



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

DIGITAALISET KAKSOSET JA NIIDEN ERILAISET KYPSYYSMALLIT

Tomi Luukkonen

KONETEKNIIKAN TUTKINOT-OHJELMA

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Digitaaliset kaksoset ja niiden erilaiset kypsyysmallit

Tomi Luukkonen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2024, 35 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Emil Kurvinen

Tämän työn tarkoituksena on tutustua digitaalisiin kaksosiin, kypsyysmalleihin sekä siihen, miten niitä on hyödynnetty digitaalisten kaksosten saralta. Pääpainona on digitaalisten kaksosten kehitys ja kuinka digitaalisten kaksosten käsitettä voitaisiin kategorisoida ja ymmärtää helpommin. Käsiteltäviä asioita tässä työssä ovat digitaalisten kaksosten historia, toimintaperiaate, erilaisia digitaalisten kaksosten kypsyysmalleja sekä niiden hyödyntämistä ja käytännön esimerkkejä digitaalisten kaksosten käytöstä.

Digitaalinen kaksonen on niin laaja-alainen käsite, että sitä on vaikea yksiselitteisesti lokeroida. Sen lisäksi niiden kokoajan kehittyessä, ne saavat uusia ominaisuuksia, jotka erottavat ne vanhoista jo toisistaan eroavista kaksosista. Tämän ongelman vuoksi on luotu kypsyysmalleja, jotka helpottavat hahmottamaan, minkälaisesta digitaalisesta kaksosesta milloinkin on kyse. Tässä työssä on tarkoitus paneutua myös erilaisiin kypsyysmalleihin, minkä avulla eritasoisia digitaalisia kaksosia voidaan lokeroida.

Tässä kandidaatintyössä tutkimusmetodinä on käytetty kirjallisuuskatsausta. Työn tavoitteena on perehtyä digitaalisiin kaksosiin sekä niiden tarjoamiin mahdollisuuksiin. Työn tarkoituksena on samalla kategorisoida, lokeroida ja auttaa ymmärtämään erityyppisiä digitaalisia kaksosia ja niiden tulevaisuuden näkymää.

Asiasanat: simulaatio, käyttäytymismalli, virtuaalinen maailma, kypsyystaso, testaus

ABSTRACT

Digital twins and their different maturity models

Tomi Luukkonen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2024, 35 pp

Supervisor at the university: Emil Kurvinen

The purpose of this bachelor's thesis is to familiarize with digital twins, maturity models and how they have been used with each other. The main focus is the evolution of the digital twins and how to make the concept of digital twins easier to understand and categorize. Issues covered in this thesis include the principle and the history of digital twins, maturity models of digital twins and how to use them and some practical examples of how digital twins are being used.

The concept of a digital twin is so wide that it is hard to summarise univocally. On top of that digital twins keep on evolving and getting new features that separate them from the old ones that already differentiate from each other. Maturity models have been created to combat this problem. They make it easier to characterize what kind of digital twin is being talked about. One of this thesis' purposes is to delve into different maturity models that help categorize different levers of digital twins.

The research method in this bachelor's thesis is a literature review. The goal is to familiarize with digital twins and the possibilities it enables. One goal is also to categorize, label and help to understand different types of digital twins.

Keywords: simulation behavior model, virtual world, maturity level, testing

ALKUSANAT

Digitaaliset kaksoset ovat aiheena hyvin tuore ja ajankohtainen. Teknologian kehittyessä digitaalisia kaksosia pystytään hyödyntämään entistä enemmän ja paremmin. Olen itse ollut aina kiinnostunut geometriasta, muodoista ja erilaisista mallintamisen tavoista. Tämä aihe tuntui kiinnostavalta ja omalta.

Työtä ohjasi yliopiston puolesta Emil Kurvinen. Suuri kiitos hänelle hänen antamastaan panoksesta kandidaatintyöhöni. Hän on antanut kattavasti neuvoja ja uusia näkökulmia työhön sekä antanut tärkeää välipalautetta työtä tehdessä.

Oulu, 9.4.2024

Tomi Luukkonen
Työn tekijä

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto	7
2. Digitaalinen kaksosen	8
2.1. Mikä on digitaalinen kaksosen?	9
2.2. Digitaalisen kaksosen historiaa	10
2.3. Digitaalisen kaksosen hyödyt ja haasteet	11
3. Digitaalisen kaksosen ryhmittäminen	13
3.1. Digitaalisen kaksosen tyypit elinkaaren mukaan	13
3.1.1. Digitaalisen kaksosen prototyyppi (DTP)	13
3.1.2. Digitaalisen kaksosen ilmentymä (DTI)	14
3.1.3. Digitaalisen kaksosen kokonaisuus (DTA)	14
3.2. Ruzsan neljä päätyyppiä toiminnallisuuden mukaan	16
4. Kypsyysmalli (DIGITAL TWIN MATURITY MODEL)	17
4.1. Kypsyysmallin määritelmä	18
4.2. Digitaalisen kaksosen erilaisia kypsyysmalleja	19
4.2.1. ETRI:n kypsyysmalli	19
4.2.1.1. Taso 1: Peilaus	19
4.2.1.2. Taso 2: Valvonta ja kontrollointi	20
4.2.1.3. Taso 3: Mallintaminen ja simulaatio	20
4.2.1.4. Taso 4: Yhdistyneet	21
4.2.1.5. Taso 5: Autonominen	21
4.2.2. Uhlenkamp et al. kypsyysmalli	22
4.2.3. Atkinsin/Institution of Engineering and Technology:n kypsyysmalli	23
4.2.4. IoT analyytikoiden kypsyysmalli	24
4.3. Kypsyysmallin hyödyt	25
5. Digitaalisen kaksosen käyttöesimerkkejä	27
5.1. Normet	27
5.2. Suomen maanmittauslaitos	28
5.3. Virtual Singapore –projekti	29
YHTEENVETO	31
LÄHDELUETTELO	33

MERKINNÄT JA LYHENTEET

AR	lisätty todellisuus (augmented reality)
BIM	tietomalli (building information model)
CAD	tietokoneavusteinen suunnittelu (computer-aided design)
CAE	tietokoneavusteinen insinöörityö (computer-aided engineering)
CAM	tietokoneavusteinen valmistus (computer-aided manufacturing)
CPS	kyberfyysinen järjestelmä (cyber-physical system)
DCS	hajautettu ohjausjärjestelmä (distributed control system)
DT	digitaalinen kaksonen (digital twin)
DTA	digitaalisen kaksosen kokonaisuus (digital twin aggregate)
DTI	digitaalisen kaksosen ilmentymä (digital twin instance)
DTP	digitaalisen kaksosen prototyyppi (digital twin prototype)
GIS	paikkatietojärjestelmä (geographical information system)
HIL	elektroninen ohjauslaite osana laitteistoa (hardware-in-the-loop)
IIoT	teollisuuden internetti (industrial internet of things)
PLM	tuotteen elinkaaren hallinta (product lifecycle management)
SCADA	valvonta- ja ohjausjärjestelmää sekä datankeruuta (supervisory control and data acquisition)
VR	virtuaalinen todellisuus (virtual reality)

1. JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on tutustua siihen mikä on digitaalinen kaksonen. Työssä käydään läpi niiden historiaa sekä niiden eri tyyppien erilaisuuksia ja kuinka niitä kannattaa erotella toisistaan. Työssä käydään läpi useita kypsyysmalleja, jotka auttavat ymmärtämään erilaisia digitaalisia kaksosia sen lisäksi, että ne helpottavat asiasta kommunikoimista. Työssä käydään myös läpi, kuinka digitaalisia kaksosia pystytään hyödyntämään.

Ensimmäisessä käsittelykappaleessa tutustutaan yleisesti digitaalisiin kaksosiin sekä niiden historiaan. Siinä pohditaan mikä digitaalinen kaksonen on ja mistä käsite on saanut alkunsa.

Toisessa käsittelykappaleessa pohditaan, miten, niin laaja-alaista käsitettä, kuin digitaalisia kaksosia olisi järkevä ryhmittää. Tässä kappaleessa käydään läpi muun muassa konseptin keksijänä pidetyn Michael Grievesin tapa ryhmitellä digitaalisia kaksosia. Kolmannessa käsittelykappaleessa käydään läpi erilaisia kypsyysmalleja, mitkä toimivat ohjenuorina ja helpottavat erilaisten digitaalisten kaksosten luokittelua kypsyystasojen mukaan.

Neljännessä käsittelykappaleessa käydään läpi aktuaalisia käytännön esimerkkejä nykypäivän tilanteista, joissa käytetään digitaalisia kaksosia hyödyksi.

2. DIGITAALINEN KAKSONEN

Ennen tietokoneita kaikki suunnittelu- ja valmistustyö tehtiin fyysisessä maailmassa. Fyysinen maailma aiheuttaa kuitenkin rajoitteita, minkä takia parasta tehokkuutta ei pystytä saavuttamaan. Ihmiset organisoivat fyysiset asiat itse. Arkistointi ja säilöntä oli tuttua, mutta ei tehokasta. 2000-luvulla tietokoneet alkoivat yleistymään ja tietokoneille kehitettiin erilaisia simulointityökaluja ja internet. Pikkuhiljaa käyttöön tuli uusi virtuaalinen maailma fyysisen maailman tueksi. Nykypäivänä tämä virtuaalinen maailma ja työkalut, millä sitä pystytään hyödyntämään, ovat kehittyneet paljon ja ne tulevat vielä kehittymään entisestään. Tämän vuoksi niillä tulee olemaan yhä suurempi rooli tulevaisuudessa. Yhteys ja kanssakäymiset virtuaalisen ja fyysisen maailman välillä tulee olemaan paljon aktiivisempaa kuin ikinä aikaisemmin. Siksi saumaton integraatio ja fuusio näiden kahden tilan välillä on väistämätön trendi, joka luo uusia mahdollisuuksia ja parantaa nykyisiä tilanteita ja teknologioita esimerkiksi suunnittelun ja valmistuksen saralla. (Fei Tao, et al., 2019)

Vaatimukset, tavoitteet sekä maailman fyysinen dynamiikka ovat niin monimutkaisia ja dynaamisia että digitaalisten kaksosten kehitys on jatkuva prosessi. Tämä tarkoittaa sitä, että, digitaalisten kaksosten on kehityttävä eri tasoissa uudestaan ja uudestaan, saavuttaakseen täyden kykynsä erilaisia tehtäviä ja vaatimuksia varten. (Jan-Frederik Uhlenkamp et al., 2022)

Digitaalinen kaksonen on edistynyt paljon samalla kun IIoT on edistynyt. IIoT:n edistyminen mahdollisti aidon yhteyden digitaalisten kaksosten välille. COVID-19 pandemia pakotti teollisuuden kohteita kiihdyttämään digitaalisen kaksosten käyttöönottoa. Vuonna 2018 SAP:n IoT:n johtaja Thomas Kaiser sanoi, että "Digitaalisista kaksosista on tulossa liiketoiminnan välttämättömyys, ja ne kattavat omaisuuden tai prosessin koko elinkaaren ja muodostavat perustan yhdistetyille tuotteille ja palveluille. Yritykset, jotka eivät vastaa, jäävät jälkeen." (Radiana Pit, 2021)

COVID-19 epidemian jälkeen teollisuuden saralla tajuttiin, että tuotanto- ja toimitusketjuja on tehostettava entistä tehokkaammiksi vastatakseen kuluttajien tarpeisiin. Tämä on mahdollista hyödyntämällä digitaalisia kaksosia. Tätä teknologiaa käyttävät yritykset voivat sekä kopiaida ja analysoida koko tuotantonsa digitaalisesti, että varautua äkilliseen raaka-ainepulaan ja tunnistaa toissijaiset hankintalähteet huomioiden

samalla kustannukset, palvelun ja kapasiteetin. Tämä voi varmistaa jatkuvan käytettävyyden ja johtaa kustannussäästöihin. (Radiana Pit, 2021)

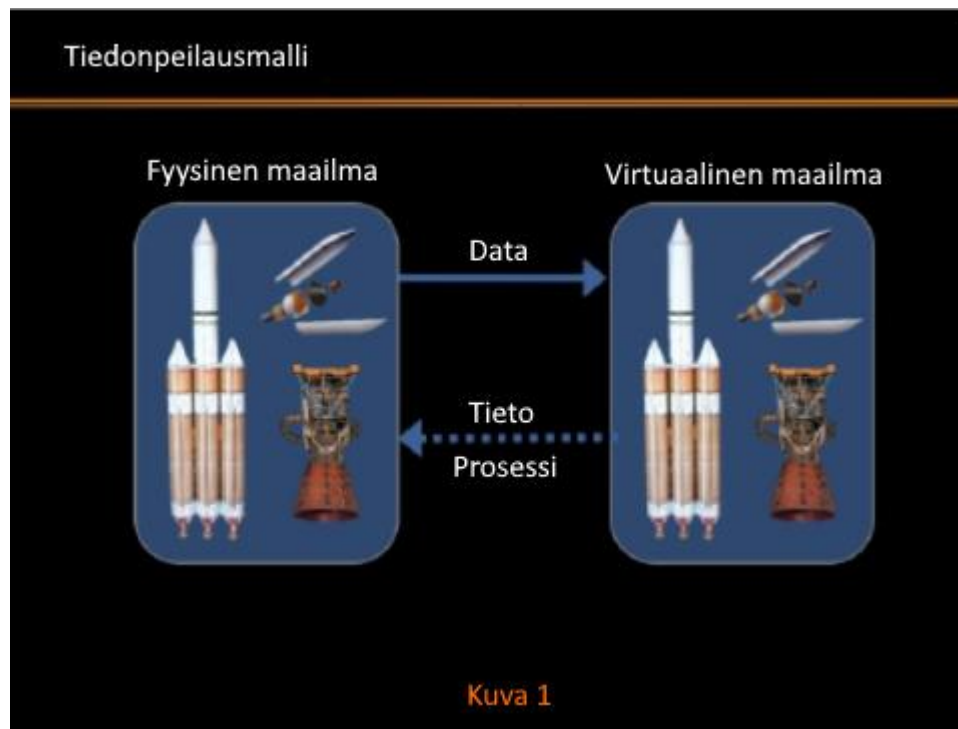
2.1. Mikä on digitaalinen kaksonen?

Kun puhutaan digitaalisista kaksosista, tulee helposti mieleen tietokoneella tehty tarkka 3D-mallinnus jostain kohteesta. Tällainen mallinnus, mikä ei pysty keskustelemaan toisen kaksosensa kanssa, on kuitenkin vain geometrinen kaksonen. Digitaalinen kaksonen on fyysisen kohteen tarkka digitaalinen kopio, mikä kykenee tiedonvaihtoon toisen kaksosensa kanssa. Digitaalisen kaksosen fyysisessä kopiossa on antureita tai muuta teknologiaa, minkä avulla se pystyy lähettämään dataa digitaaliselle kopiolleen. (Christian Foss, 2022)

Käytännön näkökulmasta ajatellaan, että digitaalisen kaksosen määrittäminen täyttyy, jos se on virtuaalinen esitys, kopio tai simulaatio todellisesta tai mahdollisesta fyysisestä kohteesta ja toteuttaa lähes jatkuvaa kaksisuuntaista kommunikaatiota vastineensa kanssa, sekä on aktiivisessa roolissa suunnittelu-, päätös- ja ohjausprosesseissa antamalla palautetta. (Brett Metcalfe et al., 2023)

Digitaalisia kaksosia käyttävät teolliset organisaatiot voivat kerätä paljon tietoa fyysisten järjestelmiensä toiminnasta. Digitaaliset kaksoset voivat kaapata ympäristötietoja, kuten sijainti-, kokoonpano- tai palvelutietueita, ja tarjota viime kädessä näkemyksiä kaikesta suunnittelusta ja historiallisista toiminnoista ennakoivaan huoltoon. (Radiana Pit, 2021)

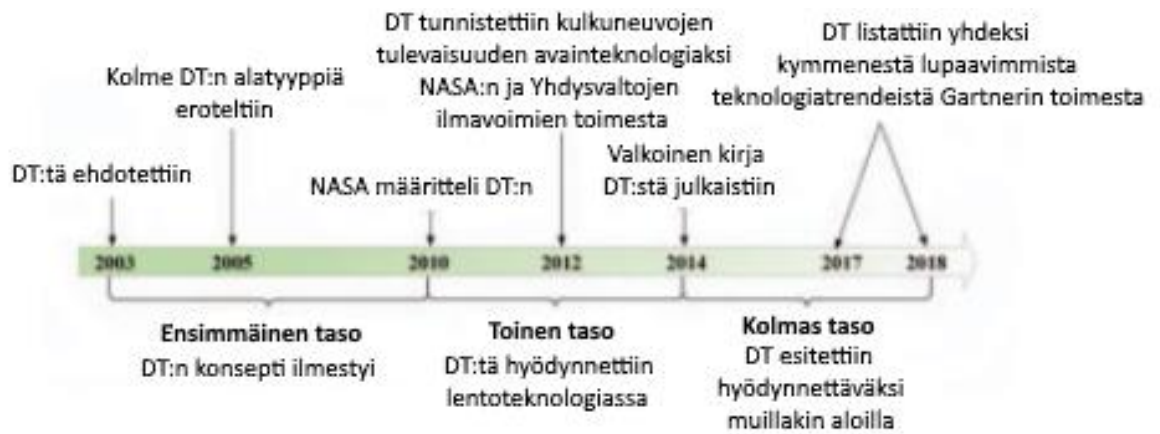
Kuva 1. osoittaa, että digitaalinen kaksonen koostuu kolmesta pääosasta. Ensimmäinen osa on fyysinen tuote fyysisessä maailmassa. Toinen osa on fyysisen tuotteen virtuaalinen versio virtuaalisessa maailmassa. Kolmas osa on tietoyhteydet, mitkä sitovat fyysisen tuotteen ja virtuaalisen tuotteen keskenään yhteen. (Michael Grieves, 2023)



Kuva 1. Digitaalisen kaksosen pääosat, mukailten (Michael Grieves, 2023)

2.2. Digitaalisen kaksosen historiaa

Digitaalisen kaksosen konsepti sai alkunsa NASA:n Apollo projektista 1960-luvulla. Apollo projektissa NASA rakensi kaksi lähes identtistä avaruusaluusta. Toinen aluksista lähetettiin tehtävälle avaruuteen vuonna 1970, kun toinen jäi maan pinnalle, sitä varten, että insinöörit pystyivät sen avulla peilaamaan astronauttien kokemia ongelmia ja antamaan näin paremmin ohjeita, kuinka selvitä vastoinkäymisistä. NASA määritteli konseptin virallisesti vuonna 2010. Tämän jälkeen digitaalisia kaksosia käytettiin pääasiassa ilma- ja avaruusteknologian tukena. Vuoden 2014 jälkeen digitaalisia kaksosia alettiin hyödyntämään laaja-alaisemmin. (Fei Tao, et al., 2019)



Kuva 2. Digitaalisen kaksosen kehityksen aikajana vuoteen 2018 asti, mukailten (Fei Tao, et al., 2019)

Michael Grieves oli suuressa roolissa digitaalisen kaksosen kehittämisessä. Hänellä oli idea digitaalisista kaksosista jo pitkään ennen kuin tietokoneiden kapasiteetti saatiin kehitettyä riittävän suureksi, jotta digitaalisia kaksosia pystytään oikeasti luomaan. Digitaalisia kaksosia alettiin käyttämään tuotannossa vuoden 2002 jälkeen, kun Michael Grieves esitteli digitaalisten kaksosten idean konferenssissa. Vuoden 2002 esityksessä digitaalisilla kaksosilla ei ollut vielä edes nimeä. Idea esitettiin yksinkertaisesti nimellä *Conceptual idea for PLM* eli käsitteellinen idea PLM:ää varten. Grieves esitteli ideaansa auton törmäystestin esimerkin avulla. Jos autolla tehdään törmäystesti, testi voidaan suorittaa vain kerran ja auto tuhoutuu prosessissa ja siitä tulee käyttökelvoton. Virtuaalisessa maailmassa samalla autolla voidaan tehdä niin monta törmäystestiä kuin tarvitaan, eikä materiaalia mene hukkaan fyysisessä maailmassa. (Michael Grieves, 2023)

Grievesin ensimmäisessä kirjassa vuonna 2006 digitaalista kaksosta kutsuttiin vielä virtuaaliseksi kaksoisolennoksi. Vuonna 2010 digitaaliset kaksoset saivat virallisen nimensä, kun Grieves toimi NASA:n konsulttina. Uuden nimen konseptille keksi Grievesin kollega John Vickers, joka myös otti digitaalisen kaksosen käyttöön NASA:n etenemissuunnitelmassa. (Michael Grieves, 2023)

2.3. Digitaalisen kaksosen hyödyt ja haasteet

Digitaalisia kaksosia hyödyntäviä applikaatioita otetaan yhä enemmän ja useammilla aloilla käyttöön. Kun digitaalisiin kaksosiin yhdistetään mahdollistavia teknologioita se mahdollistaa toiminnan, mikä on hyödyllinen esimerkiksi suunnittelijalle tai operaattorille. Tämä johtaa datapohjaiseen päätöksentekoon, mikä on monella alalla

digitaalisen kaksosen tärkein etu. Digitaalisten kaksosten saama huomio on niille suureksi eduksi ja yksityisen sektorin lisäksi julkiset virastot ja hallitukset alkavat pohtia DT-konseptien käyttöönottoa älykkäiden kaupunkien ja palveluiden kehittämiseen. Digitaaliset kaksoset linjautuvat arvoiltaan kestävään kehitykseen ja asukkaiden hyvinvointiin, mikä tekee niistä eettisesti turvallisen ja hyvän vaihtoehdon. (Diego M. Botin-Sanabria et al., 2022)

Digitaalisten kaksosten tekniikka on kuitenkin vielä alkuvaiheessa ja täyden potentiaalinsa saavuttaminen edellyttää merkittävien rajoitusten ja haasteiden käsittelemistä. Näitä haasteita ovat esimerkiksi kustannukset, tiedon monimutkaisuus ja ylläpito, standardien ja määräysten puute sekä kyberturvallisuuteen ja viestintään liittyvät ongelmat. (Diego M. Botin-Sanabria et al., 2022)

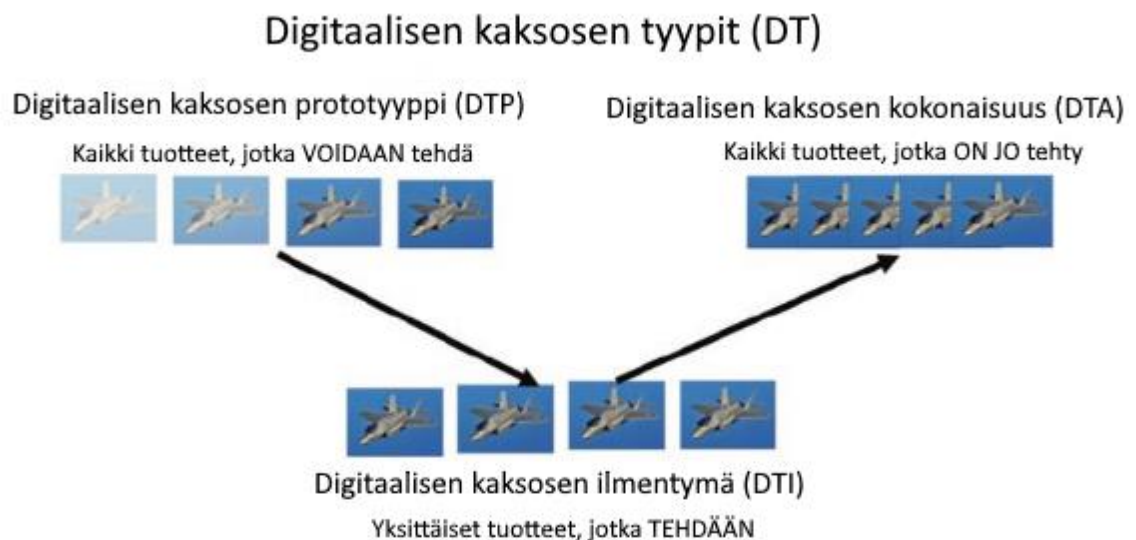
Uutena haasteena syntynyt hajaantuminen olisi ratkaistavissa sitä käsittelemillä standardeilla ja määräyksillä. Yhteiset käsitteet ja yksiselitteisen tiedon käyttö on avainasemassa. Standardointi tulisi suorittaa puolueettoman tahon toimesta, jolla olisi hyvä tietämys digitaalisista kaksosista. (Tatu Uutela, 2022)

3. DIGITAALISEN KAKSOSEN RYHMITTÄMINEN

Grieves jakaa tuotteen elinkaaren neljään osaan mitkä helpottavat tuotesuunnittelua: luominen, kasaaminen, käyttäminen ja hävittäminen. (Michael Grieves, 2023)

3.1. Digitaalisen kaksosen tyypit elinkaaren mukaan

Grieves jakaa digitaaliset kaksoset kolmeen kategoriaan tuotteen elinkaaren vaiheen mukaan. Nämä kolme kategoriaa näkyvät kuvassa 3. Grieves jakaa digitaaliset kaksoset tuotteisiin, mitkä voidaan tehdä, tuotteisiin, mitkä tehdään ja tuotteisiin mitkä on jo tehty. (Michael Grieves, 2023)



Kuva 3. Digitaalisten kaksosten kolme tyyppiä tuotteen elinkaaren mukaan, mukailleen (Michael Grieves, 2023)

3.1.1. Digitaalisen kaksosen prototyyppi (DTP)

DTP:ssä ideana on luoda digitaalinen kaksonen ennen fyysisen tuotteen luomista. Nämä ovat digitaalisia kaksosia kaikista tuotteista, jotka voidaan tehdä. Tämän tavoitteena on siirtää mahdollisimman paljon työtä fyysisestä maailmasta virtuaaliseen maailmaan. Tavoitteena on luoda tuote, testata tuote, valmistaa tuote ja tukea tuotetta virtuaalisesti. Vasta kun tuote on saatu niin täydelliseksi kuin mahdollista, sitä aletaan valmistamaan fyysisesti. Jos ja kun virheitä ollaan tekemässä, ne kannattaa tehdä virtuaalisessa

maailmassa. Virtuaalisessa maailmassa virheiden tekemisen hinta lähestyy nolaa. Kuten kuvassa 3. nähdään, tuote alkaa ideasta ja muotoutuu ajan myötä oikeaksi fyysiseksi tuotteeksi. Tässä kehitysvaiheessa kannattaa käyttää hyödyksi myös VR-teknologiaa, sillä ihminen käsittää parhaiten, minkä kanssa se on tekemisissä, kun se pääsee oikeasti näkemään kohteen. (Michael Grieves, 2023)

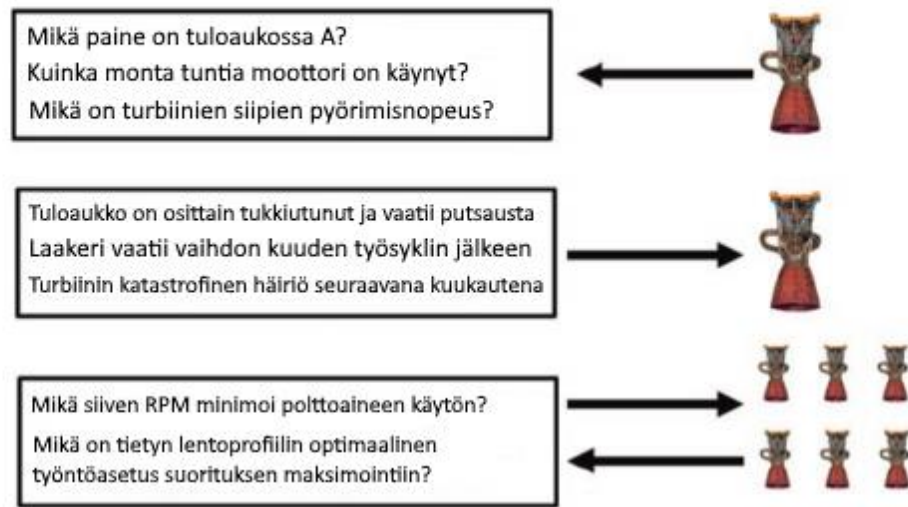
3.1.2. Digitaalisen kaksosen ilmentymä (DTI)

Kun virtuaalisesta maailmasta siirrytään tekemään fyysisiä tuotteita, siirrytään digitaalisissa kaksosissa ilmentymävaiheeseen. Nämä digitaaliset kaksoset ovat kaksosia yksittäisistä tuotteista, jotka tehdään. Tuotteita halutaan seurata niiden koko elinkaaren ajan. Digitaaliseen kaksoseen tallentuu tuotteen osien kaikki tarkat tiedot. Digitaalisessa kaksosessa on mittojen lisäksi tiedot käytettyjen osien sarjanumeroista. Näitä digitaalisia kaksosia käytetään vain vaativissa projekteissa. Esimerkiksi F-35 monitoimihävittäjä tarvitsee digitaalisen kaksosen siinä missä paperiliitin ei tarvitse. Suuri osa DTI-kaksosen tiedoista tulee DTP-kaksosesta. Tässä vaiheessa ideaalimitoista siirrytään osien aktuaalisiin mittoihin. Tässä vaiheessa tuotantoa AR-teknologiaa käytetään yhä kasvavissa määrin. AR-teknologian avulla digitaalinen kaksonen voidaan peilata keskenetäisen fyysisen tuotteen päälle. Näin insinöörit näkevät tuotteen lisäksi tuotteen ominaisuuksia, kuten lämpötilagradientteja, polttoaineen virtausnopeuden, tai virtalähteet. (Michael Grieves, 2023)

3.1.3. Digitaalisen kaksosen kokonaisuus (DTA)

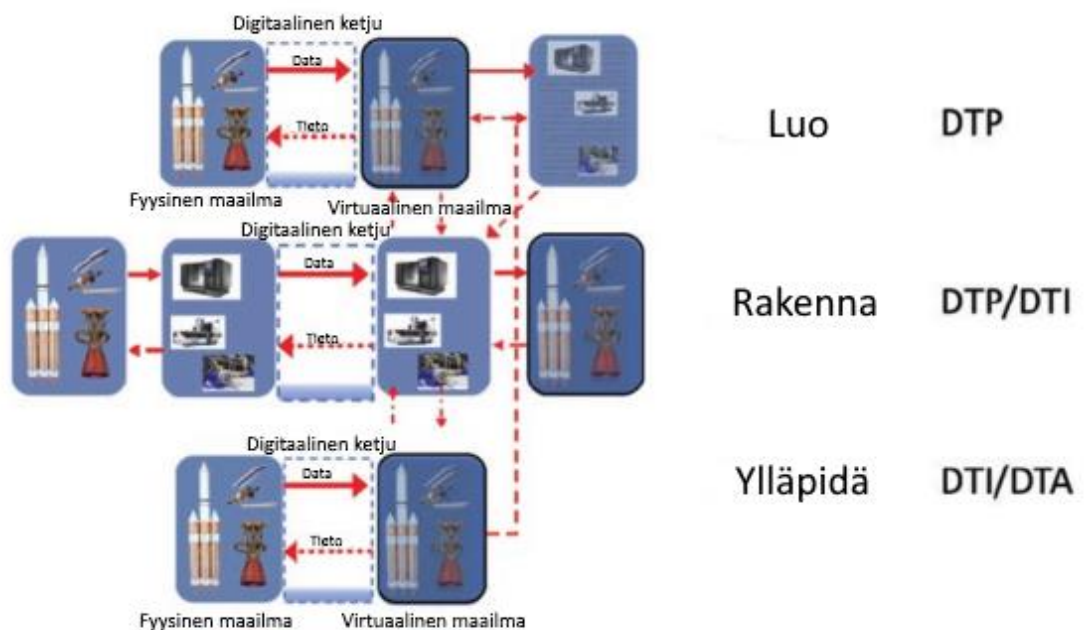
Viimeinen tyyppi on digitaalisen kaksosen kokonaisuus eli kaikki tuotteet, mitkä on jo tehty. Kaikista tuotteista, jotka on jo tehty ja tuotettu ja joista on myös tehty digitaalinen kaksonen, voidaan kerätä haluttua tietoa. Tavoitteena on ennakoida ongelmia ja epäonnistumisia ennen kuin ne tapahtuvat. Kun virheeseen johtaneista anturien lukemista ilmoitetaan tietokantaan, voi tietokanta antaa varoituksen tulevissa projekteissa, jos anturit antavat samanlaisia lukemia. Näin aikaisemmin tehty virhe saadaan karsittua tulevaisuuden tuotteissa. Tavoitteena on siirtyä huoltokaaviossa säännöllisistä huolloista, tarpeen vaativiin huoltoihin. Vaikka haluaisimme mieluummin tietää syy-seuraussuhteen, kuin korrelaation lukemien ja virheiden kanssa, tieto korrelaatioista voi myös estää epäonnistumisien tapahtumisen tuotannossa. (Michael Grieves, 2023)

Kysyvä/Ennakoiva/Oppiva



Kuva 4. Havainnollistava kuva DTA:n hyödyntämisestä DTI vaiheessa ja kuinka niitä käytetään ennakoimiseen ja oppimiseen, mukailen (Michael Grieves, 2023)

DTA:t ovat kokonaisuuksia tai yhdistelmiä, mitkä ovat kasattu monesta DTI:stä. Näiden avulla voidaan ennakoita osan hajoaminen, kun anturit antavat tiettyjä tunnettuja lukemia. DTI:t voivat myös oppia aikaisemmin tuotetuilta tuotteilta eli niiden DTA:ilta asioita, joiden avulla voidaan välttää virheiden toistamista. (Michael Grieves, 2023)



Kuva 5. Digitaalisten kaksosten eri tyyppien sijoittuminen tuotteen elinkaaren vaiheisiin, mukaillen (Michael Grieves, 2023)

3.2. Ruzsan neljä päätyyppiä toiminnallisuuden mukaan

Digitaaliset kaksoset ovat sen verran laaja käsite, että niistä löytyy monia eri tyypejä eri tarkoituksiin. Ne pystytään myös ryhmittelemään useammalla eri tavalla Digitaalisiin kaksosiin pohjautuvan kirjallisuuden ja tutkimuksen perusteella ne pystytään jakamaan neljään eri päätyyppiin. (Csaba Ruzsa, 2021)

Testaus malli on digitaalinen kaksonen, joka ei saa jatkuvaa dataa fyysiseltä kopioltaan. Tätä kaksoistyyppiä käytetään pääasiassa testaustarkoitukseen. Tuotetta voidaan esimerkiksi testata virtuaalisesti eri olosuhteissa vaarantamatta fyysistä kopiota. (Csaba Ruzsa, 2021)

Toinen päätyyppi on valvontamalli. Tämän tyyppin digitaalinen kaksonen saa jatkuvasti tietoa fyysiseltä kohteelta, mutta ei muuta tai vaikuta fyysiseen kohteeseen mitenkään. Digitaalinen kaksonen pelkästään valvoo fyysisen kohteen olotilaa ja päivittää itseään samaan olotilaan. (Csaba Ruzsa, 2021)

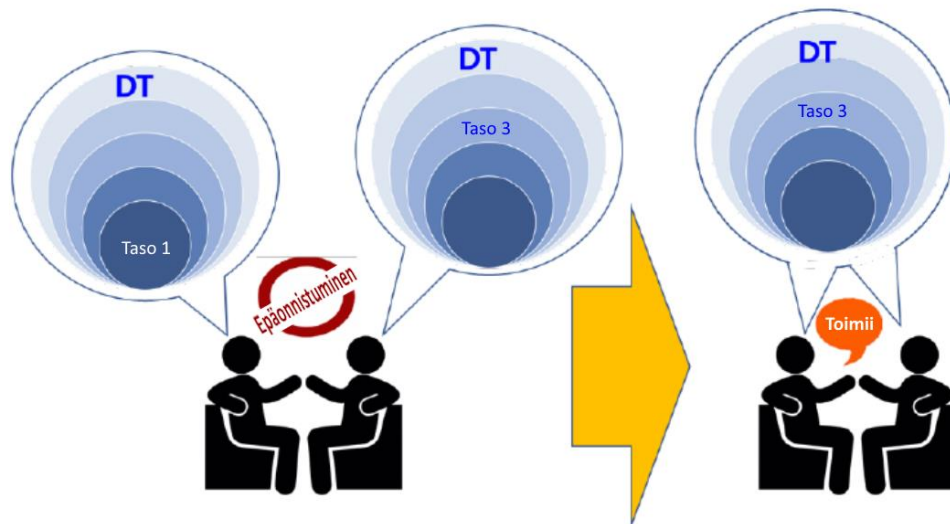
Kolmas päätyyppi on hallitseva kaksonen. Tämän tyyppin kaksoset vaihtavat dataa keskenään jatkuvasti ja mahdollisen tilanteen muuttuessa digitaalinen kopio voi hallita ja vaihtaa fyysisen kohteen asetuksia olosuhteisiin nähden optimaalisemmiksi. Digitaalinen kaksonen voi esimerkiksi huomata kohteessa tietyn paikan lämpötilan kohonneen liian suureksi ja pystyy ohjaamaan viilennyksen osumaan haluttuun paikkaan. (Csaba Ruzsa, 2021)

Neljäs päätyyppi on simulaatiokaksonen. Myös tässä tyyppissä kaksoset keskustelevat keskenään jatkuvasti. Digitaalinen kaksonen saa tietoa fyysiseltä kohteelta, mutta virtuaalisessa maailmassa tehtävät simuloituidut testit antavat dataa fyysiselle kohteelle. (Csaba Ruzsa, 2021)

4. KYPSYYSMALLI (DIGITAL TWIN MATURITY MODEL)

Digitaaliset kaksoset heijastavat fyysistä omaisuutta digitaalisessa maailmassa rikastaen niitä lisäominaisuuksilla ja parantaen päätöksentekoa ja elinkaaren hallintaa. Monipuolisten mahdollisuuksien vuoksi digitaalisten kaksosten suunnittelu sekä toteutus ovat laaja-alaisia operaatioita. Uhlenkampin kirjoituksen tavoitteena on vaikuttaa digitaalisten kaksosten kuvauksen virallistamiseen ja standardoimiseen. Uhlenkampin kypsyyssmalli arvioi digitaalisia kaksosia seitsemässä kategoriassa: konteksti, data, laskentaominaisuudet, malli, integrointi, ohjaus, ihmisen ja koneen välinen rajapinta. Mallissa on kolmekymmentäyksi arvosteltavaa ominaisuutta kategorioiden sisällä. (Jan-Frederik Uhlenkamp et al., 2022)

ETRI:n kypsyyssmallin taustalla on kokemus epäonnistuneesta kommunikaatiosta. Yong-Woon osallistui tapaamiseen, minkä aiheena oli digitaaliset kaksoset ja mihin osallistui monitaustaisia aiheen asiantuntijoita. Keskustelujen myötä Yong-Woon huomasi, että asiantuntijat puhuivat digitaalisista kaksosista niin erilaisilla tulokulmilla, että se johti moniin väärinymmärryksiin. (Yong-Woon Kim, 2020)



Kommunikaation epäonnistuminen ja onnistuminen

Kuva 6. Samasta asiasta kommunikoiminen, mukailen (Yong-Woon Kim, 2020)

Esimerkiksi kuvassa 6. on esitetty kaksi viestintätapausta, joista toinen osoittaa epäonnistumisen ja toinen onnistumisen. Epäonnistuneessa tapauksessa

vasemmanpuoleinen asiantuntija keskusteli kokemuksistaan geometrisesta esityksestä ja rakennesimulaatiosta, kun taas toinen asiantuntija keskittyi käyttäytymissimulaatioon. Vaikka he käsittelivät mallinnusta ja simulointia samalle objektille, he lähestyivät mallintamista ja simulointia eri näkökulmista ja toisinaan syventyivät erilaisiin kysymyksiin. (Yong-Woon Kim, 2020)

Tästä motivoituneena ETRI kehitti rakenteellinen hierarkia digitaalisen kaksosen järjestelmille. Tämän tarkoituksena on helpottaa kohdennettua keskustelua asiantuntijoiden kesken. Tämän ajattelumallin mukaan tasoja on viisi. Myöhemmin asiantuntija informoi Yong-Woota Gartnerin kypsyyssmallista, mutta perehdyttyään tähän, Yong-Woon huomasi, että molemmissa malleissa oli sama konseptillinen hierarkia, mutta vain hieman erilaisista näkökulmista. (Yong-Woon Kim, 2020)

4.1. Kypsyysmallin määritelmä

Yleisesti ottaen kypsyyssmalli on jäsenneilty viitekehys, mikä auttaa arvioimaan ja kehittämään kohteen kypsyytensä tietyssä huolenaiheessa. Kypsyysmalli tarjoaa reitin, millä siirtyä aloitustilanteesta kehittyneempään ja optimoidumpaan vaiheeseen. Sana *kypsyys* pitää sisällään ajatuksen kehityksestä, parannuksesta ja optimoinnista. (Yong-Woon Kim, 2020)

4.2. Digitaalisen kaksosen erilaisia kypsyysmalleja

4.2.1. ETRI:n kypsyysmalli

ETRI:n kypsyysmalli kykenevyyden näkökulmasta

Kypsyys-taso	Referenssi-nimi	Kykynevyys vaatimukset	Esimerkkejä
5	Autonominen	<ul style="list-style-type: none"> Autonomiset toiminnot live synkronoinnilla ja orkestroinnilla täysin ilman ihmisen väliintuloa Oma-aloitetoiminto tuettu 	N/A
4	Yhdistyneet	<ul style="list-style-type: none"> Yhdistyneet, synkronoidut ja vuorovaikutteiset toiminnot digitaalisten kaksosten kesken, mutta toiminta ihmisen osallistumisen kautta Sovellus-/palvelukohtainen datan vaihto yhdistyneiden käyttöliittymien kautta toimialueiden yli 	N/A
3	Mallintaminen ja simulaatio	<ul style="list-style-type: none"> Toimintoja ja simulointia varten mallinnettuja käyttäytymisiä ja dynamiikkoja "Mitä jos"-simulaatioita tarjottuna Tukee ennakoivia toimintoja Syy-analyysi mahdollista uusiosimulaatioiden avulla Tilasynkronointi kahden kaksosen välillä Tietojen ketjuttaminen koko elinkaaren ajan 	CAE, CPS, HIL Simulation, Digitaalinen tehdas, Digitaalinen malli, Virtuaalinen sensori, "Virtual Singapore"
2	Valvonta ja kontrollointi	<ul style="list-style-type: none"> Jatkuva, staattinen ja alkutietoyhteys Staattiset prosessinhallintalogiikat asetettu ilman mallin käyttäytymisen ja dynamiikkojen prosessointia Passiiviset tai reagoivat toiminnot tuettuja Reaaliaikaista valvontaa synkronointikäyttöliittymän kautta Osittaista automaattista kontrollointia, mutta pääasiassa ihmisen toiminnon kautta 	SCADA, DCS, CAM
1	Peilaaminen	<ul style="list-style-type: none"> Fyysisten objektien mallintamista, siten että niillä on samankaltainen muoto, koko, rakenne ja ulkonäkö renderöitynä 2D tai 3D:nä 	CAD, BIM, GIS, navigaattori

Kuva 7. ETRI:n kypsyysmalli, mukailten (Yong-Woon Kim, 2020)

Tässä kypsyysmallissa on hyvä huomata, että alemman kypsyystason kaksosen ominaisuudet sisältyvät ylempien kypsyystasojen kaksosiin. (Yong-Woon Kim, 2020)

4.2.1.1. Taso 1: Peilaus

Ensimmäisen kypsyystason kaksoseen riittää, että kaksosella on samankaltainen muoto, koko, rakenne ja ulkonäkö 2D- tai 3D-muodossa, kuin fyysisellä kohteella. Ensimmäinen taso ei edellytä datayhteyttä. CAD-, BIM- ja GIS-ratkaisujen tarjoajat ovat sanoneet tämän ratkaisun tukevan digitaalisia kaksosia. (Yong-Woon Kim, 2020)

4.2.1.2. Taso 2: Valvonta ja kontrollointi

Toisen kypsyystason kaksosessa prosessinohjausjärjestelmä valvoo ja ohjaa fyysistä kohdetta kiinteän käsittelylogiikan avulla. Kypsyystason 2 toimintaympäristöt ovat yleisesti staattisia. Kun kypsyystason 2 digitaalinen kaksonen kytketään fyysiseen kohdejärjestelmäänsä, sen käsittelylogiikka ja datayhteys ovat pysyviä ja kiinteitä koko käyttöiän ajan, ellei niitä rakenneta uudelleen tai oteta uudelleen käyttöön. (Yong-Woon Kim, 2020)

Kun staattista prosessointiohjauslogiikkaa sovelletaan ilman käyttäytymis- ja dynamiikkamalleja, kehitetään vaiheittaisia prosessointilogiikoita, jotka koostuvat fyysisen kohteen reaaliaikaisesta seurannasta ja reaktiivisesta ohjauksesta. Tässä on hyvä huomioida, että reaktiivisen henkilön käyttäytyminen voi edustaa reaktiivista toimintaa. Reaktiivinen henkilö odottaa asioiden tapahtuvan, vaikka ei välttämättä tarkoituksella, ja reagoi sitten tuloksena olevaan tilanteeseen. (Yong-Woon Kim, 2020)

Reaaliaikainen valvonta synkronointikäyttöliittymän kautta toimii siten, että fyysisten yksiköiden tilatiedot toimitetaan käsittelylogiikoihin valvontaa varten ja reagoivia toimintoja voidaan tehdä valvonnan pohjalta. Reaktiivinen ohjaus voidaan toteuttaa automaattisesti hallintalogiikalla tai manuaalisesti ihmisen toimesta, mutta ihmisen toimesta toteutettua toimintaa ei voida hyväksyä reaaliaikaiseksi ohjaukseksi, sillä ihmisen reagoiminen vie liikaa aikaa. (Yong-Woon Kim, 2020)

Reaaliaikaista automaattista reaktiivista ohjausta voidaan käyttää, silloin kun fyysisen kohteen toiminnot ovat vakaita ja luotettavia. Tällöin osa järjestelmästä voi hyödyntää automaattiohjausta. Koko järjestelmää ei kuitenkaan ole kehitetty täysin automatisoiduksi, vaan ohjaus ja valvonta tapahtuvat pääasiassa ihmisen toimesta. (Yong-Woon Kim, 2020)

4.2.1.3. Taso 3: Mallintaminen ja simulaatio

Virtuaalinen malli, mikä osaa simuloida fyysisen kohteensa vastaavia toimintoja ja käyttäytymistä. Kypsyystason 3 digitaalinen kaksonen pitää sisällään geometrinen ja rakenteellisten esitysmallien lisäksi käyttäytymisen ja dynamiikan mallit. Toimintaa luonnehditaan ja esitetään virtuaalisina malleina. Näiden tarkkuus riippuu mallinnustarkoituksista. (Yong-Woon Kim, 2020)

Mitä jos -simulaatio tarkoittaa sitä, että virtuaalisilla käyttäytymismalleilla voidaan simuloida, miten fyysinen kohde suoriutuisi mielivaltaisilla syöttöparametreilla. *Mitä jos* -simulaatioiden tulokset auttavat ymmärtämään, miten fyysinen kohde käyttäytyy tulevassa tilanteessa. Nämä simulaatiot voivat tukea ennakoivaa toimintaa. (Yong-Woon Kim, 2020)

Virtuaalisilla käyttäytymismalleilla voidaan simuloida tilanteita niin usein, kun on tarve. Jos fyysiselle laitteelle on tapahtunut jotain, näillä simulaatioilla voidaan saada tuloksia, mitkä auttavat analysoimaan, miksi niin tapahtui. (Yong-Woon Kim, 2020)

Digitaalisen kaksosen virtuaalimallit synkronoidaan sen fyysisen kohteen käyttäytymisen ja toimintatilojen suhteen. Ihmiset voivat kuitenkin keskeyttää toiminnot ja suorittaa toimintoja fyysisellä kohteella tarvittaessa. (Yong-Woon Kim, 2020)

Digitaalisten kaksosten järjestelmien erilaiset käyttäytymismallit jakavat tietoa ja yhdistävät toisiinsa liittyviä tietoja vertaistensa yhteistyössä toimivien osien kanssa koko elinkaaren ajan. (Yong-Woon Kim, 2020)

4.2.1.4. Taso 4: Yhdistyneet

Useat digitaaliset kaksoset ovat liittyneet tekemään vuorovaikutusta toisiensa kanssa toisistaan riippuvaisissa toiminnoissa. Tässä tapauksessa digitaalinen kaksonen vaikuttaa muihin digitaalisiin kaksosiin ja useat digitaaliset kaksoset ovat vuorovaikutuksessa toistensa kanssa tehdäkseen yhteistyötä. (Yong-Woon Kim, 2020)

Yhteisiä aiheita käsittelevä tiedonvaihto tapahtuu kaikkien asiaa koskevien digitaalisten kaksosten ja niiden kanssa yhteistyötä tekevien osien kanssa. Vaikka digitaaliset kaksoset tekevät yhteistyötä, ihminen on kuitenkin toiminnan takana. (Yong-Woon Kim, 2020)

4.2.1.5. Taso 5: Autonominen

Fyysiset kohteet ja niiden digitaaliset kaksoset ovat synkronoitu reaaliaikaisesti ja toimivat autonomisesti ilman manuaalisia keskeytyksiä. On hyvä huomioida, että autonomisuudella voi olla määrittelystä riippuen omia kypsyytasoja. (Yong-Woon Kim, 2020)

Pohjaoletuksena kypsyytason 5 digitaaliselle kaksoselle toimii, että fyysisen kohteen käyttäytymismallien ja digitaalisen kaksosen vastaavien virtuaalimallien välinen suhde on vakaa ja luotettava oikean maailman toimintoihin nähden. Autonominen toiminta tarkoittaa, että fyysisyyden kokonaisuuksien suorittaminen ei vaadi manuaalisia toimenpiteitä. (Yong-Woon Kim, 2020)

On hyvä huomioda, että tekoälyyn perustuva autonominen päätöksenteko ei ole vielä riittävän vakaata ja luotettavaa kypsyytason 5 digitaaliin malleihin siten, että ihmisen puuttuminen voitaisiin sulkea huoletta pois. (Yong-Woon Kim, 2020)

4.2.2. Uhlenkamp et al. kypsyyssmalli

Tässä kypsyyssmallissa digitaalista kaksosta arvioidaan seitsemässä kategoriassa, mutta näiden seitsemän kategorian sisällä on yhteensä kolmekymmentäyksi arvioitavaa ominaisuutta. (Jan-Frederik Uhlenkamp et al., 2022)

Malli	Konteksti	Laskentaominaisuudet
DT:n luomisen lähestymistapa	Referenssikohde	Herätetyypit
Mallinnetut ominaisuudet	Aineellisen tuotteen elämänskaaren vaiheet	Mallin ennakointiperspekti
Digitaaliset mallityypit	Edut	Laskentaominaisuudet
Mallin autenttisuus	Sovellusalue	Päivitysnopeus - Sisääntulo
Mallin ylläpito/huolto		Päivitysnopeus - Ulostulo
Modulaarisuus		
Data	Ohjaus	Integraatio
Datan säilyty	Tajunnan taso	Digitaalisen kaksosen vuorovaikutus
Datan laajuus	Autonomisuuden taso	Hierarkia
Datan laatu	Oppimisen mahdollisuudet	Yhteyden ilmennemismuoto
Datan lähteet		Käyttäjakeskeisyys
Datan tulkitseminen		Organisaatioiden välinen integraatio / Yhteistyö
	Ihmisen ja koneen välinen vuorovaikutus	
	Vuorovaikutuslaitteiden tyypit	
	Ihmisen vuorovaikutuksen mahdollisuudet	

Kuva 8. Uhlenkamp et al. kypsyyssmallin arvioitavat kategoriat ja ominaisuudet, mukailten (Jan-Frederik Uhlenkamp et al. 2022)

Tässä kypsyyssmallissa jokaisesta arvosteltavasta ominaisuudesta annetaan arvosana. Kuinka suuri arvosana voidaan antaa yhdelle ominaisuudelle, riippuu ominaisuudesta. Jokainen ominaisuus arvostellaan arvosanavälillä yhdestä seitsemään. Kuitenkin siten, että esimerkiksi ulostulon päivitysnopeudesta voi antaa maksimissaan yhden pisteen, kun mallin autonomisuuden tasosta voi antaa maksimissaan viisi pistettä. Jokaisella ominaisuudella on olemassa pisteytystaulukko, minkä mukaan pisteitä annetaan, sen

perusteella, sisältääkö digitaalinen kaksonen kyseistä ominaisuutta. Jokaiselle kategorialle annetaan arvosana saatujen pisteiden määränä suhteutettuna maksimipisteisiin. Lopulta kun kaikki arvostukset on annettu taulukoiden perusteella, digitaaliselle kaksole lasketaan keskiarvojen mukaan kypsyystaso. Tässä mallissa paras kypsyystaso on yksi, mikä vaatisi täysiä pisteitä kaikista kategorioista. (Jan-Frederik Uhlenkamp et al., 2022)

4.2.3. Atkinsin/Institution of Engineering and Technology:n kypsyysmalli

Rakennetun ympäristön tekniikan asiantuntijat kehittivät kypsyysmallin heidän teknillisiä taustojaan hyödyntäen. (Yong-Woon Kim, 2020)

Atkins/IET:n digitaalisten kaksosten kypsyysmalli

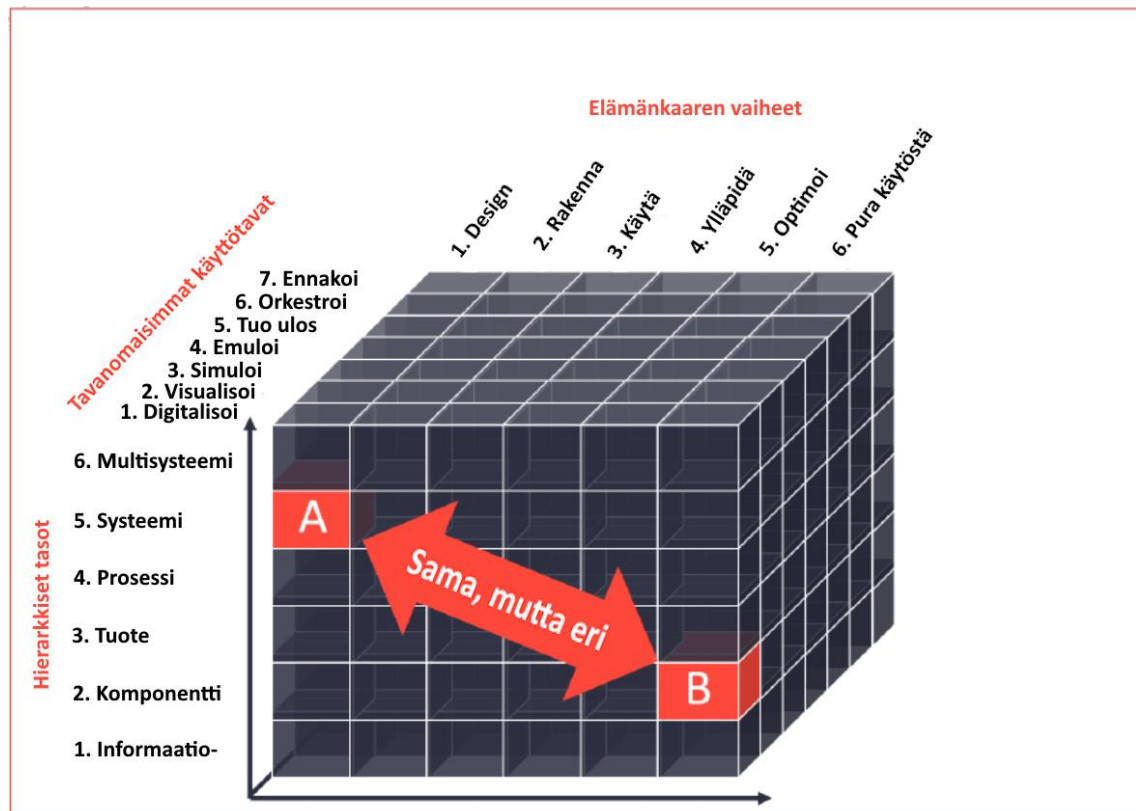
Kypsyys-elementti (logaritminen skaala)	Määrittelevä toimintaperiaate	Käyttötarkoitus
5	Autonomiset operaatiot ja ylläpito	<ul style="list-style-type: none"> Täysin autonomiset operaatiot & ylläpito
4	Kaksisuuntainen datan integraatio ja vuorovaikutus	<ul style="list-style-type: none"> Kauko-ohjattavat ja mukaansatempaavat toiminnot Kontrolloi/ohjaa fyysistä digitaalisesta kautta
3	Ajantasaisella datalla rikastuttaminen (esim. IoT sensoreista)	<ul style="list-style-type: none"> Toiminnallinen tehokkuus
2	Mallin yhdistäminen pysyvään (staattiseen) dataan, metadataan ja BIM tasoon 2 (esim. dokumentit, piirustukset ja digitaalinen aineistohallinta)	<ul style="list-style-type: none"> 4D / 5D simulaatio (esim. aika ja kustannukset 3D lisäksi) Designin/ominaisuuden johtaminen BIM taso 2
1	2D kartta/systeemi tai 3D malli (esim. objektipohjainen, ei metadattaa eikä BIM (Building Information modeling/Tietomalli))	<ul style="list-style-type: none"> Designin/ominaisuuden optimointi ja koordinointi
0	Todellisuuden vangitseminen (esim. pistepilvi, drone kuvamittaus)	<ul style="list-style-type: none"> Alikäyttöinen (olemassa oleva) "kuten rakennettu" katsaus

Kuva 9. Atkinsin/IET:n kypsyysmallitaulukko, mukailen (Yong-Woon Kim, 2020)

Atkinsin/IET:n kypsyysmalli on räätälöity rakennettua ympäristöä varten. Se voidaan huomata käytetyistä avainsanoista kuten *BIM*, *2D*, *3D*, *4D* ja *5D*. Malliin voidaan lisätä käyttötarkoituksia muista BIM-näkökulmista, kuten suorituskyky, elinkaari, kestävyys, energiatehokkuus, ympäristövaikutukset, tilan hallinta, ylläpito, riskit, turvallisuus ja terveys. Tämän vuoksi kyseinen malli soveltuu hyvin rakennettuun ympäristöön. (Yong-Woon Kim, 2020)

4.2.4. IoT analyttikoiden kypsyyssmalli

Tämä kypsyyssmalli sisältää kolme ulottuvuutta ja 252 yhdistelmätapausta. Nämä saadaan yhdistämällä kuusi hierarkkista tasoa, kuutta elinkaarivaihetta ja seitsemän digitaalisen kaksosen yleistä käyttötapaa. Malli voi auttaa hahmottamaan digitaalisen kaksosen tämänhetkisen tilan sekä mihin suuntaan sen on edettävä ja antaa ohjeita kehitystoimiin. (Yong-Woon Kim, 2020)



Kuva 10. IoT analyttikoiden kypsyyssmalli, mukailen (Yong-Woon Kim, 2020)

Kypsyyssmallin ensimmäisessä ulottuvuudessa eli hierarkisissa tasoissa on kuusi tasoa. Ensimmäinen taso on informaatiokaksonen, mikä tarkoittaa digitaalisia esitysmuotoja tiedosta. Toinen taso on komponenttikaksonen, mikä esittää komponenttia tai osia fyysisestä kohteesta. Kolmannen tason tuotekaksonen esittää useaa komponenttia, ja sitä miten ne toimivat yhdessä. Neljäs taso on prosessikaksonen, missä on mahdollista suorittaa usean erillisen yhdessä toimivan tuotteen toimintoja ja ylläpitoa. Viides taso on systeemikaksonen, mikä esittää useita prosesseja tai työnkulkua. Tämä ei rajoitu fyysisiin kohteisiin sallien toimintojen optimoimisen. Kuudes taso on multisysteemikaksonen, mikä esittää useaa systeemiä ja niiden toimintaa yhdessä. (Yong-Woon Kim, 2020)

Toisessa ulottuvuudessa, joka on elämänkaaren vaiheet, on myös kuusi tasoa. Tämä kuvastaa sitä tasoa, missä vaiheessa elämänkaarta digitaalinen kaksosen on menossa. Ensimmäinen taso on suunnittelutaso, missä digitaalinen kaksosen suunnitellaan käyttötarkoitukseensa. Toinen taso on rakentamistaso, milloin digitaalinen kaksosen rakennetaan ja luodaan. Kolmas taso on käyttötaso, jossa digitaalinen kaksosen on aktiivisessa käytössä. Ylläpitotasossa, eli neljännessä tasossa ylläpidetään digitaalista kaksosta esimerkiksi tekemällä muutoksia laitteistoon tai ohjelmistoon. Tämä vaihe sisältää mahdolliset päivitykset. Viides taso sisältää käytön optimisoinnin. Kun käytön aikana on saatu paljon tietoa siitä, miten kohde toimii, tätä tietoa hyödynnetään ja kohteen käyttö optimisoidaan parhaiten katsomalla tavalla. Kuudennessa ja viimeisessä elinkaaren vaiheessa digitaalinen kaksosen puretaan pois käytöstä. Digitaalinen kaksosen laitetaan niin sanotusti eläkkeelle. (Yong-Woon Kim, 2020)

Kolmannessa ulottuvuudessa on seitsemän tasoa. Tämä ulottuvuus pitää sisällään digitaalisten kaksosten tavanomaisimmat käyttötavat. Ensimmäinen taso on digitalisointi, mikä tarkoittaa mitä tahansa digitalisoitua tietoa. Toinen taso on visualisointi, missä digitaalinen kaksosen esittää visuaalisesti fyysistä kohdetta. Kolmas taso on emulaatiotaso, jossa digitaaliseen kaksoseen lisätään fyysisen kohteen emulaatiomalli ja ohjelmisto. Neljännessä tasossa saadaan irti reaaliaikaisia tietovirtauksia. Viides taso orkestroi mallia virtuaalisesti, ohjaten ja päivittäen fyysistä kohdetta. Seitsemäs taso on ennakoiva taso, mikä pystyy etukäteen ennakoimaan, miten fyysinen kohde käyttäytyy. (Yong-Woon Kim, 2020)

4.3. Kypsyysmallin hyödyt

Monelle tuotannon ja logistiikan systeemien suunnittelijalle ja operaattorille jää epäselväksi, kuinka digitaalista kaksosta voidaan käyttää heidän yrityksissään ja minkälainen digitaalisen kaksosen pitäisi olla tai minkälainen se voi olla. Kypsyysmallit auttavat erottamaan hyvät ja huonot digitaaliset kaksoset. Kypsyysmalleja on ollut käytössä jo 25 vuotta prosessien organisaatioiden ja systeemien arvioinnin apuna. Kypsyysmalli on väline, joka arvioi tiettyjä alueita normiin verrattaen. Se auttaa tunnistamaan teknologiset tai organisatoriset mahdollisuudet ja parantaa haluttuja tuloksia. Kypsyysmalli mahdollistaa myös vertailun muiden yritysten ja yksikköjen kanssa. (Jan-Frederik Uhlenkamp et al., 2022)

Jokainen kypsyysmalli ei voi tarjota kaikkia oikeita vastauksia, vaan suuntaviivoja tietystä näkökulmasta. Vaikka ETRI:n kypsyysmalli poikkeaa Atkinsin/IET:n mallista, ne voivat molemmat täydentää toisiaan ja toimia viitteenä. (Yong-Woon Kim, 2020)

5. DIGITAALISEN KAKSOSEN KÄYTTÖESIMERKKEJÄ

5.1. Normet

Normet on suomalainen maanalaisten kaivos- ja tunnelointilaitteiden, rakennuskemikaalien sekä kallionvahvistusratkaisujen ja –palveluiden toimittaja, joka toimii yli 50 paikkakunnalla ja 28 maassa. Digitaalinen kaksonen auttaa Normetia tuotteen koko elinkaaren ajan tutkimuksesta ja kehityksestä lähtien prototyyppien valmistukseen, markkinointiin ja loppukäyttäjien koulutukseen. Digitaalisen kaksoiset ovat Normetilla lyhentäneet uusien koneiden markkinoilletuloaika. (Kalle Määttä, 2019)

Normet käyttää digitaalisiin kaksosiin pohjautuvia simulaattoreita betonin ruiskutus- ja hilseilylaitteiden koko elinkaaren ajan. Digitaalista kaksosta käytetään aluksi tutkimus- ja kehitystyössä sekä uusien tuotemallien ja ohjelmistojen testaamisessa, minkä jälkeen sitä hyödynnetään prototyyppien valmistuksessa. Tuotelanseerauksen jälkeen samoilla simulaattoreilla kerätään palautetta tuotekehitystarpeista ja niitä käytetään asiakaskoulutukseen. Käyttöliittymät käännetään eri kielille markkinointitarkoituksiin. Normet kehittää osia simulaattoreista itse, mutta tekee yhteistyötä Mevean kanssa kehittyneemmän fysiikan simulaation osalta. Normet on tehnyt yhteistyötä Mevean kanssa jo yli vuosikymmenen (Kalle Määttä, 2019)

Normetin ensimmäinen simulaattori luotiin betoniruiskutuskaluston käyttökoulutusta varten. Uusia versioita ja simulaattoreita on kehitetty vuosien varrella. Betoniruiskutuksessa käytettävät kemikaalit ovat kalliita ja oikealla kalustolla henkilöstön kouluttaminen tulisi kalliiksi. Simulaattoreilla henkilökunta pystyy harjoittelemaan realistisissa ympäristöissä parantaakseen taitojaan Normetin käyttämällä kalustolla. Simulaattorit nopeuttavat operaattorin oppimiskäyrää perinteisiin oppimismetodeihin verrattuna. Tämän lisäksi turvallisuusprotokollat voidaan helposti testata simulaatioympäristössä. (Kalle Määttä, 2019)

Normet kehittää jatkuvasti uusia tuotteita ja lisää automaatiotasoa toimintaansa. Tuotekehitykseen tarvittavan ohjelmisto- ja laitetestauksen määrää olisi vaikea järjestää ilman simulaattoreiden apua. Ennen simulaatioita ohjelmistoja ja uusia ominaisuuksia täytyi testata itse koneessa. Iteraatioiden ajaminen oikeilla koneilla, testiympäristön järjestäminen, betoni, lisäaineet ja materiaalit kouluttajille ovat kaikki kalliita.

Simulaattorien ja virtuaalitodellisuuden käyttö on paljon kustannustehokkaampaa. (Kalle Määttä, 2019)

Digitaalisen kaksosen hyödyntäminen nopeuttaa myös uusien tuotteiden kehitystä. Tuotekehityksessä voidaan esimerkiksi suunnitella uudenlainen ruiskutuspuomi tai testiosa puomiin tai koppiin ja varmistaa uuden ratkaisun laatu asiakkaiden kanssa ennen yhdenkään oikean osan tilaamista. Jos jokin osa tarvitsee lisää kehitystä, se voidaan suunnitella yhdessä virtuaalisessa todellisuudessa. Tämän ansiosta ei tarvitse tehdä yhtä montaa prototyyppiä fyysiseen maailmaan. (Kalle Määttä, 2019)

Mevean digitaalisten kaksosten teknologiaa hyödyntäen Normetin käyttöön on myös luotu SmartSpray-betoniruiskutusjärjestelmä, mikä helpottaa laitteen käyttäjää ruiskuttamaan tasaisen ja riittävän paksun kerroksen haluttuun pintaan. (Kalle Määttä, 2019)

5.2. Suomen maanmittauslaitos

Kaupunkisuunnittelussa ja rakentamisessa digitaalisia kaksosia hyödynnetään jo. Sen lisäksi uusia soveltamiskohteita löytyy laajasti uusilta aloilta. Maanmittauslaitoksen tuottama kansallinen laserkeilaus- ja ilmakuva-aineisto tarjoaa tärkeän perustan digitaalisille kaksosille Suomeen. (Antti Jakobsson et al., 2023)

Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus FGI kehittää digitaalisia kaksosia sekä niiden luomiseen tarvittavia menetelmiä. Dataa tuotetaan metsistä ja jopa marjoista. Yhdistämällä sijaintitietoon ajantasaista tietoa saadaan aikaiseksi digitaalisia kaksosia reaali maailmasta. Yksi esimerkki tänä päivänä käytössä olevista digitaalisista kaksosista on Ilmatieteen laitoksen reaaliaikaiset havainnot ja niiden perusteella tehdyt mallit. Toisena esimerkkinä digitaalisista kaksosista toimii Fingridin kantaverkonhallintajärjestelmä. (Antti Jakobsson et al., 2023)

Suomen metsäkeskuksella, Metsähallituksella ja Maanmittauslaitoksella on yhteinen hanke, missä testataa uusia mahdollisia kansallisten laserkeilaus- ja ilmakuvausohjelmien resolluutiota, joiden avulla pystyttäisiin tulevaisuudessa muodostamaan metsien digitaalinen kaksonen. Maanmittauslaitos tuottaa ajantasaista tietoa, mitä voidaan hyödyntää digitaalisten kaksosten kehittämisessä ja tutkimuksessa, koko Suomen

laajuudelta. Maanmittauslaitos tuottaa maankattavat sijaintireferenssit, joiden avulla esimerkiksi kaupunkien ja metsien digitaaliset kaksoiset voidaan linkittää toisiinsa. (Antti Jakobsson et al., 2023)

Puulajit tunnistava algoritmi on saatu toimimaan ja Maanmittauslaitoksella on työn alla digitaalinen kaksonen Suomen metsistä, josta pystyttäisiin katsomaan puiden läpimitta, puulaji ja tilavuus. (Antti Jakobsson et al., 2023)

Kehitteillä on myös valuma-alueiden digitaalinen kaksonen, joka tuottaisi tietoa muun muassa virtaamasta ja veden laadusta. Tämä digitaalinen kaksonen vaatii kuitenkin uudenlaista teknologiaa. (Antti Jakobsson et al., 2023)

5.3. Virtual Singapore –projekti

Teknologian johtajat Singaporessa visualisoivat valtionsa viimeistä yksityiskohtaa myöten. He suunnittelevat *Virtuaalista Singaporea*, mikä on korrekti joka tavalla. Yksityiskohdat ovat oikein sekä rakennusten ja teiden, että ovien, ikkunoiden, puistonpenkkien ja katulamppujen osalta. (Adam Stone, 2017)

Smart Nation and Digital Government Office suunnittelee ja priorisoi *Smart Nation* -hankkeita ja ajaa digitaalista muutosta. Sen tavoitteina on tarjota pitkän aikavälin valmiuksia julkiselle sektorille ja edistää yleisön ja teollisuuden omaksumista ja osallistumista digitalisaatioon. Osana *Smart Nation* -hanketta Singapore halusi kehittää älykkään kaupunkiympäristön hätäevakuoinneista mukavaan kaupunkiasumiseen ja kaikesta siitä väliltä. (Daniel Pereira, 2023)

Maailman ensimmäinen digitaalinen kaksonen valtiosta. Tulvien aiheuttamien vahinkojen, jatkuvien tulvien uhkan sekä valtion pienen pinta-alan vuoksi vuonna 2012 päätettiin, että Singaporesta luodaan 3D kartta, jonka avulla Singaporea voitaisiin päivittää vastaamaan näitä uhkia paremmin. (Andy Walker, 2023)

Projektia nimeltä *Virtual Singapore* alettiin kehittää digitaalisiin kaksosiin tarkoitetulla ohjelmistolla, minkä tarjoaa Bentley Systems. Singaporea skannattiin lentokoneilla ja monilla muilla ajoneuvoilla, joissa oli laser-skannereita kiinni. Kaikki saatu tieto yhdistettiin yhteen alustaan ja asukkaiden annettiin tarkistaa ja varmistaa paikkatietoja oikeiksi. Vuonna 2023 valmiiksi tullut *Virtual Singapore* on ensimmäinen valtion

digitaalinen kaksonen, mikä tunnustetaan ja hyväksytään digitaaliseksi kaksoseksi. (Andy Walker, 2023)

Reaaliaikaista tietoa sisältävä digitaalinen kaksonen voi myös auttaa hätäpalveluita suunnittelemaan pelastustoimia katastrofitilanteissa ja evakuointiskenaarioissa. Myös väkijoukon hajoamista pystytään simuloimaan. Digitaalisen kaksosen avulla voidaan myös analysoida liikennevirtoja ja täten estää pullonkaulojen muodostumista suunnittelussa. (Andy Walker, 2023)

Suuren määrän tietoa sisältävä ja säilyttävä kaksonen varmistaa myös, että rakentamisesta ja infrastruktuurista saadut opetukset opitaan ja jaetaan ennen kuin ne aiheuttavat laajoja ja kalliita kaupunkisuunnitteluongelmia. Digitaalinen kaksonen antaa suunnittelijoille näin ollen paremmat välineet paremman maan rakentamiseen. (Andy Walker, 2023)

YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tarkoituksena oli tutustua digitaalisen kaksoisen historiaan, ominaisuuksiin sekä potentiaaliin. Tämän lisäksi tätä konseptia oli tarkoitus pystyä lokeroimaan ja hahmottamaan helpommin käsiteltäviksi käsitteiksi. Tämän tavoitteen tueksi tässä työssä tutustuttiin myös erilaisiin kypsyysmalleihin, joita on tehty nimenomaan digitaalisia kaksosia varten.

Työn ensimmäisessä käsittelykappaleessa tutustutaan digitaalisen kaksoisen käsitteeseen yleisesti ja käydään läpi digitaalisten kaksosten historiaa. Konseptina digitaalinen kaksonen on ollut pitkään olemassa. 1960-luvulla tietokoneet olivat huomattavasti yksinkertaisempia. Silloin tietokoneet eivät pystyneet pyörittämään raskaita mallinnuksia. Silloin esimerkiksi analyyttisillä kaavoilla pystyttiin ratkaisemaan täsmällisiä tilanteita suhteellisen tehokkaasti. Teknologia otti nopeasti suuria harppauksia eteenpäin eikä varsinaista loppua kehitykselle näy. Tällaiset konseptit, kuten digitaaliset kaksoset, joita ei ennen pystytty toteuttamaan, ovat nykypäivänä täyttä totta. Tämä kehitys ja uudet mahdollisuudet tuovat mukanaan myös uusia ongelmia ratkaistavaksi. Nykypäivän monimutkaiset mallit sisältävät niin paljon tietoa, että tämän tiedon hyödyntämisestä koituu uusi ongelma. Aikaisemmin käytetyt analyyttiset laskentakaavat ovat joissain tilanteissa tehokkaampia laskuvälineitä kuin digitaaliset mallit, sillä ne vastaavat haluttuun kysymykseen. Monimutkaiset mallinnukset sisältävät paljon niin sanottua *hukkatietao*, minkä vuoksi laskennan lopputulos voi olla heikompi.

Toinen käsittelykappale tarkastelee hieman eri tapoja, miten digitaalisia kaksosia pystytään ryhmittelemään ilman kypsyysmalleja, vaikka viimeinen esimerkki osoittautuu hyvin lähelle kypsyysmalliajattelua.

Kolmannessa käsittelykappaleessa käydään läpi erilaisia kypsyysmalleja ja sitä, miten niitä pystytään hyödyntämään ja miksi niitä on olemassa. Digitaalinen kaksonen on hyvin laaja-alainen käsite, mutta sitä pystytään pilkkomaan erilaisiin osiin haluttujen toiminnallisuuden ja ominaisuuksien mukaan. Lisäksi kun digitaaliset kaksoset on pilkottu ominaisuuksien mukaan, voi ominaisuuksien sisällä olla vielä tasoja siitä, kuinka hyvin digitaalinen kaksonen ottaa sen huomioon. Erilaiset kypsyysmallit toimivat hyvänä tukena siihen, että tiedetään juuri, minkälaisesta digitaalisesta kaksosesta puhutaan. Erilaiset kypsyysmallit myöskin antavat hyviä rajapylviä sitä varten, että digitaalisia

kaksosia voidaan verrata toisiinsa nähden. Loppujen lopuksi kypsyysmallit ovat kuitenkin ohjenuoria, eivätkä absoluuttisia oikeita vastauksia.

Viimeisessä käsittelykappaleessa käydään läpi muutamia käytännön esimerkkejä siitä missä nykypäivänä käytetään digitaalisia kaksosia. Digitaaliset kaksoset ovat yksi tulevaisuuden suurimpia trendejä. Yhä useammat yritykset ottavat digitaalisia kaksosia ja niiden pohjalta tehtyjä simulaattoreita käyttöön. Niillä pystytään optimoimaan, suunnittelemaan, simuloimaan ja kouluttamaan niin kustannustehokkaasti, että yritykset, jotka eivät ala pikkuhiljaa integroimaan digitaalisia kaksosia omaan toimintaansa, jäävät lopulta jälkeen.

LÄHDELUETTELO

Adam Stone, (2017) Virtual Singapore Is More Than Just a 3-D Model, It's an Intelligent Rendering of the City [viitattu 6.4.2024] Saatavilla: <https://www.govtech.com/fs/virtual-singapore-is-more-than-just-a-3-d-model-its-an-intelligent-rendering-of-the-city.html>

Andy Walker, (2023) Singapore's digital twin – from science fiction to hi-tech reality [viitattu 5.4. 2024] Saatavilla: <https://infra.global/singapores-digital-twin-from-science-fiction-to-hi-tech-reality/>

Antti Jakobsson, Heli Laaksonen, Juha Hyypä ja Harri Kaartinen, (2023). Todellisuuden virtuaalinen versio, digitaalinen kaksonen, helpottaa päätöksentekoa ja testausta [viitattu 5.4.2024] Saatavilla: <https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankohtaista/todellisuuden-virtuaalinen-versio-digitaalinen-kaksonen-helpottaa-paatoksentekoa-ja>

Brett Metcalfe, Hendriek C. Boshuizen, Jandirk Bulens ja Jasper J. Koehorst, (2023) Digital twin maturity levels: a theoretical framework for defining capabilities and goals in the life and environmental sciences [viitattu 6.4.2024] Saatavilla: <https://f1000research.com/articles/12-961>

Christian Foss, (2022). Mikä rakennuksen digitaalinen kaksonen oikeasti on? [viitattu 20.3.2024] Saatavilla: <https://www.nordicbim.com/fi/bimblogi/mik%C3%A4-rakennuksen-digitaalinen-kaksonen-oikeasti-on>

Csaba Ruzsa, (2021). Digital twin technology - external data resources in creating the model and classification of different digital twin types in manufacturing [viitattu 14.2.2024] Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.032>

Daniel Pereira, (2023) Speculative Design: “Virtual Singapore” is a Massive, Fully Functional Digital Twin of the Asian City-State [viitattu 5.4.2024] Saatavilla: <https://www.oodaloop.com/archive/2023/05/23/speculative-design-virtual-singapore-is-a-massive-fully-functional-digital-twin-of-the-asian-city-state/>

Diego M. Botin-Sanabria, Adriana-Simona Mihaita, Rodrigo E. Peimbert-Garcia, Mauricio A. Ramirez-Moreno, Ricardo A. Ramirez-Mendoza ja Jorge de J. Lozoya-

Santos, (2022) Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review [viitattu 6.4.2024] Saatavilla: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/6/1335>

Fei Tao, Meng Zhang ja A.Y.C. Nee, (2019). Digital twin driven smart manufacturing [viitattu 14.2.2024] Saatavilla: https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=PvKGDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=digital+twin+driven+smart+manufacturing&ots=hmToHHIhpk&sig=EoD_BQMnhy5W4jQTpak6t_QPdyI&redir_esc=y#v=onepage&q=digital%20twin%20driven%20smart%20manufacturing&f=false

Jan-Frederik Uhlenkamp, Jannicke Baalsrud Hauge, Eike Broda, Michael Lütjen, Michael Freitag ja Klaus-Dieter Thoben, (2022). Digital Twins: A Maturity Model for Their Classification and Evaluation [viitattu 26.3.2024] Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9807313>

Kalle Määttä, (2019). Success Story: Normet [viitattu 5.4.2024] Saatavilla: <https://mevea.com/success-stories/normet-2/>

Michael Grieves, (2023). Digital Twins: Past, Present and Future [viitattu 16.2.2024] Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/371119916_Digital_Twins_Past_Present_and_Future

Radiana Pit, (2021). The Accelerated Adoption of Digital Twins in 2020 – And What That Means for 2021 [viitattu 20.3.2024] Saatavilla: <https://www.copperberg.com/the-accelerated-adoption-of-digital-twins-in-2020-and-what-that-means-for-2021/>

Tatu Uutela, (2022) Digital Twin –katsaus [viitattu 6.4.2024] Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/751722/Uutela_Tatu.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Yong-Woon Kim, (2020). Digital Twin maturity model [viitattu 26.3.2024 ja 4.4.2024] Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/346470132_Digital_Twin_maturity_model

