



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Mikko Axelsson

## **Datakeskusten ympäristövaikutukset**

Millaisilla menetelmillä pystymme luomaan hiilineutraaleja datakeskuksia?

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö

Tietojärjestelmätieteen Pro gradu -tutkielma

Vaasa 2022

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Mikko Axelsson		
<b>Tutkielman nimi:</b>	Datakeskusten ympäristövaikutukset Millaisilla menetelmillä pystymme luomaan hiilineutraaleja datakeskuksia?		
<b>Tutkinto:</b>	Kauppätieteiden maisteri		
<b>Oppiaine:</b>	Tietojärjestelmätiede		
<b>Työn ohjaaja:</b>	Tero Vartiainen		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2022	<b>Sivumäärä:</b>	72

---

**TIIVISTELMÄ:**

Datakeskusten olemassaolo on välttämättömyys tietojärjestelmien ja nykyaikaisen informaatioteknologian olemassaololle. Datakeskusten päätehtävänä on tallentaa ja käsitellä kaikkea globaalisti tuotettua sähköistä dataa. Datan määrän räjähdysmäinen kasvu on johtanut datakeskusten energiankulutuksen suureen kasvuun. Datakeskusten tuotannosta aiheutuvan energian kulutuksen hiilidioksidipäästöt ovat nousseet samalle tasolle kuin lentoliikenteestä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Tutkimukset osoittavat datakeskuksista syntyvien hiilidioksidipäästöjen olevan hyvin ajankohtainen ongelma. Hiilineutraalien datakeskusten olemassaolo on vasta nostamassa päätään globaaleissa keskusteluissa ja on löydettävä vastaus siihen, kuinka hallitaan jatkuvasti kasvava datamäärä kestävällä tavalla. Pro gradu -tutkielman tutkimusongelmana on, millaisilla menetelmillä luodaan hiilineutraaleja datakeskuksia? Tutkimuksen tavoitteena on määrittellä tilanne, jossa datakeskusten hiilikädenjälki on keskuksissa syntyvää hiilijalanjälkeä suurempi.

Tämän työn tutkimusmenetelmänä toimii suunnittelutiede ja tutkimus toteutettiin suunnittelutieteisiin kehitetyn DSRM-mallin vaiheiden mukaisesti. Suunnittelutiede tukee tutkimusta, sillä tutkimusmenetelmän tarkoituksena on luoda uutta ja innovoida sen sijaan, että käsiteltäisiin jo olemassaolevia ratkaisuja. Aineiston keräämisessä on hyödynnetty kirjallisuuskatsausta alan kirjallisuudesta, jonka jälkeen tämä aineisto on käsitelty DSRM-mallissa luoden artefakti ratkaisemaan tutkielman tutkimusongelma.

Tutkimuksen tuloksena selvisi, että kestävä kehityksen mukaisten datakeskusten tuotantoon vaikuttavat seuraavat kolme päätekijää. 1) Datakeskusten käyttämän energian alkuperä: hyödynnetäänkö datakeskusten käyttämässä energiassa uusiutuvia energianlähteitä vai fossiilisia energianlähteitä. 2) Datakeskusten lokaatio: rakennetaanko datakeskuksia suurkaupunkeihin tukemaan niiden massiivisia tiedonkäsittelytarpeita ja tarjoamaan nopeampaa tiedonkulkua vai energian kulutuksen kannalta edullisimmille viileän ilman vyöhykkeille, joissa viileää ilmastoa voidaan käyttää apuna datakeskusten jäähdytyksessä. 3) Datakeskuksista syntyvä hukkalämpö: hyödynnetäänkö datakeskusten toiminnasta jälkituotteena syntynyttä lämpöä kaukolämpöverkoissa vai päästetäänkö tämä hukkalämpöä ilmakehään.

Tutkimuksessa on luotu artefakti, joka määrittää kolmeportaisen vaatimusmääritelmän datakeskuksille. Datakeskuspalveluita tarjoavien toimijoiden tulee noudattaa luotua artefaktia ja sen jokaista askelmaa toimintaohjeen mukaisesti. Artefaktissa on hyödynnetty jo olemassa olevia teknologioita ja koottu niistä yhtenäinen kokonaisuus. Tutkimus sekä siihen liittyvä kirjallisuuskatsaus osoittaa, että meidän on mahdollista luoda hiilineutraaleja datakeskuksia maapallolle. Jatkotutkimusta varten jääkin jäljellä kysymys siitä voimmeko luoda hiilinegatiivisia datakeskuksia keskittymällä yllä mainittuun kolmeen päätekijään?

---

**AVAINSANAT:** datakeskus, hiilidioksidi, päästö, hiilineutraalius, informaatioteknologia, kestävä kehitys, uusiutuvat energianlähteet

## Sisällys

1	Johdanto	6
1.1	Tutkimuksen tausta ja kohde	6
1.2	Tutkimuksen tavoitteet, tutkimusongelma ja rajaus	8
1.3	Tutkielman rakenne	9
2	Kestävä kehitys	10
2.1	Ympäristövastuu, sosiaalinen vastuu ja hyvä hallintotapa (ESG)	12
2.2	ISO -standardit	14
2.3	Ilmastonmuutos	15
2.3.1	Hiilijalanjälki	17
2.3.2	Hiilikädenjälki	18
3	Tieto- ja viestintäteknologian murros	20
3.1	Datakeskuksen määritelmä	22
3.1.1	Datakeskusten tavoitteet	25
3.1.2	Datakeskusten tarve	26
3.1.3	Tulevaisuuden ennusteet	29
3.2	Energian tarve	30
3.3	Tehokkuuden suhdeluvut	33
3.3.1	PUE (Power Usage Effectiveness- Energiankäytön tehokkuus )	34
3.3.2	CUE (Carbon Usage Effectiveness- Hiilen käytön tehokkuus)	36
3.3.3	WUE (Water Usage Effectiveness- Veden käytön tehokkuus)	37
4	Suunnittelutiede	39
4.1	Tutkimusmenetelmän hyödyntäminen tässä tutkimuksessa	44
4.2	Ongelman tunnistaminen ja motivointi	46
4.3	Tavoitteiden määrittäminen	47
4.4	Suunnittelu ja kehittäminen	48
4.5	Demonstraatio	51
5	Diskussio	60
5.1	Tutkimuksen ja tulosten arviointi	60

5.2	Jatkotutkimusmahdollisuus	63
	Lähteet	64

## Kuviot

<b>Kuvio 1.</b> Ympäristö vastuu, Sosiaalinen vastuu ja Hyvä hallintotapa(ESG) -kaavio	<b>13</b>
<b>Kuvio 2.</b> Ilmakehän CO <sub>2</sub> (ppm) määrän ja Globaalin lämpötilapoikkeaman (°C ) muutos 1960-2020 välillä. (NOAA 2021)	<b>16</b>
<b>Kuvio 3.</b> Varsinainen ja ennustettu tiedon määrän kasvu maailmanlaajuisesti välillä 2010-2035. *Arvot 2018 jälkeen ennusteita. (Armstrong 2019)	<b>28</b>
<b>Kuvio 4.</b> Arvioitu sähköenergian kulutus (Jones 2018).	<b>31</b>
<b>Kuvio 5.</b> Sähkön kokonaiskulutus datakeskuksessa. (Cho ja muut 2012, s.190).	<b>32</b>
<b>Kuvio 6.</b> Tietojärjestelmien tutkimuskehys (Hevner ja muut 2004, s. 80).	<b>40</b>
<b>Kuvio 7.</b> DSRM -prosessimalli (Peffer ja muut, 2007, s. 54).	<b>42</b>
<b>Kuvio 8.</b> Regressioanalyysi maailmanlaajuisesta datakeskusten keskimääräisestä PUE arvosta. (Liu ja muut 2020 s. 227)	<b>47</b>
<b>Kuvio 10.</b> Kolmen askeleen artefakti. (Zhang ja muut 2011, s.143; Lee& Chen 2013, s.111; Lu ja muut 2011, s.3371)	<b>52</b>
<b>Kuvio 11.</b> GreenWare -järjestelmä (Zhang ja muut 2011, s. 146).	<b>54</b>
<b>Kuvio 12.</b> Jäähdytysinfrastruktuuri HACA -järjestelmä. (Lu ja muut, 2011, s. 3361)	<b>55</b>

# 1 Johdanto

Tämän luvun tarkoituksena on tutustuttaa lukija tutkimuksen kohteeseen, esittää lukijalle tutkimuksen taustaa sekä selventää tutkimuksen kulkua. Tämä osio avaa lukijalle datakeskusten energian tarpeen kasvuun vaikuttavia syitä. Kappaleessa käydään läpi kasvanutta energiankulutusta sekä kasvaneen energiankulutuksen syy-seuraussuhdetta hiilidioksidipäästöjen kasvuun. Johdannon toisessa osiossa keskitytään tutkimuksen tavoitteiden asettamiseen, tutkimusongelman realisoimiseen sekä tutkimuksen rajauksiin liittyviin asioihin.

## 1.1 Tutkimuksen tausta ja kohde

Vuodesta 2009 lähtien useilla uusilla teknologioilla on ollut laaja vaikutus kaikilla tieto- ja viestintäteknologioiden aloilla. Pilvipalvelutoiminta lupaa mittakaavaetua niin pääoma- kuin toimintakusannusten osalta, nopeat langattomat verkot takaavat lähes kaikkialle maailmassa ulottuvaa verkkoyhteyttä ja pienelektroniikka (älypuhelimet sekä tablettitietokoneet) tarjoavat käyttöliittymät uuden sukupolven tieto- ja viestintäteknologian infrastruktuurin hyödyntämiseksi. (Corcoran & Andrae 2013, s.1).

Huolimatta siitä, että nämä kuluttajien nykypäiväiset tieto- ja viestintäteknologiat voisivat vähentää yhteiskunnan uuden digitaalisen elämäntavan kokonaiskustannuksia on myös tehty tutkimuksia, jotka kattavat kuluttajien viestintä ja teknologia -laitteiden hyödyntämien viestintäverkkojen ja niihin liittyvien datakeskusten kasvaneita energiakustannuksia. (Corcoran & Andrae 2013, s.1).

Datakeskuksia voidaan luonnehtia Internetin aivoiksi. Datakeskusten tehtävänä on käsitellä, tallentaa ja välittää kaikkea sitä dataa, jota käytämme yhteiskunnassa. Tämä data koostuu videoiden suoratoistopalvelusta, sähköpostin käytöstä, sosiaalisesta

mediasta tai lähes mistä vain verkkoyhteistyöstä. (AGCI, 2020). Datakeskusten toimintamallista riippuen ne voivat palvella, niin sisäisiä kuin myös ulkoisia käyttäjiä tai molempia näitä käyttäjäryhmiä yhdessä (Etna, 2020).

Datakeskukset käyttävät erilaisia tietotekniikkalaitteita edellä mainittujen palveluiden tarjoamiseen, nämä kaikki laitteet toimivat sähköllä. Palvelimet laskevat erilaisia algoritmeja vastauksena tietopyyntökysymyksiin, tallennusasemat tarjoavat käyttäjille tiedostot, joissa palvelupyyntöjen vastaukset sijaitsevat ja verkkolaitteet yhdistävät datakeskuksen Internetiin. Tämä kokonaisuus mahdollistaa saapuvan ja lähtevän tiedonsiirron. Näiden tietotekniikkalaitteiden käyttämä sähkö muuttuu viime kädessä lämmöksi, joka pitää poistaa datakeskuksista. Lämmön poistaminen tapahtuu yleisesti jäähdytysjärjestelmillä, jotka myöskin toimivat sähköenergian avulla. (AGCI, 2020).

Vuonna 2014 Yhdysvalloissa keskimäärin palvelimet ja jäähdytysjärjestelmät veivät suurimman osan suorasta sähkökäytöstä datakeskuksissa molemmat noin 43 prosenttia. Loput sähkökulutuksesta syntyi tallennusasemien ja verkkolaitteiden käytöstä. (Shehabi, 2016). Maailman suurimmat palvelinkeskukset voivat sisältää useita kymmeniä tuhansia tietoteknisiä laitteita ja voivat vaatia jopa 400 MW (megawatin) energiantarpeen. (AGCI, 2020).

Internetin globaalien käyttäjämäärien jatkuva kasvu on myös lisännyt datakeskuspalveluiden kysyntää ja samalla herättänyt huolta datakeskusten energiankäytön kasvusta. Vuodesta 2010 vuoteen 2018 globaali IP-liikenne (Internet Protocol) on kasvanut yli kymmenkertaiseksi. Samaan aikaan globaali datakeskusten tallennuskapasiteetti on kasvanut 25 kertaiseksi. (Masanet ja muut, 2020, s. 984). Kasvun myötä on herännyt huoli datakeskusten kuluttamasta energiasta ja niistä syntyvistä päästöistä. *"Datakeskusten energiakäyttö on ydinkysymys, kun etsimme ratkaisuja ilmaston lämpenemisen hidastamiseen. Hiilidioksidipäästöjä datakeskusten toiminnasta syntyy yhtä paljon kuin lentoliikenteestä"* (Lindqvist, 2020 s.38).

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet, tutkimusongelma ja rajaus

Tässä Pro gradu -tutkielmassa on tarkoituksena selvittää datakeskusten energiankulutusta sekä niiden hiilijalanjälkeä. Tutkielmassa tuodaan esille energiankulutukseen sekä hiilidioksidipäästöihin vaikuttavat tekijät datakeskusten osalta. Tutkimuksen päätavoitteena on selvittää kuinka pystymme luomaan datakeskuksista täysin hiilineutraaleja toimijoita. Tavoitteena on myös tarkastella paradigmaa, jossa datakeskusten hiilikädenjälki on hiilijalanjälkeä suurempi.

Työssä on käytetty akateemisissa lähteissä julkaistuja tilastoja ja pyritty hyödyntämään näitä tilastoja tätä tutkielmaa tukeviksi. Tutkielman tavoitteena on löytää vastaus siihen, kuinka luoda datakeskuksista hiilineutraaleja toimijoita suunnittelututkimuksen avulla.

Suunnittelututkimus koostuu kuudesta eri vaiheesta: *ongelman tunnistaminen ja lukijan motivointi, ratkaisuun tarvittavien tavoitteiden määrittäminen, suunnittelu ja kehittäminen, esittely sekä arviointi ja tuloksen julkistaminen* (Peffer ja muut. 2007, s. 47). Peffer ja muut (2007, s. 47) toteavat, että suunnittelututkimuksessa on mahdollista käyttää tutkimusparadigmoja, joiden tutkimustulokset ovat enimmäkseen tutkimusta selittäviä, mutta ei niinkään sovellettavissa olevia käytännön ratkaisuja.

Tutkielman teoreettisen osan muodostaa datakeskusten energiankulutus, datakeskuksista aiheutuvat hiilidioksidipäästöt sekä päästöihin vaikuttavat kestävän kehityksen osa-alueita käsittelevä koti- ja ulkomainen kirjallisuus. Tutkimusympäristöstä kerättävänä aineistona toimii ammattilehdissä esiintyvät haastattelut asiantuntijoiden äänen osalta. Tutkielman tutkimusongelmana on, millaisilla menetelmillä pystymme luomaan hiilineutraaleja datakeskuksia? Tutkielma ottaa kantaa globaalisti datakeskusten toimintaan eikä maantieteellisiä rajoituksia olla määritelty tutkimuksen osalta.



### 1.3 Tutkielman rakenne

Tutkielma koostuu viidestä pääluvusta, jotka voidaan jakaa kahteen osioon teoriaosioon sekä tutkimusosioon. Teoriaosuus koostuu johdanto-osuuden lisäksi kahdesta teorialuvusta. Näistä ensimmäisen tarkoituksena on käydä läpi maapalloa uhkaavaa ilmastonmuutosta sekä mahdollisia keinoja muuttaa ihmiskuntannan toimintatapoja kestävämpään suuntaan. Osiossa käydään läpi kestävän kehityksen periaate, ESG-raportointimalli, ISO-standardit sekä ilmastonmuutokseen vaikuttavat hiilidioksidipäästöt.

Viimeisessä teoriaosuudessa keskitytään tutkimuskohteen eli datakeskusten vallitsevaan tilanteeseen sekä siihen vaikuttavien muuttujien läpikäymiseen. Osio alkaa tieto- ja viestintäteknologian murroksen läpikäynnillä ja johdattelee lukijan tämän hetken tilanteeseen datakeskusten osalta. Siihen kuinka tiedon määrä on kasvanut räjähdysmäisesti maapallolla ja millaisia resursseja tulevaisuuden kysyntä datakeskusten osalta tulee vaatimaan.

Tutkielman jälkimmäinen osuus eli tutkimusosuus pitää sisällään luvut neljä ja viisi. Ensimmäisessä näistä paneudutaan johdantoa tarkemmin tutkimusmenetelmiin, kuinka tutkimusmenetelmiä tullaan hyödyntämään tässä tutkielmassa. Tunnistetaan olemassa oleva ongelma ja pyritään löytämään vastaus siihen, kuinka ratkaistaan ongelma datakeskuksista aiheutuneista hiilidioksidipäästöistä.

Viimeisessä pääluvussa on tutkimuksen diskussio. Diskussion tarkoituksena on tuoda esille tutkimuksen vallitsevat tulokset ja analysoida niitä asioita ja teemoja, joita tulisi ottaa huomioon tulevaisuuden datakeskuksissa. Diskussio antaa sekä lukijalle että tutkijoille suuntaviivoja tutkimusongelman ratkaisuun.

## 2 Kestävä kehitys

Kestävällä kehityksellä on ympäristöllisiä, poliittisia ja kulttuurisia ulottuvuuksia unohtamatta myös taloudellisia vaikutuksia globaalissa yhteiskunnassa. Kestävän kehityksen tavoite edellyttää kaikkien näiden osa-alueiden parantamista tavoilla, jotka ovat sopusoinnussa kestävän kehityksen toteutumiseen. Tähän haasteeseen lukeutuu paitsi kehitysmaiden elintason parantaminen kestäväällä tavalla, myös kestäättömien teollistuneiden valtioiden toimintatapojen muuttaminen kestävämmiksi käytännöiksi. (Holdren, 2007, s. 737).

Sivilisaation kyky vastata tähän valtavaan haasteeseen on riippuvainen meidän yhteiseen tietämykseen luonnontieteistä sekä teknologian antamista mahdollisuuksista. Haasteeseen vaikuttaa myös tietämyksemme yhteiskuntatieteistä, sosiaalisesta teknologiasta, liiketoiminnasta, hallituksien ja lakien muodosta sekä halusta yhdistää nämä elementit kestävän ja hyvinvoivan globaalien yhteiskunnan tavoitteeksi. Mikään edellä mainituista elementeistä ei ole yhtä haastava kuin energiaratkaisut. Tämä johtuu osittain siitä, että energiansaanti on tiivisti sidoksissa kansalliseen ja kansainväliseen turvallisuuteen sekä moniin haitallisiin ympäristöongelmiin, aina sisäilman laadusta maailmanlaajuiseen ilmastonmuutokseen. (Holdren, 2007, s. 737).

Teollisen vallankumouksen aikana lähtökohtaisesti tehtaiden energiankulutus pohjautui fossiilisten polttoaineiden sekä kivihiilen käyttöön, josta syntyy jälkituotteena hiilidioksidipäästöjä ilmakehään. Teknologian vallankumouksen aikana elämme kuitenkin aikaa, jolloin datakeskusten on mahdollista valita myös kestävämpiä energiavalintoja ja näin mahdollisesti vähentää hiilidioksidipäästöjään sekä sitoutua kantamaan vastuuta palveluidensa hiilijalanjäljestä. (Greenpeace International, 2011, s. 4). Tämä on yksi esimerkki teknologian mahdollisuuksista parantaa kestävän kehityksen näkökulmaa.

Vuonna 2015 Yhdistyneiden kansakuntien jäsenmaat solmivat globaalit kestävän kehityksen tavoitteet New Yorkissa järjestetyssä huippukokouksessa. Tavoitteena oli luoda ohjeet kestävän kehityksen edistämiseksi vuoteen 2030 asti. YK:n päämääränä tavoitteiden asettamiselle oli muuttaa globaalin kehityksen suuntaan niin että ihmisten hyvinvointi ja ihmisoikeudet, talouden vaurastuminen ja yhteiskuntien tasapaino turvataan ympäristön kantokykyä rasittamatta. Tämän lisäksi päämäärään kuului äärimmäisen köyhyyden poistaminen maailmasta. (Suomen YK-liitto, 2017, s. 1)

Tämä päämäärä "*Agenda 2030*" sisältää yhteensä 17 tavoitetta sekä 169 tarkentavaa alatavoitetta. Nämä tavoitteet koskevat kaikkia maailman maita yhtäläisesti sekä ne tulisivat nähdä kaikkien meidän yhteisinä tavoitteina. Tavoitteiden täyttyminen edellyttääkin jokaisen yhteiskunnan toimijan osallistumista sekä panosta toimia kestävän kehityksen periaatteella. Yksityisen sektorin aktiivisuus näiden tavoitteiden täyttymiselle on merkittävässä roolissa kansallisten hallitusten lisäksi. (Suomen YK-liitto, 2017, s. 2-3).

Globaaleille yrityksille *Agenda 2030* tarjoaa kansainvälisen kestävän kehityksen viitekehyksen ja samalla tuo esille maailman laajuiset haasteet, joiden ratkaisemisesta yritykset voivat luoda uudenlaista liiketoimintaa. (Suomen YK-liitto, 2017, s. 2-3). Kestävän kehityksen *Agenda 2030* toteutuskeinoihin sisältyy uusia keinoja, kuten teknologian edistämismekanismit ja teknologiapankki. Näiden toteutuskeinojen avulla pyritään helpottamaan kohtuuhintaisten ja kestävien teknisten ratkaisujen siirtoa vähiten kehittyneille maille kehitys- ja ympäristöongelmien ratkaisemiseksi. (Managi ja muut, 2021, s. 1).

Managin ja muiden (2021, s.1) mukaan aiemmat pyrkimykset rakentaa toimivia mekanismeja teknologian leviämiseen YK:n tasolla ei kuitenkaan anna juurikaan aihetta optimistisyyteen. Useinmiten nämä ponnistelut ovat johtaneet mekanismejen epäjohtonmukaiseen hajaantumiseen YK:n eri yksiköiden välillä sekä yhteisen

institutionaalisen rakenteen puuttumiseen, jonka avulla pystyisimme suorittamaan tasapuoliset koordinointi- ja fasilitointitehtävät näiden mekanismien jakamisen osalta.

Poliittisella kentällä on myös merkityksensä tavoitteiden saavuttamisessa niin teknologiapoliitiikan, kehityspoliitiikan, ulkopoliitiikan, turvallisuuspolitiikan kuin kauppapolitiikan osa-alueilla (Suomen YK-liitto, 2017, s. 3). Tämä voi kuitenkin aiheuttaa ristiriitoja yhteisten tavoitteiden saavuttamiseksi.

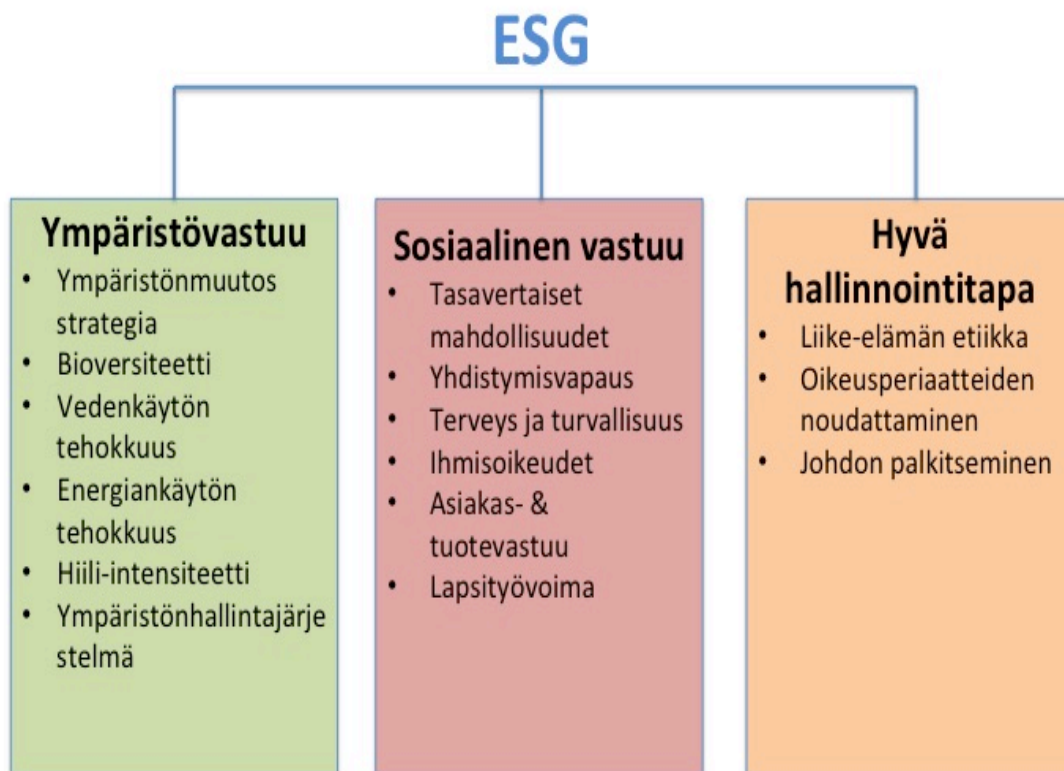
Sosioekonomisen kehityksen eri vaiheissa olevat maat tarvitsevat hyvin erilaisia teknologiapoliitiikan tavoitteita ja mekanismeja riipuen heidän tilanteestaan. Teollisuusmaat saattavat haluta käyttää tiettyjä tiede-, teknologia- ja innovaatiopoliittisia ratkaisuja auttaakseen teollisuuttaan säilyttämään tai lisäämään kilpailuetuaan globaaleilla markkinoilla. Kehitysmaiden poliitikot taas saattavat haluta käyttää hyvin erilaisia strategioita suojellakseen vastasyntyntä kotimaista teollisuuttaan tai sosiaalisten peruspalveluidensa tarjoamisen varmistamiseksi. (Managi ja muut, 2021, s. 2).

Yritysten vastuullisuutta on myös alettu tarkastelemaan ja mittaamaan. Yhtenä globaalisti tunnettuna mittausjärjestelmänä käytetään ESG (Ympäristövastuu, sosiaalinen vastuu ja hyvä hallintotapa) arviointikehikkoa. ESG arviointikehikön lisäksi yritysten vastuullisuuden arvioinnin apuna voidaan hyödyntää myös kansainvälisiä ISO standardeja.

## **2.1 Ympäristövastuu, sosiaalinen vastuu ja hyvä hallintotapa (ESG)**

Ympäristövastuu, sosiaalinen vastuu ja hyvä hallintotapa englanniksi lyhennettynä ESG muodostuu sanoista environmental, social ja corporate governance. ESG:n tavoitteena on ottaa huomioon taloudellisten tekijöiden lisäksi ympäristölliset, sosiaaliset (yhteiskunnalliset) sekä hallinnolliset tekijät sijoituspäätöksiä tehdessä. ESG:tä

voidaankin pitää arviointikehikkona yritysten vastuullisuutta analysoitaessa. ESG on tietynlainen arvio yrityksen tunnollisuudesta sosiaalisten ja ympäristötekijöiden suhteen. Tyypillisesti arvio kootaan yrityksen aineettomiin hyödykkeisiin liittyvistä tiedoista. Näitä tietoja käytetään lukemattomiin erityistarkoituksiin ja niiden perimmäisenä tavoitteena on mitata yrityksen tai liiketoiminnan kestävyys ja yhteiskunnallisiin vaikutuksiin liittyviä elementtejä. (Kocmanová ja muut, 2016, s.1-2). Kuvio 1. on mallinnettu millaisia muuttujia ESG arviointikehikko voi esimerkiksi pitää sisällään.



**Kuvio 1.** Ympäristö vastuu, Sosiaalinen vastuu ja Hyvä hallintotapa(ESG) -kaavio

Pedersenin ja muiden (2020, s. 572) mukaan ESG arviointikehikolla on kaksi erilaista roolia. ESG antaa tietoa yrityksen perustekijöistä sekä vaikuttaa sijoittajien mieltymyksiin. Pedersen ja muut (2020, s. 573) ovat kuvanneet kolmenlaisia sijoittajamalleja. U-tyyppin sijoittajat (ESG-unaware) eivät ole tietoisia ESG-pisteistä ja pyrkivät yksinkertaisesti maksimoimaan ehdottoman varianssin hyödyllisyyden. A-tyyppin sijoittajilla (ESG-aware) on myös varianssin mieltymykset, mutta he käyttävät ESG pisteitä päivittääkseen näkemystään riskeistä ja tuotto-odotuksista. M-tyyppin sijoittajat (ESG-motivated) käyttävät ESG-tietoja ja he haluavat myös korkeita ESG-pistemäärän välillä. Vaikka näiden kolme ominaisuuden; riskien, tuoton ja keskimääräisen ESG luvun optimointi voi kuulostaa mahdottomalta. Pedersen ja muut (2020, s. 573) kuitenkin osoittavat, että sijoittajan ongelmaa optimoidaan näitä kolme ominaisuutta samaan aikaan voidaan vähentää ESG:n ja Sharpen luvun välisellä kompromissillä ja näin mahdollistaa näiden kolmen ominaisuuden optimaalinen suhde.

## **2.2 ISO -standardit**

Yhä useammat organisaatiot ympäri maailmaa ovat ottaneet käyttöön erilaisia hallintajärjestelmä standardeja, joita kutsutaan myös metastandardeiksi. Nämä metastandardit perustuvat erilaisiin johtamisperiaatteisiin ja institutionaalisiin järjestelyihin. Yhtenä metastandardeina toimivat ISO 14001 ja ISO 9001, jotka on omaksuttu yli 1,3 miljoonassa organisaatiossa maailmanlaajuisesti. ISO 9001 -standardi toimii laadunhallintajärjestelmänä eräänlaisena johtamistyökaluna ja se perustuu tehtävien systematisointiin ja formalisointiin. ISO 14001 -standardi on linkitetty yritysten ympäristövaikutuksiin. (Heras-Saizarbitoria & Boiral, 2013 s.47;49).

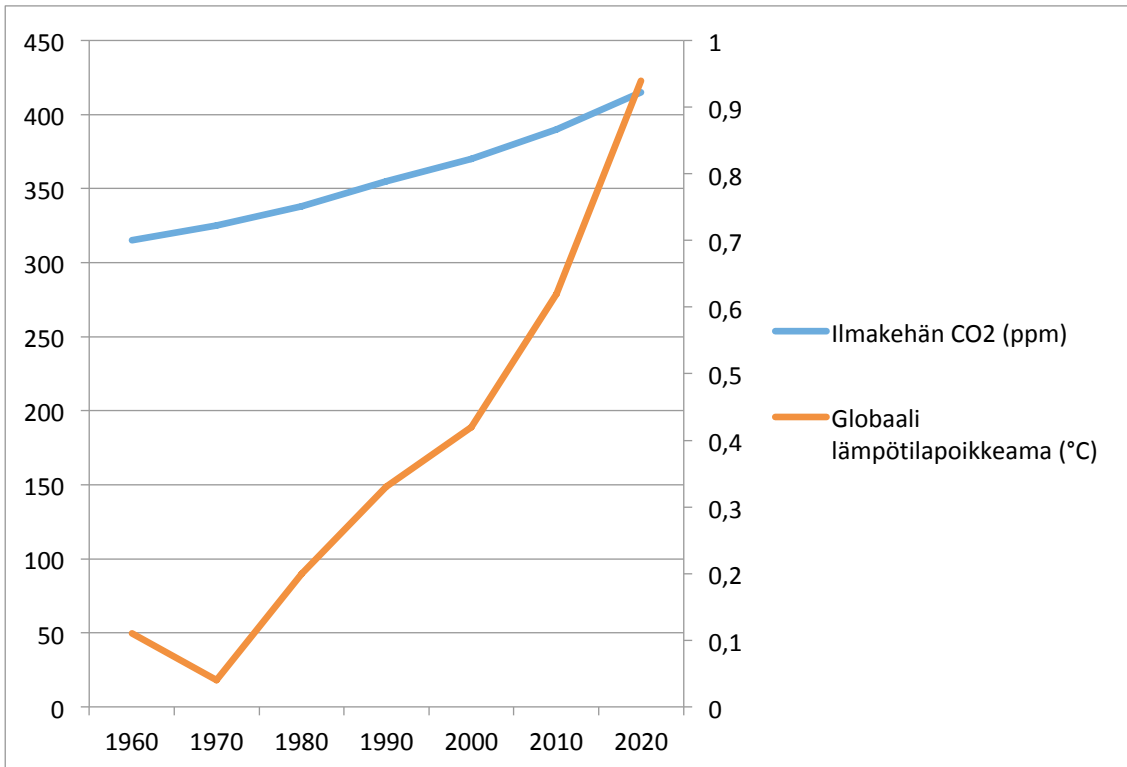
ISO standardijärjestö on kuvaillut ISO 14001 -standardin standardiksi joka asettaa kriteerit ympäristöjärjestelmälle ja tämä järjestelmä on sertifoitaessa. Standardi

kartoittaa puitteet, joita yritys tai organisaatio voi noudattaa rakentaakseen tehokkaan ympäristöjärjestelmän. Standardi toimii suunnitelmana kaikentyyppisille organisaatioille riippumatta niiden toiminnasta tai toimialasta. Standardi voi tarjota yrityksen johdolle ja työntekijöille sekä ulkopuolisille sidosryhmille varmuuden siitä, että ympäristövaikutuksia mitataan ja parannetaan standardin omaamassa yrityksessä. (ISO Internal Organization for Standardization, 2022).

### **2.3 Ilmastonmuutos**

Ihmisten elämän vaikutukset maapallolla viime vuosikymmenten aikana ja erityisesti teollinen vallankumous ovat johtaneet fossiilisten polttoaineiden poltamisesta aiheutuvan kasvihuonekaasujen pääasiassa hiilidioksidin tuotannon jatkuvaan kasvuun. Hiilidioksidin kerääntyminen ilmakehään estää auringonvalosta syntyvien infrapunasäteilyjen ulospääsyn avaruuteen ja tämän seurauksena infrapunasäteily lämmittää maapalloa. (MayorsIndicators, 2008).

Tätä hälyttävää tapahtumaa, jossa maapallon pinnan sekä valtamerien lämpötilat jatkuvasti nousevat kutsutaan ilmaston lämpenemiseksi. Ilmaston lämpeneminen puolestaan saa aikaan ilmaston rajut muutokset, joihin liittyvät pidentyneet kuivuusjaksot, helleaaltojen esiintymisien tihentymiset, rankkasateet sekä muut luonnon katastrofit, kuten vesistöjen tulvimiset. Alla olevassa taulukossa on kuvattu ilmakehän CO<sub>2</sub> ppm muutosta sekä globaalia lämpötilapoikkeamaa vuosien 1960-2020 välillä. (MayorsIndicators, 2008).



**Kuvio 2.** Ilmakehän CO<sub>2</sub>(ppm) määrän ja Globaalin lämpötilapoikkeaman (°C ) muutos 1960-2020 välillä. (NOAA 2021)

Hiilineutraalisuuden määritelmä syntyy, kun hiilidioksidipäästöjä luodaan maksimissaan sen verran kuin hiilidioksidia pystytään sitomaan ilmakehästä hiilinieluihin. Hiilineutraalisuuden eli nollapäästöjen saavuttamiseksi koko maailman kasvihuonekaasupäästöt tulisi kyetä ottamaan talteen. Hiilinieluksi voidaan nähdä esimerkiksi luonnon omat objektit, kuten maaperä, metsät sekä valtameret. Näiden arvioidaan Euroopan parlamentin mukaan sitovan 9,5-11 gigatonnia hiilidioksidia vuosittain. (Euroopan parlamentti, 2021).

Luonnon omien hiilinielujen lisäksi hiilidioksidipäästöjä voidaan kompensoida käyttämällä uusiutuvia energianlähteitä, panostamalla energiatehokkuuteen tai hyväksikäyttää vähähiilisiä teknologioita. (Euroopan parlamentti, 2021). IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) on luonut 1,5 asteen raja-arvosuosituksen, jolloin pystyisimme asiantuntijoiden mukaan vielä ennustamaan maapallolla syntyvää ilmastonmuutosta. Päästäkseen tämän suositellun arvon alle



meidän tulisi saavuttaa hiilineutraalius maapallolla vuosisadan puoliväliin mennessä. Hiilineutraaliuden tavoite on kirjattu myös Pariisin ilmastopöytäkirjaan. Kyseisen sopimuksen on allekirjoittanut 195 maata, EU mukaan lukien.

### **2.3.1 Hiilijalanjälki**

Hiilijalanjäljestä on tullut laajasti käytetty termi ja käsite julkisessa keskustelussa vastuullisuudesta ja ilmastonmuutoksen torjuntatoimissa. Hiilijalanjäljen julkisuus on lisääntynyt viime vuosikymmeninä valtavasti ja se esiintyy laajalti tiedotusvälineissä, politiikassa ja liike-elämässä. On tärkeä ymmärtää mitä konkreettisesti tarkoittaa termi hiilijalanjälki, kuinka sitä mitataan ja mitkä asiat termi kattaa.

Pertsovan (2007, s. 5) mukaan hiilijalanjäljelle on olemassa seuraavanlainen määritelmä. Hiilijalanjälki on hiilidioksidipäästöjen yksinomaisen kokonaismäärän mitta, joka on suoraan ja välillisesti aiheutunut toiminnasta tai joka kertyy tuotteen elinkaaren aikana. Tämä sisältää yksilöiden, väestöryhmien, hallitusten, yritysten, organisaatioiden, prosesseiden ja teollisuuden toiminnan. Siihen kuuluvat palvelut sekä tavarat. Se ottaa huomioon kaikki suorat (paikanpäällä tapahtuvat sisäiset) ja epäsuorat (laitoksen ulkopuoliset, ulkoiset, sisältyneet, alku- sekä loppupäähän) päästöt. Määritelmä ei ilmaise hiilijalanjälkeä pinta-alaperusteisena indikaattorina vaan hiilidioksidin kokonaismäärä mitataan fyysisesti massayksiköissä (Kg, t).

Nimensä mukaisesti hiilijalanjälki sisältää vain hiilidioksidin eikä esimerkiksi metaania, joka on myös yksi kasvihuonekaasuista mikä aiheuttaa myös ilmastonlämpenemistä hiilidioksidin tavoin. Kattavan kasvihuonekaasuindikaattorin tulisi sisältää kaikki nämä kaasut, jotka aiheuttavat maapallolla ilmastonlämpenemistä. Pertsovan (2007, s.6) mukaan kuitenkin käytännöllisin ja selkein ratkaisu on määrällisesti suurimman päästettä aiheuttavan kaasun seuraaminen eli hiilidioksidin.

### 2.3.2 Hiilikädenjälki

Neljäs kansainvälinen ympäristökasvatuskonferenssi vuonna 2007 lanseerasi kädenjälkikonseptin. Kyseinen konsepti käynnistettiin kestävän kehityksen koulutustoiminnan toimenpiteenä, jonka tavoitteena on pienentää ihmisten jalanjälkeä ja tehdä maailmasta kestävämpi. Kädenjälki luotiin erityisesti symboliksi, mittaamaan ja sitouttamaan positiiviseen toimintaan kestään kehityksen edistämiseksi. Kädenjälki-konseptia voidaan soveltaa tuotteeseen, prosesseihin yrityksiin, organisaatioihin tai yksilöihin tietyin sopeutuksin ja siinä voidaan huomioida ympäristöön tai yhteiskuntaan kohdistuvat vaikutukset. (Norris & Phanse, 2015, s.5).

Kädenjäljen käsite on otettu käyttöön mittaamaan ja viestimään toimien myönteisiä muutoksia ja hyödyllisiä vaikutuksia, kun taas jalanjälki mittaa negatiivisia vaikutuksia päästöihin ja resurssien kulutukseen. Organisaatioiden toimet luovat aina jonkinlaisen jalanjäljen, mutta se voi myös tuoda myönteisiä muutoksia ja etuja ympäröivään maailmaan. Arvioita näistä myönteisistä vaikutuksista kutsutaan kädenjäljiksi (Norris & Phanse, 2015, s. 5).

Norrisin ja Phanseyn (2015) mukaan tuotteeseen voidaan luoda kädenjälki joko estämällä tai välttämällä negatiiviset vaikutukset (jalanjäljet), joita muuten olisi syntynyt tai luomalla positiivisia etuja, joita ei olisi syntynyt. joten ympäristökädenjälki huomio sinänsä tuotteen, kokonaisuuden koko elinkaaren tai toimitusketjun. Se kuvaa olennaisesti ympäristöjalanjäljen pienentämistä muun muassa vaihtoehdoisen teknologian valinnan, energiatehokkuuden lisäämisen, kierrätyksen, uudelleenkäytön, resurssien käytön ja kokonaiskulutuksen vähentämiseksi. (Behm ja muut , 2016, s.2)

Kuten jo aiemmin todettiin, hiilijalanjälki on siis omien toimien ympäristöön kohdistuvien negatiivisten vaikutusten summa, kun taas hiilikädenjälki mittaa positiivisia toimia oman tai toisen hiilijalanjäljen pienentämiseksi.

Kunnioitettavana tavoitteena on tehdä hiilikädenjäljestä suurempi kuin hiilijalanjäljestä. Behmin ja muiden mukaan (2016) yrityksille ja organisaatioille hiilikädenjälki auttaa laajentamaan yritys vastuun ulottuvuutta. Hiilikädenjälkeen keskittymällä yritykset voivat myös osoittaa johtajuutta, parantaa omaa suoritus- ja kilpailukykyään, kasvaa kestävämmiksi toimijoiksi sekä edistää monin tavoin yhteiskunnan toimintaa.

### 3 Tieto- ja viestintäteknologian murros

1900-luvun loppupuolella yleisin maailmaa muuttanut tekniikka oli tietokone joka mullisti modernin yhteiskunnan. Tietokoneet yhdistettiin johtamaan yrity maailmaa, hallitsemaan teollisia prosesseja sekä pitämään ihmiset jatkuvasti yhteydessä toisiinsa. Tietoa on nyt helpompi kerätä, löytää ja käyttää kuin koskaan ennen. Se on myös runsaampaa kuin milloinkaan muulloin ihmiskunnan historiassa. (Hilbert & López, 2011, s. 60).

Hilbert ja López (2011, s. 60 ) määrittelivät maailman teknisen kapasiteetin tallentaa, kommunikoida ja hyväksikäyttää tietoa seuraamalla 60 erilaista analogista ja digitaalista tekniikkaa vuosien 1986-2007 välillä. Vuonna 2007 yhteiskuntamme pystyi tallentamaan  $2,9 \cdot 10^{20}$  optimaalisesti pakattua tavua, kommunikoimaan lähes  $2 \cdot 10^{21}$  tavulla ja suorittamaan  $6,4 \cdot 10^{18}$  tavua ohjeita sekunnissa yleiskäyttöisillä tietokoneilla. Tietokoneiden yleiskäyttöinen laskentakapasiteetti kasvoi 58% vuosikasvulla sekä kaksisuuntaisen tietoliikenteen kapasiteetti kasvoi 28% vuosi tahdilla.

Tietokoneiden lisäksi uusien viestintä teknologioiden, kuten älypuhelinien sekä tablettien kasvu ja kehitys on ollut hyvin suurta. Televisioiden siirtyminen perusvastaannottimista digitaalisiksi media- ja viihdekeskuksiksi on ollut vallitseva trendi kulutuselektronikan markkinoilla. Esineiden internet (IoT, Internet of Things) on termi jolla tarkoitetaan kaikkia elektronisia laitteita, jotka ovat integroitavissa esimerkiksi älypuhelinien ohjattavaksi. (Andrae & Edler, 2015, s. 118)

Tietotekniikan avulla voidaan vähentää energiaintensiivisiä toimintatapoja. Tietotekniikan ansiosta ihmiskunnalla on mahdollisuus työskennellä kotona erilaisten puhelinneuvottelujen sekä etätyökalujen ansiosta. Voimme tarkkailla henkilökohtaista sähköenergian käyttöä reaaliajassa ja hallita sitä entistä tehokkaammin. Voimme kuunnella musiikkia suoraan Internetistä, lataamatta kappaleita erikseen älylaitteiden

kiintolevyille. Näillä vaihtoehdoilla meillä on mahdollisuus valita vähemmän energiaa kuluttavia ratkaisuja ja samalla vähentää jokaisen yksilön henkilökohtaisia kasvihuonepäästöjä ja pienentää hiilijalanjälkeä. (Greenpeace International, 2011, s. 4).

Vuonna 2013 ICT-alan kokonaisenergiankulutukseksi vuositasolla arvioitiin 1500 TWh (Terawattituntia), mikä vastaa koko Japanin sekä Saksan yhteenlaskettua sähköntuotantoa. (Mills, 2013, s. 3). Vertailun kohteeksi voidaan ottaa Suomen sähkönkulutus joka oli vuonna 2019 tilastokeskuksen mukaan 86,1 TWh. (Tilastokeskus, 2020). Näiden lukujen valossa vuoden 2013 ICT-alan kokonaisenergiankulutus oli siis yli 17 kertainen koko Suomen sähkönkulutukseen 2019 vuoteen nähden.

Malmodin ja muut (2010, s. 770) toteavat tutkimuksessaan, että tieto- ja viestintä teknologian sektori tuotti 1,3 prosenttia maailmanlaajuisista hiilidioksidipäästöistä vuonna 2007 ja kuluttivat 3,9 prosenttia koko maailman energiantuotosta. Laajaa keskustelua onkin noussut esiin tieto- ja viestintäteknologia (ICT) alan positiivisista sekä negatiivisista ympäristövaikutuksista.

Edellä esitetyt arviot vuosittaisista energiankulutuksen tarpeista sekä niistä syntyvistä hiilidioksidipäästöistä yhdistettynä teknologian jatkuvaan ja myös nopeatempoiseen kehitykseen voi herättää kysymyksiä, kuten kuinka tulemme tulevaisuudessa kattamaan ICT-alasta syntyneen energiankulutuksen tarpeen? ja millaisia päästömääriä näiden tarpeiden kattaminen tulee maapallolle aiheuttamaan?

Vaikka tietojärjestelmät ja erityisesti datakeskukset käyttävät monia runsaasti erilaisia resursseja maapallolta ja voivat aiheuttaa negatiivisia vaikutuksia ympäristöön paikallisesti ja globaalisti, niin ne voivat myös edistää kestävästä kehitystä uusien teknologioidensa ja tarjoamansa tehokkuuden avulla. (Baskerville ja muut, 2016, s. 18).

Informaatioteknologiasta on tullut yhä tärkeämpi kokonaisuus useiden toimialojen kestävästä liiketoiminnastaan. Uudet tietojärjestelmät ovat mahdollistaneet tehokkaampia keinoja asioiden jäljittämiseen, suunnitteluun ja sisäisten prosessien ymmärtämiseen ja näin kasvattaneet toimialojen tehokkuutta. (Andrews, 2019).

Kannustin liiketoimintaprosessien muuttamiseen ei ole puhtaasti ympäristöstä kiinni, vaan muutoksen yhdistelmään on monia syitä. Kestävämpien prosessien rakentamisella on useita erilaisia ulottuvuuksia ja moni kannustimia. Kestävämpien prosessien tuomat edut ovat erilaisia ja käyttötapauskohtaisia. Tämän vuoksi prosessien parannusten mittaaminen ja kvantifiointi on usein erittäin haastavaa. Esimerkiksi resurssitehokkaammaksi tuleminen pitää sisällään vähemmän ympäristövaikutuksia, pienempiä kustannuksia, vähemmän jätettä, vähemmän työtä ja monta muuta laadullista ja määrällistä muuttujaa.

Täytyy kuitenkin muista, että liiketoimintaprosessien muuttaminen ei koskaan ole täysin ilmaista. Tapauksesta riippuen siirtyminen voi aiheuttaa erilaisia lisäkuluja. Tuottavuus voi esimerkiksi laskea liiketoimintaprosessien siirtymisen oppimis- ja käyttöönottovaiheessa. Yleisesti tarkkojen muutosten laskeminen etukäteen uusissa järjestelmätoteutuksissa ei ole mahdollista.

### **3.1 Datakeskuksen määritelmä**

Datakeskus on valtava laitos, jossa on kerättyä yhteen suuri määrä prosessointitehoa tukemaan erilaisia tarpeita. Tällaisten datakeskusten koostumus vaihtelee tapauskohtaisesti, mutta lähes yksinomaan datakeskukset käyttävät erikoislaitteita, jotka tarjoavat korkean luotettavuuden ja turvallisuuden. (Wu & Buyya 2015, s.155). Datakeskuksen suorituskyky luokitellaan yleensä tasoryhmiin, mitä korkeampi luotettavuus sitä korkeampi taso. (Turner ja muut, 2006, s. 3).

Datakeskukset sisältävät kriittisiä tietoteknisiä resursseja valvotuissa ympäristöissä ja keskitetyssä hallinnassa, mikä mahdollistaa yritysten ympärivuotokautisen toimintansa heidän tarpeittensa mukaan. Nämä tietotekniset resurssit sisältävät seuraavat keskusyksiköt. Verkko- ja sovelluspalvelimet, tiedosto- ja tulostuspalvelimet, sovellusohjelmistot ja niitä käyttävät käyttöjärjestelmät, tallennusjärjestelmät ja verkkoinfrastruktuurin, riippumatta siitä onko kyseessä IP-osoite vai SAN-tallennusväliverkko. (Arregoces & Portolani, 2004, s. 5).

Sovellukset vaihtelevat sisäisistä taloudellisista ja henkilöresursseista, ulkoiseen verkkokauppaan ja yritysten välisiin sovelluksiin. Lisäksi monet palvelimet tukevat verkkotoimintoja ja verkkopohjaisia sovelluksia. Verkon käyttösovelluksiin sisältyy NTP (Network Time Protocol), TN3270, FTP (File Transfer Protocol), DNS (Domain Name System), DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol), SNMP (Yksinkertainen verkkohallintaprotokolla), TFTP (Trivial File Transfer Protocol), NFS (Verkkotiedostojärjestelmä) sekä verkkopohjaiset sovellukset, mukaan lukien IP-puhelinliikenne, videoiden suoratoisto IP osoitteen avulla, IP-videoneuvottelut ja kaikki muut verkossa toimivat palvelut. (Arregoces & Portolani, 2004, s. 5).

Datakeskukset ovat yksinkertaisesti selitettyinä huoneita tai rakennuksia, joissa sijaitsee runsaasti elektronisia laitteita. Datakeskuksia voidaan myös kutsua palvelinkeskuksiksi tai vaihtoehtoisesti tietokone- tai konesaleiksi. Yhdysvaltain ympäristövirasto määrittelee datakeskuksen seuraavasti. Datakeskus koostuu ensisijaisesti palvelimista, tallennuslaitteista sekä verkkolaitteista, jotka yhdessä käsittelee, tallentaa sekä välittää digitaalista tietoa. Tämän lisäksi datakeskuksissa on erikoistuneita sähkövirtaa ja ympäristöä valvovia laitteita, joiden avulla datakeskukset tuottavat oikean määrän energiaa ja pitävät keskusten lämpötilan sekä kosteuden asianmukaisena viestintä ja kommunikaatiolaitteiden osalta. (Geng, 2015, s. 4).

Termien datakeskus ja pilviteknologia välillä vallitsee usein epäselvyyttä sekä mahdollisia väärinymmärryksiä. Perinteisellä datakeskuksella tarkoitetaan yritysten

sisäistä tietojen laskentalaitosta, kun taas pilviteknologia kuvaa yleisesti ulkopuolista kolmannen osapuolen palvelua (Saha ja muut, 2016, s.3).

Termin selventämiseksi on hyvä erottaa datakeskukset omistajuuden perusteella. Historiallisesti paikalliset datakeskukset (On-prem datacenters) sijaitsivat organisaatioiden omilla tiloillaan. Tietojen määrän ja niiden hallintatarpeiden kasvaessa ulkoistamisesta on tullut yhä suotuisampaa.

Pilvipalveluiden tarjoajat suunnittelivat ratkaisuja kasvaneeseen tiedostojen määrän hallintaan ja auttoi yrityksiä ympäri maailmaa ulkoistamaan tallennustilaa ja sovelluksia sekä lopulta koko datakeskusten hallinnan. Tämän johdosta pilviratkaisut ovat tyypillisesti luokiteltu kolmeen kategoriaan; julkinen, yksityinen ja hybridi. Saha ja muut (2016, s.4) erottavat perinteisen ja pilvi datakeskuksen toisistaan ja näitä voidaan verrata paikalliseen yrityksen yksityiseen datakeskukseen ja julkiseen pilvi datakeskukseen.

Alan johtajilta (Microsoft & Google, 2021) kerättyjen tietojen mukaan edellä esitetyt kolme kategoriaa; julkinen pilvi, yksityinen pilvi ja hybridimalli ovat avattuna omistajuuden perusteella seuraavaksi;

**Julkisen pilven** omistaa kolmas osapuoli tai palveluntarjoaja ja käyttäjillä on pääsy pilven resursseihin internet yhteyden kautta. Julkisessa pilviratkaisussa asiakas kuitenkin jakaa nämä pilvessä olevat resurssit muiden asiakkaiden kanssa, eikä hänellä ole tietoa siitä, mitkä muut sovellukset toimivat samalla laitteistolla. Joskus jopa sovellusta isännöivän datakeskuksen sijaintia ei julkisteta käyttäjille/asiakkaille. Muihin ratkaisuihin verrattuna julkisen pilven palvelusopimuksissa on yleensä alhaisemmat kustannukset, vähemmän huoltotarvetta, vähemmän monimutkaisuutta ja korkea skaalautuvuus aste.



**Yksityinen pilvi** on tarkoitettu vain yhdelle organisaatiolle. Sen mukana tulee yleensä korkeampi tietojen itsemääräämisoikeus, tietoturva, parempi saatavuus ja organisaatiolle räätälöity muotoilu joka perustuu organisaation omiin tarpeisiin. Yksityisen pilven voi myös omistaa ja ylläpitää kolmas osapuoli, mutta tällöin palveluntarjoajan tulee tarjota asiakkaalleen ainutlaatuisia pilviresursseja. Riippuen liiketoiminnan tarpeista ja tietosuojaan liittyvistä lakisääteisistä vaatimuksista, organisaatiota voidaan pakottaa ylläpitämään datakeskusta ilman ulkopuolista palveluntarjoajaa. Tällainen paikanpäällä tapahtuva hallinta voidaan nähdä yksityisen pilven erikoistapauksena ja tällöin puhutaan organisaation omasta datakeskuksesta. Yksityinen pilviratkaisu voidaan suunnitella täydellisesti yrityksen tarpeisiin. Tämän johdosta datakeskus kykenee tarjoamaan nopeamman, luotettavamman ja turvallisemman tietojen hallintajärjestelmän, jos datakeskuksen kokonaisuus on suunniteltu oikein. Tämä lisää tietysti organisaatiossa runsaasti kustannuksia sekä sen yksityisen datakeskuksen hallinta vie organisaatiolta myös huomattavasti enemmän resursseja kuin julkinen vaihtoehto.

**Hybridimalli** yhdistää edellä esitettyjen julkisen ja yksityisen datakeskuksen ominaisuuksia. Edellä mainitut vaatimukset saattavat siis pakottaa organisaation ylläpitämään omaa yksityistä datakeskusta tiettyjen tietojen hallinnoinnissa, mutta osa tiedoista voidaan siirtää julkiseen datakeskukseen hallittavaksi ja näin hyötyä osasta julkisen datakeskuksen eduista. Tässä skenaariossa sovellusten on toimittava molemmissa ympäristöissä ja käyttäjän tulee tietää mihin eri tiedot tallennetaan.

### **3.1.1 Datakeskusten tavoitteet**

Datakeskusten tarjoamiin etuihin kuuluvat yrityskeskeiset tavoitteet, kuten ympärivuorokautinen tuki erilaisille liiketoiminnoille, yritystoiminnan kustannusten ja liiketoiminnan ylläpitoon tarvittavien kokonaiskustannusten alentaminen ja sovellusten nopea käyttöönotto sekä tietoteknisten resurssien yhdistäminen. Edellä

mainittujen liiketoiminnallisten tavoitteiden saavuttamiseksi datakeskukset tarjoavat tietoteknillisiä ominaisuuksia. Tietoteknillisiksi ominaisuuksiksi voidaan nähdä sovellusten, palvelimien sekä datakeskusten yhdistäminen tietoturvallisesti keskusten sisällä, sovellusten integrointi asiakkaiden ja palvelimien välillä verkkopalveluiden avulla sekä tallennustilojen yhdistäminen yhtenäiseksi kokonaisuudeksi. (Arregoces & Portolani, 2004, s. 6).

Nämä tietoteknilliset ominaisuudet luovat yhdistelmän, jonka tarkoituksena on puuttua lyhytaikaisiin ongelmiin sekä luoda yrityksille pitkän aikavälin strategista suuntaa. Ominaisuudet vaativat arkkitehtonista lähestymistapaa tarpeettoman epävakauden välttämiseksi. Tämän vuoksi suunnittelu kriteereinä datakeskuksissa tulisi keskittyä niiden saatavuuteen, skaalautuvuuteen, turvallisuuteen sekä hallittavuuteen. (Arregoces & Portolani 2004, s. 6).

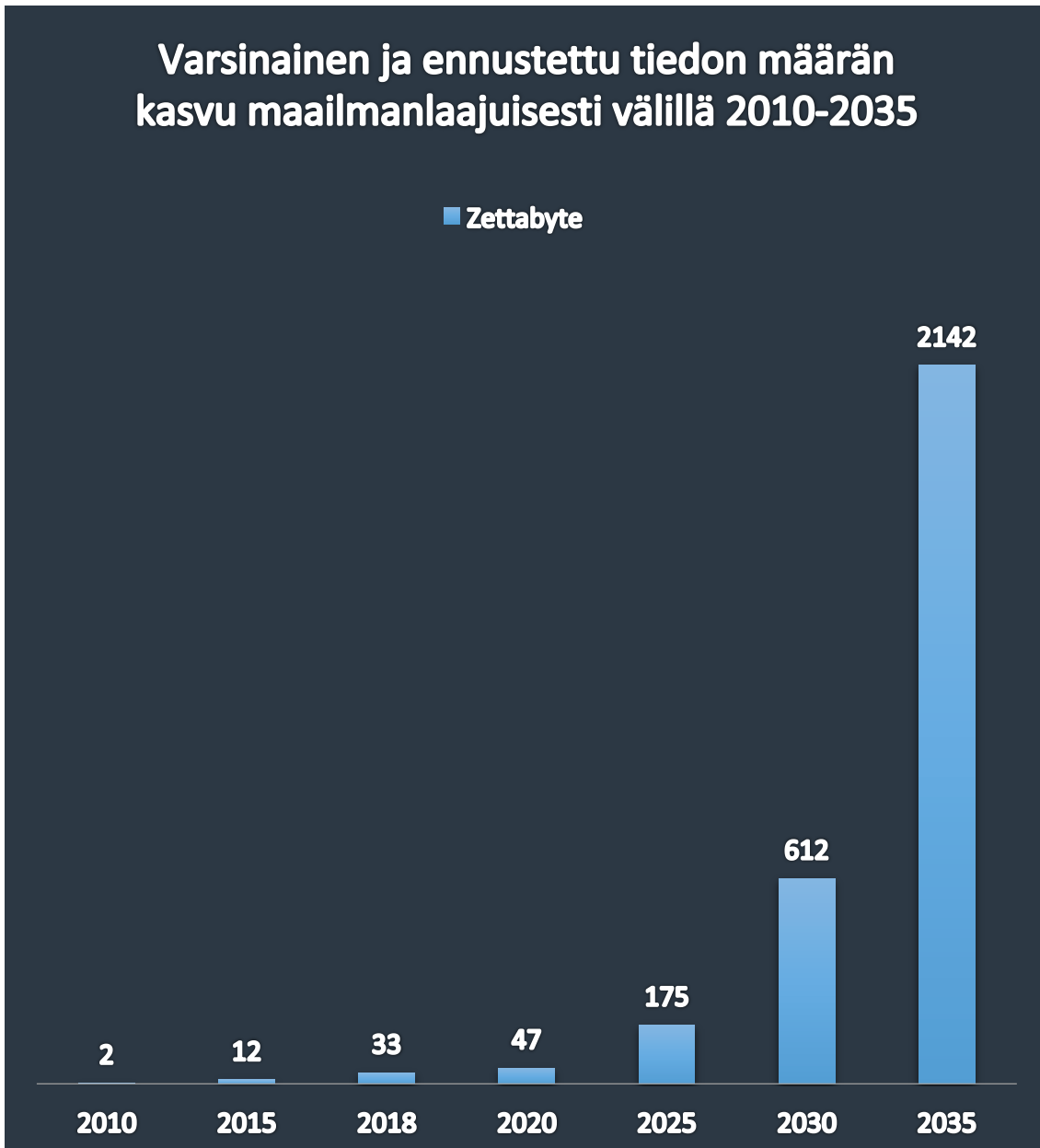
Greenberg ja muut (2009, s. 51) mukaan ketterän ja kustannustehokkaan datakeskuksen tulisi sallia resurssien dynaaminen allokointi suurille palvelinaltaille. Erityisesti palvelinkeskuksen verkon tulisi mahdollistaa minkä tahansa palvelimen osoittaminen mille tahansa palvelulle. Ketteryys parantaa Greenbergin ja muiden (2009, s. 51) mukaan datakeskusten riskienhallintaa sekä kustannusäästöjä. Ilman tätä ominaisuutta, jokaiseen tarjottuun palveluun tulisi etukäteen jakaa tarpeeksi palvelimia, joiden avulla datakeskukset pystyisivät vastaamaan niihin kohdistuviin mahdollisiin kysynnän piikkeihin.

### **3.1.2 Datakeskusten tarve**

Yhteiskuntamme vaatii valtavan määrän tietojen hallintaa ja tämä määrä kasvaa joka vuosi. Hallittavan tiedon määrän kasvu on johtanut ennennäkemättömään kasvuun myös datakeskusten osalta. Kasvuun on vaikuttanut erilaisten uusien teknologioiden synty. Näistä yhtenä esimerkkinä esineiden internet (Internet of Things, IoT).

Kehityksen suuntaus ei myöskään näytä pysähtyvän vaan ennusteet arvioivat sen eksponentiaalista kasvua. Yritysanalyttikoiden ja tietöalusta Statistan tuoreet luvut viittaavat siihen, että olemme vasta alussa tiedon luomisen räjähdysmäisen kasvun osalta. (Armstrong, 2019).

Kuvassa kaksi on visualisoitu Statistan suuntaa antavia arvioita perustuen vuoden 2018 arvoon ja globaalin tiedon määrän kasvusta. Ennustus osoittaa tiedostojen määrän kasvavan yli 500 prosenttia vuoteen 2025 asti. Vuoteen 2030 tultaessa ennusteen mukaan kasvua olisi yli 1800 prosenttia ja vuoteen 2035 mennessä yli 6400 prosenttia. Suunnilleen samat kasvuluvut löytyvät myös uusimmista julkisesti saatavilla olevista Ciscon Global Cloud Indexin ennusteista (Cisco, 2020, s. 25 ). Ciscon ennusteiden mukaan datakeskusten tietoliikenne kasvaa vuosittain noin 25 prosenttia. Tämän johdosta Cisco arvio datakeskusten tietoliikenteen kasvavan noin kolminkertaiseksi joka viides vuosi.



**Kuvio 3.** Varsinainen ja ennustettu tiedon määrän kasvu maailmanlaajuisesti välillä 2010-2035. \*Arvot 2018 jälkeen ennusteita. (Armstrong 2019)

Koska datakeskuksia voidaan pitää tieto- ja viestintäteknologian pääkomponenttina, niin on selvää, että Internet-liikenteen kasvu on vaikuttanut myös datakeskusten määrään sekä niiden tehokkuuden kasvun tarpeeseen.

Datakeskukset tarjoavat keskeiset toiminnot, joita ovat tiedostojen varastointi, suojaaminen ja käsittely. Tieto- ja viestintäteknologian vilkkaan kasvun johdosta

datakeskukset ovat kehittyneet muutaman palvelimen kokoisista kaapissa sijaitsevista kokonaisuuksista satojen tuhansien neliömetrien kokoisiksi laitoksiksi, jotka tarjoavat tarvittavan tuen Internetin, sosiaalisen median ja seuraavien sukupolvien elektronisten laitteiden eksponentiaaliselle kasvulle. (Laurent ja muut , 2020, s. 2).

### 3.1.3 Tulevaisuuden ennusteet

Andrae ja Edler (2015, s. 117) ovat esittäneet kolme erilaista skenaariota viestintäteknologioiden sähköenergian tarpeesta vuosien 2010–2030 välille. Skenaariot arvioivat kuluttajalaitteiden, viestintäverkkojen sekä datakeskusten käytöstä ja tuotannosta aiheutuneita energiakustannuksia. Skenaarioista on luotu kolme eri tasoa, *paras*, *odotettu* sekä *huonoin*. Nämä arviot koostuvat vuosittaisista teknologialaitteiden myyntimääristä, dataliikenteen määrästä sekä sähköintensiteetin tehokkuudesta.

Andrea ja Edler (2015, s. 117) arvioivat huonoimman skenaarion mukaan viestintäteknologia sähkötarpeeksi 51 prosenttia maailman sähköenergiasta 2030 vuoteen mennessä, jos kiinteiden sekä langattomien verkkojen sähköhyötysuhdetta ei pystytä parantamaan eikä datakeskusten tehokkuutta kyetä kasvattamaan. Andrea ja Edlerin (2015, s. 117) mukaan vuonna 2030 maailmanlaajuisesti tuotettu uusiutuva sähköenergia ylittää todennäköisesti datayhteyksien sekä datakeskusten kokonais sähkötarpeen.

Huolimatta siitä, että datayhteyksien sekä datakeskusten sähkötarpeen ylittävä määrä energiaa tuotettaisiin uusiutuvalla energialla, pahimman skenaarion mukaan Andrea ja Edler (2015, s. 117) ovat arvioineet, että viestintäteknologian sähköenergian käyttö aiheuttaisi jopa 23 prosenttia maailmanlaajuisista kasvihuonepäästöistä vuonna 2030. Tämän määrän arvioidaan Jonesin (2018, s. 164) mukaan olevan tällä hetkellä 2 prosenttia.

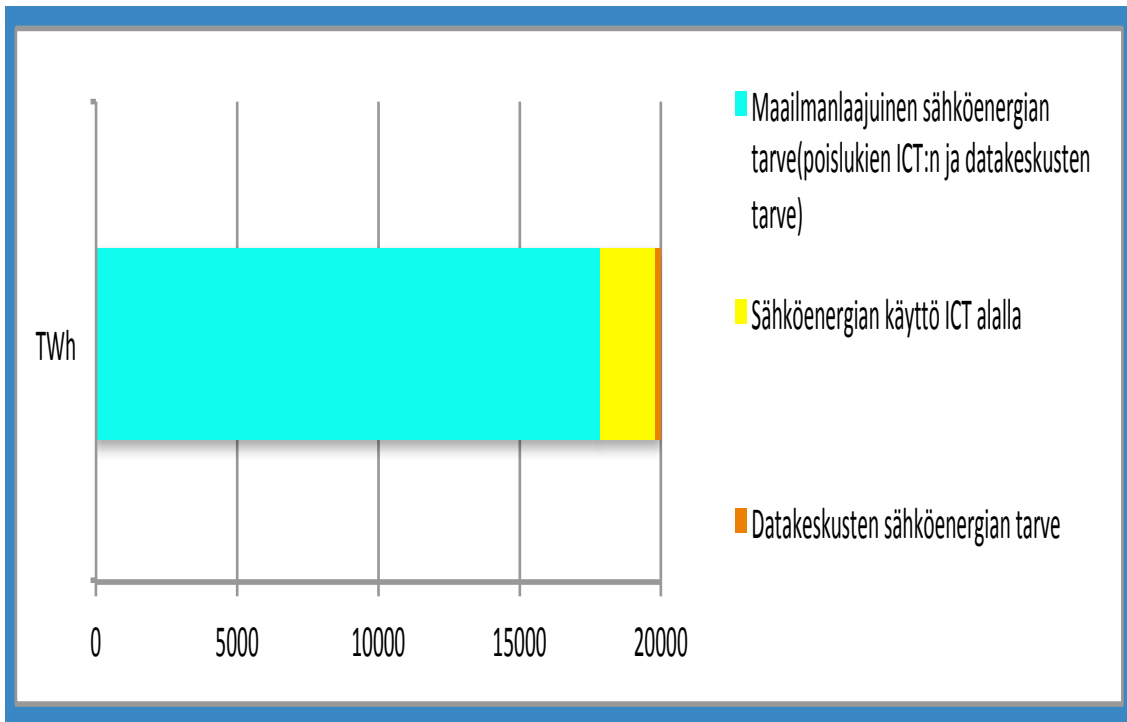
Yllä mainitut lukemat ovat huonoimman skenaarion tuotoksia, jotka Andrea sekä Edler (2015) tutkimuksensa avulla saivat aikaisiksi. Lukemat ovat kuitenkin hyvin hälyttäviä, jonka johdosta datayhteyksien sekä datakeskusten toimintaa tulee jatkuvasti kehittää. Seuraavassa luvussa perehdytään käytössä oleviin arviointia sekä seuraamista edistäviin suhdelukuihin, jotka on luotu arvioimaan datakeskusten kvantitatiivisia tuloksia.

### **3.2 Energian tarve**

Datakeskusten infrastruktuurin kasvu valtaviksi konesaleiksi täynnä palvelimia sekä IT-laitteita digitaalisen tiedon käsittelyyn, tallentamiseen ja lähettämiseen on muuttanut datakeskusten energiantarvetta sekä tapaa miten energiantarve jakaantuu datakeskuksien sisällä. Nämä edellä mainitut palvelimet sekä IT-laitteet kuluttavat sähköenergiaa toimiessaan ja ne voidaan Songin ja muiden (2015, s. 1256) mukaan nimetä datakeskuksien eniten energiaa kuluttaviksi kokonaisuuksiksi.

Datakeskusten tarve on kasvanut rajusti viime vuosikymmenien aikana, jonka johdosta myös niiden käyttämän sähköenergian määrä on kaksinkertaistunut vuosien 2000 ja 2005 välillä. Datakeskusten sähkönkulutuksen arvioitiin olevan yli 1,3 prosenttia koko maailman sähkönkulutuksesta vuonna 2013 ja tämän tarpeen uskotaan kasvavan joka vuosi. (Ebrahimi ja muut 2014, s.623)

Jones (2018) taas arvioi globaalin sähkön kokonaiskulutuksen olevan noin 20 000 TWh vuodessa. Tästä ICT-ala kuluttaa saman arvion mukaan noin 10 prosenttia eli 2 000 terawattituntia (TWh) ja datakeskusten sähköenergian tarve on arvioitu olevan noin 200 TWh eli 1 prosentti. Alla oleva taulukko kuvaa visuaalisesti yllä arvioidun sähkön kulutuksen.



**Kuvio 4.** Arvioitu sähköenergian kulutus (Jones 2018).

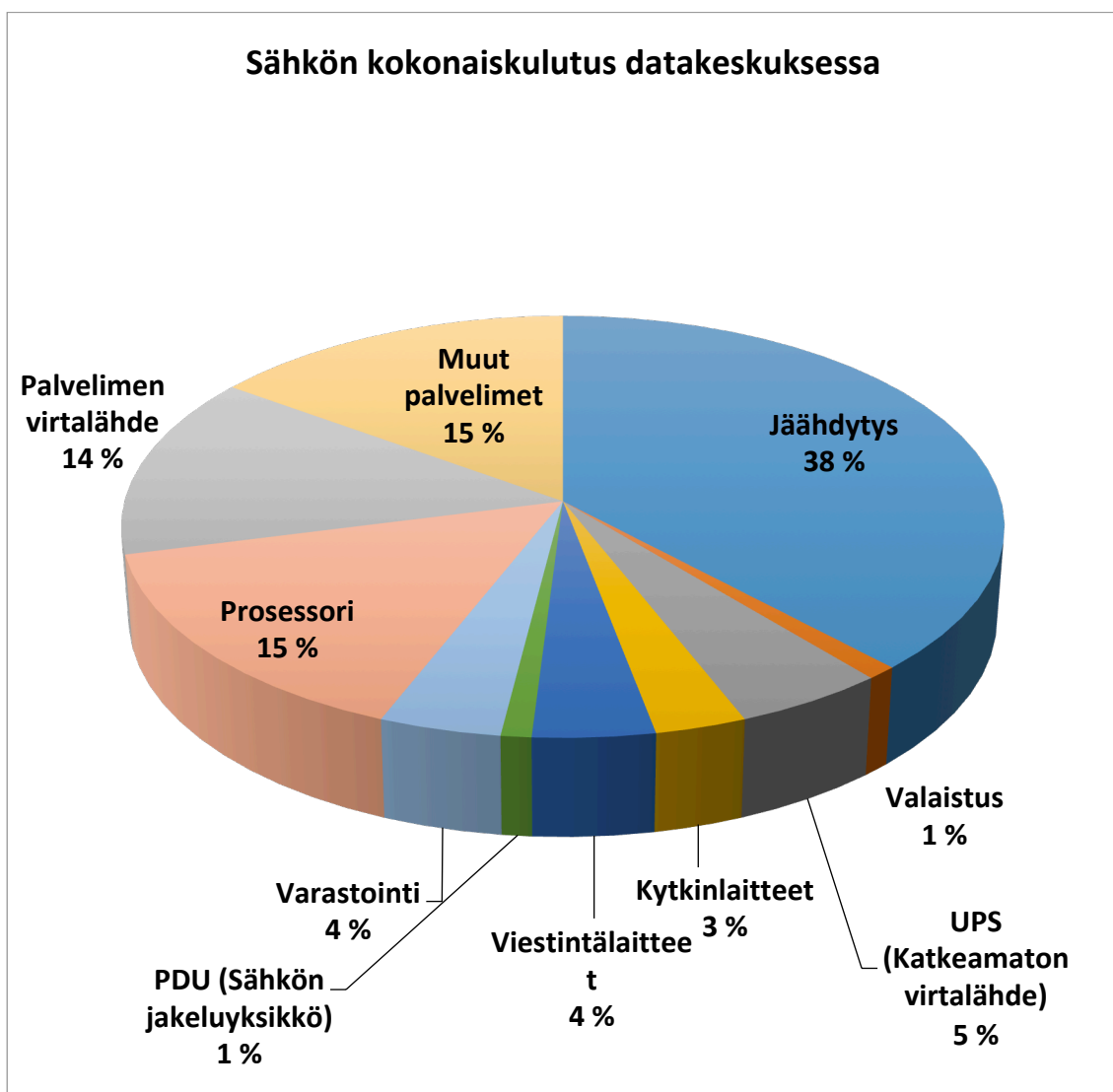
Sähkön kulutuksesta syntyvien hiilidioksidipäästöjen Jones (2018) arvioi datakeskusten osalta olevan 0,3 prosenttia koko maailman hiilidioksidipäästöistä, kun taas ICT-ala itsessään tuottaa Jonesin arvion mukaan 2 prosenttia koko maailman hiilidioksidipäästöistä.

Jones (2018) toteaa, että tulevaisuuden lukuja on vaikea ennustaa, mutta huolestuttavimmat ennusteet arvioivat ICT-alan sähkön kysynnän nousevan jopa 20 prosenttia maailman kokonaiskysynnästä 2030 vuoteen tultaessa. Samaan hengenvetoon Jones (2018) kuitenkin nostaa esille tutkimuksia, joissa tämä kyseinen kasvu on arvioitu olevan 3% suuruusluokkaa.

Renegadevinin ja muiden (2020, s.2) mukaan viimeaikaiset energiatehokkuuden trendit ovat hillinneet datakeskusten energiankulutuksen noin 1 prosentin tasolle vuoteen 2020 asti. Samaan aikaan datakeskukset ovat onnistuneet nelinkertaistamaan prosessointitehonsa. Malmodin ja Lundén (2018, s. 2) toteavat kuitenkin, että

tuoreimmat markkinanäkymät ennustavat valtavaa päästöjen kasvua koko ICT-alan osalta.

Songin ja muiden (2015, s. 1256) tutkimus paljastaa, että IT-laitteiden jäähdytys kuluttaa suuren määrään energiaa datakeskuksissa. Songin ja muiden (2015, s.1256) tutkimus osoittaa, että jäähdytykseen käytetty energia jakautui 30-55 prosentin välille datakeskusten kokonaisenergiankulutuksesta ja keskiarvolta jäähdytysjärjestelmä kulutti 40 prosenttia datakeskusten kokonaisenergiankulutuksesta.



**Kuvio 5.** Sähkön kokonaiskulutus datakeskuksessa. (Cho ja muut 2012, s.190).



Kuviossa viisi on esitetty datakeskusten sähkön kokonaiskulutuksen osuudet. Kokonaiskulutus on arvioitu keskimäärin jakautuvan 52 prosenttia IT-laitteiston yleiseen energian kulutukseen, 38 prosenttia datakeskuksissa käytössä olevien jäähdytysjärjestelmien kulutukseen ja 10 prosenttia muiden tukilaitteiden kulutukseen. (Cho ja muut 2012, s.190).

Syy suureen jäähdytystarpeeseen datakeskuksissa on jatkuvasti käynnissä olevien prosessoreiden ja muiden elektronisten laitteiden tuottamat lämpöpäästöt. Jäähdytysjärjestelmiä tarvitaan laitteiden turvallisen ja vakaan käytön takaamiseksi. Jäähdytys myös varmistaa datakeskusten tarpeellisen kuivan sisäilman, mikä on vältämätöntä elektronisten laitteiden ympäristössä. (Nadjahi ja muut, 2018, s. 14).

Edellä esitetyt tutkimukset osoittavat, että datakeskusten rakentamisessa ja infrastruktuurissa on otettava huomioon keskusten jäähdytysjärjestelmä sekä jäähdytykseen vaikuttava tekijä datakeskusten lokaatio. Näiden elementtien avulla voidaan vaikuttaa datakeskusten energiankulutukseen, energia kustannuksiin sekä entistä tehokkaampaan jäähdytysjärjestelmään. Uudenlaisten jäähdytysjärjestelmien sekä uusien teknologioiden hyödyntämisen avulla voidaan päästä datakeskuksissa tämän tutkimuksen päämäärään ja luoda datakeskuksista hiilineutraaleja toimijoita.

### **3.3 Tehokkuuden suhdeluvut**

Kestävän kehityksen seuraamista varten datakeskuksille on luotu erilaisia globaaleja kvantitatiivisia suhdelukuja mittaamaan datakeskusten suorituskykyä ja mahdollisuutta tuottaa palveluitaan tehokkaasti. Energian kulutuksen (PUE <sup>TM</sup>) metriikka on osoittautunut toimivaksi teollisuuden työkaluksi infrastruktuurin energiatehokkuuden mittaamiseen. Datakeskusten energiankulutus, hiilidioksidipäästöt ja veden käyttö vaikuttavat yritysten päätöksiin heidän kasvun, sijaintinsa ja ulkoistamis strategioidensa osalta. (The Green Grid 2011, s. 3).

Teollisuuden on tärkeää jatkaa resurssien tehokkaan käytön ohjaamista maksimoidakseen toimintansa tehokkuuden. Tämän lisäksi näiden resurssien käytön vaikutukset ympäristössä tulisi suorittaa kestävän kehityksen mallin mukaisesti.

Kestävän kehityksen datakeskuksissa organisaatiot pystyvät hallitsemaan paremmin kasvaneita tietoteknillisiä, verkkoon liittyviä ja varastointiin keskittyviä vaatimuksia sekä samalla alentamaan energiakustannuksia ja tämän avulla toimintansa kokonaiskustannuksiaan (TCO, Total Cost of Ownership). (The Green Grid 2011, s. 3).

### 3.3.1 PUE (Power Usage Effectiveness- Energiankäytön tehokkuus )

Yksi näistä suhdeluvuista on PUE (Power Usage Effectiveness). Suhdelukuna PUE auttaa ymmärtämään kuinka kattavasti datakeskukset käyttävät energiaansa datakeskusten IT-laitteisiin.

$$PUE = \frac{\text{Datakeskuksen kokonaisenergia}}{\text{IT-laitteiden käyttämä energia}} = 1 + \frac{\text{Datakeskuksen kokonaisenergia}(-\text{IT laitteiden käyttämä energia})}{\text{IT-laitteiden käyttämä energia}}$$

PUE:sta on tullut IT-alan suosima suhdeluku infrastruktuurin vaikutuksen mittaamisesta datakeskuksen energiatehokkuuteen. Suhdeluvun on kehittänyt The Green Grid Association (2007), joka on voittoa tavoittelematon, avoimen teollisuuden konsortio mikä pitää sisällään loppukäyttäjät, päätöksentekijät, teknologian tarjoajat, laitosarkkitehdit sekä energiayhtiöt, joiden tavoitteenaan on resurssitehokkuuden parantaminen IT-alan sekä datakeskusten osalta. (The Green Grid 2012, s.7).

Parhaiten tätä suhdelukua voidaan käyttää, kun tarkastellaan yksittäisen datakeskuksen energiankulutusta ja verrataan sitä erilaisiin operatiivisiin sekä muotoiluun liittyviin päätöksiin, joita datakeskuksen osalta ollaan tehty. PUE suhdeluku liittyy siis datakeskuksen infrastruktuuriin. Se ei ole tuottavuusmittari eikä kata tietoja datakeskuksen tehokkuuksista. Suhdeluku mittaa koko datakeskuksen kulutetun energian ja käytettyjen IT-laitteiden energian suhdetta.

Silloin kun, PUE-lukua tarkastellaan oikeassa kontekstissa, se tarjoaa vahvan ohjauksen ja hyödyllisen käsityksen tehokkaiden teho- ja jäähdytysarkkitehtuurien suunnittelusta, laitteiden käytöstä näissä arkkitehtuureissa ja kyseisten laitteiden päivittäisestä käytöstä. Muutokset PUE:ssa ovat kaikista merkityksellisimpiä, kun ne nähdään datakeskuksen vastauksena tehtyihin muutoksiin sen infrastruktuurissa. (The Green Grid 2012, s.13).

PUE ei tarjoa ohjeita tai tietoa IT-laitteiden toiminnasta tai tuotettavuudesta eikä sen avulla ole järkevää vertailla useita eri datakeskuksia toisiinsa. PUE:n arvot voivat vaihdella yhden (1.00) ja äärettömän välillä( $\infty$ ). Ihannetapauksessa PUE lähestyy ykköstä (1.0), jolloin hyötysuhde olisi 100% eli kaikki datakeskuksen sähköenergia käytetään ainoastaan IT-laitteisiin. (The Green Grid 2012, s.13).

Google 2018 raportoi heidän 12 kuukauden keskiarvoiseksi PUE luvuksi 1,12. Kyseinen arvo vaihteli Googlen mukaan välillä 1,09 ja 1,31. Avgerinoun ja muiden (2017) julkaisussaan *datakeskusten energiankulutuksen trendit datakeskusten energiatehokkuutta koskevien eurooppalaisten käytännnesäntöjen mukaisesti* tutkijat keräsivät tietoja 289 eurooppalaisesta datakeskuksesta. Raportti osoitti, että tutkimuksiin osallistuneiden datakeskusten keskiarvoinen PUE luku oli 1.8

### 3.3.2 CUE (Carbon Usage Effectiveness- Hiilen käytön tehokkuus)

Datakeskukset, jotka eivät tuota itse paikallisia hiilidioksidipäästöjä ja hankkivat kaiken käyttämänsä sähköenergian sähköverkosta määrittellään CUE (Carbon Usage Effectiveness) suhdeluvun osaltaan seuraavasti.

$$CUE = \frac{\text{Datakeskuksen energiankulutuksesta syntyneet CO2 päästöt}}{\text{IT-laitteiden käyttämä energia}}$$

Datakeskuksen käyttämä kokonaisenergia on sama arvo kuin PUE suhdeluvun osoittaja, kun taas CUE luvussa osoittajana on datakeskuksen kokonaishiilidioksidipäästöt, jotka aiheutuvat PUE mittarissa olevan osoittajan eli energian käytön vaikutuksesta. CUE suhdeluku ilmoittaa tuloksensa hiilidioksidikiloja (KgCO<sub>2</sub>eq) yhtä kilowattituntia (kWh) kohden. ( The Green Grid 2010, s. 4).

Vaihtoehtoinen tapa laskea CUE on kertoa hiilipäästökerroin CEF (Carbon Emission Factor) datakeskuksen vuosittaisella PUE luvulla.

$$CUE = CEF \times PUE$$

Yllä oleva kaava voidaan myös esittää seuraavasti.

$$CUE = \frac{\text{CO2 Päästöt (kgCO2eq)}}{\text{Energian yksikkö (kWh)}} \times \frac{\text{Datakeskuksen kokonais energiankulutus}}{\text{IT-laitteiden käyttämä energia}}$$

Ihannetapauksessa tiedot hiilidioksidipäästöistä kerättäisiin reaaliaikaisesti CO<sub>2</sub> mitta-  
reista, jotka keräävät tietoja käytetyn sähköenergian lähteestä (maakaasu, diesel, polt-  
toöljy, kivihiili, turbiinit/ generaattorit tai muut uusiutuvan energian lähteet). Jos tätä  
reaalilaikasta hiilidioksidipäästöjen tietoa ei ole saatavilla, laskelmat tulisivat tehdä  
käyttämällä generaattorin valmistajan tietoja päästöistä ja käytetyn energian lähteistä.  
( The Green Grid 2010, s. 5). Toisin kuin PUE:n osalta CUE:n ihannearvo on 0.00 joka

osoittaisi, että datakeskuksen toiminta on täysin hiilidioksidipäästötöntä, ylärajaa ei kuitenkaan kummallakaan näillä suhdeluvuilla ole.

Näiden kahden suhdeluvun arvojen perusteella palvelinkeskusten operaattorit voivat arvioida heidän datakeskustensa kestävästä kehitystä ja hyödyntää suhdeluvuista saatuja tuloksia, tehdessään päätöksiä energiatehokkuuden sekä kestävästä energiapolitiikan kannalta. ( The Green Grid 2010, s. 5).

ETLA :n (2020, s.12) mukaan tällä hetkellä on mahdotonta seurata tarkasti yksityisen sekä julkisen sektorin datakeskusten energian ja sähköenergian käyttöä. Kyseiset luvut merkitään sen toimialan kokonaislukuihin, joihin yrityksen toiminta perustuu eli yleisesti ICT-sektorin sähkönkulutukseen. ETLA :n (2020, s.12) toiveena olisi yksityisen sekä julkisen sektorin datakeskusten energia- ja sähkönkulutuksen yksityiskohtaisempi raportointi, jolloin näitä lukuja voitaisiin arvioida tarkemmin.

### 3.3.3 WUE (Water Usage Effectiveness- Veden käytön tehokkuus)

The Green Grid (2011, s.3) arvioi hiilidioksidipäästöjen sekä veden käyttö nousevan äärimmäisen vaikuttaviksi tekijöiksi datakeskusten suunnittelussa, niiden sijainnissa sekä toiminnassaan tulevaisuuden osalta. PUE:n, CUE:n sekä WUE:n yhdistelmä mahdollistaa datakeskusten operaattoreille kestävyysnäkökohdan arvioinnin ja näiden suhdelukujen avulla selvittää, onko heidän mahdollista parantaa energiatehokkuuttaan tai lisätä kestävästä kehitykseen liittyviä toimiaan. WUE:n ihannearvo on sama kuin CUE:lla eli nolla (0.00) ja suhdeluvun yksikkö ilmoitetaan litraa/kilowattitunti.

$$WUE = \frac{\text{Vuositainen Veden käyttö datakeskuksessa}}{\text{IT-laitteiden käyttämä energia}} \quad (5)$$

Kaikki kolme yllä mainittua suhdelukua kattavat datakeskusten toiminnan, mutta ne eivät kata datakeskusten ja siellä sijaitsevien IT-laitteiden koko elinkaaren

ympäristökuormitusta, vaan antavat tämän hetkistä kuvaa siitä kuinka kuormittavaa toiminta on kun sitä datakeskuksissa harjoitetaan. (The Green Grid 2011, s. 4).

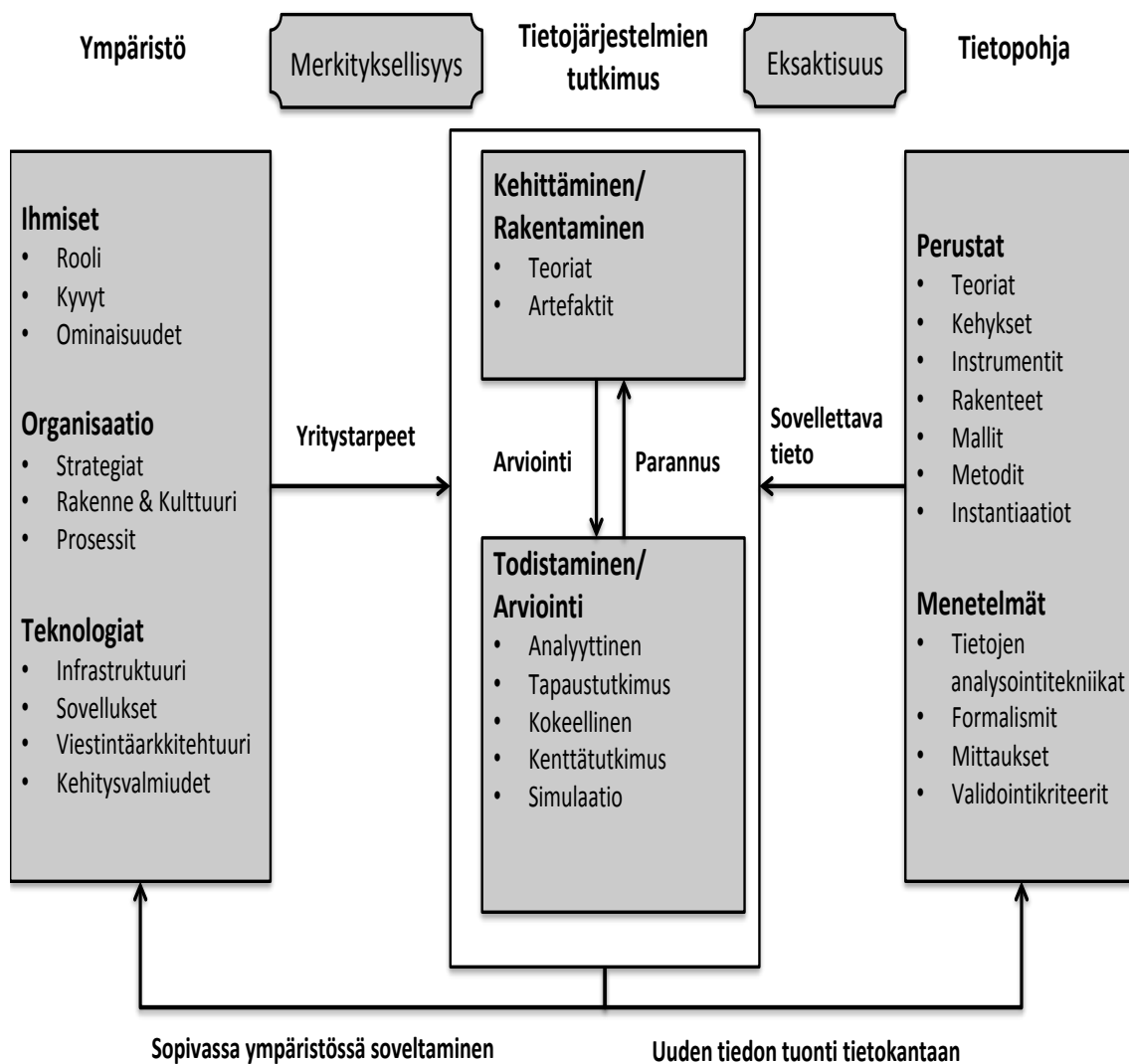
## 4 Suunnittelutiede

Tutkimuksen lähestymissuuntana on käytetty suunnittelutiedettä (Design Science). Hevner ja muut (2004, s. 98) toteavat, että suunnittelutieteellisessä tutkimuksessa (Design Science Research, DSR) perehdytään tuottamaan innovatiivisia tietoteknisiä asioita, joiden ansiosta organisaatiot voivat tehostaa merkittäviä tietoon liittyviä toimintojaan. Hevnerin ja muiden (2004) mukaan artefaktien luominen ja arviointi ovat suuressa roolissa suunnittelutieteellisessä tutkimuksessa. Näiden artefaktien avulla pyritään ratkaisemaan ongelmat niin organisaatioiden kuin myös globaalien toimijoiden sisällä.

Tähän tutkimukseen suunnittelutiede toimii varsin tehokkaana lähestymistapana, sillä tutkimuksen tarkoituksena on luoda toimiva mallinnus siitä, kuinka tulemme pääsemään haluttuun lopputulokseen. Suunnittelutieteen päälähtökohtana on toimia ongelmanratkaisuprojektina ja sen lopputuotoksena on tarkoitus syntyä täysin uusia ratkaisumalleja (Hevner ja muut, 2004, s.82). Tutkimusmalli sopeutuu erilaisille tieteenaloille ja sen perustana on rakentaa vielä julkaisemattomia ratkaisuja kuitenkin tuoden esille aikaisemmat tiedot ja tutkimustulokset uusien ratkaisuiden tukemiseksi (Peffers ja muut, 2007).

Suunnittelutieteen ymmärtämisen saavuttamiseksi tutkimusparadigmana on nähtävä tärkeä kaksijakoisuus. Suunnittelutieteessä on sekä prosessi (toimintosarja) että tuote (artefakti). Prosessit eli toimintosarjat luovat artefaktit. Luodut artefaktit arvioidaan uudelleen ja tämän toiminnon lopputuotoksena syntyy uutta tietoa. Uuden tiedon avulla kykenemme taas parantamaan suunnitteluprosessia sekä aiempia artefakteja. Toiminnasta syntyy tutkimuskehys joka käydään läpi useaan otteeseen. Hevner ja muut (2004, s.78) toteavat, että tutkimuskehys olisi käytävä läpi useita kertoja muodostaen lopullisen artefaktin.

Hevner ja muut (2004, s.80) ovat luoneet kuvion 6 mukaisen tutkimuskehymen. Kehys osoittaa kuinka tutkimuksesta syntynyt tieto siirtyy ympäristöön ja tieteisiin sekä kertoo, mistä tutkimuksen tieto on peräisin. Kuten kehys osoittaa suunnittelutieteellisessä tutkimuksessa merkityksellisyys ja tutkimuksen tarpeet tulevat ympäristöltä. Tieteen roolina taas on tuottaa eksaktia sovellettavaa tietoa, joka hyväksikäytetään tutkimuksessa (Hevner ja muut, 2004, s.80).

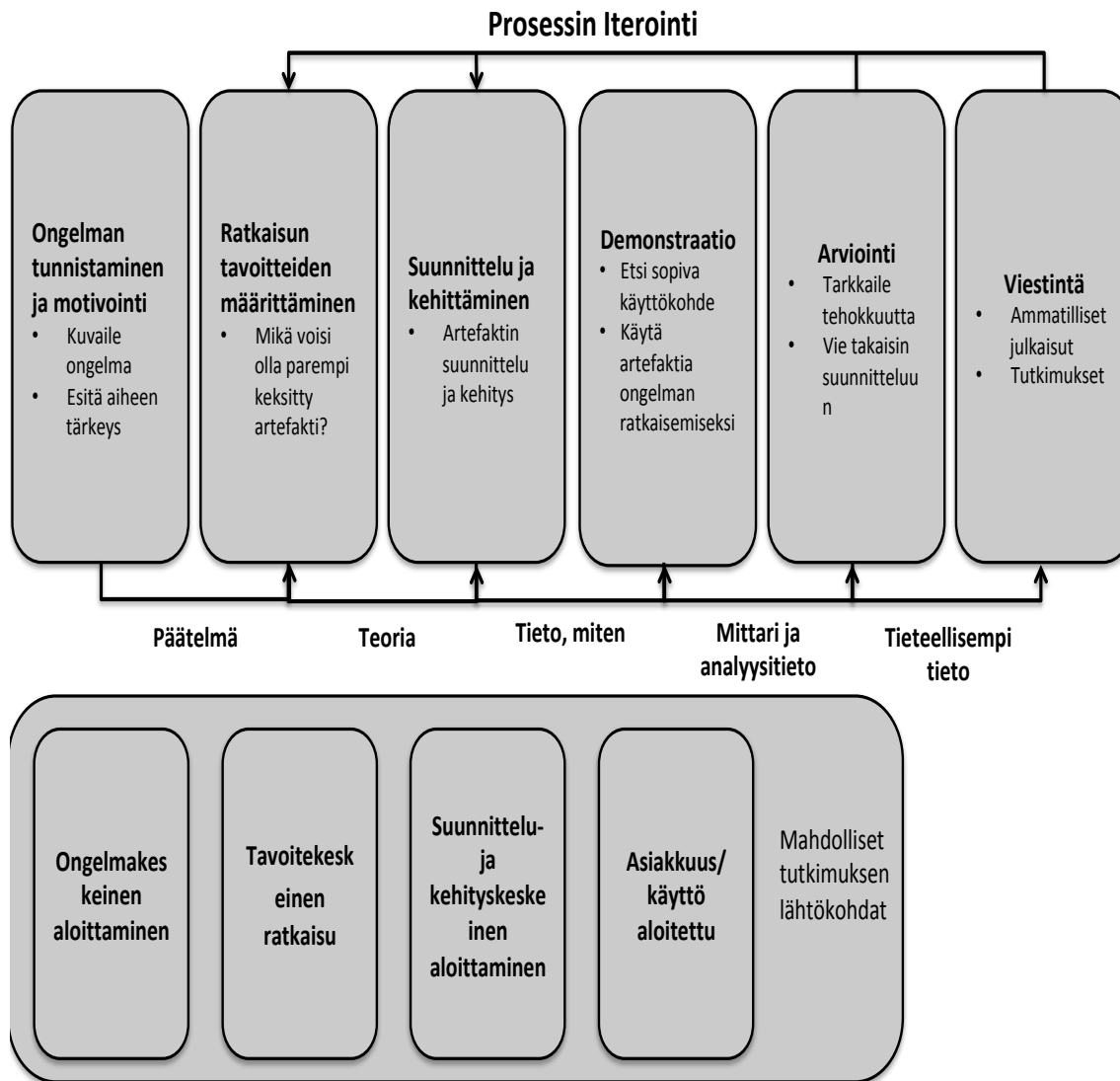


**Kuvio 6.** Tietojärjestelmien tutkimuskehys (Hevner ja muut 2004, s. 80).



Heverin ja muiden luoman tietojärjestelmä tutkimuskehityksen lisäksi on olemassa myös muitakin suunnittelutieteellisen tutkimuksen malleja. Yksi näistä malleista on Pefferin ja muiden (2007, s.54) esittämä DSRM-malli, joka pitää sisällään kuusi erilaista vaihetta ja luo hieman saman tyyllisen mallin kuin edellä esitetty tietojärjestelmien tutkimuskehitys malli.

Pefferin ja muiden (2007, s.54) luoma DSRM-malli antaa suunnittelutieteelliselle tutkimukselle yleisesti hyväksytyt kehykset. Mallin luojat painottavat, että heidän DSRM-mallia voidaan parantaa sekä muuttaa. Malli voidaan myös toteuttaa muillakin kuin heidän kuvaamallaan tavalla ja sitä ei tulisi käyttää kaavamaisena mallina tutkimuksissa. Mallista voidaan hyödyntää vain tarvittavia osioita tutkimustarpeiden mukaan. Tämä malli kokonaisuudessaan on kuvattuna kuviossa 7.



**Kuvio 7.** DSRM -prosessimalli (Peffers ja muut, 2007, s. 54).

Ensimmäisessä osiossa DSRM -prosessimallissa on ongelman tunnistaminen ja motivointi. Tässä kohtaa tulisi määrittää selkeästi, mikä on tutkimuksen tutkimusongelma ja perustella ongelman ratkaisun arvo. Joissain tilanteissa tutkimusongelma on hyödyllistä hajottaa pienempiin osiin. Pienemmissä osissa monimutkaiset ongelmat realisoituvat yksityiskohtaisemmin ja näin pystytään luomaan helpommin artefakti, joka tulisi tämän ongelman ratkaisemaan. Ongelman hajottaminen pienempiin, mahdollisesti helpommin ymmärrettäviin osiin voi motivoida tutkijaa sekä tutkimuksen yleisöä etsimään oikeaa ratkaisua ja ymmärtämään asiaan liittyviä päätelmiä.

Tämän osion tärkeimmät resurssit ovat tieto esitetyn ongelman tilasta ja sen ratkaisemisen tärkeydestä. (Peffer ja muut, 2007 s. 54-55).

Seuraavassa osiossa määritellään ratkaisun tavoitteet. Tavoitteet tulee olla linjassa ongelmanmäärittämisen kanssa. Tämän lisäksi ratkaisun tavoitteita luodessa tulisivat olla tiedossa, mitkä tavoitteista ovat mahdollisia ja toteutettavissa olevia. Edellä esitetyt tavoitteet voivat olla määrällisiä tai laadullisia. Määrällisissä tavoitteissa toivottu ratkaisu olisi parempi kuin nykyiset ratkaisut. Laadullisissa tavoitteissa pyritään esittämään ratkaisu siitä, kuinka uuden artefaktin odotetaan tehostavan ratkaisua ongelmiin, joita ei ole tähän mennessä kukaan vielä käsitellyt. (Peffer ja muut, 2007 s. 55).

Kolmas osio käsittelee suunnittelua ja kehitystä. Tässä osiossa tarkoituksena on luoda artefaktit. Nämä artefaktit voivat olla rakenteita, menetelmiä, malleja tai ilmentymiä ja ne määritellään hyvin laajasti. Tähän kuuluu artefaktin halutun toiminnallisuuden ja sen arkkitehtuurin määrittäminen ja sen jälkeen varsinaisen artefaktin luominen. Tavoitteiden määrittämisestä siirtyminen artefaktin suunnitteluun ja kehittämiseen vaatii teoriaosaamista jota hyödynnetään itse ratkaisun luomisessa. (Peffer ja muut, 2007 s. 55).

Mallin neljännessä vaiheessa demonstroidaan artefaktin käyttöä yhden tai useamman ongelman ratkaisemiseksi. Vaihe voi sisältää artefaktin hyödyntämisen erilaisessa kokeilussa, mallintamisessa, tapaustutkimuksessa, ratkaisun todistamisessa tai muissa asianmukaisissa toiminnoissa. Demonstraatioon tarvittavat resurssit sisältävät laajan tietämyksen siitä, kuinka artefaktia käytetään ongelman ratkaisemiseksi. (Peffer ja muut, 2007 s. 55).

Viides osio pitää sisällään arvioinnin. Arvioinnissa on tarkoituksena tarkastella ja mitata kuinka toisen vaiheen määritellyt ratkaisun tavoitteet täyttyvät ja neljännessä vaiheessa tuotetut artefaktit toimivat ongelman suhteen. Arviointi voi pitää sisällään niin empiirisiä kuin loogisiakin todisteita. Toiminto pitää sisällään ratkaisun tavoitteiden vertaamisen todellisiin havaittuihin tuloksiin demonstroitaessa artefaktin käytöstä. Toi-

minnon lopussa tutkija/t päättävät palaavatko he takaisin osioon kolme parantaakseen artefaktin tehokkuutta tai jatkavat luoduilla artefakteilla eteenpäin ja jättävät lisäparannukset seuraaviin projekteihinsa. Tutkimuksen luonne vaikuttaa siihen onko tällainen iteraatio mahdollista vai ei. (Peffer ja muut, 2007 s. 56).

Viimeinen osio sisältää viestinnän. Tässä osiossa käydään läpi prosessimallin tuottamat tulokset. Siinä viestitään olemassa olevasta ongelmasta ja sen merkittävydestä, tämän johdosta luodusta artefaktista ja artefaktin hyödyllisyydestä, suunnittelun tarkkuudesta sekä tehokkuudesta tutkijoille ja muille asiaankuuluvalla yleisölle, kuten alan ammattilaisille sekä lukijoille. (Peffer ja muut, 2007 s. 56).

#### **4.1 Tutkimusmenetelmän hyödyntäminen tässä tutkimuksessa**

Tässä tutkimuksessa keskitytään DSRM-mallin neljään ensimmäiseen vaiheeseen. Kuten jo edellä mainittiin Peffer ja muut (2007) totesivat, että heidän mallinsa soveltuu yleisesti hyväksyttäväksi malliksi suunnittelututkimuksen tekemiseen. Kyseistä mallia ei tulisi käyttää kaavamaisena tutkimusmallina vaan sitä voidaan hyödyntää siinä määrin, missä se on soveliaista tutkimuskehikseen nähden.

Aiemmin läpikäyty mallin neljä ensimmäistä osiota soveltuvat tehokkaasti tähän tutkimukseen. Tutkimuksesta jätetään pois mallin kaksi viimeistä osiota arviointi ja viestintä. Alkupään vaiheet ovat liitoksissa uusien ratkaisuiden luomiseen, joka on keskiössä myös tässä tutkimuksessa. Tutkimukselle voidaan myös suorittaa jatkotutkimus myöhemmässä vaiheessa, jossa käydään läpi mallin jälkimmäiset osiot.

1) Ongelman tunnistaminen ja motivointi osiossa tunnistetaan datakeskusten energian käytöstä aiheutuneita ympäristökustannuksia sekä perehdytään energiantarpeen jatkuvan kasvun aiheuttamiin mahdollisiin tulevaisuuden ongelmiin. Näiden ongelmien tun-

nistamisessa on hyödynnetty tutkijoiden tekemiä aikaisempia laskelmia datakeskusten energiantarpeesta sekä digitaalisen tiedon määrän kiihtyneestä kasvusta maapallolla.

2) Ratkaisun tavoitteiden määrittäminen osion tehtävänä on määrittää tavoitetila, johon tulemme pääsemään uuden artefaktin avulla. Tavoitteena tutkimuksessa on tutkia, kuinka pysty luomaan datakeskuksista hiilineutraaleita toimijoita ja näin vähentää datakeskusten energiankulutuksesta aiheutuneita ympäristöpäästöjä.

3) Suunnittelu ja kehittäminen osion tarkoituksena on suunnitella ja kehittää tavoite määritelmässä esille tuotu artefakti. Tässä osiossa käytetään hyödyksi tutkimuksen teoriaosuutta ja tämän lisäksi tuodaan asiantuntijoiden ääni esille toimialan julkisesti saatavilla olevien haastatteluiden ja artikkelien avulla. Tutkimuksessa itsessään ei järjestetä omia haastatteluja, johtuen vaikeudesta saada toimialan asiantuntijoita haastateltavaksi.

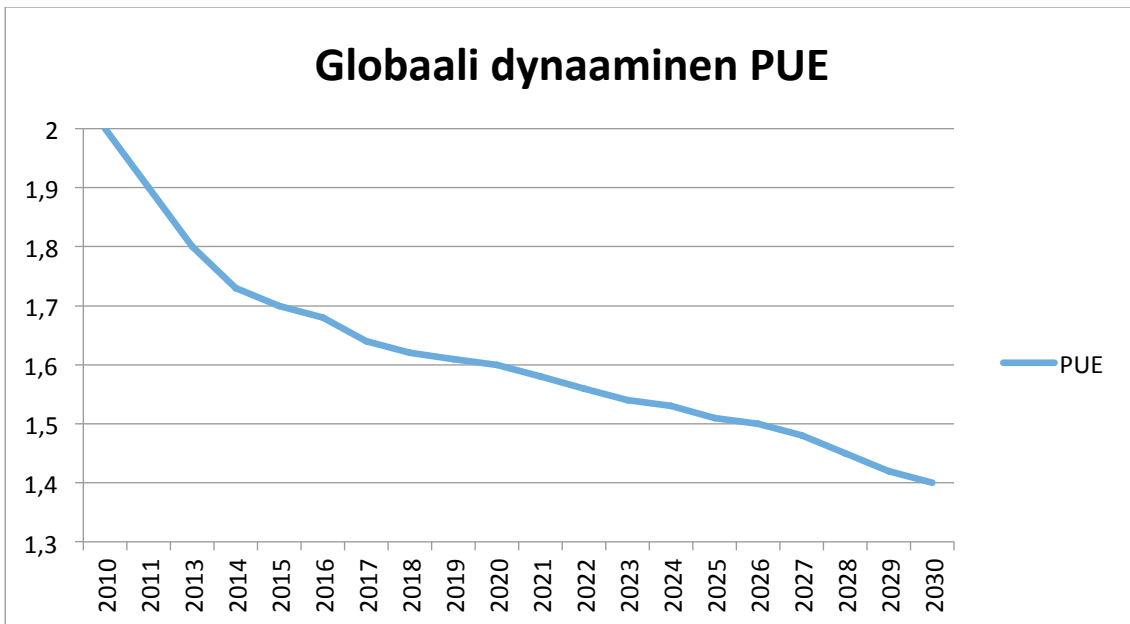
Suunnittelu- ja kehittämisosiossa Markuksen ja muiden (2002) mukaan tutkijan luovuus, henkilökohtainen kokemus sekä ongelmanratkaisukyky toimivat työkaluina artefaktin luomisessa. Kehittämisvaiheessa mallinnetaan suunnitelmaan perustuen optimaalinen malli kestävän kehityksen mukaiselle datakeskukselle. Tämä toimii tietynlaisena ohjeistuksena, mitä vaatimuksia hiilineutraalin datakeskuksen luomiseksi tarvitaan.

4) Viimeisessä osiossa eli demonstraatio osiossa mallinnetaan suunnittelu- ja kehittämisvaiheessa syntynyt artefakti, jolla pyritään luomaan ratkaisu tutkimuskysymykselle, kuinka voidaan luoda hiilinegatiivisia datakeskuksia ja ongelman ratkaisemiselle luoden datakeskuksista kestävän kehityksen mukaisia toimijoita.

## 4.2 Ongelman tunnistaminen ja motivointi

Tutkimuksen aikana on tuotu esille, että datakeskusten hiilidioksidipäästöt ovat noin 2 prosenttia maapallon hiilidioksidipäästöistä, mikä on yhtä suuri osuus kuin lentoliikenteestä syntyvät hiilidioksidipäästöt (Lindqvist, 2020). Samalla globaali lämpötilapoikkeama on kasvanut vuodesta 2010 vuoteen 2020 0,3 °C astetta (NOAA, 2021). Armstrong (2019); Cisco (2020) ovat arvioineet tiedon määrän kasvun olevan 500 prosenttia 2025 vuoteen tultaessa sekä kasvavan yli 6400 prosenttia vuoteen 2035 mennessä. Näiden kolmen muuttujan välillä voidaan nähdä looginen yhteys. Tiedonmäärän kasvu lisää datakeskusten määrän ja(tai) tehokkuuden tarvetta. Kysynnän kasvuun vastataan tuotantoa lisäämällä, joka taas nostaa tuotannosta aiheutuneita energiakustannuksia.

Liu ja muut (2020 s. 277) ovat ennustaneet maailman keskimääräisen PUE luvun kehitystä. Heidän tutkimuksensa mukaan PUE luvun ennustetun regressioanalyysin tulos tulee laskemaan 1.40 globaalisti vuoteen 2030 saavuttaessa.



**Kuvio 8.** Regressioanalyysi maailmanlaajuisesta datakeskusten keskimääräisestä PUE arvosta. (Liu ja muut 2020 s. 227)

Vaikka datakeskusten energiankulutuksen odotetaan tehostuvan tulevaisuudessa datakeskuksille syntyneen räjähdysmäisen kysynnän vuoksi, voidaan aikaisempien tulosten perusteella olettaa hiilidioksidipäästöjen kasvavan, jos datakeskusten toimintamalleja ei tulla muuttamaan nykyisistä malleistaan.

Kasvaneet hiilidioksidipäästöt taas saavat globaalin lämpötilapoikkeaman kasvamaan. Edellä esitetty tapahtumaketju aiheuttaa suuria globaaleja ongelmia ympäristön osalta, jos emme keksi kestävämpiä ratkaisuja räjähdysmäisen tiedon määrän hallitsemiseksi. Tutkimus kuvaa jokaisen näiden tekijöiden muutoksia ja kasvanutta tarvetta parantaa yleisiä toimintatapoja haittavaikutuksien vähentämiseksi.

### 4.3 Tavoitteiden määrittäminen

Tässä luvussa luodaan tavoitteet kehitettävälle artefaktille niiden ongelmien pohjalta, jotka edellisessä luvussa tuotiin esille. Keskeisimpiä ongelmia havaittiin kolme kappaletta, joita olivat tiedon määrän räjähdysmäinen kasvu maailmassa ja tähän vastaamiseen vaadittavat resurssit, datakeskusten hiilidioksidipäästöt sekä päästöistä johtuva ilmaston lämpeneminen.

Järvisen (2006, s. 25) mukaan artefaktien sijasta voidaan luoda myös uusia innovaatioita. Tällöin innovaation arviointi tai rakentaminen voi perustua tekniseen tai sosiaaliseen tietoon tai näiden yhdistelmästä rakentuvaan ideaan. Tässä tutkimuksessa tulemme luomaan kolmeportaisen innovaation olemassa olevien teknisten ratkaisumallien avulla yhdistämällä nämä mallit yhdeksi toimintaohjeeksi eli artefaktiksi.

Tavoitteiden määrittämiseksi tulisi luoda datakeskus, jonka avulla pystyttäisiin vastaamaan kasvaneeseen tiedon määrän hallintaan ja samalla pyrkiä vähentämään toiminnasta syntyneitä hiilidioksidipäästöjä.

Yleisesti voidaan ajatella, että kasvavan tiedonhallinnan ratkaisemiseksi meidän tulisi lisätä datakeskusten tehokkuutta ja/tai lukumääriä sekä kasvattaa niiden kokoa. Voidaan ajatella, että tehokkuuden kasvattaminen yleisesti lisää siihen tarvittavien resurssien kulutusta, jos emme keksi uusia tehokkaampia menetelmiä.

Datakeskukset aiheuttavat tällä hetkellä 2 prosenttia maapallon hiilidioksidipäästöistä, joten meidän tulisi luoda innovaatio, jossa tehokkuuden lisääminen ei kasvattaisi näitä päästömääriä ja näin rakentaa hiilineutraaleja datakeskuksia. Suurempana innovaationa voitaisiin pitää datakeskusta, jonka hiilikädenjälki olisi suurempi kuin hiilijalanjälki ja näin päästäisiin luomaan kestävämpää sekä ilmastopositiivisempaa tulevaisuutta maapallolla.

#### **4.4 Suunnittelu ja kehittäminen**

Tämän luvun teemana on tutkimuksen lopputuloksen eli artefaktin suunnittelu ja kehittäminen. Tutkimuksen artefaktina on innovaatio menetelmästä, jossa luodaan hiilinegatiivinen datakeskus. Hiilinegatiivisella datakeskuksella tarkoitetaan datakeskusta, joka sitoo hiilidioksidia enemmän kuin aiheuttaa sitä ilmakehään vuoden aikana. Luodakseen hiilinegatiivisen datakeskuksen meidän täytyy ensin keskittyä siihen, mistä nykyisten datakeskusten hiilidioksidipäästöt muodostuvat.

Zhang ja muut (2020, s. 144) toteavat, että kaksi merkittävintä syytä datakeskusten hiilidioksidipäästöille ovat niiden lokaatio sekä uusiutuvaa energiaa edullisemmat fossiilisilla polttoaineilla tuotettu energia. Datakeskusten sijainti palvelunkäyttäjien näkyvyydessä ja tiedonsiirron nopeuksissa. Tästä johtuen kaikkia maailman



datakeskuksia ei ole voitu sijoittaa ainoastaan niille ilmastollisesti suotuisille viileän vyöhykkeen alueille. Joissa datakeskukset voisivat hyödyntää viileämpää ulkoilmaa niiden jäähdyttämisessä. Datakeskusten rakentaminen viileille alueille ei pelkästään vähentäisi datakeskusten jäähdytysjärjestelmästä syntyviä energiakustannuksia, vaan myös datakeskuksista syntyvää hukkalämpöä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi lähialueiden lämmöntuotannossa. Näin ollen kerran tuotettu energia pystyttäisiin uudelleen hyödyntämään ja se vähentäisi lämmityksestä johtuvia päästöjä lähialueilla. Datakeskuksia kuitenkin tarvitaan ympäri maailmaa ja yleisesti painopisteenä ovat suurvaltojen alueet nopeiden tiedonsiirtoyhteyksien takaamiseksi.

Viime aikoina on tehty monia tutkimuksia datakeskusten energiantehokkuudesta. Suurin osa datakeskusten energiatehokkuutta koskevista tutkimuksista liittyy tehokkaisiin jäähdytysjärjestelmiin, sähkönkulutukseen sekä uusiutuvan energian integroimiseen. Sen sijaan datakeskusten "hukkalämmön" uudelleenkäyttöä on tutkittu vähemmän. Aihe on kuitenkin viime vuosina tullut entistä ajankohtaisemmaksi ja muutamia tapaustutkimuksia on aiheesta tehtynä.

Orón ja muiden (2015, s. 347) mukaan ulkoilman hyödyntäminen datakeskusten jäähdytyksessä voisi säästää paikasta riippuen 5,4-7,9 prosenttia jäähdytysjärjestelmien sähkönkulutuksesta. Samainen tutkimus osoittaa, että vesivoiman ja ydinvoiman suuren osuuden vuoksi Ruotsissa Tukholman datakeskus tuottaisi Orón ja muiden (2015, s. 339) mukaan yli 30 kertaa vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin Lontoossa sijaitseva datakeskus. Tutkimuksessa huomautetaan kuitenkin, että kansainvälisten sähkönsiirtoyhteyksien sähköntuotantoyhdistelmien päästöjen vertailu on kuitenkin kyseenalaista.

Datakeskuksista syntyneen hukkalämmön hyödyntämisessä nähdään eräitä haasteita. Wahlroos ja muut (2018, s. 1749) mukaan kaukolämpöverkkooperaattorien ja datakeskusoperaattorien väliset liiketoimintamallit eivät ole usein läpinäkyviä. Tämän lisäksi hukkalämmön laatu matalana lämpötilana sekä epävakaana lämmönlähteenä

aiheuttaa haasteita sen hyödyntämiselle. Lisäksi uudet investoinnit hukkalämmön hyödyntämiseksi aiheuttavat lisäkustannuksia datakeskuksia rakentaessa. Hiilidioksidipäästöjen vähentämisen näkökulmasta hukkalämmön hyödyntäminen voidaan haasteista huolimatta nähdä potentiaalisena mahdollisuutena. Sen vuoksi tässä tutkimuksessa pyritään luomaan innovaatio, jossa myös hukkalämmön hyödyntämismenetelmää käytetään hyväksi.

"Edullinen" lokaatio jäähdytyskustannuksien osalta ei kuitenkaan aina takaa ratkaisua, jolla pystytään hillitsemään kasvanutta hiilidioksidin määrää datakeskusten osalta. Tiettyyn määrään asti datakeskusten lokaatiosta voi olla hyötyä, mutta massoittain rakennettuna datakeskuksia tietyille alueille, niiden valtavat energian tarpeet voivat aiheuttaa ongelmia alueen muussa energian tarpeessa.

Yhtenä esimerkkinä voidaan nähdä Irlannin tämän hetkinen tilanne. Irlannissa kevyt yritysverotus sekä leuto sääympäristö on kiihdyttänyt datakeskusten rakentamista alueelle. Irlannin valtion omistaman energiayhtiön EirGrindin mukaan vuonna 2021 Irlannin koko sähkön kulutuksesta datakeskukset kuluttivat 17 prosenttia. Tämän suuntainen kehitys on alkanut nostattaa huolta Irlannissa kuin myös Alankomaissa, jossa on jo yli 250 datakeskusta. (Joakim Kullas 2022).

Valtavat energiankulutuksen kasvut rajatulla pienellä alueella kuormittavat kyseisen alueen energiantuotantoa ja näin ollen alueella voidaan joutua turvautumaan fossiilisten polttoaineiden hyödyntämiseen, uusituvien energiamuotojen lisäksi. Fossiilisten polttoaineiden hyödyntäminen energiantuotannossa taas aiheuttaa lisää hiilidioksidipäästöjä. Datakeskukset vievät tämän lisäksi alueen pinta-alasta laajoja alueita ja näin tuhoavat esimerkiksi erilaisia viljelysmaita tai metsäalueita, joita voidaan pitää yhtenä maapallon hiilinieluinä sitoessaan hiilidioksidia ilmakehä yhteyttämisen avulla. (Joakim Kullas 2022).

## 4.5 Demonstraatio

Tässä tutkimuksessa luotu artefakti pitää sisällään kolmen askeleen vaatimusmääritelmän, jonka avulla pyritään takaamaan datakeskusten hiilinegatiivisuus. Artefakti toimii eräänlaisena ohjenuorana, kuinka meidän olisi mahdollista päästä tilanteeseen, jossa datakeskukset eivät tuottaisi lainkaan hiilidioksidipäästöjä sekä mahdollistaisi jopa hiilidioksidipäästöjen vähentämisen esimerkiksi lähialueen lämmityksessä.

Artefaktin tarkoituksena on ottaa datakeskuksissa käyttöön kaikki nämä kolme vaatimusmääritelmän sisältämää askelmaa ja hyödyntämällä näitä askelmia päästäkseen lähemmäksi tavoitetta, jossa tullaan luomaan hiilinegatiivisia datakeskuksia.

Luotu malli koostuu jo olemassaolevista teknisistä ratkaisumalleista sekä mahdollisuuksista, joita datakeskukset voivat toiminnassaan hyödyntää. Artefakti kokoaa nämä mahdollisuudet yhdeksi toimintaohjeeksi, jossa tullaan noudattamaan jokaista mallissa esiintyvää askelmaa päästäkseen haluttuun lopputulokseen.

Ensimmäisessä askelmassa vaatimuksena on hyödyntää ainoastaan uusiutuvista luonnonvaroista tuotettua energiaa. Uusiutuviin energianlähteisiin lukeutuvat aurinkoenergia, tuulienergia sekä vesivoimalla tuotettu energia. Toisessa askelmassa tullaan hyödyntämään ulkoilmaa datakeskusten jäähdytysjärjestelmissä.

Olemme jo aiemmin huomioineet tutkijoiden Cho ja muut (2012, s.190) tuloksista, että jäähdytysjärjestelmät datakeskuksissa kuluttavat lähes 40% datakeskusten kokonaissähkön kulutuksesta. Hyödyntämällä ulkoilmaa jäähdytyksessä pystymme vaikuttamaan positiivisesti datakeskusten energiankulutukseen. Viimeisenä artefaktin askelmana on datakeskuksissa syntyneen hukkalämmön hyödyntäminen. Kokonaisuudessaan artefakti on kuvattu kuviossa 10.



**Kuvio 10.** Kolmen askeleen artefakti. (Zhang ja muut 2011, s.143; Lee& Chen 2013, s.111; Lu ja muut 2011, s.3371)

Ensimmäinen askel hiilineutraalille datakeskukselle on hyödyntää ainoastaan uusiutuvista luonnonvaroista tuotettua energiaa. Zhang ja muut (2011, s. 144) toteavat kustannusten olevan suurin syy fossiilisten energialähteiden käytölle, kun tutkitaan datakeskuksissa käytettyjä energialähteitä.

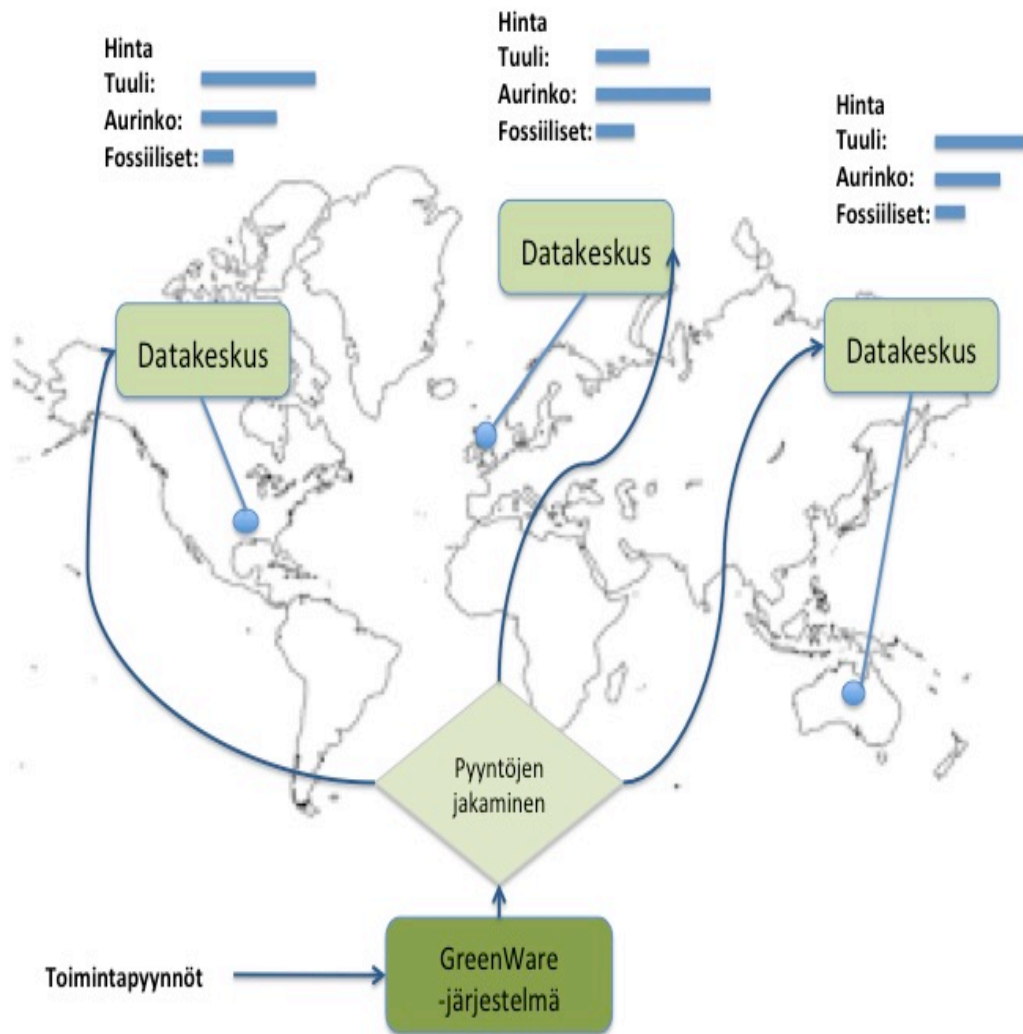
Tutkijoiden Zhang ja muut (2011, s.144) mukaan uusiutuvan energian nopeat hintojen vaihtelut vaikuttavat negatiivisesti uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämiseen. Esimerkkinä aurinkoenergian hinta aurinkoisella alueella voi liikkua 0,16 Yhdysvaltain dollarissa per kWh ja pilvisessä ilmastossa 0,36 dollarin per kWh hinnassa. Samaan

aikaan fossiilisesti tuotettua energiaa voidaan saada 0,06 dollarin KWh hinnalla. Tutkijoiden mukaan myös vesi- ja tuulivoimasta hintaa kertyy noin 0,03 dollaria enemmän yksiköä kohtaan verratessa fossiilisten polttoaineiden käyttöön.

Datakeskusten lokaatiot vaikuttavat myös siihen mitä uusiutuvaa energiamuotoa niissä käytetään. Maantieteellisesti eri alueiden sijainnit voivat vaikuttaa suuresti siihen millaisia energiamuotoja juuri kyseisillä alueilla hyödynnetään paikallisista sääolosuhteista riippuen. (Zhang ja muut 2011, s. 144). Tämä on tärkeä ottaa huomioon, kun mietitään kuinka uusiutuvaa energiaa olisi tehokasta hyödyntää fossiilisten energiamuotojen sijasta.

Zhang ja muut (2011, s. 145) esittelevät ratkaisuksi GreenWare -järjestelmän, joka hajauttaa datakeskusten toimintaa maantieteellisesti aina energiakustannuksiltaan edullisimpiin alueisiin. Esitellyn järjestelmän tarkoituksena on lähettää dynaamisesti palvelupyynnöt niihin datakeskuksiin, joissa sillä hetkellä on alhaisimmat uusiutuvan energian kustannukset.

Päätarkoituksena on maksimoida uusiutuvan energian käyttö ja näin tasoittaa kustannuseroa fossiilisiin energianlähteisiin. Kyseisen ratkaisun avulla pystytään vaikuttamaan uusituvien energialähteiden nopeisiin hinnanmuutoksiin sekä tasoittamaan datakeskusten kysyntäpiikkejä. Järjestelmä seuraa jatkuvasti reaaliaikaista koko maailman säätä, uusiutuvien energiamuotojen hintoja sekä datakeskuksiin lähetettyjen toimintapyyntöjen määrää eli datakeskusten kokonaistyömäärää. Tämän jälkeen järjestelmä jakaa palvelupyynnöt datakeskusten välille niille alueille, joissa uusiutuvan energian kustannukset ovat pienimmillään ja näin maksimoi niiden hyödyntämistä kustannustehokkaasti verrattuna fossiilisten energialähteiden hyödyntämiseen. (Zhang ja muut 2011, s. 145). GreenWare järjestelmä mallinnettuna kuviossa 11.



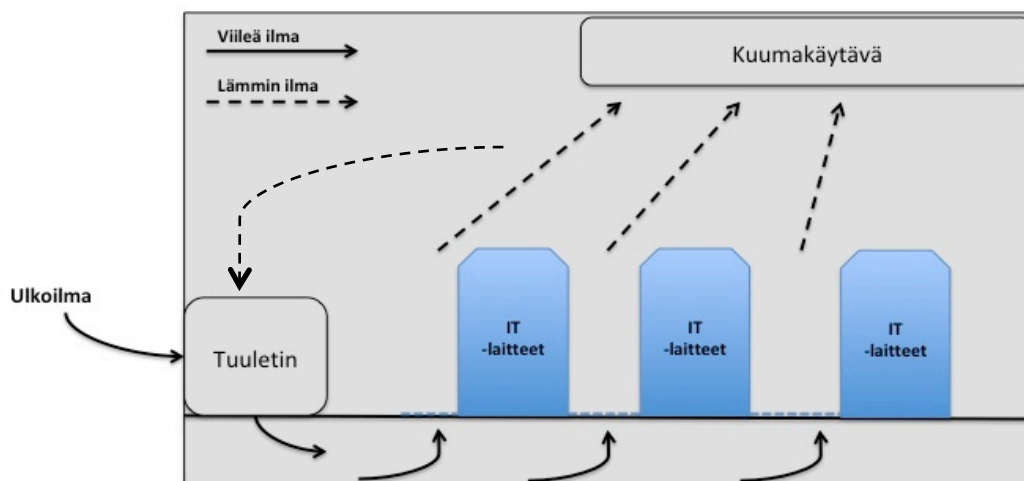
**Kuvio 11.** GreenWare -järjestelmä (Zhang ja muut 2011, s. 146).

Seuraavana vaatimuksena on hyödyntää viileää ulkoilmaa datakeskuksen jäähdytyksessä. Tutkijoiden Lu ja muiden (2011, s. 3361) mukaan keskusteluissa viileän ulkoilman hyödyttämiseen jäähdytyksessä keskitytään usein kahteen näkökohtaan: energiatehokkuuteen sekä ulkoilman hallintaan. Apuna voidaan käyttää seuraavia energiatehokkuusmittareita: energiankäytön tehokkuus (PUE), paluulämpöindeksi (Return Temperature Index, RTI) sekä syöttölämpöindeksi (Supply Heat Index, SHI).

Tutkijat Lu ja muut (2011, s. 3361) pitävät tärkeänä huomiona sitä, että datakeskusten energiankulutus on hyvin paikkakohtaista ja tähän vaikuttaa suuresti maantieteellinen sijainti, ilmasto sekä paikallisen ympäristön olosuhteet.

Yleisesti käytössä olevia jäähdytysjärjestelmiä datakeskuksissa ovat sekä ulkoilmaa hyödyntävät järjestelmät että nesteitä esimerkiksi vettä hyödyntävät jäähdytysjärjestelmät. Yhtenä tunnettuna datakeskusten jäähdytysjärjestelmänä on vuonna 1992 IBM:n luomaa HACA ( Eng. Hot Aisle/Cold Aisle Suom. Kuumaa käyttävä/kylmää käyttävä) -järjestelmä. (Lu ja muut 2011, s.3362).

HACA -jäähdytysjärjestelmän toimintaperiaate perustuu datakeskuksen alle rakennettuun korotettuun lattiaan, jonka alla kulkee viileää ulkoilmaa. Viileä ulkoilma ohjataan datakeskuksen IT laitteisiin lattiasa olevien reikien kautta, jolloin lämmin ilma nousee ylös, mistä se ohjataan poistoilmana kuumakäytävään. IT -laitteisiin tulevan viileän ilman tulee olla 18°C-27°C välillä sekä ilman kosteus tulee olla IT laitteille sopivalla tasolla. (Lu ja muut 2011, s.3360) Kuviossa 12 on mallinnettu HACA -jäähdytysjärjestelmän toimintaa.



**Kuvio 12.** Jäähdytysinfrastruktuuri HACA -järjestelmä. (Lu ja muut, 2011, s. 3361)

Tutkijoiden Lee ja Chen (2013, s.103) mukaan hyvin suunnitelluissa ja hallitusti ohjatuissa datakeskuksissa voidaan vaikuttaa energiapositiivisesti datakeskusten sisätilojen lämpötilaolosuhteisiin ulkoilmaa hyödyntämällä. Tutkijoiden tulokset perustuvat Ashrae Technical Committee TC 9.9 rakennusenergian simulointiohjelmaan, jota käytettiin eri ilmastovyöhykkeillä sijainneissa datakeskuksissa.

ASHRAE on vuonna 1894 perustettu amerikkalainen ammattiliitto, jonka pyrkimyksenä on kehittää talotekniikkaa, energiatehokkuutta, sisäilman laatua ja jäähdytyksen toimivuutta kestäväen kehityksen avulla globaalisti. Liiton missiona on edistää ihmisten hyvinvointia rakentamalla ympäristöä kestäväen teknologian avulla ja se tuottaa alalta erilaisia tutkimuksia, standardeja ja julkaisuja yhdessä liittoon kuuluvien tutkijoiden kanssa. Vuonna 2018 liittoon kuului yli 56 000 jäsentä yli 132 eri valtiosta. (Ashrae, 2021)

Tutkimus osoitti, että ulkoilmaa hyödyntämällä jokaista 2°C lämpötilan laskua datakeskusten sisäilmassa kohden voidaan säästää 2,8 - 8,5 prosenttia jäähdytyksestä muuten aiheutuvista energian kustannuksista. Tulokseen vaikutti se millä ilmastovyöhykkeellä tutkimus suoritettiin. Viileän ilman vyöhykkeellä saatiin merkittävimmät tulokset energian säästöistä. Tuloksiin vaikutti myös ilman kosteus ja tutkijat Lee ja Chen totesivat, että kaikilla ilmastovyöhykkeillä ulkoilman hyödyntäminen ei ole optimaalisin ratkaisu, vaan he ehdottivat näillä alueilla käytettävän vesijohteista jäähdytysjärjestelmää. (Lee & Chen 2013, s.103).

Viimeinen porras pitää sisällään datakeskuksista syntyneen hukkalämmön varastoimisen sekä hyödyntämisen kaukolämpöverkossa. Kuten jo aiemman vaatimustason porras osoitti meille, ulkoilman hyödyntäminen datakeskusten jäähdytysjärjestelmissä on paljolti riippuvainen siitä millä ilmastovyöhykkeellä datakeskus sijaitsee. Ilmastovyöhykkeellä on myös oma vaikutuksensa hukkalämmön hyödyntämisessä.



Wahlroosin ja muut (2018, s.1750) mukaan Pohjoismaiden ilmasto on erittäin sopiva niin ulkoilman hyödyntämiseen datakeskusten jäähdytyksessä, kuin myös jäähdytyksen jälkeen syntyneen hukkalämmön hyödyntämisessä korkean kaukolämmitysasteen vuoksi. Hukkalämpöä on hyödynnetty jo aiemmin kaukolämmityksessä, vuonna 2015 sen osuus Suomessa oli 3,3 prosenttia ja vuonna 2014 Ruotsissa 8 prosenttia kokonaiskaukolämmöstä.

Tutkijat Wahlroos ja muut (2018, s.1750) uskovat näiden lukujen kasvavan tulevaisuudessa. Asuntojen lämmöneristysten parantuessa kyetään yhä enenemissä määrin hyödyntämään hukkalämmöstä saatavaa matalampaa lämpöenergiaa ja näin korvaamaan osan fossiilisilla polttoaineilla tuotetusta lämpöenergiasta.

Hukkalämmön hyödyntämisessä ei ole ainoastaan yhtä ratkaisua. Marciniche ja muut (2012, s.45) toteavat, että datakeskuksista syntyvää alhaisenlämpötilan hukkalämpöä voidaan käyttää esimerkiksi voimalaitosten syöttöveden esilämmitykseen. Marcinichen ja muut (2012, s.45) mukaan tämä johtaisi voimalaitoksien polttoainesäästöihin ja lisäisi niiden hyötysuhdetta jopa 2,2 prosenttia.

Lu ja muut (2011, s.3371) arvioivat Suomen datakeskusten energiatehokkuutta ja hukkalämmön talteenottomahdollisuuksia. Tutkijoiden tutkimustulokset osoittivat, että 97 prosenttia sähkönkulutuksesta voidaan ottaa talteen hukkalämpönä. Tutkimuksessa todettiin, että 1 megawatin kokoisen datakeskuksen toimiessa puolella teholla sen täyskuormituksesta pystyttäisiin kattamaan yli 30 000 neliometrin ei asutetun alueen lämmöntarve vuoden aikana.

Wahlroos ja muut (2018, s. 1749) toteavat, että nykypäivän modernit datakeskukset voivat sisältää tuhansia servereitä ja nimellinen energiankulutus voi nousta jopa 400 megawattiin suurimmissa tämän päivän datakeskuksissa. Karkeasti arvioituna ja tutkioiden tuloksiin linjaten voidaan siis todeta, että 400 megawatin kokoiset valtavat datakeskukset pystyisivät kattamaan lämmön tarpeen 12 neliökilometrin

asuttamattomalle alueelle. Hyödyntämällä tämän mahdollisuuden meille syntyisi keino, jolla pystytään korvaamaan fossiilisilla polttoaineilla tuotettua lämpöenergiaa ja samalla vähentämään lämmityksestä syntyneitä hiilidioksidipäästöjä. Edellä kuvattu tapahtumaketju voitaisiin nähdä yhtenä datakeskusten hiilikädenjälkeä edistävänä ominaisuutena.

Pohjoismailla on runsaasti potentiaalia houkutella uusia datakeskuksia edellämainittujen olosuhteiden vuoksi. Datakeskuksissa syntyvän hukkalämmön tehokas uudelleenkäyttö vaatiivat kuitenkin paljon yhteistyötä lämmönjakelusta vastaavien toimijoiden kanssa. Teknologia ei niinkään ole ongelmana hukkalämmön hyödyntämisessä vaan suuremmaksi kysymykseksi nousee se miten datakeskukset tulevat kattamaan investoinneista aiheutuneet kustannukset sekä kuinka datakeskukset pystyvät hyötymään rahallisesti hukkalämmön hyödyntämisestä. (Walhroos ja muut, 2018, s.1775).

Tutkijat Wahlroos ja muut (2018 s.1755) toteavat, että konesalioperaattoreilta saattaa puuttua asiantuntemus tekemiseen kuinka hukkalämmöstä tultaisiin hyötymään taloudellisesti. Datakeskusten todellisiin tietoihin perustuva hukkalämmön toimittaminen kaukolämpöverkkoihin tulisi analysoida yksityiskohtaisesti, jotta löydetään molemmille osapuolille kannattavimmat liiketoimintavaihtoehdot. Kaukolämpöverkon ja konesalin operaattorien väliset liiketoimintamallit tulisivat olla läpinäkyviä sekä molempien osapuolten tulisi haluta muuttua ja kehittää tuotantomalleja kestävämmän kehityksen mukaisiksi. Lisäämällä tietoisuutta onnistuneista hukkalämmön hyödyntämisprojekteista, teollisuus voi sopeutua uusiin ajattelutapoihin ja näin muttaa nykyisiä liiketoimintamalleja.

Energiatehokkuuden ja hukkalämpöpotentiaalin mittaamiseen on luotava standardimenetelmät ja tämän lisäksi toimijoiden tulee saada riittävästi tukea valtion asetuksista ja lainsäädännöstä energiatehokkuuteen siirtymisen ja hukkalämmön hyödyntämisen osalta. Tavoitteena investoinnissa ei ole vain kustannussäästöt ja

suuremmat voitot, vaan keskittyminen globaaleihin ratkaisuihin energiankulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen osalta.

## 5 Diskussio

Tässä tutkimuksessa selvitettiin suunnittelututkimuksen avulla, millaisilla keinoilla datakeskuksista voitaisiin tulevaisuudessa luoda hiilinegatiivisia toimijoita sekä määriteltiin muuttujat, jotka vaikuttavat datakeskusten energiankulutukseen ja kasvaneisiin hiilidioksidipäästöihin.

Tutkielman tavoitteena oli ratkaista ongelma, millaisilla järjestelyillä datakeskukset voisivat tuottaa palvelujaan kestävän kehityksen näkökulman mukaisesti. Tutkimuksessa hyödynnettiin tieteellistä kirjallisuutta liittyen tutkimusalueeseen, asiantuntijoiden näkemyksiä sekä tutkijan omia näkemyksiä aiheeseen liittyen. Seuraavat osiot käyvät läpi tutkimuksen ja tulosten arvioinnin sekä jatkotutkimusten mahdollisuudet tällä jatkuvasti kehittyvällä teknologian alueella.

### 5.1 Tutkimuksen ja tulosten arviointi

Tutkimuksessa luotu kolmeportainen vaatimusmääritelmä osoittaa, että datakeskusten hiilidioksidipäästöihin on mahdollista vaikuttaa tehokkaasti hyödyntäen uusiutuvia energianlähteitä, hyväksikäyttää viileää ulkoilmaa sekä hyödyntää datakeskuksista syntyntä hukkalämpöä (Zhang ja muut 2011, s.143; Lee& Chen 2013, s.111; Lu ja muut 2011, s.3371). Mitä enemmän datakeskuksissa pystytään hyödyntämään uusiutuvia energianlähteitä sitä vähemmän joudutaan turvautumaan fossiilisten polttoaineiden kulutukseen ja näin vaikutetaan suoraan datakeskuksista syntyviin hiilidioksidipäästöihin.

Datakeskusten sähköntarve on jatkuva ja näin ollen energiantarjoajien tulisi taata vakaa uusiutuvasta energiasta tuotettu sähköntarjonta datakeskuksille. Tähän voidaan nähdä eräänä ratkaisuna Zhangin ja muiden (2011, s. 145) esittelemä GreenWare -järjestelmä,

jonka avulla datakeskusten energiankulutusta ja kuormitusta pystytään hallitsemaan. Tämän hetken globaali tilanne liittyen maapallon ympäristökysymyksiin sekä ilmastonmuutoksen torjumiseen on myös osoittanut, että valtiot pyrkivät hiilineutraaleiksi lähitulevaisuudessa. Tämän johdosta myös osa energiayhtiöistä on alkanut panostaa kestävämpiin energiantuotantoratkaisuihin tukeakseen tätä yhteistä tavoitetta.

Toinen esille noussut keino vaikuttaa datakeskusten energiankulutukseen ja näin hiilidioksidipäästöihin on datakeskusten lokaatio. Datakeskusten sijainnin avulla datakeskukset voivat hyötyä leudon sään tuomista eduista niiden jäähdytysjärjestelmissä. Lokaatio tuo myös toisen edun datakeskuksien energiankäyttöön, sillä datakeskuksista syntyvää hukkalämpöä voidaan hyödyntää alueen kotitalouksien lämmittämisessä. (Wahlroos ja muut 2018, s. 1749). Hukkalämmön hyödyntämisen haasteena kuitenkin on lämmönjakelun epäsäännöllisyys. Epäsäännöllisyys on myös ongelmana jäähdytyksen suhteen, sillä leudoilla alueilla sää voi olla tiettyinä aikoina lämpimämpää.

Tutkielmassa on osoitettu, että ulkoilman hyödyntämisen avulla datakeskusten jäähdytyksessä voidaan säästää jopa 8,5 prosenttia jäähdytyskustannuksista jokaista 2°C sisälämpötilan laskua kohden (Lee & Chen 2013, s.111). Jäähdytysjärjestelmän kuluttaessa 38 prosenttia datakeskusten kokonaisenergiankulutuksesta voidaan arvioida ulkoilman jäähdytyksen luovan noin kolmen prosentin säästön datakeskusten kokonaisenergian kulutuksesta.

Wahlroos ja muut (2018, s. 1749) tuovat esille suurimpien datakeskusten sähkönkulutukset olevan 400 megawatin luokkaa. Tällöin kolme prosentin energiansäästöt tarkoittaisivat noin 13 megawatin säästöjä energiakustannuksissa. Tilastokeskuksen Energia ja päästöt 2021 tilastojen mukaan vuosien 2018-2020 keskiarvo sähköntuotannossa Suomessa synnytti päästöjä 89 kg CO<sub>2</sub>/MWh. Käyttäen tätä kerrointa 13 megawatin säästö energiakustannuksissa tarkoittaisi 1157 kg hiilidioksidisäästöjä hiilidioksidikustannuksissa.

Aiemmin esille tuodulla esimerkillä 400 megawatin kokoisella datakeskuksella pystytään kattamaan 12 neliökilometrin asuttamattoman alueen lämmöntuotanto. Ottamalla huomioon tämä hukkalämmön mahdollisuus kaukolämmön energiasäästöissä voidaan päästä vielä suurempiin säästöihin hiilidioksidikustannuksissa.

Microsoft ja Fortum julkaisivat 17.3.2022 tiedotteen globaalisti ainutlaatuisesta yhteishankkeestaan, jossa Microsoft tulee rakentamaan modernin datakeskusalueen yhdessä Fortumin kanssa. Hankkeen tarkoituksena on hyödyntää hukkalämmön tuomaa etua Fortumin tarjoamassa kaukolämpöverkossa. Hanke on kuvattu tiedettävästi maailman suurimmaksi datakeskusten hukkalämmön hyödyntämis- ja talteenottoprojektiksi ja lukeutuu Suomen historian suurimpiin yksittäisiin ICT-alan investointeihin. Hankkeessa tullaan hyödyntämään myös tutkimuksen artefaktiin kirjattua ensimmäistä askelmaa eli uusiutuvista energiamuodoista syntyneitä sähköenergiaa. Alustavien ennusteiden mukaan Microsoft ja Fortum ovat ennustaneet, että datakeskuksen valmistuessa sen avulla pystyttäisiin saavuttamaan 400 000 tonnin vuotuinen vähennys hiilidioksidipäästöjen osalta. Hukkalämpö tulee kattamaan lähes 40 prosentin lämmöntarpeen Espoon, Kirkkonummen sekä Kauniaisten alueella ja palvelemaan lähes 250 000 kaukolämmön käyttäjää. (Microsoft, 2022).

Microsoftin ja Fortumin yhteishanke sisältää tutkimuksessa aiemmin luodun artefaktin kaksi askelmaa hyödyntämällä ainoastaan uusiutuvia energianlähteitä datakeskusten sähköntarpeen tuottamisessa sekä hukkalämmön hyödyntämisen kaukolämmityksessä. Voidaan todeta, että artefakti palvelee jo nyt suuressa määrin uusimpia datakeskushankkeita ja tulevaisuuden myötä voidaan päästä tilanteeseen, jossa luodun artefaktin vaatimustasot ovat kaikki käytössä.

Yhteenvetona voidaan todeta, että jatkuvasti kasvavan tiedon määrään johdosta meidän tulee yhteiskunnassa luoda toimiva uusia ratkaisumalleja. Ratkaisumallit tulevat sisältämään tehokkaampia tiedonkäsittelyyn luotuja ratkaisuja, kestäväällä tavalla tuotetun energian hyödyntämistä, hyväksikäyttää ilmastomme luomia etuja datakeskusten

sijaintiin liittyen sekä luoda globaalit pelisäännöt siitä, kuinka tiedonhallinta tullaan jatkossa tarjoamaan maapallolla. Onnistuaksemme tavoitteessa luoda hiilinegatiivisia datakeskuksia tulee eri liiketoimintojen, kuten ICT-alan ja energia-alan yhtiöiden jatkosakin luoda Microsoftin ja Fortumin tapaisia yhteishankkeita ja näin päästä kohti haluttua lopputulosta.

## **5.2 Jatkotutkimusmahdollisuus**

Tutkimusosuudessa luodun artefaktin sisältämät kolme vaatimusporrasta eivät ole tiedettävästi vielä missään maapallolla sijaitsevassa datakeskuksessa täydellisesti käytössä. Microsoftin ja Fortumin juuri julkaisema yhteishanke tulee valmistuttuaan hyödyntämään artefaktin kahta vaatimusporrasta, joka tulee toimimaan hyvänä testausjärjestelmänä luotua artefaktia kohtaan. Artefakti ei myöskään välttämättä ole täydellinen vaatimusmäärittelyn malli ja näin ollen jatkuvasti kehittyvien teknologisten hankkeiden avulla sitä voidaan jatkojalostaa tulevaisuudessa. Artefakti voidaan käyttää kuitenkin kattavana pohjana jatkotutkimuksissa ja sen testaaminen tulevaisuudessa riippuu siitä tulevatko datakeskukset ottamaan nämä kaikki kolme vaatimusmäärittelyn porrasta käyttöön tulevaisuudessa pyrkiessään luomaan yhteiskuntaan hiilineutraaleja datakeskuksia.

## Lähteet

Andrews, D. (2019). *Data Centres in 2030: comparative case studies that illustrate the potential of Design for the Circular Economy as an enabler of Sustainability*. Haettu 13.10.2021 osoitteesta <https://openresearch.lsbu.ac.uk/item/8675q>

Armstrong, M. (2019). Global data creation is about to explode. Haettu 7.10.2021 osoitteesta <https://www.statista.com/chart/17727/global-data-creation-forecasts/>

Arregoces, M. & Portolani, M. (2004). *Data Center Fundamentals. Understand Data Center Network Design and Infrastructure Architecture, Including Load Balancing, SSL, and Security*. Cisco Press.

Ashrae (2021). Haettu 12.3.2022 osoitteesta <https://www.ashrae.org/>

Avgerinou, M., Bertoldi, P. & Castellazzi, L. (2017). Trends in Data Centre Energy Consumption Under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency. *MDPI Energies* 10(10) s.1-18. <https://doi.org/10.3390/en10101470>

Baskerville, R., Pries-Heje, J. & Recker, J. (2016). Principles for re-designing information systems for environmental sustainability. Springer International (pp. 14–25). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-44447-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44447-5_2)

Behm, K., Husgafvel, R., Hohenthal, C., Pihkola, H. & Vatanen, S. (2016). Carbon handprint- Communicating the good we do. Research Report. Teknologian tutkimuskeskus. Haettu 20.11.2021 osoitteesta <https://cris.vtt.fi/en/publications/carbon-handprint-communicating-the-good-we-do>



- Cisco. (2020). Cisco annual internet report (2018–2023) white paper. Cisco annual internet report. Haettu 7.11.2021 osoitteesta  
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>
- Corcoran, P. & Andrae, A. (2013). Emerging Trends in Electricity Consumption for Consumer ICT.  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.843.8608&rep=rep1&type=pdf>
- Ebrahimi, K., Jones, G. F. & Fleischer, A. S. (2014). A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding lowgrade waste heat recovery opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, s. 622–638.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.007>
- Euroopan parlamentti. Mitä hiilineutraalius tarkoittaa ja miten se saavutetaan 2050 mennessä. Haettu 23.10.2021 osoitteesta  
<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20190926STO62270/mita-hiilineutraalius-tarkoittaa-ja-miten-se-saavutetaan-2050-menessa>
- Geng, H. (2014). Data Centers- Strategic Planning, Design, Construction, and Operations. <https://doi-org.proxy.uwasa.fi/10.1002/9781118937563.ch1>
- Google Cloud. (2020). Google Cloud Hybrid Connectivity. Haettu 10.11.2021 osoitteesta  
<https://cloud.google.com/hybrid-connectivity>
- Greenberg. Albert, Kandula. Srikanth, Maltz. David A, Hamilton. James R, Kim. Changhoon, Parveen. Patel, Jain. Nvendu, Lahiri. Parantap, and Sengupta. Sudipta (2009). A Scalable and Flexible Data Center Network. Microsoft Research.  
<https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/1592568.1592576>

- Hevner, A., Salvatore, T., & Park, J. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly* 28(1), 75–105. Haettu 20.11.2021 osoitteesta [https://www.researchgate.net/publication/201168946\\_Design\\_Science\\_in\\_Information\\_Systems\\_Research](https://www.researchgate.net/publication/201168946_Design_Science_in_Information_Systems_Research)
- Heras-Saizarbitoria, I. & Boiral Olivier (2013). ISO 9001 and ISO 14001: Towards a Research Agenda on Management System Standards. DOI: 10.1111/j.1468-2370.2012.00334.x
- Hiekkanen, Seppälä & Ylhäinen (2020). Informaatiosektorin energian- ja sähkökäyttö Suomessa. ETLA Raportti No. 104, luonnos 19.5.2020. Haettu 23.11.2021 osoitteesta <https://www.etla.fi/julkaisut/informaatiosektorin-energian-ja-sahkonkaytto-suomessa/>
- Hilbert, Martin, and Priscila López (2011). The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information. *Science*. vol. 332, no. 6025. s. 60- 65. DOI: 10.1126/science.1200970
- Holdren John, P (2007). Energy and Sustainability. *Science* vol 315. <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.1139792>
- ISO International Organization for Standardization (2022) ISO 14000 Family Environmental Management. Haettu 20.02.2022 osoitteesta <https://www.iso.org/iso-14001-environmental-management.html>
- Jones, Nicolas (2018). How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature* 561, s. 163-166. Haettu 11.7.2021 osoitteesta <https://www.nature.com/articles/d41586-018-06610-y>

Järvinen Pertti (2006). *Onko innovaatioiden suunnittelu tiedettä?* Systemityö 2 painos. Haettu 27.10.2021 osoitteesta

<http://www.pcuf.fi/sytyke/lehti/kirj/st20062/ST062-25A.pdf>

Kocmanová, A., Docekalová, M., Skapa, S. & Smolíková, L. (2016). Measuring Corporate Sustainability and Environmental, Social, and Corporate Governance Value Added. *Sustainability*, 8(9), 945. s.13. <https://doi.org/10.3390/su8090945>

Kullas, J. (2022, 29. tammikuuta). Valtavat datakeskukset uhkaavat Irlannin ilmastotavoitteita- 17% kaikesta tuotetusta sähköstä vuonna 2021. *Uusi Suomi*. Noudettu 2.2.2022 osoitteesta <https://www.uusisuomi.fi/uutiset/valtavat-datakeskukset-uhkaavat-irlannin-ilmastotavoitteita-17-kaikesta-tuotetusta-sahkosta-vuonna-2021/f9980101-1d59-4f7b-bdcc-f746e8fcad12>

Laurent, A., Dal Maso, M., Wang, X., Zhu, X & Prata D, (2020). Environmental Sustainability of Data Centres: *A Need for a Multi-impact and Life Cycle*. Copenhagen Centre on Energy Efficiency. Haettu 15.4.2021 osoitteesta: [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/222047968/2020\\_06\\_IssueBrief\\_Datacenter\\_UK\\_endorsed.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/222047968/2020_06_IssueBrief_Datacenter_UK_endorsed.pdf)

Lee, K, P. & Chen, H, L. (2013). Analysis of Energy Saving Potential of Air-Side Free Cooling for Data Centers in Worldwide Climate Zones. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.013>

Lindqvist, Eero (2020). Digi vie puhtaaseen tulevaisuuteen. *Tieken Tiedosta Lehti*. (1)1-52. Haettu 19.2.2022 osoitteesta <https://www.slideshare.net/Tieke/tiedostalehti-12020-digi-vie-puhtaaseen-tulevaisuuteen>

- Lu, T., Lü, X., Remes, M. & Viljanen, M. (2011). Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case study. *Energia and Buildings*. Volume 43, Issue 12. s. 3360-3372.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.034>
- Masanet, Eric, Arman Shehabi, Nuo Lei, Sarah Smith, and Jonathan Koomey (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science* 367, no. 6481 (2020): 984-986. DOI: 10.1126/science.aba3758
- Malmodin, J. & Lundén, D. (2018). The Energy and Carbon Footprint of The Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. *Sustainability*. Volume 9, Issue 9.  
<https://doi.org/10.3390/su10093027>
- Malmodin, Moberg, Lundén, Finnveden & Lövehagen (2010). Greenhouse Gas Emissions and Operational Electricity Use in the ICT and Entertainment & Media Sectors. KTH, Royal Institute of Technology. Volume 14, Number 5.  
<https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00278.x>
- Marcinichen, J., Oliver, J. & Thome, J.(2012). On-chip Two-phase Cooling of Datacenters: Cooling System and Energy Recovery Evaluation.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.008>
- Markus, M., Majchrzak, A., & Gasser, L. (2002). A Design Theory for Systems That Support Emergent Knowledge Processes. *MIS Quarterly*, 26(3), 179–212. Noudettu 2021- 02-03 osoitteesta <https://doi.org/10.2307/4132330>
- MayorsIndicators (2008). CO2-Raportti. Haettu 18.3.2022 osoitteesta <https://www.co2-raportti.fi/?page=ilmastonmuutos>

Microsoft (2022). Microsoft ja Fortum yhteistyöhön - Microsoft rakentaa Suomeen datakeskusalueen, joka tuottaa päästötöntä kaukolämpöä Fortumin asiakkaille pääkaupunkiseudulla. Haettu 18.3.2022 osoitteesta <https://news.microsoft.com/fi-fi/2022/03/17/microsoft-rakentaa-suomeen-datakeskusalueen/>

Microsoft Azure. (2021). Public cloud vs private cloud vs hybrid cloud | microsoft azure. Haettu 10.12.2021 osoitteesta <https://azure.microsoft.com/enus/overview/what-are-private-public-hybrid-clouds/>

Mills, Mark P. (2013). The Cloud Begins with Coal Big Data, Big Networks, Big Infrastructure, and Big Power. "An Overview of The Electricity Used By The Global Digital Ecosystem". Digital Power Group. Haettu 18.3.2021 osoitteesta [https://www.tech-pundit.com/wp-content/uploads/2013/07/Cloud\\_Begins\\_With\\_Coal.pdf](https://www.tech-pundit.com/wp-content/uploads/2013/07/Cloud_Begins_With_Coal.pdf)

Nadjahi, C., Louahlia, H. & Lemasson, S. (2018). A review of thermal management and innovative cooling strategies for data center. Sustainable Computing: Informatics and Systems. 19. s. 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.05.002>

NOAA, National Centers for Environmental Information (2021). *Climate at a Glance*. Haettu 13.9.2021 osoitteesta [https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/globe/land\\_ocean/1/9/2010-2021](https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/globe/land_ocean/1/9/2010-2021)

Norris, G. and Phansey, A. (2015). Handprints of Product Innovation: A Case Study of Computer-aided Design in the Automotive Sector. Haettu 20.8.2021 osoitteesta [https://shine.mit.edu/sites/default/files/Norris%202015%20Handprints%20of%20Product%20Innovation%20A%20Case%20Study%20of%20Computer-aided%20Design%20in%20the%20Automotive%20Sector\\_2.pdf](https://shine.mit.edu/sites/default/files/Norris%202015%20Handprints%20of%20Product%20Innovation%20A%20Case%20Study%20of%20Computer-aided%20Design%20in%20the%20Automotive%20Sector_2.pdf)

- Oró, E., Depoorter, V., Garcia, A. & Salom, J. (2015). Energy Efficiency and Renewable Energy Integration in Data Centres. Strategies and Modelling Review. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.035>
- Pedersen, Lasse, Heje. Fitzgibbons, Shaun & Pomorski, Lukasz. (2020). Responsible investing: The ESG-efficient frontier. Journal of Financial Economics 142. s. 572-597. <https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2020.11.001>
- Peffer, Ken. Tuunanen, Tuure. Rothenberger, Marcus, A. & Chatterjee, Samir (2007). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. Journal of Management Information Systems. Vol. 24, No. 3. s.45–77. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>
- Pertsova, Carolyn (2007). Ecological Economics Research Trends. Nova Science Publishers, Inc. New York. s.366
- Renugadevi, T., Geetha, K., Muthukumar, K. & Geem, Z. W. (2020). Optimized energy cost and carbon emission-aware virtual machine allocation in sustainable data centers Multidisciplinary Digital Publishing Institute. No16 <https://doi.org/10.3390/su12166383>
- Saha, S., Sarkar, J., Dwivedi, A., Dwivedi, N., Narasimhamurthy, A. M. & Roy, R. (2016). A novel revenue optimization model to address the operation and maintenance cost of a data center. Journal of Cloud Computing. Vol. 5, No.1 . s. 1-23 <https://doi.org/10.1186/s13677-015-0050-8>
- Song, Z., Zhang, X. & Eriksson, C. (2015). Data Center Energy and Cost Saving Evaluation. Energy Procedia. Elsevier. s. 1255-1260 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.178>

Suomen YK-Liitto (2017) Kestävän kehityksen tavoitteet. Haettu 28.12.2021 osoitteesta [https://www.ykliitto.fi/sites/www.ykliitto.fi/files/media/Agenda2030\\_pikkukirjanen\\_2017.pdf](https://www.ykliitto.fi/sites/www.ykliitto.fi/files/media/Agenda2030_pikkukirjanen_2017.pdf)

Tilastokeskus (2020). Energian kokonaiskulutus väheni ja uusiutuvan energian kulutus kasvoi prosentoin vuonna 2019. Haettu 18.3.2021 osoitteesta [http://www.stat.fi/til/ehk/2019/ehk\\_2019\\_2020-12-21\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehk/2019/ehk_2019_2020-12-21_tie_001_fi.html)

Tilastokeskus (2022). Energia ja päästöt 2021. Haettu 18.3.2022 osoitteesta [https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2021/html/suom0011.htm](https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2021/html/suom0011.htm)

The Green Grid (2010). Carbon Usage Effectiveness (CUE): A Green Grid Data Center Sustainability Metric. Haettu 28.4.2021 osoitteesta: [https://www.netalis.fr/wp-content/uploads/2016/04/Carbon-Usage-Effectiveness-White-Paper\\_v3.pdf](https://www.netalis.fr/wp-content/uploads/2016/04/Carbon-Usage-Effectiveness-White-Paper_v3.pdf)

The Green Grid (2011). Water Usage Effectiveness (WUETM): A Green Grid Data Center Sustainability Metric. Haettu 28.4.2021 osoitteesta: <https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/238-Water-Usage-Effectiveness-%28WUE%29%3A-A-Green-Grid-Data-Center-Sustainability-Metric->

The Green Grid (2012). PUETM: A Comprehensive Examination of The Metric. Haettu 28.4.2021 osoitteesta: <http://nikom.in/Downloads/0a58778d-fc96-4482-8c46-13abe76b015c.pdf>

Turner, W., Seader, J. H., Renaud, V. & Brill, K. (2006). Tier classifications define site infrastructure performance. Uptime Institute. Haettu 6.10.2021 osoitteesta <https://www.atlas-environment-finland.com/wp-content/uploads/2019/07/Tier.pdf>

Zhang, Y., Wang, Y. & Wang, X. (2011). GreenWare: Greening Cloud-Scale Data Centers to Maximize the Use of Renewable Energy. [https://doi-org.proxy.uwasa.fi/10.1007/978-3-642-25821-3\\_8](https://doi-org.proxy.uwasa.fi/10.1007/978-3-642-25821-3_8)