

Helmi Korpela

# DIGITALISAATION HYÖDYNTÄMINEN KIERTOTALOUDEN PALUUVIRROISSA

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Hasse Nylund  
Joulukuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Helmi Korpela: Digitalisaation hyödyntäminen kiertotalouden paluuvirroissa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden kandidaatinohjelma  
Joulukuu 2023

---

Kiertotalous on ollut puheenaiheena jo pitkään väkiluvun lisääntymisestä johtuneen länsimaisen kulutustason kasvamisen vuoksi. Sen tarkoituksena on estää lineaarisen talousmallin aiheuttama luonnonvarojen vähentyminen sekä haitalliset ympäristövaikutukset. Kiertotalouden tavoitteena on pitää raaka-aineet mahdollisimman pitkään materiaalikierrossa, jonka seurauksena uusien tuotteiden kulutus vähenee.

Tutkielma tehtiin systemaattisena kirjallisuuskatsauksena perustuen viime vuosina julkaistuun kirjallisuuteen aiheesta. Lähdeartikkelien avulla määriteltiin työn kannalta oleelliset käsitteet ja taustateoria sekä vastattiin tutkimuskysymykseen.

Työssä keskitytään kiertotalouden paluuvirtoihin eli virtauksiin kuluttajilta takaisin toimittajille. Kiertotalouden paluuvirtojen avulla pyritään luomaan suljetun kierron järjestelmä, jonka avulla saadaan pidennettyä tuotteiden elinkaarta ja vähennettyä syntyvän jätteen määrää. Paluuvirroista käsitellään neljä keskeistä vaihetta, jotka ovat verkoston suunnittelu, keräily, varastointi ja käsittely. Paluuvirtoihin liittyvät kiertotalouden käsittelymenetelmät käsitellään 9R-viitekehyksen avulla, jossa jokainen R-kirjain vastaa yhtä menetelmää.

Kiertotalouden jälkeen työssä keskitytään digitalisaatioon, joka nähdään tulevaisuudessa kiertotalouden mahdollistajana. Tässä työssä digitalisaatiolla tarkoitetaan teollisuutta 4.0, jonka teknologioista käsitellään tarkemmin tekoälyä, esineiden internettiä ja big data -analytiikkaa. Työn tavoitteena on selvittää, miten digitalisaatiota voidaan hyödyntää kiertotalouden paluuvirroissa.

Digitaalisia teknologioita voidaan hyödyntää kaikissa paluuvirtojen vaiheissa. Käsitellyt teknologiat mahdollistavat pääasiassa laajan ja reaaliaikaisen tietojen keräämisen palautuvien tuotteiden määrästä, laadusta ja ajasta. Niiden perusteella pystytään tekemään erilaisia suunnittelu-, päätöksenteko-, ennustamis- ja analysointitehtäviä. Teknologioita voidaan hyödyntää myös fyysisissä tehtävissä, kuten erilaisissa kuljetus- ja käsittelytehtävissä.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että digitaalisten teknologioiden käyttäminen antaa yrityksille paremman kyvyn toteuttaa kiertotaloutta. Tulevaisuudessa on tärkeää saada prosessien läpinäkyvyys, jäljitettävyys ja osapuolten välinen luottamus kuntoon, sekä jatkettava aiheen tutkimista tehokkuuden lisäämiseksi.

Avainsanat: kiertotalous, paluuvirrat, digitalisaatio, teollisuus 4.0

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. KIERTOTALOUS JA PALUUVIRRAT .....	2
2.1 Kiertotalouden määritelmä .....	2
2.2 9R-viitekehys .....	3
2.3 Paluuvirrat.....	5
3. DIGITALISAATIO .....	8
3.1 Tekoäly .....	9
3.2 Esineiden internet .....	11
3.3 Big data -analytiikka .....	13
4. DIGITAALISET TEKNOLOGIAT PALUUVIRTOJEN TUKENA .....	14
4.1 Edellytykset toimiville paluuvirroille .....	14
4.2 Digitaalisten teknologioiden hyödyntäminen.....	15
5. PÄÄTELMÄT .....	18
6. YHTEENVETO.....	19
LÄHTEET .....	20

# 1. JOHDANTO

Ympäristöasiat ovat saaneet viime vuosina paljon mediahuomiota, jonka seurauksena ihmisten tietoisuus ja huoli ilmastonmuutoksesta, luonnonvarojen rajallisuudesta ja ympäristön saastumisesta on lisääntynyt. Tämän takia nykyiselle talousmallille on etsitty kestävämpää ratkaisua, ja kiertotalous on esiintynyt potentiaalisena vaihtoehtona (de Melo et al. 2022). Lainsäädäntö ja kuluttajien ympäristötietoisuus ohjaavat yrityksiä tekemään kiertotaloutta tukevia valintoja.

Digitalisaation kehittyminen voi olla avainasemassa kiertotalouden ongelmien ratkaisemisessa. Digitalisaation avulla pystytään keräämään, hallitsemaan hyödyntämään valtavia tietomääriä ja hyödyntämään niitä paluuvirtojen eri vaiheissa. Ihmisille vaikeat päätökset ja tehtävät voidaan antaa koneiden ratkaistavaksi.

Tämän työn tavoitteena on antaa yleinen kuva kiertotaloudesta ja digitalisaatiosta. Nämä ovat laajoja aiheita, minkä vuoksi työ keskittyy käsittelemään niitä paluuvirtojen näkökulmasta. Työssä yhdistetään digitalisaatio ja kiertotalouden paluuvirrat ja tutkimuskysymyksenä onkin seuraava: miten digitalisaatiota voidaan hyödyntää kiertotalouden paluuvirroissa?

Työ tehtiin systemaattisena kirjallisuuskatsauksena. Työssä kartoitettiin ensin aiheiden taustoja ja määriteltiin käsitteet. Sen jälkeen selvitettiin, miten teorialukujen aiheet liittyvät toisiinsa. Työn aineistoina käytettiin pääasiassa vertaisarvioituja artikkeleita, konferenssijulkaisuja ja alan oppikirjoja. Lähteet haettiin työhön pääasiassa Andor-tietokannasta.

Työn teorialuvut alkavat luvusta 2, joka käsittelee kiertotaloutta. Siinä annetaan mahdollisimman tarkka ja selkeä määritelmä kiertotaloudelle ja tuodaan ilmi kiertotalouden tärkeys. Luvussa esitellään myös kiertotalouden yhteydessä usein käytetty 9R-viitekehys, jonka kautta päästään syventymään kiertotalouden paluuvirtoihin. Luvussa 3 esitellään digitalisaatiota yleisesti ja syvennytään tarkemmin työn kannalta oleellisiin digitaalisiin teknologioihin. Luvussa 4 yhdistetään aiempien lukujen aiheet ja tarkastellaan, miten luvussa 3 esitetyt digitaalisia teknologioita voidaan hyödyntää paluuvirtojen eri vaiheissa. Luvussa 5 analysoidaan työssä ilmenneitä asioita. Viimeisin luku 6 on yhteenveto työstä.

## 2. KIERTOTALOUS JA PALUUVIRRAT

Kiertotalous on ollut aiheena jo pitkään esillä ja tullut jatkuvasti tärkeämmäksi aiheeksi, kun tietoisuus planeetan resurssien rajallisuudesta on kasvanut. Nykyinen lineaarinen talousmalli perustuu *extract-produce-use-dump*-periaatteeseen eli ota-valmista-käytä-hävitä-periaatteeseen, joka ei ole kestävä malli (Korhonen et al. 2018). Kiertotalous on vaihtoehtoinen malli perinteiselle lineaariselle talousmallille, ja se on kerännyt suosiota uutena kestäväen kehityksen muotona (de Melo et al. 2022). Siirtyminen kiertotalouteen vaatii toimia ja politiikkaa sekä muutoksen kuluttajien ja päättäjien asenteissa. Tällä hetkellä EU sekä useat kansalliset hallitukset ja yritykset ympäri maailman edistävätkin kiertotaloutta (Korhonen et al. 2018).

### 2.1 Kiertotalouden määritelmä

Kiertotalouden konsepti on ollut viime vuosina entistä enemmän esillä ja kerännyt suosiota. de Melon et al. (2022) mukaan tälle on syynä räjähdysmäisestä väestönkasvusta seurannut kuluttajaluokan suureneminen, minkä seurauksena nykyisen lineaarisen talousmallin toteuttamisesta on pyrittävä siirtymään kestävämpään vaihtoehtoon. Bonciu (2014) kertoo ongelmaksi myös väestönkasvun ja painottaa vielä, että länsimaisen elintason ja kulutustottumuksien mahdollistaminen kaikille ihmisille on mahdotonta planeetan kantokyvyn rajoissa. Kulutuksen kasvamisen seurauksena lineaarinen talousmalli on aiheuttanut tarpeetonta tuhoa ympäristölle, kuten ilmastonmuutoksen, merten saastumisen, biodiversiteetin katoamisen ja maan huonontumisen (Khan et al. 2022, s. 6279). Lineaarisen talousmallin kestäättömyyden takia on tullut todellinen tarve löytää vaihtoehtoinen malli eli kiertotalous.

Vaikka kiertotalous on ollut terminä esillä jo pidemmän aikaa, on se yhä käsitteenä laaja ja sen määritelmä vaihtelee lähteen mukaan. Yhtenä kiertotalouden (eng. Circular economy) määritelmänä voidaan pitää systeemiä, jossa jätteen määrää pyritään vähentämään säilyttämällä käytössä olevia materiaaleja mahdollisimman pitkään materiaali-kierrrossa (Wilson et al. 2022). Toisin sanoen perinteisessä lineaarisessa talousmallissa syntyvä jäte käytetään kiertotaloudessa uusien tuotteiden raaka-aineena tai uusiutuvana

voimavarana (Wilson et al. 2022). Kiertotalouden avulla pyritään siis suljetun kierron järjestelmään. Materiaalit kuitenkin heikkenevät ajan myötä eivätkä ne pysy kierrossa ikuisesti, jolloin hävittäminen on tehtävä siten, että polttamisesta saadaan mahdollisimman paljon energiaa talteen. Koska kiertotalouden seurauksena raaka-aineet ja tuotteet pysyvät materiaalikierrossa mahdollisimman pitkään, jätteen määrä vähenee, ja pystytään mahdollistamaan parempi elintaso useammalle ihmiselle ympäristöä tuhoamatta.

Poikkeavista määritelmistä huolimatta lähteet ovat yhtä mieltä siitä, että kiertotalous on yhdistelmä vähentämisen-, uudelleenkäyttö- ja kierrätystoimintoja (Kirchherr et al. 2017). Näitä käsitellään seuraavassa alaluvussa 9R-viitekehysten muodossa.

## 2.2 9R-viitekehys

Yksi kiertotalouden käytetyimmistä työkaluista on 9R-viitekehys. de Melon et al. (2022) mukaan 9R-viitekehys on tarkoitettu tarkastuslistaksi sille, kuinka toteuttaa kiertotaloutta. Listassa esitetään englanninkielisiä R-kirjaimella alkavia sanoja, joista jokainen esittää kiertotaloutta edistävän periaatteen. Periaatteet ovat järjestyksessä seuraavat: *refuse*, *rethink*, *reduce*, *reuse*, *repair*, *refurbish*, *remanufacture*, *repurpose*, *recycle* ja *recover* (de Melo et al. 2022). 9R-viitekehyksestä kiertotalouden paluuvirtoihin liittyvät vain periaatteet R3–R9, jonka takia tässä työssä jätetään tarkemmin käsittelemättä periaatteet R0–R2. Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty viitekehysten kymmenen R:ää ja niiden määritelmät.

**Taulukko 1:** 9R-viitekehys (mukaillen lähdettä Kirchherr et al. 2017, s.224).

Järkevämpi tuotteiden käyttö ja valmistus	R0 <i>Refuse</i> Kieltäydy	Tuotteen tekeminen tarpeettomaksi luopumalla sen toiminnosta tai tarjoamalla sama toiminto eri tuotteessa
	R1 <i>Rethink</i> Uudelleenajattele	Tuotteen käytön tehostaminen
	R2 <i>Reduce</i> Vähennä	Tuotteen valmistuksen tai käytön tehostaminen käyttämällä vähemmän luonnonvaroja ja raaka-aineita
Tuotteen ja sen osien elinkaaren pidentäminen	R3 <i>Reuse</i> Käytä uudelleen	Hyväkuntoisen tuotteen käyttäminen alkuperäisessä käyttötarkoituksessaan
	R4 <i>Repair</i> Korjaa	Viallisen tuotteen korjaaminen ja huolto, jotta sitä voidaan käyttää alkuperäiseen käyttötarkoitukseensa
	R5 <i>Refurbish</i> Kunnosta	Vanhan tuotteen kunnostaminen ja päivittäminen
	R6 <i>Remanufacture</i> Uudelleenvalmista	Hylätyn tuotteen osien käyttäminen uuteen samanlaiseen tuotteeseen
	R7 <i>Repurpose</i> Käytä uuteen tarkoitukseen	Hylätyn tuotteen tai sen osien käyttäminen uuteen tuotteeseen, jolla on eri käyttötarkoitus kuin alkuperäisellä tuotteella
Raaka-aineiden hyödyllinen soveltaminen	R8 <i>Recycle</i> Kierrätä	Materiaalien käsittely siten että ne säilyttävät saman tai huonomman laadun
	R9 <i>Recover</i> Ota talteen	Energian talteen ottaminen poltetuista materiaaleista

Periaatteet R3–R7 pyrkivät pidentämään tuotteen tai sen osien elinkaarta. R3 eli uudelleenkäyttäminen tarkoittaa toisen hylkäämän hyväkuntoisen tuotteen käyttämistä uudelleen samassa käyttötarkoituksessa. (Kirchherr et al. 2017) Nämä tuotteet vaativat vain vähän tai eivät ollenkaan tarkastamista, puhdistamista tai huoltoa, jolloin ne voidaan yleensä palauttaa suoraan toimitusketjuun (Agrawal et al. 2015).

R4–R6 pyrkivät ylläpitämään tuotetta alkuperäisessä käyttötarkoituksessaan ja näin ollen kumoamaan tai lykkäämään sen vanhenemista. R4 eli korjaaminen tarkoittaa viallisen tuotteen huoltamista tai korjaamista siten että sitä voidaan käyttää alkuperäisessä

käyttötarkoituksessaan. Se on myös rikkiäisen tuotteen korjaamista vaihtamalla tai korjaamalla vialliset osat. R5 eli kunnostaminen on vanhan tuotteen kunnostamista ja modernisointia. Kunnostamisella pyritään palauttamaan tuotteet tiettyihin laatustandardeihin tai tyydyttävään toimintakuntoon ja ulkonäköön. R6 eli uudelleenvalmistaminen tarkoittaa käytöstä poistetun tuotteen osien käyttämistä uuteen samanlaiseen tuotteeseen, jonka tulee olla täysin alkuperäisen veroinen, vaikka siinä on käytetty komponentteja poistetusta tuotteesta. (Morseletto 2020)

R7 tarkoittaa tuotteen tai sen osien käyttämistä uuteen tarkoitukseen. Periaatteen tarkoituksena on käyttää hylättyä tuotetta tai sen osia uuteen tuotteeseen, jolla on eri käyttötarkoitus kuin alkuperäisellä tuotteella. Tämä tarkoittaa, että tuotteilla on erilaiset identiteetit ja toiminnot kuin alkuperäisillä tuotteilla, minkä takia periaate eroaakin muista elinkaaren pidentämiseen kuuluvista periaatteista. (Morseletto 2020)

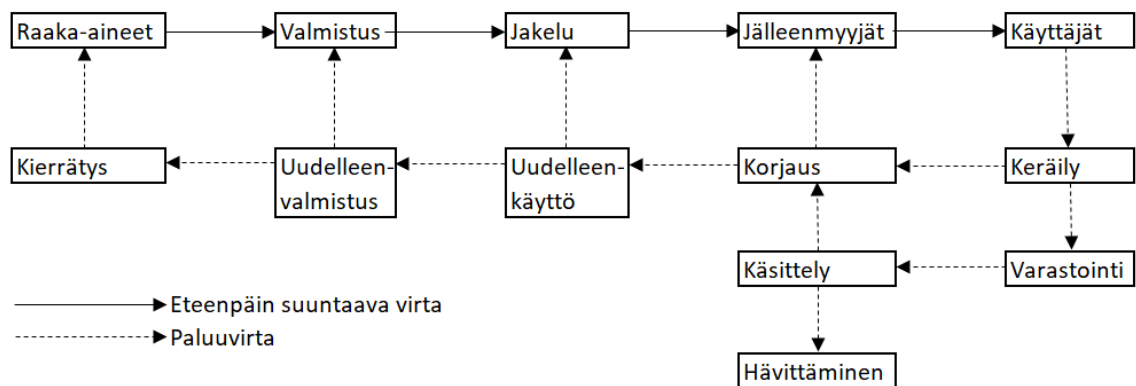
R8 ja R9 pyrkivät soveltamaan materiaaleja hyödyllisesti (Kirchherr et al. 2017). Periaatteet liittyvät jätteeseen, joka ilman näitä periaatteita päätyisi kaatopaikalle tai polttoon ilman energian talteen ottamista. R8 eli kierrättäminen pyrkii säilyttämään materiaalien laadun samana tai heikompana. Vaikka materiaalit pyritään kierrättämään niin, että ne säilyttävät saman laadun ja toiminnallisuuden, se ei ole useinkaan mahdollista, sillä suurin osa kierrättämisestä heikentää materiaalin laatua. Viimeinen periaate on 9R eli talteen ottaminen, jolla tarkoitetaan materiaalin polttamisesta talteen otettavaa energiaa. Tätä jätettä ei siis enää kierrätetä, mutta sitä käytetään energian lähteenä. (Morseletto 2020)

## 2.3 Paluuvirrat

Paluuvirrat eli käänteinen logistiikka on noussut tärkeäksi ja jopa kriittiseksi osaksi kiertotaloutta. Tärkeystä huolimatta käänteisen logistiikan toteuttaminen aiheuttaa haasteita yrityksille tiedon ja kokemuksen puutteellisuuden takia (Mallick et al. 2023). Käänteisen logistiikan integroiminen osaksi toimintaa on kuitenkin haasteista huolimatta suotavaa, sillä sen toteuttamista vaatii lainsäädäntö ja sen lisäksi siitä on myös hyötyä yritykselle. Taloudellista hyötyä yritys saa laskeneista tuotantokustannuksista ja vähentyneestä energiankulutuksesta, jotka ovat seurausta uudelleenkäyttö-, -valmistus ja kierrätystoiminnoista. Näiden lisäksi kiertotalouden ja paluuvirtojen huomioiminen parantavat yrityskuvaa. (Mallick et al. 2023) Kuten alaluvussa 2.1 kerrottiin, lineaarinen talousmalli on aiheuttanut resurssien niukkuutta. Tämän seurauksena on yhä tärkeämpää palauttaa tuotteiden arvo niiden käytön loppuvaiheessa (Allshammari & Ball 2016). Tähän ratkaisuna toimivat kiertotalouden paluuvirrat, joiden avulla arvokkaat materiaalit saadaan säilytettyä kierrossa pidempään, jolloin ne eivät joudu enää hukkaan (Bonciu 2014).



Kiertotalouden paluuvirroilla tarkoitetaan virtausta käyttäjiltä takaisin toimittajille ja se on kriittinen elementti, kun halutaan luoda suljetun kierron järjestelmä. Toisin sanoen paluuvirrat koostuvat toiminnoista, joiden tarkoitus on säilyttää tuotteen arvo mahdollisimman pitkään tai hävittää tuote asianmukaisesti. (Wilson et al. 2022)



**Kuva 1:** Kiertotalouden materiaalivirta (mukailten lähde Agrawal et al. 2015, s.78)

Kuva 1 esittää kierron virtauksia. Yhtenäiset nuolet esittävät eteenpäin suuntaavan virran, joka esittää myös lineaarista materiaali- ja energiavirtaa, jossa tuotteet päätyvät käyttäjiltä kaatopaikoille. Katkoviivoilla esitetyt nuolet esittävät kierron paluuvirrat, joita tämä työ käsittelee. Kuten kuvasta nähdään, paluuvirrat tekevät järjestelmästä suljetun.

Paluuvirrat koostuvat erilaisista vaiheista ja tehtävistä. Nämä voidaan jakaa neljään keskeiseen vaiheeseen, jotka ovat tuotteiden hankintaverkoston suunnittelu, keräily, varastointi ja käsittely (Agrawal et al. 2015; Wilson et al. 2022).

Verkoston suunnittelussa päätetään infrastruktuurin rakenne, kuten keräyspisteiden ja käsittelylaitosten määrät ja sijainnit, joiden välillä tuotteet virtaavat. Haasteita aiheuttaa, että tuotteet palautuvat takaisin toimittajille monista eri pisteistä ja niiden määrä sekä laatu vaihtelevat huomattavasti. Prosessi on siis epäjohdonmukainen ja arvaamaton, mikä kasvattaa kuljetus- ja käsittelykustannuksia ja johtaa huonoon näkyvyyteen koko prosessin osalta. Verkoston suunnittelu sisältää myös päätöksenteon mahdollisen kolmannen osapuolen käyttämisestä käänteisen logistiikan eri vaiheissa. Kolmannen osapuolen käyttäminen vapauttaa yrityksen vastuun vaiheiden hoitamisesta ja antaa mahdollisuuden yritykselle keskittyä ydinosaamiseensa. (Wilson et al. 2022)

Verkoston suunnittelun jälkeen siirrytään varsinaisiin käänteisen logistiikan vaiheisiin. Näistä ensimmäinen on keräily, joka sisältää kaikki ne toiminnot, joilla tuote siirtyy kuluttajalta keräyspisteeseen. Vastuu keräilystä voi olla alkuperäisellä toimittajalla, kuluttajalla, jälleenmyyjällä tai kolmannen osapuolen logistiikalla. Keräily voi tapahtua eri kanavien kautta ja se voi olla joko rajoittamatonta tai rajoitettua. Jos keräily on rajoittamatonta, kaikki tuotteet saa palauttaa paluuvirtoihin. Yleisesti käytössä on kuitenkin *gatekeeping*-periaate, jolla rajoitetaan tiettyjen tuotteiden palautusoikeutta. Tämän keinon avulla voidaan pitää paluuvirroista poissa sinne kuulumattomat tuotteet. (Agrawal et al. 2015; Wilson et al. 2022)

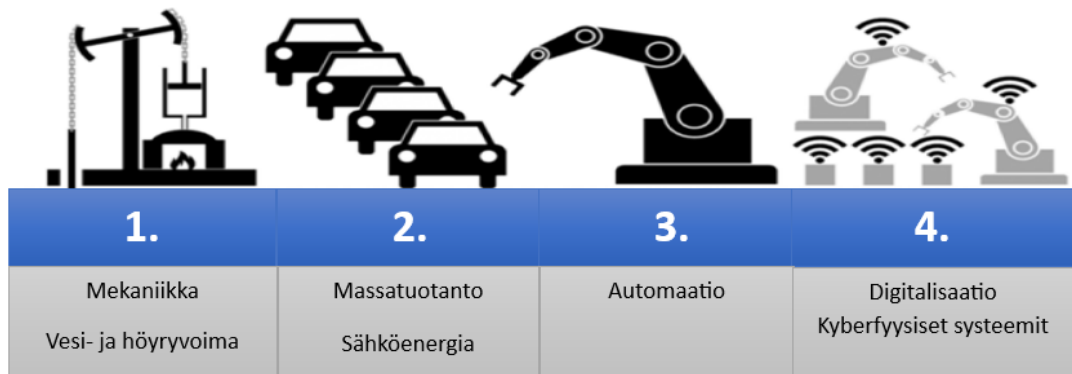
Keräilyn jälkeinen vaihe on varastointi. Vaihe sisältää tuotteiden tarkastamisen, lajittelun, yhdistelyn ja varaston hallinnan. Näitä tehtäviä vaikeuttaa palautuvien tuotteiden vaihteleva laatu ja määrä. Tuotteiden laadun ja ulkonäön tarkastaminen on erityisen tärkeää, sillä sen avulla jokainen tuote ohjataan omaan kanavaansa sen kunnon, arvon ja kustannusten perusteella. Kanavien kautta tuotteet tai niiden osat ohjataan jatkokäsittelyvaiheeseen. (Wilson et al. 2022)

Viimeinen vaihe on tuotteiden käsittely, jolle on seitsemän vaihtoehtoa. Nämä ovat uudelleenkäyttö sellaisenaan, korjaus, kunnostus, uudelleenvalmistus, käyttäminen uudelleen eri tarkoitukseen, kierrätys tai tuotteen hävitys (Agrawal et al. 2015; Kirchherr et al. 2017; Wilson et al. 2022). Nämä käsittelyn vaiheet käytiin läpi tarkemmin 9R-viitekehyyksen alaluvussa.

### 3. DIGITALISAATIO

Digitalisaatiolla tarkoitetaan yleisesti digitaalisten teknologioiden integroimista arkielämän toimintoihin (Sarc et al. 2019). Burmaoglu et al. (2022) puolestaan määrittelevät digitalisaation siirtymänä digitaaliseen liiketoimintaan. Sille ei ole kuitenkaan tarkkaa määritelmää ja se vaihtelee kontekstin mukaan.

Tässä työssä digitalisaatiolla tarkoitetaan teollisuus 4.0 konseptia (eng. industry 4.0), joka on käsitteenä vielä todella uusi. Se nousi ensimmäisen kerran esille Saksassa vuonna 2011 (Hennemann Hilario da Silva & Sehnem 2022). Teollisuus 4.0 on osa neljättä teollista vallankumousta, jota edeltää kolme varhaisempaa teollista vallankumousta. Nämä esitetään alla olevassa kuvassa 2.



**Kuva 2:** Teolliset vallankumoukset (mukaillen lähdettä Awan et al. 2021 s.2043)

Ensimmäinen teollinen vallankumous oli mekaaninen ja seurausta vesi- ja höyryvoiman käytöstä. Toinen teollinen vallankumous oli seurausta sähkövoiman käytöstä, mikä mahdollisti massa- ja linjatuotannon. Kolmas vallankumous oli tietokoneiden ja automatisaation aikaa. Teollisuus 4.0 on seurausta kolmannesta teollisesta vallankumouksesta ja siinä yhdistyvät automaation lisäksi digitalisaatio ja kyberfyysiset systeemit. (Awan et al. 2021)

Teollisuus 4.0 kuvaa tieto- ja viestintätekniikan laajaa käyttöönottoa, sekä sen yhdistämistä esineiden ja palveluiden internetiin mahdollistaen jatkuvan vuorovaikutuksen (Sarc et al. 2019). Vuorovaikutus tapahtuu koneiden välillä, ihmisten välillä sekä ihmisten ja koneiden välillä (Kamble et al. 2018). Teollisuus 4.0 tarjoaa digitaalista automaatiota ja tiedonvaihtoa (Awan et al. 2021). Huomioitavaa konseptissa on, etteivät järjestelmät

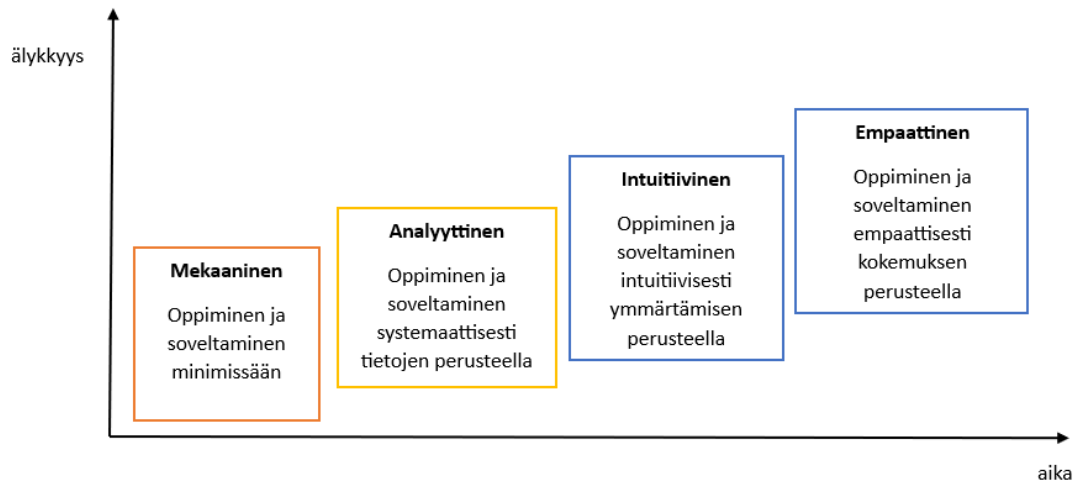
ole vain automaattisia vaan myös älykkäitä (Kamble et al. 2018). Sen vuoksi teollisuus 4.0 painottaa kaikkien aineellisten resurssien yhdistämistä digitaalisiin ympäristöihin ja järjestelmiin, mikä mahdollistaa joustavuuden, reaaliaikaisen seurannan ja kestäväen resurssienhallinnan toimitus- ja arvoketjussa (Sahu et al. 2022).

Teollisuus 4.0 muodostuu monista digitaalisista teknologioista. Niistä tarkastellaan tässä työssä tarkemmin tekoälyä, esineiden internettiä ja big data -analytiikkaa.

### 3.1 Tekoäly

Tekoäly (eng. Artificial Intelligence) on yksi digitalisaation ja teollisuus 4.0:n teknologioista. Tekoäly yleisesti määritellään koneen kykyä suorittaa ihmiselle ominaisia älyllisiä prosesseja, kuten päättelyä, oppimista, yleistämistä ja suunnittelemista (Copeland 2020). Russel & Norvig (2016, s.2) esittelevät taulukon, jonka mukaan tekoäly voidaan jakaa neljään kategoriaan sen mukaan, nähdäänkö tekoäly ajatteluna vai toimintana ja tavoitellaanko rationaalisuutta vai inhimillisyyttä. Nämä kategoriat ovat inhimillisesti ajatteleva, inhimillisesti toimiva, rationaalisesti ajatteleva ja rationaalisesti toimiva. He eivät oleta tekoälyltä ihmisen kaltaista toimintaa, vaan määrittelevät sen rationaalisena toimintana, jonka mukaan koneet toimivat tilanteen mukaan järkevällä tavalla. (Russel & Norvig 2016, s. 30) Tekoäly on laaja kokonaisuus, joka sisältää eri ominaisuuksia, toimintoja ja tekniikoita. Sen menetelmiä ovat koneoppiminen, data-analyysi, havainnointi, vuorovaikutus ihmisen kanssa, robotiikka ja automaatio. (Ailisto 2018) Tekoäly voidaan jakaa ohjelmistoihin sekä fyysisiin koneisiin ja laitteisiin.

Huang ja Rust (2018) jakavat tekoälyn neljään osaan sen mukaan, millainen kyky sillä on suorittaa erilaisia tehtäviä. Nämä neljä tekoälyn tyyppiä ovat mekaaninen, analyttinen, intuitiivinen ja empaattinen tekoäly. Alla olevassa kuvassa 2 on esitelty nämä neljä tekoälyn tyyppiä.



**Kuva 3:** Tekoälyn neljä tyyppiä (mukaillen lähdettä Huang & Rust 2018)

Kuten kuvasta 3 nähdään, mekaaninen tekoäly on vanhin muoto ja täten myös yksinkertaisin älykkyyden tasolla. Empaattinen tekoäly on uusin innovaatio, joka on kaikista älykkäin ja monimutkaisin. Mekaaninen tekoäly suorittaa yksinkertaisia ja toistuvia tehtäviä, jotka vaativat vain vähäistä koulutusta ja ovat johdonmukaisia. Suoritetut tehtävät eivät vaadi erityistä osaamista tai luovuutta. Mekaanisia tekoälyn teknologioita ovat esimerkiksi itsepalveluteknologiat ja palvelurobotit. Analyttinen tekoäly on tarkoitettu ratkaisemaan monimutkaisia, mutta systemaattisia, johdonmukaisia ja ennustettavia tehtäviä. Sillä on kyky käsitellä informaatiota ongelmien ratkaisemiseksi ja oppia siitä. Keskeistä analyttiselle tekoälylle on tietojenkäsittelytaidot, looginen päättely ja matemaattiset taidot. Analyttisiä teknologioita ovat koneoppiminen ja data-analytiikka. Intuitiivisella tekoälyllä on kyky ajatella luovasti, sopeutua tehokkaasti uusiin tilanteisiin ja se perustuu kokemuspohjaiseen ajatteluun. Sen ajattelu on ammattimaista ja vaatii oivalluksia, sekä luovaa ongelmanratkaisutaitoa. Empaattinen tekoäly pystyy kokemaan asioita ja sen tulisi ainakin käyttäytyä kuin sillä olisi kyky tuntea. Sen tehtävä on avustaa ihmisiä ja tehdä päätöksiä. Nämä tehtävät vaativat korkeampaa sosiaalista läsnäoloa ja vuorovaikutusta. (Huang & Rust 2018)

Tekoäly on siis järjestelmän kykyä käsitellä tietoja, oppia niistä ja hyödyntää opittuja asioita tehtävien tekemiseen ja tavoitteiden saavuttamiseen. Tekoälyllä on kyky jakaa monimutkaiset tehtävät yksinkertaisiksi päätöksiksi (Schlüter et al. 2021). Se on suunniteltu seuraamaan ja ennustamaan vikoja, sekä korjaamaan ja tukemaan muita tehtäviä (Awan et al. 2021).

## 3.2 Esineiden internet

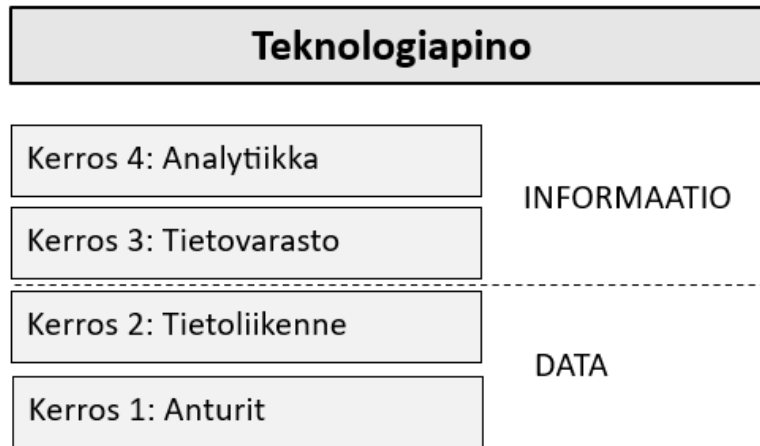
Esineiden internet (eng. Internet of things, IoT) on teknologia, joka käyttää laiteyhdistelmiä datan tuottamiseen ja lähettämiseen muille laitteille, sekä pilvipalveluun (Hennemann Hilario da Silva & Sehnem 2022). Se on siis koneiden välistä vuorovaikutusta. Siinä esineisiin ja koneisiin lisätään elektroniikkaa, usein antureita tai RFID-tunnistimia. Näiden avulla ne voidaan liittää järjestelmiin, joissa kerätty tieto jaetaan kaikkien nähtäväksi. (Kamble et al. 2018)

Esineiden internetiä käytetään tiedon keräämiseen, analysointiin ja hallintaan. Siinä tuotteille on varattu yksilölliset tunnisteet, jotka on liitetty tietoihin niiden alkuperästä, käytöstä ja määränpäästä. Sen avulla monimutkaisten tuote- ja arvovirtojen ohjaus ja hallinta onnistuu tehokkaammin. (Kamble et al. 2018)

Ben-Dayan et al. (2019) mukaan esineiden internetin määritelmässä tulee huomioida neljä keskeistä ominaisuutta:

1. fyysisten esineiden digitaalinen liitettävyyys
2. tämän liitettävyyden on oltava ennakoivaa mahdollistaen tietojen tallentamisen, analysoinnin ja jakamisen
3. viestintä tapahtuu sisäisesti yritysten sisällä sekä ulkoisesti eri osapuolten välillä huomioiden kaikki toimitusketjun prosessit
4. esineiden internet helpottaa toimitusketjun suunnittelua, valvontaa ja koordinoimista.

Ben-Dayan et al. (2019) mukaan esineiden internet voidaan jakaa ominaisuuksiensa perusteella myös neljään kerrokseen, jotka muodostavat teknologiapinon. Teknologiapinossa oleellista on, että jokainen kerros tukee toistaan, alhaalta ylös ja toisinpäin. Kaksi alinta kerrosta toimivat datan keräämisessä, jota kaksi ylempää kerrosta hyödyntää informaatioksi. (Collin & Saarelainen 2016)



**Kuva 4:** Teknologiapino (mukaillen lähdettä Collin & Saarelainen 2016, s.143)

Kuvassa 4 on esitetty teknologiapino, joka voi koostua neljästä, viidestä tai kuudesta kerroksesta. Tässä työssä esitetään neljän kerroksen malli, jonka ensimmäinen kerros on tunnistekerros, joka sisältää erilaisia tuotteiden tunnistamiseen liittyviä teknologioita kuten RFID-tunnistimia ja antureita. Toinen kerros eli verkostokerros tukee tiedonsiirtoa langallisen tai langattoman verkon kautta. Toisin sanoen se kuvaa tietoliikennettä, joka kuljettaa tunnistekerroksessa kerättyä tietoa ylöspäin. Kolmas kerros toimii keskitettynä tietovarastona, johon alemmista kerroksista ja muista tietolähteistä kerätyt tiedot tallennetaan. Neljännessä kerroksessa tapahtuu datan käsittely. (Collin & Saarelainen 2016)

Lyhyesti ilmaistuna esineiden internet on siis verkosto fyysisiä esineitä, jotka on yhdistetty digitaalisesti vuorovaikuttamaan yritysten sisällä ja myös eri osapuolten välillä. Fyysiset esineet on rikastettu tunnistamiseen liittyvällä elektroniikalla ja ne on yhdistetty verkkoon, mikä muodostaa järjestelmän. Tämä mahdollistaa ketteryuden, läpinäkyvyyden, tiedonjaon ja seurannan, mikä helpottaa toimitusketjun suunnittelua, hallintaa ja valvontaa. (Ben-Dayan et al. 2019)

Esineiden internetin käytetyimmät tunnistamiseen liittyvät teknologiat ovat erilaiset anturit ja RFID-tunnisteet. Älykkäät anturit (eng. Smart sensors) ovat mekaanisia laitteita, jotka muuntavat fyysisestä maailmasta tulevat tiedot kyberjärjestelmän tiedoiksi. Ne keräävät ja välittävät tiedot reaalisajassa tietokoneille. (Kamble et al. 2018) Älykkäillä antureilla kerätty tieto poistaa epä johdonmukaisuuksia ja lisää luotettavuutta (Hennemann Hilario da Silva & Sehnem 2022). Radiotaajuustunnistimilla puolestaan (eng. Radio Frequency Identification, RFID) on yksilölliset tunnistenumerot ja uudelleenkirjoitettava muisti, mikä mahdollistaa reaaliaikaisen datan näkymisen ja perinteisistä viivakoodeista poiketen, useita tunnisteita voidaan lukea kerralla. (Mallick et al. 2023)

### 3.3 Big data -analytiikka

Big datalle ei löydy sopivaa käännöstä suomeksi, mutta sillä tarkoitetaan yleisesti tietojoukkoja, jotka ovat niin suuria ja monimutkaisia etteivät perinteiset tietojenkäsittelyohjelmat pysty keräämään, hallitsemaan ja käsittelemään niitä järkevässä ajassa (Krstić et al. 2022).

Big dataa voidaan kuvata ominaisuuksiensa mukaan. Näitä ominaisuuksia kuvataan englanninkielisillä v-kirjaimella alkavilla sanoilla, joita oli lähteistä vaihdellen kolme, viisi tai enemmän. Tässä työssä esitellään Big datan viisi ominaisuutta. Nämä ovat määrä (eng. volume), nopeus (eng. velocity), moninaisuus (eng. variety), todenmukaisuus (eng. veracity) ja arvo (eng. value). Määrällä tarkoitetaan kerätyn ja tallennetun datan määrää. Nopeudella tarkoitetaan aikaa, joka kuluu datan tuottamiseen, käsittelemiseen, analysoimiseen ja visualisoimiseen. Näihin kuluva aika voi vaihdella huomattavasti. Moninaisuudella tarkoitetaan, että dataa on monessa muodossa. Se voi olla jäsenneiltyä numeerista dataa tai jäsentämätöntä dataa kuten tekstidokumentit, ääni ja video. Dataa myös tuotetaan eri lähteistä, mikä vaikeuttaa sen käsittelemistä. Todenmukaisuudella tarkoitetaan tiedon luotettavuutta ja laatua. Joidenkin tietojen luontainen arvaamattomuus vaatii datan analysointia luotettavan ennusteen saamiseksi. Arvolla tarkoitetaan big datan tuottamaa taloudellista arvoa ja siitä hyötymistä. (Aryal et al. 2022)

Big data -analytiikalla tarkoitetaan näiden valtavien ja monimutkaisten tietomäärien louhimista, jonka avulla pystytään tunnistamaan nykyiset mallit ja trendit ja ennustamaan tulevia muutoksia. (Krstić et al. 2022) Big data -analytiikka tukee reaaliaikaista tiedonkeruuta useista eri lähteistä, kattavaa datan analysointia ja reaaliaikaista päätöksentekoa (Kamble et al. 2018) Big data -analytiikan etuja on valtavien tietomäärien käsittely reaaliaikaisesti, nopea ja luotettava reagointi, päätöksenteko ja ennustaminen. Tämän takia sitä voidaan hyödyntää materiaaliketjun monissa eri vaiheissa.



## 4. DIGITAALISET TEKNOLOGIAT PALUUVIRTOJEN TUKENA

Jos halutaan saavuttaa täysi hyöty kiertotaloudesta, tarvitaan sen tueksi digitaalisia teknologioita (Kristoffersen et al. 2020). Digitalisaatiota pidetäänkin kiertotalouden mahdollistajana. Hennemann Hilario da Silvan ja Sehnemin (2022) mukaan yrityksillä, jotka ovat ottaneet käyttöön teollisuuden 4.0 teknologioita, on parempi kyky toteuttaa 9R-viitekehysten strategioita kuin sellaisilla yrityksillä, jotka eivät ole ottaneet käyttöön näitä teknologioita. Tämä puolestaan on suoraan yhteydessä siihen, kuinka hyvin yritykset pystyvät toteuttamaan kiertotalouden paluuvirtoja.

### 4.1 Edellytykset toimiville paluuvirroille

Digitaalisten teknologioiden käyttöönotto tuo uusia tapoja parantaa jäljitettävyyttä ja läpinäkyvyyttä tuotteen koko elinkaaren aikana, mikä helpottaa erityisesti keräystä, kunnostusta, uudelleentalmistusta ja kierrätysvaihtoehtoja elinkaaren loputtua (Burmaoglu et al. 2022). Tätä vaikeuttaa kuitenkin tiedon puute ja etenkin paluuvirtojen dataa on kerätty hyvin vähän. Digitalisaation avulla voidaan yhdistää ihmisiä maailmanlaajuisesti, mikä voi edistää globaalia yhteistyötä ympäristöasioiden edistämiseksi (Burmaoglu et al. 2022).

Jotta digitaalisia teknologioita voidaan hyödyntää kiertotalouden paluuvirroissa, pitää löytää keino kerätä dataa niistä. Tarvittavaa tietoa on palautuvien tuotteiden määrä, laatu, tyyppi ja aika, jolloin tuotteet palautuvat. Schlüterin et al. (2023) mukaan tekoälyä voidaan hyödyntää tuotteiden tunnistamisprosesseissa. Jatkuva tunnistusmenetelmien soveltaminen tuottaa kuitenkin valtavia tietomääriä, mikä johtaa korkeaan energian ja resurssien kulutukseen ja pitkiin käsittelyaikoihin oppimisvaiheessa. Ratkaisuna tähän on inkrementaalinen liiketoiminta- ja kuvatietojen oppiminen, mikä voi olla energiatehokas vaihtoehto tunnistusalgoritmien nopealle käynnistämiseksi. (Schlüter et al. 2023) Big data -analytiikan käyttäminen näiden valtavien tietomäärien hallinnassa mahdollistaa tietojen virtualisoinnin ja tallentamisen mahdollisimman tehokkaalla taloudellisella tavalla (Hennemann Hilario da Silva & Sehnem 2022). Myös esineiden internetiä voidaan hyödyntää datan keräämisessä, sillä tuotteiden ja niitä kuljettavien konttien tunnistaminen ja yhdistäminen onnistuu erilaisilla teknologioilla, kuten antureilla ja RFID-tunnistimilla (Mallick et al. 2023).

Kaikki työssä esiteltyt teknologiat mahdollistavat läpinäkyvyyden, jäljitettävyyden ja luottamuksen paluuvirtojen vaiheissa (Mallick et al. 2023). Nämä täytyvät olla kunnossa, jotta käänteisen logistiikan on mahdollista toimia. Läpinäkyvyydellä tarkoitetaan, että tiedot ovat helposti saatavilla kaikkien osapuolten välillä. Tämä on tärkeää, koska tuotteet kulkevat laajan verkoston läpi, jossa on läsnä monia eri toimijoita. Jäljitettävyys mahdollistaa tuotteiden seurannan ja tiedonsaannin toimitusketjun eri vaiheiden aikana. Ihmiset ovat kiinnostuneita tuotteiden alkuperästä, joka on vaikea määrittää monimutkaisten toimitusketjujen ja tuotevirtojen verkostosta. Sen vuoksi jäljitettävyys edellyttää tuotteiden seurantaan koko niiden elinkaaren ajan. Luottamuksella tarkoitetaan eri osapuolten yhteisymmärrystä siitä, miten voi käyttäytyä oikealla tavalla ja kohtuullisesti sekä mihin voi luottaa. (Centobelli et al. 2022)

## 4.2 Digitaalisten teknologioiden hyödyntäminen

Digitalisaatiota voidaan hyödyntää kaikissa paluuvirtojen vaiheissa. Kappaleessa käsitellään vaihekohtaisesti, miten jokaista teknologiaa voidaan siinä hyödyntää.

Verkoston suunnittelussa analyttistä tekoälyä voidaan käyttää hyväksi keräyspisteiden, käsittelylaitosten ja hävityskeskusten määrien ja sijaintien päättämisessä ja suunnittelussa. Kyseessä on siis paluuvirtojen ideaalisen infrastruktuurin ratkaiseminen. Analyttisellä tekoälyllä voidaan myös määrittää optimaaliset säilytysajat keräyspisteissä tuotteille ennen niiden siirtoa käsittelylaitoksille. Kolmannen osapuolen logistiikkaa valitessa voidaan hyödyntää intuitiivista tekoälyä päätöksen tekemisessä. Valinta vaatii useiden kriteerien huomioon ottamista ja tekoäly tarjoaa vankemman ja kvantitatiivisemmän ratkaisun ihmisen subjektiiviseen ja puolueelliseen ratkaisuun verrattuna. (Wilson et al. 2022) Myös big data -analytiikkaa ja esineiden internetiä voidaan hyödyntää useiden tuotteiden keräyspisteiden määrien, välimatkojen ja välisten yhteyksien eli infrastruktuurin suunnittelussa (Krstić et al. 2022).

Keräilyssä analyttistä tekoälyä voidaan hyödyntää logistiikan reitityksessä, sillä se pystyy laajasta datasta ennustamaan reittejä (Schlüter et al. 2023). Analyttistä tekoälyä, big data -analytiikkaa ja esineiden internetiä voidaan kaikkia hyödyntää myös palautuvien tuotteiden määrän arvioimisessa, jonka kautta pystytään määrittämään tarvittavat keräilytoimet ja niiden kysynnän. Niiden avulla pystytään myös määrittelemään, kelppaako palautettava tuote keräiltäväksi vai tuleeko tuote hävittää. Intuitiivinen tekoäly ja esineiden internet voisi tukea keräilyprosessia älykkäillä ajoneuvoilla, jotka voisivat hoitaa keräilyn ilman ihmistä. (Krstić et al. 2022; Wilson et al. 2022). Älykkäät ajoneuvot voivat mukautua, oppia ja toimia itsenäisesti käyttämällä niiden kykyä aistia ympäristöä,

tehdä itsenäisiä päätöksiä ja liikkua turvallisesti. Ne vaativat vain vähän tai eivät ollenkaan ihmisen apua toimiakseen. Älykkäiden ajoneuvojen etuna automaattisiin autoihin verrattuna on, ettei niiden tarvitse kulkea kiinteää reittiä vaan ne voivat tehdä itse päätöksiä reittien suhteen kehittyneiden algoritmien avulla. Älykkäitä ajoneuvoja voidaan käyttää sekä lyhyen, että pitkän matkan kuljetuksiin, joita ovat maantie-, ilma-, rautatie- ja vesitiekuljetukset, minkä vuoksi ne soveltuvat keräilyprosessiin paremmin kuin automaattiset ajoneuvot. (Krstić et al. 2022) Mallickin et al. (2023) mukaan keräilyä voisi tukea myös älykkäillä keräyspisteillä, jotka viestittävät sijaintinsa ollessaan täynnä ja valmiina keräiltäväksi. Älykkäät keräyspisteet tai kontit voivat myös punnita sisältöään ja sen kautta arvioimaan palautuvien tuotteiden määrää (Garrido-Hidalgo et al. 2019). Haasteeksi tulee kuitenkin palautettavien tuotteiden heterogeenisuus, jolloin painot ja koot vaihtelevat. Kappalemäärää pystyisi siis arvioimaan vain, jos kaikki tuotteet olisivat samanlaisia.

Varastointivaiheessa tuotteiden tunnistaminen ja palauttamisen syyn tunnistaminen on tärkeää, mikä voidaan selvittää esineiden internetin ja RFID-tunnistimien avulla. (Garrido-Hidalgo et al. 2019) RFID-tunnistimet myös nopeuttavat prosessia, koska useita tunnisteita voidaan lukea samanaikaisesti (Mallick et al. 2023). Varastoinnissa mekaanisella tekoälyllä varustettuja robotteja voidaan hyödyntää monissa lajittelu- ja tarkastustehtävissä. Yhteistyörobotit, joihin on upotettu koneoppimisominaisuuksia ovat jo käytössä monissa varastointiasetuksissa. Ne voivat auttaa ihmisiä monissa eri paaluvirtoihin liittyvissä tehtävissä, kuten tuotteiden laadun, vikojen ja tiettyjen osien olemassaolon tunnistamisessa, sekä vuorovaikutuksessa muiden koneiden ja järjestelmien kanssa. (Wilson et al. 2022) Näitä tekoälyllä varustettuja robotteja käytetään varsinkin toistuviin ja yksinkertaisiin tehtäviin, joihin on vaikea löytää työvoimaa. Robottien käytön etuna on korkea hyötysuhde, joustavuus, tarkkuus ja luotettavuus. (Krstić et al. 2022) Varastointivaiheessa voidaan myös hyödyntää automaattitrukkeja. Automatisoiduilla autoilla tai trukeilla tarkoitetaan kuljetus- ja materiaalinkäsittelyjärjestelmiä, jotka ovat kauko- tai itseohjautuvia magneettien, radioaaltojen, lasereiden ja kameroiden avulla. Niitä käytetään pääasiassa kuorman vaaka- tai pystysuuntaiseen siirtämiseen, varastointiin, keräämiseen ja hakemiseen. Niiden avulla tuotteiden siirtely varaston sisällä helpottuu (Krstić et al. 2022).

Käsittelyvaiheessa tehdään päätös tuotteen tai sen osien seuraavasta vaiheesta. Tekoälyllä ja esineiden internetillä voidaan tukea päätöstä. Niiden avulla voidaan arvioida tuotteen kuntoa ja tehdä päätös siitä, voiko tuotteen kierrättää, uudelleen käyttää tai uudelleen valmistaa vai pitääkö se purkaa tai hävittää. (Krstić et al. 2022) Intuitiivinen te-

koäly voi auttaa päättämään kaikista tehokkaimman tavan purkaa tuote osiin jatkokäsittelyä tai hävittämistä varten. Käsittelyasemien määrän ja joutoaikojen minimointi, sekä purkamisjärjestys ovat tärkeitä näkökulmia paluuvirtojen osalta, mutta optimaalisen ratkaisun löytäminen on vaikeaa. Tekoälyn yksi teknologioista on koneoppiminen, jonka avulla löydetään tehokas ja optimaalinen ratkaisu käsittelyaikojen minimoimiseksi sen oppimisvaikutuksen avulla. (Wilson et al. 2022) Esineiden internettiä voidaan myös käyttää apuna purkamisvaiheessa päätöksenteon tukena (Garrido-Hidalgo et al. 2019). Käsittelylaitoksissakin voidaan käyttää automaattitrukkeja tuotteiden siirtämiseen paikasta toiseen (Krstić et al. 2022).

**Taulukko 2:** Kirjallisuuskatsauksen tulokset tiivistetysti

Tehtävä	Tekoäly	Esineiden internet	Big data -analytiikka
Verkoston suunnittelu	Päätöksenteko keräys-, käsittely- ja hävityspisteiden määrien ja sijaintien suhteen Säilytysaikojen määrittäminen Kolmannen osapuolen logistiikan valitseminen	Päätöksenteko infrastruktuurin suhteen	Päätöksenteko keräyspisteiden määrien ja välisten yhteyksien suhteen
Keräily	Autonomiset ajoneuvot Logistiikan reititys Tuotteiden määrän arviointi	Älykkäät ajoneuvot hoitavat keräilyä Älykkäät keräyspisteet Keräyspisteiden hallinta	Palautuvien tuotteiden määrän ennustaminen ja laadun arviointi
Varastointi	Tekoälyllä varustetut robotit auttavat tehtävien tekemisessä	Varaston optimointi Automaattitrukit RFID-tunnisteet	
Käsittely	Päätöksenteko tuotteiden tai osien jatkokäsittelystä Tehokkaan ratkaisun löytäminen käsittelyaikojen minimoimiseksi Tekoälyllä varustetut robotit auttavat käsittelytehtävissä	Päätöksenteko tuotteiden tai osien jatkokäsittelystä Automaattitrukit	Päätöksenteko tuotteiden tai sen osien jatkokäsittelystä Tuotteiden laadun arviointi

Taulukossa 2 on esitetty tiivistetysti kirjallisuuskatsauksessa löytyneet tulokset. Valitut teknologiat auttavat paluuvirroissa erityisesti erilaisia suunnittelu-, päätöksenteko-, ennustamis- ja analysointitehtäviä. Digitaalisia teknologioita voidaan myös hyödyntää fyysisissä tehtävissä, jotka muuten vaatisivat työvoimaa. Tällaisia ovat erilaiset kuljettamiseen liittyvät tehtävät, sekä tuotteiden käsittelytehtävät.

## 5. PÄÄTELMÄT

Kiertotalouteen siirtyminen tulevaisuudessa on erityisen tärkeää ilmastonmuutoksen hidastamiseksi. Jotta siirtymä kiertotalouteen onnistuu, on lainsäädännön ajettava yrityksiä toteuttamaan kiertotalouden menetelmiä ja integroimaan paluuvirrat osaksi yrityksen toimintaa. Paluuvirrat ovat kriittinen osa kiertotaloutta, koska ne luovat suljetun kierron järjestelmän ja näin ollen vähentävät syntyvän jätteen määrää. Yritysten ja kuluttajien tietoisuutta lineaaritalouden haitoista ja kiertotalouden hyödyistä on lisättävä, jotta siirtymä on mahdollinen. Tämä edellyttää myös osapuolten välistä yhteistyötä ja luottamusta sekä koko materiaalivirran läpinäkyvyyttä ja jäljitettävyyttä.

Työn tavoitteena oli selvittää, miten digitalisaatiota voidaan hyödyntää kiertotalouden paluuvirroissa. Työtä tehdessä ilmeni, että digitaalisia teknologioita voidaan hyödyntää monipuolisesti kaikissa paluuvirtojen vaiheissa. Digitalisaatio tuo reaaliajassa monipuolisesti tietoa materiaalivirran eri vaiheilta ja selkein hyöty teknologioiden käytöstä olikin tietojen laaja kerääminen ja käsitteleminen. Tietojen avulla teknologiat pystyvät auttamaan erilaisissa suunnittelu-, ja päätöksentekotehtävissä. Sen lisäksi teknologioista on hyötyä myös logistiikan ja käsittelytehtävien tukena. Digitalisaatiolla pystytään siis tekemään paluuvirtojen verkostosta mahdollisimman tehokas, ja auttamaan ihmisiä eri tehtävien tekemisessä. Sen takia yritysten tuleekin pyrkiä ottamaan erilaisia teknologioita osaksi toimintaansa.

Paluuvirrat ja teollisuus 4.0 ovat molemmat konseptina suhteellisen uusia. Näiden yhdistäminen tulee todennäköisesti tulevaisuudessa ratkaisemaan monia ongelmia, mutta lisätutkimuksille on tarvetta. Kirjallisuutta löytyy paluuvirroista ja digitalisaatiosta paljon, mikä kertoo aiheiden suosiosta ja tärkeydestä. Myös digitalisaation hyödyntämisestä kiertotaloudessa löytyy kirjallisuutta, mutta vielä enemmän voisi löytyä kirjallisuutta, joka keskittyy suoraan digitalisaation hyödyntämiseen paluuvirroissa. Työssä myös käsiteltiin vain kolmea eri teknologiaa, joten useampien teknologioiden käsitteleminen olisi voinut tuoda erilaisia ratkaisuja esille.

## 6. YHTEENVETO

Nykyisen lineaarisen talousmallin aiheuttamat ongelmat ja tuhot ympäristölle ovat todellinen huolenaihe. Yhtenä ratkaisuna ongelmiin voidaan nähdä kiertotalous ja etenkin kiertotalouden paluuvirrat. Paluuvirroilla tarkoitetaan takaisinpäin virtausta kuluttajilta toimittajille, minkä avulla saadaan luotua suljetun kierron järjestelmä. Järjestelmä pitää materiaalit kierrossa mahdollisimman pitkään, mikä vähentää jätteiden määrää. Paluuvirtojen keskeisimpinä vaiheina voidaan pitää verkoston suunnittelua, keräystä, varastointia ja käsittelyä. Käsittelyn eri vaiheita esitettiin 9R-viitekehityksen muodossa.

Jotta kiertotaloudesta saavutetaan mahdollisimman suuri hyöty, tarvitsee se tuekseen digitalisaatiota. Digitalisaatiolla tarkoitetaan tässä työssä teollisuus 4.0 konseptia, joka yhdistää fyysisen ja digitaalisen maailman automaattisten ja älykkäiden esineiden avulla. Teollisuus 4.0 sisältää monia erilaisia digitaalisia teknologioita, joista keskityttiin tässä työssä tarkemmin tekoälyyn, esineiden internetiin ja big data -analytiikkaan työn rajaamiseksi. Työn tavoitteena oli selvittää, miten digitalisaatiota voidaan hyödyntää kiertotalouden paluuvirtojen vaiheissa.

Kiertotalouden paluuvirroista on aikaisemmin kerätty vain hyvin vähän tai ei ollenkaan tietoa. Näitä tietoja saadaan kerättyä työssä esiteltyjen teknologioiden avulla, mikä nousikin yhdeksi selkeimmäksi hyödyksi koko työssä. Tämä vaatii kuitenkin toimitusketjujen ja materiaalivirtojen läpinäkyvyyttä ja jäljitettävyyttä sekä yritysten välistä luottamusta.

Näiden asioiden ollessa kunnossa voidaan työssä esiteltyjä teknologioita hyödyntää kaikissa paluuvirtojen vaiheissa. Digitaalisia teknologioita voidaan hyödyntää monipuolisesti erilaisissa päätöksenteko-, suunnittelu- ja ongelmanratkaisutehtävissä. Sen lisäksi niiden avulla voidaan hoitaa erilaisia keräily- ja käsittelytehtäviä, jotka ovat ennen olleet ihmisen tekemiä.

Parhaan tuloksen saamiseksi yritysten kannattaa hyödyntää monipuolisesti erilaisia teknologioita, sillä ne tukevat toisiaan. Teknologioiden kehittyminen ja tietoisuus paluuvirroista auttavat varmasti tulevaisuudessa kiertotalouteen siirtymistä. Muutos vaatii kuitenkin lainsäädäntöä, erilaisia kannustimia sekä muutoksia kuluttajien ja yritysten asenteissa.

## LÄHTEET

Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 76–92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>

Ailisto, H., Heikkilä, E., Helaakoski, H., Neuvonen, A. & Seppälä, T. (2018). Tekoälyn kokonaiskuva ja osaamiskartoitus [WWW Dokumentti]. Selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 46/201. Valtioneuvoston kanslia. Saatavissa (viitattu 2.9.2023): <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/160925>

Alshammari, S. & Ball, P. (2016) 'Towards Reverse Logistics Archetypes to Stimulate Manufacturers' Usage of End of Life and End of Use Products', in *Smart Innovation, Systems and Technologies*. [Online]. 2016 Cham: Springer International Publishing. s. 179–187.

Aryal, A., Liao, Y., Nattuthurai, P., & Li, B. (2020). The emerging big data analytics and IoT in supply chain management: a systematic review. *Supply Chain Management*, 25(2), 141–156. <https://doi.org/10.1108/SCM-03-2018-0149>

Awan, U., Sroufe, R., & Shahbaz, M. (2021). Industry 4.0 and the circular economy: A literature review and recommendations for future research. *Business Strategy and the Environment*, 30(4), 2038–2060. <https://doi.org/10.1002/bse.2731>

Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahroun, Z. (2019). Internet of things and supply chain management: a literature review. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 4719–4742. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402140>

Bonciu, F. (2014) The European economy: From a linear to a circular economy. *Romanian journal of European affairs*. 14 (4), 78–91.

Burmaoglu, S., Ozdemir Gungor, D., Kirbac, A., & Saritas, O. (2022). Future research avenues at the nexus of circular economy and digitalization. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 72(8), 2247–2269. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-01-2021-0026>

Centobelli, P., Cerchione, R., Vecchio, P. D., Oropallo, E., & Secundo, G. (2022). Blockchain technology for bridging trust, traceability and transparency in circular supply chain. *Information & Management*, 59(7), 103508-. <https://doi.org/10.1016/j.im.2021.103508>

- Collin, J. ja Saarelainen, A. (2016) Teollinen internet. Available at: [https://melinda.kansalliskirjasto.fi/F/?func=direct&doc\\_number=009585451&local\\_base=fin01\\_opac](https://melinda.kansalliskirjasto.fi/F/?func=direct&doc_number=009585451&local_base=fin01_opac).
- Copeland, B. (2020). Artificial intelligence. Encyclopedia Britannica. Saatavissa (viitattu 6.11.2023): <https://www.britannica.com/technology/artificial-intelligence>
- Garrido-Hidalgo, C., Olivares, T., Ramirez, F. J., & Roda-Sanchez, L. (2019). An end-to-end Internet of Things solution for Reverse Supply Chain Management in Industry 4.0. *Computers in Industry*, 112, 103127-. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103127>
- de Melo, T.A.C., de Oliveira, M.A., de Sousa, S.R.G., Vieira, R.K. & Amaral, T.S. (2022). Circular Economy Public Policies: A Systematic Literature Review. *Procedia Computer Science*. Vol. 204, s. 652–662. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.08.079>
- Hennemann Hilario da Silva, T., & Sehnem, S. (2022). The circular economy and Industry 4.0: synergies and challenges. *Revista de Gestão*, 29(3), 300–313. <https://doi.org/10.1108/REGE-07-2021-0121>
- Huang, M.-H. & Rust, R. T. (2018). Artificial Intelligence in Service. *Journal of service research: JSR*. [Online] 21 (2), 155–172.
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408–425. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>
- Khan, S. A., Laalaoui, W., Hokal, F., Tareq, M., & Ahmad, L. (2022). Connecting reverse logistics with circular economy in the context of Industry 4.0. *Kybernetes*. <https://doi.org/10.1108/K-03-2022-0468>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*. [Online] 127221–232.
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological economics*. [Online] 14337–46.
- Krstić, M., Agnusdei, G. P., Miglietta, P. P., Tadić, S., & Roso, V. (2022). Applicability of Industry 4.0 Technologies in the Reverse Logistics: A Circular Economy Approach Based on COmprehensive Distance Based RAnking (COBRA) Method. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, 14(9), 5632-. <https://doi.org/10.3390/su14095632>
- Kristoffersen, E., Blomsma, F., Mikalef, P., & Li, J. (2020). The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. *Journal of Business Research*, 120, 241–261. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.07.044>



Mallick, P. K., Salling, K. B., Pigosso, D. C. A., & McAloone, T. C. (2023). Closing the loop: Establishing reverse logistics for a circular economy, a systematic review. *Journal of Environmental Management*, 328, 117017–. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117017>

Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation & Recycling*. Vol 153. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>

Potting, J., Hekkert, M.P., Worrell, E. & Hanemaaijer, A. (2017). Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague. Saatavissa (viitattu 1.10.2023): <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/358310>.

Russell, S. J. & Norvig, P. (2016) *Artificial intelligence: a modern approach*. 3rd edition. Boston: Pearson.

Sahu, A., Agrawal, S., & Kumar, G. (2022). Integrating Industry 4.0 and circular economy: a review. *Journal of Enterprise Information Management*, 35(3), 885–917. <https://doi.org/10.1108/JEIM-11-2020-0465>

Sarc, R., Curtis, A., Kandlbauer, L., Khodier, K., Lorber, K. E., & Pomberger, R. (2019). Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management – A review. *Waste Management (Elmsford)*, 95, 476–492. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.035>

Schlüter, M., Lickert, H., Schweitzer, K., Bilge, P., Briese, C., Dietrich, F., & Krüger, J. (2021). AI-enhanced Identification, Inspection and Sorting for Reverse Logistics in Remanufacturing. *Procedia CIRP*, 98, 300–305. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.107>

Schlüter, M., Schimanek, R., Koch, P., Briese, C., Chavan, V., Bilge, P., Dietrich, F., & Krüger, J. (2023). Green incremental learning - Energy efficient ramp-up for AI-enhanced part recognition in reverse logistics. *Procedia CIRP*, 116, 414–419. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.070>

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*. [Online] 33 (1), 9–25.

