hyödyntämiseen, erityisesti sosiaalisten ja taloudellisten tavoitteiden saavuttamisessa, mikä on johtanut ympäristöön liittyvien näkökohtien jäämisen vähäisemmälle huomiolle. (Ahvenniemi ym., 2017). Tämä epätasapaino korostaa tarvetta kokonaisvaltaiselle lähestymistavalle, jossa teknologian, kestävyuden ja kaupunkikehityksen tavoitteet yhdistyvät tasapainoisesti. Uudemmat mallit, kuten Silva ja muiden (2018) esittämä, nostavat kestävyuden keskeiseksi osaksi älykaupunkikonseptia (ks. Kuvio 2). Uusi ehdotettu malli täydentää Ahvenniemen ja muiden (2017) havaintoa teknologian ja kestävyuden välisestä epätasapainosta. Sillä se ei ainoastaan integroi ympäristönäkökulmia osaksi älykaupungin kehitystä, vaan myös määrittää kestävyuden yhdeksi kaupunkisuunnittelun peruspilariksi.



KUVIO 2 Älykaupungin keskeiset piirteet (Silva ym., 2018, s. 699)

Uuden mallin mukaan älykaupunki muodostuu neljästä keskeisestä, mutta toisiaan täydentävästä ulottuvuudesta: kestävyys, kaupunkilaisten elämälaatu, älykkyys ja kaupungistuminen (Silva ym., 2018). Kestävyydellä viitataan infrastruktuuriin ja hallintoon, saasteisiin ja jätteisiin, energiaan ja ilmastomuutokseen sekä sosiaalisiin, taloudellisiin ja terveyteen liittyviin näkökulmiin. Elämänlaadulla tarkoitetaan kaupunkilaisten taloudellista ja henkistä hyvinvointia.

Kaupungistuminen käsittää teknologiset, taloudelliset ja infrastruktuurimuutokset sekä siirtymisen maaseudulta kaupunkiympäristöön. Älykkyydellä viitataan kaupungin pyrkimykseen parantaa sosiaalisia, ympäristöllisiä ja taloudellisia tekijöitä. (Silva ym., 2018.) Jokainen näistä ulottuvuuksista tukee älykaupunkikonseptia ja ottaa huomioon kaupungin keskeisiä osa-alueita. Teknologia puolestaan älykaupunkimallissa toimii keskeisenä välineenä paitsi kaupunkikehityksessä myös kestävyiden ja elämänlaadun tavoitteiden saavuttamisessa.

Edellä mainitut tutkimukset viittaavat siihen, että älykaupunkien konseptin kehitys on ollut monivaiheinen prosessi, johon ovat vaikuttaneet useat eri projektit ja teknologian kehittyminen. Näissä projekteissa teknologia nähdään keskeisessä roolissa kaupungin infrastruktuurin optimoinnissa ja toimintojen parantamisessa. Älykaupunkien tavoitteena on yhdistää teknologia ja yhteiskunta uudella tavalla, jossa integroimalla dataa ja innovatiivisia teknologisia ratkaisuja, voidaan vaikuttaa paitsi kaupunkien toimivuuden parantamiseen myös niiden mukauttamiseen paremmin asukkaiden tarpeisiin. (Major ym., 2021; Söderström & Klauser, 2024.) Uusi malli, joka korostaa älykaupungin neljää pääulottuvuutta, konkretisoi, miten nämä tavoitteet voidaan saavuttaa käytännössä (Silva ym., 2018). Lisäksi älykaupungin konseptin kehitys on vauhdittanut uusien teknologiamarkkinoiden nousua, mikä osoittaa teknologian edelleen keskeisen aseman (Sharifi ym., 2021). Tämä osoittaa, että teknologialla voidaan edistää kestävyttä ja tehokkuutta sekä mahdollisesti parantaa asukkaiden elämänlaatua.

3.2 Kestävyys ja sen merkitys älykaupungissa

Kestävän kehityksen käsite juontaa juurensa 1960-luvun kirjallisuudesta, joka on nopeasti alkanut yhdistää ympäristön, talouden ja sosiaalisen hyvinvoinnin kysymyksiä. Keskeinen ajatus on, että maapallolla on rajallinen kyky ylläpitää ihmiskuntaa, ja väestönkasvu ja resurssien käyttö olivat ja ovat edelleen kestävättömiä. (Rajabifard, 2019, s. 16.) Luonnonvarat, muun muassa vesi, energia ja mineraalit, eivät ole loppumattomia, ja niiden ylikulutus vaarantaa ekosysteemien tasapainoa ja ihmisten tulevaisuutta. Väestönkasvu lisää resurssien kysyntää, mikä korostaa kestävän kehityksen tarpeellisuutta.

Kestävän kehityksen teoreettinen viitekehys muotoutuu erityisesti vuosien 1972 ja 1992 välillä, jolloin useat kansainväliset konferenssit, esimerkiksi Yhdistyneiden Kansakuntien (YK) ympäristökonferenssi Tukholmassa, toivat esiin tarpeen ympäristön suojelemiselle tulevien sukupolvien hyväksi. Vuonna 1987 julkaistu maailman Ympäristö- ja kehityskomission laatima raportti "Our Common Future" toi kestävän kehityksen käsitteen ja sen tarpeen laajempaan tietoisuuteen. Raportti antoi kestäväälle kehitykselle poliittista painoarvoa määrittelemällä kestävän kehityksen, joka vastaa "nykyhetken tarpeisiin vaarantamatta tulevien sukupolvien mahdollisuuksia vastata omiin tarpeisiinsa". (Rajabifard, 2019, s. 16–17.)

Raportin julkaisun jälkeen on järjestetty myös muita merkittäviä kansainvälisiä konferensseja, jotka ovat painottaneet kestävän kehityksen tärkeyttä,

kuten vuonna 2015 Pariisin ilmastosopimus ja vuonna 2022 Kunming-Montrealin luontokokous (Dovolil & Svitek, 2024). Pariisin ilmastosopimus keskittyy ilmastomuutoksen hillitsemiseen ja täydentää vuoden 1992 YK:n sopimusta (Ympäristöministeriö, ei pvm.-b). Montrealin luontokokouksessa oli hyväksytty maailmanlaajuisen luonnon monimuotoisuuskehityksen, joka pyrkii hillitsemään luontokatoa (Ympäristöministeriö, ei pvm.-a).

Kestävä kehitys on yhä keskeisemmässä asemassa tämän päivän yhteiskunnassa, jossa kaupungit ja niiden rakennettu ympäristö ovat muutoksen keskiössä. Kestävyyden merkitys tulee korostumaan entistä enemmän kaupungistumisen vuoksi. Ennusteiden mukaan noin 68 % maailman väestöstä tulee asumaan kaupungeissa vuoteen 2050 mennessä (UN-SDSN, 2019). Kaupungistuminen lisää painetta infrastruktuurille, luonnonvarojen käytölle ja kaupunkien hallinnolle, mikä tekee tarkasta suunnittelusta ja kestävästä ratkaisusta välttämättömiä. Vaikka kaupungit kattavat vain noin 2 % maapallon pinta-alasta, ne kuluttavat arviolta 78 % maailman energiasta ja tuottavat yli 60 % kasvihuonekaasupäästöistä (Dovolil & Svitek, 2024). Nämä luvut korostavat kaupunkien merkittävää osuutta energiankulutuksessa ja hiilijalanjäljen tuottamisessa.

Tämä kehityssuunta edellyttää innovatiivisten teknologisten ratkaisujen hyödyntämistä ja kestävästä kaupunkisuunnittelun priorisointia. Tilastojen perusteella uusiutuvan energian käyttö ja resurssien käytön optimointi ovat keskiössä, ja ne voivat vähentää kaupunkien hiilijalanjälkeä merkittävästi (Chen, Li & Zhu, 2024). Mikäli kestävyystoimia ei oteta laajasti käyttöön, kaupungistumisen vaikutukset voivat kasvaa entisestään. Näin kaupungit ovat keskeisessä roolissa ilmastomuutoksen hillitsemisessä ja kestävästä kehityksen tavoitteiden saavuttamisessa.

Euroopan unioni on ottanut aktiivisen roolin tukemaan tätä kehityssuuntaa asettamalla ympäristötavoitteita ja kehittämällä lainsäädäntöä, joka edistää kestävyystoimia. Euroopan unionin 2020/852 asetuksen 9 artiklan mukaan ympäristötavoitteet kattavat ilmastomuutoksen hillinnän ja siihen sopeutumisen, vesivarojen kestävästä käytön ja suojelun, siirtymisen kiertotalouteen, ympäristön pilaantumisen ehkäisyn sekä biologisen monimuotoisuuden ja ekosysteemien suojelun ja ennallistamisen (Euroopan unionin asetus 2020/852). Lisäksi vuonna 2023 voimaan tulleet kestävyysraportointistandardit (ESRS) velvoittavat suuryrityksiä raportoimaan toiminnoistaan, jotka liittyvät ympäristövastuuseen, yhteiskuntavastuuseen ja hyvään hallintotapaan (ESG, englanniksi Environmental, Social, Governance) (Dovolil & Svitek, 2024).

ESRS kestävästä kehityksen standardit koostuvat ympäristö-, sosiaalisista ja hallintostandardeista, jotka on jaoteltu monialaisiin, aihekohtaisiin ja alakohtaisiin standardeihin. Ympäristöstandardit käsittelevät muun muassa ilmastomuutosta, saastumisen hallintaa, vesivarojen ja meriluonnon suojelua, resurssien käyttöä ja kiertotaloutta. Sosiaaliset standardit puolestaan kattavat työvoiman, arvoketjun työntekijät, loppukäyttäjät ja yhteisöihin kohdistuvat vaikutukset. Hallintopuoleen liittyvä standardi kattaa liiketoiminnan harjoittamisen. (Komission delegoitu asetus 2023/2772.) ESRS-standardien tarkoituksena on tukea kestävyyttä monipuolisesti, huomioiden ympäristön, talouden ja sosiaalisten

näkökulmat. Tämä luo mahdollisuuden jatkokehittää Silva ja muiden (2018) mallia ja laajentaa kestävyysmääritelmää älykaupunkien kontekstissa.

Kaupunkisuunnittelussa kestävyystoimet keskittyvät resurssien hallintaan ja asukkaiden tarpeiden priorisointiin siten, että nykyiset toimet eivät vaaranna tulevien sukupolvien mahdollisuuksia (Barbieri ym., 2025). Tämä lähestymistapa korostaa, että älykaupunkien kestävyys ei rajoitu pelkästään ympäristökysymyksiin, vaan sisältää myös sosiaaliset, taloudelliset ja terveydelliset ulottuvuudet, joissa huomioidaan pitkäkestoinen resurssienhallinta ja asukkaiden hyvinvointi (Barbieri ym., 2025; Silva ym., 2018).

Vaikka ESRS-standardit velvoittavat ensisijaisesti yrityksiä, niiden tuottama ESG-data voi tarjota konkreettista tukea kaupunkien kestävyys tavoitteiden saavuttamisessa. ESG-datan analysointi voi parantaa energiatehokkuutta, edistää ympäristötavoitteiden saavuttamista ja huomioida sosiaalisia näkökulmia, kuten turvallisuuden parantamista. (Dovolil & Svitek, 2024.) Kaupunkien ja yritysten välinen yhteistyö tarjoaa mahdollisuuden tiedon jakamiseen ja uusien kestävien ratkaisujen kehittämiseen. Tämä yhteistyö ei ainoastaan tue Euroopan unionin ympäristötavoitteiden saavuttamista, vaan myös kestävien toimintamallien käyttöönottoa kaupunkiympäristössä. Lisäksi YK:n kestävä kehityksen tavoitteiden (englanniksi Sustainable Development Goals, SDG) viisi avainelementtiä, kuten ihmiset, planeetta, vauraus, rauha sekä kumppanuus, tukevat yhteisöjen, yritysten, hallitusten ja muiden sidosryhmien osallistumista kestäväan kehitykseen älykaupungeissa (Rajabifard, 2019, s. 185–186).

Älykäs kaupunkiuudistus eli urbanismi rakentuu edellä kuvattujen kestävyteen liittyvien tavoitteiden ja periaatteiden varaan. Se hyödyntää massadataa, digitaalisia ratkaisuja ja verkkoteknologioita (Allam ym., 2022). Älykkään kaupunkiuudistuksen tavoitteena ei ole ainoastaan teknologisten ratkaisujen kehittäminen, vaan myös uusien palveluiden tarjoaminen kaupunkilaisille siten, että heidän osallistumisensa päätöksentekoon on keskeisessä roolissa. Tämä lähestymistapa huomioi ihmisten tarpeet sekä hyödyntää teknologian ja tietojenkäsittelytieteen mahdollisuuksia. (Allam ym., 2019; Camero & Alba, 2019.) Näin yhdistyvät kestävä kehityksen tavoitteet ja sosiaaliset näkökulmat, mikä edistää kestävämpiä ja ihmiskeskeisempiä ratkaisuja kaupunkiympäristössä.

Älykaupungin pääulottuvuudet, kuten kestävyys, elämälaatu, kaupungistuminen ja älykkyys, tukevat kaupungin ekosysteemin tasapainoa ja hyvinvointia (Silva ym., 2018). Kaupunkien merkittävä energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt korostavat niiden roolia ilmastonmuutoksen hillitsemisessä ja kestävä kehityksen tavoitteiden saavuttamisessa. ESRS-standardit ja niihin liittyvä ESG-datan raportointi tarjoavat tärkeitä välineitä kaupunkien kestävyys arviointiin ja kehittämiseen erityisesti hiilijalanjäljen pienentämisen ja resurssien käytön optimoinnin näkökulmasta.

Lisäksi YK:n kestävä kehityksen tavoitteet ja älykäs kaupunkiuudistus korostavat eri sidosryhmien osallistumista päätöksentekoon. Näiden yhdistäminen mahdollistaa ihmislähtöisen kehityksen ja kestävien ratkaisujen toteuttamisen. Pitkäjänteinen resurssien hallinta sekä sosiaalisten ja taloudellisten näkökulmien

huomioiminen ovat kestävyuden peruspilareita älykaupungin kontekstissa (Barbieri ym., 2025; Silva ym., 2018).

3.3 Älykaupungin kestävyuden haasteet ja mahdollisuudet

Yrityslähtöinen vaikutus älykaupunkien kehitykseen on kasvussa. Teknologia-markkinoiden laajentuminen, erityisesti esineiden internetin osalta, tarjoaa taloudellista potentiaalia ja tukee samalla kestävyystavoitteita. Tämä kehitys selittää osaltaan kestävien teknologiaratkaisujen yhä laajemman käyttöönoton kaupungin infrastruktuurissa ja palveluissa, kuten energiakäytön optimoinnissa ja resurssien hallinnassa (Mihai ym. 2022; VanDerHorn & Mahadevan, 2021; Ferre-Bigorra ym., 2022). Seuraava taulukko (Taulukko 2) esittää keskeiset haasteet ja mahdollisuudet, jotka vaikuttavat älykaupunkien kestävyystavoitteiden saavuttamiseen älykaupungissa.

TAULUKKO 2 Kestävyystavoitteiden saavuttaminen älykaupungissa

Haasteet	Mahdollisuudet
Teknologian ja ihmislähtöisyyden tasapaino (Söderström ym., 2015; Sharifi ym., 2021; Camero & Alba, 2019)	Euroopan unionin tavoitteet ja 2020/852 asetus tukevat teknologisia innovaatiota (Komission delegoitu asetus 2023/2772, Reynoso Vanderhorst ym., 2024)
Yhteentoimivuuden ja standardien puute (Reynoso Vanderhorst ym., 2024; Mihai ym., 2022)	Kustannussäästöt energiatehokkuuden parantuksessa (Silva ym., 2018; Sharifi ym., 2021)
Taloudelliset kustannukset (Silva ym., 2018)	Uusiutuvan energian käyttö: energiatehokkuus ja riippuvuuden vähentäminen (Chen ym., 2024)
Tietoturvariskit ja kyberuhat (Silva ym., 2018; Reynoso Vanderhorst ym., 2024)	Yksityisen ja julkisen sektorin kumppanuuDET: pitkäaikaiset ratkaisut (Xu & Xu, 2024)
Resurssien ylikulutus ja ilmansaasteet (Silva ym., 2018; Sharifi ym., 2021)	Päästöjen hillitseminen ja ympäristösuojelun vahvistaminen (Silva ym., 2018; Sharifi ym., 2021)

Liiallinen keskittyminen teknologisiin ratkaisuihin voi kuitenkin vähentää kaupunkien ihmisystävällisyyttä, jolloin pääpaino siirtyy taloudellisiin etuihin ja asukkaiden tarpeet jäävät vähemmälle huomiolle. Liiallinen teknologian käyttö saattaa myös rajoittaa kaupunkilaisten käyttäytymistä ja autonomian tunnetta (Söderström ym., 2015). Yritysten taloudellisen kasvun tavoitteet ja markkinoiden paine voivat ohjata yritysten toimintaa keskittymään omien palvelujen tarjoamiseen ja kilpailukyvyn säilyttämiseen (Sharifi ym., 2021; Söderström & Klaus, 2014). Älykaupunkien kehityksessä on keskeistä löytää tasapaino teknologisten ratkaisujen hyödyntämisen ja inhimillisten tarpeiden huomioimisen välillä. Teknologia voi edistää kestävyystavoitteita ja taloudellista kehitystä, mutta sen rinnalla on varmistettava, että kaupunkien suunnittelu ja päätöksenteko pysyvät ihmislähtöisinä. Kestävien ratkaisujen toteuttaminen edellyttää asukkaiden

itsenäisen päätöksenteon tukemista ja heidän tarpeidensa integroimista kehitysprosesseihin (Sharifi ym., 2021; Camero & Alba, 2019).

Vaikka ihmislähtöisyys ja teknologian hyödyntäminen ovat tärkeitä tekijöitä älykaupunkien kehityksessä, kansainvälisten standardien puute tekee lähestymistapojen yhtenäistämistä haasteellista. UN-Habitat on ottanut aktiivisen roolin näiden tarpeiden tukemisessa. (Sharifi ym., 2021.) UN-Habitat on YK:n asuinyhdyskuntaohjelma, joka tukee kestävästä kaupunkikehityksestä sosiaalisesta, taloudellisesta ja ympäristön näkökulmasta (Ympäristöministeriö, ei pvm.-c).

UN-Habitat tavoitteena on laatia vuoteen 2025 mennessä kansainväliset ohjeet, jotka tukevat ihmiskeskeisiä älykaupunkiratkaisuja (UN-Habitat, 2024). Tavoitteena on yhdistää teknologian potentiaali ja ihmislähtöisyyden niin, että kaupunkien kehitys vastaa sekä tehokkuus- että kestävyystavoitteita. Kansainväliset standardit voivat tarjota yhteisen viitekehyksen, joka edistää kestävien ratkaisujen käyttöönottoa ja kaupunkien välistä yhteistyötä kestävyys tavoitteiden saavuttamiseksi.

Teknologian hyödyntämisen ja sen yhdistäminen kestävyystavoitteiden saavuttamiseen korostaa tarvetta yhtenäisyydelle, erityisesti yhteentoimivuuden varmistamisen osalta. Standardien, protokollinen ja strategioiden yhdenmukaisuus on välttämätöntä, jotta uusien teknologioiden potentiaalia voidaan hyödyntää täysimääräisesti (Reynoso Vanderhorst ym., 2024; Mihai ym. 2022). Yhteentoimivuuden saavuttaminen voi tuoda mukanaan merkittäviä hyötyjä, mutta se vaatii pitkän aikavälin teknologista kehitystyötä. Standardien avulla voidaan luoda yhteinen näkemys eri sidosryhmien välillä, mikä parantaa resurssien tehokkuutta ja laadunvarmistusta.

Yhteentoimivuus tukee taloudellista kasvua luomalla tasavertaiset kilpailuedellytykset, mikä puolestaan edistää innovointia ja lisää asiantuntijoiden määrää. Erityisesti datan hyödyntämisen osalta yhteentoimivuuden varmistaminen sekä kansallisella että kansainvälisellä tasolla voi tuoda merkittäviä yhteiskunnallisia hyötyjä, kuten päätöksenteon laadun parantamista. Vaikka yhteentoimivuuden varmistaminen tuo monia etuja yhteiskunnalle ja älykaupungille, siihen liittyvät teknologiset järjestelmät tuovat esiin taloudellisia ja tietoturvariskejä. Tietoturvariskien tiedostaminen ja hallinta on kriittistä tietoturvallisuuden kannalta.

Kustannuksia aiheuttavat tiedonkeruun ja analyysin tarve sekä tietotuvan varmistaminen. Vaikka teknologiset ratkaisut tarjoavat mahdollisuuksia kaupungin mukauttamiseen asukkaiden ja yritysten tarpeisiin, ne altistavat samalla kaupungeja kyberhyökkäyksille. (Silva ym., 2018.) Erityisesti kriittisten infrastruktuurien sisältämä data voi olla herkkää, mikä lisää tarvetta tietoturvan varmistamiselle ja kyberuhkien hallinnalle (Silva ym., 2018; Reynoso Vanderhorst ym., 2024). Samalla tietoturvatoimet voivat luoda haasteita yhteentoimivuuden kehittämiseksi, mikä edellyttää tasapainottelua eri tavoitteiden välillä.

Vaikka teknologian kehitys edellyttää taloudellisia panostuksia ja herättää kysymyksiä tietoturvasta, se luo samalla mahdollisuuksia kustannussäästöihin ja kestävyys edistämiseen. Kaupungistuminen myötä saasteiden ja resurssien kulutuksen kasvu korostaa tarvetta siirtyä uusiutuvan energian käyttöön. Tämä

on olennaista kaupunkiympäristön ja sen resurssien säilyttämiseksi tuleville sukupolville, minimoiden hiilijalanjälki ja tehostaen resurssien käyttöä. (Silva ym., 2018; Sharifi ym., 2021.) Lisäksi uusiutuvan energian käyttö vähentää kaupunkien riippuvuutta fossiilisista polttoaineista, mikä lisää energiavarmuutta ja vähentää riskejä, kuten kyberhyökkäysten vaikutuksia kriittiseen infrastruktuuriin sekä muita häiriöitä (Chen ym., 2024).

Älykaupungit voivat hyödyntää digitaalisia ratkaisuja energiatehokkuuden optimoimiseksi, päästöjen hillitsemiseksi ja ympäristötavoitteiden edistämiseksi, mikä myös tuo mukanaan taloudellisia hyötyjä ja säästöjä. Kuten aiemmin mainittiin, uusien teknologisten ratkaisujen käyttöönotto edellyttää investointeja. Kaupungistumisen tuomat haasteet voidaan kuitenkin nähdä myös mahdollisuutena houkutellessa yksityisen ja julkisen sektorin kumppanuuksia (Xu & Xu, 2024). Tällaiset kumppanuudet voivat vahvistaa kestävyystavoitteiden toteutumista älykaupungeissa ja edistää pitkäaikaisia ratkaisuja. Sijoittajien kiinnostuksen herättäminen voi helpottaa eri organisaatioiden välistä yhteistyötä ja mahdollistaa resurssien tehokkaan jakamisen.

Euroopan unionin asetus 2020/852, erityisesti sen artikla 10, sekä kestävyysraportointistandardit (ESRS) tukevat uusiutuvan energian, materiaalien ja muiden resurssien tehokasta käyttöä hyödyttämällä teknologisesti innovatiivisia ratkaisuja (Komission delegoitu asetus 2023/2772; Reynoso Vanderhorst ym., 2024). Asetetut vaatimukset energiankäytöstä ja ympäristövaikutusten vähentämisestä ovat linjassa älykaupunkien kestävyyspyrkimysten kanssa. Ahvenniemi ja muut (2017) korostavat, että kestävyiden ja teknologian yhdistelmä on olennainen tekijä älykaupunkien kestävä kehityksen edistämässä. Teknologiset ratkaisut voivat tukea energiankulutuksen optimointia, kiertotaloutta ja luonnonvarojen säilyttämistä. Erityisesti kun otetaan huomioon Euroopan unionin asettamat tavoitteet CO₂ -päästöjen vähentämiseen ja energiatehokkuuden kasvattamiseen vuoteen 2030 mennessä (Ahvenniemi ym., 2017).

Haasteet, kuten tietoturvariskit, yhteentoimivuudet puutteet ja taloudelliset kustannukset, asettavat esteitä älykaupunkien kehitykselle ja teknologian käyttöönotolle. Samalla kaupungistumisen myötä kasvavat ympäristöhaasteet, kuten ilmaston saastuminen ja resurssien ylikulutus, ovat herättäneet kansainvälistä huomiota. Euroopan unionin aloitteet, muun muassa asetus 2020/852, asettamat tavoitteet ja kestävyysraportointistandardit, toimivat kannustimina kaupunkien kestävyyspyrkimyksille, luovat perustan organisaatioiden väliselle yhteistyölle sekä edistävät innovatiivisten ratkaisujen kehitystä. Tämä kehitys vahvistaa älykaupunkikonseptia, jossa yhdistyvät kestävä kehityksen periaatteet, teknologiset innovaatiot ja ihmislähtöiset ratkaisut.

4 DIGITAALISET KAKSOSET KESTÄVYYDEN EDISTÄMISESSÄ

Älykaupungin neljä keskeistä ulottuvuutta, älykkyys, kaupunkilaisten elämänlaatu ja kaupungistuminen, muodostavat älykaupungin teoreettisen viitekehyyksen, jonka kautta digitaalisten kaksosten roolia voidaan tarkastella. Kestävyys pidetään näistä ulottuvuuksista keskeisenä, sillä kaupungit ovat merkittäviä resurssien kuluttajia ja kasvihuonepäästöjen tuottajia. (Silva ym., 2018; Dovolil & Svitek, 2024.) Lisäksi Euroopan unionin tasolla kestävyysraportointistandardit, ympäristötavoitteet ja SDG-tavoitteet lisäävät kestävyydelle merkitystä ja asettavat paineita teknologian käyttöönotolle kaupungistumisen haasteiden ratkaisemiseksi (Euroopan unionin asetus 2020/852; Komission delegoitu asetus 2023/2772; Ahvenniemi ym., 2017; Dovolil & Svitek, 2024). Digitaaliset kaksoset tarjoavat ratkaisuja näihin haasteisiin, erityisesti energiakulutuksen optimoinnissa ja resurssitehokkuuden kaupunkisuunnittelussa. Näin ollen ne voivat toimia keskeisenä työkaluna kestävyuden edistämiseksi. Seuraavassa luvussa tarkastellaan tarkemmin, miten digitaaliset kaksoset tukevat kestävyuden edistämistä älykaupungeissa ja mitkä haasteet tässä yhteydessä esiintyy.

4.1 Digitaalinen kaksonen kestävien ratkaisujen mahdollistajana

Digitaalisten kaksosten merkitys älykaupungissa perustuu kykyyn yhdistää ja hyödyntää eri lähteistä kerättyä dataa kaupunkiympäristöstä ja eri sektoreista, kuten infrastruktuurista, liikenteestä ja energiankäytöstä (Ferre-Bigorra ym., 2022; Diaz-Sarachaga, 2024; Mihai ym., 2022). Kerätty data säilyy digitaalisella kaksosella myös fyysisen ympäristön olosuhteiden muuttuessa, mikä mahdollistaa pitkäaikaisen seurannan ja reaaliaikaisen päätöksenteon. Lisäksi pilvipalvelut tarjoavat laskentatehokkuutta ja toimivat alustana kerätyn tiedon analysoinnille, mikä tehostaa resurssien käyttöä ja tiedon hyödyntämistä osana päätöksentekoa älykaupungin eri sovellusalueilla (Mihai ym., 2022; Ersan ym., 2024).

Käytännön sovelluksissa digitaaliset kaksoset ovat osoittaneet potentiaalia kaupunkien suunnittelussa ja kestävyuden edistämässä. Kalasataman projektissa digitaaliset kaksoset mahdollistivat tuulisimulaatiot, joiden avulla analysoitiin rakennusten ja katualueiden ilmapvirtauksia sekä ilmapaineen vaikutuksia. Simulaatiot tuottivat tarkkaa numeerista dataa, kuten tuulen nopeuksia ja paineeroja, sekä visuaalisia 3D-animaatioita paitsi alueellisella tasolla myös yksittäisten katujen ja rakennusten osalta, mikä tuki paitsi päätöksentekoa myös mikroilmaston hallintaa. (KIRA-digi, 2019.) Tämä osoittaa digitaalisten kaksosten kyvyn simuloida ja optimoida ympäristötekijöitä, mikä tukee teoriassa esitettyjä väitteitä niiden merkittävästä roolista suunnittelussa ja päätöksenteossa (VanDerHorn & Mahadevan, 2021; Grieves & Vickers, 2022; Mihai ym., 2022, Ersan ym., 2024).

Toinen merkittävä tapaustutkimus on Kattohukka-projekti, jossa hyödynnettiin digitaalisia kaksosia rakennusten lämpöhäviöiden visualisointiin ja energiakulutuksen analysointiin. Digitaalisten kaksosten avulla tarjottiin konkreettista tietoa rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi, ottamalla huomioon rakennusmateriaalit ja lämmöneristysratkaisut. (Ruohomäki ym., 2018.) Hanke mahdollisti myös datan jakamisen kiinteistöomistajien ja yritysten kesken, mikä edistää osallisuutta ja luo pohjaa laajemmalle energiatehokkuusratkaisulle. Tämä korostaa digitaalisten kaksosten kykyä toimia osallisuuden välineenä, parantaen vuorovaikutusta eri käyttäjäryhmien ja sidosryhmien välillä (Diaz-Sarachaga, 2025; Allam ym., 2022).

Molemmat hankkeet Kalasatama ja Kattohukka ovat osoittaneet digitaalisten kaksosten roolia kestävyuden edistämässä älykaupungissa. Molemmissa tapauksissa digitaalisten kaksosten avulla analysoitiin ympäristötekijöitä ja tuettiin tietopohjaista päätöksentekoa, korostamalla niiden hyötyjä kestävyuden edistämässä. Lisäksi digitaalisten kaksosten soveltuvuus päätöksenteon tukena on vahvistettu niiden integroinnilla muihin uusiin teknologioihin, muun muassa koneoppimiseen. O'Dwyer ja muut (2020) avaa digitaalisten kaksosten sovellusmahdollisuudet uusiutuvan energian mahdollisuuksien analysoinnissa.

Uusiutuvan energian käyttö on strategisesti kriittistä, sillä se vähentää riippuvuutta perinteisistä energialähteistä ja varmistaa resurssien kestäväää käyttöä (Chen ym., 2024; Silva ym., 2018; Sharifi ym., 2021). Huomionarvoista on se, että digitaalisten kaksosten hyöty on saavutettu Lontoossa paitsi energiankäytön optimoinnissa, myös uusiutuvien energialähteiden integroinnissa osaksi energiahallintajärjestelmää. Teknologian tehokkuutta ja hyötyjä on tehostettu koneoppimis pohjaisten algoritmien avulla, jotka mahdollistavat energiankulutuksen, -tuotannon sekä hintojen kehityksen ennusteiden laatimista. (O'Dwyer ym., 2020.) Tapaustutkimus vahvistaa aiemmissä luvussa tehdyt havainnot digitaalisten kaksosten roolin ja sovellusalueiden laajentumisesta uusien teknologioiden nousun myötä.

Energiakulutuksen ja -tuotannon ennustamisessa digitaalisten kaksosten hyöty on todettu myös liikenteenhallinnassa parantamalla sekä käyttäjäkokeudesta että vähentämällä kustannuksia (El-Agamy ym., 2024). Nämä esimerkit havainnollistavat ja vahvistavat digitaalisten kaksosten monipuolisia

sovellusmahdollisuuksia älykaupunkien kehittämisessä. Erityisesti kaupungin tieliikenteen hahmottaminen digitaalisten kaksosten avulla korostaa niiden merkitystä osana älykästä hallintoa ja tukee parempaa päätöksentekoa (Sharifi ym., 2021; Camero & Alba 2019). Kaupungin liikkumisdatan hyödyntämällä voidaan varmistaa kaupunkisuunnittelussa ihmislähtöisiä ja toimivia ratkaisuja sekä vähentää liikenteen ympäristövaikutuksia, kuten ilmansaasteita.

Vaikka datan hajautuminen eri organisaatioihin ja alueisiin on suuri haaste tehokkaalle päätöksenteolle (Grieves & Vickers, 2022), digitaalisten kaksosten kyky integroida tietoa voi tarjota siihen ratkaisun. Kalastaman ja Kattohukan projektit osoittavat, miten digitaaliset kaksoset voivat parantaa energiatehokkuutta, optimoida resurssien käyttöä ja edistää kestäviä ratkaisuja. Esineiden internetin avulla digitaaliset kaksoset voivat hyödyntää antureita ja sensoreita saamaan tarkkaa tietoa ympäristöstä, mutta myös jakaa sitä tietoa muille sidosryhmille (Mihai ym., 2022; Ferre-Bigorra ym., 2022; Ruohomäki ym., 2018). Tämä edistää yhteistyötä, osallisuutta, resurssien tehokkaampaa käyttöä ja myös parantaa sidosryhmien välistä vuorovaikutusta (VanDerHorn & Mahadevan, 2021; Allam ym., 2022; Diaz-Sarachaga, 2025). Näin ollen digitaaliset kaksoset eivät ainoastaan tue kestäväen kehityksen tavoitteita sosiaalisesta, taloudellisesta ja ympäristöllisestä näkökulmasta, vaan myös edistävät osallistuvampaa ja tietoon perustuvaa kaupunkisuunnittelua. Tämä korostaa digitaalisten kaksosten monipuolisuutta työkaluna älykaupungin kestävyystavoitteiden edistämässä ja ihmislähtöisessä suunnittelussa.

Edellisissä luvuissa on käsitelty digitaalisten kaksosten potentiaalia, erityisesti niiden kykyä integroida muita teknologioita. Havaintojen perusteella voidaan päätellä, että metaversumi edustaa uutta teknologia, joka yhdistyy digitaalisiin kaksosiin ja tarjoaa teknisen alustan asukkaiden osallistumiselle kaupunkisuunnitteluun. Metaversumin tarjoamat uudet vuorovaikutustavat, jotka yhdistävät fyysisen ja virtuaalisen maailman, mahdollistavat kaupunkilaisten osallistumisen infrastruktuurin kehittämiseen ja päätöksentekoon jo suunnitteluvaiheessa (Diaz-Sarachaga, 2024; Allam ym., 2022). Tästä voidaan päätellä, että digitaalisten kaksosten ja metaversumin yhdistelmä voi edistää sosiaalista kestävyttä tarjoamalla kaupunkisuunnittelulle uusia tiedonkeruun ja osallistamisen keinoja. Kalastaman kaltaiset projektit kaupungissa voidaan visualisoida hyödyntäen digitaalisia kaksosia ja metaversumia, tarjoamalla kaupunkilaisille tietoa suunnitteluprosessista ja mahdollisuuden osallistua päätöksentekoon.

Digitaalisten kaksosten soveltaminen metaversumissa voi myös merkittävästi tukea kestävyystavoitteiden saavuttamista älykaupungeissa, kuten resurssien käytön optimoinnissa ja hiilijalanjäljen hallinnassa. Tämä on mahdollista hyödyntämällä digitaalisten kaksosten kykyä visualisoida kaupunkeja ja rakenteita metaversumissa sekä tehostamalla energiatuotannon ja liikenteen prosesseja (Lv, Shanf & Guizani, 2022; Allam ym., 2022).

Rikastamalla digitaalisten kaksosten ainestoa datalla eri lähteistä ja tehostamalla niiden toimintaa teknologialla, kuten koneoppimisella ja esineiden internet-ratkaisuilla, voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä päätöksenteossa ja laajentaa niiden soveltuvuusmahdollisuuksia kestävyysedistämässä (El-Agamy

ym., 2024; Mihai ym., 2022; Ersan ym., 2024). Digitaaliset kaksoset mahdollistavat tietoisemman päätöksenteon ja optimoivat suunnittelua, toimintaa, rahoitusta sekä strategista suunnittelua (El-Agamy ym., 2024). Lisäksi digitaalisten kaksosten integrointi kaupunkien käyttöjärjestelmiin edistävät turvallisempaa ja tehokkaampaa kaupunkitoimintaa. Vaikka suoraa linkitystä terveyteen ei ole mainittu, voidaan päätätä, että ilmaasaasteiden vähentäminen, turvallisuuden parantaminen vähentämällä riippuvuutta perinteisistä energialähteistä sekä osallistuvalla lähestymistavalla on ilmeistä. Alla oleva taulukko 3 esittää yhteenvedon digitaalisten kaksosten hyödyntämisestä älykaupungin kestävyuden eri ulottuvuuksilla, mukaan lukien ympäristölliset, sosiaaliset ja taloudelliset näkökulmat.

TAULUKKO 3 Digitaalisten kaksosten rooli kestävyuden edistämisessä

Sovellusalueet	Ympäristöllinen	Sosiaalinen	Taloudellinen
Kalasadama, tuulisi-mulaatit	Mikroilmaston hallinta resurssien optimointi	Ihmislähtöinen suunnittelu	Resurssien optimointi ja energiatehokkuus
Kattohukka, lämpöhäviöt	Energiakulutuksen ja hiilijalanjäljen vähentäminen	Sidosryhmien osallistuminen ja vuorovaikutuksen vahvistaminen	Energiatehokkuusratkaisut
Lontoon tapaustutkimus, uusiutuva energia	Uusituvan energian integrointi energiakäytön optimointi hiilidioksidipäästöjen vähentäminen Riippuvuuden vähentäminen fossiilista energialähteistä	Elämälaadun parantaminen ja turvallisuus	Hintojen ennustaminen, energiatehokkuus
Liikenteen hallinta	Päästöjen ja liikenteen saasteiden hallinta	Ihmislähtöiset ratkaisut kaupunkisuunnittelussa	Kustannussäästöt liikenteen optimoinnilla
Metaversumi		Kansalaisosallistuminen ja osallistuva kaupunkisuunnittelu	Resurssien ja suunnitteluprosessien optimointi

Voidaan vahvistaa, että älykaupungin kontekstissa digitaaliset kaksoset voidaan hyödyntää laajasti tukemaan kestävyyttä ja kaupunkisuunnittelua, edistämällä pitkän aikavälin kestävä kehityksen tavoitteita (El-Agamy ym., 2024). Digitaaliset kaksoset eivät ainoastaan tue ympäristöön ja energiakäyttöön liittyviä tavoitteita, vaan myös mahdollistavat ihmislähtöisen suunnittelun, taloudellisten hyötyjen saavuttamisen ja yhteisön osallisuuden lisäämisen. Voidaankin päätellä, että digitaalisten kaksosten rooli kestävyuden edistämisessä laajenee perinteisen kestävyuden määritelmän ulkopuolelle, kattaen myös sosiaaliset, taloudelliset ja terveydelliset ulottuvuudet (Barbieri ym., 2025; Silva ym., 2018). Näin ollen

digitaaliset kaksokset voivat toimia myös keskeisenä työkaluna älykaupungin ulottuvuuksien, kuten älykkyyden, kaupungistumisen, elämänlaadun ja kestävyuden, vahvistamisessa. Muutokset ja vaikutukset yhdessä ulottuvuudessa, kuten ympäristöllisissä ratkaisuisissa, voivat heijastua suoraan muihin ulottuvuuksiin, muun muassa taloudellisiin ja sosiaalisiin hyötyihin.

4.2 Kestävyyden seuranta digitaalisten kaksosten avulla

Edellisessä aluvussa 4.1 tarkasteltiin digitaalisten kaksosten roolia kestävien ratkaisujen edistämisessä. Tässä luvussa käsitellään digitaalisten kaksosten roolia kestävyuden mittaamisessa ja seurannassa, erityisesti ESRS-standardien ja SDG-tavoitteiden näkökulmasta. Kestävyysraportointia voidaan tukea teknologisilla ratkaisuilla ja digitaaliset kaksokset voivat avata uusia tapoja tehdä raportoinnista tehokkaampaa ja tarkempaa.

Digitaaliset kaksokset voivat tukea ESRS-standardien mukaista raportointia, kuten ilmastonmuutoksen (ESRS-E1), saastumisen (ESRS-E2) sekä resurssien käytön ja kiertotalouden (ESRS-E5) osalta, seuraamalla ja mittaamalla yritysten toiminnan ympäristövaikutuksia (Dovolil & Svitek, 2024). Vaikka raportointivoitteet kohdistuvat ensisijaisesti suuryrityksiin, organisaatioiden tuottama tieto tukee tiedonhallintaa ja älykästä päätöksentekoa. Yritysten kestävyuden mittaamiseen liittyvien datalähteiden yhdistäminen kaupunkien keräämään ympäristötietoon, voi tarjota uusia ratkaisuja kestävä kehityksen haasteisiin. (Diaz-Sarachaga, 2025; Dovolil & Svitek, 2024; Barbieri ym., 2025). Tällainen datan yhdistäminen ja integrointi analysointia varten voi tuottaa uusia ratkaisuja ja ennusteita energiatehokkuuteen parantamiseen ja resurssien käytön optimointiin.

Lisäksi digitaalisilla kaksosilla voidaan edistää SDG-tavoitteiden saavuttamista ajantasaisen raportoinnin avulla ja hyödyntämällä reaaliaikaisia tilannepäivityksiä. Niiden avulla voidaan mitata ja analysoida muun muassa energian käyttöä (SDG7), ilmastotoimien tehokkuutta (SDG13) sekä kestävien resurssien käyttö- ja tuotantotapoja (SDG12), mikä edistää kestävästä kaupungistumisesta (SDG11) (Dovolil & Svitek, 2024; Barbieri ym., 2025). Digitaalisten kaksosten ja SDG-raportoinnin yhdistäminen voi lisätä raportoinnin tarkkuutta ja entistä parempaa resurssien kohdentamista, kuten ilmastotoimien tai energian käytön optimointiin.

Digitaalisten kaksosten potentiaali ulottuu myös ennaltaehkäisevään ympäristövaikutusten tunnistamiseen, kuten ilmansaasteiden varhaiseen havaitsemiseen (Ersan ym., 2024). Ilmastonmuutos on yksi keskeisimmistä ympäristöllisistä haasteista, jonka torjunta tuetaan myös Euroopan unionin tasolla, esimerkiksi rahoittamalla innovaatio- ja infrastruktuurihankkeita (Euroopan unionin asetus 2020/852). Norjan Ålesundin tapaustutkimus osoittaa, miten digitaalisten kaksosten avulla voidaan analysoida suuria määriä monipuolista dataa, kuten ilmanlaatu- ja liikennetietoja kaupungissa, ja tunnistaa datan muuttujien välisiä riippuvuuksia ja trendejä (Major ym., 2021).

Digitaalisten kaksosten merkitys kestävyiden seurannassa on tukittu tois-
taiseksi vähän ja aiemmissa tutkimuksissa on keskitytty pääasiassa tiettyjen on-
gelmin tai osa-alueiden, kuten ilmanlaadun hallinnan tai energiatehokkuuteen,
ratkaisemiseen. Digitaalisten kaksosten kyky yhdistää eri lähteistä kerättyä dataa,
kuten yritysten tuottamia ympäristövaikutustietoja ja kaupunkien reaaliaikaista
ympäristödataa, voi luoda kokonaisvaltaisemman kuvan kestävyiden tilasta ja
kehitystarpeista (El-Agamy ym., 2024; Dovolil & Svitek, 2024). Norjan tapaustut-
kimuksen perusteella voidaan todeta, miten digitaaliset kaksokset pystyvät onnis-
tuneesti sopeutumaan ja hyödyntämään data jatkuvasti muuttuvasta ympäristö-
olosuhteista (Major ym., 2021). Tämän perusteella voidaan todeta digitaalisten
kaksosten soveltavuutta ESRS- ja SDG-raportoinnissa ja niiden kyvystä analy-
soida jatkuvasti muuttuvaa dataa.

4.3 Rajoitteet digitaalisten kaksosten hyödyntämisessä

Digitaalisten kaksosten hyödyntämistä kestävyystavoitteiden saavuttamisessa
rajoittavat usein tekniset, sosiotekniset ja organisaatioista johtuvat haasteet. Näi-
hin kuuluvat erityisesti yksityisyyden suojaan liittyvät kysymykset sekä niiden
vaikutukset kaupunkilaisten elämään. Teknologioiden, kuten tekoälyn, esinei-
den internetin ja koneoppimisen, yhteensovittaminen herättää myös sosiaalisia
ja eettisiä huolia, erityisesti ihmisten ja teknologian vuorovaikutuksen sekä yksi-
tyisyyden ja tekoälyn tietoisuuden rajojen osalta. (Reynoso Vanderhorst ym.,
2024; Sharifi ym., 2021; Silva ym., 2018.) Näiden lisäksi kulttuuriset esteet, kuten
nykyisten toimintamallien ja ajattelutapojen muutosvastarinta, voivat hidasta di-
gitaalisten kaksosten käyttöönottoa (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Tekno-
logian kehitys etenee kuitenkin nopeasti ja metaversumin kaltaiset uudet ratkai-
sut laajentavat digitaalisten kaksosten mahdollisuuksia kaupunkisuunnittelussa
ja kestävyystavoitteiden saavuttamisessa (Reynoso Vanderhorst ym., 2024; Lv
ym., 2022; Allam ym., 2022).

Organisatoriset ja teknologiset rajoitteet ovat myös merkittäviä. Digitaalis-
ten kaksosten täyden hyödyn saavuttamiseksi tarvitaan dataa useista eri lähteistä
ja organisaatioista kaupungin sisällä. Datan jakaminen sidosryhmien kesken voi
kuitenkin olla haastavaa johtuen yritysten keskinäisestä kilpailusta tai datan
omistajuuteen liittyvistä epäselvyyksistä (Ferre-Bigorra ym., 2022). Toisaalta ta-
paustutkimukset, kuten Norjassa toteutettu Ålesundin tutkimus tai Lontoossa,
ovat osoittaneet, että datan jakaminen eri toimijoiden välillä on mahdollista ja
sen käytännöt ovat vähitellen kehittymässä (Major ym., 2021; O'Dwyer ym.,
2020).

Taloudelliset rajoitteet voivat hidastaa teknologian käyttöönottoa, sillä di-
gitaalisten kaksosten kehittäminen ja integrointi muihin teknologioihin voi ai-
heuttaa merkittäviä kustannuksia. Esimerkiksi reaaliaikaisen tiedonkeruun mah-
dollistavien antureiden ja sensoreiden käyttöönottokustannukset voivat olla
huomattavia (El-Agamy ym., 2024; Mihai ym., 2022). Kustannuksista huolimatta
digitaalisten kaksosten kehitys jatkuu aktiivisesti eri puolilla Eurooppaa, mikä

korostaa niiden potentiaalia kestävyystavoitteiden saavuttamisessa (Ferre-Bigora ym., 2022). Erityisesti niiden soveltaminen energiakustannusten optimoinnin osoittaa, että teknologiasta saatavat hyödyt ylittävät selvästi sen rajoitteita.

Yleisesti ottaen teknologian yhteensovittamisen haasteet ovat ratkaistavissa jatkuvan tutkimuksen, kehityksen ja yhteistyön kautta. Digitaalisten kaksosten vastuullinen kehittäminen edellyttää kuitenkin eettisten ja inhimillisten periaatteiden noudattamista, joiden avulla voidaan varmistaa teknologian hyväksyttävyyden yhteiskunnassa. On tärkeä huomata, että digitaalisten kaksosten data ei perustu henkilökohtaisen tietojen keräämiseen, vaan tietoa hyödynnetään kaupunkien ja kaupunkilaisten hyödyksi (Ruohomäki ym., 2018).

5 YHTEENVETO

Kaupungistumisen haasteet, kuten resurssien ylikulutus, ympäristön saastuminen, liikenteen ruuhkauttaminen ja lisääntynyt tarve palveluille, ovat korostaneet kestävän kehityksen ja älykaupunkien merkitystä. Ennusteiden mukaan yli puolet maailman väestöstä asuu kaupunkialueilla vuoteen 2050 mennessä. Kaupungit kuluttavat huomattavan määrän luonnonvaroja ja tuottavat merkittävän osan kasvihuonepäästöistä. Näiden haasteiden ratkaisemiseksi tarvitaan kestäviä ratkaisuja, joissa yhdistyvät teknologia ja älykkäät päätökset.

Digitaaliset kaksoset ovat nousseet keskeiseen rooliin älykaupunkien kehittämisessä. Aiemmissä tutkimuksissa on painotettu digitaalisten kaksosten potentiaalia älykaupungissa, mutta niiden tarkempi linkitys kestävän kehityksen tavoitteisiin on kuitenkin jäänyt vähäiseksi. Tutkielmassa on selvitetty digitaalisten kaksosten roolia kestävän kehityksen tukemisessa älykaupungeissa ja soveltamismahdollisuuksia kaupunkiympäristössä. Sen lisäksi kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltiin digitaalisten kaksosten yhteyttä muihin teknologioihin. Tutkimuskysymys oli *”Kuinka digitaalisia kaksosia voidaan hyödyntää kestävän kehityksen edistämässä älykaupungeissa?”*.

Tulokset ovat osoittaneet, että digitaalisia kaksosia hyödynnetään monipuolisesti älykaupungin eri osa-alueilla päätöksenteon tukena ja kestävän kehityksen edistämässä. Useat hankkeet ja tapaustutkimukset ovat osoittaneet digitaalisten kaksosten laajan potentiaalın energiankulutuksen ja resurssien optimoinnissa, hiilijalanjäljen pienentämisessä, uusiutuvan energian hyödyntämisessä sekä ilmansaasteiden seurannassa. Kirjallisuuskatsauksessa laajennettiin kestävän kehityksen perinteistä määritelmää huomioimaan älykaupunkien erityispiirteet. Kestävyys ulottuu ympäristön lisäksi taloudellisiin, sosiaalisiin ja terveydellisiin näkökulmiin, joissa ihmisten elämänlaatu ja pitkän aikavälin tavoitteet ovat keskiössä.

Digitaaliset kaksoset tukevat kestävyyttä kaikilla näillä ulottuvuuksilla. Keskeinen havainto on niiden kyky vahvistaa älykaupungin neljää pääulottuvuutta, kuten kestävyyttä, elämänlaatua, älykkyyttä ja kaupungistumista. Yhden ulottuvuuden parantaminen vaikuttaa myös muihin. Esimerkiksi

energiatehokkuuden parantaminen ja uusiutuvan energian integrointi vähentävät ilmastovaikutuksia ja parantavat asukkaiden elämänlaatua sekä terveyttä.

Reaaliaikaisen datan hyödyntäminen on digitaalisten kaksosten keskeinen vahvuus. Datan avulla digitaaliset kaksoset edistävät tarkkaa päätöksentekoa, tietopohjaisten ennusteiden laatimista ja simulaatioiden toteuttamista. Yhteensovittaminen muiden teknologioiden, kuten esineiden internetin, tekoälyn ja koneoppimisen, kanssa lisää digitaalisten kaksosten potentiaalia. Esimerkiksi antureiden avulla kerätty ympäristötieto ja koneoppimisen laskentateho mahdollistivat entistä tarkemmat analyysit ja simulaatiot. Lisäksi metaversumin mahdollisuuksia digitaalisten kaksosten ja kestävyuden edistämiseksi tutkitaan aktiivisesti. Metaversumin ja digitaalisten kaksosten yhteistyön odotetaan parantavan energiatehokkuutta ja lisäävän kaupunkilaisten osallistumista.

Digitaalisten kaksosten keskeinen painopiste on energian käytön optimoinnissa, koska se on tehokkain tapa vähentää ilmastovaikutuksia. Tulokset osoittavat digitaalisten kaksosten potentiaalinen tukea ESRS-standardien ja SDG-tavoitteiden seurantaan ja mittaamiseen. Rajallisen tutkimusaineiston vuoksi tämän havainnon kontribuutio jäänyt vähäisemmäksi.

Digitaalisten kaksosten hyödyntämiseen liittyy kuitenkin rajoitteita, kuten teknologiat korkeat kustannukset, yksityisyyden suojan kysymykset ja datan jakamisen haasteita. Teknologian täydellisen potentiaalisen saavuttaminen edellyttää monipuolisen datan hyödyntämistä, mutta sen jakaminen eri sidosryhmien välillä voi olla haastavaa. Lisäksi kulttuuri- ja organisatoriset tekijät, kuten muutostarinta, voivat hidastaa käyttöönottoa. Näistä huolimatta tutkimukset osoittavat, että yhteistyö ja teknologinen kehitys voivat vähitellen ratkaista nämä haasteet.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että digitaalisten kaksosten hyödyt kestävä kehityksen edistämiseksi ovat merkittäviä. Niiden avulla voidaan vahvistaa älykaupunkien keskeisiä ulottuvuuksia ja edistää pitkän aikavälin kestäviä ratkaisuja. Jatkotutkimukseksi suositellaan tarkastelemaan syvällisemmin digitaalisten kaksosten käyttöä ESRS- ja SDG-raportoinnissa, sillä niiden kyky integroida monipuolista dataa näyttää lupaavalta. On myös tärkeää selvittää, liittyykö ESRS- ja SDG-raportoinnin ja digitaalisten kaksosten integrointiin erityisiä haasteita. Lisäksi jatkotutkimuksissa tulisi kiinnittää huomiota datan laatuun ja saavutettavuuteen sekä tietosuojaan ja yksityisyyskysymyksiin, jotka ovat kriittisiä digitaalisten kaksosten laajamittaisessa hyödyntämisessä. Digitaalisten kaksosten ydintoiminto perustuu laajamittaiseen datankeruuseen, mikä korostaa näiden tekijöiden merkitystä kestävä kehityksen tavoitteiden saavuttamisessa.

LÄHTEET

- Ahvenniemi, H., Huovila, A., Pinto-Seppä, I., & Airaksinen, M. (2017). What are the difference between sustainable and smart cities? *Cities*, 60, 234-245.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.009>
- Allam, Z., Sharifi, A., Bibri, S. E., Jones, D. S., & Krogstie, J. (2022). The Metaverse as a Virtual Form of Smart Cities: Opportunities and Challenges for Environmental, Economic, and Social Sustainability in Urban Futures. *Smart Cities*, 5(3), 771-801.
<https://doi.org/10.3390/smartcities5030040>
- Awasthi, A., Yadav, M., Baswaraju, S., Nijhawan, G., Ziara, S., & Kumar, A. (2024). Detailed analysis of sustainable infrastructure design and benefits for urban cities. *E3S Web of Conferences*, 552.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455201054>
- Barbieri, R., Coluccia, B., & Natale, F. (2025). How are smart city policies progressing in Italy? Insights from SDG indicators. *Land Use Policy*.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107386>
- Camero, A., & Alba, E. (2019). Smart City and information technology: A review. *Cities*, 93, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.04.014>
- Chen, L., Li, X., & Zhu, J. (2024). Carbon peak control for achieving net-zero renewable-based smart cities: Digital twin modeling and simulation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 65.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103792>
- Diaz-Sarachaga, J. M. (2024). May Urban Digital Twins Spur the New Urban Agenda? The Spanish Case Study. *Sustainable Cities and Society*, 114.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105788>
- Diaz-Sarachaga, J. M. (2025). Developing an assessment governance framework for urban digital twins: Insights from smart cities. *Cities*, 156.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105558>
- Dovolil, P., & Svitek, M. (2024). Integrating ESG into the smart city concept with focus on transport. *Proceeding of the IEEE Smart Cities Symposium Prague*, 378-383. <https://doi.org/10.1109/SCSP61506.2024.1055273>
- Euroopan unionin asetus 2020/852. (2020). Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2020/852, annettu 18 päivänä kesäkuuta 2020, kestävän sijoittamisen helpottamiseksi toteuttavasta kehyksestä ja asetuksen (EU) 2019/2088 muuttamisesta. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32020R0852>
- El-Agamy, R.F., Sayed, H.A., AL Akhatatneh, A.M., Aljohani, M., & Elhosseini, M. (2024). Comprehensive analysis of digital twins in smart cities: a 4200-

paper bibliometric study. *Artificial Intelligence Review*, 57(6).
<http://dx.doi.org/10.1007/s10462-024-10781-8>

- Ersan, M., Irmak, E., Colak, A. M. (2024). Applications, Insights and Implications of Digital Twins in Smart City Management. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 378-383. <https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1109/icSmartGrid61824.2024.10578291>
- Ferre-Bigorra, J., Casals, M., & Gangolells, M. (2022). The adoption of urban digital twins. *Cities*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103905>
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating unpredictable undesirable emergent behaviour in complex systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds). *Transdisciplinary perspectives on complex systems: new findings and approaches*, ss. 85-113. Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Karren, K., Schmitz, M., & Schaffer, S. (2024). Improving conversational user interfaces for citizen complaint management through enhanced contextual feedback. *Proceedings of the 2024 ACM CHI Conference on Human factors in computing systems*, 1-10. <https://doi.org/10.1145/3640794.3665562>
- KIRA-digi. (2019). Kalasatama Digital Twins Pilot Project's CityGML Files. https://www.opendata.fi/data/en_GB/dataset/helsingin-3d-kaupunkimalli/resource/cd7ed6e8-fd77-4319-bc67-692f7dfc43de
- Komission delegeoitu asetus 2023/2772. (2023). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2013/34/EU täydentämisestä kestävyysraportointistandardien osalta. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32023R2772#d1e177-1-1>
- Lv, Z., Shanf, W. L., & Guizani, M. (2022). Impact of Digital Twins and Metaverse on Cities: History, Current Situation, and Application Perspectives. *Applied Sciences*, 12(24).
<https://doi.org/10.3390/app122412820>
- Löcklin, A., Müller, M., Jung, T., Jazdi, N., White, D., & Weyrich, M. (2020). Digital Twin for Verification and Validation of Industrial Automation Systems – a Survey. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 851-858.
<https://doi.org/10.1109/ETFA46521.2020.9212051>
- Major, P., Li, G., Hildre, H. P., & Zhang, H. (2021). The Use of a Data-Driven Digital Twin of a Smart City: A Case Study of Alesund, Norway. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 24(7), 39-49.
<https://doi.org/10.1109/MIM.2021.9549127>
- Mihai, S., Mahnoor, Y., Hung, D. V., Davis, W., & Towakel, P. (2022). Digital Twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(4), 2255-2291.
<http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773>

- O'Dweyer, E., Pan., I., Charleswoth, R., Butler, S., & Shah, N. (2020). Integration of an Energy Management Tool and Digital Twin for Coordination and Control of Multi-vectors Smart Energy Systems. *Sustainable Cities and Society*, 62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2020.102412>
- Rajabifard, A. (Ed.). (2019). Sustainable development goals connectivity dilemma: land and geospatial information for urban and rural resilience (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429290626>
- Reynoso Vanderhorst, H., Heesom, D., & Yenneti, K. (2024). Technological advancements and the vision of a meta smart twin city. *Technology in Society*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102731>
- Ruohomäki, T., Kesäniemi, O., Airaksinen, E., Martikka, M., Huuska, P., & Suomisto, J. (2018). Smart City Platform Enabling Digital Twin. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 155-161. <http://dx.doi.org/10.1109/IS.2018.8710517>
- Sharifi, A., Allam, Z., Feizizadeh, B., Ghamari, H. (2021). Three Decades of Research on Smart Cities: Mapping Knowledge Structure and Trends. *Sustainability*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/su13137140>
- Silva, B. N., Khan, M., & Han, K. (2018). Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 38, 697-713. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.053>
- Söderström, O., & Klaus, F. (2014). Smart cities as corporate storytelling. City: analysis of urban trends, culture, theory, policy, action. *City*, 18(3), 307-320. <http://dx.doi.org/10.1080/13604813.2014.906716>
- Un-Habitat. (ei pvm.). International guidelines on people-centered smart cities. <https://unhabitat.org/international-guidelines-on-people-centred-smart-cities>
- UN-SDSN. (2019). Transformations to achieve the Sustainable Development Goal: includes the SDG index and dashboards. Sustainable development report 2019. <https://sdgtransformationcenter.org/reports/sustainable-development-report-2019>
- VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: generalization, characterization and implementation. *Decision support systems*, 14 (1). <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- Vivi, Q., Parlikad, A., Woodall, P., Ranasinghe, G., & Heaton, J. (2019). Developing a dynamic digital twin at a building level: Using Cambridge campus as case study. *ICE Publishing*. <https://doi.org/10.17863/CAM.38523>
- Xu, J., & Xu, W. (2024). Financing sustainable smart city projects: public-private partnerships and green bonds. *Sustainable energy technologies and assessments*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103699>

Ympäristöministeriö. (ei pvm.-a). Montrealin luontokokous COP15.

<https://ym.fi/montrealin-luontokokous-cop15>

Ympäristöministeriö. (ei pvm.-b) Pariisin ilmastopimus.

<https://ym.fi/pariisin-ilmastosopimus>

Ympäristöministeriö. (ei pvm.-c). UNEP ja UN-HABITAT. [https://ym.fi/unep-](https://ym.fi/unep-unhabitat)

[unhabitat](https://ym.fi/unep-unhabitat)