

Pihla Kettula

RAKENTEIDEN KIERTOTALOUSINDI- KAATTORIT

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Toni Pakkala
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Pihla Kettula: Rakenteiden kiertotalousindikaattorit (The circularity indicators of structures)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2021

Kiertotalous on erityisesti viime vuosikymmenen aikana herättänyt kiinnostusta maailmanlaajuisesti ja sen katsotaan tarjoavan vaihtoehdon nykyiselle talousmallille ja sen periaatteille. Raaka-aineiden suunnittelemattoman kulutuksen sekä niiden lyhyen elinkaaren sijasta kiertotaloudessa materiaalit ja tuotteet nähdään resursseina ja niiden arvo pyritään säilyttämään korkeana mahdollisimman pitkään. Tämän lisäksi kiertotaloudessa pyritään materiaalien pitkään elinkaareen, jätteiden vähenemiseen, uusiin omistusmuotoihin ja resurssitehokkuuteen. Rakennusalalla on paljon mahdollisuuksia kiertotalouden mukaiseen toimintaan. Yhtenä syynä tähän on esimerkiksi rakennusmateriaalikierron ja niiden maksimointi, jolloin voidaan saavuttaa materiaalikustannusten ja jätteiden vähentymistä. Yksi suuri haaste kiertotalouteen siirtymisessä on kuitenkin sen mittaaminen ja arvottaminen sekä eri kiertotalousindikaattoreiden yhteneväinen määrittäminen.

Rakenteiden kiertotalousindikaattoreiden tarkoituksena on arvioida ja mitata kiertotalouden mukaisuutta. Tämän lisäksi kiertotalousindikaattoreiden yhtenä roolina voidaan pitää niiden mahdollisuutta toimia ohjaavana työkaluna päätöksenteossa.

Kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, minkälaisilla indikaattoreilla rakenteiden kiertotaloudellisuuden mukaisuutta voidaan mitata. Samalla selvitetään käytössä olevien kiertotalousindikaattoreiden nykytila. Näiden lisäksi tutkimuksessa sivutaan myös kiertotalouden ilmiötä rakennusalalla yleisemmällä tasolla. Kandidaatintyö toteutettiin kirjallisuustutkimuksena, jonka aineistona hyödynnettiin pääosin tieteellisiä artikkeleita.

Tehdyn kirjallisuusselvityksen perusteella rakenteiden suunnitteluvaiheessa pystytään tunnistamaan useita eri teemoja, jotka edistävät kiertotaloutta. Tunnistettujen teemojen pohjalta voidaan kehittää ja valita moniulotteisia kiertotalousindikaattoreita. Kandidaatintyössä perehdytään tarkemmin kahteen kiertotalousindikaattoriin: rakenteiden hyödyntämispotentiaali-indeksiin sekä siirtokapasiteettiin.

Rakenteiden kiertotalouden mukaisuuden arviointiin liittyvät menetelmät kehittyvät koko ajan ja niiden tarve on huomattava, sillä nykyiset luokitusjärjestelmät eivät vastaa kiertotalouden arviointitarpeeseen tarpeeksi kattavasti. Tehty kirjallisuusselvitys osoittaa kuitenkin, että kiertotalouden kehitystyö on vilkasta ja erilaisia ratkaisuja kehitetään koko ajan kiertotalouteen siirtymisen tueksi.

Avainsanat: Rakenteiden kiertotalousindikaattorit, kiertotalous, rakenteet.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Kandidaatintyön kirjoittaminen oli opettavainen ja uusi kokemus, jonka myötä tutustuin kiertotalouden ilmiöön ja sen mahdollisuuksiin rakennusosalalla. Aiheeseen perehtyminen ja sen ajankohtaisuus herättivät pysyvän kiinnostuksen, minkä vuoksi ajattelin seurata myös jatkossa kiertotalouden parissa tehtävää tutkimustyötä.

Haluan kiittää ohjaajiani Toni Pakkalaa, Satu Huuhkaa, Henna Teerihalmetta ja Tiina Haaspuroa ohjaustyöstä ja saamistani neuvoista sekä kannustuksesta. Lisäksi haluan kiittää opiskelukavereitani yhteisistä hetkistä ja tuesta sekä kandidaatintyön että kolmen viimeisen opiskeluvuoden ajalta.

Tampereella, 31.5.2021

Pihla Kettula

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta ja merkitys	1
1.2 Tutkimuskysymykset ja rajaus.....	2
1.3 Kandidaatintyön rakenne	2
2. KANDIDAATINTYÖN TOTEUTTAMINEN	3
3. KIERTOTALOUSINDIKAATTORIT TALONRAKENTAMISESSA.....	5
3.1 Kiertotalous käsitteenä.....	5
3.2 Kiertotalous talonrakentamisessa.....	6
3.3 Kiertotalous rakennesuunnittelussa.....	7
3.4 Kiertotalousindikaattoreiden rooli rakentamisessa.....	9
3.5 Rakenteiden kiertotalousindikaattorityytit	9
3.6 Rakenteiden kiertotaloudellisuuden mittaamisen nykytila.....	10
4. RAKENTEIDEN MATERIAALIT JA NIIDEN HYÖDYNTÄMISPOTENTIAALIN MERKITYS KIERTOTALOUDESSA.....	13
4.1 Rakenteiden materiaalit ja niiden valinta suunnitteluvaiheessa	13
4.2 Rakenteiden materiaalien kiertotalouden mukaisuuden arviointi	14
4.3 Rakenteiden materiaalien hyödyntämispotentiaali-indeksi	14
5. SIIRRETTÄVÄT RAKENTEET	17
5.1 Rakenteiden siirtokapasiteetin mittaaminen	17
6. YHTEENVETO.....	21
7. LÄHTEET.....	23

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta ja merkitys

Kiertotalous on yksi maailman nopeimmin kasvavista talousmalleista. Se yhdistää taloudellisen toiminnan ja ympäristöasiat yhdeksi kokonaisuudeksi, joka perustuu tuotteiden ja materiaalien pitkäaikaisempaan hyödyntämiseen sekä niiden arvon säilyttämiseen, resurssien minimointiin ja jätteiden vähentämiseen. (Lieder et al. 2017) Kiertotaloudessa huomioidaan koko elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset (Luoma et al. 2015).

Ellen MacArthur -säätiön (2015) mukaan maailmanlaajuisesta materiaalikulutuksesta ja jätteestä noin kolmannes muodostuu rakennusten rakentamisesta ja purkamisesta. Tätä toimintamallia ja nykyisen talousmallin asemaa on alettu kuitenkin kyseenalaistamaan ympäristötietoisuuden ja -trendien vaikutuksesta. Samaan aikaan taloudelliset, sosiaaliset ja teknologiset tekijät ovat kehittyneet ja siten konkretisoineet ajatusta siirtymä lineaarisesta talousmallista kiertotalousmalliin myös rakennusalaalla. (Ellen MacArthur Foundation 2015) Kiertotalouteen siirtymisessä on kuitenkin haasteita, joista yksi on sen toteutumisen mittaaminen ja eri kiertotalousindikaattoreiden määrittäminen.

Kiertotalousindikaattoreiden tavoitteena rakennusalaalla on avustaa kunnallisella ja valtakunnallisella tasolla suunnittelun ja päätöksenteon kehittymistä siten, että ne tukevat materiaalivirtojen kiertävyyttä rakennuksissa koko materiaalien elinkaaren ajan. Tämän lisäksi kiertotalousindikaattoreilla on myös korkeampia kiertotaloustavoitteita, kuten tuotteiden pysymistä käytössä mahdollisimman pitkään. Kiertotalousindikaattoreita voidaan hyödyntää myös kiertotalouden ympäristövaikutusten, taloudellisten ja sosiaalisten vaikutusten mittaamisessa sekä vertailemisessa. (Cartwright et al. 2021)

Kandidaatintyö tehdään osana kansainvälistä Circular Construction In Regenerative Cities -hanketta (CIRCuiT), joka keskittyy rakentamisen kiertotalouteen. CIRCuiT-hankkeen tarkoituksena on kehittää toimintamalleja, jotka helpottavat kaupunkeja ottamaan kiertotalouden ratkaisuja käyttöönsä sekä tulevaisuudessa nykyisissä toiminnoissa. Hankkeessa pyritään selvittämään myös kiertotalouden haasteita ja etsimään niihin ratkaisuja, joita myös kandidaatintyöaiheessa sivutaan. Kiertotalousindikaattorit on todettu hankkeessa yhdeksi osa-alueeksi, jota tulee tutkia tarkemmin (Cartwright et al. 2021).

1.2 Tutkimuskysymykset ja rajaus

Kandidaatintyössä tavoitteena on tehdä selvitys rakenteisiin käytettävistä kiertotalousindikaattoreista. Tutkimusongelma keskittyy kiertotalousindikaattoreiden määrittämiseen ja siihen, kuinka niitä voitaisiin hyödyntää myös lineaarisesta talousmallista kiertotalousmalliin siirtymisessä. Kandidaatintyössä on tarkoituksena myös syventyä muutamaaan potentiaaliseen indikaattoriin, joita voitaisiin käytännössä hyödyntää rakenteissa ja niiden suunnittelussa.

Päätutkimuskysymys voidaan muotoilla seuraavanlaisesti: minkälaisilla indikaattoreilla rakenteiden kiertotalouden mukaisuutta voidaan mitata? Indikaattorilla tarkoitetaan kiertotalouden tiettyä näkökulmaa kuvaavaa mittaria (Luoma et al. 2015). Tutkimusongelmaan liittyy myös käytössä olevien kiertotalousindikaattoreiden nykytilan selvitys.

1.3 Kandidaatintyön rakenne

Johdannon jälkeen kandidaatintyö etenee aiheen yksityiskohtaisempaan käsittelyyn. Toisessa pääluvussa esitellään kirjallisuuskatsauksessa käytettyjä tutkimus- ja tiedonhakumenetelmiä sekä kerättyä aineistoa. Kolmannessa pääluvussa käsitellään kiertotalousindikaattoreita talonrakentamisessa sekä sivutaan myös kiertotalouden ilmiötä yleisemmällä tasolla rakennusalalla. Tämän jälkeen kandidaatintyö keskittyy muutamaaan potentiaaliseen kiertotalouden teemaan ja niihin liittyviin kiertotalousindikaattoreihin. Kiertotalousindikaattorit valikoituivat kirjallisuusselvityksen perusteella. Neljännessä pääluvussa näkökulmaksi on valittu rakenteiden materiaalien hyödyntämispotentiaali ja sen mahdollinen huomioiminen ja arviointi jo suunnitteluvaiheessa. Viidennessä pääluvussa puolestaan on tutkittu rakenteiden siirtopotentiaalia ja sen arvioimista. Viimeisenä päälukuna on yhteenveto, jossa esitetään tiivistetysti kandidaatintyön loppupäätelmät ja pohditaan myös rakenteiden kiertotalousindikaattoreiden jatkotutkimuksen ja kehitystyön tarvetta sekä niihin liittyviä mahdollisuuksia.

2. KANDIDAATINTYÖN TOTEUTTAMINEN

Kandidaatintyö toteutetaan kirjallisuustutkimuksena, jonka aineistona hyödynnetään pääosin tieteellisiä artikkeleita. Suomenkielistä tutkimusta ei ole tehty vielä kattavasti osittain tutkimusalan nuoruuden vuoksi, jonka vuoksi kandidaatintyön lähdekirjallisuus on pääosin englanniksi. Lähteiden julkaisuvuoden osalta pyritään mahdollisimman tuoreisiin ja ajantasaisiin julkaisuihin, sillä uusia ratkaisuja sekä uutta tietoa julkaistaan koko ajan lisää. Tämä johtuu aiheen ajankohtaisuudesta. Lähdemateriaalin kokoamisessa ja hyödyntämisessä on pyritty myös huomioimaan julkaisuun tehtyjen viittausten määrä, vertaisarviointi sekä julkaisualusta. Julkaisualustan luotettavuutta arvioidessa hyödynnettiin Julkaisufoorumia, joka on tutkimuksen laadunarviointia tukeva julkaisukanavien tasoluokitus (Julkaisufoorumi 2021). Mikäli asiaankuuluvalla vaikuttavan artikkelin julkaisufoorumin määrittelemä tasoluokitus ei ollut korkea, lukeminen suoritettiin erittäin kriittisesti.

Tutkimuksen tekemisessä käytetään pääosin Scopus-tietokantaa (Scopus 2021). Ennen tiedonhaun aloittamista tehtiin hakusuunnitelma, jotta suoritettava tiedonhaku olisi säännömukaista ja suunnitelmallista. Kandidaatintyön keskeisiä käsitteitä ovat kiertotalous (engl. circular economy), indikaattorit (engl. indicators) ja rakenteet (engl. structure). Taulukossa 1 on koottu käytettyjä hakulausekkeita sekä niistä saatuja tuloksia käytetyssä tietokannassa.

Taulukko 1. Hakusanoja ja hakulausekkeita sekä niiden avulla saatuja tuloksia.

Hakusana tai hakulauseke	Tulokset
"Circular economy" AND building	976
Circularity indicator*	252
Circularity metric*	171
Circularity indicator* AND (structure OR building)	134
Circularity metric* AND (structure OR building)	46
"Circularity indicators" AND (building OR construction OR structure)	35

Taulukossa 1 esitettyjen hakusanojen ja -lausekkeiden lisäksi muita käytettyjä hakusanoja olivat muun muassa recyclability, measuring, evaluation, assessment, "the structure

of the building”, product*, material* sekä component*. Lisähakusanojen avulla tarkennettiin tiedonhakua ja etsittiin tarvittavaa lisätietoa aiheesta.

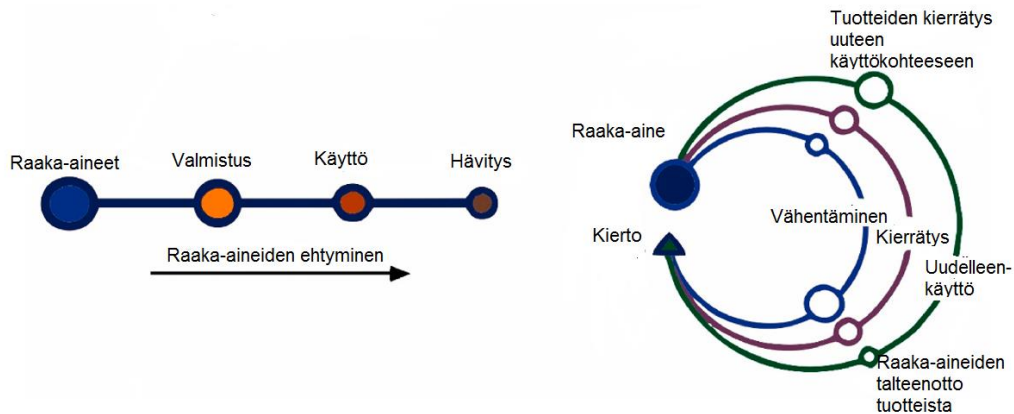
Hakutuloksia käytiin läpi avainsanojen, johdantojen sekä tiivistelmien pohjalta. Lisäksi aineiston keräämisessä hyödynnettiin lähde- ja viittausanalyysiä. Näin saatiin koottua kandidaatintyössä käytetty materiaali. Koska aihe on ajankohtainen, tiedonhakua ja aineiston keräämistä pyrittiin kuitenkin tekemään jatkuvasti alkukartoituksen jälkeenkin viimeisimmän tiedon saamiseksi.

3. KIERTOTALOUSINDIKAATTORIT TALONRAKENTAMISESSA

3.1 Kiertotalous käsitteenä

Vuonna 2002 Braungart ja McDonough popularisoivat 1900-luvulla esitetyn ajatuksen siitä, että taloudessa raaka-aineet ja tuotteet tulisi käyttää uudelleen siten, että niiden arvo säilyisi mahdollisimman pitkään. (Seppälä et al. 2016, s. 10). Braungartin ja McDonoughin popularisoimaa ajatusta kiertotalouden käsitteestä on sittemmin kehittänyt muun muassa Ellen MacArthur -säätiö (2015), jonka kiertotalouden pelkistettyä määritelmää hyödynnetään myös tässä kandidaatintyössä. Ellen MacArthur -säätiön mukaisessa pelkistetyssä kiertotalousmallissa on eroteltu biologiset ja tekniset materiaalit toisistaan niiden eroavaisuuksista johtuen. (Ellen MacArthur Foundation 2015, s. 6) Kandidaatintyössä keskitytään teknisten materiaalien kiertoihin. Kiertotalousmallin ajatuksena on materiaalikiertojen pitäminen mahdollisimman pieninä ja lähellä toisiaan, sillä näin voidaan minimoida energian kulutusta ja jätteiden syntyä. (Ellen MacArthur Foundation 2015, s. 6).

Kiertotalous haastaa kulutukseen perustuvaa lineaarista talousmallia, jossa materiaali tai tuote valmistetaan, hyödynnetään ja hävitetään (Seppälä et al. 2016, s.7, 10). Kuvassa 1 on havainnollistettu lineaarisen talousmallin ja kiertotalouden eroavaisuuksia. Kiertotaloutta voidaan pitää lineaarisen talousmallin vastakohtana, sillä siinä materiaalin tai tuotteen hävittämistä pyritään välttämään viimeiseen asti. Kiertotaloudessa materiaalit ja tuotteet pyritään saamaan mahdollisimman pieniin kiertoihin liiketalouden keinoin esimerkiksi uudelleen käyttämällä, kunnostamalla ja kierrättämällä. Kiertotalousmallissa kierrot on jaoteltu sen mukaisesti, kuinka paljon tuotetta tai materiaalia joudutaan muokkaamaan ennen uutta käyttöä. Kierto on sitä pienempi, mitä vähemmän energiaa on käytetty. Tuotteen tai materiaalin käyttäminen uudestaan täysin muokkaamattomana uudessa käyttökohteessa on esimerkki toiseksi pienimmästä mahdollisesti kierrosta kiertotalousmallissa. Kiertotaloudessa tuotteiden ja materiaalien elinkaari pidentyy ja niiden arvo pystytään pitämään mahdollisimman korkeana.



Kuva 1. Havainnekuva lineaarisesta talousmallista ja kiertotaloudesta. Kuva muokattu lähteestä: Akhimien et al. (2020).

Seppälä et al. (2016) toteavat, että käytännössä kiertotalous tarkoittaa toimintamallia, jossa elinkaarensa lopussa olevat tavarat siirretään uusiksi resursseiksi, materiaali- ja energiankierrot sulkeutuvat teollisissa systeemeissä ja jätteen tuotanto minimoidaan. Näin vältetään materiaalivirtojen poistumista materiaalikierroista, ja voidaan saavuttaa energiatehokkaampia sekä vähemmän kasvihuonepäästöjä aiheuttavia ratkaisuja. (Seppälä et al. 2016, s. 11; Huuhka 2019a, s. 7-9) Esimerkiksi tilanteessa, jossa neitseellisten materiaalien sijasta suositaan kierrätettyjä materiaaleja, energiaa voi säästyä, sillä neitseellisen materiaalin valmistus vaatii paljon energiaa ja täten tuottaa paljon myös päästöjä. Kuitenkin jotkut kiertotaloudelliset toimet saattavat käyttää enemmän energiaa kuin lineaarisen talousmallin mukaiset toimet. Tällöin ratkaisun tekemisessä voi vertailla ja punnita kiertotaloudellisemmasta ratkaisusta saatavia muita hyötyjä. (Huuhka 2019a, s.7-9)

3.2 Kiertotalous talonrakentamisessa

Kestävä ja kiertotalouden huomioiva rakentaminen tuottaa materiaali- ja energiatehokkaita rakennuksia sekä rakenteita pitkäikäiseen käyttöön. Rakennetussa ympäristössä on paljon kiertotalouspotentiaalia hyödynnettävänä. Yhtenä syynä tähän ovat esimerkiksi rakentamisessa olevat rakennusmateriaalikierrot ja niiden mahdollinen maksimointi, millä voidaan saavuttaa myös materiaalikustannusten ja jätteiden vähentymistä. (Ellen MacArthur Foundation 2015). Kiertotalouden muut mahdollisuudet rakennusalalla liittyvät liiketoiminnan kasvattamiseen sekä kestävämpään liiketoimintaan ja yhteiskuntaan.

Talonrakentamisessa kiertotaloudelliset päätökset liittyvät rakennuksen elinkaaren vaiheisiin, joissa materiaalia käytetään tai poistetaan käytöstä. Täten oleellisemmat talonrakennushankkeen vaiheet erityisesti rakenteiden näkökulmasta ovat ehdotussuunnittelu, yleissuunnittelu ja toteutussuunnittelu. Tarveselvitys- ja hankesuunnitteluvaiheet ovat myös tärkeitä, sillä niissä päätetään hankkeen peruslähtökohdat. (Huuhka 2019a, s.9) Talonrakentamisessa liittyvät kiertotalouden tasot voidaan jakaa kaupunkitasoon, rakentamistasoon sekä rakenne- ja materiaalitasoon (Cartwright et al. 2021). Tässä kandidaatintutkielmassa keskitytään jatkossa ainoastaan tarkimpaan tasoon eli rakenne- ja materiaalitasoon. Käytännössä rakenne- ja materiaalitasoon ratkaisut liittyvät pitkälti rakennesuunnittelussa tehtäviin valintoihin. Toinen yleisesti käytössä oleva kiertotalouden jako koostuu neljästä eri tasosta: makro, meso, mikro ja nano -tasosta. Tämä jaottelu on pitkälti samanlainen kuin Cartwrightin et al. (2021) määrittelemä kolmitasoinen jako, mutta lisäksi siihen on mikrotaso, joka käsittelee yritystasoa. (de Oliveira et al. 2020)

3.3 Kiertotalous rakennesuunnittelussa

Suunniteltaessa kiertotalouden mukaisia rakenteita on ensiarvoisen tärkeää tunnistaa ratkaisut, jotka puoltavat kiertotalouden mukaisia periaatteita. Rakennesuunnitteluun sisältyy monia kiertotalouden teemoja: materiaalivalinnat, resurssitehokkuus, energiatehokkuus, muuntojoustavuus, käyttöikä ja elinkaari. Teemat mukailevat kiertotalousindikaattoreiden aihealueita ja niiden mitattavia ominaisuuksia. Materiaalivalinnoilla on suuri merkitys suunniteltavissa ja lopulta toteutettavissa rakenteissa esimerkiksi materiaalien hiilijalanjäljen ja kierrätettävyyden näkökulmasta. Resurssitehokkuus sisältää muun muassa rakenteiden mitoituksen, liitostekniikat sekä rakenteiden uudelleenkäytön. Energiatehokkuuteen vaikuttavat muun muassa rakennetyypit sekä liitostekniikat. Käyttöikään puolestaan liittyy esimerkiksi rakenteiden säilyvyys ja niiden elinkaaristrategia. Kaikki edellä mainitut rakennesuunnittelun aihealueet voidaan muuntaa mitattavaan tai määritettävään muotoon rakenteille suunniteltujen indikaattoreiden avulla kiertotaloudellisuuden arvioimiseksi.

Belgiassa Vrijen yliopiston toteuttamassa projektissa ”Le Bati Bruxellois: Source de nouveaux Matériaux” nimettiin yksityiskohtaisempia teemoja, jotka auttavat rakennesuunnittelijoita tekemään yhtenäisiä ja johdonmukaisia teknisiä ratkaisuja rakenteiden toteuttamiseen. Listattuja teemoja ovat muun muassa uudelleenkäyttö, kierrätys, turvallisuus ja terveellisyys, materiaalin homogeenisuus, käsiteltävyys ja palautuvuus, yhteensopivuus, muuntojoustavuus, kestävyys, yksinkertaisuus, palautuvuus sekä biologinen hajoaminen. (Cambier et al. 2019) Alla olevassa taulukossa (taulukko 2) on koottu ja tarkennettu edellä mainittuja teemoja.

Taulukko 2. Kiertotalouden mukaisia rakennesuunnittelussa huomioitavia teemoja. (Cambier et al. 2019; Antonini et al. 2020; Rahla et al. 2021).

Teema	Tarkennus
Uudelleenkäyttö	Rakenteiden ja komponenttien uudelleenkäyttö rakennuksen käyttöiän loppupuolella joko samassa tai uudessa käyttötarkoituksessa.
Kierrätys	Rakenteiden ja komponenttien valmistus joko jättemateriaalista tai materiaaleista, jotka on valmistettu muun teollisuuden sivuvirroista. Neitseellisen materiaalin käyttöä pyritään minimoimaan.
Turvallisuus ja terveellisyys	Materiaalien ja komponenttien valinta ja käyttö siten, että ihmiset eikä luonto sairastu tai vaurioidu rakenteen elinkaaren aikana.
Materiaalin homogeenisuus	Materiaalien ja komponenttien valinnassa suositaan tuotteita, jotka ovat valmistettu mahdollisimman homogeenisesti. Toisin sanoen valinnassa suositaan komponentteja, jotka koostuvat yhdestä materiaalista eikä seoksista. Tämä helpottaa myös rakenteen kierrättämistä, sillä ainesosia ei tällöin tarvitse jaotella. Huomioitavaa on kuitenkin se, että toteutettavan rakenteen soveltuvuus tai ominaisuus ei saa heikentyä.
Käsiteltävyys ja palautuvuus	Suunnittelussa, erityisesti liitosten suunnittelussa, huomioidaan rakenteiden mahdollisimman vaivaton talteenotettavuus sekä niiden vaurioitumattomuus.
Yhteensopivuus	Rakenteiden ja komponenttien suunnittelu ja toteuttaminen siten, että niitä voidaan vaihtaa, yhdistää ja käyttää sellaisinaan muissa kohteissa.
Muuntojoustavuus	Rakenteiden muuntojoustavuuden suunnittelu jo suunnitteluvaiheessa.
Kestävyys	Rakenteiden suunnittelussa pyritään siihen, että valitut komponentit ja materiaalit vastustavat kulumista. Kestävyys edesauttaa myös rakennusosien uudelleenkäyttöä.
Yksinkertaisuus	Suunnittelussa pyritään välttämään monimutkaisia ja materiaalia paljon vaativia ratkaisuja. Yksinkertainen ja turvallinen rakenneratkaisu on tavoiteltava.
Biologinen hajoaminen	Mikäli mahdollista, toteutettavaan rakenteeseen valitaan materiaali, joka pystyy hajoamaan biologisesti ja kompostoitumaan sen elinkaaren loppupuolella.

Taulukossa 2 nostettujen kiertotaloudellisten teemojen huomioiminen suunnittelussa mahdollistaa rakennusten ja rakennusosien tehokkaamman uudelleenkäytön, kierrätyksen tai uusimisen. Lisäksi Cambier et al. toteavat (2019), että kiertotalouden mukainen suunnittelu tuottaa lisäarvoa koko suunnitteluprosessille heti sen alusta alkaen.

3.4 Kiertotalousindikaattoreiden rooli rakentamisessa

Kiertotalousindikaattoreita käytetään kiertotalouden mittaamiseen. Cartwrightin et al. (2021) mukaan rakennettuun ympäristöön liittyviä kiertotalousindikaattoreita voidaan nimetä noin 510. Kyseiseen lukuun sisältyy kaikilta maantieteellisiltä alueilta käytössä olevia rakennusmateriaalien, tuotteiden, rakennusten ja alueiden elinkaaren vaiheita ja keskeisiä näkökulmia erityylisten indikaattoreiden muodossa. Kuitenkaan kaikkia määriteltyjä indikaattoreita ei voida hyödyntää yleisessä käytössä esimerkiksi niiden spesifisyyden vuoksi, joten yleisesti käytettävien indikaattoreiden lukema pienenee huomattavasti määritetystä kokonaislukemasta. (Cartwright et al. 2021)

Selkeiden ja toteutettavien kiertotalousrakenteiden rooli rakentamisessa on merkittävä. Indikaattoreiden avulla eri toimijat saavat käyttöönsä viitearvoja sekä tietoa siitä, mitä ja miten kiertotalouden toteutumista mitataan. Tämä yhdenmukaistaa kiertotalouden toimia-alaa, mikä taas puolestaan helpottaa esimerkiksi kuluttajia eri palveluiden vertailussa. Tämän lisäksi kiertotalousindikaattoreiden käyttö määrittää eri tuotteille lisäarvon. Erikseen määritetty lisä- ja kiertotalousarvo pienentää osittain myös valmistajien materiaalihintojen epävakautta ja materiaalityöntöön liittyviä riskejä. (Cartwright et al. 2021)

Kiertotaloudellisuuden mittaamisen lisäksi tärkeänä kiertotalousindikaattoreiden roolina voidaan pitää niiden mahdollisuutta toimia ohjaavana työkaluna päätöksenteossa kiertotalouden ja kiertotaloudellisuuden mahdollistamiseksi. Kiertotalousindikaattorit saattavat helpottaa päättäjiä suunnittelemaan tehokkaita keinoja, joilla voi ohjata esimerkiksi materiaalivirtojen kiertävyyttä rakennetussa ympäristössä. (Cartwright et al. 2021)

3.5 Rakenteiden kiertotalousindikaattorityypit

Coronan et al. (2019) mukaan kiertotalousindikaattorityypit voidaan jaotella karkeasti kahteen ryhmään: kiertotalouden toteutumisen arviointiin käytettäviin työkaluihin ja mittareihin sekä kiertotalouden mittaamisen indekseihin. Molemmissa tapauksissa esitettävien työkalujen tavoitteena on selventää, missä määrin kiertotalouden periaatteita noudatetaan. (Corona et al. 2019) Sanojen indikaattori ja indeksi välillä on pieni merkitysero, ja termit saattavat kirjallisuudessa sekoittua keskenään. Indikaattorit ovat mittareita, joiden tarkoituksena on arvioida edistymistä tai muutosta aloitetun lopputuloksen välillä.

Indeksit puolestaan ovat suhdelukuja, jotka kuvaavat muuttujan suhteellista muutosta tiettyyn jaksoon.

Kiertotalouden toteutumisen arviointi keskittyy taloudellisiin vaikutuksiin ja ympäristövaikutuksiin yhteiskunnassa. Kiertotalouden arviointiin käytettävät työkalut ja mittarit voidaan jakaa kiertotalouden arviointi-indikaattoreihin ja kiertotalouden arviointikehyksiin. Arviointikehykset voidaan mukauttaa tapauskohtaisesti. (Corona et al. 2019)

Kiertotalouden mittaamisen indeksit voidaan puolestaan jaotella karkeasti kolmeen: Urban Mining, Lifespan- ja Circular Design -indeksiin. Indeksit on jaoteltu kiertotaloudellisuuden pääominaisuuden mukaan. Tämän jälkeen eri indekseille on määritetty numeeriset asteikot 0—100 kuvastamaan kiertotalouden mukaisuutta. Mitä korkeampi lukema sitä suurempi on määritettävän asian kiertotalouden mukaisuus. (Corona et al. 2019) Kaikki indeksit eivät kuitenkaan noudata samaa asteikkoa, joten indeksejä keskenään vertailtaessa pitää aina tarkastaa käytetyt asteikot ja tarvittaessa muuttaa ne keskenään vastaaviksi. Cartwrightin et al. (2021) mukaan Urban Mining -indeksi mittaa materiaalien ja tuotteiden uudelleenkäytön ja kierrätyksen yleisyyttä. Lifespan- eli elinikäindeksi puolestaan mittaa materiaalien, tuotteiden ja rakenteiden käyttöastetta sekä eliniän ja käyttöiän pidentämismahdollisuutta. Circular Design -indeksin avulla voidaan mitata ja arvioida, miten uusiin rakennuksiin ja niissä käytettyihin rakennustuotteisiin sisältyy suunnitelmia ja periaatteita, jotka helpottavat materiaalien käyttöiän pidentämistä ja talteenottoa rakennuksen sekä tuotteiden käytön jälkeen. (Cartwright et al. 2021)

Rakenteiden kiertotalousindikaattorityypeistä puhuttaessa on kuitenkin otettava huomioon, että yksittäinen kiertotalousindikaattori saattaa soveltua useampaan kuin yhteen indikaattorialatyyppeihin. Esimerkiksi kiertotalousindikaattori voi kuulua kiertotalouden mittaamisen indeksi -päätyyppiin ja kyseisen päätyypin kahteen alatyyppeihin kuten Urban Mining- ja Lifespan -indeksiin.

Edellä mainituista pääindikaattorityypeistä voidaan huomata, että sosiaalista näkökulmaa ja erityisesti sen tuomaa arvon lisäystä kuvaavaa indikaattoria ei ole kuitenkaan kummassakaan päätyypissä huomioitu. Tällä hetkellä tämänkaltaisten sosiaalisten indikaattoreiden määrittäminen ja numeeriseen asteikkoon muovaaminen on vaikeaa työkalujen puutteellisuudesta johtuen.

3.6 Rakenteiden kiertotalouden mukaisuuden mittaamisen nykytila

Rakennusalalla ympäristösertifiointista ja sertifiointijärjestelmistä on tullut yleinen käytäntö erityyppisissä hankkeissa maailmanlaajuisesti. Mayerin (2020) mukaan sertifiointi

on yleistynyt huomattavasti kahden viime vuosikymmenen aikana. Tällä hetkellä neljällä luokitusjärjestelmällä, Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM), Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (DGNB) ja Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB), on suurin osa maailmanlaajuisista markkinoista. (Mayer 2020) Suomessa on käytössä myös kansallinen RTS-ympäristöluokitus. (Rakennustieto 2021) Sertifiointijärjestelmät ottavat huomioon ympäristöystävällisen rakentamisen suunnitteluvaiheesta elinkaaren loppuun asti erilaisten luokkien ja näkökulmien avulla. Seuraavaksi perehdytään tarkemmin LEED-, BREEAM- ja DGNB-luokitusjärjestelmään sertifiointijärjestelmien ja kiertotalouden välisen suhteen selventämiseksi.

LEED-luokitusjärjestelmä arvioi rakennusten ympäristövaikutuksia koko elinkaaren ajan. Green Building Council Finlandin mukaan LEED on maailman käytetyin ympäristöluokitusjärjestelmä, jonka vaatimusluokkien takana on monia amerikkalaisia käytäntöjä. Tämä ei kuitenkaan ole ongelma, vaan vaatimuksia voidaan soveltaa esimerkiksi myös eurooppalaisiin käytäntöihin. Tällä hetkellä luokitukselta käytetään versioita LEED v4 for Building Design and Construction (LEED BD+C), joka voidaan jakaa kolmeen alajärjestelmään. (Green Building Council Finland 2021) LEED v4:n vähimmäisvaatimus sertifiointin saamiseksi on esimerkiksi jätehuoltosuunnitelma rakennus- ja purkujätteille niiden minimoimiseksi. Mayer (2020) toteaa, että rakenteiden näkökulmasta kiinnostavin alajärjestelmän luokka on materiaalit ja raaka-aineet -luokka, josta pisteitä saa osoittamalla materiaalin ympäristöystävällisyyttä ympäristötuoteselosteiden avulla. Pisteitä voi saada myös kierrätettyjen tai uudelleenkäytettyjen materiaalien hyödyntämisestä sekä kvantitatiivisesta elinkaariarvioinnista, joka osoittaa tuotteen tai rakenteen olennaiset ympäristövaikutukset. (Mayer 2020) Kuitenkin verrattaessa kyseisessä luokassa jaossa olevia kokonaispisteitä muihin LEED-järjestelmässä oleviin luokkiin ja niissä jaossa oleviin kokonaispisteisiin voidaan todeta, että kiertotalouden rooli jää melko olemattomaksi.

BREEAM on kansainvälinen luokitusjärjestelmä, joka tarkastelee rakennuksen ympäristövaikutuksia esimerkiksi energian- ja vedenkulutuksen, käytettyjen materiaalien, maankäytön ja liikenteen tekijöiden avulla (Rakennusteollisuus 2021). Mayerin (2020) mukaan luokitusjärjestelmässä suurin osa kiertotalouteen ja kierrätykseen liittyvistä pisteistä on sijoitettu materiaalit ja jäte -kategorioihin. Elinkaariarviointi on integroitu BREEAM-luokitusjärjestelmään, mutta sillä ei ole vaikutusta saatuihin pisteisiin. Rakenteiden näkökulmasta merkittävin on alakategoria, joka käsittelee kriteeristöä rakennustuotteiden vastuullista hankintaa koskien. Niin sanotusti palkittavia tuotteita ovat BES 6001:n, FSC:n ja

EMAS-sertifioitujen tuotteiden käyttö. Näiden lisäksi materiaalitehokkuudelle on oma kriteerinsä, jossa materiaalin kulutuksen minimoimisesta ja kierrätysmateriaalien käytöstä saa pisteitä. (Mayer 2020)

DGNB-luokitusjärjestelmässä pyritään suljettuihin materiaali kiertoihin kymmenen kriteerin avulla, jotka liittyvät kierrätykseen ja uudelleenkäyttöön. Mayerin (2020) mukaan kiertotalouden näkökulmasta DGNB:n resurssien vastuullinen käyttö -kriteeri on mielenkiintoinen, sillä kriteerissä pisteitä saa kierrätettyjen ja uudelleenkäytettyjen materiaalien käytöstä sekä vastuullisesta hankinnasta. DGNB-luokitusjärjestelmän yhtenä etuna verrattuna muihin sertifiointijärjestelmiin voidaan pitää kriteerejä, jotka huomioivat elinkaaren loppuvaiheessa materiaalin talteenoton suunnittelun. Erityisesti helposti kierrätettävien rakennusmateriaalien valinta ja helposti talteenotettavat rakenteet -kriteerit tarjoavat indikaattoreita materiaalin talteenottopotentiaalin arviointiin elinkaaren loppupuolella sen perusteella, voidaanko komponentit ja rakenteet poistaa kokonaisuuksina ilman niiden vahingoittumista. (Mayer 2020)

Sertifiointijärjestelmistä puhuttaessa on huomioitava niiden kaupallinen luonne (Mayer 2020). Vaikka sertifiointijärjestelmät mahdollistavat rakennusalalla esimerkiksi kiinteistöjen luotettavan vertailun keskenään, ne eivät ole täysin optimaalisia puhuttaessa rakenteiden kiertotaloudellisuuden mittaamisesta ja kiertotalousindikaattoreista. Yksi syy tähän on esimerkiksi se, että niissä kierrätyksen ja uudelleenkäytön rooli on suhteellisen vähäinen. Myöskään materiaalin talteenottoa ei ole yleensä huomioitu. Tämän lisäksi sertifiointijärjestelmät huomioivat teemoja eri painoarvoilla, jolloin kiertotaloudellisuuden kokonaisarviointi kärsii. Mayer (2020) toteaaakin, että tällä hetkellä olemassa ei ole standardisoitua tapaa arvioida materiaalin talteenotto- ja hyödyntämispotentiaalia kokonaisvaltaisesti rakennuksissa niiden elinkaaren loppupuolella. Toisin sanoen sertifikaateissa kiertotalouden painoarvo on vähäinen muihin näkökulmiin verrattuna ja sen huomiointi on paikoin sisällytetty materiaalivalintoihin ja jätteenkäsittelyyn (Huuhka 2019a, s.36).

Seuraavissa kahdessa pääluvussa on tarkasteltu tarkemmin alaluvussa 3.3 esitettyjä rakennesuunnittelussa huomioitavia kiertotalouden teemoja. Pääluvussa neljä valittavaksi näkökulmaksi on otettu rakenteiden ja niiden materiaalien uudelleenkäyttö sekä käsittely ja palautuvuus. Pääluvussa 5 on puolestaan keskitytty rakenteiden siirrettävyyteen. Tarkempina teemoina ovat muun muassa uudelleenkäyttö sekä yhteensopivuus. Pääluvussa 3 esitetyn yleisen kartoituksen asioita hyödynnetään ja syvennetään pääluvuissa 4 ja 5 vielä lisää.

4. RAKENTEIDEN MATERIAALIT JA NIIDEN HYÖDYNTÄMISPOTENTIALIN MERKITYS KIEROTALOUDESSA

Rakennusmateriaalit ovat merkittävässä roolissa puhuttaessa kiertotalouteen siirtymisestä rakennetussa ympäristössä. Rakennukset ja rakenteet toimivat materiaalipankkeina, joista esimerkiksi niiden purkamisen yhteydessä vapautuu huomattava määrä rakennusmateriaaleja uudelleenkäyttöön tai kierrätykseen.

4.1 Rakenteiden materiaalit ja niiden valinta suunnitteluvaiheessa

Tuotesuunnittelu on merkittävässä osassa kiertotaloudellisia rakennusmateriaaleja. Tuotteiden käyttöiän pidentäminen ja materiaalin optimoitu suunnittelu ovat esimerkkejä tuotesuunnittelun vaikutusmahdollisuuksista kiertotaloudellisempiin materiaaleihin ja tuotteisiin. Rakenteiden materiaalivalinnat tulisi suunnitteluvaiheessa valita siten, että ne kyetään käyttämään ja kierrättämään uusiomateriaaliksi siten, että niihin sitoutunut arvo säilyisi. (Seppälä et al. 2016, s. 10-15) Rakenteiden materiaalien osalta pyrkimyksenä ovat suljetut materiaalikierrot.

Kiertotaloudessa on tavoiteltava tuotantoprosesseja, jotka minimoivat materiaalien käytön ja joissa hävitettävien materiaalien määrä on vähäinen. Käytettävät resurssit valikoidaan tehokkaasti ja käytetään uusiutuvia sekä ominaisuuksiltaan soveltuvia materiaaleja. Kiertotalousmallissa syntyviä sivuvirtoja ja jätteitä hyödynnetään. (Seppälä et al. 2016, s. 10-15) Esimerkiksi rakenteiden esivalmistus saattaa ehkäistä materiaalihukan syntymistä. Lisäksi esivalmistuksessa syntyvää jätettä saattaa olla myös helpompi lajitella valmistusolosuhteista johtuen.

Suunnitteluvaiheessa tehtävissä materiaalivalinnoissa voidaan pyrkiä korkeampien kiertotaloustavoitteiden lisäksi myös vähähiilisyteen ja biologisesti hajoaviin materiaaleihin. Erityisesti vähähiilisyyden arvioimiseen on olemassa jo nykyisin paljon työkaluja.

4.2 Rakenteiden materiaalien kiertotalouden mukaisuuden arviointi

Ruuskan et al. vuonna 2013 tekemän selvityksen perusteella rakennusmateriaalien ja -tuotteiden ympäristövaikutuksista alkoi olla jo hyvin tietoa ja niihin liittyvä elinkaarilaskenta oli jo silloin edistynyt. Aihe on tullut viime vuosina entistä ajankohtaisemmaksi ja tieto sekä menetelmät tehtävään laskentaan ovat kehittyneet entisestään.

Tällä hetkellä huomattava osa rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten arvioinnista suoritetaan erillisillä hiilijalanjäljen laskentamenetelmillä, jotka huomioivat niiden hankkimisen, jalostamisen ja kuljettamisen. Hiilijalanjäljen laskentaan on olemassa standardit EN 14044 (2018), EN 14040 (2006), EN 15978 (2012) sekä EN 15804 (2019), jotka ohjaavat, yhdenmukaistavat ja rakentavat pohjaa toteutettavalle elinkaariarvioinnille (LCA).

Elinkaariarvio koostuu neljästä vaiheesta: tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelystä, inventaarioanalyysistä, vaikutusarvioinnista ja tulosten tulkinnasta (EN 14040, s. 22). Tulos ilmoitetaan yleensä ilmaston lämmityspotentiaalin eli GWP-arvon (engl. Global Warming Potential) avulla, jonka yksikkönä käytetään kg CO₂-ekvivalenttia. Hiilijalanjäljen laskennan tueksi on kehitetty monia sovelluksia ja tietokantoja apuvälineiksi.

Kaikkien kiertotalouden periaatteiden kannalta LCA-laskenta ei kuitenkaan ole kaikkein optimaalisin mittari rakenteiden materiaalien vertailuun. Huuhkan mukaan (2019b) selittävänä tekijänä voidaan pitää eroavaisuuksia vähähiilisuuden tavoiteltavuudessa. Kiertotaloudessa vähähiilisyys ei ole ainoa arvoitettava kokonaisuus, vaan esimerkiksi materiaalin pysyminen pidempään kierrossa toteuttaa myös kyseisen talousmallin peruseriaatteita. Esimerkiksi kierrätysbetonilla, jonka kiviaines on kierrätettyä, on tavanomaisesti käytettävää betonia suurempi hiilijalanjälki. (Huuhka 2019b, s. 9) Muitakin samankaltaisia esimerkkejä voidaan havaita kirjallisuuden perusteella.

Rakenteiden materiaalivalinnoille ei ole olemassa vielä standardisoitua mittaamenetelmää tai indikaattoria, joka ottaisi huomioon edes suurimman osan pääkappaleessa 3 mainituista kiertotalouden mukaisista toimista. Tästä johtuen seuraavassa alakappaleessa 4.3 on pyritty kirjallisuutta hyödyntäen etsimään rakenteille indikaattori, jonka avulla rakenteiden kiertotalouden mukaisuutta, erityisesti materiaalien näkökulmasta, pystyttäisiin mittaamaan kokonaisvaltaisesti.

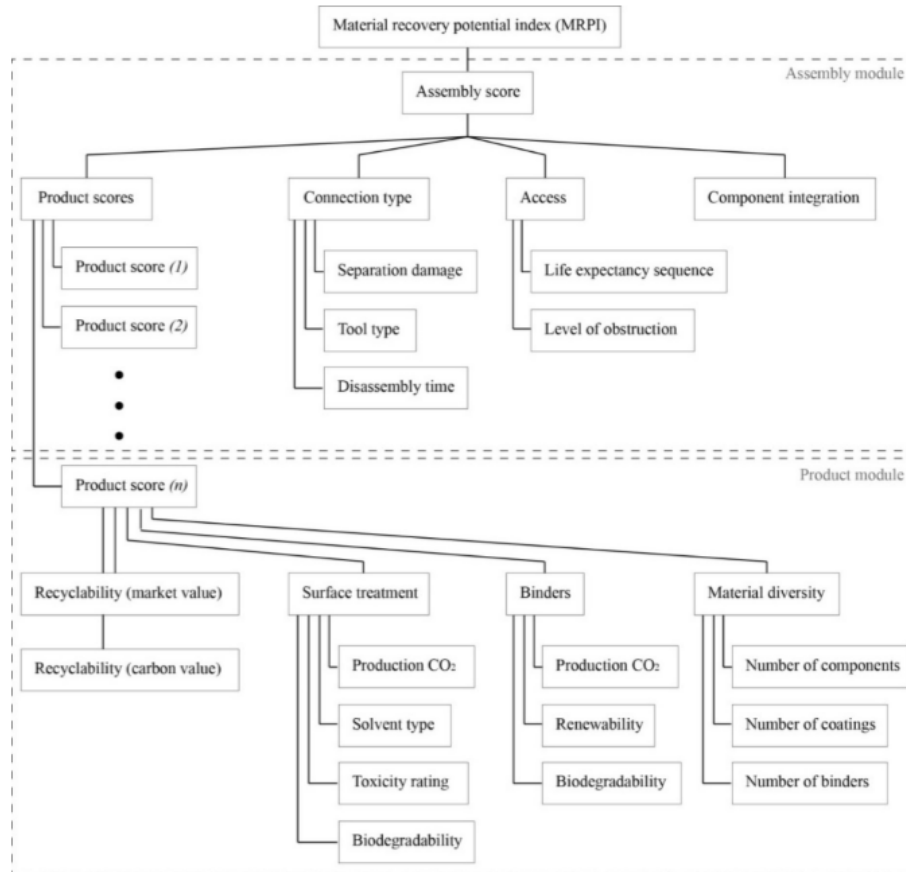
4.3 Rakenteiden materiaalien hyödyntämispotentiaali-indeksi

Mayer ja Bechthold (2018) ovat kehittäneet arviointikehyksen rakenteiden ja niiden materiaalien hyödyntämispotentiaalin arvioimiseksi suunnitteluvaiheessa. Kandidaatintyötä

varten tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella materiaalin hyödyntämispotentiaali-indeksi (engl. Material Recovery Potential Index, MRPI) on kokonaisvaltainen arviointikehys, joka huomioi nimenomaan rakenteet. MRP-indeksi muodostuu kahdesta rinnakkaisesta osa-alueesta, joista toinen huomioi rakenteet (engl. Assembly score) ja toinen rakennusmateriaalit tai yksittäiset tuotteet (engl. Product score). MRP-indeksi luokittelee rakennusmateriaalit ja rakenteet asteikolla 0,0—1,0, jossa suurempi luku viittaa parempaan hyödyntämispotentiaaliin. Mayer ja Bechthold (2018) toteavat, että kehitetty indikaattori ja siihen liittyvät laskentamenetelmät perustuvat ennakkotapauksiin sekä tutkimuksiin, jotka ovat keskittyneet rakennusten purkamiseen. (Mayer & Bechthold 2018)

MRP-indeksissä rakennustuotteet ja -materiaalit pisteytetään neljän luokan perusteella, jotka ovat kierrätettävyys (eng. Recyclability), pintakäsittely (engl. Surface treatment), sideaineet (engl. Binders) ja materiaalin monimuotoisuus (engl. Material diversity). Kierrätettävyysluokka arvioi olemassa olevien kierrätystekniikoiden saatavuutta ja tehokkuutta. Pintakäsittelyluokassa tarkastellaan pinnoitteiden irrottamista käyttöiän päättymisen jälkeen siten, että ne voidaan ottaa talteen. Sideaineluokassa arvioidaan puolestaan liimojen ja laastien mahdollisuuksia uudelleenkäyttöön ja kierrätykseen. Tässä luokassa tärkeää on se, että mahdolliset epäpuhtaudet pystytään erottamaan kierrätettävästä materiaalista. Viimeisenä luokkana on materiaalien monimuotoisuus, missä tarkastellaan eri komponenttien, pinnoitteiden sekä sideaineiden vaikutusta materiaalin kokonaisvaltaiseen hyödyntämiseen. (Mayer & Bechthold 2018)

Rakenteet -osa-alueen tulokset lasketaan neljän alaluokan avulla, joista yksi on edellä mainitun rakennustuotteet tai -materiaalit -osion lopputulos (engl. Product score). Toinen luokka on liitosindeksi (engl. Connection Type), joka huomioi liitoksen purkamisesta rakenteelle aiheutuvat vahingot, liitoksen purkamiseen tarvittavat työkalut ja menetelmät sekä purkamisajan. Kolmas luokka puolestaan on käsiteltävyysindeksi (engl. Access), joka huomioi yhdessä rakenteessa olevien materiaalien tai komponenttien omat käyttöiät ja niiden purku- ja korvausmahdollisuuden siten, että rakenteen osat, jotka ovat käyttöikänsä pidempiä, eivät vaurioidu korvattavan rakenteen osan käsittelyn yhteydessä. Viimeinen luokka on komponenttien integraatio (engl. Component integration), joka käsittelee rakenteiden irrottamista rakennuksesta. Komponenttien integraatio -alaluokka huomioi myös esivalmistetut osat ja niiden hyödyntämispotentiaalin. Kuvassa 2 on havainnollistettu MRP-indeksin jakautumista siinä käytettäviin kategorioihin. (Mayer & Bechthold 2018)



Kuva 2. Havainnekuva MRP-indeksin kategorioista. (Mayer & Bechthold 2018)

MRP-indeksin luokkien keskinäinen painotusarvo perustuu Analytic Hierarchy Process (AHP) -menetelmään, joka jaottelee luokkien painotusarvon prioriteetti- ja intensiteetti-vertailun perusteella. Mayerin ja Bechtholdin (2018) mukaan osa-alueiden ja luokkien väliset painotusarvot voidaan osoittaa toimiviksi noin 96 % vastaavuudella. Vastaavuuden todentamiseksi on verrattu olemassa olevien rakenteiden MRP-indeksin mukaan määritettyjä tuloksia todellisuudessa rakenteesta saatuihin ja hyödynnettyihin materiaaleihin. MRPI:n pisteiden, ilmaston lämpenemispotentiaalin sekä myös kokonaiskustannusten välillä voidaan osoittaa korrelaatio. Korrelaation osoittamiseen on tutkittu 12 tyyppillistä ulkovaipparakennetta ja niiden MRP-indeksin tuloksia. MRPI:n kehitystyön pitää vielä kuitenkin jatkua, jotta siitä saataisiin tarkka työkalu rakennesuunnittelun tueksi. Yksi syy tähän on MRPI:n hankalakäyttöisyys. (Mayer & Bechthold 2018)

5. SIIRRETTÄVÄT RAKENTEET

Suunniteltaessa siirrettäviä rakenteita on määritettävä kriteerit, joihin suunnittelupäätökset perustuvat. Kriteerit mittaavat myös suunnittelussa suoritettavien valintojen vaikutusta rakenteiden siirrettävyyteen. (Durmisevic 2006, s.157) Kaiken rakennesuunnittelun lähtökohdana on kuitenkin turvallisuus sekä terveellisyys ja ne tulee huomioida aina ensimmäisenä. Ympäristöministeriön asetuksen (YMa 477/2014, 2§) mukaisesti rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava siitä, että rakenteiden suunnittelu ja toteutus tehdään siten, että niillä säilyy riittävä lujuus ja vakaus koko suunnitellun käyttöiän ajan. Rakenteella on oltava koko sen käytön aikana riittävä luotettavuus sen käyttötarkoitukseen ja sijaintiin nähden haitallisten painumien, halkeamien, muiden muodonmuutosten, värähtelyjen ja muiden haitallisten vaikutusten syntymistä vastaan. (YMa 477/2014, 2§) Asetuksen noudattaminen ei kuitenkaan sulje pois siirrettävyyden suunnittelua, vaan se antaa vain lähtökohdat siihen.

Durmisevic (2006) toteaa, että rakenteita voidaan siirtää, jos niiden elementit voidaan määritellä rakennuksen muista rakenteista riippumattomiksi. Tämän lisäksi rakenteiden ja niiden komponenttien pitää olla vaihdettavia. Rakenteiden vaihdettavuus sisältää esimerkiksi liitostyyppit. Edellä mainittujen huomioiden lisäksi on olemassa vielä useita seikkoja, jotka vaikuttavat siirrettävien rakenteiden suunnitteluun ja siihen liittyvään päätöksentekoon. Esimerkiksi rakenteiden liitoskohtien detaljit ja yksityiskohtien geometria ovat tärkeitä siirrettävien rakenteiden suunnittelussa. (Durmisevic 2006, s.157-201)

Rakenteiden siirtäminen on kiertotalouden periaatteiden mukaista, sillä silloin rakenteen arvo pysyy täysin tai ainakin melkein samana. Mikäli koko rakennetta ei pystyisi siirtämään, voitaisiin harkita myös rakenteiden komponenttien siirtämistä toiseen käyttökohteeseen sillä edellytyksellä, että niillä on teknistä käyttöikää jäljellä (Cartwright et al. 2021).

Tällä hetkellä ei ole kuitenkaan olemassa yhtä selvää mittausmenetelmää tai indikaattoria, joka mittaisi nimenomaan rakenteiden potentiaalia uudelleenkäyttöön samassa käyttötarkoituksessa, johon se on alun perin suunniteltu. Seuraavassa kappaleessa on esitetty yksi tapa, jolla rakenteiden siirtämisen potentiaalia toiseen kohteeseen voisi mitata.

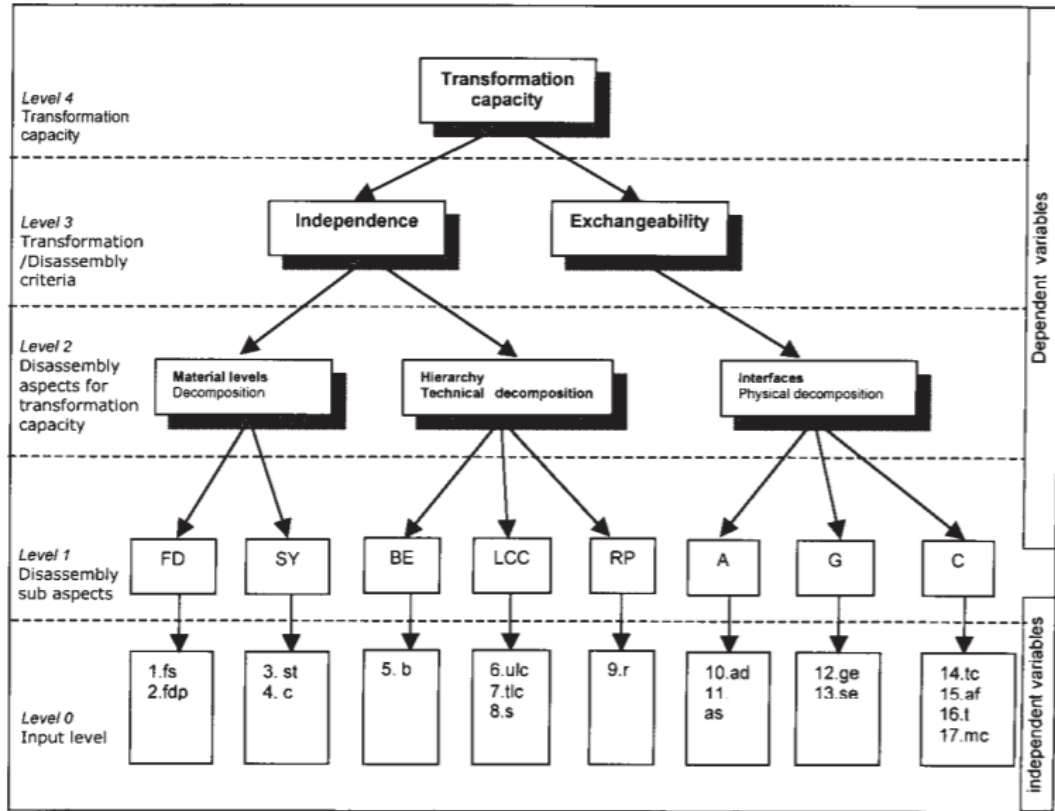
5.1 Rakenteiden siirtokapasiteetin mittaaminen

Durmisevic (2006) esitteli väitöskirjassaan tavan rakenteiden siirtokapasiteetin arvioimisesta ja mittaamisesta rakenteiden purettavuuden perusteella. Kahdeksan näkökulmaa

ja niiden alakohtaa (kuva 3) toimii mallin pohjana. Korkeampi siirtokapasiteetti tarkoittaa matalampia rakenteiden ympäristövaikutuksia. Mallin toimivuutta on testattu myös kahden tapaustutkimuksen avulla, joiden tulosten pohjalta sitä on myös pystytty vertailemaan LCA-laskennasta saatuihin tuloksiin. LCA-vertailuun on otettu kolme eri seinäjärjestelmää, jotka huomioivat muuntojoustavuuden ja uudelleenkäyttöominaisuudet 75 vuoden aikana. Näiden vuosien aikana seinät ovat uudelleenrakennettu tai korvattu seitsemän kertaa. Korvaamisella tarkoitetaan rakenteen siirtämistä toiseen kohteeseen sellaisenaan teknisen käyttöiän salliessa. LCA:n tulokset osoittavat, että elinkaaren aikana käyttöikänsä päähän tulleen rakenteen vaihtaminen on ympäristöystävällinen vaihtoehto purkamiselle ja uudelleenrakentamiselle. Näin [huom: LCA:han viitaten] on saatu osoitettua, että suurempi siirtokapasiteetti tarkoittaa pienempiä ympäristövaikutuksia. (Durmisevic 2016, s. 205-217, 239-241)

Siirtokapasiteettimalliin on kerätty kriteerejä, joilla on vaikutus rakenteiden purkamispotentiaaliin. Kriteerit eivät kuitenkaan ole niin sanotusti kiinteitä, vaan voivat vaihdella projektikohtaisesti. Tästä syystä malli pitää sisällään 17 riippumatonta muuttujaa ja 14 riippuvaa muuttujaa. Riippuvat muuttujat sisältävät kerättyä tietoa esimerkiksi rakenteiden toiminnallisuudesta ja niissä olevista teknisistä ratkaisuksista esimerkiksi purkamisen näkökulmasta. Mallin riippumattomien ja riippuvien muuttujien välillä on hierarkia, jota voidaan kuvata neljän tason avulla. Kuvassa 3 on havainnollistettu tasojen jakautumista. (Durmisevic 2016, s. 205-217)

Ensimmäinen taso eli purettavuuden alakategoriat -taso (engl. Disassembly sub aspects) on jaoteltu kahdeksaan erilaiseen kategoriaan, joista jokainen sisältää projekti-kohtaisesti valittavia riippumattomia muuttujia. Tasolla 1 olevat kategoriat toimivat tasolla 0 oleville mittareille yläotsikkoina. Kategoriat ovat purkaminen, järjestelmällisyys, peruselementit, elinkaarikustannuslaskenta (LCC), riippuvuusmallit, kokoonpanoprosessi, geometria ja liitokset. Esimerkinomaisesti voidaan tarkastella vielä liitosten riippumattomia muuttujia, jotka ovat liitoksen tyyppi, rakenteen kiinnikkeet, toleranssi ja liitosten säännönmukaisuus. Toinen taso (engl. Level 2: Disassembly aspects for transformation capacity) sisältää kolme purettavuuden näkökulmaa siirtokapasiteettiin. Kolmas taso puolestaan sisältää kaksi tärkeää indikaattoria siirrettävyyteen liittyen: riippumattomuus (engl. Independence) ja vaihdettavuus (engl. Exchangeability). Neljäs taso on rakenteen siirtokapasiteetti (engl. Transformation capacity). Lopullinen siirtokapasiteetti-indikaattorin tulos muodostetaan taulukoitujen arvojen avulla ja se kertoo, kuinka siirrettävä rakenne on. Suurempi siirtokapasiteetti merkitsee kiertotaloudellisesti parempaa tulosta, sillä siihen sisältyy muun muassa materiaalien ja osien uudelleenkäyttö, kierrätys, mahdollisuus korvata tuotteita ja materiaaleja vastaavilla. (Durmisevic 2006, s. 205-217)



Kuva 3. Havainnekuva siirtokapasiteetti-indikaattorin kategorioista. (Durmisevic 2006, s. 209)

Durmisevicin siirtokapasiteettia on myös yksinkertaistettu muuttujia karsimalla. Yksinkertaistamisen tarkoituksena on helpottaa siirtokapasiteetin arviointia rakennesuunnittelussa. Pääperiaatteiltaan karsittu siirtokapasiteetti on hyvin samanlainen kuin Durmisevicin esittämä, mutta käytettäviä muuttujia on vähennetty. Kuten alkuperäisessä mallissa, yksinkertaistetussakin versiossa on taulukoitu muuttujista saatavat pisteet, jotka muunnetaan siirtokapasiteetiksi seuraavan kaavan avulla:

$$D_{sak} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{n},$$

jossa D_{sak} on tason 1 lopputulos, g_i luokiteltujen riippumattomien muuttujien taulukkoarvojen lopputulos tasolta 0 ja n on projektikohtaisesti valittujen riippumattomien muuttujien lukumäärä. Kaavan tulos kertoo, kuinka suuri rakenteen siirtokapasiteetti on. (Andrade & Braganca 2019)

Suurin ero rakenteiden siirtokapasiteetin ja MRP-indeksin välillä on niiden tavoitteet. Rakenteiden siirtokapasiteetti keskittyy indikaattorina rakenteiden siirrettävyyden arviointiin eri kriteerien avulla, kun taas MRP-indeksi keskittyy rakenteiden materiaalin hyödyntämispotentialiin. Samankaltaisuuksia kirjallisuuden perusteella valituissa indikaatto-

reissa ovat kuitenkin kiertotalouden teemat, jotka esiintyvät indikaattoreiden eri osa-alueissa. Samoja teemoja ovat esimerkiksi liitokset ja niiden vaikutus käsiteltävyyteen, yhteensopivuuteen sekä muuntojoustavuuteen. Tämän lisäksi indikaattoreiden samankaltaisuutena voidaan pitää niiden perusrakennetta, joka on molemmissa jaoteltu arvoiltaan eri tasoihin. Kuitenkin jaottelussa on hyödynnetty eri menetelmiä, joten samankaltaisuus on ainoastaan ideatasolla. MRP-indeksi sisältää lisäksi paikoin yksityiskohtaisempia laskukaavoja kuin rakenteiden siirtokapasiteetti, jonka käyttö perustuu pitkälti valmiiksi taulukoituihin arvoihin. (Durmisevic 2006; Mayer & Bechthold 2018) Kiertotalousindikaattorityypeiltään sekä MRP-indeksi että siirtokapasiteetti kuuluvat kiertotalouden mittaamisen indekseihin (Cartwright et al. 2021).

6. YHTEENVETO

Kiertotalous on erityisesti viime vuosikymmenenä noussut tällä hetkellä käytössä olevan talousmallin eli lineaarisen talousmallin haastajaksi. Kiertotalousmallissa pyritään materiaalien ja tuotteiden mahdollisimman pitkään elinkaareen sekä niiden arvon säilymiseen. Materiaalien ja tuotteiden kiertoon saaminen esimerkiksi uudelleenkäytöllä tai kierrätyksellä on tavoiteltavaa. Kiertotalous ja sen mukaiset toimet ovat tällä hetkellä vielä uusia, mutta silti kiinnostus aiheeseen on maailmanlaajuista. Kiertotaloutta tutkitaan paljon ja kehitystyö on vilkasta. Tällä hetkellä päätavoitteena on kartoittaa nykyistä tilannetta ja kehittää uusia ratkaisuja kiertotalouteen siirtymisen tueksi.

Kiertotalouden yhtenä haasteena on sen toteutumisen mittaaminen ja eri kiertotalousindikaattoreiden yhdenmukainen ja tarkoituksenmukainen määrittäminen. Indikaattoreita tarvitaan muun muassa kiertotaloudellisten toimenpiteiden arviointiin ja vertailuun niin ympäristövaikutusten, taloudellisten ja sosiaalisten vaikutusten näkökulmista. Kandidaattintyötä varten tehty kirjallisuuskatsaus osoitti sen, että kiertotaloudellisesti merkittäviä näkökulmia tunnustetaan jo paljon ja niitä pystytään nimeämään ja luokittelemaan, mutta yhtenäinen arviointijärjestelmä ja ohjeistus puuttuu kokonaan, mikä vaikeuttaa kiertotalouteen siirtymistä.

Rakennetussa ympäristössä kiertotalous sisältää useita eri teemoja, joita voidaan huomioida rakennuksen eri elinkaaren vaiheiden aikana. Tärkeimmät kehityskohteet kuitenkin liittyvät rakennuksissa olevien rakenteiden ja materiaalien kiertoon saamiseksi. Rakennusalalla kiertotalousindikaattorien tavoitteena on avustaa valtakunnallisella ja kunnallisella tasolla suunnittelun ja päätöksenteon kehittymistä, jotka tukevat näitä kiertotaloudellisia toimenpiteitä.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, minkälaisilla indikaattoreilla rakenteiden kiertotalouden mukaisuutta voidaan mitata. Kun tarkastellaan rakenteita niiden suunnitteluvaiheessa, aluksi pitää tunnistaa teemat, jotka voivat edistää kiertotaloutta. Kerätyn aineiston mukaan näitä teemoja ovat esimerkiksi uudelleenkäyttö, kierrätys, turvallisuus ja terveellisyys, materiaalien puhtaus, käsiteltävyys ja palautuvuus, siirrettävyys, yhteensopiavuus, monikäyttöisyys, kestävyys, yksinkertaisuus ja biologinen hajoavuus. Teemojen pohjalta pyrittiin etsimään rakenteille kehitettyjä tai kehitteillä olevia kiertotalousindikaattoreita, jotka huomioisivat mahdollisimman montaa teemaa.

Rakennusmateriaalien hyödyntämispotentiaali-indeksi ja rakenteiden siirtokapasiteetti-indikaattori valikoituivat tutkimuksen kiertotalousindikaattoreiksi. Kyseisten indikaattoreiden etuina verrattuna muihin kirjallisuudessa olleisiin indikaattoreihin oli nimenomaan niiden soveltuvuus rakenteisiin ja se, että indikaattorit sisälsivät useita eri kiertotalouden teemoja. Lisäksi niistä tapaustutkimuksissa saadut tulokset vaikuttivat lupaavilta. Kuitenkin käytännön toteutuksen kannalta molemmat indikaattorit ovat vielä melko monivaiheisia, joten sellaisinaan ne eivät ole kaikista optimaalisimpia ja käyttäjäystävällisimpiä rakenteiden kiertotaloudellisuuden mittaamiseen.

Rakenteiden kiertotaloudellisuuden arviointiin liittyviä menetelmiä sekä työkaluja kehitetään koko ajan ja niiden tarve on merkittävä, sillä nykyiset luokitusjärjestelmät eivät vastaa kiertotalouden arviointitarpeeseen tarpeeksi kattavasti. Kun kiertotalouteen liittyvä kehitystyö on siinä pisteessä, että rakenteiden kiertotalousindikaattoreihin liittyvät ratkaisut ovat konkreettisia ja yhdenmukaisia, kiertotalouteen siirtyminen on vaivatonta. Tällöin esimerkiksi rakennesuunnittelijat pystyvät suunnittelemaan rakenteita kiertotaloudellisesti, jolloin rakennusalan siirtyminen kokonaisuudessaan lineaarisesta talousmallista kiertotalousmalliin on lähempänä toteutumista.

7. LÄHTEET

Akhimien, N. G., Latif, E. & Hou, S. S. (2020). Application of circular economy principles in buildings: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 23527102. 10.1016/j.jobe.2020.102041.

Andrade, J. B. & Bragance, L. (2019). Assessing buildings' adaptability at early design stages. *Earth and Environmental Science*, 17551307. 10.1088/1755-1315/225/1/012012.

Antonini, E., Boeri, A., Lauria, M. & Giglio, F. (2020). Reversibility and Durability as Potential Indicators for Circular Building Technologies. *Sustainability*, 20711050. 10.3390/su12187659.

Cambier, C., Galle, W. & De Temmerman, N. (2020). Research and Development Directions for Design Support Tools for Circular Building. *Buildings*, 20755309. 10.2290/BUILDINGS10080142.

Cartwright, B., Lowres, F., Turner, E., Hobbs, G., Abis, M., Andersen, R., Bromisch, J., Charlson, A., Haaspuro, T., Maubach-Howard A., Pikkarainen P., Savvilotidou, V., Teerihalme, H., Antony van Peer, D. & Watts, A. (2021) Recommendations on circularity indicators for WP8. <https://www.circuit-project.eu/post/report-recommendations-on-circularity-indicators-for-a-circularity-dashboard>

Corona, B., Shen, L., Reike, D., Carreon, J. R. & Worrell, E. (2019). Towards sustainable development through the circular economy —A review and critical assessment on current circularity metrics. *Resources, Conservation and Recycling*, 20711050. 10.3390/su12124973.

De Oliveira, C. T., Dantas, T. E. T. & Soares, S. R. (2020). Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments. *Sustainable Production and Consumption*, 23525509. 10.1016/j.spc.2020.11.024.

Durmisevic, E. (2006). Transformable building structures: Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction (Doctoral dissertation). TUDelft. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:9d2406e5-0cce-4788-8ee0-c19cbf38ea9a?collection=research>

Ellen MacArthur Foundation (2015). Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition. EMF. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf

Green Building Council Finland. Työkalut kestävän rakennetun ympäristön suunnitteluun. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.3.2021): <https://figbc.fi/tyokalu/leed/>

Huuhka, S. (2019a). Talonrakentamisen hiilineutraaliuden ohjaaminen Tampereen Hiedanrannassa kiertotalouden keinoin. Ekokumppanit. <https://ekokumppanit.fi/wp-content/uploads/cicrhubs-talonrakentamisen-hiilineutraaliuden-ohjaaminen-tampereen-hiedanrannassa-kiertotalouden-keinoin.pdf>

Huuhka, S. (2019b). Rakennusten ja rakentamisen kiertotalous. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.3.2021): <https://www.novia.fi/assets/CE-wood/190509/Huuhka190509-rakennusten-ja-rakentamisen-kiertotalous.pdf>

Julkaisufoorumi. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.4.2021): <https://www.tsv.fi/julkaisufoorumi/haku.php>

Lieder, M., Farazee, M. & Rashid, A. (2017). Towards circular economy implementation in manufacturing systems using a multi-method simulation approach to link design and business strategy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 02683768. 10.1007/s00170-017-0610-9.

Luoma, P., Larvus, L., Hjelt, M., Päälyysaho, M. & Aho, M. (2015). Miten kiertotalouden kehitystä mitataan? Gaia Consulting Oy. <https://media.sitra.fi/2017/02/27174938/Miten-kiertotalouden-kehitysta-mitataan-2.pdf>

Mayer, M. & Bechthold, M. (2018). Development of Policy Metrics for Circularity Assessment in Building Assemblies. *Economics and Policy of Energy and the Environment*, 22807659. 10.3280/EFE2017-001005.

Mayer, M. (2020). Material recovery certification for construction workers. *Buildings and Cities*.

McDonough, W. & Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle: Rethinking the way we make things*. North Point, NY.

Rahla, K. M., Mateus, R. & Bragance, L. (2021). Selection Criteria for Building Materials and Components in Line with the Circular Economy Principles in the Built Environment — A Review of Current Trends. *Infrastructures*, 6040049.

Rakennusteollisuus. Ympäristöluokitukset tekevät kiinteistöistä vertailukelpoisia. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.3.2021): <https://www.rakennusteollisuus.fi/TIETOALASTA/ILMASTO-YMPARISTO-JA-ENERGIA/RAKENTAMINEN-JA-VAARALLISET-AINEET/YMPARISTOLUOKITUKSET/>

Rakennustieto. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.5.2021): <https://www.rakennustieto.fi/index/tuotteet/rts-ymparistoluokitus.html>

Ruuska, A., Häkkinen, T. (2013). Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset — Taustaraportti. Saatavissa (viitattu 14.3.2021): https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2013/YM_Taustaraportti.pdf

Scopus. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.4.2021): <https://www.scopus.com/home.uri>

Seppälä, J., Sahimaa, O., Honkatukia, J., Valve, H., Antikainen, R., Kautto, P., Myllymaa, T., Mäenpää, I., Salmenperä, H., Alhola, K., Kauppila & J. Salminen, J. (2016). Kiertotalous Suomessa — toimintaympäristö, ohjauskeinot ja mallinnetut vaikutukset vuoteen 2030. VTT. https://tietokayttoon.fi/documents/10616/2009122/25_Kiertotalous+Suomessa.pdf/5a942ae7-9ec8-4b54-a079-f99c8ba2f8f1?version=1.0

SFS-EN 14044 (2018). Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja. Suomen Standarditoimistoliitto. Helsinki, 109 s.

SFS-EN 14040 (2006). Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Suomen Standarditoimistoliitto. Helsinki, 50 s.

SFS-EN 15978 (2012). Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method. Suomen Standarditoimistoliitto. Helsinki, 62 p.

SFS-EN 15804 (2019). Kestävä rakentaminen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt. Suomen Standarditoimistoliitto. Helsinki, 71 s.

YMa 477/2014. Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista. Saatavissa (viitattu 20.4.2021): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140477>