

Oona Tolonen

# **DIGITAALISET RATKAISUT TUOTTEEN KIERRON MAHDOLLISTAJINA**

Kandidaatintyö  
Johtamisen ja talouden tiedekunta  
Tarkastaja: Ulla Saari  
Joulukuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Oona Tolonen Digitaaliset ratkaisut tuotteen kierron mahdollistajina  
Digital solutions as product circulation enablers  
Kandidaatintutkielma  
Tampereen yliopisto  
Tuotantotalouden tutkinto-ohjelma  
Joulukuu 2023

---

Ihmiskunta käyttää maapallon resursseja kestävämmällä tahdilla, mikä aiheuttaa ongelmia ympäristölle ja uhkaa ekosysteemien tasapainoa. Perinteinen lineaaritalous ei enää palvele länsimaisen hyvinvointiyhteiskunnan tarpeita, vaan pikemminkin korostaa rajallisten resurssien tuhlausta ja nykyisenlaisen kulutuskäsitteemme vastuuttomuutta. Tuota-käytä-hävitä -mallin vastapainoksi on noussut vaihtoehtoinen talousmalli, kiertotalous, joka korostaa resurssien tehokasta kierrätystä ja uudelleenkäyttöä ympäristön suojelemiseksi, resurssien säästämiseksi ja kestävä kehityksen edistämiseksi. Kiertotalouden lisäksi digitalisaatio muokkaa yhä kiihtyvällä tahdilla yhteiskuntaa, liiketoimintaa ja tapaamme elää, joten on oleellista huomioida digitalisaation mahdollisuudet kiertotaloudellisten toimintatapojen mahdollistajana Teollisuus 4.0:n aikakaudella. Tutkijat ja teollisuuden asiantuntijat näyttäisivät olevan yhtä mieltä siitä, että digitalisaatio on keskeisessä asemassa kiertotalouden käytänteiden integroinnissa käytäntöön ja tuotantoketjujen hallinnassa.

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan digitaalisten teknologioiden ja sovellusten mahdollisuuksia tukea kiertotalouden mukaista tuotekiertoa. Katsaukseen valitut digitaaliteknologiat esitellään suppeasti, minkä jälkeen tutkitaan kunkin teknologian käyttömahdollisuuksia kiertotaloudellisen tuotekierron yhteydessä. Teknologioiden vaikutuksia tuotekiertoa jäsenellään tuotteen elinkaaren vaiheiden mukaan, aina suunnittelusta käytöstä poistoon. Jokaisesta esitellystä digitekologiasta löydettiin mahdollisuuksia tuotteisiin liittyvien kiertotalousstrategioiden edistämiseksi ja tuotteen elinkaaren pidentämisessä. Myös digitalisaation välillisiä hyötyjä kiertotalouden tukemisessa tunnistettiin. Lisäksi tutkielman puitteissa kiinnitettiin huomiota haasteisiin, joita lisääntyvä digitalisaatio voi tuoda mukanaan.

Tutkielma suoritettiin kirjallisuuskatsauksena. Katsauksessa esitetyt teknologiat ja niiden sovellukset seulottiin kvantitatiivisella menetelmällä ajankohtaisesta lähdeaineistosta, millä pyrittiin takaamaan katsauksen ajankohtaisuus. Katsauksen tulokset pyrkivät kuvaamaan millä tavoin teollisuus 4.0 voi edistää tuotekierron vastuullisuutta.

Avainsanat: digitalisaatio, kiertotalous, teollisuus 4.0 tuotekierto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ALKUSANAT

*”Sillä maailma hukkuu paskaan,  
me vain luemme lehtiä,  
pitäis nopsaan laulaa rastaan,  
jos se meinaa ehtiä”*

- *Rauli Badding Somerjoki, Hymyile Miss Universum (1973).*

Tämä työ syntyi mielenkiinnosta kestävästä kehitystä ja uteliaisuudesta parempaa tulevaisuutta kohtaan.

Haluan kiittää työn tarkastajaa Ulla Saarea palautteesta ja kehitysehdotuksista kirjoitusprosessin aikana. Kiitokset ansaitsee myös Jaakko Siltaloppi, jolta sain hyviä ideoita työn kehittämiseksi. Kiitos myös Tuomakselle, joka luki työn läpi digitaalinen punakynä heiluen.

Tampereella, 1.12.2023

Oona Tolonen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Tutkimuskysymys.....	2
1.2 Tutkimusmetodologia .....	2
2. KIERTOTALOUS JA DIGITALISAATIO MUUTOSVOIMINA .....	5
2.1 Kiertotalous ja tuotekierto.....	5
2.2 Digitalisaatio ja Teollisuus 4.0 .....	8
3. DIGITAALISET RATKAISUT JA -TEKNOLOGIAT TUOTEKIERROSSA.....	10
3.1 Tekoäly .....	10
3.2 Esineiden internet .....	12
3.3 Massadata ja data-analyysi.....	13
3.4 Jakamis- ja alustatalous .....	13
3.5 Lohkoketjut .....	14
4. DIGITAALISTEN RATKAISUJEN KIERTOTALOUDELLISET HYÖDYT TUOTEKIERROSSA.....	16
4.1 Ratkaisut suunnitteluvaiheessa .....	16
4.2 Ratkaisut käytön aikana .....	18
4.3 Ratkaisut käytöstä poistossa .....	19
4.4 Muita hyötyjä.....	20
4.5 Ratkaisujen haasteet ja esteet .....	21
5. PÄÄTELMÄT .....	23
LÄHTEET .....	26

# 1. JOHDANTO

Yhä enenevässä määrin on alettu tunnistamaan lineaarisen talousmallin haitalliset vaikutukset ympäristöön. Nämä vaikutukset näkyvät luonnonvarojen ehtymisenä, elinympäristöjen pilaantumisena ja jätteiden määrän lisääntymisenä, mikä johtuu lineaaritalouden kestäättömästä ympäristöressurssien käytöstä ja tuota-käytä-hävitä -suhtautumisesta tuotteiden elinkaareen. (Morseletto, 2023). Linearisessa talousajattelussa tuotteet suunnitellaan, valmistetaan, käytetään ja hävitetään huomioimatta raaka-aineiden ja materiaalien rajallisuutta, mikä lisää ekologista kuormitusta ja resurssien tuhlausta.

Vastuullisuuden noustessa yhä merkittävämpään rooliin tuotannossa ja kuluttamisessa, yritykset ovat alkaneet kiinnittämään huomiota näihin heikkouksiin, joita lineaariseen talousajatteluun sisältyy. Siirtyminen kohti vastuullisempaa toimintatapaa ja kestävämpää tulevaisuutta vaatii etenkin kahta merkittävää muutosvoimaa; kiertotaloutta ja digitalisaatiota. Voidaan havaita, että kiertotalous ilmiönä ja käytännössä on laajentunut merkittävästi erityisesti digitalisaation ja digiteknologioiden kypsyyden ja käyttöönoton kasvun myötä (Bressanelli et al., 2018; Rusch et al., 2023). Tutkimukset ovat vahvistaneet, että digitaalitekniologioiden käyttöönotto voi edistää yritysten kiertotaloudellista suorituskykyä (Awan et al., 2021). Lisäksi on havaittu, että korkea digitalisaation aste liittyy myönteisesti yritysten kiertotaloudellisten valmiuksien kasvuun (Bag & Pretorius, 2022). Digitalisaatiolla ja kiertotaloudella on voimakas synerginen suhde, ja digitaaliset teknologiat voivat toimia merkittävinä liikkeellepanevinä voimina kiertotalouden edistämisessä.

Digitaaliset teknologiat ovat usein keskiössä keskusteltaessa ratkaisusta, joilla voidaan mahdollistaa tuotteiden elinkaari kiertotalouden periaatteiden mukaisesti. Näiden teknologioiden tosiasiallinen hyödyntäminen vaatii ymmärrystä teknologioiden taustoista, sovelluksista ja käyttötavoista. Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan digitalisaation roolia kiertotalouden mukaisen tuotekierron mahdollistajana ja edistäjänä. Tutkielmassa selvitetään, mitkä ovat merkittävimpiä Teollisuus 4.0:n mukaisia teknologioita ja näiden sovelluksista kiertotaloudessa, miten näillä ratkaisulla ja teknologioilla voidaan edelleen tehostaa resurssien hallintaa, edistää tuotteiden uudelleenkäyttöä ja kierrätystä sekä mahdollistaa kestäviä liiketoimintatapoja. Lisäksi tarkastellaan niitä haasteita ja mahdollisia esteitä, jotka liittyvät digitalisaatioon, kiertotalouteen ja näiden ilmiöiden yhteensovittamiseen.

Katsauksen rakenne alkaa aiheen motivoinnista ja tutkimuskysymysten asettamisesta ensimmäisessä luvussa. Toisessa luvussa käydään läpi tutkimuksen toteutus sekä tutkimusaineiston haku ja seulonta, sekä avataan metodologiaa katsauksen taustalla. Teoriaa digitalisaatiosta, kiertotaloudesta ja tuotekierrosta käydään läpi kolmannessa luvussa. Neljännessä luvussa syvennyttään lähdeaineistojen synteisiin ja pyritään löytämään vastaukset esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Lähdeaineiston synteessin päätteeksi lopputulokset, rajoitukset ja jatkotutkimusehdotukset esitellään päätelmissä.

## 1.1 Tutkimuskysymys

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena on tutkia digitalisaation ja valittujen digitaalisten teknologioiden roolia tuotteiden ja materiaalien kiertotaloudessa. Digitalisaatio on jo vuosikymmeniä muokannut maailmankuvaamme, mutta digitaalisten teknologioiden jatkuva ja nopea kehitys on edelleen merkittävä muutosvoima, eikä digitalisaation täyttä potentiaalia pystytä vielä hyödyntämään liiketoiminnassa. Kiertotalous taasen on nousut keskusteluun erityisesti 2010-luvulla, kun lineaaritalousajattelun haitat ovat korostuneet kiihtyvän kulutuksen, globalisaation ja väestönkasvun myötä. Vastuullisuusajattelun ja kestävä kehityksen tullessa yhä tärkeämmiksi arvoiksi yhteiskunnassa, on yritysten reagoitava ja mukautettava toimintaansa pysyäkseen kilpailukykyisinä. Digitalisaation merkitys kiertotalouden mahdollistamisessa on tunnistettu, ja tutkimuksia erityisesti yksittäisten digiteknologioiden hyödyntämisestä tuotekierron edistämässä on tehty. Tutkielmassa avataan ensin tutkittavien ilmiöiden taustaa ja teoriaa, jonka pohjalta luodaan käytännönläheinen synteesi tämän hetken merkittävimmistä digitaalisista ratkaisuista kiertotaloudessa.

Tutkimuskysymys saa näin ollen muodon

- Miten ja mitä digiratkaisuja hyödynnetään tuotteen kierron tukena?

Tavoitteena on siis tutkia, miten digitaalitekniikat vaikuttavat tuotekiertoon ja kuinka ne edistävät tuotteiden vastuullisuutta elinkaaren aikana.

## 1.2 Tutkimusmetodologia

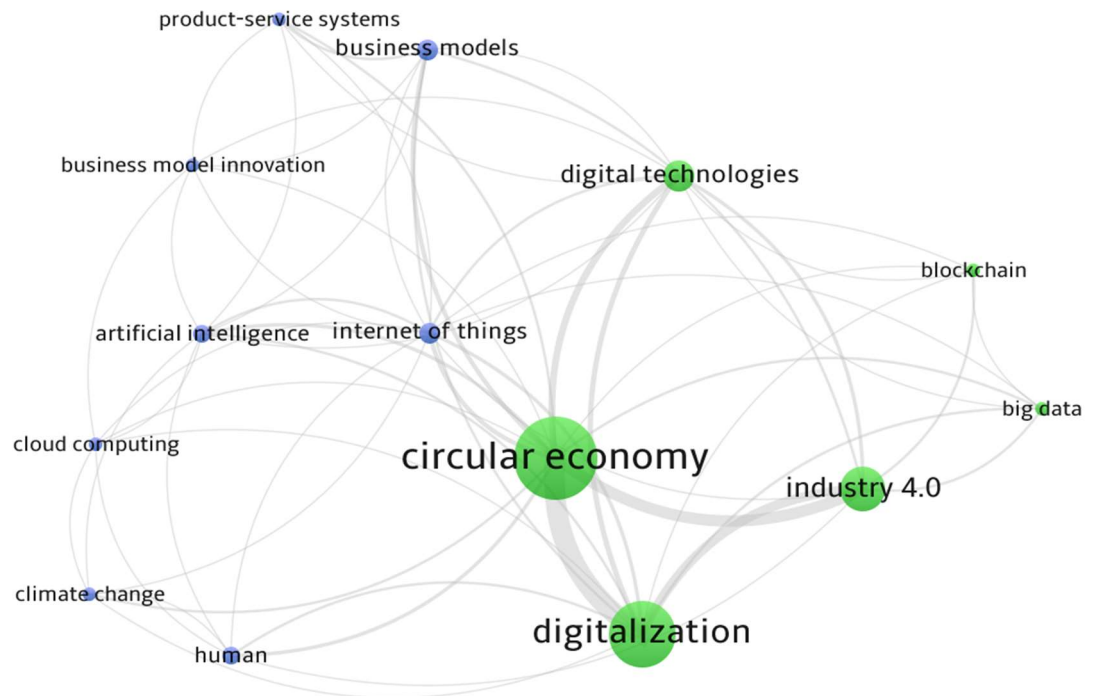
Tämän kandidaatintyön tutkimusmenetelmänä toimii kirjallisuuskatsaus. Tutkimusmenetelmän rakenne mukailee Finkin (2019) systemaattisen kirjallisuuskatsauksen mallia, joskin katsauksen suorittamisen vaihetta on yksinkertaistettu kandidaatintutkielmaa varten. Katsauksen teko alkaa tutkimuskysymysten asettamisella, minkä jälkeen lähdemateriaalia etsitään määritellyistä tietokannoista ennalta määritettyjen hakutermin ja -kri-

teerien avulla. Katsaukseen valitut aineistot käydään läpi, ja niiden näkökulmat ja tulokset esitetään systemaattisesti ja selkeästi. Lopuksi materiaaleista koostetaan synteesi, joka kerää yhteen katsauksen lopputulokset ja päätelmät. Mallin noudattamisella pyritään varmistamaan tutkimusaineiston tasalaatuisuus ja näin luomaan uskottavuutta kirjallisuuskatsaukselle.

Katsauksessa käytettyinä lähdemateriaalin tietokantoina olivat Web of Science, Scopus ja Andor. Hakusanat ja – lausekkeet seulottiin aihepiirin keskeisistä käsitteistä. Katsauksessa hyödynnetyt aineistot ovat pääosin alkuperäisartikkeleita ja aihepiireihin liittyviä kirjallisuuskatsauksia, lisäksi teoriaosuudessa hyödynnettiin kirjoja sekä tunnettujen organisaatioiden julkaisuja. Koska katsauksen aihe on hyvin aikaan sidottu, oli oleellista suosia mahdollisimman tuoreita julkaisuja. Katsauksen ja tulosten luotettavuuden lisäämiseksi työssä käytettiin vain vertaisarvioituja julkaisuja. Lisäksi lähdemateriaalin valinnassa kiinnitettiin huomio aineiston julkaisualustaan, viittausten määrää ja artikkelien tapauksessa abstraktin sisältöön ja avainsanoihin. Julkaisualustan tuli olla tunnettu, tieteellisiä julkaisuja toimittava kanava. Viittausten määrä auttoi arvioimaan aineiston käytettävyyttä ja luotettavuutta, joskin kovin tuoreissa lähdemateriaaleissa viittausten määrälle ei annettu suurta painoarvoa. Aineistot, jotka rajoittuvat tarkasti tiettyyn toimialaan, tapaukseen tai maantieteelliseen sijaintiin pyrittiin jättämään pois katsauksen yleistettävyyden parantamiseksi. Mikäli materiaali sopi ominaisuuksiltaan näihin kriteereihin ja julkaisu vaikutti abstraktin mukaan aiheeseen sopivalta, saattoi aineisto valikoitua lähdemateriaaliksi.

Koska mielenkiintona katsauksessa on selvittää juuri tämän hetken puhutuimmat ja tutkituimmat digitaaliset ratkaisut kiertotalouden edistämisessä, valikoitiin esitetyt teknologiat ja niiden sovelluskohteet kvantitatiivisella katsauksella aihepiirin artikkeleihin ja julkaisuihin. Menetelmässä määritettiin ensimmäiseksi hakulauseke (*“digitalization” AND “circular economy”*), jolla lähdemateriaalia etsittiin valitusta tietokannasta (Scopus). Hakuseulaan asetettiin aineiston julkaisuvuodiksi 2022-2023 ja tarkasteluun otettiin vain vertaisarvioidut lähteet. Aineistoja haettiin johtamisen, talouden, suunnittelun (eng. *engineering*), ympäristö- ja päätöksentekotieteiden alalta. Haku tuotti näillä kriteereillä 113 tulosta. Tuloksista valittiin 39 julkaisua. Valinnasta jätettiin ulos erityisesti julkaisut, jotka keskittyivät yhteen tiettyyn teknologiaan, tapaustutkimukseen tai tarkkaan rajatulle maantieteelliselle alueelle. Valittujen julkaisujen avainsanoista koostettiin semanttinen verkko (kuva 1) VOSviewer-ohjelmiston avulla. Kuvaajan selkiyttämiseksi verkon kuvantamisessa karsittiin pois sanoja, jotka eivät liittyneet digitalisaatioon tai kiertotalouteen, tai jotka esiintyivät aineistossa vain muutaman kerran. Avainsanojen koko verkossa kuvaa termin esiintymismäärää aineistossa; mitä suurempi kuvaajan termi, sitä useammin

se esiintyy aineistossa. Kuvan verkosto kuvaa avainsanojen liittymistä toisiinsa; mitä enemmän yhteyksiä termien välillä on, sitä tiiviimmin ne liittyvät toisiinsa valitussa aineistossa.



**Kuva 1.** Katsaukseen valitusta materiaalista muodostettu semanttinen verkko, joka määrittää katsauksessa käsiteltävät digitaaliset teknologiat ja ratkaisut.

Lähdemateriaalille suoritetun analyysin perusteella katsaukseen käsiteltäviksi aiheiksi valikoituivat tekoäly, esineiden internet, massadata ja data-analyysi, kiertotalouden liiketoimintamallit (tarkemmin jakamis- ja alustatalous) ja lohkoketjuteknologia. Jakamis- tai alustatalous eivät suoraan esiinny semanttisessa verkossa, mutta katsauksen kontekstissa on perusteltua kiinnittää huomio näihin kiertotalouden liiketoimintamalleihin. Digitaalisia teknologioita, joita lähdemateriaalissa käsiteltiin, mutta jotka eivät päätyneet kandidaatintyössä käsiteltäviksi, olivat esimerkiksi kyberfyysiset järjestelmät, 3D-tulostus, RFID-tagit ja älykkäät tehtaot. Käsiteltävien aiheiden määrä on rajattu viiteen, jotta katsauksen pituus pysyy maltillisena.



## 2. KIERTOTALOUS JA DIGITALISAATIO MUUTOSVOIMINA

Luvussa kaksi esitellään tutkimuskysymyksen hallitsevat teemat, kiertotalous ja digitalisaatio. Työn kannalta on oleellista määritellä nämä ajankohtaiset ilmiöt ja niiden vaikutukset liiketoimintaympäristöömmme yleisellä tasolla. Luku kaksi pyrkii kuvaamaan ilmiöiden käytännön ilmenemistä sekä hyötyjä ja haittoja, minkä jälkeen on helpompi paneutua yksityiskohtaisemmin tuotekiertojen digitaalisiin ratkaisuihin luvussa kolme. Vaikka ilmiöt käsitellään erillisinä, voidaan todeta, että kyse on megatrendeistä, jotka kietoutuvat toisiinsa ja kehittyvät jatkuvasti yhtä matkaa, toisiaan muokaten.

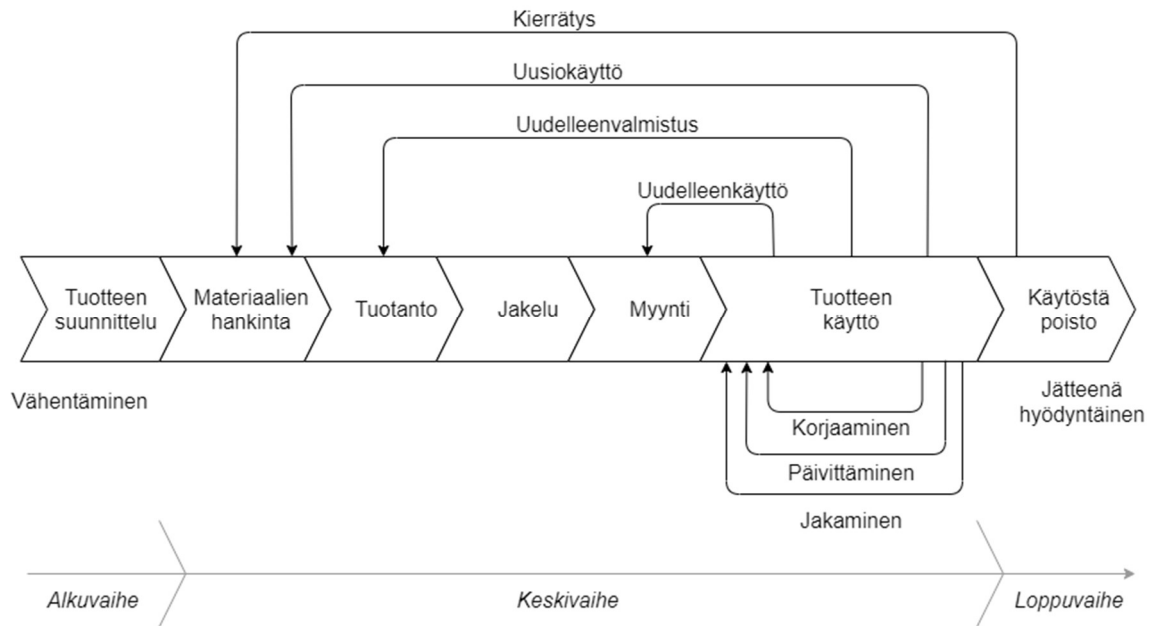
### 2.1 Kiertotalous ja tuotekierto

Kaupankäynnin ja hyödykkeiden tuottamisen alkamisesta lähtien yhteiskuntamme toimintaa on ohjannut jatkuvaan uuden tuottamiseen ja kulutuksen lisäämiseen tähtäävä talousmalli, lineaaritalous (Morseletto, 2023). Lineaaritalous perustuu tuota-käytä-hävitä-ajattelutapaan, jossa resurssit otetaan ympäristöstä, ja tuotteiden valmistuksessa sekä kulutuksessa korostuu kertakäyttöisyys. Tämä tarkoittaa sitä, että tuotteet suunnitellaan ja valmistetaan usein siten, että tuotteiden käyttöaika on lyhyt ja elinkaaren lopussa ne päätyvät jätteeksi (Neves & Marques, 2022). Toimintamallin myötä luonnonvarojen käyttö on noussut kestävämmälle tasolle, mistä kertovat globaalit ympäristöilmiöt, kuten ilmastonmuutos, luontokato, ja ympäristön saastuminen. Yleisesti ottaen lineaaritalousmallin haitat ja riskit ympäristölle sekä tuleville sukupolville tunnetaan jo laajalti, minkä takia ekologisesti kestävämpiä ja vastuullisempia toimintatapoja on lähdetty etsimään kiertotaloudesta.

Ensimmäisen kerran kiertotaloudesta on puhuttu jo 1970-luvulla (Merli et al., 2018), joskin termille ”kiertotalous” ei ole vielä 2020-luvulle tultaessa kehittynyt yleisesti tunnustettua, yksityiskohtaista määritelmää. Geissdoerfer et al. (2016) mukaan kiertotalous on toimintaa, jolla voidaan vähentää resurssien käyttöä ja minimoida jätteiden, päästöjen ja energian muodostumista hidastamalla, kaventamalla ja sulkemalla materiaali- ja energiavirtoja, niin kutsuttuja ”looppeja”. Ellen McArthur -säätöön (2013) mukaan kiertotalous pohjautuu palauttavaan ja uudistavaan suunnitteluun, jonka tarkoituksena on säilyttää tuotteiden ja palveluiden arvo mahdollisimman korkeana arvoketjun eri vaiheissa. Ghisellini et al. (2016) puolestaan kuvaa kiertotalouden perimmäisen tarkoituksen olevan talouskasvun erottaminen luonnonvarojen hyödyntämisestä, niin kutsuttu irtikykentä

(eng. *decoupling*). Huolimatta määritelmien runsaasta määrästä, eroavaisuuksista ja yhtäläisyyksistä, on niiden kaikkien perimmäisenä tavoitteena talouden toimiminen kestävä kehityksen mukaisesti ja ympäristön ehdoilla, ei sen kustannuksella. Päämääränä kiertotaloudessa on luoda ekologista, taloudellista ja sosiaalista hyvinvointia tukeva talousmalli, joka keskittyy resurssitehokkuuden parantamiseen, tuotteiden käyttöiän pidentämiseen ja jätteeksi päätyvän materiaalin määrän minimointiin (Ellen McArthur Foundation, 2016).

Kiertotalouden mukaisia toimia voidaan konkretisoida R-strategioiden kautta. R-strategiat kuvaavat toimintatapoja, joilla pystytään pidentämään tuotteiden elinkaarta ja mahdollistetaan materiaalien arvon säilyminen mahdollisimman pitkään (Potting et al., 2017). Usein esitetty 3R-viitekehys kiertotalouden kontekstissa viittaa materiaalien vähentämiseen (eng. *reduce*), uudelleenkäyttöön (eng. *reuse*) ja kierrätykseen (eng. *recycle*). Nämä kolme tapaa ovat ehkä tunnetuimmat materiaalin kiertoon vaikuttavat strategiat, sittemmin R-strategioita on kehitetty, ja parhaimmillaan puhutaan jopa kymmenestä R-strategiasta, joihin kuuluu edelle mainittujen lisäksi kieltäytyminen (myös vähentäminen, eng. *refuse*), tuotteen ja liiketoimintamallin uudelleen määrittäminen (eng. *rethink*), korjaaminen (eng. *repair*), kunnostaminen (myös päivittäminen tai modernisointi, eng. *refurbish*), uudelleenvalmistus (eng. *remanufacture*), materiaalin uudelleen käyttäminen eri tarkoitukseen (uusiokäyttö, eng. *repurpose*), ja energian talteenotto tuotteen elinkaaren lopussa, kuten polttamalla energiajätteenä (eng. *recover*). (Winqvist et al., 2023). Kuvassa 2 on havainnollistettu, kuinka strategiat sijoittuvat tuotteen elinkaareen, luoden suljettuja kiertoja ja poistaen lineaaritalousajattelusta tutun tuotteen hävittämisen jätteenä sen elinkaaren lopussa. Kuva 2 keskittyy niin kutsuttuun tekniseen kiertoon, joka kuvaa ihmisen valmistamien materiaalien ja tuotteiden elinkaarta (Ellen MacArthur Foundation, 2013).



**Kuva 2.** R-strategiat kiertotaloudellisessa tuotekierrossa ja tuotteen elinkaaren eri vaiheissa (mukaiillen Ellen MacArthur Foundation, 2013; Stark 2011).

Kuvasta 2 nähdään, kuinka kiertotalousstrategiat vaikuttavat tuotteiden elinkaareen kaikissa tuotteen elinkaaren vaiheissa, aina tuotteen suunnittelusta sen käytöstä poistoon. Perinteisessä lineaarisessa ajattelussa tuotteen elinkaari voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen. Alkuvaihe sisältää tuotekehityksen, suunnittelun ja valmistuksen. Keskivaiheeseen sijoittuvat jakelu, tuotteen käyttö ja käytön aikaiset toimet, kuten kunnossapito ja korjaaminen. Elinkaari päättyy käytöstä poistoon (eng. *End of life, EoL*), jossa tuote hävitetään jätteenä tai kierrätetään. (Stark, 2011) Kiertotalousstrategiat muokkaavat lineaarista kiertoa mahdollistamalla kehdestä kehtoon (eng. *cradle-to-cradle*) lähestymisen tuotteiden ja materiaalien elinkaareen, pyrkien pidentämään tuotteiden käyttöikää ja säilyttämään tuotteiden ja materiaalien jo tuotetun arvon (Braungart et al., 2007). Keskeltä kuvaa voidaan nähdä lineaarisen talousmallin runko, jonka vaiheisiin kiertotalousstrategiat sulautuvat. Nähtävissä on sekin, että strategioiden käyttöönotto tarkoittaa lisääntyvää logistiikkaa tuotteiden liikkua kiertoja pitkin, kompleksisempia toimitusketjuja ja -verkostoja, sekä uudenlaisia toimintoja tuotteen elinkaaren aikana.

Kiertotalousstrategiat vaikuttavat tuotteeseen kaikissa sen elinkaaren vaiheissa. Suunnittelusta alkaen kiertotalous näkyy tuotteiden ja niiden osien ekosuunnitteluna (eng. *ecodesign, ecological design*), joka keskittyy kehittämään tuotteista kestäviä, korjattavia, päivitettäviä sekä materiaali- ja energiatehokkaita. Tavoitteena on vähentää tuotteen valmistukseen käytettäviä resursseja ja jopa tarvetta tuotteen valmistamiselle. Valmistuksessa kiertotalous voi näkyä esimerkiksi tuotantoprosessien energiaoptimointina, zero

waste -ajattelun kautta tai kierrätysmateriaalien hyödyntämisenä uusien tuotteiden valmistuksessa. Varsinaisen käytön aikana kiertotalous pyrkii pidentämään tuotteen käyttöikä kiertotalousstrategioiden avulla, ja se kannustaa vaihtoehtoisin omistamismalleihin, kuten tuotteen vuokraamiseen tai jakamiseen, poiketen perinteisen lineaaritalouden tuota, käytä, hävitä -periaatteesta. Elinkaaren lopussa pyritään estämään tuotteen päätyminen jätteeksi. (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

## 2.2 Digitalisaatio ja Teollisuus 4.0

Toinen merkittävästi yhteiskuntaa ja liiketoimintaprosesseja muokkaava globaali ilmiö on digitalisaatio. Digitalisaatio tarkoittaa prosessia, jossa perinteisiä analogisia tai fyysisiä tietoja ja toimintoja siirretään digitaaliseen muotoon ja niitä käsitellään sähköisesti tietokoneiden, ohjelmistojen ja muiden digitaalisten välineiden avulla. Yhteiskunnallisessa mittakaavassa tarkasteltuna digitalisaatio on jo vuosikymmeniä käynnissä ollut ja jatkuvasti kiihtyvä kehitysprosessi, joka muuttaa perusteellisesti tapaamme viestiä, työskennellä, kuluttaa tietoa ja palveluita. Samalla toimintojen digitalisaatiolla on syvällisiä vaikutuksia talouteen, koulutukseen, liiketoimintaan ja moniin muihin yhteiskunnan osa-alueisiin. (Neittaanmäki, 2021). Liiketoiminnassa yritykset pyrkivät hyödyntämään digitalisaatiota parantaakseen tuotteidensa arvoa tai tuotantoprosessiensa tehokkuutta. Digitalisaatio voi näin ollen auttaa yrityksiä tekemään asioita nopeammin, tehokkaammin ja innovatiivisemmin, mikä usein johtaa vahvempaan asemaan markkinoilla. (Yu et al., 2021).

Digitalisaation merkitys ja muutokset liiketoiminnalle ovat niin suuria, että ilmiöstä on alettu puhua neljäntenä teollisena vallankumouksena, Teollisuus 4.0:na (eng. *Industry 4.0, 4th industrial revolution*). Teollisuus 4.0 kuvaa digitalisaation tuomaa muutosta erityisesti valmistavassa teollisuudessa, ja sen ilmenemismuotoja liiketoiminnassa ovat mm. IoT-teknologioiden hyödyntäminen, kyberfyysiset järjestelmät ja pilvilaskenta (Lasi et al., 2014). Olennaista Teollisuus 4.0:ssa ja siihen liittyvissä teknologioissa on datan kerääminen, käsittely ja hyödyntäminen, sillä ilmiö korostaa tiedon keskeistä roolia nykyaikaisessa liiketoiminnassa ja teollisuudessa. Tätä kuvaa hyvin ilmiön kutsuminen myös *Informaation aikakaudeksi* (eng. *Information age*). (Gordan et al., 2023).

Teknologisten ratkaisujen, tuotannon digitalisoitumisen ja tiedon hyödyntämisen lisäksi Teollisuus 4.0 nähdään sosioteknisenä muutoksena, johon liittyy teknologisten kehityskielten lisäksi niin sosiaalisia kuin organisatorisia muutoksia sekä muutoksia liiketoiminta- ja ansaintamalleissa (Beier et al., 2020; Lasi et al., 2014). Sittemmin on ruvettu puhumaan jo viidennestä teollisesta aikakaudesta, Teollisuus 5.0:sta, joka ottaa enemmän kantaa sosiaaliseen hyvinvointiin, mitä Teollisuus 4.0 (Ghobakhloo et al., 2023).

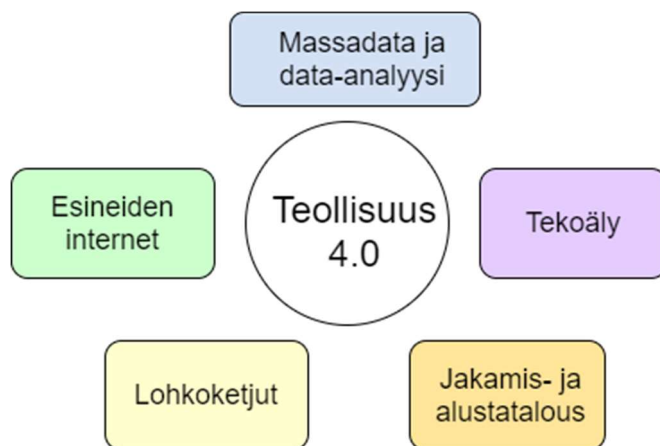
Tässä katsauksessa sosiaalinen aspekti ei kuitenkaan ole keskiössä, joten digitalisaation vaikutusten tarkastelu Teollisuus 4.0:n näkökulmasta riittää työn kontekstissa.

Tutkijat ja teollisuusasiantuntijat uskovat, että siirtymällä Teollisuus 4.0:n aikakauteen on positiivinen vaikutus kestäväen kehityksen tukemiseen ja kiertotalouden strategioiden käyttöönottoon (Antikainen et al., 2018; Ghobakhloo, 2020; Mattos Nascimento et al., 2019). Ghobakhloo (2020) on tutkinut ja havainnut, kuinka digitalisaatio voi tuoda merkittäviä hyötyjä kiertotalouteen niin sosiaalisesta, taloudellisesta, kuin ekologisesta näkökulmasta. Ekologinen näkökulma korostaa digitekniologioiden osallisuutta resurssitehokkuuden parantamisessa ja tuotteiden kierron mahdollistamisessa esimerkiksi kehittyneen tuotesuunnittelun, tuotekiertojen järjestelmällisen hallinnan ja energiatehokkuuden kautta. Digitaalitekniologioiden käytön taloudelliset edut liittyvät siihen, kuinka niiden avulla voidaan optimoida liiketoimintaprosesseja ja vähentää tuotantokustannuksia. Digitaaliset sovellukset tarjoavat myös mahdollisuuden ottaa käyttöön innovatiivisia liiketoimintatapoja, jotka noudattavat kiertotalouden periaatteita. Tämä avaa yrityksille mahdollisuuden kehittää toimintaansa kestävästi, samalla luoden taloudellista hyötyä. Sosiaaliset hyödyt Teollisuus 4.0:ssa ja kiertotaloudessa tulevat monista eri tekijöistä. Ghobakhloon (2020) mukaan yksi niistä voi olla aktiiviset verkostot, jotka edistävät yhteistyötä ja tiedon jakamista eri toimijoiden kesken. Myös Antikainen et al. (2018) esittävät tekniologioiden mahdollistaman viestinnän ja verkostoitumisen tärkeänä kiertotaloutta edistävänä tekijänä, sillä kiertotaloudessa tuotekierrat harvoin pysyvät yhden yrityksen hallinnassa koko tuotteen elinkaaren ajan. Verkostojen toimijoiden välisen tiedonjaon nähdään edistävän vastuullisuuden kulttuurin leviämistä tuotantoketjuissa, mikä edesauttaa kiertotalouskäytäntöjen käyttöönottoa (Mattos Nascimento et al., 2019). Lisäksi kasvavat verkostot ja kiertotalousstrategiat tuotekierron aikana edistävät uusien työpaikkojen luomista ja taloudellista kasvua (Ghobakhloo, 2020).

Digitalisaatiolla on kiistämättä merkittävä rooli kiertotalouden laajamittaisessa käyttöönotossa ja hyödyntämisessä. Kiertotalouteen, kestävyteen ja digitalisaatioon liittyy valtavasti näkökulmia, sovelluskohteita ja kehityskaaria, jolloin kokonaisuuden ja ilmiöiden limittymisen ymmärtäminen voi olla haastavaa. Seuraavassa luvussa tarkastellaan muutamia esimerkkejä digitaalisten ratkaisujen merkityksestä ja sovelluskohteista kiertotaloudellisessa tuotekierrossa.

### 3. DIGITAALISET RATKAISUT JA -TEKNOLOGIAT TUOTEKIERROSSA

Kolmannessa luvussa tutustutaan tämän hetken puhutuimpiin digitaalisiin teknologioihin (kuva 3) ja ilmiöihin sekä siihen, miten niitä voidaan hyödyntää liiketoiminnassa sekä tuotteiden elinkaaren eri vaiheissa. Valitut teknologiat ja sovellukset ovat osa Teollisuus 4.0:n mukanaan tuomaa muutosta, ja niiden vaikutusta tuotteiden kiertoon on hyvä tutkia tarkemmin, sillä ne voivat tarjota mahdollisuuksia tehostaa resurssien käyttöä, parantaa tuotteiden kiertävyyttä sekä edistää kestäväen kehityksen periaatteiden toteutumista koko tuotantoketjussa. Tarkoituksena ei ole paneutua ratkaisujen yksityiskohtaiseen, teknologiseen toteutukseen, vaan esitellä ratkaisujen yleinen periaate ja esimerkkejä hyödyntämistavoista tuotteiden kierron mahdollistamisessa. Kaikki ratkaisut eivät ole suoraan teknologioita, vaan myös ilmiöitä ja toimintatapoja, joita kehittyneet digiteknologiat ovat mahdollistaneet. Huomioitavaa on, että ratkaisut kehittyvät jatkuvasti ja tarvitsevat toisiinsa toimiakseen, jolloin niiden tarkastelu vaatii kokonaisvaltaista ymmärrystä digitalisatiosta ja teknologioiden yhteyksistä toisiinsa.



**Kuva 3.** Katsaukseen valitut Teollisuus 4.0:n lukeutuvat digitaaliset teknologiat ja näiden teknologioiden mahdollistamat ilmiöt.

#### 3.1 Tekoäly

Tekoäly (myös keinoäly, eng. *artificial intelligence*, *AI*) on laaja käsite, joka viittaa teknologioihin, koneisiin ja ohjelmiin, jotka kykenevät suorittamaan älykkäinä pidettyjä toimin-

toja itsenäisesti. Tekoälyteknologioita on kehitetty 1950-luvulta lähtien, ja nykyisin tekoälysovellutuksia hyödynnetään laajalti massadatan käsittelyssä, analysoinnin ja ennustamisen tukena sekä päätöksenteossa. Tekoälyn toiminta perustuu datan prosessoimiseen ja datasta oppimiseen koneoppimisen (eng. *machine learning*) ja syväoppimisen (eng. *deep learning*) kautta. (Jiang et al., 2022). Tekoälyn mahdollisia sovelluksia on lukuisia, vaikuttavimpia ja tunnetuimpia ovat kuitenkin konenäkö, luonnollisen kielen käsittely, suositusjärjestelmät ja optimointityökalut (Pathan et al. 2023). Tekoälyn ja siihen liittyvien sovellusten kehitys on nopeasti etenevä tieteenalan, jonka on ennustettu muuttavan yhteiskuntaa enemmän, mitä tulen tai sähkön valjastaminen ihmisen käyttöön aikoinaan (Gruetzemacher & Whittlestone, 2022). Tekoäly teknologiana on herättänyt paljon kiinnostusta ja saanut laajalti sovelluksia viime vuosina. Siten on ymmärrettävää, että teknologian käyttötavat ja potentiaaliset hyödyt ovat merkittäviä myös liiketoiminnassa ja tuotteiden elinkaaren eri vaiheissa.

Sestino ja De Mauro (2022) määrittävät tämän hetken tärkeimmiksi tekoälyn käyttökohteiksi liiketoiminnassa massadatan käsittelyn, prosessilouhinnan (trendien ja toimintamallien tunnistaminen datasta) ja toimintojen automatisoinnin. Heidän näkemyksensä mukaan tekoälysovellusten merkittävimmät edut ovat kyky tuottaa tietoa päätöksenteon tueksi ja tehostaa yrityksen toimintaa toistuvien prosessien automatisoinnin myötä. Pathan et al. (2023) esittävät tekoälyn olevan merkittävässä roolissa tuotteiden elinkaareissa suunnitteluvaiheessa. Tuotteiden ja materiaalien suunnittelussa tekoälyn avulla on mahdollista kehittää uusia ratkaisuja koneoppimisella tuetun suunnitteluprosessin kautta. Samalla tekoälyn avulla voidaan simuloida materiaalien ja tuotteiden testausta, mikä tehostaa suunnitteluprosessin etenemistä. Tuotteiden suunnittelun ja testaamisen tukena toimivina tekoälyteknologioina tutkijat mainitsevat neuroverkkojen hyödyntämisen, koneoppimisen ja aikasarja-analyysin.

Wilson et al. (2022) tunnistavat mahdollisuuden tekoälyn hyödyntämiseen kompleksisten tuotantoketjujen ja -verkostojen rakentamisessa ja infrastruktuurin optimoinnissa. Tekoälysovelluksia voidaan hyödyntää logistiikkareittien optimoinnissa, jolloin kuljetukset voidaan suunnitella siten, että kuljetukset hyödyntävät mahdollisimman tehokkaasti käytävissä olevaa kapasiteettia. Lisäksi tekoäly voi auttaa konttien suunnittelussa ja kuormituksen hallinnassa, mikä on tärkeää varmistettaessa, että tavarat saapuvat ehjinä ja tehokkaasti määränpäähänsä.

## 3.2 Esineiden internet

Esineiden internet (eng. *Internet of Things, IoT*) kuvaa älykkäiden laitteiden muodostamaa verkostoa, jossa fyysiset laitteet keräävät tietoa ja kommunikoivat keskenään verkoyhteyden kautta (Porter & Heppelman, 2014). Käytännössä IoT rakentuu toisiinsa yhteydessä olevista tasoista, joihin kuuluu fyysinen laite (kuten älykkäät laitteet, sensorit, RFID-tagit), verkkoliikenneprotokolla, datan säilytys, pilvilaskenta sekä prosessoidun tiedon välittäminen ja soveltaminen. (Márquez, 2021). Erityisesti teollisuudessa IoT-ratkaisuja (teollinen esineiden internet, eng. *Industrial Internet of Things, IIoT*) voidaan hyödyntää laitteiden seurannassa ja monitoroinnissa, minkä lisäksi ratkaisuja käytetään usein myös kontrolloinnin, optimoinnin ja tuotekehityksen tukena (Nobre & Tavares, 2020).

Tuotekierrossa IoT-tekniikoita voidaan hyödyntää niin tuotteiden valmistusprosesseissa, kuin itse tuotteissa ja niiden suunnittelussa. Tuotannon aikana IoT mahdollistaa prosessien reaaliaikaisen seurannan ja analysoinnin. Tämä tarkoittaa, että valmistusprosesseja voidaan tarkkailla ja analysoida reaaliajassa antureiden ja IoT-laitteiden avulla. Tämä reaaliaikainen valvonta tarjoaa mahdollisuuden välittömään reagointiin ja tehokkaaseen päätöksentekoon, minkä avulla voidaan tehostaa tuotantoa ja vähentää tuotannon aikana syntyvää hävikkiä (Han et al. 2023). Yksittäisten tuotteiden näkökulmasta IoT tarjoaa mahdollisuudet tuotteiden toimintakyvyn seurantaan ja hallintaan. IoT-tekniikoiden varustettujen esineiden avulla on mahdollista kerätä tuotteista käytön aikaista dataa, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi laitteiden ylläpidon ja tuotekehityksen tukena (Ertz et al 2022).

Tuotteiden valmistusprosessien ja elinkaarta pidentävien toimien lisäksi Ingemarsdotter et al (2020) nostavat esiin IoT-tekniikoiden mahdollisuudet palveluorientoituneiden liiketoimintamallien käyttöönotossa ja kehittämisessä. IoT-tekniikoiden avulla yritykset voivat tarjota palveluita, jotka perustuvat laitteiden keräämään reaaliaikaiseen dataan ja laitteiden keskinäiseen kommunikaatioon. Tämä mahdollistaa esimerkiksi etävalvonnan, ennakoivan huollon ja personoidut palvelut, jotka parantavat asiakaskokemusta ja luovat uusia liiketoimintamahdollisuuksia. Tämä luo puitteet innovatiivisille palvelukonsepteille, jotka eivät ainoastaan paranna tuotteiden suorituskykyä, vaan myös vahvistavat asiakassuhteita ja avaavat uudenlaisia mahdollisuuksia perinteisten, tuotokeskeisten liiketoimintamallien rinnalle.



### 3.3 Massadata ja data-analyysi

Digitaalisten teknologioiden kehityksen ansiosta datan keräämisestä on tullut laajempaa ja monipuolisempaa kuin koskaan aiemmin. Suuria tietomääriä on kehittynyt kuvaamaan termi ”massadata” (eng. *big data*), joka viittaa massiivisiin ja monimutkaisiin tietomääriin, joiden keräämiseen ja käsittelyyn tarvitaan digitaalisia teknologioita sekä kehittyneitä tiedonhallintakeinoja. Massadataa kuvaa myös tiedon nopea kertyminen, ja tämä tieto voidaan kerätä monipuolisista lähteistä, kuten verkkosivuilta, IoT-laitteilta, sosiaalisesta mediasta ja kaupallisista tietokannoista. Massadatan hyödyntämiseen on kehittynyt datatiede, joka käyttää matemaattisia, tilastollisia, ohjelmointi- ja analyttisiä taitoja sekä tietoteknisiä ratkaisuja tietojen keräämiseen, analysointiin ja tulkintaan. Datatiede jalostuu edelleen data-analytiikaksi (eng. *big data analytics, BDA*), kun datasta saadaan jalostettua liiketaloudellista hyötyä. (Sarker, 2021).

Digitalisaation ja Teollisuus 4.0:n myötä datan kerääminen ja käyttö päätöksenteon tukena on yleistynyt ja data-analyysi on jo arkipäivää suuressa osassa yrityksiä (Sarker, 2021). Massadatan kerääminen ja analysointi tarjoaa yrityksille mahdollisuuden hyödyntää data-analytiikkaa liiketoiminnan päätöksenteossa, prosessien optimoinnissa ja asiakaskokemuksen parantamisessa. Data-analytiikan avulla yritykset voivat tunnistaa trendejä, tehdä ennusteita ja saada syvällistä tietoa toimintaympäristöstään, mikä puolestaan mahdollistaa kilpailuedun saavuttamisen ja liiketoiminnan kehittämisen (Gupta et al., 2019). Massadatan hyödyntäminen tuotteiden elinkaaren hallinnassa tarjoaa useita etuja ja mahdollisuuksia eri vaiheissa, kuten suunnittelussa, valmistuksessa, käytössä ja kierrätyksessä. Keräämällä ja hyödyntämällä massadataa yritykset voivat saada syvällisempää tietoa käyttäjiensä toimintatavoista tuotteiden suhteen, sekä tuotteidensa suorituskyvystä käytännössä. Datasta jalostetun tiedon avulla yritykset pystyvät paremmin suunnittelemaan tuotteita sekä niiden elinkaaren aikaisia toimintoja. Erityisesti ennakkoiva analytiikka ja ohjaileva, niin kutsuttu preskriptiivinen analytiikka, tehostavat toimintastrategioita, kuten hinnoittelua, tuotteiden jakelua sekä tuotteiden valmistukseen, logistiikkaan ja varastointiin liittyvien resurssien allokoitua, parantaen näin tuotteiden elinkaaren resurssitehokkuutta. (Ertz et al., 2022).

### 3.4 Jakamis- ja alustatalous

Kiertotalousajattelun myötä perinteisen tuotokeskeisen talousajattelun rinnalle ovat nousseet liiketoimintamallit, jotka keskittyvät tuotteiden jakamiseen sen sijaan, että jokainen omistaisi oman yksilöllisen kappaleen. Tätä liiketoimintamallia kutsutaan jakamistaloudeksi, ja se edustaa kulttuuria ja toimintatapaa, joka pyrkii hyödyntämään resursseja tehokkaammin esimerkiksi lainaamisen, yhteiskäytön tai tuotteiden vuokraamisen

kautta (Sutherland & Jarrahi, 2018). Jakamistalouteen liittyviä toimintamalleja ovat esimerkiksi tuote palveluna -mallit, jakamistalustat ja tuotteiden yhteiskäyttöön nojaavat käyttäjäverkot (Morsetto, 2023). Teknologisten ratkaisujen, kuten kehittyneen viestintäteknologian ja digitaalisten sovellusten käyttö, on mahdollistanut yrityksille jakamiseen perustuvien toimintatapojen laajamittaisiin hyödyntämisen liiketoiminnassa aiempaa paremmin (Chauhan et al., 2022).

Samalla digitalisaation myötä kaupankäyntialustat ovat siirtyneet perinteisistä kauppakeskuksista ja toreilta ohjelmistoihin ja sovelluksiin. Tämä muutos on synnyttänyt uuden liiketoimintakentän, jota kutsutaan alustataloudeksi. Alustatalouden periaatteena on liiketoiminnan harjoittaminen digitaalisella alustalla, joka toimii väylänä yritysten ja asiakkaiden väliselle vuorovaikutukselle. Digitaaliset alustat saavuttavat laajemman käyttäjäkunnan verrattuna perinteisiin kaupankäyntialustoihin, ja niiden skaalaaminen tuotteiden ja käyttäjien määrän suhteen on huomattavasti helpompaa kuin perinteisillä kauppapaikoilla, sillä digitaaliset alustat voivat nopeasti sopeutua kasvavaan kysyntään ja käsitellä suurempia tuotevalikoimia sekä palvella laajempaa asiakaskuntaa. (Sutherland & Jarrahi, 2018).

### 3.5 Lohkoketjut

Lohkoketjuteknologia rakentuu verkossa olevista, hajautetuista tietokannoista, joiden kautta on mahdollista siirtää tietoa luotettavasti ja läpinäkyvästi. Yksittäinen tietokanta voidaan nähdä lohkona, jolloin useampi peräkkäinen lohko muodostaa ketjun, jossa kulkee tietoa toimien, ns. transaktioiden, myötä. Nämä transaktiot voivat olla fyysisiä tapahtumia, kuten sopimusten tekoa tai osto- ja myyntitapahtumia. Tapahtumista tallentuu tietoja lohkoketjuihin, joita ei voi jälkikäteen muuttaa, eikä hävittää. (Alman & Hirsh, 2019) Lohkoketjun tietojen kopioiminen ja hajauttaminen eri tietokantoihin tekee tiedoista erityisen kestäviä muokkaamista vastaan. Lohkoketjuteknologian tunnetuimpia sovelluskohteita ovat kryptovaluutat ja rahoitusala yleisesti, lisäksi käyttökohteita on tunnistettu esimerkiksi lääketieteen, energiateknologian, kiinteistömarkkinoiden ja tuotantoketjujen hallinnan apuna (Khan et al., 2022). Muntaser et al. (2023) mukaan lohkoketjuteknologioiden hyödyntäminen on vielä kuitenkin vähäistä, eikä kaikki teknologian mahdollistamia hyötyjä ja sovelluskohteita ole edes tunnistettu.

Kaupankäynnin siirtyessä yhä enemmän verkkoon ja toimitusketjujen laajentuessa globaaleiksi verkostoiksi tarvitaan teknologioita, jotka toimivat luotettavina tiedonvälittäjinä digitaalisissa ympäristöissä. Lohkoketjujen potentiaali toimia tiedonvälittäjinä korostuu erityisesti niiden hajautetun rakenteen ja luotettavuuden ansiosta. Böhmecke-Schwafert

et al., (2022) listaavat ominaisuuksiksi, jotka mahdollistavat tiedonsiirron luotettavuuden lohkoketjuissa, olevan suojatut tietueet, julkinen tiedonsiirto, muuttumattomuus ja lohkoketjun tietokantojen hajauttaminen. Lohkoketjun muuttumattomuus ja väärentämiseltä suojatut datatietueet voivat merkittävästi parantaa toimitusketjujen seuranta ja läpinäkyvyyttä sekä lisätä asiakkaiden tietoisuutta tuotteen valmistusprosessista (Khan et al., 2022). Samalla lohkoketjut voivat parantaa toimitusverkostojen välistä yhteistyötä ja vuorovaikutusta, luoden luottamusta eri toimijoiden välille (Muntaser et al., 2023).

## 4. DIGITAALISTEN RATKAISUJEN KIERTOTALOUDELLISET HYÖDYT TUOTEKIERROSSA

Neljännessä luvussa keskitytään tutkimaan esiteltyjen digitaalisten ratkaisujen vaikutuksia kiertotalouden mukaiseen tuotekierto. Tuotteen elinkaari on jaettu toisessa kappalessa esiteltyjen elinkaaren vaiheiden mukaan alku-, keski- ja loppuvaiheisiin, joiden mukaan tarkastellaan kuhunkin vaiheeseen vaikuttavia teknologioita ja kiertotalousstrategioita. Lisäksi nostetaan esiin muita Teollisuus 4.0 luomia kiertotaloudellisia hyötyjä sekä haasteita, joita toimintojen laajamittaiseen digitalisaatioon liittyy. Lopputuloksena on kuvaus siitä, miten ja missä tuotekierron vaiheessa ratkaisut mahdollistavat kiertotalouden mukaista materiaalien kiertoa.

### 4.1 Ratkaisut suunnitteluvaiheessa

Tuotteen kiertotaloudellisen elinkaaren mahdollistaminen alkaa jo suunnitteluvaiheessa. Han et al. (2023) kuvaavat suunnitteluvaiheen olevan tuotteen elinkaaren tärkein vaihe, sillä tuotesuunnittelu vaikuttaa merkittävästi siihen, miten tuotteet, niiden materiaalit ja komponentit saadaan kiertämään elinkaaren muissa vaiheissa. Helposti kiertävien tuotteiden suunnittelu on monimutkainen prosessi, joka edellyttää siirtymistä perinteisestä tuotokeskeisestä suunnittelusta kohti järjestelmäkeskeistä lähestymistapaa. Tämä lähestyminen sisältää esimerkiksi erilaisten elinkaarivaihtoehtojen huomioimisen, huolto-, uudelleenkäyttö- ja kierrätysstrategioiden paremman yhteensovittamisen, sekä järjestelmien ja tuotteiden päivitettävyyden, standardoinnin ja mukautuvuuden ennakkoinnin (Matos Nascimento et al., 2019). Kuvan 2 perusteella voidaan havaita, että suunnittelu muodostaa oman erillisen vaiheensa, ja kiertotalousstrategioiden ansiosta tuotteet eivät enää palaudu takaisin suunnitteluvaiheeseen sen jälkeen, kun ne on kerran suunniteltu ja valmistettu. Kiertotalousstrategioista vähentäminen on olennaisessa osassa suunnitteluvaiheessa, jolloin on suurin mahdollisuus vaikuttaa tuotteiden resurssitehokkuuteen.

Massadatan ja data-analyysin hyödyntäminen nähdään olennaisena osana kiertotaloutta. Datan ja datan käsittelyn tehtävänä on tuottaa tietoa päätöksenteon tueksi esimerkiksi tuotteiden seurannan, analysoinnin, materiaalien hallinnan ja ympäristövaikutusten laskennan kautta (Awan et al., 2021; Gupta et al., 2019). Datan rooli nähdään erityisen tärkeänä tuotteen elinkaarisuunnittelun tukena ja datan tehokkaan hyödyntämisen tunnistetaan edesauttavan kiertotaloutta organisaation oppimisen kautta (Awan et al., 2021). Awan et al. (2021) mukaan massadatan kerääminen ja sen analysointi ovat

keskeisiä tekijöitä, jotka mahdollistavat yrityksille kiertotaloudellisten päämäärien asettamisen ja niiden saavuttamisen. Johtopäätös syntyi huomiosta, jonka mukaan massadatan analysoinnin kautta lisääntynyt tietoisuus tuotteista ja tuotantoketjujen toiminnasta auttoivat tekemään vastuullisempia liiketoimintapäätöksiä. Bag et al., (2020) tarkentavat massadatan roolin organisaation oppimisessa olevan tiiviisti yhteydessä innovaatiotoimintaan, jota voidaan pitää kestävien liiketoimintaratkaisujen pohjana. Tutkijat pystyivät vahvistamaan oletuksensa, jonka mukaan massadatan hallinta- ja hyödyntämistaidot vaikuttavat positiivisesti vihreään tuotekehitykseen. Tutkimuksen päätelmä oli, että taitava datan käyttö voi avustaa henkilöstöä kehittämään sekä tuote- että prosessi-innovaatioita, jotka edelleen mahdollistavat toiminnan ja tuotteiden kehittämisen vastuullisemmiksi ja kiertotalouskäytänteiden mukaisiksi.

Myös Nobre & Tavares (2020) toivat esiin tutkimuksessaan, että massadata ja datan analysointi toimivat kriittisessä roolissa tuotteiden suunnitteluvaiheessa. Suunnittelussa olennaista on tietää mahdollisimman tarkoin tuotteen materiaaleista, käyttötavoista ja -tarkoituksesta, jotta tuotteista voidaan suunnitella kestäviä ja helposti kierrätettäviä. Dataa suunnittelun tueksi saadaan tuotettua esimerkiksi IoT-teknologioin tuetuilla laitteilla. IoT-laitteet toimivat usein yhdessä tekoälyalgoritmien kanssa, mikä auttaa tuottamaan IoT-laitteiden keräämästä datasta tuotteiden suunnittelun kannalta hyödyllistä tietoa. (Han et al., 2023). Tuotteen suunnitteluvaiheessa on tärkeää ottaa huomioon paitsi itse tuotteen ominaisuudet ja käyttötavat, myös sen elinkaaren suunnittelu. Elinkaaren ja toimitusketjujen osalta voidaan hankkia tietoa esimerkiksi lohkoketjuun tallennettujen transaktioiden avulla (Böhmecke-Schwafert et al., 2022). Digitaaliset alustat, jotka keräävät tietoa tuotteisiin liittyvistä transaktioista, tarjoavat myös mahdollisen tietolähteen, kun pyritään saamaan tietoa tuotteiden elinkaaresta ja kysynnästä (Wu & Yu, 2023).

Pathan et al. (2023) mukaan tekoälyn hyödyt tulevat esiin tuotekierron alussa suunnittelun lisäksi testaamisen kautta. Tuotteiden ja materiaalien suunnittelussa tekoälyn avulla on mahdollista kehittää uusia ratkaisuja koneoppimisella tuetun suunnitteluprosessin kautta. Samalla tekoälyn avulla voidaan simuloida materiaalien ja tuotteiden testausta, mikä tehostaa suunnitteluprosessin etenemistä. Käytännössä esimerkkejä tällaisista suunnittelu- ja testaussovelluksista ovat mm. rakennusten suunnitteluun ja materiaalien käytön optimointiin kehitetyt rakennusten tuotetietomallit (eng. *building information model, BIM*), laitteiden suunnittelussa ja tuotekehityksessä käytettävät digitaaliset kaksoset (eng. *digital twins*) (Pathan et al. 2023).

## 4.2 Ratkaisut käytön aikana

Kiertotalouden keskeisenä tavoitteena on pidentää tuotteiden käyttöikää ja tehostaa jo tuotettujen resurssien hyödyntämistä. Useat kiertotalousstrategiat asettuvat käyttövaiheeseen, pyrkien minimoimaan hukkaan heitettyjä resursseja ja vähentämään ympäristövaikutuksia tuotteen elinkaaren aikana. Näihin strategioihin kuuluvat esimerkiksi tuotteiden jakaminen palveluna, korjaus- ja päivityspalvelut sekä muut innovatiiviset lähestymistavat, jotka korostavat tuotteiden pitkäikäisyyttä ja monipuolista käyttöä.

Tekoälyn mahdollisuudet tuotteiden elinkaaren käyttövaiheessa näkyvät erityisesti logististen prosessien suunnittelussa ja tuotteiden suorituskyvyn ennustamisen ja mittaamisen muodossa. Tutkijoiden mukaan tekoälyn avulla on mahdollista tehostaa ja parantaa logistisia prosesseja, joita kiertotaloudellisista toimitusketjuista löytyy runsaasti enemmän, mitä lineaarisesta mallista (Pathan et al., 2023; Wilson et al., 2022). Ertz et al. (2022) kuvaavat tekoälyalgoritmien avulla ennustamista apuvälineenä, jonka avulla voidaan ajoittaa ja mitoittaa tarvittavat ylläpitotoimet tuotteille. Tämä mahdollistaa tuotteiden toimintakyvyn ennakoivan ylläpitämisen, mikä puolestaan vähentää tuotteen käyttöön liittyviä odotusaikoja ja tehostaa sekä tuotteen että huolto- ja korjausprosessien suorituskykyä.

Myös IoT-ratkaisut näyttäisivät olevan oleellisessa osassa tuotteen elinkaaren pidentämisessä tuotteen käyttövaiheessa. IoT-teknologioin tuetut tuotteet ja laitteet pystyvät välittämään tietoa laitteiden kunnosta, minkä avulla voidaan ennakoida huolto-, korjaus- ja päivitystoimenpiteiden tarvetta, ja tällä tavoin pidentää tuotteiden elinkaarta. (Nobre & Tavares, 2020). Nämä piirteet edelleen mahdollistavat käyttö- ja tulorientoituneet liiketoimintamallit tuoteorientoituneen liiketoimintamallin sijaan. Tämä tarkoittaa sitä, että yritykset voivat keskittyä tarjoamaan palveluita ja ratkaisuja asiakkailleen sen sijaan, että liiketoiminta perustuisi fyysisiin tuotteisiin ja niiden omistamiseen. IoT:n avulla voidaan kerätä reaaliaikaista tietoa tuotteiden käytöstä, mikä mahdollistaa paremman asiakasymmärryksen ja kyvyn tarjota palveluita tuotteiden sijasta (Han et al. 2023; Ingemarsdotter et al., 2020).

Tuotteiden tarjoaminen palveluna ja muut jakamistalouden toimintamallit ovat olennainen osa resurssitehokkuuden parantamista ja elinkaaren pidentämistä tuotteen käytön aikana. Digitaaliset alustat ovat mahdollistaneet tuotteiden jakamiseen ja palveluihin keskittyvien toimintamallien laajemman hyödyntämisen liiketoiminnassa, mikä parantaa tuotteiden resurssitehokkuutta vähentämällä tuotteiden käyttöön liittyvää niin kutsuttua ”joutoaikaa” sekä vähentämällä tarvetta omistaa oma, yksilöllinen tuote (Pouri, 2021; Ingemarsdotter 2020). Myyntialustat voivat toimia tehokkaina välineinä tuotteiden uudel-

leenkäytön edistämässä ja siten tukea kiertotalouden periaatteita. Tällaiset alustat luovat markkinapaikan, jossa ihmiset voivat ostaa, myydä ja vuokrata tuotteita. Hyviä esimerkkejä tuotteiden uudelleenkäyttöä ja jakamista edistävästä digitaalisista alustoista ovat yritysten ja kuluttajien käytettyjen tavaroiden myyntialusta Tori.fi, rakennusalan laitteiston vuokrauspalveluihin keskittyvän Rentan Renta Easy-sovellus ja hävikkiruoan verkkokauppa Fiksuruoka.fi.

Tutkijat ovat havainneet lohkoketjuteknologian mahdollisuudet kiertotalouden kompleksisten tuotanto- ja toimitusketjujen hallinnassa (Khan et al. 2022, Ajwani-Ramchandani et al., 2021). Kiertotaloudellisessa tuotteen elinkaaressa, jossa tuotantoketjut ja tuotekierrot ovat monimutkaisempia mitä lineaarisessa mallissa, on mukana laajempi joukko sidosryhmiä, joiden välillä liikkuu niin tuotteita, tietoa kuin rahaa. Tällaisissa kompleksisessa sidosryhmäympäristössä tarvitaan tehokkaita työkaluja verkostojen ja tiedon hallintaan. Lohkoketjuteknologia tarjoaa ratkaisun tähän tarpeeseen mahdollistamalla luotettavan ja nopean tiedonsiirron verkostojen osapuolille.

### **4.3 Ratkaisut käytöstä poistossa**

Tuotteen elinkaaren viimeinen vaihe käsittää tuotteen poistamisen käytöstä sen elinkaaren päättyessä. Kiertotalousstrategioista kierrättäminen liittyy tuotteen elinkaaren loppuvaiheeseen. Kierrätyksessä tuote käsitellään niin, että sen materiaalit ja komponentit voidaan palauttaa takaisin materiaalikiertoon. Kierrätysprosessissa pyritään hyödyntämään ja uudelleenkäyttämään mahdollisimman paljon tuotteen osia tai materiaaleja, vähentäen näin jätteen määrää ja edistäen kestävästä resurssien käyttöä. Kierrättämisen lisäksi jätteenä hyödyntäminen voidaan nähdä loppuvaiheeseen kuuluvana kiertotaloustrategiana, joka estää tuotteiden päätymisen kaatopaikoille ja mahdollistaa materiaaleihin sitoutuneen energian talteenoton.

Sekä tekoälystä, IoT-tekniologiasta ja lohkoketjuista löytyi sovelluksia, joita voidaan hyödyntää elinkaaren loppuvaiheessa materiaalien kierrätyksen tukena. Esimerkiksi Nobre & Tavares (2020) ovat tutkimuksessaan kuvanneet IoT-tekniologian hyödyntämistä jättemateriaalin lajittelussa yhdessä tekoälyn kanssa. Tutkijat esittelivät tutkimustapauksen, jossa kyseisten tekniologioiden avulla materiaalien tunnistaminen ja lajittelu voidaan hoitaa automaattisesti ja tarkemmin, mitä ihmistyön avulla, mikä paransi materiaalien kierrätysastetta. Böhmecke-Schawafert et al (2022) kuvaavat, kuinka lohkoketjuteknologiat voivat tukea jätteenkäsittelyprosesseja oikea-aikaisen ja luotettavan tiedonsiirron kautta. Tämä näkyy esimerkiksi älykkäiden sopimusten käyttönä jätteenkäsittelyyn ja kierrätykseen osallistuvien toimijoiden välillä, digitaalisten alustojen kautta tapahtuvien transaktioiden mahdollistamisena sekä logistiin prosesseihin liittyvän tiedonsiirron tukemisena.

Alustojen rooli tuotteen elinkaaren loppuvaiheessa on tuoda yhteen elinkaaren loppuvaiheessa olevat tuotteen ja toimijat, jotka pystyvät kierrättämään tai hyödyntämään jätteenä nämä tuotteet.

#### 4.4 Muita hyötyjä

Muita tunnistettuja hyötyjä, jotka eivät suoraan vaikuta tuotteen elinkaaren vaiheisiin voitiin myös tunnistaa lähdemateriaalista. Nämä hyödyt voivat kuitenkin toimia kiertotaloudellisia toimenpiteitä ja päämääriä edesauttavina tekijöinä, kun yritykset pyrkivät irti lineaaritalouden mukaisista toimintatavoista.

Digitalisaation keskeisenä hyötynä nähdään palveluorientoituneiden liiketoimintamallien mahdollistuminen ja yleistyminen (Chauhan et al., 2022; Ingemarsdotter et al., 2020). Digitaaliset teknologiat ja edistynyt viestintäteknologia mahdollistavat monipuolisten palveluiden tarjoamisen samanaikaisesti perinteisten tuotteiden, mikä edistää yritysten taloudellisen hyvinvoinnin riippuvuuden vähenemistä pelkistä fyysisistä tuotteista. Nämä teknologiat voivat olla myös avainasemassa mahdollistamassa tuotteiden kiertoosallistuvien verkostojen toimintaa. Viestintäteknologiat ja digitaaliset alustat voivat tukea ja tehostaa prosesseja, jotka liittyvät tuotteiden jäljitettävyyteen, keräämiseen, kierrätykseen ja uudelleenkäyttöön. Näin ollen ne voivat luoda tehokkaampia ja älykkäämpiä järjestelmiä, jotka edistävät kiertotalouden periaatteiden toteutumista. (Schwanholz & Leipold, 2020). Datan kerääminen ja analysointi voi edistää organisaation oppimista sekä vihreää innovaatiotoimintaa, mikä edistää liiketoiminnan kiertotalousvalmiuksia yleisemmällä tasolla (Bag et al. 2020).

Lohkoketjujen suoria vaikutuksia tuotekiertoos ei tunnistettu lähdemateriaalista, sen sijaan välillisiä vaikutuksia ja yhteyksiä muihin digitaalitekniologioihin löytyi. Tutkijat korostavat lohkoketjun roolia tuoda läpinäkyvyyttä toimitusketjuihin, mikä lisää niin yritysten kuin asiakkaiden tietoisuutta niiden toiminnasta. Tämä parantaa tuotteiden laadun ja alkuperän varmistamista sekä edistää toimitusketjujen vastuullisuutta (Khan et al., 2022). Lohkoketjut voivat näin ollen toimia eräänlaisina vastuullisuuden vahtikoirina, viestittäen yritysten kestävydestä ja mahdollistaen sidosryhmille tuotteiden alkuperän ja laadun varmistamisen. Myös Böhmecke-Schwafert et al. (2022) korostavat lohkoketjuteknologian merkitystä sosiaalisten ja kulttuurillisten vaikuttimien edistäjänä kiertotaloudellisten tuotteiden ja tuotantoketjujen kehittämisessä. Heidän mukaansa lisääntynyt tietoisuus tuotteiden elinkaaresta voi vaikuttaa kulutustottumuksiin ja tätä kautta vaikuttaa vastuullisuuden lisääntymiseen tuotekierrrossa.



## 4.5 Ratkaisujen haasteet ja esteet

Siinä missä digitaaliset ratkaisut tuovat hyötyjä ja liiketoimintamahdollisuuksia, vaativat ne myös uusien toimintatapojen oppimista, teknologisten sovellusten hallintaa ja massadatan hallintaa. Jotta digitalisaation avulla voidaan luoda hyötyä, tulee yritysten ymmärtää digitalisaation merkitys ja sovellustavat kiertotalouden mahdollistajana. Haasteiksi alati lisääntyvässä toimintojen, prosessien ja laitteiden digitalisaatiossa nähdään esimerkiksi digitaalinen rebound-ilmiö, uusien sovellusten ja toimintamallien oppiminen, digiteknologioiden hyödyntäminen liiketoiminnassa sekä dataan, sen omistajuuteen ja tietoturvaan liittyvät kysymykset (Antikainen et al., 2018, Kunkel & Tyfield, 2021).

Massadataan liittyvät haasteet, kuten datan puute ja kerääminen, laatuongelmat, datan hyödyntämisen vaikeudet ja yrityksen valmius käsitellä massadataa, voivat olla kuitenkin esteenä kiertotaloudellisten päämäärien tavoittelussa ja tavoittamisessa (Rusch et al. 2023; Chauhan et al. 2022). Gordan et al. (2023) taasen nostavat esiin digitaalisten teknologioiden nopean kehityksen uhat; teknologioiden nopea kehitys ja vaihtoehtoisten teknologioiden ja protokollien suuri määrä luo yhteensopivuusongelmia ja pakottaa sitoutumaan tiettyyn teknologiaan ja toimintatapaan. Digitaalisten teknologioiden, ohjelmistojen ja laitteistojen integrointi voi osoittautua haastavaksi, kun hallitsevat standardit vielä hakevat muotoaan.

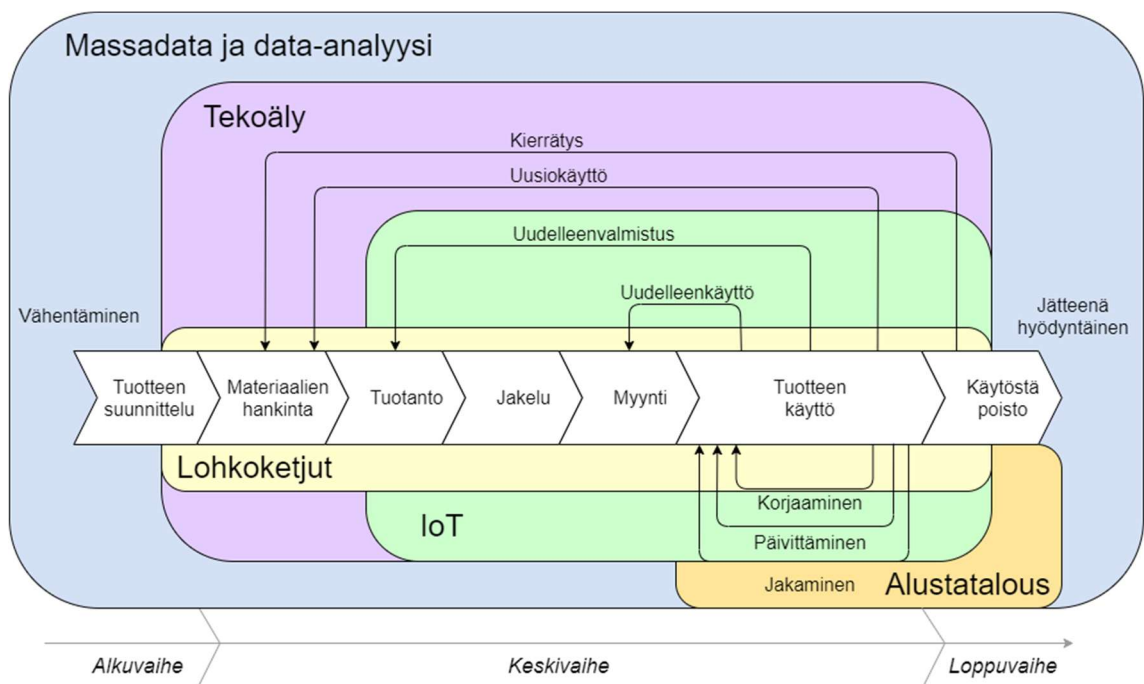
Useissa tutkimuksissa (Khan et al. 2022, Ghobakloo et al. 2020, Böhmecke-Schwafert et al., 2022) tuotiin esille, ettei teknologioiden hyödyntäminen tuotantoketjuissa automaattisesti tarkoita, että toiminta olisi ekologisesti kestävä. Jotta voidaan tavoitella ekologisesti kestävä tuotekierto, tulee vastuullisuustavoitteen olla osa yrityksen strategiaa, jolloin Teollisuus 4.0:n mukaiset digitaalitekniikat toimivat välineinä vastuullisuustavoitteiden saavuttamisessa. Beier et al. (2020) analyysin mukaan kestävyys tavoittelu harvoin on keskeisin vaikutin liiketoiminnan digitalisaation kasvattamisessa, vaan kestävyys nähdään tulevan digitalisaation lisänä. He painottavat tarvetta tarkastella ennemmin kestävä liiketoiminnan rakentamista digitalisaation avulla, kuin Teollisuus 4.0:n vaikutusta toimintamme kestävyteen. Digitalisaation myötä digitaalisten laitteiden ja energian käytön lisääntymistä, mikä on omiaan kasvattamaan materiaali- ja energiaressurssien käyttöä. Kunkel ja Tyfield (2021) nostavat esiin digitalisaation rebound-efektin, joka nähdään uhkana laajamittaisen digitalisaation myötä. Rebound-efekti kuvaa tilannetta, jossa ongelman ratkaisu kääntyy itseään vastaan luomalla uusia ongelmia tai pahentamalla jo olemassa olevia (Sitra, 2023). Esimerkiksi tuotteiden jakaminen voi rohkaista lisääntynyttä käyttöä ja mahdollistaa sellaisten tuotteiden käyttämisen, joita yksittäinen käyttäjä ei alun perin käyttäisi. Vaikka jakamisen tavoitteena on vähentää tarvetta omistaa omaa tuotetta ja parantaa tuotteiden käyttötehokkuutta, se voi

samanaikaisesti lisää tuotteiden kulumista ja lyhentää niiden käyttöikä. Tämä saattaa asettaa ristiriitaisuuden jakamisen perimmäisen tarkoituksen, resurssitehokkuuden ja materiaalien käytön vähentämisen, kanssa. (Pouri, 2021). Suuressa mittakaavassa digitalisaatio voi siis lisätä ympäristöresurssien käyttöä, mikä on päinvastaista tavoiteltujen hyötyjen suhteen.

## 5. PÄÄTELMÄT

Teollisuus 4.0 ja kiertotalous tulevat muokkaamaan tuotteiden elinkaarta perustavanlaatuisesti, luoden uusia mahdollisuuksia tuotteen suunnittelusta ja valmistuksesta aina käytöstä poistoon, kierrätykseen ja uudelleenkäyttöön asti. Muutosta perinteisiin tuotekeskeisiin ja resurssitehottomiin tuotekiertoihin tarvitaan, jotta pystytään vastaamaan nykypäivän vaatimukseen vastuullisesta ja kestävän kehityksen mukaisesta liiketoiminnasta. Digitaaliset teknologiat ja kiertotalouden mukaiset toimintatavat kehittyvät ja lisääntyvät jatkuvasti, mutta niiden väliset synergiaedut tulevat täysimääräisesti hyödynnettäviksi vasta, kun teknologiset innovaatiot ja kiertotalouden periaatteet integroidaan saumattomasti yhteen.

Tutkimuksen päämääränä oli tunnistaa ne digitaaliset teknologiat ja niihin liittyvät ilmiöt, jotka nähdään mahdollisina edistäjinä kiertotaloudellisessa tuotekierrossa. Esitellyt teknologiat ja ratkaisut voivat vaikuttaa tuotteiden kiertoon joko suoraan tai välillisesti. Suorat vaikutukset tulevat esiin esimerkiksi materiaalien kierrätyksen tai tuotteiden jakamisen kautta, kun välilliset vaikutukset näkyvät sosiaalisella ja kulttuurisella tasolla, esimerkiksi yritysten ja asiakkaiden kasvaneena tietoisuutena tuotantoketjuista ja tuotteiden vastuullisuudesta (Böhmecke-Schwafert et al., 2022). Kuvassa 4 on yhteenveto katsauksessa esitetyistä digitaalitekniologioista ja niiden sijoittumisesta tuotteen elinkaaren vaiheisiin.



**Kuva 4.** Esitellyt digitaaliset ratkaisut tuotekierrossa.

Suunnitteluvaiheessa digitaaliset teknologiat ja tieto tuotteista sekä niiden käyttötavoista mahdollistavat tuotteiden suunnittelun siten, että niiden kierto on mahdollista elinkaaren muissa vaiheissa. Käyttövaiheessa teknologiat mahdollistavat tuotteiden kierron esimerkiksi jakamisalustojen, tuotteiden toimintakyvyn seurannan ja ennustamisen sekä kehittyneiden palveluiden kautta, samalla tuottaen tietoa tuote- ja elinkaarisuunnittelun tueksi. Loppuvaiheessa teknologioiden käyttösovellukset keskittyvät tuotteiden kierrättämiseen takaisin elinkaaren aiempiin vaiheisiin. Lisäksi hyötyjä ovat palveluorientoituneiden liiketoimintamallien mahdollistaminen ja tuotteiden vastuullisuuden ja läpinäkyvyyden lisääminen.

Tulokset tukevat aiheesta jo aiemmin julkaistua tutkimusta, esimerkiksi Mattos Nascimento et al., (2019) sekä Rusch et al., (2023) ovat tunnistaneet vastaavanlaisia teknologioiden hyödyntämistapoja ja vaikutuksia tuotekierto. Yhteenvedona voidaan sanoa, että digitaaliset teknologiat mahdollistavat tehokkaamman ja läpinäkyvämmän hallinnan tuotteiden elinkaaresta, mikä edistää vastuullista tuotekiertoa ja kiertotaloutta.

Yleisimpiä ratkaisuja tutkiessa on helppo huomata digitalisaation kokonaisvaltaisuus. Rusch et al. (2023) kuvaavat, kuinka teknologiat tarvitsevat toisiaan toimiakseen parhaalla mahdollisella tavalla. Esiteltyt digitaaliteknologiat ja niiden käyttösovellukset tarvitsevat toisia teknologioita ja niiden sovelluksia toimiakseen, samalla mikään teknologioista ei toimi yksinään. Esimerkiksi tekoälyn oppimisen perustana toimii suuret datamassat, joiden keräämisessä voidaan käyttää esineiden internetin ja älykkäiden laitteiden kautta kerättyä dataa. Tekoälyn hyödyntämiseen taasen tarvitaan datatiedettä, joka on lähtenyt jalostumaan jatkuvasti kasvavien data- ja tietomäärien käsittelemiseksi. Yritysten ja niiden sidosryhmien siirtyminen näihin digitaalisiin toimintatapoihin tuo mukanaan lukuisia haasteita, sekä ympäristön että teknologian käyttäjien näkökulmasta. Tämä muutos edellyttää tasapainottelua ympäristövaikutusten, tietoturvakysymysten, käyttäjien koulutustarpeiden ja muiden tekijöiden välillä, jotta siirtyminen digitaaliseen toimintaympäristöön tapahtuu kestävä kehityksen mukaisesti.

Tämä työ pystyi tarjoamaan pintapuolisen katsauksen kuhunkin esiteltyyn teknologiaan ja teknologian sovellukseen. Digitaaliteknologioiden hyötyjä, sovelluksia ja vaikutuksia kiertotalouden edistämiseksi on valtaisesti, jolloin tarkastelun työstäminen yksittäisiin teknologioihin ja niiden vaikutuksiin luo suppean kuvan digitalisaation merkityksestä kestävä kehityksen edistämiseksi. Työssä ei myöskään eritelty B2B-, B2C- tai C2C-markkinoiden tai eri sidosryhmien eroja digitaalisten teknologioiden hyödyntämisessä, vaikka erot eri toimijoiden välillä voivat olla merkittävät.

Jatkotutkimuksen kannalta mielenkiintoisia kysymyksiä voisivat olla digitalisaation haasteisiin liittyvät ongelmat ja niiden ratkominen. Haasteita on tunnistettu ja nämä tunnistetut haasteet voivat pahimmassa tapauksessa eliminoida hyödyt, mitä digitaaliteknoologioista saadaan. Siksi olisi tärkeää selvittää, missä määrin ja millä tavoin on perusteltua hyödyntää digitaaliteknoologioita samalla kun pyritään edistämään kestäväää kehitystä.

# LÄHTEET

- Ajwani-Ramchandani, R., Figueira, S., Torres de Oliveira, R., Jha, S. (2021). Enhancing the circular and modified linear economy: The importance of blockchain for developing economies. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol 168.
- Alman, S., Hirsh, S. (2019). *Blockchain*. American Library Association, Chicago, United States.
- Antikainen, M., Uusitalo, T., Kivikytö-Reponen, P. (2018). Digitalisation as an Enabler of Circular Economy. *Procedia CIRP*. Vol 73, pp. 45–49.
- Awan, U., Shamim, S., Khan, M. N., Khan, Z., Zia, N. U., Shariq, S.M. (2021) Big data analytics capability and decision-making: The role of data-driven insight on circular economy performance. *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 168.
- Bag, S., Pretorius, J.H.C. (2022). Relationships between industry 4.0, sustainable manufacturing and circular economy: proposal of a research framework. *International Journal of Organizational Analysis*. Vol 30(4), pp. 864–898.
- Bag, S., Wood, L.C., Xu, L., Dhamija, P., Kayikci, Y. (2020). Big data analytics as an operational excellence approach to enhance sustainable supply chain performance. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol 153.
- Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., Habich, M. (2020). Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes – A literature review. *Journal of Cleaner Production*. Vol 259.
- Böhmecke-Schwafert, M., Wehinger, M., Teigland, R. (2022). Blockchain for the circular economy: Theorizing blockchain's role in the transition to a circular economy through an empirical investigation. *Business Strategy and the Environment*. Vol 31(8), pp. 3786-3801.
- Chauhan, C., Parida, V., Dhir, A. (2022). Linking circular economy and digitalisation technologies: A systematic literature review of past achievements and future promises. *Technological Forecasting and Social Change*. Vol 177.
- Ertz, M., Sun, S., Boily, E., Kubiak, P., Quenum, G.G.Y. (2022). How transitioning to Industry 4.0 promotes circular product lifetimes. *Industrial Marketing Management*. Vol 101, pp. 125–140.
- Fink, A. (2019). *Conducting research literature reviews: From the internet to paper*. SAGE Publications, Inc.
- Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*. Vol 114, pp. 11–32.
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*. Vol 252.
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Foroughi, B., Babaei Tirkolaee, E., Asadi, S., Amran, A. (2023). Industry 5.0 implications for inclusive sustainable manufacturing: An evidence-knowledge-based strategic roadmap. *Journal of Cleaner Production*. Vol 417.
- Gordan, M., Ghaedi, K., Saleh, V. (2023). *Industry 4.0 - Perspectives and Applications, Artificial Intelligence*. IntechOpen. Vol 16.

- Gruetzemacher, R., Whittlestone, J. (2022). The transformative potential of artificial intelligence. *Futures*. Vol 135.
- Gupta, S., Chen, H., Hazen, B.T., Kaur, S., Santibañez Gonzalez, E.D.R. (2019). Circular economy and big data analytics: A stakeholder perspective. *Technological Forecasting and Social Change*. Vol 144, pp. 466–474.
- Ingemarsdotter, E., Jamsin, E., Balkenende, R. (2020). Opportunities and challenges in IoT-enabled circular business model implementation – A case study. *Resources, Conservation and Recycling* 162, 105047.
- Jiang, Y., Li, X., Luo, H., Yin, S., Kaynak, O. (2022). Quo vadis artificial intelligence? *Discover Artificial Intelligence*. Vol 2(4).
- Kunkel, S., Tyfield, D. (2021). Digitalisation, sustainable industrialisation and digital rebound – Asking the right questions for a strategic research agenda. *Energy Research & Social Science*. Vol 82.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*. Vol 6(4), pp. 239–242.
- Márquez, F. P. G. (2021) *Internet of Things*. Intech Open.
- Mattos Nascimento, D.L., Alencastro, V., Quelhas, O.L.G., Caiado, R.G.G., Garza-Reyes, J.A., Rocha-Lona, L., Tortorella, G. (2019). Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*. Vol 30(3), pp. 607–627.
- Merli, R., Preziosi, M., Acampora, A. (2018). How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. Vol 178.
- Morseletto, P. (2023). Sometimes linear, sometimes circular: States of the economy and transitions to the future. *Journal of Cleaner Production*. Vol 390.
- Muntaser, M., Paolo, R., Giovanna, L. N., Giovanni, P. (2023) Understanding blockchain applications in Industry 4.0: From information technology and operations management. *Journal of Industrial Information Integration*. Vol 33.
- Neittaanmäki, P., Lehto, M., & Savonen, M. (2021). Yhteiskunnan digimurros. *Jyväskylän yliopiston IT-tiedekunta*.
- Neves, S.A., Marques, A.C. (2022). Drivers and barriers in the transition from a linear economy to a circular economy. *Journal of Cleaner Production*. Vol 341.
- Nobre, G.C., Tavares, E. (2020). Assessing the Role of Big Data and the Internet of Things on the Transition to Circular Economy: Part II: An extension of the ReSOLVE framework proposal through a literature review. *Johnson Matthey Technology Review*. Vol 64(1), pp. 32–41.
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., Hanemaaijer, A. (2017). *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. PBL publication number: 2544
- Porter, M., Heppelman, J. (2014). How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. *Harvard Business Review*.
- Pouri, M.J. (2021). Eight impacts of the digital sharing economy on resource consumption. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol 33(168).

- Rusch, M., Schöggel, J.-P., Baumgartner, R.J. (2023). Application of digital technologies for sustainable product management in a circular economy: A review. *Business Strategy and the Environment*. Vol 32(3), pp. 1159–1174.
- Sarker, I.H. (2021). Data Science and Analytics: An Overview from Data-Driven Smart Computing, Decision-Making and Applications Perspective. *SN Computer science*. Vol 2(5).
- Schwanholz, J., Leipold, S. (2020). Sharing for a circular economy? An analysis of digital sharing platforms' principles and business models. *Journal of Cleaner Production*. Vol 269.
- Sestino, A., De Mauro, A. (2022). Leveraging Artificial Intelligence in Business: Implications, Applications and Methods. *Technology Analysis & Strategic Management*. Vol 34(1), pp. 16–29.
- Sitra. (2023). Rebound-ilmio. Verkkojulkaisu. Sitra. Saatavissa (viitattu 3.10.2023) <https://www.sitra.fi/tulevaisuussanasto/rebound-ilmio/>.
- Stark, J. (2011). *Product Lifecycle Management. 21<sup>st</sup> Century Paradigm for Product Realisation*. Springer Cham. 4<sup>th</sup> edition.
- Sutherland, W., Jarrahi, M.H. (2018). The sharing economy and digital platforms: A review and research agenda. *International Journal of Information Management*. Vol 43(1), pp. 328–341.
- The Ellen McArthur Foundation (2016). Intelligent assests: unlocking the circular economy potential. Saatavissa (viitattu 15.9.2023): [https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation\\_Intelligent\\_Assets\\_030216.pdf](https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Intelligent_Assets_030216.pdf)
- The Ellen McArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition*. Saatavissa (viitattu 30.9.2023): <https://emf.thirdlight.com/link/x8ay372a3r11-k6775n/@/preview/1?o>
- Wilson, M., Paschen, J., Pitt, L. (2022). The circular economy meets artificial intelligence (AI): understanding the opportunities of AI for reverse logistics. *Management of Environmental Quality*. Vol. 33(1), pp. 9–25.
- Winqvist, E., Horn, S., Tuovila, H., Lavikko, S., Sorvari, J., Joutsjoki, V., Karhu, M., Slotte, P., Kautto, P., Kivikytö-Reponen, P., Ilvesniemi, H. (2023). R-strategies in circular economy: Textile, battery, and agri-food value chains. Natural Resources Institute Finland.
- Wu, J., Yu, J. (2023). Blockchain's impact on platform supply chains: transaction cost and information transparency perspectives. *International Journal of Production Research*. Vol. 61(11), pp. 3703–3716.
- Yu, F., Jiang, D., Zhang, Y., Du, H. (2021). Enterprise digitalisation and financial performance: the moderating role of dynamic capability. *Technology Analysis & Strategic Management*. Vol 2(1), pp. 1–17.