



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **HENKILÖAUTOJEN ELINKAARI KIERTOTALOUDEN NÄKÖKULMASTA**

Taru Sarajärvi

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintyö

Toukokuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Henkilöautojen elinkaari kiertotalouden näkökulmasta

Taru Sarajärvi

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 35 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Valtteri Ahonen

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli perehtyä liikenteen kiertotalouteen ajoneuvojen elinkaaren kautta. Työssä pyrittiin selvittämään mitä on liikenteen kiertotalous ja miten se näkyy nykypäivänä liikenteessä ja ajoneuvojen elinkaaren eri vaiheissa. Lisäksi työssä pyrittiin selvittämään mitkä ovat liikenteen kiertotalouteen liittyvät keskeisimmät haasteet ja kuinka näihin ongelmiin tullaan tulevaisuudessa puuttumaan. Tämä kandidaatintyö suoritettiin kirjallisuuskatsauksena ja käytetty aineisto on pitkälti aihepiiriä tarkastelevaa kirjallisuutta.

Tätä kandidaatintyötä tehdessä huomattiin, että ajoneuvoteollisuuden ja kiertotalouden entistä tehokkaampi yhteiselo on ollut ja tulee olemaan myös tulevaisuudessa erittäin laaja ja monitieteellinen haaste. Täysin kiertotalousmallin mukainen ajoneuvo maksimoisi materiaalitehokkuuden, eikä tuottaisi ollenkaan jätettä tai päästöjä. Tämä on kuitenkin täysin kuvitteellinen tilanne, sillä ajoneuvot tuskin koskaan tulevat vastaamaan täysin kiertotalousmallia.

Kiertotalous näkyy osaltaan jokaisessa ajoneuvon elinkaaren vaiheessa. Ajoneuvon elinkaari on silti kiertotalouden näkökulmasta monimutkainen ja kehitystyötä vaativa prosessi, jonka jokaista vaihetta on kehitettävä tasavertaisesti. Usein vain yksittäistä elinkaaren vaihetta kehitettäessä sen energiatehokkuus ja negatiivisia ympäristövaikutuksia vähentävät toimenpiteet saattavat aiheuttaa ajoneuvon elinkaaren toisessa vaiheessa jopa suurempia haitallisia ympäristövaikutuksia.

Osaltaan vanhentunut lainsäädäntö ja erittäin nopeasti kehittyvä ajoneuvoteollisuus eivät enää tue toisiaan kiertotalouden näkökulmasta. Nykypäivän kierrätystekniikat ja prosessit ovat vaillinaisia modernien ajoneuvojen kiertotaloudessa, joka tulee näkymään

lähitulevaisuudessa haasteena mahdollisimman täydellistä kierrätysprosenttia tavoitellessa. Ajoneuvojen metalliosien ja hienoksi murskatun jäännöksen erotusprosessit vaativat kehitystyötä ja uusia innovaatioita pysyäkseen monipuolistuvan materiaalivalikoiman tasalla, sekä esimerkiksi nopeasti kehittyvä akkuteollisuus luo uusia haasteita. Ongelmien ratkaisu vaatii kiertotalouden peruseriaatteiden soveltamista liikenteeseen ja ajoneuvoteollisuuteen.

*Asiasanat: kiertotalous, elinkaari, liikenne, ajoneuvo*

# ABSTRACT

The life cycle of passenger cars from the circular economy point of view

Taru Sarajärvi

University of Oulu, Degree Programme of Environmental Engineering

Bachelor's thesis 2023, 35 pp.

Supervisor(s) at the university: Valteri Ahonen

The purpose of this bachelor's thesis was to learn more about the circular economy of passenger vehicles through the life cycle assessment. The work aimed to find out what the circular economy of light traffic is and how it can be seen in today's traffic and in the different stages of the vehicles' life cycle. In addition, the work sought to find out what are the most central challenges related to the circular economy of transport and how these problems will be noticed in the future. This bachelor's thesis was carried out as a literature review and the material used is largely literature examining the subject area.

While doing this bachelor's thesis, it was noticed that an even more efficient coexistence of the vehicle industry and the circular economy is needed to achieve the goals of circular economy. Reaching this goal will be a very broad and multidisciplinary challenge in the future. A vehicle that complies fully with the circular economy model maximizes material efficiency and produces no waste or emissions. However, this is completely an imaginary situation because vehicles probably never will fully correspond to the circular economy model.

From the point of view of the circular economy, the life cycle of a vehicle is a complex and development-intensive process in which each phase must be developed equally. Often, when developing only a single stage, its energy efficiency and measures that reduce negative environmental effects are transferred to another stage of the life cycle with even greater over all negative results.

Partly outdated legislation and rapidly developing vehicle industry no longer support each other from the point of view of circular economy. Today's recycling technologies and processes are lacking in the circular economy of modern vehicles, which will appear soon

as a challenge when aiming for the most complete recycling percentage. The separation processes of metal parts and finely crushed waste require development work and new innovations to keep up with the diversifying material selection, and for example the rapidly developing battery industry creates new challenges. Tackling these issues requires application of the fundamental principles of the circular economy to the transportation sector and vehicle industry.

*Keywords: circular economy, life cycle, transportation, vehicle*

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	6
2 KIERTOTALOUS .....	8
2.1 Yleiskuva kiertotaloudesta .....	8
2.2 Siirtymä lineaarisesta talousjärjestelmästä kiertotalouteen.....	10
3 HENKILÖAUTOJEN ELINKAARI .....	11
3.1 Materiaalit .....	11
3.2 Valmistus.....	13
3.3 Liikennekäyttö.....	14
3.4 Romutus ja kierrätys .....	14
3.5 Sähkö- ja sähköhybridiajoneuvot.....	16
4 LIIKENTEEN KIERTOTALOUS.....	19
4.1 Nykytilanne .....	19
4.2 Keskeisimmät haasteet .....	20
4.3 Tulevaisuuden muutokset ja ratkaisut.....	22
5 YHTEENVETO .....	25
LÄHDELUETTELO	

# 1 JOHDANTO

Vuonna 2021 liikenne oli yksi kolmesta eniten kasvihuonekaasupäästöjä aiheuttavasta sektorista. Euroopassa liikennesektori aiheutti 22,7 % kaikista kasvihuonekaasupäästöistä. (European Environment Agency 2021) Liikenteen kiertotaloudessa tavoitellaan ajoneuvon elinkaaren tuottamien ympäristövaikutusten vähentämistä. Tämän tarkoitus on lisätä esimerkiksi ajoneuvojen kestävyyttä ja parantaa niiden kierrätysmahdollisuuksia. Tähän pyritään korvaamalla uusiutumattomat materiaalit uusiutuvilla sekä käyttämällä pääasiassa uusiutuvaa energiaa tuotantoprosesseissa. (Esteva et al. 2020, s. 877)

Kiertotalous on kehittynyt perinteisestä lineaarisesta taloudesta. Linearisessa taloudessa raakamateriaalit muutetaan tuotteiksi ja niiden elinkaaren loppupäässä ne luokitellaan jätteeksi. Lineaarinen talous ei huomioi tuotteen ekologisuutta tai vaikutuksia ympäristöön. Kiertotaloudessa keskitytään lisäämään sekä raaka-aineiden että lopputuotteiden kierrätystä sekä estämään jätteen syntymistä. (Stahel 2016) Tässä tutkielmassa elinkaariajattelulla tarkoitetaan tuotteen aiheuttamia kokonaisvaltaisia ympäristövaikutuksia. Tämä sisältää suorat ympäristövaikutukset valmistusprosessista ja epäsuorat ympäristövaikutukset, jotka ovat peräisin tuotteen elinkaaren eri vaiheista. Elinkaariajattelu on tapa käsitellä ympäristöasioita ja se on muokannut ympäristövaikutusten tutkimustapaa, näin ollen se vaikuttaa kiertotalouteenkin. (Suomen ympäristökeskus 2022a)

Kiertotaloutta on tutkittu jo paljon, mutta sen kehittäminen vaatii edelleen paljon tutkimusta ja innovaatiota. Työtä on tehtävä niin yhteiskunnallisella tasolla, kuin teknillisellä ja kaupallisellakin tasolla. (Stahel 2016) Liikenteen aiheuttamia ympäristövaikutuksia on tutkittu paljon ja kiertotalouden periaatteita on alettu soveltamaan niiden torjumiseksi.

Esimerkiksi Ellen MacArthur Foundation, vuonna 2010 perustettu säätiö, on tehnyt paljon tutkimustyötä kiertotalouteen liittyen ja pyrkii nopeuttamaan yhteiskunnan siirtymistä kohti kiertotaloutta, pois lineaarisen talousjärjestelmän parista (Ellen MacArthur Foundation 2013a, s. 1–6). Liikenteen kiertotalous on vain kiertotalouden periaatteen soveltamista liikenteeseen ja kulkuneuvoihin. Teoreettisesti ajateltuna

kiertotalouden ideaaliauto on maksimoinut materiaalien tehokkaan käytön eikä aiheuta jätettä tai päästöjä missään vaiheessa elinkaarta. (World Economic Forum 2020, s. 5)

Tutkielmassa käsitellään liikenteen kiertotaloutta henkilöautojen elinkaaren näkökulmasta. Kiertotaloutta käydään läpi yleisesti ja tutkitaan kuinka se vaikuttaa henkilöautojen elinkaareen sen eri vaiheissa. Tutkielman lopussa käsitellään liikenteen kiertotaloutta hieman laajemmin, sen keskeisimpiä haasteita sekä tulevaisuuden näkymiä. Seuraavat tutkimuskysymykset on asetettu tukemaan sekä selittämään työn tavoitteita.

1. Mitä on liikenteen kiertotalous?
2. Kuinka kiertotalous näkyy nykypäivänä henkilöautojen eri elinkaarten vaiheissa?
3. Mitkä ovat liikenteen kiertotalouteen liittyvät keskeisimmät haasteet ja kuinka niihin mahdollisesti tullaan tulevaisuudessa puuttumaan?

Maailma on eräänlaisessa siirtymävaiheessa, joka määrittää yhteiskunnan tulevaisuuden. Kaikki luonnonvarat eivät ole uusiutuvia ja ne loppuvat, jos nykyisiä toiminta tapoja ei muuteta. Luonnonvarojen loppuminen uhkaa ihmiskuntaa, mutta nykyinen toiminta uhkaa myös elinympäristöä. (Seiffert & Loch 2005, s. 1197–1202) Liikennesektori aiheuttaa huomattavaa haittaa ympäristölle tuottamalla kasvihuonepäästöjä ja käyttämällä luonnonvaroja. Kiertotalouden konseptia soveltamalla voidaan vastata liikennesektorin aiheuttamiin haittoihin. (De Abreu et al. 2022, s. 1) Suomessa tieliikenteen tuottamista hiilidioksidipäästöistä noin 53 % on henkilöautoliikenteen tuottamia (Traficom 2022), minkä takia tutkielmassa käsitellään nimenomaan henkilöautoja ja niiden elinkaarta sekä kiertotaloutta.



## 2 KIERTOTALOUS

### 2.1 Yleiskuva kiertotaloudesta

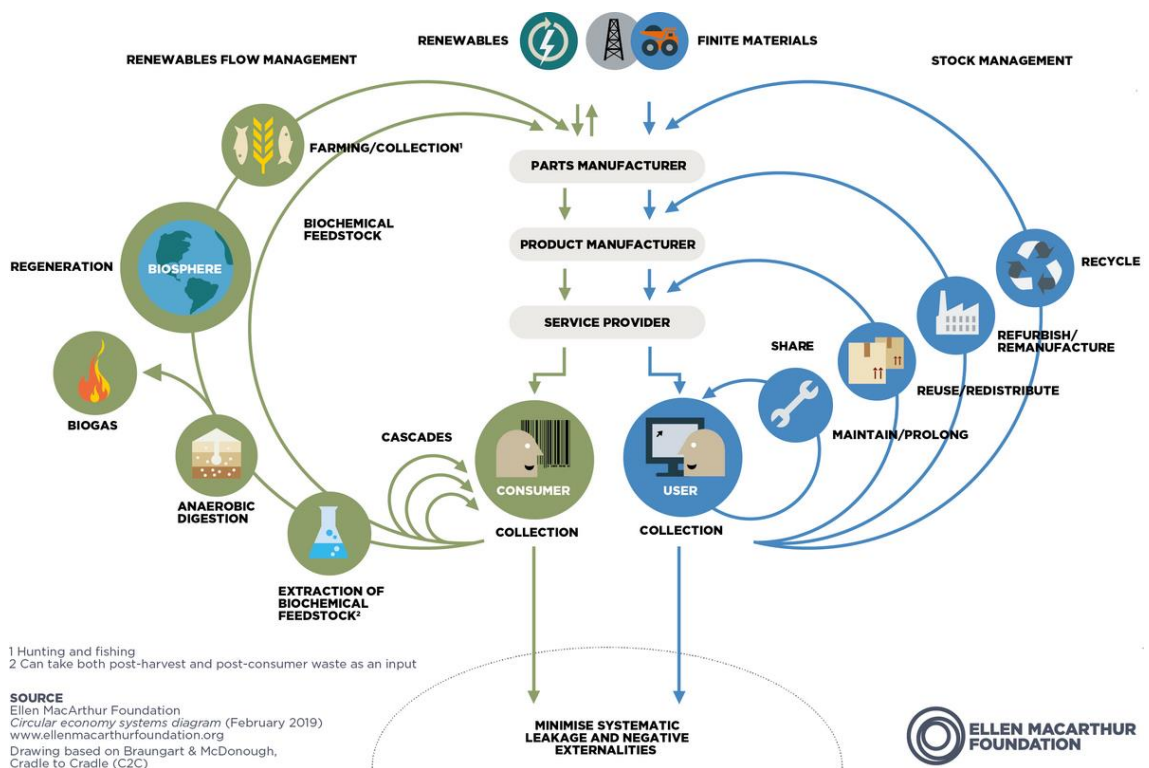
Ellen MacArthur Foundation säätiön määritelmän mukaan kiertotalous on teollista taloutta, jossa tuotteet tarkoituksen mukaisesti suunnitellaan kierrätettäväksi. Tuote suunnitellaan niin, että se on helppo uudelleen käyttää, kunnostaa, kierrättää tai purkaa takaisin erillisiksi materiaaleiksi, joita voidaan hyödyntää edelleen. (Ellen MacArthur Foundation 2013a, s. 7) Kiertotalousmallilla pyritään vaikuttamaan luontokatoa, luonnonvaroja ja ilmastonmuutosta aiheuttaviin tekijöihin (Forslund 2021).

Kiertotalousmallilla pyritään muuttamaan taloudellinen toiminta kiertäväksi suoraviivaisen sijaan. Kiertotalousmalli ei aiheuta elintason laskua tai vähennä taloudellista toimintaa. (Sitra 2014, s. 5) Kiertotalouden päätavoitteita ovat luonnonvarojen kuluttamisen vähentäminen, kestävä hyödyntäminen sekä riittävyyden turvaaminen. Muita tavoitteita ovat jätteiden sekä päästöjen vähentäminen ja luonnonpääoman säilyttäminen. Kiertotalousmallilla pyritään myös lisäämään uusia työpaikkoja ja maksimoimaan tuottavuus. (Potting et al. 2017, s. 14)

Ellen MacArthur Foundation on luonut viisi peruseriaatetta, joihin kiertotalousmalli perustuu (Ellen MacArthur Foundation 2013a, s. 22–23). Periaatteet ovat: poista jäte jo suunnittelussa, pidennä elinkaaria muunneltavuuden kautta, nojaa uusiutuvaan energiaan, ajattele systeemejä ja jäte on ruokaa (Ellen MacArthur Foundation 2013a, s. 22–23, Sitra 2014, s. 4 mukaan). Ensimmäinen periaatteista kuvaa sitä, kuinka jo tuotteen suunnittelussa tulisi eliminoida mahdollinen jätteen synty. Tuotteet ja palvelut tulee siis suunnitella niin, että niitä voidaan uudelleen käyttää tai ne voidaan kierrättää uusiomateriaaleiksi. Toinen periaate kehottaa pidentämään tuotteen tai palvelun elinikää muunneltavuudella. Tuotteen modulaarisuus, monipuolisuus ja mukautuvuus helpottavat tuotteen uudelleen käyttöä ja kierrätystä. Kolmas periaate painottaa, että järjestelmien ja tuotantoprosessien tulisi pyrkiä toimimaan pääosin uusiutuvalla energialla. Neljäs periaate perustuu systemaattiseen ajatusmalliin. On tärkeää ymmärtää kuinka systeemin eri osat vaikuttavat toisiinsa sekä kokonaisuuteen, jolloin on helpompi havaita kaikki mahdolliset vaikutukset. Viimeisessä periaatteessa tarkoitetaan biologisten

ravintoaineiden kierrättämistä kaskadiperiaatteen mukaisesti. (Ellen MacArthur Foundation 2013a, s. 22–23)

Kiertotalousmallilla pyritään aktiivisesti säilyttämään tuotteen tai palvelun arvo ennallaan käytöstä riippumatta (Sitra 2014, s. 4). Kaskadiperiaatteella tarkoitetaan raaka-aineiden tehokasta hyödyntämistä, jossa raaka-aineita kierrätetään mahdollisimman pitkään ennen niiden muuttamista energiaksi (Sitra 2023). Ellen MacArthur Foundation on luonut perhosdiagrammin (Kuva 1), joka kuvaa materiaalin jatkuvaa kiertoa kiertotalousmallissa. Tekninen sykli ja biologinen sykli ovat perhosdiagrammin kaksi pääkiertoa. (Ellen MacArthur Foundation 2023a) Teknisessä syklissä raaka-aineet, materiaalit ja tuotteet pyritään pitämään kierrossa esimerkiksi kierrätyksen, uudelleen käytön, korjauksen ja kunnostuksen avulla. Biologisessa syklissä pyritään optimaaliseen luonnonvarojen käyttöön ja biohajoavien materiaalien kierrättämiseen kaskadiperiaatteen mukaisesti. Biologisessa syklissä viimeinen vaihe on palauttaa biohajoavien materiaalien ravintoaineet takaisin maaperään elävöittämään luontoa. (Rood & Kishna 2019, s. 16–18)



Kuva 1. Ellen MacArthur Foundationin luoma perhosdiagrammi (Ellen MacArthur Foundation 2023a).

## 2.2 Siirtymä lineaarisesta talousjärjestelmästä kiertotalouteen

Talousjärjestelmä oli lineaarinen ennen kiertotalouden keksimistä. Pohjan lineaariselle talousjärjestelmälle loi maailman bruttokansantuotteen kaksikymmenkertainen kasvu vuosien 1900–2000 aikana, joka mahdollisti uusien tuotantomenetelmien ja maailmanlaajuisien toimitusketjujen kehittymisen. (Ellen MacArthur Foundation 2013b, s. 7) Huoli ympäristötilasta alkoi kasvaa vasta 1960-luvulla, mutta voidaan sanoa, että Peter Lund Simmonds esitteli idean kiertotalouden esiasteesta jo vuonna 1862. 1960-luvun jälkeen kiertotaloutta on tutkittu paljon ja siihen on viitattu useammissa teoksissa ja tutkimuksissa. Gunter Paulin teos vuodelta 2010 on yleisesti viitattu olevan kiertotalouden pääperusta. Viimeistään vuonna 2013 Ellen MacArthur Foundation toi kiertotalouden käsitteen yleiseen tietoon. (Tuladhar et al. 2022, s. 90–93)

Lineaarinen talous on kulutukseen perustuva järjestelmä, jossa tuotteet valmistetaan uusista raaka-aineista, jonka jälkeen ne myydään kuluttajalle, joka hävittää tuotteen jätteeksi sen tullessa tarpeettomaksi (Ellen MacArthur Foundation 2013a, s. 6–14). Jopa puolet maailman kasvihuonekaasujen kokonaispäästöistä aiheutuu luonnonvarojen talteenotosta ja prosessoinnista. Luonnonvarojen ylikuluttaminen aiheuttaa myös 90 % luonnon monimuotoisuuden vähenemisestä. (Oberle et al. 2019, s. 8) Kiertotalousmallia tarvitaan, koska lineaarinen talousjärjestelmä aiheuttaa maapallon ekologisen kantokyvyn romahtamisen, johtaa maapallon globaaliin kestävyyskriisiin ja on uhka maailmanlaajuiselle talouskasvulle sekä ympäristön kestävyydelle. (Karttunen 2020; Sitra 2014, s. 3; Ellen MacArthur Foundation 2013a, s. 14–20).

Kiertotalousaste on yksi kiertotalouden indikaattoreista ja se kuvaa kierrätetyn materiaalin ja kaiken käytetyn materiaalin suhdetta (Tilastokeskus 2023). Vuonna 2019 globaali kiertotalousaste oli ainoastaan 9,0 % ja vuonna 2023 se on tippunut 7,2 %:iin (Circle Economy 2019, s. 10; CGRI 2023). Joten edelleen vain pieni osa käytetystä materiaalista on kierrätettyä (Tilastokeskus 2023).

### 3 HENKILÖAUTOJEN ELINKAARI

Elinkaari kuvaa tuotteen eliniän vaiheita. Ajoneuvojen elinkaaren neljä päävaihetta ovat materiaalien tuotanto, valmistus, liikennekäyttö ja romutus. Materiaalien tuotanto sisältää niiden louhinnan, hankinnan, käsittelyn ja valmistuksen sellaiseen muotoon, että niitä voidaan hyödyntää ajoneuvojen valmistuksessa. Ajoneuvojen valmistus on seuraava elinkaaren vaihe, missä ajoneuvon osat valmistetaan ja ajoneuvo kootaan. Elinkaaren kolmas vaihe sisältää ajoneuvon liikennekäytön aikaiset toimenpiteet kuten ajon, ylläpidon ja huollon. Ajoneuvojen elinkaari loppuu romuautojen käsittelyyn eli romutukseen ja kierrätykseen. Näistä materiaalien tuotanto ja liikennekäyttö vaikuttavat eniten ajoneuvon ympäristökestävyyteen. (Keoleian & Sullivan 2012, s. 365)

Sähköautojen ja perinteisten polttomoottoriautojen kori, alustarakenteet, verhoilumateriaalit tai renkaat eivät eroa toisistaan. Suurin ero on moottoreissa ja voimansiirtojärjestelmissä. Sähköautoissa ajamiseen tarvittavan tehon tuottaa sähkömoottori sekä akusto, kun taas polttomoottoriautoissa on nimensä mukaisesti polttomoottori ja siihen kuuluvat voimansiirtojärjestelmät. Ajoneuvojen liikennekäyttö aiheuttaa suurimman osan kasvihuonekaasupäästöistä. Polttomoottoriautot saastuttavat liikennekäytössä enemmän kuin sähköautot, mutta sähköautojen valmistus on haitallisempaa ympäristölle kuin polttomoottoriautojen valmistus, sillä ne vaativat enemmän harvinaisia maametalleja ja tuotanto on erittäin energiaintensiivistä. (Keoleian & Sullivan 2012, s. 367; Hawkins et al. 2012 s. 55–56)

#### 3.1 Materiaalit

Ajoneuvossa käytetyt materiaalit ja raaka-aineet määrittelevät hyvin pitkälle ajoneuvon ympäristökestävyyden (Keoleian & Sullivan 2012, s. 365). Ajoneuvovalmistajilla on suurin päätäntävalta materiaalien sekä raaka-aineiden suhteen. Se mitä materiaaleja ajoneuvon valmistaja valitsee käyttää ja mistä ne ovat peräisin vaikuttaa ajoneuvon elinkaaren kestoon ja ympäristövaikutuksiin. (Esteva et al. 2020, s. 880) Materiaalien valitseminen ei ole yksinkertainen prosessi. Siihen vaikuttavat muun muassa materiaalien fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet, turvallisuus, rakenne, kestävyys, ulkomuoto, materiaalien kustannukset sekä kierrätettävyys. (Keoleian & Sullivan 2012, s. 366)

Materiaalit usein täytyy itsessään käsitellä ja valmistaa eri raaka-aineista, ennen kuin niitä voidaan hyödyntää ajoneuvon tai sen komponenttien valmistuksessa. Valmistusprosessi sisältää louhinnan, jalostuksen, kuljetuksen ja raaka-aineiden muun käsittelyn. (Esteve et al. 2020, s. 880) Jotta valmistusprosessit olisivat mahdollisimman kiertotalouden mukaisia, täytyy niiden energia- ja hiili-intensiteetti sekä materiaalitehokkuus ottaa huomioon (Keoleian & Sullivan 2012, s. 365).

Ajoneuvoteollisuus kuluttaa maailmanlaajuisesti suuren määrän raaka-aineita (Keoleian & Sullivan 2012, s. 366). Neljä eniten käytettyä materiaalia ajoneuvon valmistuksessa ovat teräs, alumiini, erilaiset muovit ja kumi. Terästä ajoneuvosta on noin 47 %, alumiinia noin 13 %, muoveja noin 13 % ja kumia noin 4 %. (Sato & Nakata 2020, s. 3) Alumiinin osuus kasvaa jatkuvasti, sillä sitä on helppo muovata ja se on kevyttä sekä kestävä. Lisäksi muovien osuus on nousussa niiden monikäyttöisyyden, kestävyys ja keveyden takia. Renkaiden vuoksi kumi on paljon käytetty materiaali ajoneuvoteollisuudessa. (Fentahun & Savaş 2018, s. 41–49)

Ajoneuvojen valmistuksessa käytetystä teräksestä vain noin yksi neljäsosa on kierrätettyä terästä, kun kolme neljäsosaa on primääristerästä. Primääristerästä ei voi kutsua kestäväksi valinnaksi ympäristön kannalta. Teräs valmistetaan raudasta koksilla pelkistämällä ja emäshappimellotuksella ja se aiheuttaa huomattavan määrän kasvihuonekaasupäästöjä sekä kuonaa, lietettä ja pölyä. Kierrätetyn teräksen prosessointi aiheuttaa noin 54 % vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä. (Esteve et al. 2020, s. 881)

Alumiinin käyttö ajoneuvoissa lisää ympäristöystävällisyyttä, mutta ilman alumiinin asianmukaista kierrätystä ja uudelleen käyttöä ei sen täydellistä potentiaalia voida hyödyntää. Alumiinin tuottaminen on melko energiantensiivinen prosessi ja yli 60 % alumiinin valmistusprosessin ympäristöjalanjäljestä aiheutuu prosessissa käytetystä energiasta. Kierrätetyn alumiinin prosessointi käyttää ainoastaan murto-osan siitä energiasta, mitä vaaditaan neitseellisen alumiinin tuotantoon. (The Aluminum Association 2013, s. 101–102)

Euroopassa autoteollisuus muodostaa lähes 10 % muovin kokonaiskysynnästä (Plastics Europe 2020, s. 24). Muoveja käytetään esimerkiksi autojen puskureissa, ovissa ja kojelautoissa (Van Bruggen et al. 2022, s. 2). Muoveja valmistetaan raakaöljystä, maakaasusta, kivihiilestä tai selluloosasta polymeroinnilla tai polykondensaatiolla

(Plastics Europe 2023). Muovintuotanto vaati jopa 6 % maailman öljynkulutuksesta vuonna 2014. Muovituotannon kasvaessa myös öljynkulutus kasvaa. Tätä voidaan tasapainottaa lisäämällä kierrätysmuovien käyttöä ja vaihtamalla energianlähteet uusiutuviksi. (Venkatachalam et al. 2022, s. 2)

### 3.2 Valmistus

Tyypillinen ajoneuvo koostuu noin 20 000 eri osasta. Ajoneuvon valmistus eli kokoonpano on materiaalien tuotannon, ajoneuvon liikennekäytön ja romutuksen ohella yksi tärkeimmistä elinkaaren vaiheista. Eniten ajoneuvon ympäristökestävyyteen vaikuttaa raaka-aineiden ja materiaalien tuotanto sekä ajoneuvon liikennekäyttö. Ajoneuvon suunnittelu kuitenkin yhdistää nämä kaksi vaihetta vahvasti ajoneuvon valmistusprosessiin. (Keoleian & Sullivan 2012, s. 365) Toisin sanoen valmistusprosessissa ajoneuvojen tuotesuunnittelulla, valmistusprosessin valinnalla ja valmistukseen liittyvällä logistiikan hallinnalla on suuri vaikutus ajoneuvon elinkaareen ja ympäristövaikutuksiin (Esteva et al. 2020, s. 880).

Ajoneuvojen valmistusprosessissa suurimmat negatiiviset ympäristövaikutukset aiheutuvat kiinteän jätteen syntymisestä, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöistä sekä suuresta veden- ja energiankulutuksesta (Nunes & Bennett 2010, s. 404). Prosessien uudistamisella pyritään vähentämään negatiivisia ympäristövaikutuksia. Yksi esimerkki prosessin uudistamisesta on polttoaineen vaihto puhtaammin palavaan polttoaineeseen ja uusiutuviin energianlähteisiin. Lisäksi valmistusprosessia voidaan optimoida energiatehokkaammaksi, tuottamaan vähemmän jätettä ja käyttämään vähemmän vettä. (Nunes & Bennett 2010, Esteva et al. 2020, s. 882 mukaan) Erityisen haitallisia VOC-päästöjä ja negatiivisia ympäristövaikutuksia aiheuttaa ajoneuvojen maalaus sekä liuottimien käyttö. Näitä ympäristövaikutuksia pyritään pienentämään käyttämällä vesipohjaisia maaleja ja liuottimia. (Nunes & Bennett 2010, s. 407)

Vaikka nykyisellään vain pieni osa ajoneuvon elinkaaren tuottamasta energia- ja hiili-intensiteeteistä aiheutuu valmistusprosessista, ajoneuvojen polttoainetaloudellisuuden parantuessa ajoneuvojen valmistusprosessin odotetaan aiheuttavan suhteellisesti enemmän negatiivisia ympäristövaikutuksia. Valmistusprosessi vaikuttaa epäsuorasti valmistuksessa käytettäviin materiaaleihin ja niiden ympäristökestävyyteen. Materiaaleja

tulee hyödyntää ajoneuvojen valmistusvaiheessa tehokkaasti ja niin, että jäljelle jäävän romun ja jätteen määrä olisi minimaalinen. (Keoleian & Sullivan 2012, s. 369–371)

### **3.3 Liikennekäyttö**

Ajoneuvon elinkaaren kolmas päävaihe on liikennekäyttö. Se voidaan jakaa kahteen osaan: ajoneuvon käyttö ja ajoneuvon ylläpito, mikä sisältää kunnossapidon, tankkauksen ja auton hoidon. (Esteva et al. 2020, s. 884) Ajoneuvon käyttö vaatii lähes satakertaisen määrän energiaa ja aiheuttaa satakertaisen määrän päästöjä verrattuna ajoneuvon huoltoon ja korjaukseen. Lisäksi ajoneuvon käyttö aiheuttaa 84–88 % kokoenergiankulutuksesta ajoneuvon elinkaaren aikana. (Keoleian & Sullivan 2012, s. 369) Ajoneuvon aiheuttamat päästöt voidaan laskea määrittämällä ajatut kilometrit, moottorin aiheuttamat päästöt ja polttoaineen tai sähkön tuotannon ja kuljetuksen aiheuttamat ympäristövaikutukset (Volvo 2021, s. 21).

Polttoainetaloudellisuus on yksi määrittävimmistä tekijöistä ajoneuvojen liikennekäytön kiertotaloudessa (Esteva et al. 2020, s. 883). Ajoneuvot saastuttavat, koska ne kuluttavat suuren määrän fossiilisia polttoaineita liikennekäytössä. Saastuttavia aineita autojen pakokaasuissa ovat muun muassa hiilidioksidi, hiilimonoksidi, rikkioksidi, typpioksidi ja pienhiukkaset (Nunes & Bennett 2010, s. 404). Maailmanlaajuisesti on monia standardeja, jotka varmistavat, että ajoneuvojen polttoainetaloudellisuus paranee jatkuvasti. On kuitenkin kolme pääkeinoa, joilla polttoainetaloudellisuutta voidaan tehostaa. Nämä keinot ovat: kevyiden materiaalien käytön lisääminen valmistuksessa sekä energiatehokkaampien voimansiirtojen ja aerodynaamisempien ajoneuvojen kehittäminen. (Esteva et al. 2020, s. 883)

### **3.4 Romutus ja kierrätys**

Romuautojen kierrätys on maailmanlaajuisesti hyvin samanlaista, vaikka lainsäädännöt eroavatkin toisistaan. Romuautojen kierrätys alkaa autojen purkamisella. Ensimmäiseksi poistetaan haitallisia aineita sisältävät komponentit. Haitallisiksi aineiksi luokitellaan lyijyakut sisältöineen, erilaiset öljyt ja jäähdytysnesteet sekä ilmastointilaitteiden kylmäaineet. Seuraavaksi romuautoista kerätään arvokkaat materiaalit, joita voidaan helposti hyödyntää uudelleen. Näitä ovat esimerkiksi ajoneuvojen moottori ja muut

voimansiirron komponentit, renkaat vanteineen, sekä puskurit ja muut korin muoviosat. Ajoneuvon purkamisen, eli haitallisten komponenttien ja arvokkaiden materiaalien poistamisen, jälkeen jäljellä on enää ajoneuvon kori. Korin osuus on noin 55–70 % ajoneuvon alkuperäisestä painosta ja se päättyy seuraavaksi murskaajaan. Murskauksen jälkeen murskatut materiaalit erotetaan toisistaan. Esimerkiksi metallit erotetaan ei rautametalleista magneetin avulla. (Sakai et al. 2014, s. 4) Mikäli romuajoneuvoja ei käsitellä asianmukaisesti, ne voivat saastuttaa maaperän sekä pohjavesikerrokset (Nunes & Bennett 2010, s. 404).

Romuautojen kierrätys sisältää useita resurssien palautusprosesseja. Palautusprosesseja ovat esimerkiksi uusiokäyttö ja uudelleenvalmistus (Keoleian & Sullivan 2012, s. 371). Vuonna 2020 EU:ssa romuautojen kierrätysaste oli noin 90 %, mutta erityisesti muovien sekä eri metalliseosten erottaminen on haasteellista (Eurostat 2023; Keoleian & Sullivan 2012, s. 365). Murskauksen ja metallien erotuksen jälkeen ajoneuvoista jäljelle jää noin 15 % kierrättämätöntä materiaalia (Vermeulen et al. 2011, s. 13). Usein kierrättämätön materiaali päätyy kaatopaikalle (Jody et al. 2010, s. 3).

Alumiinin kokonaiskierrätysprosentti on yli 90 (Kelly & Apelian 2017, s. 6). Alumiinin kierrätys on erittäin hyödyllistä, koska kierrätysprosessi ei muuta metallin ominaisuuksia huolimatta siitä kuinka monta kertaa sitä kierrätetään. Alumiinin kierrätys vähentää huomattavasti ajoneuvon elinkaaren aiheuttamia ympäristövaikutuksia. (The Aluminum Association 2013, s. 109) Samat asiat pätevät teräksen kierrätykseen, vaikka ajoneuvojen valmistuksessa suositaan primääriterästä kierrätysteräksen sijasta. Romuajoneuvoista saatavan teräksen kierrätysaste on melko korkea, koska sitä voidaan hyödyntää lähes mihin tahansa. Teräksen kierrätyksessä teräs sulatetaan ja romuautosta saatua terästä voidaan sulatuksen jälkeen hyödyntää esimerkiksi rakennusmateriaalina. (Walker et al. 2018, s. 4) Muovit voidaan erottaa romuajoneuvosta ennen purkamista tai murskauksen jälkeisistä jäännöksistä. Muovien uudelleenkäyttö ja kierrätys on huomattavasti helpompaa, jos erottelu tapahtuu ennen purkamista (Ravina et al. 2023, s. 2). Ajoneuvoissa käytetään yli 35 erilaista polymeeriä, joka hankaloittaa huomattavasti erottelua, talteenottoa ja uudelleenkäyttöä (Van Bruggen et al. 2022, s. 2). Lisäksi muovit saattavat sisältää vaarallisia aineita, joka osaltaan vaikeuttaa kiertotalousmallin mukaista kierrätystä (Wagner & Schlummer 2020, s. 2).



Metallien kuten alumiinin ja teräksen kierrätys on kannattavaa taloudellisesti, mutta ajoneuvoissa olevien muoviosien kierrättäminen ei niinkään. Tämä luo materiaaliteollisuudelle tarpeen kehittää uutta ja ottaa talteen ajoneuvoista myös toissijaiset materiaalit ja siten vähentää neitseellisten materiaalien tarvetta. (Keoleian & Sullivan 2012, s. 371–372) Kevyiden materiaalien yleistyessä, myös kierrätystekniikan tulisi parantua, jotta kiertotalousmallin mukaiset energia- ja kustannussäästöt kasvaisivat (Esteva et al. 2020, s. 885).

Kierrättämätön materiaali eli jäännös koostuu muovista, kumista, tekstiileistä, lasista ja ei-rautametalleista. Jäännös sisältää myös haitallisia raskasmetalleja jauhemaisessa muodossa. (Margarido & Nogueira 2011) Lisäksi jäännöksessä on usein merkittäviä pitoisuuksia klooria. (Vermeulen et al. 2011, s. 14) Osa jäännöksen sisältämistä materiaaleista ovat kierrätyskelpoisia kuten muovit, kumi, lasi ja metallit (Jody et al. 2010, s. 50). Ne ovat kuitenkin hankala erottaa toisistaan jäännöksen heterogeenisyyden vuoksi. Erilaisia jäännöksen käsittelytekniikoita on tutkittu paljon. Mahdollisia erottelutekniikoita ovat muun muassa ilmaluokitin, magneettinen erottelu, pyörrevirtaerotin ja rumpuerotin. (Vermeulen et al. 2011, s. 15) Vaikka kierrättämättömän materiaalin osuus romuautoista on melko pieni, täytyy sen aiheuttamat ympäristövaikutukset ottaa tärkeänä asiana huomioon. Kierrätyksen ja uudelleenkäytön lisääminen parantaa kiertotaloutta ja vähentää ympäristövaikutuksia. (Esteva et al. 2020, s. 884)

Joissakin maissa kuten Japanissa murskauksen jälkeen jäännöksiä pyritään vielä hyödyntämään energian tuotannossa (Sakai et al. 2014, s. 4). Jäännökset palavat ilman lisäpolttoainetta, koska niiden lämpöarvo on korkea (Jody et al. 2010, s. 62). Jäännöksen käyttö polttoaineena saattaa olla kuitenkin ongelmallista niiden sisältämien vaarallisten aineiden takia, minkä takia on tärkeää pystyä erottamaan saastuttavat aineet jäännöksestä (Vermeulen et al. 2011, s. 16). Jäännöksiä voidaan hyödyntää myös esimerkiksi tien päällystyksessä (Esteva et al. 2020, s. 885).

### **3.5 Sähkö- ja sähköhybridiajoneuvot**

Sähkö- ja sähköhybridiajoneuvot yleistyvät jatkuvasti. Sähköautot toimivat yksinomaan sähköisellä voimansiirrolla, kun taas hybridisähköajoneuvoissa ja ladattavissa

hybridisähköajoneuvoissa käytetään polttomoottorin ja sähkömoottorin yhdistelmää. (Esteva et al. 2020, s. 883) Yleistymisen vuoksi on ehdottoman tärkeää, että sähköisten ajoneuvojen akuille kehitetään taloudellinen ja ympäristöystävällinen kierrätysstrategia (Ramoni & Zhang 2013, s. 881).

Kiertotalousmallin kannalta on tärkeää tutkia sähkö- ja sähköhybridiajoneuvojen polttoainekiertoa ja sen aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä. Sähköhybridiajoneuvoilla on sähkömoottorin ansiosta parempi polttoainetehokkuus kuin perinteisellä polttomoottoriajoneuvolla, joten ne tuottavat oikein käytettynä merkittävästi vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä. Täyssähköautot eivät tuota ollenkaan primääripäästöjä sähkömoottorin ansiosta. Energiantuotanto vaikuttaa kuitenkin olennaisesti sähköautojen kokonaispäästöihin, sillä energiantuotantolaitoksista aiheutuu sekundääripäästöjä, sähkön tuotantotavasta riippumatta. (Esteva et al. 2020, s. 883) Tämän vuoksi on tärkeää huomioida sähkön tuotantotapa, kun lasketaan koko elinkaaren hiilijalanjälkeä (Volvo 2021, s. 32).

Litiumioniakut ovat kaikista yleisin akkutyypin sähköisissä ajoneuvoissa (Power Battery 2023). Heikentynyt akku poistetaan autosta, kun sen kapasiteetti on vähentynyt noin 20 % alkuperäisestä kapasiteetista. Tällöin akun teho ei riitä takaamaan luvattua toimintasädetä. (Wolfs 2010, s. 1) Akkujen kierrätys ohjataan lainsäädännön ja metallien arvon avulla. Euroopan parlamentin ja neuvoston antama direktiivi 2006/66/EC määrää kierrätystavoitteet akuille, jotta negatiiviset ympäristövaikutukset voidaan minimoida. 45 % käytetyistä litiumakuista tulisi kerätä käytön jälkeen ja vähintään 50 % niiden painosta tulisi kierrättää tai käyttää uudelleen. (Thomas et al. 2018, s. 38) EU:n antama direktiivi 2000/53/EC velvoittaa ajoneuvovalmistajia olemaan vastuussa tuotteistaan elinkaaren lopussa. Akut ovat sähköisessä ajoneuvossa yksi pääkomponenteista ja ajoneuvovalmistajat joutuvat miettimään kuinka niiden kierrätys ja uudelleenkäyttö hoidetaan. (Ramoni & Zhang 2013, s. 882)

Litiumioniakut koostuvat neljästä pääkomponentista, jotka ovat positiivinen ja negatiivinen elektrodi, elektrolyytti ja erotin. Negatiivinen elektrodi eli katodi määrää akun suorituskyvyn. Litiumioniakkujen katodien rakenne ja sen myötä ominaisuudet vaihtelevat. Yleisiä alkuaineita katodissa ovat muun muassa litium, koboltti, alumiini, mangaani ja nikkeli. (Or et al. 2019, s. 7–8) Näiden alkuaineiden valmistus on erittäin

energiaintensiivistä ja aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä. Tämän vuoksi litiumakkujen kierrättäminen edistää kiertotaloutta ja vähentää ympäristövaikutuksia. (Winslow et al. 2018, Or et al. 2019, s. 9 mukaan) Litiumioniakuille on kaksi päämenetelmää kierrätykseen ja materiaalien palautukseen. Pyrometallurgiset menetelmät käyttävät korkeita lämpötiloja kemiallisen muutoksen aikaansaamiseen ja hydrometallurgiset menetelmät käyttävät vesitekniikkaa samaan tarkoitukseen. (Winslow et al. 2018, s. 273)

Akkujen lisäksi sähköisten ajoneuvojen sähkömoottorit vaativat harvinaisia maametalleja. Sähköisten ajoneuvojen yleistyessä, myös tarve harvinaisille maametalleille lisääntyy, joka edelleen lisää niiden louhintaa. Lisääntynyt louhinta taas aiheuttaa osaltaan huomattavan määrän negatiivisia ympäristövaikutuksia. (Langkau & Erdmann 2021, s. 1034–1035)

## 4 LIIKENTEEN KIERTOTALOUS

### 4.1 Nykytilanne

Jos ajoneuvot olisivat täysin kiertotalousmallin mukaisia, ne maksimoisivat materiaalitehokkuuden, eivätkä tuottaisi ollenkaan jätettä tai päästöjä missään elinkaaren vaiheessa. Tämä on täysin kuvitteellinen tilanne, sillä ajoneuvot tuskin koskaan vastaavat täysin kiertotalousmallia. Ajoneuvoteollisuus on siirtymävaiheessa, sillä ilmastokriisi ja maailman taloustilanne pakottavat siirtymään lineaarisesta taloudesta kiertotalouteen. Tämä ohjaa ajoneuvovalmistajia kehittämään uusia ja ympäristöystävällisempiä teknologioita ympäristön kestävyuden parantamiseksi. (World Economic Forum 2020, s. 5)

Ajoneuvojen elinkaaren aikana tarvitaan paljon eri materiaaleja ja elinkaarta voi kutsua melko energiaintensiiviseksi. Ajoneuvot ovat edelleen erittäin riippuvaisia uusiutumattomista luonnonvaroista sekä energiasta. (Keoleian & Sullivan 2012, s. 372) Ajoneuvojen materiaaliresurssit ovat kuitenkin melko helposti kierrätettävissä ja uusiokäytettävissä. Lisäksi kiertotalousmallin mukaisesti rakennetut autot ovat kestäviä ja niitä voidaan korjata. (World Economic Forum 2020, s. 7) Liikenteen kiertotaloutta ja ajoneuvojen elinkaarta voi kutsua monimutkaiseksi optimointiongelmaksi. Siihen kytkeytyvät materiaalien valinta ja hankinta, suunnittelu, valmistus, liikennekäyttö ja viimein romuajoneuvon kierrätys. Autoteollisuus siirtyy koko ajan lähemmäs kestäväää kehitystä ja kiertotaloutta, mikä vaatii jatkuvasti uusia innovaatioita. (Keoleian & Sullivan 2012, s. 372)

Negatiivisten ympäristövaikutusten vähentämiseksi ja kestävyuden edistämiseksi täytyy ajoneuvojen koko elinkaarta tutkia (Vermeulen et al. 2011, s. 9). Yksi vaihtoehto arvioida ajoneuvon vaikutuksia ympäristöön on käyttää elinkaaren arvioinnin viitekehystä. Se on systemaattinen keino arvioida ajoneuvon kestävyyttä ympäristön kannalta koko ajoneuvon elinkaaren ajan. Arviointia käytetään, jotta voidaan vähentää ajoneuvojen aiheuttamia negatiivisia ympäristövaikutuksia ja huolehtia, etteivät yhdestä vaiheesta poistetut vaikutukset siirry seuraavaan vaiheeseen. (Keoleian & Sullivan 2012, s. 365–366)

Jo syyskuussa 2000 Euroopan parlamentti ja neuvosto antoivat direktiivin 2000/53/EC. Direktiivi koskee ajoneuvoja ja romuajoneuvoja sekä niiden materiaaleja ja osia. Direktiivillä pyritään ehkäisemään ja rajoittamaan ajoneuvoista syntyvää jätettä lisäämällä komponenttien ja materiaalien uudelleenkäyttöä, kierrätystä ja korjaamista. Direktiivi kieltää käyttämästä vaarallisia materiaaleja kuten lyijyä ja elohopeaa. (Council Directive 2000/53/EC) Tämä direktiivi velvoittaa autovalmistajia ottamaan vastuun ajoneuvoista ja niiden materiaaleista käytön jälkeen. Autovalmistajien vastuu tarkoittaa siis sitä, että valmistajat sitoutuvat ottamaan tuotteet takaisin elinkaaren loppuvaiheessa, jotta ne voidaan käyttää uudelleen tai kierrättää. (Ramoni & Zhang 2013, s. 881) Direktiivi ohjaa ajoneuvoja ja liikennettä kiertotalouden suuntaan (European Commission 2021a, s. 51).

Vuonna 2021 Euroopan komissio sai valmiiksi arvion direktiivin 2000/53/EC toimivuudesta. Euroopan komissio toteaa, että romuajoneuvoja koskeva direktiivi on ollut tehokas sen alkuperäisissä tavoitteissa, mutta autoteollisuus on muuttunut viimeisen 20 vuoden aikana ja se on tuonut uusia haasteita ajoneuvojen kiertotalouteen. (European Commission 2021b, s. 1) Direktiivi 2000/53/EC ei ole huomionnut sähkö- ja muoviosia, joita uusissa autoissa on koko ajan enemmän. Kuitenkin monet autovalmistajat ovat alkaneet omatoimisesti lisäämään varsinkin muovin kierrätystä. Ainakin Mercedes-Benz, BMW ja Volvo ovat lisänneet muoviosien kierrätysastetta. Lisäksi vuonna 2009 Volkswagen on ilmoittanut, että 40 % Golf -mallin painosta on kierrätettyä materiaalia. (European Commission 2021a, s. 52–53)

Myös muut ajoneuvovalmistajat, kuten General Motors Company (GM), ovat tehneet töitä, jotta toiminta olisi enemmän kiertotalousmallin mukaista. GM pyrkii vähentämään vaarallisia ja vaarattomia jätteitä niiden alkulähteiltä. Jos kierrätys ei ole mahdollista, on tavoitteena uudelleen käyttää ja kierrättää materiaaleja niin paljon kuin se on teknisesti ja taloudellisesti mahdollista. Lisäksi heillä on tavoitteena minimoida valmistusprosessin aiheuttamat päästöt. (Nunes & Bennett 2010, s. 410)

## **4.2 Keskeisimmät haasteet**

Miljoonat ajoneuvot tulevat elinkaarensa päähän vuosittain ja tuottavat laskennallisesti noin 11 miljoonaa tonnia jätettä EU:n alueella. Jos jätettä ei käsitellä asianmukaisesti se

aiheuttaa ongelmia ympäristölle sekä taloudelle materiaalihävikin vuoksi. (European Commission 2021b, s. 1) Romuajoneuvoja koskeva direktiivi on tehty vuonna 2000, jolloin ei otettu huomioon autoissa olevia muovisia ja sähköisiä osia. Nämä ovat yleistyneet uusissa autoissa ja ne aiheuttavat haasteita romuajoneuvojen kierrätyksessä. Sähköiset osat sisältävät esimerkiksi kultaa, hopeaa, palladiumia sekä muita arvokkaita materiaaleja. Lisäksi nykyautot ovat noin 15–20 % muovia. (European Commission 2021a, s. 45)

Direktiivin 2000/53/EC arvioissa todetaan, että kadonneet ajoneuvot ovat suuri ongelma. Vuosittain 6,5 miljoonaa ajoneuvoa raportoidaan hävitetyksi direktiivin vaatimalla tavalla, mutta loput noin 35 % eli noin 4 miljoonaa rekisteristä poistettua ajoneuvoa katoaa. On suuri riski, että nämä ajoneuvot päätyvät jätteeksi ilman asianmukaista käsittelyä. Tällöin ajoneuvojen sisältämät vaaralliset jätteet saattavat päätyä luontoon. (European Commission 2021a, s. 29–32) Luontoon päätyneet vaaralliset jätteet saastuttavat maaperää ja pohjavettä (Nunes & Bennett 2010, s. 404). Ongelmallista liikenteen kiertotalouden kannalta on myös se, että direktiivi 2000/53/EC tai sen asettamat säännöt eivät koske yli 45 miljoonaa ajoneuvoa kuten moottoripyöriä, maatalouskoneita, vetolaitteita tai linja-autoja. (European Commission 2021a, s. 43–44)

Sähköautojen ja ladattavien hybridautojen lisääntyminen tulee aiheuttamaan suuren muutoksen romuautojen käsittelyssä (European Commission 2021a, s. 48). Sähköautojen ja ladattavien hybridautojen keskeisimmät kiertotalouden haasteet liittyvät akkujen kierrätykseen (Ramoni & Zhang 2013, s. 883). Heikentynyt akku poistetaan autosta sen jälkeen, kun sen teho ei enää riitä takaamaan luvattua toimintasädettä. Akuilla on yleensä kapasiteettia tässä vaiheessa jäljellä vielä noin 80 % (Wolfs 2010, s. 1). Direktiivi 2006/66/EC ohjeistaa kierrättämään 50 % akun painosta. Koska kierrätystehokkuutta mitataan akun painon perusteella, saavat akkujen kierrättäjät päättää, mitä osia akusta kierrätetään. Useat suosivat perusmetallien kierrätystä, koska perusmetalleja kuten rautaa ja kuparia löytyy luonnosta melko paljon ja niitä käytetään paljon kaupallisissa ja teollisissa sovelluksissa. Tämä aiheuttaa sen, että direktiivi ei edistä harvinaisten tai erikoismetallien kierrätystä. Nämä metallit kuitenkin aiheuttavat luonnolle suurimman negatiivisen vaikutuksen. (Thomas et al. 2018, s. 38)

Vähäpäästöiset ajoneuvot kuten sähköautot on luotu vähentämään liikenteen hiilidioksidipäästöjä ja tekemään liikenteestä enemmän kiertotalousmallin mukaista. Sähköautojen yleistyminen lisää tarvetta harvinaisille maametalleille ja niiden louhinnalle. Harvinaisten maametallien louhinta ja kaivostoiminta aiheuttaa negatiivisia ympäristövaikutuksia. (Langkau & Erdmann 2021, s. 1034–1035) Sähköautot ja ladattavat hybridiautot aiheuttavat käytön aikana vähemmän haitallisia ympäristövaikutuksia, mutta sähkö- ja hybridiajoneuvojen valmistaminen aiheuttaa enemmän negatiivisia ympäristövaikutuksia verrattuna polttomoottoriautoihin. Toisin sanoen liikennekäytön aiheuttamat negatiiviset ympäristövaikutukset ovat vähentyneet, mutta ajoneuvon tuotannon aiheuttamat vaikutukset ovat lisääntyneet. On siis tärkeää huomioida uusia innovaatiota ja käyttövoimia kehittäessä, etteivät yhdestä elinkaaren vaiheesta poistetut negatiiviset ympäristövaikutukset siirry vahingossa toiseen elinkaaren vaiheeseen. (European Commission 2021a, s. 48–49)

Romuajoneuvoista jää jäljelle murskauksen jälkeen pieni osuus kierrättämätöntä materiaalia, joka sisältää myös haitallisia aineita. Jäännöksen kierrättämistä on tutkittu, mutta on muutamia ongelmia, jotka estävät materiaalien tehokkaan talteenoton. Kustannustehokas tekniikka materiaalien erottamiseen puuttuu. Jäännöksestä on hankala erottaa materiaaleja tarpeeksi korkeina pitoisuuksina, jotta niillä olisi tarpeeksi markkina-arvoa. Lisäksi kierrätystä hankaloittaa kierrätysmateriaalien markkinoiden puute. (Jody et al. 2010, s. 50–51)

Kiertotalouden toteuttaminen liikenteessä on ennen kaikkea haastavaa, koska se vaatii sarjan erilaisia ratkaisuja ja yksittäisillä teoilla ei ole niin suurta merkitystä. Tämä johtuu siitä, että on tavoitteena parantaa ajoneuvojen koko elinkaarta yhden vaiheen sijasta. (World Economic Forum 2020, s. 20)

### **4.3 Tulevaisuuden muutokset ja ratkaisut**

Liikenteen muuttaminen kiertotalousmallin mukaiseksi on monimutkainen prosessi, johon tarvitaan yhdenmukaisia toimia. Tämän vuoksi autovalmistajien sekä muiden toimijoiden tulee luoda yhteinen etenemissuunnitelma kiertotalouden edistämiseksi. Ilman kiertotalousmallin mukaista liikennettä ei voida saavuttaa vähähiilistä liikkumista tai 1,5 asteen ilmastotavoitetta. (World Economic Forum 2020, s. 7–20)

Kiertotalouden peruseriaatteita voidaan soveltaa myös liikenteen kiertotalouteen ja sen parantamiseen (Ellen MacArthur Foundation 2023b). Keskeisiä toimia ovat ajoneuvojen kestävyuden parantaminen, energia- ja resurssitehokkuuden lisääminen, uudelleenvalmistuksen sekä kierrätyksen mahdollistaminen ja omistamisen muutosmallin edistäminen. Kierrätettävyyttä parane, jos pystytään välttämään monimutkaisia materiaalisuoksia. (Suomen ympäristökeskus 2022b) Kierrätystä ja materiaalien talteenottoa voidaan edistää luomalla uusia taloudellisia kannustimia ja liiketoimintaa, jotta markkinatalous kasvaisi kierrätetylle materiaalille (Esteva et al. 2020, s. 885). Lisäksi ympäristökestävyyttä parantaa uusiutuvan energian käyttö ajoneuvojen sekä ajoneuvoissa käytettyjen materiaalien valmistusprosesseissa (Esteva et al. 2020, s. 881). Tämän avulla muun muassa liikenteen hiilidioksidipäästöjä sekä hiili- ja ympäristöjalanjälkeä pystytään huomattavasti pienentämään. (Ellen MacArthur Foundation 2023b; Suomen ympäristökeskus 2022b)

Tuotesuunnittelu, eli tässä tapauksessa ajoneuvosuunnittelu on kestävyuden ja kiertotalousmallin keskipiste. Laskennallisesti on mahdollista, että jopa 80 % tuotteen aiheuttamista negatiivisista ympäristövaikutuksista voidaan vähentää huolellisen tuotesuunnittelun avulla. (Suomen ympäristökeskus 2022b) Tämän vuoksi ajoneuvojen suunnitteluun tulisi kiinnittää entistä enemmän huomiota. Suunnittelemalla ajoneuvot kevyemmiksi, voidaan vähentää tarvittavia materiaaleja ja energiaa. Lisäksi suunnitteluvaiheessa on tärkeää ottaa huomioon uudelleenkäyttömahdollisuudet. (Ellen MacArthur Foundation 2023b) Vaihtoehtoisten käyttövoimien, kuten sähkön ja biopohjaisten polttoaineiden lisääminen auttaa tekemään liikenteestä enemmän kiertotalousmallin mukaista (De Abreu et al. 2022, s. 16–17).

Tulevaisuudessa tulee myös huolehtia siitä, että ajoneuvon elinkaaren yhdessä vaiheessa aiheuttamat negatiiviset ympäristövaikutukset eivät siirry seuraavaan vaiheeseen. Sen sijaan, että keskityttäisiin ainoastaan ajoneuvon polttoainetehokkuuteen, olisi hyödyllistä määrittää asetus koskien hiili-intensiteettiä ajoneuvon elinkaaren aikana. (Keoleian & Sullivan 2012, s. 371)

Sähköisten ajoneuvojen akut ja moottorit vaativat harvinaisia maametalleja. Niiden aiheuttamia ympäristövaikutuksia voidaan vähentää parantamalla materiaalitehokkuutta, sulkemalla laittomia kaivoksia ja koventamalla ympäristöstandardeja. (Langkau & Erdmann 2021, s. 1048) Jotta voidaan huolehtia uusiutumattomien materiaalien



riittävydestä, on sähköautojen akkujen ja moottoreiden kierrätys erityisen tärkeää. Lisäksi akkujen kierrätys edistää ympäristöystävällisyyttä ja se vaikuttaa myönteisesti energiankulutukseen. (Or et al. 2019, s. 9) Akkuteknologia on vielä kehittämätöntä verrattuna polttomoottoriautoihin, joten sähköisillä ajoneuvoilla on vielä suuri potentiaali kehittyä. On osoitettu, että sähköisten ajoneuvojen akkujen tuotannon aiheuttama hiilijalanjälki on pienentynyt vuosien aikana ja sen uskotaan pienenevän myös tulevaisuudessa. (Volvo 2021, s. 33)

Kiertotaloutta edistää omistamisen muutos. Omistamisen muutoksella tarkoitetaan sitä, että asiakas siirtyy tuotteen omistamisesta kohti käyttämistä. Käyttämistä voi esimerkiksi olla jakaminen, lainaaminen tai vuokraaminen ja tuotteet omistajuus pysyy valmistajalla. Tällöin valmistajan on helpompi ottaa vastuu tuotteen koko elinkaaresta. (Orasmaa et al. 2020, s.11) Omistamisen muutosta voidaan soveltaa liikenteen kiertotalouteen. Esimerkiksi julkinen liikenne ja yhteiskyytien käyttäminen ovat jakamista eivätkä vaadi ajoneuvon omistamista (Ellen MacArthur Foundation 2023b).

Direktiivi 2000/53/EC on 20-vuotta vanha, eikä sitä ole sen jälkeen oleellisesti muutettu (European Commission 2021b, s. 1). Tämän vuoksi edellisessä kappaleessa (4.2) esitetyille epäkohdille on mietitty ratkaisuja. Ajoneuvon poistaminen rekisteristä ei aina tarkoita ajoneuvon muuttumista romuajoneuvoksi. Syitä tämän takana voi olla monia, esimerkiksi väliaikainen poistaminen liikennekäytöstä. Eri sidosryhmät kuitenkin toivovat tiiviimpää yhteistyötä kansallisten sekä alueellisten viranomaisten välille, jotta rekisteröinti olisi ajantasaisempaa ja kadoksissa olevien ajoneuvojen määrää voitaisiin vähentää. Tämä voisi parantaa direktiivin 2000/53/EC mukaista kierrätystä. (European Commission 2021a, s. 33–34)

Monet sidosryhmät kannattavat direktiivin laajentamista myös muille ajoneuvoille, sillä tällä hetkellä direktiivin ulkopuolelle jää 45 miljoonaa ajoneuvoa. Sidosryhmien mielestä lainsäädäntöä tulisi päivittää myös sähköisten ajoneuvojen akkujen kannalta, sillä se on nykyisellään liian laaja. Lisäksi autoromuttamoita ja -purkaamoita tulisi valvoa, jotta voidaan varmistua sääntöjen noudattamisesta. Toiveissa on myös, että uudistettu direktiivi ohjaisi autovalmistajia entistä enemmän kohti kiertotalouden toimintamalleja. (European Commission 2021a, s. 71–74)

## 5 YHTEENVETO

Kiertotalousmallin mukaisella toiminnalla pyritään muuttamaan taloudellinen toiminta kiertäväksi lineaarisen sijaan. Tuote pyritään suunnittelemaan valmistuksesta saakka mahdollisimman vähän jätettä tuottavaksi ja helposti kierrätettäväksi. Lisäksi tuotteen elinkaarta pyritään pidentämään, materiaalien hyödyntämistä tehostamaan sekä uusiutuvan energian käyttöä lisäämään. Kiertotaloudella pyritään vähentämään luontokatoa sekä syntyvää jätettä ja varmistamaan luonnonvarojen riittävyys myös tulevaisuudessa. Liikenteen kiertotalous on vain kiertotalouden periaatteiden hyödyntämistä liikenteessä sekä ajoneuvojen valmistuksessa ja kierrätyksessä. Liikenteen kiertotaloudella tavoitellaan ajoneuvon elinkaaren tuottamien ympäristövaikutusten vähentämistä, maksimoimalla materiaalitehokkuus sekä lisäämällä ajoneuvojen kestävyyttä ja kierrätysmahdollisuuksia.

Elinkaari kuvaa ajoneuvon eliniän eri vaiheita ja elinkaariajattelulla tarkoitetaan ajoneuvon aiheuttamia kokonaisvaltaisia ympäristövaikutuksia. Kiertotalouden peruseriaatteita sovelletaan elinkaaren eri vaiheissa, jotta liikenteen ja ajoneuvoteollisuuden kiertotalousastetta saadaan kasvatettua.

Ajoneuvoteollisuus käyttää kokonaisuutena suuren määrän eri materiaaleja ja käytetyt materiaalit määrittelevät ajoneuvon ympäristökestävyyden. Esimerkiksi kierrätetyn materiaalin hyödyntäminen teollisuudessa vähentää huomattavasti materiaalin prosessoinnin aiheuttamia haittoja. Valmistuksessa kiertotaloutta edistetään hyvällä tuotesuunnittelulla, valmistusprosessin optimoinnilla ja materiaalien tehokkaalla hyödyntämisellä. Optimointitoimenpiteitä ovat esimerkiksi polttoaineen vaihto puhtaammin palavaan polttoaineeseen ja uusiutuvan energian hyödyntäminen.

Liikennekäytössä kiertotalouden toteutumista valvotaan lähinnä polttoainetaloudellisuuden kautta. Kierrätys ja uusiokäyttö ovat keskeisessä asemassa kiertotaloudessa. Romuajoneuvoista voidaan kierrättää noin 90 %, mutta jäljelle jäävä kierrättämätön materiaali eli jäännös päättyy usein vain kaatopaikalle. Jäännöksen kiertotalousastetta on pyritty parantamaan hyödyntämällä jäännöstä energiantuotannossa tai esimerkiksi tien päällystyksessä. Kiertotalousmallin mukaan materiaaleja tulisi

kierrättää ja hyödyntää mahdollisimman pitkään ennen niiden hyödyntämistä energian tuotannossa.

Sähkö- ja hybridiajoneuvot ovat luotu lisäämään liikenteen kiertotaloutta ja parantamaan ajoneuvokannan energiatehokkuutta. Sähköistetyillä ajoneuvoilla on parempi polttoainetehokkuus kuin polttomoottoriajoneuvoilla, eivätkä ne liikenteessä aiheuta primääripäästöjä. Sähköautot eivät kuitenkaan ole kokonaan päästöttömiä, sillä energiantuotanto aiheuttaa sekundäärisiä päästöjä. Sähkö- ja hybridiajoneuvojen valmistus aiheuttaa kuitenkin enemmän haittaa ympäristölle kuin perinteisten polttomoottoriajoneuvojen valmistus. Lisäksi ne aiheuttavat päästöjä tuotantolaitosten kautta ja niiden kierrätys on ongelmallista.

Liikenteen kiertotalouden keskeisimmät haasteet liittyvät materiaalien tehokkaaseen hyödyntämiseen ja kierrättämiseen. Vuosittain pelkästään EU:n alueella elinkaarensa päähän tulevat ajoneuvot tuottavat yhteensä miljoonia tonneja jätettä. Jos tätä jätemäärää ei käsitellä asianmukaisesti, aiheuttaa se haittaa niin ympäristölle kuin taloudellekin. Ajoneuvoteollisuus uudistuu jatkuvasti, sillä sen tulee vastata muuttuvan maailman tarpeisiin. Muutokset lisäävät esimerkiksi elektroniikka- ja muoviosien määrää sekä lisää harvinaisten maametallien kysyntää, mutta näiden kierrätystä ja uudelleenkäyttöä ei ohjata tarpeeksi lainsäädännöllä.

Kokonaisuudessaan liikenteen kiertotalouden saavuttaminen on haasteellista, sillä se vaatii autovalmistajilta ja muilta toimijoilta sarjan erilaisia, mutta yhdenmukaisia toimia. Ratkaisuna liikenteen kiertotalouden ongelmiin on kiertotalousmallin mukaiset toimenpiteet kuten materiaalien tehokkaan hyödyntämisen ja kierrätyksen kehittäminen. Lisäksi uusiutuvan energian tehokkaampi hyödyntäminen muuttaa toimintaa enemmän kiertotalouden mukaiseksi. Liikenteen kiertotaloutta voidaan edistää myös direktiivin 2000/53/EC päivittämisellä, omistamisen muutoksella ja määrittämällä asetus koskien ajoneuvon elinkaaren hiili-intensiteettiä.

Ajoneuvoteollisuus on eräänlaisessa murrosvaiheessa maailman ilmastokriisin sekä taloustilanteen vuoksi ja nyt tehtävät toimet määrittelevät osaltaan yhteiskunnan tulevaisuutta. Kuten todettu, liikennesektori aiheuttaa huomattavaa haittaa ympäristölle ja yksi tehokkaimpia keinoja vastata näihin haasteisiin on kiertotalouden periaatteiden soveltaminen liikenteeseen ja ajoneuvojen valmistukseen.

## LÄHDELUETTELO

CGRi, 2023. The Circularity Gap Report – 2023 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.circularity-gap.world/2023> [viitattu 28.3.2023].

Circle Economy, 2019. The Circularity Gap Report – 2019 [verkkodokumentti]. Amsterdam: Circle Economy. Saatavissa: [https://docs.wixstatic.com/ugd/ad6e59\\_ce56b655bc4f67ad7b5ceb5d59f45c.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/ad6e59_ce56b655bc4f67ad7b5ceb5d59f45c.pdf) [viitattu 28.3.2023]. 56 s.

Council Directive 2000/53/EC of 18 September 2000 on end-of-life vehicles [2000] OJ L269/1

De Abreu, V.H.S, Da Costa, M.G., Da Costa, V.X., De Assis, T.F., Santos, A.S. & D’agosto, M.d.A, 2022. The Role of the Circular Economy in Road Transport to Mitigate Climate Change and Reduce Resource Depletion. Sustainability 14 (14), 8951.

Ellen MacArthur Foundation, 2013a. Towards the circular economy Volume 1: An economic and business rationale for an accelerated transition [verkkodokumentti]. Yhdistynyt kuningaskunta: Ellen MacArthur Foundation. Saatavissa: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an> [viitattu 10.3.2023]. 96 s.

Ellen MacArthur Foundation, 2023a. The butterfly diagram: visualising the circular economy [verkkodokumentti]. Yhdistynyt kuningaskunta: Ellen MacArthur Foundation. Saatavissa: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram> [viitattu 13.3.2023].

Ellen MacArthur Foundation, 2023b. Climate change and a circular economy for transport [verkkodokumentti]. Yhdistynyt kuningaskunta: Ellen MacArthur Foundation. Saatavissa: <https://ellenmacarthurfoundation.org/climate-change-and-a-circular-economy-for-transport> [viitattu 5.4.2023].

Ellen MacArthur Foundation. 2013b. Towards the circular economy Volume 2: Opportunities for the Consumer Goods Sector [verkkodokumentti]. Yhdistynyt

kuningaskunta: Ellen MacArthur Foundation. Saatavissa: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-2-opportunities-for-the-consumer-goods> [viitattu 11.3.2023]. 111 s.

Esteva, L.C.A, Kasliwal, A., Kinzler, M.S., Kim, H.C. & Keoleian, G.A., 2020. Circular economy framework for automobiles – Closing energy and material loops. *Journal of Industrial Ecology*, 25 (4), S. 877–889.

European Commission, 2021a. Commission staff working document: Evaluation of Directive (EC) 2000/53 of 18 September 2000 on end-of-life vehicles [verkkodokumentti]. Bryssel: European Commission. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/1912-End-of-life-vehicles-evaluating-the-EU-rules\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/1912-End-of-life-vehicles-evaluating-the-EU-rules_en) [viitattu 2.4.2023].

European Commission, 2021b. Commission staff working document: Executive summary of the evaluation of Directive (EC) 2000/53 of 18 September 2000 on end-of-life vehicles [verkkodokumentti]. Bryssel: European Commission. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/1912-End-of-life-vehicles-evaluating-the-EU-rules\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/1912-End-of-life-vehicles-evaluating-the-EU-rules_en) [viitattu 5.4.2023].

European Environment Agency, 2021. EEA greenhouse gases – data viewer [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer> [viitattu 22.4.2023].

Eurostat, 2023. End-of-life vehicle statistics [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=End-of-life\\_vehicle\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=End-of-life_vehicle_statistics) [viitattu 18.4.2023].

Fentahun, M.A. & Savaş, M.A., 2018. Materials used in Automotive Manufacture and Material Selection Using Ashby Charts. *International Journal of Materials Engineering*, 8 (3), S. 40–54.

Forslund, T., 2021. Kiertotalous on avain luontokadon pysäyttämiseen [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.sitra.fi/artikkelit/kiertotalous-on-avain-luontokadon-pysayttamiseen/> [viitattu 13.3.2023].

Hawkins, T.R., Singh, B., Majeau-Bettez, G. & Strømman, A.H., 2012. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17 (1), S. 53–64.

Jody, B.J., Daniels, E.J., Duranceau, C.M., Pomykala, J.A. and Spangenberg, J.S., 2010. End-of-Life vehicle Recycling: State of the Art of Resource Recovery from Shredder Residue [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2011/02/69114.pdf> [viitattu 18.4.2023].

Karttunen, M., 2020. Kuusi faktaa kiertotaloudesta [verkkodokumentti]. Helsinki: Sitra. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/artikkelit/kuusi-faktaa-kiertotaloudesta/> [viitattu 10.3.2023].

Kelly, S. & Apelian, D., 2017. Automotive aluminum recycling at end of life: a grave-to-gate analysis [verkkodokumentti]. Worcester: Worcester Polytechnic Institute. Saatavissa: <https://www.aluminum.org/sites/default/files/2021-10/Final-Report-Automotive-Aluminum-Recycling-at-End-of-Life-A-Grave-to-Gate-Analysis.pdf> [viitattu 14.4.2023]. 36 s.

Keoleian, G.A. & Sullivan, J.L., 2012. Materials challenges and opportunities for enhancing the sustainability of automobiles. *MRS Bulletin*, 37 (4), S. 365–373.

Langkau, S. & Erdmann, M., 2021. Environmental impacts of the future supply of rare earths for magnet applications. *Journal of Industrial Ecology*, 25 (4), S. 1034–1050.

Margarido, F. & Nogueira, C.A., 2011. Characterisation of automotive shredder residue [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/266290767\\_CHARACTERISATION\\_OF\\_AUTOMOTIVE\\_SHREDDER\\_RESIDUE](https://www.researchgate.net/publication/266290767_CHARACTERISATION_OF_AUTOMOTIVE_SHREDDER_RESIDUE) [viitattu 18.4.2023]. 6 s.

Nunes, B. & Bennett, D., 2010. Green operations initiatives in the automotive industry: An environmental reports analysis and benchmarking study. *Benchmarking: An International Journal*, 17 (3), S. 396–420.

Oberle, B., Bringezu, S., Hatfield-Dodds, S., Hellweg, S., Schandl, H., Clement, J., and Cabernard, L., Che, N., Chen, D., Droz-Georget, H., Ekins, P., Fischer-Kowalski, M., Flörke, M., Frank, S., Froemelt, A., Geschke, A., Haupt, M., Havlik, P., Hüfner, R., Lenzen, M., Lieber, M., Liu, B., Lu, Y., Lutter, S., Mehr, J., Miatto, A., Newth, D., Oberschelp, C., Obersteiner, M., Pfister, S., Piccoli, E., Schaldach, R., Schüngel, J., Sonderegger, T., Sudheshwar, A., Tanikawa, H., van der Voet, E., Walker, C., West, J., Wang, Z. & Zhu, B., 2019. Global Resources Outlook 2019 – Natural Resources for the Future We Want. Nairobi: United Nations Environment Programme, 158 s. ISBN: 978-92-807-3741-7

Or, T., Gourley, S.W.D., Kaliyappan, K., Yu, A. & Chen, Z., 2019. Recycling of mixed cathode lithium-ion batteries for electric vehicles: Current status and future outlook. Carbon Energy, 2 (1), S. 6–43.

Orasmaa, A., Laurila, L. & Liimatainen, H., 2020. Omistamisen muutos kiertotaloudessa [verkkodokumentti]. Helsinki: Sitra. Sitran selvityksiä 175. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/app/uploads/2020/12/omistamisen-muutos-kiertotaloudessa.pdf> [viitattu 5.4.2023]. 49 s.

Plastics Europe, 2020. Plastics – the Facts 2020 [verkkodokumentti]. Bryssel: Plastics Europe. Saatavissa: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/> [viitattu 21.4.2023].

Plastics Europe, 2023. How plastics are made [verkkodokumentti]. Bryssel: Plastics Europe. Saatavissa: <https://plasticseurope.org/plastics-explained/how-plastics-are-made/> [viitattu 21.4.2023].

Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E. & Hanemaaijer, A., 2017. Circular economy: Measuring innovation in the product chain. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 46 s.

Power Battery, 2023. Electric vehicle batteries [verkkodokumentti]. Nuuenen: Power Battery. Saatavissa: <https://www.powerbattery.nl/resources/electric-vehicle-batteries/> [viitattu 18.4.2023].

Ramoni, M.O. & Zhang, H.C., 2013. End-of-life (EOL) issues and options for electric vehicle batteries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15 (6), S. 881–891.

Ravina, M., Bianco, I., Ruffino, B., Minardi, M., Panepinto, D. & Zanetti, M., 2023. Hard-to-recycle plastics in the automotive sector: Economic, environmental and technical analyses of possible actions. *Journal of Cleaner Production*, 394, 136227.

Rood, T. & Kishna, M., 2019. Outline of the circular economy – PBL Netherlands Environmental Assessment Agency [verkkodokumentti]. The Hague: PBL Netherlands Environment Assessment Agency. 3633. Saatavissa: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/pbl-2019-outline-of-the-circular-economy-3633.pdf> [viitattu 14.3.2023]. 42 s.

Sakai, S., Yoshida, H., Hiratsuka, J., Vandecasteele, C., Kohlmeyer, R., Rotter, V.S., Passirini, F., Santini, A., Peeler, M., Li, J., Oh, G.J., Chi, N.K., Bastian, L., Moore, S., Kajiwara, N., Takigami, H., Itai, T., Takahashi, S., Tanabe, S., Tomoda, K., Hirakawa, T., Hirai, Y., Asari, M. & Yano, J., 2014. An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 16 (1), S. 1–20.

Sato, F.E.K. & Nakata, T., 2020. Energy Consumption Analysis for Vehicle Production through a Material Flow Approach. *Energies*, 13, 2396.

Seiffert, M.E.B. & Loch, C., 2005. Systemic thinking in environmental management: support for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 13 (12), S. 1197–1202.

Sitra, 2014. Kiertotalouden mahdollisuudet Suomelle [verkkodokumentti]. Helsinki: Sitra. Sitran selvityksiä 84. Saatavissa: <https://media.sitra.fi/2017/02/27174628/Selvityksia84-2.pdf> [viitattu 13.3.2023]. 72 s.

Sitra, 2023. Kaskadi-periaate [verkkodokumentti]. Helsinki: Sitra. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/tulevaisuussanasto/kaskadi-periaate/> [viitattu 13.3.2023].

Stahel, W., 2016. The circular economy. *Nature* 531, S. 435–438.



Suomen ympäristökeskus, 2022a. Elinkaariarviointi tukee kestävyysmurrosta [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: <https://www.syke.fi/elinkaariarviointi> [viitattu 4.5.2023].

Suomen ympäristökeskus, 2022b. Tuotesuunnittelu [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavilla: <https://www.ymparisto.fi/fi/kestava-kierto-ja-biotalous/tuotesuunnittelu> [viitattu 13.4.2023].

The Aluminum Association, 2013. The Environmental Footprint of Semi-Finished Aluminum Products in North America: A Life-Cycle Assessment Report [verkkodokumentti]. Arlington: The Aluminum Association. Saatavilla: [https://legacy-assets.eenews.net/open\\_files/assets/2014/01/11/document\\_cw\\_01.pdf](https://legacy-assets.eenews.net/open_files/assets/2014/01/11/document_cw_01.pdf) [viitattu 14.4.2023]. 124 s.

Thomas, M., Ellingsen, L.A.W. & Hung, C.R., 2018. Research for TRAN Committee – Battery-powered electric vehicles: market development and lifecycle emissions. European Union: TRAN Committee, 62 s. ISBN 978-92-846-2667-0

Tilastokeskus, 2023. Kiertotalousliiketoiminnan indikaattorit [verkkodokumentti]. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: <https://www.stat.fi/tup/kiertotalous/kiertotalousliiketoiminnan-indikaattorit.html> [viitattu 24.4.2023].

Traficom, 2022. Liikenteen CO<sub>2</sub>-päästöt liikennemuodoittain sekä maakunnittain [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Saatavissa: <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikenteen-co2-paastot-liikennemuodoittain-seka-maakunnittain> [viitattu 30.11.2022].

Tuladhar, A., Iatridis, K. & Dimov, D., 2022. Chapter 6 - History and evolution of the circular economy and circular economy business models. Teoksessa: Stefanakis, A. & Nikolaou, I., 2022. Circular Economy and Sustainability. Elsevier, S. 87-106, ISBN 9780128198179

Van Bruggen, A.R., Zonneveld, M., Zijp, M.C. & Posthuma, L., 2022. Solution-focused sustainability assessments for the transition to the circular economy: The case of plastics in the automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, 358, 131606.

Venkatachalam, V., Pohler, M., Spierling, S., Nickel, L., Barner, L. & Endres, H.J., 2022. Design for Recycling Strategies Based on the Life Cycle Assessment and End of Life Options of Plastics in a Circular Economy. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 223 (13), 2200046.

Vermeulen, I., Van Caneghem, J., Block, C., Baeyens, J. & Vandecasteele, C., 2011. Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (EVLs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation. *Journal of Hazardous Material*, 190 (1–3), S. 8–27.

Volvo, 2021. Carbon footprint report: Volvo C40 Recharge [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.volvocars.com/images/v/-/media/Market-Assets/INTL/Applications/DotCom/PDF/C40/Volvo-C40-Recharge-LCA-report.pdf> [viitattu 18.4.2023]. 51 s.

Wagner, S. & Schlummer, M., 2020. Legacy additives in a circular economy of plastics: Current dilemma, policy analysis, and emerging countermeasures. *Resources, Conservation & Recycling*, 158, 104800.

Walker, S., Coleman, N., Hodgson, P., Collins, N. & Brimacombe, L., 2018. Evaluating the Environmental Dimension of Material Efficiency Strategies Relating to the Circular Economy. *Sustainability*, 10 (3), 666.

Winslow, K.M., Laux, S.J. & Townsend, T.G., 2018. A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, S. 263–277.

Wolfs, P., 2010. An Economic Assessment of “Second Use” Lithium-Ion Batteries for Grid Support. Christchurch: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 6 s. ISBN 978-1-4244-8380-8

World Economic Forum, 2020. Raising Ambitions: A new roadmap for the automotive circular economy [verkkodokumentti]. Sveitsi: World Economic Forum. Saatavissa: <https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/a-com-migration/r3-3/pdf/pdf-146/accenture-and-wef-raising-ambitions-pov.pdf#zoom=50> [viitattu 28.3.2023]. 44 s.