

Minna Leimu

**PANOSPAKKAUSTEN
ILMASTONMUUTOSVAIKUTUS
ELINKAARIARVIOINNILLA**
Biomateriaalien soveltuvuuden tarkastelu

Opinnäytetyö

Tekniikan ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Ympäristötekniikan koulutus

2022



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (ylempi AMK)
Tekijä/Tekijät	Minna Leimu
Työn nimi	Panospakkausten ilmastonmuutosvaikutus elinkaariarvioinnilla
Toimeksiantaja	Puolustusvoimien logistiikkalaitoksen esikunta (PVLOGLE)
Vuosi	2020
Sivut	65 sivua, liitteitä 21 sivua
Työn ohjaaja(t)	Kyösti Huhtala, Liisa Routaharju

TIIVISTELMÄ

Työn tavoite oli selvittää panospakkausten ilmastonmuutosvaikutus hiilidioksidiekvivalentteina Puolustusvoimien logistiikkalaitoksen esikunnan toimeksiannosta. Ilmastonmuutosvaikutuksen perusteella arvioitiin, miten panospakkausta tulee kehittää ilmasto- ja lämmittävän vaikutuksen pienentämiseksi. Puolustusvoimien ympäristöstrategiassa määritellään, että materiaalien elinkaaren hallinnassa tulee ottaa huomioon ympäristönsuojelulliset ja kestävä kehityksen mukaiset näkökulmat. Lisäksi opinnäytetyössä kartoitettiin kirjallisuuskatsauksella mahdollisia biopohjaisia materiaaleja ja kuvattiin elinkaariarvioinnin teoria.

Ympäristövaikutusten elinkaariarviointi on menetelmä, jonka avulla määritetään materiaalin tai palvelun koko elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset raaka-aineen hankinnasta loppusijoitukseen asti. Ympäristövaikutuksia voidaan arvioida esimerkiksi kasvihuonekaasujen ilmasto- ja lämmittävänä vaikutuksena, jolloin tulos ilmoitetaan kilogrammaa per hiilidioksidiekvivalentti. Ympäristövaikutusten elinkaariarviointia käytetään päätöksenteon tukena, tuotesuunnittelussa ja kehittämisessä, strategisessa suunnittelussa ja markkinoinnissa.

Biomateriaalit ovat moninainen ryhmä, johon kuuluvat muun muassa puupohjaiset tuotteet, biomuovit, luonnon kuidut ja nanoselluloosat. Poikkeuksena biomateriaaleihin kuuluvat myös öljypohjaiset biohajoavat muovit. Ekologisia biopohjaisia raaka-aineita saadaan metsäteollisuudesta ja maatalouden jätteistä. Biomateriaaleja käytetään esimerkiksi pakkausmateriaaleina, puukomposiiteissa, autojen sisustusmateriaaleissa ja lääketieteellisissä sovelluksissa.

Toiminnallisena yksikkönä käytettiin kahdeksaa kappaletta panospakkauksia. Panospakkaus koostuu ulkopakkauksesta, panoslaatikosta, sekä sisäpakkauksista, kahdesta panossäiliöstä. Panospakkausten ilmastonmuutospotenti- aali laskettiin 30 vuoden varastointiajalla. Panoslaatikko on hiilinegatiivinen, koska siihen käytetty puumateriaali sitoo itseensä siinä olevan hiilen. Elinkaari- laskennan mukaan ilmastoalämmittävistä päästöistä panospakkauksen panossäiliö tuottaa 55 %, varastointi 22 %, kuljetukset ja panoslaatikoiden energia käyttö 11 %. Panospakkauksien ilmastoalämmittävävaikutus on negatiivinen -55 kg hiilidioksidiekvivalenttia.

Panossäiliöiden pultruusiolasikuitumateriaalin kierrättäminen sementin raaka- aineeksi pienentäisi panospakkausten ilmastonmuutosvaikutusta. Varastointi- järjestelmää voitaisiin kehittää siten, että yhdelle lavapaikalle saataisiin mahtu- maan kahdeksan panospakkausta enemmän kuin nykyään. Panossäiliö ei ole

täysin optimaalinen lähes ilmatiiviinä pakkauksena käyttötarkoitukseensa. Tämän takia kannattaa tutkia, kuinka panospakkausta voisi kehittää. Esimerkiksi sisäpakkauksena toimii puolijohtava hermeettinen muovipussi ja ulkopakkauksena puristekuitua, johon on integroitu hihna helpottamaan kantamista, kun panospakkaus ei ole lavalla.

Asiasanat: biopohjaiset materiaalit, biomateriaalit, elinkaariarviointi, LCA, GWP, ilmastonmuutos, panospakkaus

Degree title	Master of Engineering
Author (authors)	Minna Leimu
Thesis title	The climate impact of artillery charge packages by life cycle assessment
Commissioned by	The Finnish Defence Force Logistics Command (PVLOGLE)
Time	2022
Pages	65 pages, 21 pages of appendices
Supervisor	Kyösti Huhtala, Liisa Routaharju

ABSTRACT

The aim of the thesis was to determine the climate impact of artillery charge packages as carbon dioxide equivalents commissioned by PVLOGLE. Based on the impact of climate change, it was found that the artillery charge packages should be developed to reduce their impact on global warming. The Finnish Defence Forces' environmental strategy defines that environmental and sustainability perspectives must be considered in the management of the material life cycle. In addition, a literature review surveyed possible bio-based materials and presented theory of life cycle assessment.

The environmental impact life cycle assessment is a method to determine the environmental impact of a material or service throughout its life cycle, from raw material procurement to disposal. Environmental impacts such as the climate-warming effect of greenhouse gases can be assessed, whereby the result is reported per kilogram of carbon dioxide equivalent. The environmental impact lifecycle assessment is used to support decision-making, product design and development, strategic planning, and marketing.

Biomaterials are a diverse group that includes, among others, wood-based products, bioplastics, natural fibers and nanocellulose. The biomaterials also include oil-based biodegradable plastics. Ecological bio-based raw materials are obtained from the forestry industry and agricultural waste. Biomaterials are used, for example, as packaging materials, wood composites, automotive interior materials, and medical applications.

In this thesis, eight pieces of artillery charge packages were used as a functional unit. The artillery charge package consists of secondary packaging, an artillery charge crate, and a primary packaging, including two artillery charge containers. The climate change potential of an artillery charge packages was calculated with the potential of thirty years of storage. The study showed that the artillery charge crate is carbon negative because the wood material used for its construction binds the carbon contained within it. The artillery containers contributes 55 % of emissions, storage contributes 22 %, finally transports and artillery charge crate both contributes 11 %. The climate-warming effect of the artillery charge packages is therefore negative -55 kg of carbon dioxide equivalent.

The reuse of pultrusion glass fiber material from artillery charge containers as a raw material for cement would reduce the climate change impact of the artil-

lery charge packages. The storage system could be developed to allow a single flatbed to accommodate four more the artillery charge packages than current standards. The artillery charge container is not completely optimal as almost hermetic packaging for its purpose of use. For this reason, it is worth exploring how to further develop artillery charge packages. For example, a primary package includes a semi-conductive hermetic plastic bag, and a secondary package which would be composed of compression fiber with an integrated strap. The strap would make it easier to carry an artillery charge package when the package is not on a flatbed.

Keywords: bio-based materials, biomaterials, life cycle assessment, LCA, global warming potential, GWP, artillery charge package

SISÄLLYS

MÄÄRITELMÄT	9
1 JOHDANTO	12
2 YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ELINKAARIARVIOINNIN TEORIA	13
3 PAKKAUKSET JA PAKKAAMINEN	15
3.1 Teoreettinen tausta pakkauksiin ja pakkaamiseen	15
3.1.1 Materiaalien läpäisevyys	17
3.1.2 Materiaalien valonsuojaus	18
3.2 Panospakkaus	20
3.3 Panospakkauksen materiaalivaatimukset	21
3.4 Panossäiliön lasikuitumateriaalin kierrätys ja uusiokäyttö	22
4 BIOMATERIAALIT PAKKAUSMATERIAALEINA	23
4.1 Puu- ja sellupohjaiset sovellukset	24
4.1.1 Puu	25
4.1.2 Vaneri	26
4.1.3 Paperi, kartonki ja aaltopahvi	27
4.2 Biomuovit	31
4.2.1 Biomuovien raaka-aineet	32
4.2.2 Muovien ominaisuudet	34
4.3 Biokomposiitit	35
4.3.1 Luonnonkuidut	36
4.3.2 Luonnonkuitujen ja muovimatriisien muokkaaminen	37
4.4 Bionanomateriaalit	39
4.5 Pinnoitemateriaalit eli barrierit	41
4.6 Biomateriaalien muita käyttötarkoituksia	41
5 TUTKIMUSAINEISTO JA MENETELMÄT	43
5.1 Kirjallisuuskatsaus biomateriaalien soveltuvuuteen panospakkaukseen	43

5.2	Elinkaariarvioinnin tekeminen.....	43
5.2.1	Asiantuntijahaastattelut	44
5.2.2	Panospakkausten elinkaariarviointi	44
6	TUTKIMUSTULOKSET	49
6.1	Panospakkausten ilmastonmuutosvaikutus nykyisellä konstruktiolla	51
6.2	Panospakkausten varastotiheyden kasvattaminen.....	52
6.3	Panospakkausten panossäiliöiden ilmastonmuutosvaikutus ja käyttö sekundäärisenä raaka-aineena.....	54
6.4	Biomateriaalien käytettävyys panospakkausten ilmastonmuutosvaikutuksen pienentämiseksi	54
7	TULOSTEN TARKASTELU.....	55
8	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	58
	LÄHTEET	59

LIITTEET

Liite 1. Ympäristövaikutuksien elinkaariarviointi (LCA)

Liite 2. Panospakkauksien elinkaariarvioinnin prosessikaavio
GaBilla

Liite 3. Panoslaatikon massan ja ilmastonmuutosvaikutuksen prosentuaaliset osuudet arvioidessa elinkaariarvioon mukaan otettavat osa-alueet

Liite 4. Panossäiliön massan ja ilmastonmuutosvaikutuksen prosentuaaliset osuudet arvioidessa elinkaariarvioon mukaan otettavat osa-alueet

Liite 5. EcoCalculatorilla yhden panossäilön putken ilmastonmuutosvaikutus

Liite 6. EcoCalculatorilla yhden panossäilön kannen ilmastonmuutosvaikutus

Liite 7. EcoCalculatorilla yhden panossäilön pohjan ilmastonmuutosvaikutus

Liite 8. GaBilla yhden panossäilön ilmastonmuutosvaikutus

Liite 9. Elinkaariarviointiin käytettävät laskentaohjelmistot

Liite 10. Panospakkausten elinkaariarvioinnin tulokset nykyisellä konstruktiolla

Liite 11. Panospakkausten elinkaariarvioinnin tulokset suuremmalla varastointitiheydellä

MÄÄRITELMÄT

Adheesio	Kahden aineen välinen fyysinen vetovoima tai sidos.
Asetylointi	Menetelmä, joka parantaa kuidun ja muovimatriisin adheesiota
Barrier	Estokerros, jolla pinnoitetaan materiaali.
Biohajoava	Eri mikro-organismit hajottavat materiaalin siten, että siitä syntyy hiilidioksidia (tai metaania), vettä ja biomassaa. Biohajoavuus riippuu ajasta sekä ympäristöstä.
Biokomposiitti	Biokomposiitiksi luokitellaan komposiitti, jossa vähintään matriisi, lujite tai täyteaine on biopohjainen.
Biomuovi	Biomuovi voi olla biopohjainen biohajoava, biopohjainen ei-biohajoava tai fossiilinen biohajoava.
Bio-PE	Biopohjainen polyeteeni, ei-biohajoava.
Bio-PET	Biopohjainen polyeteenitereftalaatti, suurin osa vain osittain biopohjaisia, ei-biohajoava
Biopohjainen	Eloperäinen, uusiutuvaa alkuperää oleva raaka-aine
Cel	Sellulaasientsyymi kykenee hajottamaan selluloosaa
Dimensio	Fysiikan suure, joka tässä työssä kuvaa materiaalin kolmea ulottuvuutta pituus, leveys ja korkeus.
Drop-in-biomuovit	Ominaisuudet ja kemiallinen rakenne täysin identtinen fossiiliseen muoviin verrattuna.
Ensikuitu	Ensikuiduksi kutsutaan puukuitua, jota prosessoidaan ensimmäistä kertaa.
Entsyymi	Entsyymit ohjaavat biokemiallisia prosesseja. Entsyymit toimivat erittäin spesifejä ja vaikuttavat vain tiettyyn reaktioon. Tämän takia entsyymien käyttö
GaBi	Ympäristön vaikutuksien elinkaariarviointiohjelmisto.
GWP	Ilmaston lämpenemispotentiaali hiilidioksidiekvivalen- teiksi muunnettuna, Global Warming Potential
Hermeettinen	Ilmatiivis
Karboksyylirakenne	Hydroksyyli (-OH) ja karbonyyli (-C=O) muodostavat funktionaalisen eli toiminnallisen karboksyyliryhmän.
KiMuRa-projekti	Komposiittijätteen reitti <u>kierrätetyksi</u> ja <u>murkatuksi raaka-aineeksi</u> komposiittijätteen sementtiklinkkerin rinnakkaisprosessissa.

Komposiitti	Muovista ja lujitemateriaalista valmistettu tuote. Muovi toimii matriisina, joka määrittää tuotteen muodon ja lujiteaineella saadaan haluttu kestävyys.
Lac	Lakkaasientsyymi hapettaa aromaattisia eli rengasraken- teisiä yhdisteitä. Lakkaasia käytetään selluteolli- suudessa ligniinin poistamiseen ja sellun valkaisu- seen.
LCA	Ympäristövaikutuksien elinkaariarviointi, Life Cycle Assessment
Lujitemateriaali	Komposiitissa lujitteena käytettävä kuitumateriaali, voi olla synteettinen- tai luonnonkuitu.
Matriisi	Matriisi antaa komposiitille muodon. Matriisi on bio- tai öljypohjaista muovia.
MFC	Microfibrillar cellulosa, mikrokuituselluloosa.
Nanomateriaali	Koko vähintään yhteen suuntaan alle 100 nm
NFC	Nanofibrillar cellulosa, nanokuituselluloosa.
PA	Polyamidi, öljypohjainen muovi.
PBAT	Polybuteeni-adipaatti-tereftalaatti, öljypohjainen muovi, biohajoava
PC	Polykarbonaatti, öljypohjainen, ei-biohajoava muovi.
PCL	Polykaprolaktoni, öljypohjainen muovi, biohajoava
PE	Polyeteeni, öljypohjainen, ei-biohajoava muovi
PG	Polygalakturonaasi on yksi pektinaaseista, jotka ha- jottavat kasvien soluseiniä.
PHA	Polyhydroksialkaonaatti, biopohjainen, biohajoava muovi.
PLA	Polylaktaattihappo, biopohjainen, biohajoava muovi.
PS	Polystyreeni, öljypohjainen, ei-biohajoava muovi.
Polaarinen	Molekyylin elektronit jakautuvat epätasaisesti mole- kyylin atomien välillä, jolloin molekyylin toinen osa on positiivisesti varautunut ja toinen osa negatiivisesti varautunut.
Polaariton	Molekyylin elektronit ovat jakautuneet lähes tasan atomien välillä, jolloin molekyylille ei synny heikkoa ulkoista varausta.
Primääripakkaus	Tuotetta lähinnä oleva pakkaus
PP	Polypropeeni, öljypohjainen, ei-biohajoava muovi.

Pullulaani	Pullulaani on polysakkaridi, jota tuottaa <i>Aureobasidium pullulans</i> -sieni.
Reologia	Oppi aineen muodonmuutos- ja virtausominaisuuksista
Sekundaaripakkaus	Sitoo primääripakkauksia yhteen.
Tertiääripakkaus	Sitoo yhteen useita sekundaaripakkauksia, lava-kuorma
ThinkStep	GaBin tietokannat
Uusiokuitu	Kierrätetystä paperista tai pahvista valmistettu kuitu.
Vihreä pakkaaminen	Green packaging. Pakkausmateriaalit kokonaan biopohjaisia.
Yksikköpakkaus	Pienin tuotepakkaus, käytännössä usein sama kuin kuluttajapakkaus.
Xyl	Ksylanaasientsyymi katalysoi ksylaanipolysakkaridien hydrolyysia ksyloosimonomeereiksi. Ksylanaasia käytetään paperiteollisuudessa sellun valkaisuun.

1 JOHDANTO

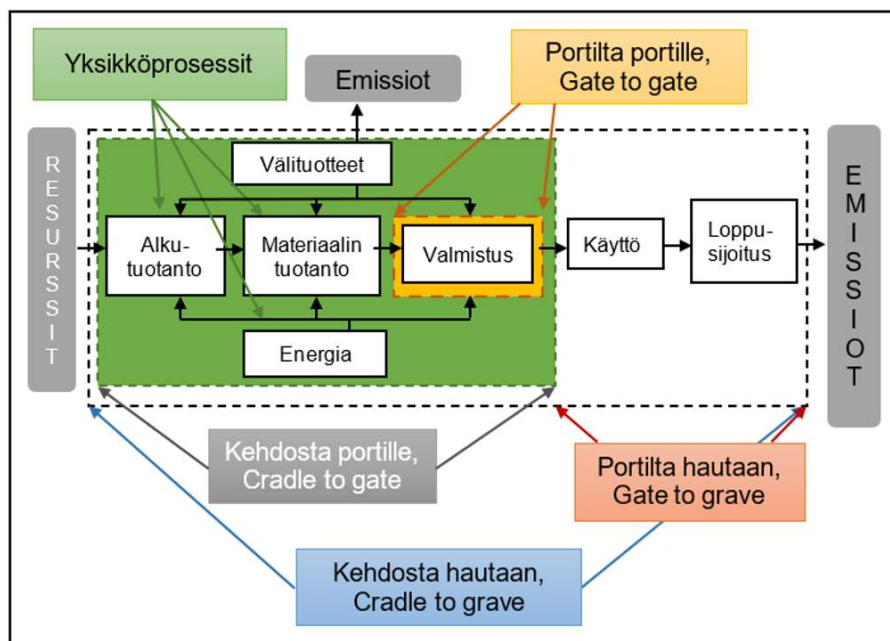
Tutkimuksessa määritetään panospakkausten ilmastonmuutosvaikutus hiilidioksidiekvivalenttina ympäristövaikutuksen elinkaariarvioinnilla. Elinkaariarviointi on menetelmä, jolla määritetään tuotteen tai palvelun ympäristöön kohdistuva vaikutus raaka-ainetuotannosta loppusijoitukseen asti. Tämän pohjalta arvioidaan, miten panospakkausta tulisi kehittää ilmastoa lämmittävän vaikutuksen pienentämiseksi. Puolustusvoimien toiminnassa Suomessa pakataan tarvikkeita monenlaisista materiaaleista valmistettuihin pakkauksiin, kuten esimerkiksi puuhun ja lasikuituun. Tarvikkeita säilytetään erilaisissa olosuhteissa, kuten luolissa, maapeitteisissä halleissa ja varastoissa. Säilytysajat ovat jopa 30–50 vuotta.

Tutkimuksen kohteena on panospakkaus, joka koostuu panoslaatikosta ja kahdesta panossäiliöstä. Panospakkaus varastoidaan maapeitteiseen halliin, jonka kosteus pidetään vakiona. Puolustusvoimien ympäristöstrategiassa (s.a.,3) määritetään, että materiaalien elinkaaren hallinnassa tulee ottaa huomioon ympäristönsuojelulliset ja kestävän kehityksen mukaiset näkökulmat. Puolustusvoimille ympäristövastuullisuudessa on tärkeää, että ”ympäristönäkökohdat huomioidaan kaikessa toiminnassa, suunnitteluvaiheista alkaen.” (Puolustusvoimien ympäristöstrategia s.a., 5).

Kirjallisuuskatsauksessa esitellään kattavasti vaihtoehtoisia biopohjaisia materiaaleja, jotka soveltuvat pakkausmateriaaleiksi. Kuinka öljypohjaisia pakkausmateriaaleja voitaisiin korvata biopohjaisilla pakkausmateriaaleja. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta esitetään alustavia vaihtoehtoja ekologisemmalle panospakkaukselle. Tutkimuksen rajauksen vuoksi näiden osalta ei suoritettu elinkaariarviointia. Työ on tarkoitettu Puolustusvoimien logistiikkalaitoksen sisäiseen käyttöön.

2 YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ELINKAARIARVIOINNIN TEORIA

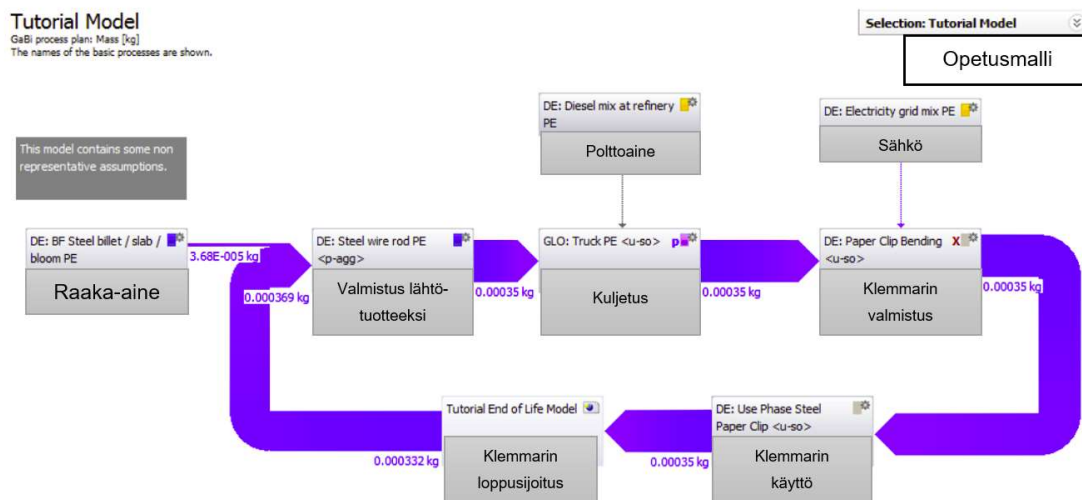
Ympäristövaikutusten elinkaariarviointi on menetelmä, jonka avulla määritetään materiaalin tai palvelun koko elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset raaka-aineen hankinnasta loppusijoitukseen asti tai raaka-aineen hankinnasta valmiiksi tuotteeksi (kuva 1). Ympäristövaikutuksia voidaan arvioida esimerkiksi kasviuonekaasujen ilmastoa lämmittävänä vaikutuksena, jolloin tulos ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttina. Elinkaariarviointi perustuu standardeihin SFS-EN ISO 14040, yleinen sisältö ja SFS-EN ISO 14044:2006 + A1:2018, laskennan suorittaminen. Ympäristövaikutusten elinkaariarviointia käytetään tuotesuunnitteluun ja -kehittämiseen, strategiseen suunnitteluun sekä päätöksenteon tukena ja markkinoinnissa. (SFS-EN ISO 14044: 2006, 7–8 & 27.)



Kuva 1. Ympäristövaikutuksen elinkaariarvioinnin rajausvaihtoehtoja (GaBi s.a., 15 mukaillen)

Ympäristövaikutusten elinkaariarviointi koostuu neljästä vaiheesta. Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelystä, inventaarioanalyysistä, vaikutusten arvioinnista ja tulosten tulkinnasta. Elinkaariarviointi alkaa tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyllä. Määrittelyn tulee vastata kysymyksiin, miksi arviointi tehdään, mihin sitä käytetään, mikä on sen kohdeyleisyys ja julkaisumuoto ja tuleeko se omaan vai julkiseen käyttöön. Tämän jälkeen valitaan toiminnallinen yksikkö, joka vastaa arvioinnin tarpeita. Toiminnallinen yksikkö voi olla esimerkiksi palvelu tai tuote. Järjestelmä rajataan tavoitteiden mukaisesti. Tuotejär-

jestelmän materiaali-, syöte- ja energiavirtojen hahmottamista helpottaa prosessikaavion tekeminen, kuten kuvassa 2 esitetään. (SFS-EN ISO 14044: 2016 + A1: 2018, 15–16.)



Kuva 2. Prosessikaavion käyttö helpottaa tuotejärjestelmän hahmottamista (GaBi s.a., 30 muokailen)

Inventaarioanalyysissä kerätään kaikki tarvittavat tiedot, joita materiaalivirrat yhdistävät. Tietojen ja laskentamenettelyn dokumentoinnin tulee olla tarkkaa ja johdonmukaista. Siinä tulee huomioida mitä vaikutusluokkaa tai -luokkia käytetään vaikutusten arvioinnissa, esimerkiksi kasvihuonekaasujen ilmastoalämmittävä vaikutus. Tulosten tulkinnassa varmistetaan, että tiedot ovat riittävät ja rajaus on tehty tavoitteiden mukaisesti. (SFS-EN 14044: 2006 + A1: 2018, 19–20 & 32–33.)

Ympäristövaikutuksien elinkaariarviointi soveltuu sekä jo käytössä olevien materiaalien kehittämiseen että uusien materiaalien vertailuun ja kehittämiseen. Elinkaariarvioinnilla voidaan tunnistaa ympäristöön ja henkilöstöön liittyviä riskejä, kun vaikutuksen arviointiluokkiin otetaan mukaan riskit ympäristölle, kuten happamoituminen ja esimerkiksi humaanitoksisuus ihmisille. Tuotejärjestelmän yksityiskohtainen tuntemus nostaa esille niin raaka-aineisiin kuin prosessiin liittyvät riskitekijät. Elinkaariarvioinnin avulla pystytään pienentämään kustannuksia, kun arvioinnin avulla löydetään tehostamismahdollisuuksia materiaalissa, logistiikassa ja/tai varastoinnissa. Ympäristövaikutuksien elinkaari-

riarvioinnin käyttö parantaa uskottavuutta ympäristön vaikutuksien hallinnassa. Liitteessä 1. esitellään ympäristövaikutuksien elinkaariarviointi tarkemmin. (SFS-EN 14044: 2006 + A1: 2018, 7–8.)

3 PAKKAUKSET JA PAKKAAMINEN

Kasvava huoli pakkauksien aiheuttamasta ympäristö- ja ilmastoa lämmittävästä vaikutuksesta, sekä loppusijoitusongelmat ovat lisänneet biopohjaisten pakkausmateriaalien tutkimusta. Tarkoituksena on selvittää, kuinka öljypohjaisia pakkausmateriaaleja voitaisiin korvata biopohjaisilla pakkausmateriaaleilla. Myös pakkauskoon optimoiminen logistiikan kannalta on tärkeää. (Matuana ym. 2021, 1–2.)

3.1 Teoreettinen tausta pakkauksiin ja pakkaamiseen

Pakkauksen tarkoituksena on suojata pakattava materiaali ulkoisilta vaikutuksilta, sekä suojata ihmisiä ja ympäristöä pakattavalta materiaalilta. Pakkaus jaetaan sisä-, väli- ja ulkopakkaukseen. Välipakkausta käytetään tuentaan, eikä sitä ole kaikissa pakkauksissa. Sisäpakkauksella on kontaktipinta pakattavaan materiaaliin, joten pakkauksen tulee olla yhteensopiva kyseisen materiaalin kanssa. Ulkopakkauksen tehtävä on suojata materiaalia ja sisäpakkaukselta vaurioitumiselta kuljetuksessa ja varastoinnissa. Sisä- ja ulkopakkaus voivat olla erilliset pakkaukset tai osa samaa pakkausta. (Foster 2009, 162; Bix 2009, 859–862.)

Pakkaaminen jaetaan myöskin kolmeen tasoon; primääri- eli kuluttajapakkaus, sekundaari- eli ryhmäpakkaukseen ja tertiääri- eli kuljetuspakkaukseen. Yhdessä kuluttajapakkausessa voi olla useita pienempiä pakkauksia, kuten esimerkiksi kartonkilaatikossa myytävät yksittäispakatut välipalakeksit. Primääripakkaus sisältää siis vähintään sisäpakkauksen, mutta siihen voivat kuulua myös väli- ja ulkopakkaus. Mikäli primääripakkaukseen eivät sisälly väli- ja ulkopakkaus, silloin ne ovat osa sekundaaripakkausta. (Säilä 2021, 12.)

Ryhmäpakkausta käytetään nimensä mukaisesti helpottamaan kuluttajapakkausten käsittelyä. Esimerkiksi välipalakeksien kartonkilaatikat ovat pakattuina

aaltopahvilaatikkoon. Kuljetuspakkauksia käytetään ryhmäpakkausten ko-koamiseen kuljetuksen helpottamiseksi. Tyypillinen kuljetuspakkaus on esi-merkiksi kuormalavan päälle pakatut ryhmäpakkaukset, jotka on kiinnitetty la-vaan muovikalvolla tai lavakauluksilla. (Emblem 2012, 6–7.)

Kaikkien pakkaustyyppien tulee kestää niihin kohdistuva rasitus koko elinkaa-ren ajan, sisältäen pakkausmateriaalin valmistamisen, pakkaamisen, kuljetuk-sen aikaiset mekaaniset rasitukset, sekä lämmön ja kosteuden vaihtelut. Myös käytön aikaiset rasitukset on huomioitava. Pakkausmateriaalien testaamisella todennetaan, että se täyttää sille asetetut vaatimukset. Lisäksi tulee testata, että sekä primääripakkaus että sekundaaripakkaus toimivat suunnittelun mu-kaan. (Jokela ym. 2021a, 422.)

Pakkausmateriaalin yleisiä testausmenetelmiä esitellään taulukossa 1. Tes-tausmenetelmät auttavat ymmärtämään, miten erityyppisiä rasituksia pak-kauksien tulee kestää. Eri pakkausmateriaaleille on omanlaisiaan testejä. Joustopakkausista testataan muun muassa vetolujuutta, kihartavuutta, kit-kaa, adheesiota, sauman lujuutta ja mikroreikätestiä. Aaltopahvista testataan taas reunalitistys-, puhkaisu- ja litistyslujuutta, nelipistetaivutusta, kitkaa ja pu-ristuslujuustestejä. Lisäksi monille pakkauksille tehdään pudotustestejä. Vaa-rallisten aineiden pakkauksilla on omat testinsä pudotuksista ja pinottavuuk-sista. (Jokela ym. 2021a, 421–426.)

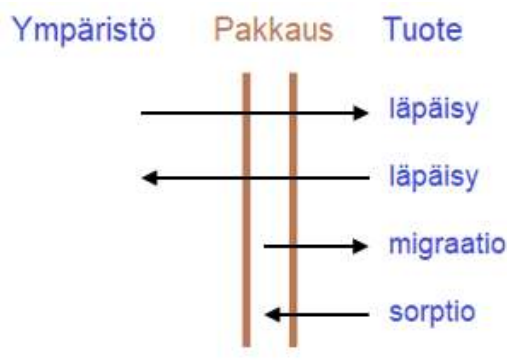
Taulukko 1. Pakkausten testausmenetelmiä (Jokela 2021, 428–431)

Nimi	Menetelmä
Migraatiotesti	Testataan suoraan tuotteen kanssa kosketuksessa oleva pakkausmateriaali. Tutkitaan ettei tuotteeseen liukene pak-kauksesta aineita tiettyä painomäärää enempää.
Aistinvarainen arviointi	Tutkitaan, vaikuttaako pakkausmateriaali haitallisesti tuotteen hajuun ja makuun.
Tiiveystesti	Pakkausmateriaaleista ja pakkauksista tutkitaan esimerkiksi vesihöyryn-, hapen- tai muiden kaasujen läpäisevyyttä ja ras-vantiiveyttä.
Kitkatesti	Tutkitaan pakkausmateriaalin kitkaa. Esimerkiksi pysyykö pakkausmateriaali pakkauskoneessa tai pahvilaatikot pinot-tuna kuljetuksessa.

Puhkaisulujuus	Tutkitaan kuitulujuutta. Esimerkiksi kartongin ja aaltopahvin lujuuden määrittämiseen.
Pudotustesti	Pudotukset tehdään eri korkeuksilta. Pakkaus kohtaa esteen pohjallaan, kyljellään ja kulmallaan. Vaarallisten aineiden pakkausten tulee läpäistä pudotustestit kovalle alustalle.

3.1.1 Materiaalien läpäisevyys

Pakkauksen sisäpuolen ja ulkopuolen olosuhteet pyrkivät tasapainoon toisiinsa nähden. Aineet liikkuvat neljällä tavalla pakkauksen ja tuotteen välillä. Tavat ovat läpäisy sekä ympäristöstä tuotteeseen, että tuotteesta ympäristöön, migraatio ja sorptio (kuva 3). Migraatiossa pakkauksesta liukenee tuotteeseen yhdisteitä, mikä voi heikentää tuotteen makua, säilyvyyttä tai rakennetta. Sorptiossa tuotteesta siirtyy yhdisteitä pakkausmateriaaliin. Tyypillisesti tasapainoon pyrkivät aineet ovat kaasuja, kuten esimerkiksi happi, hiilidioksidi ja vesihöyry; nesteitä, rasvoja tai muita pienimolekyylisiä aineita, jotka liukenevat pakkausmateriaaliin. Mekanismit siihen, kuinka hyvin jokin aine läpäisee materiaalin, eivät ole yksinkertaisia. Kaasujen läpäisevyydestä ei pystytä tekemään johtopäätöstä siitä, miten vesihöyry läpäisee materiaalin. (Koivula & Kuusipalo 2021, 45.)



Kuva 3. Aineiden liikkuvuus pakkausmateriaaleissa (Koivula & Kuusipalo 2021, 44 mukailten)

Materiaalien läpäisevyyteen vaikuttavat useat tekijät, kuten materiaalin pakkaus, käyttöolosuhteet, sekä materiaalin kemiallinen ja molekulaarinen rakenne. Materiaalien moolimassalla ja muovien polymeeriketjujen pituudella on vain hieman merkitystä läpäisevyyteen. Tärkeämpi suure on materiaalin tiheys. Mitä tiheämpää materiaali on, sitä hitaammin kaasut läpäisevät sen. Kaasun läpäisevyys on kääntäen verrannollinen materiaalin paksuuteen eli

mitä paksumpi kalvo, sen vaikeampaa kaasun on läpäistä sitä. (Syväne 2021, 139–141.)

Lämpötila vaikuttaa kaasujen aktiivisuuteen ja pakkausmateriaalin koostumukseen. Lämpötilan kasvaessa molekyylit liikkuvat nopeammin, jolloin monet materiaalit pehmenevät. Pehmeä materiaali on vaivattomammin läpäistävää. Polymeereillä kaasujen läpäisevyys on lasittumislämpötilan alapuolella heikkoa. Pakkausmateriaalin kosteuden absorbointi, tasapainottuminen ympäristön ilman kosteuteen, vaikuttaa joidenkin materiaalien kaasunläpäisykertoi-
miin. (Syväne 2021, 140.)

Pienten kaasumolekyylien materiaalin läpäisevyyteen vaikuttavat myös aineen virtaus huokosten ja mikroreikien läpi sekä aineen aktiivinen diffuusio pakkausmateriaalissa. Ohuisiin päällysteisiin ja kalvoihin syntyy helposti valmistuksessa huokoisuutta ja mikroreikiä. Jos mikroreikä ulottuu läpi kalvon tai päällystemateriaalin, kaasut ja höyryt kulkeutuvat kapillaarivirtauksella kalvon läpi. Mikroreikäisiä pakkausmateriaaleja voidaan hyödyntää esimerkiksi hedelmien ja kasvien säilytyksessä. Mikroreikäisillä kalvoilla säädellään kaasujen vaihtuvuutta pakkauksen sisällä ja säilyvyyttä saadaan parannettua. (Koivula & Kuusipalo 2021, 45–46.)

Diffuusio perustuu molekyylien pyrkimykseen saavuttaa tasapaino ympäristön kanssa, eli molekyylit liikkuvat suuremmasta pitoisuudesta pienempään pitoisuuteen. Pakkausmateriaalin sisä- ja ulkopuolella on eri kaasujen osapaine, joka aiheuttaa liikkeen korkeamman osapaineen puolelta materiaalin pinnalle ja liukenemisen polymeerimatriisiin. Tämän jälkeen molekyylit diffundoituvat, siirtyvät väliaineessa pienemmän pitoisuuden suuntaan, polymeerimatriisin läpi toiselle pinnalle. Viimeiseksi aine desorptioituu alemman osapaineen puolelle polymeerimatriisin pinnasta. Kaasumolekyylin koon lisäksi aineen diffundoitumiskykyyn vaikuttavat sen läpäisevyyskerroin sekä lämpötila. (Koivula & Kuusipalo 2021, 46–48.)

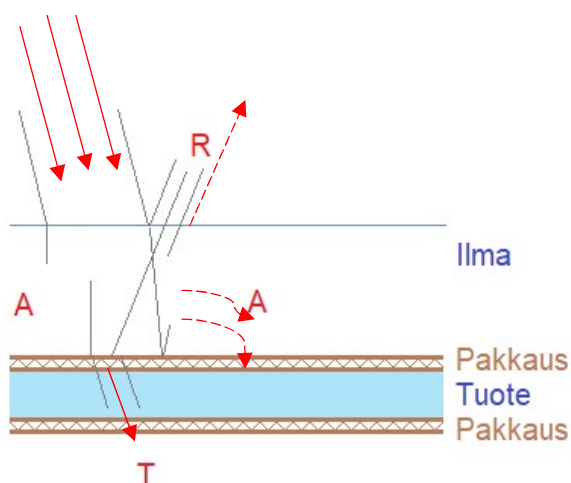
3.1.2 Materiaalien valonsuojaus

Pakkauksen tulee suojata tuotetta myös valolta. Erityisesti lyhyillä aallonpituuksilla olevat ultraviolett- eli UV-säteet voivat läpäistä pakkauksen, mutta

myös näkyvän valon aallonpituudet voivat aiheuttaa haittaa. Tuotteista valonherkkiä ovat muun muassa elintarvikkeet, ravintolisät ja lääkkeet. Pakkauksen valosuojauksen optimoimista vaikeuttaa kuluttajien halu nähdä ostettava tuote. Valosuojausta täytyy ajatella läpi jakeluketjun, ettei altistusta tapahdu tehtaalla, kuljetuksessa tai varastoinnissa. Valonlähteitä ovat auringon lisäksi erilaiset lamput. Led-valot tuottavat vähemmän lämpöenergiaa kuin hehkulamput ja loisteputket. Led-valojen vähäinen lämpeneminen edesauttaa myös parempaa säilyvyyttä. (Koivula & Kuusipalo 2021, 55.)

Valo on elektromagneettista säteilyä, jota kuvataan aaltoliikkeenä. Aaltoliikettä voidaan havainnoida tunnettuna aallonpituutena tai energiakvanttina, jossa on tietty määrä energiaa. Mitä lyhyempi aallonpituus valolla on, sitä enemmän siinä on energiaa. Lyhytaaltainen ultraviolettisäteily sijoittuu valon spektrin alkupäähän aallonpituusalueella 100–380 nm. Esimerkiksi UV-C-säteilyä, 100–280 nm, jota käytetään pintojen steriloimiseen, ei juurikaan esiinny luonnossa. UV-B-säteily 280–315 nm aiheuttaa ihosyöpää ja UV-A-säteilyä käytetään ihon hoitamiseen. (Koivula & Kuusipalo 2021, 55–56.)

Valon osuessa pakkauksen pintaan (kuva 4), se voi heijastua pinnasta (R), absorboitua eli imeytyä pakkausmateriaaliin (A) tai transmittoitua eli kulkeutua pakkausmateriaalin läpi (T). Pakkausmateriaalin läpäissyt valo voi heijastua tuotteen pinnasta (R), imeytyä tuotteeseen (A) tai läpäistä tuotteen (T). (Koivula & Kuusipalo 2021, 56–57.)



Kuva 4. Valon vuorovaikutus pakkaukseen ja tuotteeseen. (Koivula & Kuusela 2021, 57 mukailen)

Valon haitallisuuteen vaikuttaa tuotteen kemiallinen koostumus. Myös valon spektrijakauma, intensiteetti, altistuksen kesto, lämpötila ja valonlähteen etäisyys tuotteesta vaikuttavat haitan määrään. Tuotteen kanssa kemiallisesti reagoivat pro- ja antioksidantit ja happi nopeuttavat haitallisia reaktioita. Merkittävää on tuotteen absorboiva aallonpituus, koska vain absorboituneet valokvantit ovat kemiallisesti tehokkaita. Usein lyhytaaltainen näkyvä valo käynnistää elintarvikkeissa pilaantumisen varsinkin, jos tuotteessa on katalyyttinä toimivaa ainetta, kuten esimerkiksi riboflaviinia, E 101. Koivula & Kuusipalo 2021, 56–57.)

3.2 Panospakkaus

Puolustusvoimien materiaalien tulee kestää monenlaisia olosuhteita, eivätkä ne saa särkyä vähästä. Panospakkaukset, jonka ulkopakkaus on panoslaatikko ja sisäpakkauksena on kaksi panossäiliötä, voivat altistua lyhytaikaisesti niin vesi- kuin lumisateellekin. Niillä on riski pudota auton lavalta kuten myös päätyä toimimaan istuinalusena. Tästä huolimatta panossäiliöiden tulee olla vahingoittumattomia, kun niiden sisältö otetaan käyttöön. (Huhtala 2021.)

Panoslaatikko (kuva 5.) on höylättyä ponttilautaa, joka on ulkomitoiltaan, pituus x leveys x korkeus, 935 x 520 x 280 mm ja sisämitoiltaan 815 x 450 x 210 mm. Panoslaatikko painaa noin 20 kg. Panoslaatikko valmistetaan höylätyistä kuusiponttilaudasta, jonka kulutuspinnoilla on teräsvanteet ja jonka sisätuenta tehdään kuusivanerista. Panossäiliön korkeus on noin 800 mm ja lie-

riön sisähalkaisija on noin 165 mm. Panossäiliö valmistetaan pultruusiolasi-kuidusta, pohja ja kansi ovat ruiskuvalettua kestumuovia. Panossäiliö painaa noin 2 kg. (Mäntymaa 2021.)



Kuva 5. Panoslaatikko.

3.3 Panospakkauksen materiaalivaatimukset

Pakkauksen tulee täyttää vaarallisten aineiden tie-, lento- ja rautatiekuljetuksissa voimassa olevan ADR-sopimuksen (SopS 23/1979) vaatimukset. Pakkauksen tulee kestää kuljetus ja varastointi lämpötila-alueella $\pm 40^{\circ}\text{C}$, sekä il-mankosteuden ja -paineenvaihteluita Suomen ilmasto-olosuhteissa. Sisäpakkauksen tulee olla hermeettinen ja vähintään puolijohtava $10^{-10} - 10^2 \text{ S/cm}$. Lieriön sisähalkaisijan tarkkuus tulee olla $\pm 0,2 \text{ mm}$ ja sisäkorkeuden osalta $\pm 1,0 \text{ mm}$. Sisäpakkauksen tulee olla ruudin kanssa yhteensopiva. Mikäli yksi panossäiliö räjähtää, räjähdys ei saa välittyä vieressä oleviin panossäiliöihin. Räjähdyksen välittyminen voidaan estää turvavälillä tai sopivalla ulkopakkauks-materiaalilla. (Mäntymaa 2021.)

Pakkausmateriaalien pitää pysyä käyttökelpoisina 30–50 vuoden säilytysaika. Ulkopakkauksen tulee kestää vesisadetta ja siten suojata sisäpakkausta. Pakkauksen tulee olla käyttökuntoinen vedelle altistumisen jälkeen. Sisäpakkauksen hermeettisyys on kuitenkin tärkeää ruudin säilymisen varmistamiseksi. (Mäntymaa 2021.)

3.4 Panossäiliön lasikuitumateriaalin kierrätys ja uusiokäyttö

Muovimateriaalin kierrätystavoitteet tiukentuivat vuoden 2022 alussa, kun laki jätelain muuttamisesta 5.11.2021/917 astui voimaan. Valtioneuvoston asetus 2.5.2013/331 26 § ja 53 § kielsi yli 10 % orgaanista ainetta sisältävien jätteiden sijoittamisen kaatopaikalle. Lujitemuovi sisältää normaalisti yli 50 % kestomuovihartsia, joten lujitemuovia saa sijoittaa kaatopaikalle ainoastaan erikoisluvalla. (Blom & Duft 2016, 5.) Hallituksen esityksen 23.5.2021/40 vp mukaan, joka perustuu pakkausjätedirektiiviin, pakkausmateriaaleista muovista tulee kierrättää vuonna 2025 (massa-%) 50 %, kun tämänhetkinen tavoite on 22,5 %. Tulee huomioida, että jätelain 17.6.2011/646 4 § säädetään lain soveltamisesta puolustusvoimissa. Mikäli jätelain noudattaminen vaarantaisi Suomen turvallisuuden tai huoltovarmuuden lakia ei sovelleta puolustusvoimien toiminnassa. Tulee huomioida, että lain periaatteita tulee noudattaa mahdollisimman laajasti ottaen kuitenkin huomioon huoltovarmuuden.

Jätelaki 17.6.2011/646, joka perustuu EU:n jätedirektiiviin 19.11.2008/98/EY), määrittää jätehuollon etusijajärjestyksen. Etusijajärjestyksessä määritetään, että jätteen määrää ja haitallisuutta tulee vähentää. Jäte tulee uudelleen käyttää, mikäli mahdollista tai se tulee kierrättää. Jollei kierrätys onnistu, jäte tulee hyödyntää esimerkiksi energiaksi. Mikäli tämäkään ei onnistu, jäte loppusijoitetaan.

Blomin ja Duftan (2016, 15.) tutkimuksesta ilmenee, että lujitemuovia voidaan taloudellisesti kannattavasti hyödyntää sementin valmistukseen. Lujitemuovin käyttö sementin valmistuksessa olisi uudelleenkäyttöä, koska kaksi kolmasosaa käytettäisiin sementin raaka-aineena ja yksi kolmasosa polttoaineena. Lujitemuovin uudelleenkäyttö sementin raaka-aineeksi ei kuitenkaan ole mahdollista tällä hetkellä, koska materiaalin keräilyä ei ole saatu toimivaksi (Kääntee 2021). Vuonna 2020 käynnistyi KiMuRa-projekti, jossa pyritään ratkaisemaan lujitemuovijätteen keräilyyn liittyvät ongelmat (Tavoitteena kartoittaa s.a.).

4 BIOMATERIAALIT PAKKAUSMATERIAALEINA

Biomateriaaleja käytetään paljon pakkausmateriaaleina, muun muassa aaltopahvi on massallisesti eniten käytetty pakkausmateriaali. Haasteena on korvata öljypohjaiset pakkausmateriaalit, kuten esimerkiksi pakkauskalvot, kanisterit ja lääkepakkaukset biomateriaaleilla. Muovin korvaaminen pakkauksissa biomateriaaleilla vaatii biomateriaalien ominaisuuksien parantamista ja uusien materiaalien kehittämistä. Biopohjaisten pakkausmateriaalien käyttäminen pienentäisi tuotteen aiheuttamaa ympäristövaikutusta ja pienentäisi ilmastonmuutospotentiaalia. (Matuana ym. 2021, 1.)

Biomateriaalien raaka-aineena käytetään biomassaa, jota saadaan metsäteollisuudesta ja maataloudesta. Maataloudessa ekologinen biomassa saadaan esimerkiksi lannasta ja viljelyjätteestä sekä lopputuotannon puolelta ruokajätteestä. Metsäteollisuudessa biomateriaalituotantoon käytetään niin sellutuotannon pää- ja sivuvirtoja sekä sahoilta saatua hakkuujätettä ja purua. Biomateriaaleihin kuuluvat biopohjaiset muovit, luonnonkuidut, keraamiset- ja bionanomateriaalit. Biomateriaaleja käytetään hyvin erityyppisissä teknologisissä ratkaisuissa lentokoneista, ruokapakkauksista ja veden puhdistuksesta lääketieteellisiin sovelluksiin. (Sun 2005, 6–7; Abhiram ym. 2021, 2658–2659, 2663.)

Luvussa biomateriaalit on kuusi alalukua. Ensimmäisessä alaluvussa käsitellään puu- ja sellupohjaisia sovelluksia, millaisia ne ovat ominaisuuksiltaan ja miten niitä käytetään. Biopolymeerejä käsitellään toisessa alaluvussa, niiden ominaisuuksia ja mistä raaka-aineista niitä valmistetaan. Kolmannessa alaluvussa kuvataan komposiittien rakennetta ja mitä haasteita luonnonkuitujen ja muovimatriisien yhdistäminen aiheuttaa. Neljännessä alaluvussa perehdytään bionanomateriaalejen ominaisuuksiin ja kuinka eri dimensiot siihen vaikuttavat. Viidennessä alaluvussa esitellään, millaisia ominaisuuksia pinnoitemateriaaleilla on ja mitä haasteita materiaalien ominaisuudet aiheuttavat. Kuudennessä alaluvussa tutustutaan muihin biomateriaalien sovelluksiin kuin pakkausmateriaalit.

4.1 Puu- ja sellupohjaiset sovellukset

Puu soveltuu monipuolisesti erilaisiin biotuotantoihin. Puun eri osat hyödynnetään monipuolisesti eri prosesseissa. Paksumpi runkopuu jalostetaan hirsiksi, laudaksi ja vaneriksi. Ohuemmat puut ja suurten puiden latvukset käytetään selluntuotantoon. Sellusta jalostetaan paperia, kartonkia, pahvia ja käytetään muuhun biomateriaalituotantoon, kuten biomuovien ja komposiittien raaka-aineena. Puukuituja on käytetty pitkään tekstiiliteollisuudessa, viskoosi on tunnetuin raaka-aine. Mäntyöljy, jota saadaan sulfaattisellun sivutuotteena, on hyvä raaka-aine biodieselin ja bensaan lisättävän etanolin tuotannossa. Ligniini, jota on 30 % kaikissa kasveissa ja myös puissa, soveltuu hyvin bioenergiaksi ja biopolttoaineeksi. Ligniinistä valmistetaan myös hartseja, liimoja, biomuovia ja polyuretaania. Nanoselluloosalla on koosta johtuen uniikkeja ominaisuuksia. Nanoselluloosaa käytetään muun muassa komposiiteissa lujitemateriaaleina, reologisena muokkaajana kosmetiikassa, ruoissa, maaleissa ja pinnoitteissa. (Soilampi & Valkeapää 2021.)

Halutun tuotteen ominaisuudet määrittävät, millaisesta raaka-aineesta se voidaan valmistaa. Käytetäänkö ensikuitua (mänty, kuusi ja koivu) vai kierrätettyä kuitua. Ensi-, neitseellinen eli primääri kuitu on kierrättämätöntä kuitumateriaalia. Kuusesta ja männystä saadaan pitkää 3–4 millimetristä kuitua, ja koivusta lyhyttä 1–1,5 millimetristä kuitua. Kierrätysmateriaaleja ovat sahoilta syntyvät sahadake ja -puru, sekä kierrätetty pahvi, kartonki ja paperi. Kuitua voidaan kierrättää 5–7 kertaa, jonka jälkeen kuidun pituus on liian lyhyttä uusiokäyttöön. Liian lyhyt kuitu päättyy energiakäyttöön. Kuidun lähteen lisäksi ominaisuuksiin vaikuttaa valmistusmenetelmä. (Chamberlain & Kirwan 2014, 6–9.)

Kemiallisessa massan valmistuksessa kuidun ligniini liuotetaan pois. Tämän johdosta kemiallinen massa sisältää pääasiassa selluloosaa ja hemiselluloosaa. Ligniinin, puun sidosaineen, poisto tekee kuidut joustavammiksi, mukautumis- ja sitoutumiskykyisemmiksi. Mekaanisessa massassa kuidut erotetaan toisistaan mekaanisesti, jolloin massa sisältää ligniinin, selluloosan ja hemiselluloosan. Mekaanisen massan kuidut ovat kuitupituudeltaan lyhyempiä kuin kemiallisessa massassa, mutta huomattavasti jäykempiä ja heikommin sitoutuvia. Kemimekaanisessa massassa puuta pehmennetään ensin kemiallisesti,

jonka jälkeen mekaanisessa käsittelyssä kuitu irtoaa helpommin. Tällöin kuidun pituus on suurempi kuin mekaanisessa massassa. Kierrätysmassoilla kuitupituus on huomattavasti pienempi kuin ensikuidulla ja hienoaineksen määrä on suurempi. Mekaanisen massan ominaisuudet säilyvät kierrätyksessä paremmin kuin kemiallisen massan, jonka ominaisuudet heikkenevät merkittävästi kostumisen ja kuivumisen seurauksena. (Chamberlain & Kirwan 2014, 7–11.)

4.1.1 Puu

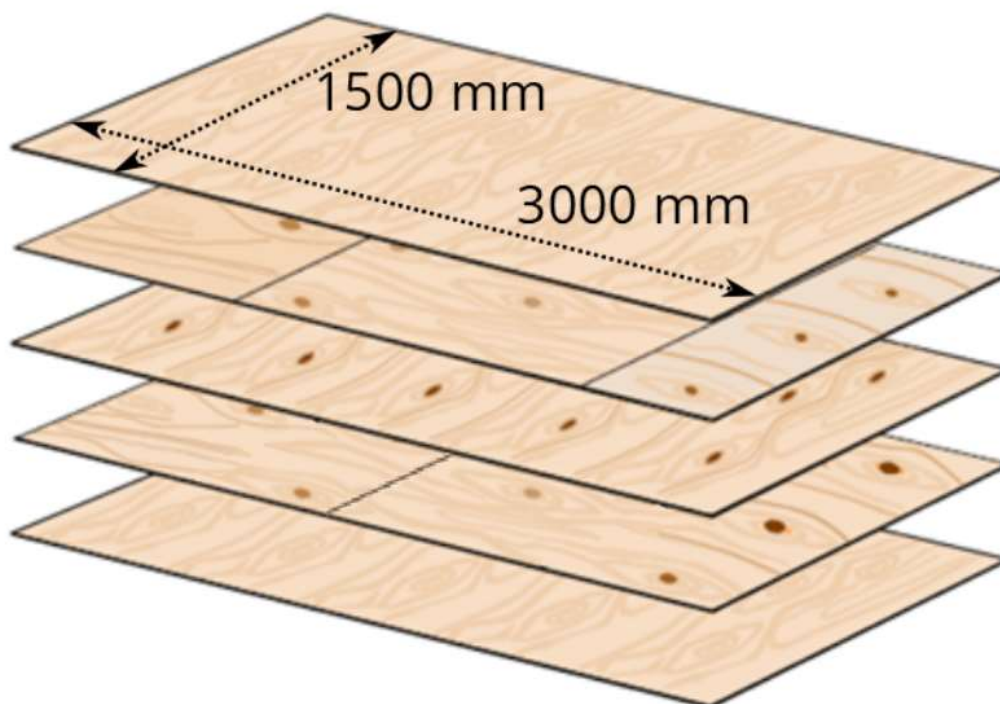
Puun käytössä pakkausmateriaalina on huomioitava, että Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksella (EU) 20.10.2010/995, joka toimeenpantiin lailla puutavaran ja puutuotteiden markkinoille saattamiseksi 13.12.2013/897 säädetään, että puumateriaalin tulee olla kestävästi tuotettua. Puupakkausten käyttöön vaikuttaa myös ISPM 15 standardi, joka määrittelee, kuinka metsä- ja puutavaratuhoajien leviäminen estetään. ISPM 15 -standardi on kansainvälisen elintarvike- ja maatalousjärjestö FAO:n laatima ja se määrittelee kansainvälisessä kaupassa käytettäville puisille pakkausmateriaaleille asetetut vaatimukset. (Ala-Viikari 2021, 164–165.)

Puuaines koostuu valtavasta määrästä tehtävältään ja muodoltaan erilaisista pitkulaisista soluista. Kemiallisesti tärkeimmät puukuitujen soluseinien osat ovat selluloosa, joka antaa rakenteelle lujuutta, ligniini, joka sitoo puusolut yhteen ja hemiselluloosa, joka sitoo vettä ja antaa rakenteelle joustavuutta. Hydrofiilisiä näistä ovat selluloosa ja hemiselluloosa. Ligniini on puolestaan hydrofobista. Lisäksi puun solukossa ja kanavissa on lahoamiselta suojaavia pihka-aineita ja vararavintona toimivia rasvoja. (Lepistö 2014, 7, 10) Selluloosapolymeeri muodostuu glukoosimonomeereistä ja on rakenteeltaan lineaarinen. Pituukseltaan selluloosamolekyylillä on noin 10 000 glukoosimonomeeriä eli noin 5 000 nm. Hemiselluloosat koostuvat heteropolysakkarideista ja ovat rakenteeltaan lineaarisia. Ligniini on kolmiulotteinen haaroittunut fenyylipropaniyyksoista muodostunut polymeeri. Muita soluseinissä esiintyviä yhdisteitä ovat pektiini, tärkkelys, proteiinit, uuteaineet, vesiliukoiset orgaaniset yhdisteet ja epäorgaaniset yhdisteet. (Lepistö 2014, 10.)

Puukuitujen pituus vaihtelee 1–5 mm ja halkaisija 0,001–0,05 mm riippuen puulajista. Puukuidut antavat puulle mekaanisen lujuuden ja sitkeyden, joka syntyy selluloosasäikeiden hienorakenteesta. Soluseinien hienorakenteet poutuvat 3–4 nm selluloosasäikeistä. Hemiselluloosien ja ligniinin muodostaman soluseinän väliaine estää selluloosasäikeiden takertumisen toisiinsa. Väliaine pysyy sulana -40 °C lämpötilaan asti. Hienorakenteessa lujuutta lisäävät selluloosasäikeiden kiertymiskulmat soluseinien kerroksissa. Lisäksi kestävyysvaikuttavat kerrosten paksuuksien lisäksi selluloosan ja ligniinin osuudet soluseinissä. Ligniini liimaa puuaineksen solut toisiinsa. Solut toisiinsa liimaava ligniini ei ole nestemäistä. (Lepistö 2014, 12–13.)

4.1.2 Vaneri

Vaneri on vahva ja jäykkä puuviiluista valmistettu puulevy. Vanerit ovat sään ja kosteuden kestäviä. Niitä käytetään monissa rakennusteollisuuden ja raskaan liikenteen sovelluksissa sekä moniin muihin käyttötarkoituksiin. (Varis 2020, Special.) Vaneri valmistetaan yleensä parittomasta viilukerros määrästä. Viilukerroksia voi olla kolmesta jopa 35 kerrokseen. Vanerin hyvät lujuusominaisuudet syntyvät, kun vierekkäisissä kerroksissa puusyyn suunta ei ole sama, kuva 6. Erilaisilla pinnoitteilla vaikutetaan myös vanerin ominaisuuksiin. (Varis 2020c, Technical properties.)



Kuva 6. Viisikerroksisen vanerin viilurakenteen periaate (Varis 2020a, Basic properties)

Hyvä paino–lujuussuhde on vanerin tärkeimpiä teknisiä ominaisuuksia. Vaneri on painoonsa nähden kestävä ja sillä on monia käyttökohteita erilaisissa sovelluksissa, joissa keveys ja lujuus ovat etuja. Koivuvanerin tiheys on noin 680–700 kg/m³ ja havuvanerin 440–460 kg/m³. Vanerilla on hyvä iskun- ja kosteudenkestävyys. Kosteudenkestävyys perustuu fenoliformaldehydiliimaan, joka muodostaa sään ja kiehumisen kestävän (WBP) sauman vanerin viilujen välille. (Varis 2020, Technical properties.) Näiden ominaisuuksien ansiosta vaneri soveltuu hyvin myös pakkausteollisuuden raaka-aineeksi. Vaneria käytetään esimerkiksi lavoihin, lavakauluksiin ja raskaan teollisuuden pakkauslaatikoihin.

4.1.3 Paperi, kartonki ja aaltopahvi

Yli 40 % kaikista pakkauksista on paperiin tai pahviin perustuvia. Tämä tekee siitä kaikista pakkausmateriaaleista massallisesti suurimman. (Chamberlain & Kirwan 2014, 1–2.) Paperi on vahva pakkausmateriaali. Pakkauspaperit valmistetaan ominaisuuksiltaan soveltuvammasta sulfaattisellusta. Taulukossa 2 esitellään papereiden ominaisuuksia ja käyttötarkoituksia.

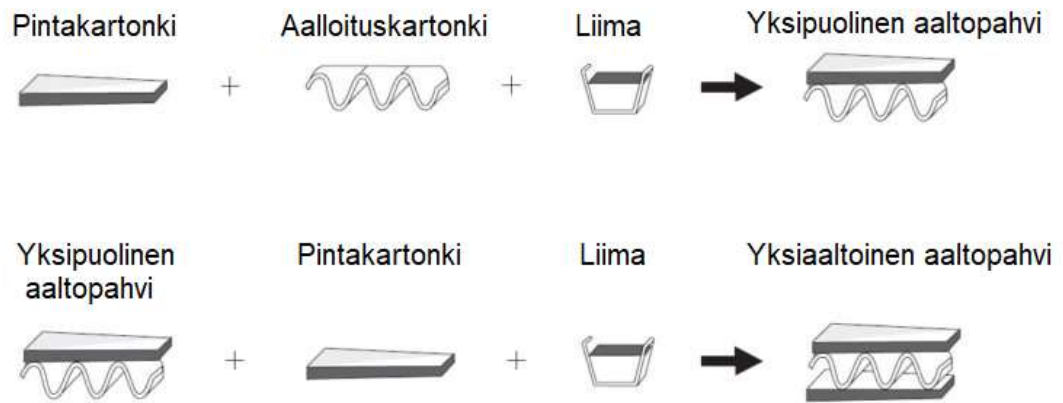
Taulukko 2. Papereiden ominaisuudet ja käyttötarkoitus (Hovi 2021, 76–77; Holappa 2021, 107–109)

NIMI	NELIÖMASSA [g/m ²]	OMINAISUUDET & KÄYTTÖTARKOITUS
Voima- eli kraftpaperi, UG , kiillottamaton MF , (machine finished)		Mekaanisilta ominaisuuksiltaan kestävimpiä papereita. Yleisimmät sovellukset ovat kääreet, pussit, kassit, säkit ja laminaatit.
MG-paperit , (machine glazed)	20–120	Toispuoleisesti kiiltävää. Mittapysyvä ja makaava eli arkki pysyy suorana, ei käpristy. Kirjekuoreet, kääreet, etiketit ja joustolaminaatit.
Yksipuolisesti päällystetyt paperit, C15 , Coated one side	45–120	Yksipuoleisesti savella päällystetty valkaistu sellupaperi. Päällyste voidaan tehdä joko mataksi tai erittäin kiiltäväksi, käyttötarkoituksen mukaan. Erittäin korkealaatuisiin painokuviin. Käytetään mm. vyötteissä, banneroleissa, eläintenruokapussissa, maustepussissa ja kosmetiikassa.

Tiivispaperit eli pergamiini	30–70	Erittäin voimakkaasti jauhetusta massasta valmistettu paperi. Käytetään elintarvikerasvojen pakkauksiin, leivinpaperina ja kääreinä.
Irrokepaperit	50–90	Tiivispaperia, joka on pinnoitettu silikonilla tai muulla irrotusta helpottavalla polymeerillä. Käytetään tarrojen pohjamateriaalina.
Kreppipaperit		Erittäin hyvät sitkeys ja mekaaniset suojausominaisuudet. Käytetään terästeollisuudessa suojapaperina.
Säkkipaperit	70–90	Erikoispapereita. Mikrorepattua voimapaperia, joka venyy jopa 6–8 % pituussuunnassaan. Paperisäkit ovat rakenteeltaan monikerroksisia, 2–6 kerrosta. Käytetään raemaisilla ja jauhemaisilla kuiville tuotteille esim. sokeri, jauhot ja sementti.

Kartongit ovat neliöpainoltaan 150–600 g/m² ja paksuudeltaan 0,2–1,2 mm. Kartonki koostuu yleensä kolmesta kuitukerroksesta. Kartongin laatu määräytyy kerroksissa käytettävien kuitujen ominaisuuksien mukaan. Kartongit jaetaan kahteen pääryhmään kuituraaka-aineen mukaan. Ensimmäinen on ensikuidusta kemiallisesti, kemimekaanisesti tai mekaanisesti valmistettu massa. Toinen on kierrätyskuidusta, ensisijaisesti paperista, valmistettu massa. Eniten käytetty kartonki on taivekartonki (FBB, folding boxboard). Kartonkityypit esitellään taulukossa 3. (Järvinen 2021, 80; Palttari 2020, Pulps used.)

Aaltopahvi on suosittu pakkausmateriaali keveytensä ja kestävyytensä takia. Yleisin käytettävä aaltopahvi on yksiaaltoista. Aaltopahvi muodostuu kartonki-kerroksista, joista pintakartongit eli lainerit ovat valkaistuja tai ruskeita (kuva 7). Kaksiaaltoista aaltopahvia käytetään lujuutta vaativissa pakkauksissa. Aaltojen lukumäärä ja korkeus vaikuttavat pahvin kestävyysominaisuuksiin. Mitä paksumpi aalto ja mitä harvemmassa ne ovat, sitä pinoamislujempi se on. Matalalla ja tiheällä aallolla saadaan paremmat painatusominaisuudet. Kuljetuspakkauksissa, aaltopahviluokka c, pahvin paksuus on 4 mm ja aaltoja on metrissä 130. (Jokela & Ympäristöryhmä 2021, 94–94.)



Kuva 7. Yksiaaltoisen aaltopahvin rakenne (Lindqvist & Paltakari 2020, Corrugated board)

Kuituvalokset tehdään pääosin kierrätysmateriaaleista, mutta myös ensikuitua käytetään. Kuituvaloksella pystytään toteuttamaan lähes mikä tahansa kolmiulotteinen muoto. Tunnetuin kuituvalospakkaus lienee kananmunakenno. Kuituvalos on hyvin hengittävä pakkausmateriaali. Kuituvaloksia käytetään paljon välipakkauksena esimerkiksi pullojen tukena. (Rilay 2012, 238–239.)

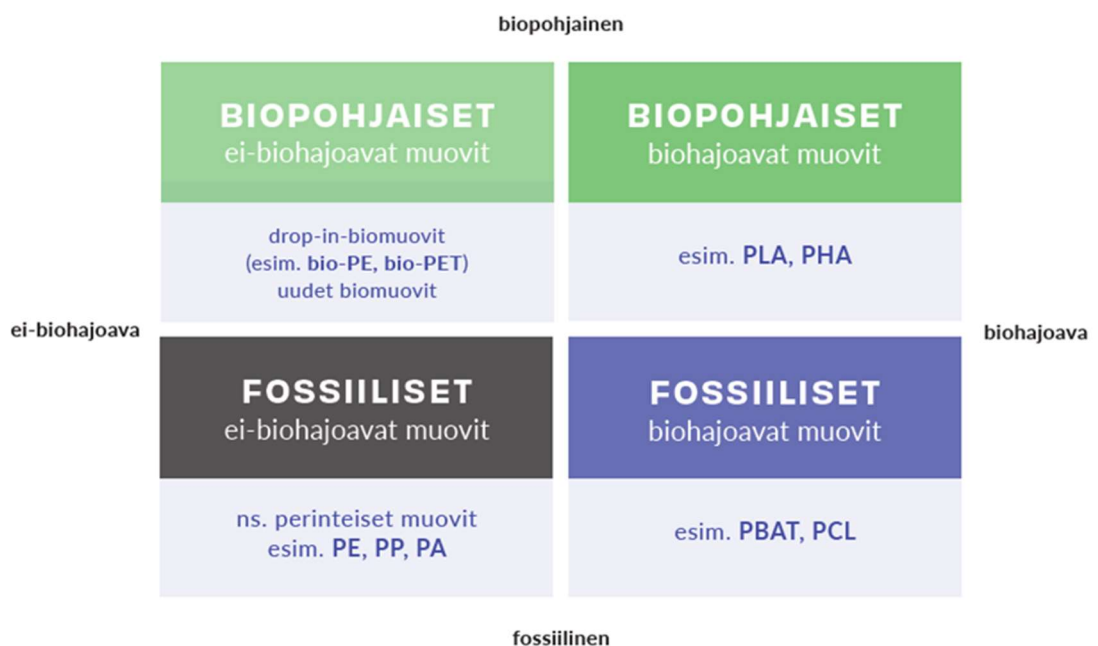
Taulukko 3. Kartonkien valmistusmateriaalit ja ominaisuudet (Järvinen 2021, 80–82)

NIMI	PINTAMATERIAALI	SISÄKERROS	OMINAISUUDET
TAIVEKARTONKI, FBB FOLDING BOXBOARD	Valkaistu havu- tai koivu-selluloosa	Puuhioke SWG, stone groundwood/ PGW, pressure groundwood Valkaistu kemihierre, BTCTMP, bleached chemi thermo mechanical pulp	Puuhiokesisäkerros antaa rakenteelle jäykkyyttä. Alhainen neliöpaino suhteessa jäykkyyteen. Valkaistu pintakerros takaa hyvän painettavuuden.
VALKAISTU SELLUKARTONKI, SBB/SBS, SOLID BLEACHED BOARD/ SOLID BLEACHED SULPHATE	Valkaistu havu- tai koivu-selluloosa	Valkaistu havu- tai koivuselluloosa	Jäykkyys suhteessa neliöpainoon alhaisempi kuin taivekartongilla. Hyvä painettavuus.
VALKAISEMATON SELLUKARTONKI, SBB/SBS, SOLID UNBLEACHED BOARD/ COATED UNBLEACHED KRAFT	Valkaisematon selluloosa Pigmenttipäällyste pinta-puolella parantaa painettavuutta	Puuhioke SWG, stone groundwood/ PGW, pressure groundwood Valkaistu kemihierre, BTCTMP, bleached chemi thermo mechanical pulp	Kartonki on lujaa. Sillä on erinomaiset veto-, repäisy-, ja puhkaisulujuudet. Vaalealla pigmenttipäällysteellä saadaan kohtuullinen painettavuus.
KIERRÄTYSKUITUKARTONKI, WLC, WHITE LINED CHIPBOARD	Siistattu kierrätyspaperista valmistettu massa	Kierrätyspaperista valmistettu massa	Tummaa painetusta kierrätyskuidusta valmistettua massaa. Jäykkyys ja paksuus suhteessa neliöpainoon valkaisua sellukartonkia heikompi. Vaalealla pinnan pigmenttipäällysteellä parannetaan painettavuutta.

4.2 Biomuovit

Muovit ovat polymeerejä. Polymeeri on suuri makromolekyyli, joka on luonnonpolymeeri tai synteettisesti valmistettu. Monomeerit ovat muovin pienimpiä rakenneyksiköitä, pieniä molekyyliä. Polymeroinnissa monomeereistä muodostuu polymeerejä eli monomeeriketjuja. ”Muovit ovat materiaaleja, jotka koostuvat pitkistä polymeeriketjuista sekä lisäaineista ja jotka joissakin valmistuksen vaiheessa ovat muovattavissa lämmön ja paineen avulla. Muovit ovat siis seoksia, kun taas polymeerit ovat puhtaita kemiallisia yhdisteitä.”, kuten Muoviteollisuus ry kiteytti hyvin SFS-EN ISO 472 standardin määritelmän.

Biomuovit jakautuvat ominaisuuksiensa mukaan biopohjaisiin ei-biohajoaviin, biopohjaisiin biohajoaviin ja fossiilisiin biohajoaviin muoveihin (kuva 8). Fossiiliset ei-biohajoavat muovit eivät kuulu biomuoveihin. Biomuovit voidaan luokitella myös alkuperänsä mukaan kasvipohjaisiin, synteettisiin tai mikrobiologisesti tuotettuihin biomuoveihin. Biopohjaisuutta määritellään standardeissa EN 16640: 2017/AC: 2017 ja 16785–1, joiden mukaan biopohjainen materiaali tuotetaan biomassasta. Biopohjaista tuotantoa ovat kokonaan tai osittain biomassasta tehdyt tuotteet. (Biomuoviopas 2020, 9; Sun 2005, 5.)



Kuva 8. Nelikenttäjako muoveista (Biomuoviopas 2020, 9)

Muovit ovat rakenteeltaan moninainen ryhmä. Muovit jaetaan amorfisiin ja osakiteisiin muoveihin. Amorfisissa muoveissa polymeeriketjut eivät ole järjestäytyneitä, eikä niiden kiderakenne ole säännöllinen. Ne ovat usein kovia, hauraita, läpinäkyviä ja niiden kutistuma on pientä. Ne kestävät hyvin korkeita lämpötiloja, mutta eivät kemiallista rasitusta. Tyypillisiä amorfisia kestumuoveja ovat polystyreeni (PS) ja polykarbonaatti (PC). Osakiteisillä muoveilla on nimensä mukaisesti järjestäytyminen säännölliseen kiderakenteeseen osittaista. Kiteisyysaste vaihtelee 5–95 %. Siihen vaikuttavat polymeerin rakenne ja jäähdyttämisolosuhteet. Osakiteiset muovit ovat ominaisuuksiltaan pääsääntöisesti läpinäkymättömiä ja kestävät kemiallista rasitusta. Yleisiä kestumuoveja ovat polyeteenit (PE), polypropeenit (PP) ja polyamidit (PA). (Syväne 2021, 139.)

4.2.1 Biomuovien raaka-aineet

Kasvipolymeerien kolme pääluokkaa ovat proteiinit, öljyt ja hiilihydraatit. Luonnon polymeereistä proteiinipohjaisia ovat esimerkiksi kollageeni, fibrinogeeni ja soijaproteiini. Polysakkaridipohjaisia ovat puolestaan selluloosa, tärkkelys ja selluloosa-asettaatti. Polysakkarideiksi kutsutaan tärkkelystä ja selluloosaa, jotka kuuluvat suureen hiilihydraattien joukkoon. Kasvikuidut kuuluvat myös hiilihydraatteihin; luonnonkuituja käsitellään tarkemmin kappaleessa luonnonkuidut sivulta 36 alkaen. Synteettisiä biopolymeerejä tuotetaan biomassasta, esimerkiksi polylaktaattihappo (PLA). Mikrobiologisesti tuotetaan polyesterihiilihydraatti pullulaania. (Sun 2005, 2, 7)

Kasviproteiinit ovat aminohappopolymeerejä öljykasveista ja siemenistä. Kasviproteiinit ovat pääosin öljyn ja tärkkelystuotannon sivutuotteita. Proteiineja voidaan muokata fysikaalisesti, kemiallisesti ja entsyymaattisesti. Gluteenia saadaan vehnästä ja sen lähisukulaisista ohrasta ja rukiista. Vehnän gluteeni muodostuu gliandiinista, joka on glykoproteiini, ja gluteniinista. Vehnägluteenista ja soijaproteiinista valmistetaan kalvoja. (Sun 2005, 2–5.)

Kasviöljyt ovat triglyseridejä, jotka sisältävät monenlaisia rasvahappoja. Biopohjaisista öljyistä tuotetaan liimoja ja hartseja samoilla synteettisillä menetelmillä kuin petrokemian tuotteista. (Sun 2005, 5). Biopohjaisia polyestereitä

valmistetaan erilaisista kasviöljyistä. Biopohjaisista polyestereistä valmistetaan polyhydroksialkaonaatteja (PHA), jotka ovat nopeasti biohajoavia. Osakiteinen polyhydroksybutyraatti (PHB) -ryhmän muovit soveltuvat ruiskuvaluun. Polyhydroksybutyraatti-co-valeraattia (PHBV) käytetään sitkeänä muovina kalvosovelluksissa. PHA-muovit toimivat hyvin yhdessä rasvojen, kosteuden ja kuuman veden kanssa. (Biomuoviopas 2020, 29.)

Polysakkarideista selluloosapohjaisia muoveja (CA, CAB, CAP) käytetään kemikaalien, rasvojen ja öljyä kestävien kirkkaiden kalvojen valmistamiseen. Pakkauksissa selluloosapohjaisia muoveja käytetään paljon kalvosovelluksissa. Selluloosa- ja tärkkelyspohjaisten muovien biohajoavuuteen vaikutetaan asetyloinnin avulla, muokkausmenetelmiä kuvataan tarkemmin kappaleessa luonnon kuitujen muokkaaminen (sivu 37.). Tärkkelyspohjaisten muovien mekaanisia ominaisuuksia parannetaan käyttämällä muita muoveja seosaineena. Tyypillisiä sovelluksia tärkkelyspohjaisille muoveille ovat kompostoituvat biohajoavat muovipussit. (Syväne 2021, 153.)

Fossiilisesta raaka-aineesta valmistettavia biohajoavia muoveja ovat muun muassa polykaprolaktoni (PCL). PCL:a käytetään yleisesti biopolymeereihin, ja tärkkelykseen seostettuna tämä parantaa tuotteen joustavuutta. Polybuteeni-adipaatti-tereftalaatti (PBAT) on joustavaa ja sitkeää. PBAT:sta valmistetaan maatalouden katekalvoja ja tuorekelmuja. Sitä käytetään myös pinnoitteena. PBAT:ia voidaan käyttää PCL:n tapaan seosaineena parantamaan tuotteen ominaisuuksia. (Biomuoviopas 2020, 30.)

Muovien lisäaineilla parannetaan muovin ominaisuuksia ja prosessoitavuutta. Täyteaineilla pyritään laskemaan tuotteen hintaa ja keventämään tuotetta. Lisä- ja täyteaineet voivat vaikuttaa siihen, miten tuote reagoi pakkausmateriaalin kanssa ja tämä on huomioitava tuotetta suunnitellessa. Biohajoavissa muoveissa on erityisesti huomioitava, etteivät lisä- ja täyteaineet ole ympäristölle vaarallisia. Täyteaineina käytetään yleisesti kalsiumkarbonaattia ja talkkia. Mekaanisista ominaisuuksista lujuutta parannetaan lisäämällä joukkoon esimerkiksi lasi- tai hiilikuitua. Tällöin puhutaan komposiittimateriaaleista, joihin tutustutaan kappaleessa biokomposiitit sivulla 35. (Biomuoviopas 2020, 33; Syväne 2021, 139.)

4.2.2 Muovien ominaisuudet

Muovien ominaisuudet jaetaan termisiin, mekaanisiin, optisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Muoveille on tyypillistä matalat prosessointilämpötilat, jotka puolestaan johtavat mataliin käyttölämpötiloihin. Muoveista puhuttaessa tärkeä termi on lasisiirtymälämpötila. Lasisiirtymälämpötilan yläpuolella muovi on pehmeää ja joustavaa, lämpötilan alapuolella muovi on kovaa. Kylmässä muovit jäykistyvät, koska molekyyliketjujen liikkuvuus vähenee. Muovien lämmönkesto jaetaan lyhyt- ja pitkäaikaisiin maksimikäyttölämpötiloihin sekä taipumis- ja pehmenemislämpötiloihin. Muovien lämmönkesto on usein alhainen ja pitkäaikaisen lämpökuormituksen kesto vaihtelee 60–150 °C astetta. Taivutuslämpötilalla määritetään muovin taivutuskuormituksen kesto korotetussa normaalikäytön lämpötilassa. Pehmenemislämpötila ilmaisee maksimilämpötilaa, jossa muovituote pysyy jäykkänä. (Syväne 2021, 139–140.)

Muovien mekaanisista ominaisuuksista tärkeimpiä ovat tiheys, veto- ja iskulujuus sekä jännityssäröily. Muovien tiheydet ovat alhaisia 0,8–2,2 g/cm³. Pakkauksissa käytettävät muovit ovat tyypillisesti tiheydeltään 0,8–1,4 g/cm³. Lisäaineet voivat vaikuttaa merkittävästi tiheyttä nostavasti. Vaahdotettuna muovin tiheys on erittäin alhainen 0,1 g/cm³, kuten esimerkiksi polyuretaanivaahdo. Vetolujuudella mitataan polymeeriketjujen liikkuvuutta toisiinsa nähden. Muovin vetolujuuden keston vaikuttaa kuormituksen voiman lisäksi kesto. Muovit ovat usein sitkeämpiä muihin materiaaleihin nähden, vaikka vetolujuus on pienempi. Iskulujuus mittaa muovin kykyä ja sitkeyttä vastustaa katkeamista voimakkaassa iskutilanteessa, kuten pullon pudotessa lattialle. Iskusitkeys on erittäin riippuvainen lämpötilasta, esimerkiksi huoneenlämmössä pullo kestää tiputuksen, mutta pakkasessa se sirpaloituu kuin lasi. Jännityssäröily on tyypillistä muoveille. Se merkitsee muovin kykyä kestää kemiallisen rasituksen ja jännityksen yhteisvaikutusta. (Syväne 2021, 140–142.)

Muovin optisia ominaisuuksia ovat väri, kirkkaus, valon taittuminen ja absorboituminen, sekä heijastuskyky. Muoveja löytyy kirkkaista täysin läpinäkymättömiin. Lisäaineilla voidaan vaikuttaa osaan optisista ominaisuuksista, kuten esimerkiksi kirkkauteen ja väriin. Amorfisista muoveista polystyreeni (PS) on erittäin kirkas ja jäykkä ilman lisäaineita tai epäpuhtauksia. (Syväne 2021, 142.)

Muovien kemiallisiin ominaisuuksiin kuuluvat kemiallinen kestävyys, ultraviolettisäteilyn (UV) kesto, veden absorptio, kosteuden kestävyys ja kaasujen sekä höyryjen läpäisevyys. Muovien kemiallisessa kestävyudessa on suuria eroja. Muovit kestävät usein hyvin happoja ja emäksiä, tosin vahvoina liukosina ne voivat vaurioittaa muovin rakennetta. Orgaaniset liuokset, kuten alkoholi, tolueeni ja asetonit yleensä reagoivat muoveihin aiheuttaen, esimerkiksi värin muutoksia, turpoamista ja liukenemistä. (Syväne 2021, 142–144.)

Ultraviolettisäteily vaikuttaa merkittävästi muovien säänkestävyyteen. UV-säteily haalistuttaa värejä, haurastuttaa muovia ja näiden lisäksi heikentää sähköisiä ja fysikaalisia ominaisuuksia. Happi, kosteus ja korkea lämpötila kiihdyttävät UV-säteilyn vaikutuksia. Hyvää säänkestävyyttä tarvitseviin muoveihin lisätään stabilaattoreita ja UV-säteilyä absorboivia aineita. (Syväne 2021, 143.)

Myös muovit voivat absorboida pienen määrän vettä itseensä, vaikka eivät liukene siihen. Absorboitunut vesi voi pehmittää muovia ja vaikuttaa mittatarkkuuteen. Myös muovin fysikaaliset ominaisuudet heikkenevät kosteuden lisääntyessä. Muoviin imeytynyt vesi voi hankaloittaa muovin prosessointia höyrystymisestä johtuen. (Syväne 2021, 143.) Materiaalien kaasujen ja höyryjen läpäisevyyttä käsitellään tarkemmin sivulla 17.

4.3 Biokomposiitit

Komposiitit ovat yhdistelmämaterialleja, jotka koostuvat muovimatriisista ja vahvikemateriaalista kuten esimerkiksi lasikuidusta. Muovimatriisi antaa komposiitin muodon ja vahvikemateriaalilla vahvistetaan rakennetta. Esimerkiksi suksisauvoissa lasi- ja hiilikuidulla saadaan tehtyä rakenne kestävämmäksi ja kevyemmäksi. Matriisista ja lujitteesta/täyteaineista syntyy erityyppisiä komposiitteja. Biokomposiitiksi luokitellaan, kun yksi komposiitin osa: matriisi, vahvike- tai täytemateriaali on biohajoavaa tai biopohjaista. Vihreät komposiitit ovat puolestaan matriisiltaan, lujitteeltaan ja täyteaineeltaan biopohjaisia.

Matriisit ovat luonteeltaan hydrofobisia eli vesipakoisia ja polaarittomia. Luonnonkuidut ovat hydrofiilisiä eli vesihakuisia ja polaarisia. Tästä seuraa, ettei luonnonkuitukomposiitin ja matriisin välille synny voimakasta adheesiota, mikä

johtaa rakenteelliseen heikkouteen. Näitä ongelmia on lähdetty ratkomaan luonnonkuitujen kemiallisella ja/tai mekaanisella käsittelyllä, jolla kuidusta tehdään tasalaatuisempaa ja matriisin kanssa paremmin yhteensopivaa. Lisäksi apuaineita käyttämällä on parannettu adheesiota komposiiteissa. (Abhiram ym. 2021, 2658–2659.) Biokomposiittien matriisin ja lujitemateriaalinen rajapinnan mekaanisten, termisten, fysikaalisten, morfologisten ominaisuuksien sekä veden imeytyvyys ominaisuuksien muokkaaminen ovat keskeisessä roolissa parempien biokomposiittien kehityksessä. (Donghwan ym. 2013, 134.)

4.3.1 Luonnonkuidut

Luonnonkuidut luokitellaan selluloosa-, proteiini- ja mineraalipohjaisiin kuituihin. Toinen luokittelutapa on alkuperän perusteella kasvi- ja eläinperäisiin sekä mineraalikuituihin. Kasvikuidut ovat monipuolisin luokka, kuten kuva 9 osoittaa. Kasvikuitujen käyttöä biokomposiittien lujitemateriaalina tukee hyvä saatavuus ja edullinen hinta. (Abhiram ym. 2021, 2659.)

Luonnonkuidut eivät ole tasalaatuisia. Niiden ominaisuudet vaihtelevat kasvu- paikasta ja sääolosuhteista riippuen hyvinkin paljon. Haasteita tuovat myös kasvikuitujen hydrofiilisyys ja polaarisuus, koska tyypillisimmät matriisit, kertatai kestopuovi, ovat hydrofobisia (vesipakoisia) ja polaarittomia. (Abhiram ym. 2021, 2658–2659.) Hydrofiilisydestä johtuen luonnonkuidut imevät hyvin kosteutta, johtuen hydroksyyli- ja muista polaarista ryhmistä molekyyli- rakenteessa. Luonnonkuitujen hyviin ominaisuuksiin kuuluvat puolestaan suuri saatavuus, matalat hinnat, matala tiheys eli keveys, ympäristönystävällisyys, hiilen sidonta sekä vaimennus- ja eristysominaisuudet.



Kuva 9. Luonnonkuitujen jaottelu esiintymispaikan mukaan (Abhiram ym. 2021, 2659; Lepistö 2014, 6 mukaillen)

4.3.2 Luonnonkuitujen ja muovimatriisien muokkaaminen

Luonnonkuidun ominaisuuksia tulee muokata, jotta ne saadaan paremmin yhteensopiviksi muovimatriisin kanssa. Luonnonkuitujen hydrofiilisyyttä johtuu niiden pinnalla olevasta funktionaalisista eli toiminnallisista hydroksyyli-ryhmistä (OH-ryhmistä). Luonnonkuitujen voimakasta taipumusta imeä itseensä kosteutta pyritään muuttamaan erilaisilla fysikaalisilla ja kemiallisilla käsittelyillä. Fysikaalisilla käsittelyillä parannetaan kuidun ja muovimatriisin mekaanista sitoutumista. Kemiallisilla käsittelyissä esimerkiksi kuidun hydroksyyli-ryhmiä muutetaan hydrofobisemmiksi ja erilaisilla kytkeäaineilla parannetaan kuidun ja matriisin yhteensopivuutta. Usein käytetään useampaa kuin yhtä käsittelyä optimaalisen tuloksen saamiseksi. (Lepistö 2014, 22–23).

Fysikaalisia käsittelyjä ovat muun muassa koronakäsittely ja plasmakäsittely. Koronakäsittelyssä luonnonkuitua modifioidaan plasmalla normaalipaineessa.

Käsittelyssä kuidun pinta hapettuu ja pintaenergia kasvaa, jolloin luonnonkuidun ja muovimatriisin välinen adheesio paranee. Plasmakäsittelyssä synnytetään plasma alennetussa paineessa, käyttäen sopivaa kaasua sen muodostamiseen. Plasmassa käytettävällä kaasulla vaikutetaan siihen, mitä ominaisuutta halutaan muuttaa. Inerteilla kaasuilla ristosilloitetaan rakennetta. Happipitoisella plasmalla saadaan matriisin pinta hydrofiilisemmäksi karboksyyli- ja katekolyyli-ryhmien takia. Typpipitoiset plasmat lisäävät aminorakenteiden kautta bioyhteensopivuutta. Fluoripitoisilla plasmalla saadaan kasvukuidun pinta hydrofobisemmaksi. (Lepistö 2014, 22–23).

Kemiallisia käsittelyitä ovat silaani- ja alkalikäsittely, asetylointi ja kytkeäaineet. Silaanikäsittely on alun perin kehitetty lasikuitulujitteisten muovimatriisien adheesioita parantamiseksi. Silaaneita on monia erityyppisiä, mutta rakenne on kaikilla sama. Silaanit ovat kytkeäaineita, joiden reagoimalla syntyy hydroksyyli-ryhmiä. Silaanin hydroksyyli-ryhmät muodostavat vety- tai eetterisidoksen kuidun hydroksyyli-ryhmän kanssa. Funktionaalinen R-ryhmä kiinnittyy matriisiin. Oikein valitulla silaanilla saadaan parannettua matriisin ja luonnonkuidun välistä sidosta, jolloin adheesio paranee. (Lepistö 2014, 24–25.)

Alkalikäsittelyä eli merserointia on käytetty puuvillakuiduille vuodesta 1850 alkaen. Käsittely soveltuu myös muille luonnonkuiduille. Kuituja muokataan natriumhydroksidiliuoksella, jolloin kuitujen rakenteesta liukenee ligniiniä, hemiselluloosaa, vahaa ja öljyä. Kuitukimput hajoavat ligniinin liukenemisen vaikutuksesta mikrokuiduiksi. Kuidun pituuden suhde halkaisijaan paranee ja pinnan karkeus lisääntyy sekä lujuus kasvaa. Alkalikäsittely vaikuttaa kuitujen ja matriisin tartunnan parantumisen lisäksi myös kuidun rakenteeseen. (Lepistö 2014, 26)

Asetyloinnissa luonnonkuitujen pinta käsitellään hydrofobisemmaksi peittämällä kuidun pinnan hydroksyyli-ryhmät asetyyli-ryhmillä COCH_3 . Hydroksyyli-ryhmien korvautuminen asetyyli-ryhmillä tekee kuidun hydrofobisemmaksi, joka parantaa sen tarttuvuutta matriisiin polaarisuuserojen tasaantuessa. Asetylointi vähentää kuidun kykyä imeä kosteutta, mikä parantaa komposiitin ominaisuuksia. (Lepistö 2014, 27–29.)

Entsymaattiset käsittelyt kasvattavat merkitystään luonnonkuitujen muokkauksessa. Entsyymit ovat ympäristöystävällisempiä kuin kemialliset käsittelyt. Käytettäviä entsyymejä ovat muun muassa ksylanaasi (Xyl), sellulaasi (Cel), polygalakturonaasi (PG) ja lakkaasi (Lac). Entsyymeillä pystytään valitsemaan, mihin rakenteisiin vaikutetaan. Kuidun polaarisuutta saadaan vähennettyä poistamalla pektiiniä ja hemiselluloosaa, mikä parantaa adheesiota matriisiin kuidun polaarisuuden laskiessa. (Alemaskin ym. 2016, 2018, 2678–2679, 2686–2687.)

4.4 Bionanomateriaalit

Bionanomateriaalien potentiaali pakkausmateriaaleissa on vahvike- ja pinnoitemateriaaleina sekä älykkäissä pakkaussovellutuksissa. Nanomateriaalit ovat kokoluokaltaan yhdestä sataan nanometriä vähintään yhdeltä ulottuvuudeltaan, pituudeltaan, leveydeltään tai korkeudeltaan. Yksi nanopartikkeli on helposti ymmärrettävissä nanomateriaaliksi koon perusteella. Seosmateriaali voidaan luokitella nanomateriaaliksi EU-komission suosituksen mukaan, kun nanomateriaalissa on vähintään 50 % hiukkasista kokoalueella 1–100 nm. Nanomateriaalit tai vihreät nanovahvikkeet luokitellaan joko dimension eli koon ja muodon mukaan tai alkuperänsä mukaan. (Abou-Kandil ym. 2019, 17–18.)

Dimensioista ensimmäinen on nollaulotteiset eli 0-dimensio. Luokkaan kuuluvat kvanttipisteet (QDs), jotka ovat kokoluokaltaan erittäin pieniä alle 10 nanometriä. 0-dimension materiaaleja käytetään esimerkiksi valoa emittoivissa diodeissa (LED), aurinkokennoissa, yksielektronitransistoreissa ja lasereissa. (Aminabhavim ym. 2021, 2–3.; Jitendra ym. 2011, 727.)

Yksiulotteiset eli 1-dimensioisilla nanomateriaaleilla on suuri ominaispinta-ala. 1-dimension nanomateriaalit ovat ihanteellisia ilmiöiden tutkimiseen nanomitakaavassa. Ne ovat ominaisuuksiltaan hyviä yhdistämään nanokoon materiaaleja toisiinsa. Lisäksi ne ovat tärkeitä yksiköitä nanokoon elektronisten, optoelektronisten ja EED-laitteiden valmistuksessa. Ensimmäisen dimensioiden materiaaleja ovat muun muassa nanolangat (nanowires), nanonauhat (nanoribbons) ja nanosauvat (nanorods). (Aminabhavim ym. 2021, 2–3.; Jitendra ym. 2011, 727.)

Kaksiulotteiset, eli 2-dimensioiset nanomateriaalit ovat pinta-alaltaan erittäin suuria, koska niiden kaksi ulottuvuutta ovat nanomittakaavaa suurempia. Niillä on hyvä lämmön- ja sähkönjohtavuus. Niitä voidaan käyttää nanolaitteiden kriittisten osien komponentteina. Niitä käytetään muun muassa uusien sovellusten kehittämiseen antureissa, fotokatalyyteissä, nanosäilöissä ja nanoreaktoreissa. Tähän ryhmään kuuluvat esimerkiksi nanolevyt (nanosheets), nanolehdet (nanoleaves), nanoprismat (nanoprisms) ja nanolautaset (nanodisks). (Aminabhavim ym. 2021, 2–3.; Jitendra ym. 2011, 729.)

Kolmiulotteiset eli 3-dimensioiset nanomateriaalit muodostuvat 0-, 1- tai 2-dimensioisista nanomateriaaleista tai niiden yhdistelmistä. 3-dimension nanomateriaalin ominaisuudet riippuvat koosta, muodoista, dimensioista ja morfologiasta, joiden pohjalta määräytyy niiden suorituskyky ja käyttösovellutus. Näistä saadaan muodostettua rakenteita muun muassa seuraaviin sovellutuksiin: katalyytit, magneettiset materiaalit, elektrodimateriaaleina akuissa, kontrolloitu lääkkeen annostelu suoraan soluihin ja raskasmetallien poistaminen tai hajottaminen vesiympäristössä. 3-dimensioisia nanomateriaaleja ovat esimerkiksi nanokukat (nanoflowers), nanopallot (nanoballs), nanokelat (nanocoils) ja nanopillerit (nanopills). (Aminabhavim ym. 2021, 2–3.; Jitendra ym. 2011, 729.)

Nanopartikkelit jakautuvat epäorgaanisiin ja orgaanisiin partikkeleihin. Orgaaniset nanopartikkelit syntetisoidaan käyttämällä luonnon- tai keinotekoisia orgaanisia molekyylejä, kuten proteiiniklustereita, liposomeja, misellejä, syklodekstriineja ja dendrimetreja. Nämä partikkelit ovat biohajoavia ja myrkyttömiä. Partikkelit, jotka ovat onttoja sisältä, kuten liposomit ja misellit, toimivat nanokapseleina. (Abou-Kandil 2019, 17–18.)

Epäorgaaniset nanopartikkelit ovat metalleja ja metallioksideja. Ne ovat tyypillisesti epäorgaanisia suoloja, jotka kiinnittyvät molekyyleihin kovalenttisilla tai metallisidoksilla. Nanokultahiukkasia käytetään esimerkiksi syövänhoidossa. Nanoemulsio on kahden sekoittumattoman nesteen kaksifaasinen dispersio. Niillä on korkeampi liukoisuusaste ja suurempi kineettinen stabiilisuus kuin yksinkertaisilla miselleillä tai karkeilla emulsioilla. Nanoemulsioita käytetään esimerkiksi kosmetiikassa, torjunta-aineissa ja lääkkeissä. (Abou-Kandil 2019, 17–18.)

Selluloosapohjaisilla nanomateriaaleilla on yksi tai useampi dimensio nanomitakaavassa 1–100 nm. Selluloosananomateriaalit jaetaan usein valmistusmenetelmän, koon ja muiden ominaisuuksien mukaan kolmeen luokkaan, selluloosananokuidut (CNF), selluloosananokiteet (CNC) ja bakteeriselluloosa (BC). (Aminabhavim ym. 2021, 2–3.)

4.5 Pinnoitemateriaalit eli barrierit

Pakkauksen tehtävä on suojata tuotetta valon, kosteuden ja lämpötilan vaikutuksilta sekä fyysiseltä rasitukselta. Aina tarvittavia ominaisuuksia ei saada yhdellä materiaalilla, jolloin haluttuihin pakkauksen ominaisuuksiin päästään muun muassa pinnoittamalla pakkaus sopivalla aineella. Esimerkiksi neste-pakkaukset pinnoitetaan polyetyleenillä (PE) molemmiin puolin. Englanninkielisellä lausannalla barrier tarkoitetaan materiaalin suojaavuutta ja tiiviysominaisuuksia. (Koivula & Kuusipalo 2021, 43–44.)

Muovien ja erilaisten pinnoitteiden läpäisevyys riippuu pakkausmateriaalin molekyyliarakenteesta ja paksuudesta. Toisessa ääripäässä ovat päällystämätön paperi ja kartonki, jotka ovat erittäin hengittäviä, mikä sallii kaasujen ja höyryjen kulkea helposti rakenteen läpi. Mikäli pakkausmateriaali estää hyvin tietyn aineen siirtymisen, se on barrier eli estokerros. Jotta voidaan ymmärtää, millaisia ominaisuuksia pakkauksella tulee olla, täytyy tietää miten materiaalin läpäisevyys ja valonsuojaus toimivat. (Koivula & Kuusipalo 2021, 43–44; Järvinen 2021, 83.)

4.6 Biomateriaalien muita käyttötarkoituksia

Biopohjaisista materiaaleista luonnonkuitupohjaisia komposiitteja käytetään paljon autojen sisäverhoiluissa. Esimerkiksi FlexForm Technologiesin valmistamaa FlexFormia käytetään sisäverhoilussa muun muassa ovipaneeleissa ja -palkeissa, kattoverhoilussa, istuinten selkänojissa, pilareissa ja tavaratilan verhoilussa. FlexForm on kevyempää kuin perinteiset verhoilumateriaalit ja samalla on saatu auton sisäverhoilun massaa pienemmäksi. Lisäksi heillä on oma FlexForm XLP materiaali matkailuautojen ja perävaunujen sivuseinien

valmistamiseen. Tämän lisäksi he ovat kehittäneet absorboivia luonnonkuitumattoja öljyjen imeyttämiseen maasta. Matoista öljyt uutetaan pois, puhdistetaan ja käytetään uudelleen. (FlexFormTechnologies 2013, Applications.)

Rakennusmateriaalisovelluksissa käytetään paljon erilaisia luonnonkuitukomposiitteja. Esimerkiksi erilaisia puumuovikomposiitteja käytetään kyllästetyn puun tapaan terassilautoituksissa ja aidoissa. Muun muassa olki- ja hamppupaaleista valmistetaan seinäelementtejä, joiden kantavat rakenteet ovat puuta. Näiden etuna perinteisiin rakennusmateriaaleihin on hyvä lämmön eristävyys ja ympäristöystävällisyys, koska hamppu ja pellava sitovat kasvaessaan ilmastasta hiilidioksidia. TTS Inc. on kehittänyt erilaisia rakennuksien sisäpintaratkaisuja, joissa on hyvät äänen- ja lämmöneristävyysominaisuudet. Ikkunarakenteisiin on kehitetty sopivia biopohjaisia komposiitteja. (Lepistö 2014, 46–51.)

5 TUTKIMUSAINEISTO JA MENETELMÄT

Tutkimuksessa arvioidaan panospakkausten elinkaariarvioinnilla kasvihuonekaasujen ilmakehää lämmittävää vaikutusta (global warming potential, GWP). Ympäristövaikutuksien elinkaariarviointiin käytetään GaBi-elinkaarilaskentaohjelmistoa. GaBi:n tuloksia verrataan panossäiliön osalta Exel composites:n EcoCalculator-ohjelmistolla laskemiin tuloksiin valmistuksen osalta. Liitteessä 2 esitellään laskentaohjelmistot. Asiantuntijahaastattelut ovat merkittävässä roolissa elinkaariarvioinnin taustatietojen keräämisessä ja tulosten oikeellisuuden arvioinnissa. Haastattelut ovat avoimia haastatteluita, joita tehdään tutkimuksen eri vaiheissa selvittämään tarvittavia tietoja elinkaariarviointia varten ja ekologisemman pakkauksen alustavan valmistustavan, muodon ja materiaalitarpeen kriittiseen arvioimiseen.

5.1 Kirjallisuuskatsaus biomateriaalien soveltuvuuteen panospakkaukseen

Biomateriaaleista ja niiden sovelluksista etsitään ajantasaista tutkimustietoa ScienceDirectista ja EBSCO:n kautta. Hakusanoina käytettiin muun muassa bio-based materials, biomaterials, biobased packaging, green composites. Ensimmäisten tutkimukseen soveltuvien artikkelien löytyessä saatiin myös uusia hyviä hakusanoja jatkoartikkeleiden etsimiseen. Perusteoksia biomateriaaleista, pakkaamisesta ja ympäristövaikutuksien elinkaariarvioinnista löytyy Ebook Centralin kautta. Lisäksi Suomen pakkausyhdistyksen 2021 julkaisema perusteos Kestävästä pakkauksesta, jonka ovat kirjoittaneet Suomen johtavat asiantuntijat omista erikoisaloistaan on ollut tärkeä lähde tässä työssä.

5.2 Elinkaariarvioinnin tekeminen

Työssä ilmastonmuutospotentiaali määritetään ympäristövaikutuksien elinkaariarvioinnin standardin ISO 14040:2016 mukaisesti panospakkausista raaka-aineiden tuotannosta loppusijoitukseen asti. Tärkeä osa tiedonhankintaa oli asiantuntijahaastattelut.

5.2.1 Asiantuntijahaastattelut

Haastattelua käytettiin tiedonhankintamenetelmänä. Menetelmän avulla selvittää panospakkauksen toimivuutta, sekä hankitaan ja varmennetaan elinkaariarvioinnin tietoja. Haastattelut aloitettiin suunnittelijasta, joka antoi yleistiedot panospakkauksesta ja sen käytöstä, sekä pakkaukseen liittyvistä haasteista. Otettiin yhteyttä panoslaatikon ja panospakkauksen valmistajaan, jotta saatiin elinkaariarvioinnin laskentaan tarvittavat tiedot. Panossäiliön pakkaamisesta ja sen pakkauksesta haastateltiin lataamonjohtajaa, jolta saatiin tiedot, kuinka suuri osa panoslaatikoista käytetään uudelleen, ja mikä osa menee energijätteeksi.

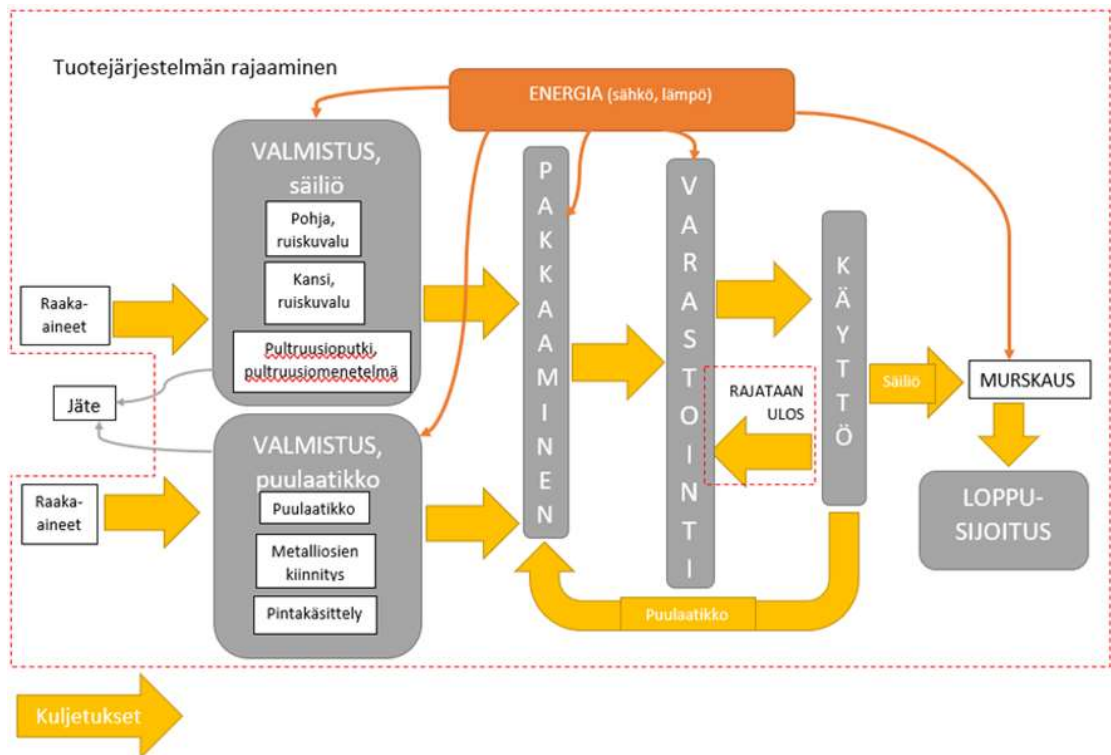
Suunnittelijan ja järjestelmäinsinöörin kanssa arvioitiin vaihtoehtoja, mitkä ovat kriittisiä tietoja uuden pakkauksen suunnittelemisessa, kuten ilmatiivis sisäpakkkaus ja ettei räjähdys saa levitä. Sekä mietittiin nykyisen lavapakkauksen haasteita, ja mitä vaikutusta olisi, jos lavapaikkaa kohden saataisiin pinottua useampi lava päällekkäin. Järjestelmäinsinööriltä varmennettiin tietoja panospakkauksen osien mitoista. VTT:n asiantuntijoiden kanssa keskusteltiin vaihtoehtoisista pakkausmateriaaleista ja pakkauksen suunnittelun tärkeydestä.

Tulosten käsittelyvaiheessa varmennettiin vielä maapeitteisen hallin energian kulutus Puolustuskiinteistöjen järjestelmäinsinööriltä. Lisäksi puulaatikon osalta alustavat tulokset esiteltiin tuotantopäällikölle. Samalla varmennettiin, että lähtötiedot olivat oikein. Tämä oli erityisen tärkeää, koska panoslaatikon mitat olivat aluksi väärin. Panoslaatikon massa oli jäänyt pienemmän laatikon mukaiseksi ja haastattelun perusteella tämäkin saatiin korjattua.

5.2.2 Panospakkausten elinkaariarviointi

Tässä tutkimuksessa on tarkoitus määrittää ympäristövaikutuksien elinkaariarviointimenetelmällä kahdeksan panospakkauksen ilmastonmuutosvaikutus. Varastoinnista lasketaan, miten varastointitiheyden kasvattaminen vaikuttaa ilmastonmuutosvaikutukseen. Tulosten pohjalta arvioidaan, kuinka panospakkausta tulisi kehittää. Työ on Puolustusvoimien sisäiseen käyttöön.

Toiminnallisena yksikkönä on kahdeksan panospakkausta, koska kahdeksan panospakkausta muodostaa yhden tertiäari- eli lavapakkauksen. Kun toiminnallinen yksikkö on lavapakkaus, on mahdollista arvioida helposti, kuinka esimerkiksi lavakorkeuden muuttuminen vaikuttaa varastoinnin tehokkuuteen. Yksi panospakkaus koostuu puisesta panoslaatikosta ja kahdesta lasikuituisesta panossäiliöstä. Kuvassa 10 on alustava rajausta tuotejärjestelmästä ja yksikköprosessit.



Kuva 10. Panospakkauksen tuotejärjestelmän rajausta ja yksikköprosessit (Leimu 2021).

Panoslaatikko valmistetaan höylätystä pontatusta kuusilaudasta, jossa on sisällä vanerista tehty tuki panossäiliölle. Laatikon pinnassa on käsittelyn helpottamiseksi ja rakenteen vahvistamiseksi puukorotusten päälle kiinnitetty metallivanteet vahvikkeina. Kiinnitykseen käytetään metallisia saranoita ja salpoja. Panoslaatikko maalataan. Käytettävä puumateriaali on kotimaista. Laskennassa testataan, onko käytettävillä metalliosilla ja maalauksella merkitystä panoslaatikon ilmastonmuutosvaikutukselle. Mikäli ei ole ne jätetään huomiotta varsinaisessa laskennassa. Panoslaatikoista käytetään uudelleen 95 % kunnostuksen jälkeen ja loput 5 % kierrätetään energiaksi.

Panossäiliö valmistetaan pultruusiomenetelmällä muovimatriisista ja lasikuidusta. Pohja ja kansi ruiskuvaletaan. Materiaaleina käytetään eurooppalaisia raaka-aineita. Panossäiliöt ovat kertakäyttöisiä ja ne loppusijoitetaan murskattuina kaatopaikalle.

Panossäiliöiden pakkaamiseen panoslaatikkoon liittyvä energian käyttö ei ole tiedossa, mutta laskennassa huomioidaan kuljetus. Varastona käytetään maapeitteistä hallia, jonka kosteus pidetään vakiona. Varastoinnissa käytetään 30 vuoden varastointiaikaa. Varastoinnin jälkeen laskennassa huomioidaan kuljetukset käyttöön ja loppusijoitukseen sekä panossäiliöiden loppusijoitus ja panoslaatikoiden uudelleenkäyttö ja poltto energiajakeena.

Lähtötiedot panoslaatikon yksikköprosesseihin. Panoslaatikon raaka-aineet, pakkausmateriaalit ja jätteet toiminnallista yksikköä kohden (taulukot 4, 5). Sähköenergiaa käytetään noin 13,3 kWh, jäännösjakauman mukainen seka-sähkö: fossiiliset energialähteet ja turve 40,58 %, uusiutuvat energian lähteet 7,88 % ja ydinvoima 51,54 %. Tuotantotilat lämmitetään tuotannon jätepuulla. 1200 kappaletta panoslaatikoita painaa 23 000 kg. Niiden pakkaamiseen käytetään 1 700 kg EUR-lavoja ja 65 kg teräsvannetta. (Vainio 2021.)

Taulukko 4. Panoslaatikoiden raaka-aineet ja kuljetusmatkat (Vainio 2021)

Materiaali	Massa	Kuljetusmatka
Puutavara, kuusi	140,0 kg	30 km
Vaneri, kuusi	1,8 kg	600 km
Naulat	2,2 kg	220 km
Salpasetti	5,2 kg	130 km
Niitit ja ruuvit	0,4 kg	220 km
Teräsvanne	1,8 kg	200 km
Visasol-maali	7,4 kg	220 km

Taulukko 5. Raaka-aineiden pakkausmateriaalit ja jätteet (Vainio 2021.)

Materiaali	Massa	Loppusijoitustapa
EUR-lavat	0,6 kg	Kierrätys
Maalipurkit, teräs	0,6 kg	Kierrätys
Pahvilaatikot	~ 0,2 kg	Kierrätys
Teräsvanne	~ 0,2 kg	Kierrätys
Muovi, kirkas ja värilinen	~ 0,2 kg	Kierrätys, kirkas ja värillinen erikseen
Tuotannon jäte, hukkapalat, purut, laadunvalvonta	~6,6 kg	Toissijaiset tuotteet, lämmitys, pellettien raaka-aine

Panossäiliön raaka-aineet tulevat useista eri lähteistä. Laskennassa oletetaan, että raaka-aineet tulevat Euroopasta, koska valtaosa tuotannossa käytettävistä raaka-aineista toimitetaan Euroopasta. Panossäiliön valmistukseen käytettävät menetelmät ja materiaalit ovat alla olevassa taulukossa 6. (Pirinen 2021.)

Taulukko 6. Panossäiliön lähtötiedot (Pirinen 2021).

	Menetelmä	Materiaali	Massa
Panospakkaus	Pultruusio	Lasikuitukomposiittiputki	24 kg
		Lasikuitulujitteiden osuus	16 kg
		Polyesterihartsin osuus	8 kg
Kansi	Ruiskupuristettu	LDPE	3,2 kg
Pohja	Ruiskupuristettu	Termoplastinen	3,2 kg
		Polystyreeni	

Kuljetusten osuus on koko elinkaaren aikana panoslaatikon, panossäiliön ja panospakkauksen osalta yhteensä 1250 km. Varastoinnin arvioitu energiankulutus on nykyisellä varastointitiheydellä kahdeksaa panospakkausta kohden 5,0 kWh vuodessa eli energian kulutus 30 vuodessa on 150 kWh. Jos varastointitiheyttä kasvatetaan kolmanneksella, energian kulutus kahdeksaa panospakkausta kohden on 3,8 kWh vuodessa eli energian kulutus 30 vuodessa on 113 kWh.

Vaikutusluokaksi valittiin ilmastonmuutos (GWP 100), jonka tulos annetaan kilogrammaa hiilidioksidiekvivalentti/toiminnallista yksikköä kohti. Puolustusvoimien logistiikkalaitoksella materiaalin kilpailutuksessa käytetään vaikutusluokana hiilijalanjälkeä ja tästä johtuen ilmastonmuutos valittiin elinkaariarvioinnin mittariksi. Allokoinnille ei muodostunut tarvetta annettujen lähtötietojen perusteella. Liitteessä 2. esitellään laskennassa käytetty prosessikaavio.

Herkkyystarkastelun avulla arvioitiin, mitä panoslaatikon ja panossäiliön syötevirroista tulee huomioida elinkaariarviointia tehdessä. Liitteessä 3 esitellään panoslaatikon prosentuaaliset osuudet massan ja hiilidioksidiekvivalentin mukaan. SFS-EN 14044: 2006/ A2: 2018, 22 mukaan rajauskriteereiden tunnistamiseen voidaan käyttää muun muassa materiaalin prosentuaalisia massaosuuksia ja ilmastonmuutosvaikutuksen merkittävyyttä. Panoslaatikon metalliosat yhdistettiin yhdeksi luokaksi, jolloin kaikilla materiaaleilla on yli 5 % massaosuus. Kun taas huomioidaan panoslaatikon päästöjen eli ilmastoja lämmitävien materiaalien ja toimintojen prosentuaaliset osuudet kg CO₂-ekvivalenttia/toiminnallinen yksikkö maali on ainoa materiaali, joka jää alle 5 %. Näiden tulosten perusteella panoslaatikon ilmastonmuutosvaikutuksen elinkaariarviointiin käytettiin kaikkia olemassa olevia lähtötietoja.

Panossäiliön lähtötiedoilla ovat kaikki arvot yli 5 % sekä materiaalin massaosissa, että päästöjen ilmastonmuutosvaikutuksissa (liite 4). Näiden tulosten perusteella panossäiliön ilmastonmuutosvaikutuksen elinkaariarviointiin käytettiin kaikkia olemassa olevia lähtötietoja.

6 TUTKIMUSTULOKSET

Elinkaariarvioinnin perusteella panospakkausten ilmastonmuutosvaikutukseksi saatiin -55 kg CO₂ ekvivalenttia/toiminnallinen yksikkö. Kaikkia tuloksia käsitelään suhteessa toiminnalliseen yksikköön, joka koostuu kahdeksasta kappaaleesta panospakkauksia. Kahdeksan panospakkausta sisältää kahdeksan panoslaatikkoa ja kuusitoista panossäiliötä. Elinkaariarvioinnin tuloksina saatiin, kuinka varastointitiheyden kasvattaminen vaikuttaa panospakkausten ilmastonmuutosvaikutukseen. Lisäksi arvioitiin, miten biomateriaalin käyttö vaikuttaa panospakkausten ilmastonmuutosvaikutukseen.

Panoslaatikosta saatiin luotettavat lähtötiedot laskentaan, koska valmistaja toimitti kaikki tarvittavat lähtötiedot raaka-aineista, kuljetusmatkoista, hukkamateriaaleista ja energian kulutuksesta. Panossäiliön lähtötiedot olivat puutteellisia, materiaalien toimitusmatkat, hukkamateriaalin määrä ja energian kulutus eivät ole tiedossa. Lähtötietojen hankinnassa, kehitysvaihtoehtojen arvioimisessa ja tulosten varmentamisessa haastattelut olivat tärkeässä roolissa. Taulukossa 7 kuvataan haastatteluiden tulokset. Tuloksia pystytään vertaamaan käyttäen elinkaarilaskennan työkaluja, joilla saatu tulos yhdelle panossäiliölle ilmastoa lämmittävänä vaikutuksena on 5,93 kg CO₂ ekvivalenttia/panossäiliö (Liitteet 5–7). Toisella elinkaarilaskennan työkalulla yhden panossäiliön ilmastoa lämmittävä vaikutus on 4,80 kg CO₂ ekvivalenttia/panossäiliö (Liite 8.). Ero on -1,13 kg CO₂ ekvivalentteina/panossäiliö eli 23,5 %. Tulosten eroa selittää osin laskentaohjelmien käyttämät eri tietokannat. Liitteessä 9. esitellään elinkaarilaskentaohjelmistot.

Taulukko 7. Haastattelut aikajärjestyksessä

Aihe	Pääkysymykset	Tulokset
Pakkauksen valinta	Mitä pakkausvaihtoehtoja on harkittu työhön? Mitä vahvuuksia pakkauksilla on? Mitä heikkouksia pakkauksilla on?	Kokonaan puiset pakkaukset suljettiin ulos, koska niiden ilmastonmuutosvaikutus on todennäköisesti pieni. Tutkimuksen kohteeksi valittiin panospakkaus, koska sisäpakkaus on pultruusiolasikuitua ja lähes ilmatiiviinä pakkauksena se ei ole täysin optimaalinen käyttötarkoitukseensa
Pakkauksen vaatimukset	Mitä ominaisuuksia pakkauksella tulee olla? Kuljetusturvallisuus? Säilytysolosuhteet?	Sisäpakkauksen tulee olla puolijohdettava, hermeettinen ja kemiallisesti yhteensopiva ruudin kanssa. Räjähdyksi ei saa levitä pakkauksesta toiseen. Pinoamis- ja putoamiskokeet. Tasalämpöisessä paikassa kymmeniä vuosia. Lyhytaikaisesti huonoissa olosuhteissa.
Panossäiliö	Voiko biokomposiitilla korvata lasikuitukomposiitin? Mitä haasteita se aiheuttaisi? Lasikuidun kierrätys?	Biokomposiiteilla vaikea saavuttaa samat lujuus ja iskunkestävyys ominaisuudet. Kasvikuidut yhteensopimattomia muovimatriisien kanssa. Onko ylipäättäen tällä hetkellä ekologisempaa käyttää biokomposiittia?
Panoslaatikon inventaariotiedot	Panoslaatikon elinkaari-laskentaan tarvittavat tiedot.	Materiaali ja jäte määrät, sekä kuljetusmatkat.
Panossäiliön kehittäminen	Pakkauskehityksessä huomioitavaa? Vaihtoehtoiset pakkausmateriaalit?	Pystytäänkö varastointitiheyttä kasvattamaan? Onko pakkaus optimaalinen?
Panossäiliöiden pakkaaminen Panoslaatikot	Kuinka panossäiliö pakataan? Mitä haasteita siinä on? Kuinka panoslaatikoita kierrätetään?	Ilmatiiveyden kannalta haasteellista kannen kiinnitys silikonilla. Panoslaatikoista 95 % uudelleen käytetään kunnostuksen jälkeen. Loput 5 % kierrätetään energijakeeksi.
Panospakkauksen kehittäminen	Mitä vaihtoehtoja panoslaatikon kehittämisessä on?	Mahtuisiko panossäiliön sisään puolijohdettava ilmatiivis muovipussi? Koko panospakkauksen kehittäminen siten, että varastointitiheys kasvaa.
Kuljetusvaatimukset	Mitä kuljetusvaatimuksia on? Millaisia testejä tehdään?	Pinotestit, palotestit, massaräjähdyksi, syntyminen, paineen pitää purkautua niin, ettei detonoit.
Varastointi	Maapeitteisten hallien lavapaikkojen määrä?	Varastoinnissa lavapaikkojen määrään vaikuttaa varastoiva materiaali.
Panoslaatikon alustavien tulosten esittely	Panoslaatikon mittojen ja painon varmistaminen	Panoslaatikon paino oli liian pieni. Laskenta korjattiin suuremmalla painolla.
Varastointi	Mikä on maapeitteisten hallien energian kulutus?	Teho x käyttötunnit = Energiankäyttö 2,2 kW x 1600 h = 3520 kWh

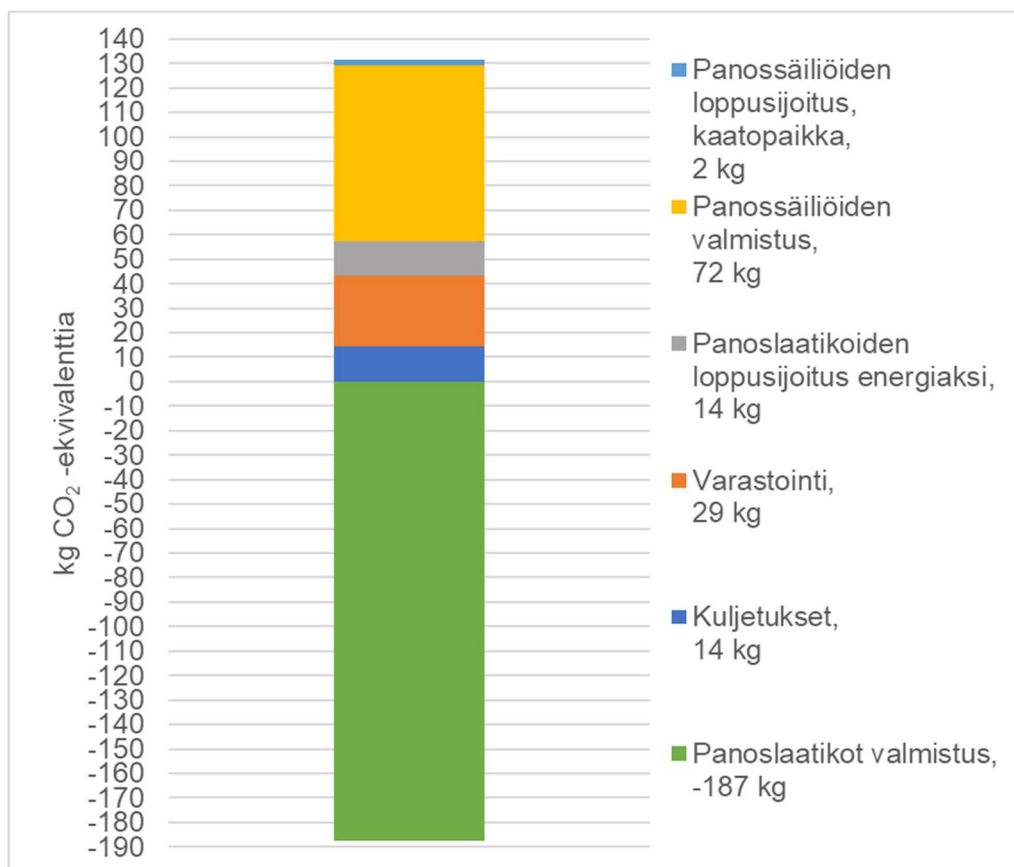
Varastoinnin osalta tunnetaan keskimääräinen kahdeksan panospakkauksen osuus sähkönkulutuksesta, joka on 30 vuodessa 150 kWh. Varastointiin käytettävä energiankulutus on suhteutettu toiminnallisen yksikön käyttämään osuuteen koko varaston sähkönkulutuksesta. Täten on pystytty laskemaan, miten varastointitiheyden kasvattaminen kolmanneksella vaikuttaisi panospakkauksen elinkaaren aiheuttamaan ilmastonmuutosvaikutukseen.

6.1 Panospakkausten ilmastonmuutosvaikutus nykyisellä konstruktiolla

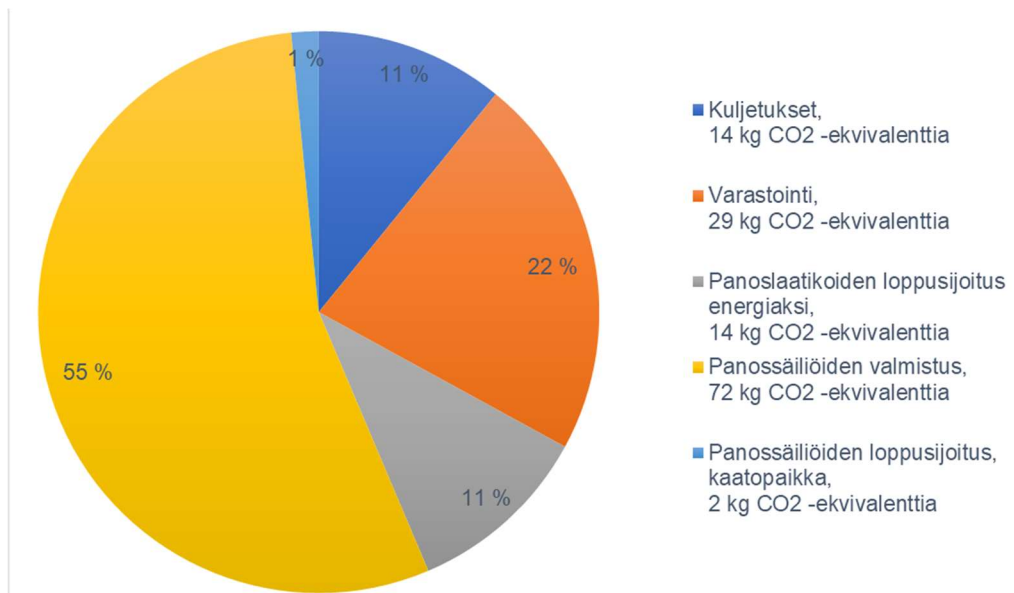
Panospakkausten ilmastonmuutosvaikutus on negatiivinen -55 kg CO₂ ekvivalenttia/toiminnallinen yksikkö. Kuvassa 12 eritellään, kuinka ilmastoalämmittävävaikutus jakautuu elinkaaren eri vaiheisiin. Päästöjä panospakkauksen elinkaareissa aiheuttavat varastointi, panoslaatikoiden loppusijoituksen energijakeeseen menevä osa 5 %, panossäiliön valmistus ja loppusijoitus, sekä kuljetukset. (Liite 10.)

Panoslaatikoiden ilmastoalämmittävävaikutus on negatiivinen -187 kg CO₂ -ekvivalenttia/kahdeksan panoslaatikkoa, koska puusta valmistettu laatikko sitoo itseensä käytön aikana puumateriaalin hiilen. Käytön jälkeen panoslaatikoista 95 % kunnostetaan uudelleen käytettäväksi. Loput 5 % kierrätetään energijakeessa, jolloin puuhun sitoutuneesta hiilestä vapautuu 14 kg.

Panossäiliön ilmastoalämmittävävaikutus on 72 kg CO₂ -ekvivalenttia/16 kpl panossäiliötä, joka on 55 % panospakkausten kokonaispäästöstä. Logistiikan osuus päästöistä on 43 kg CO₂ -ekvivalenttia/toiminnallisesta yksiköstä, joka jakautuu seuraavasti: varastoinnin osuus on 29 kg CO₂ -ekvivalenttia/toiminnallinen yksikkö ja kuljetuksien osuus 14 kg CO₂ -ekvivalenttia/toiminnallinen yksikkö. Kuvassa 13. on kokonaispäästöihin kuuluvien päästöjen prosentuaalinen jakautuminen, hiilidioksidiekvivalenttiltaan positiiviset arvot eli kuljetukset, varastointi, panoslaatikoiden loppusijoituksen energijakeen osuus, panossäiliöiden valmistus ja loppusijoitus.



Kuva 11. Panospakkausten elinkaaren eri vaiheiden ilmastonmuutospotentiaali toiminnallista yksikköä kohden

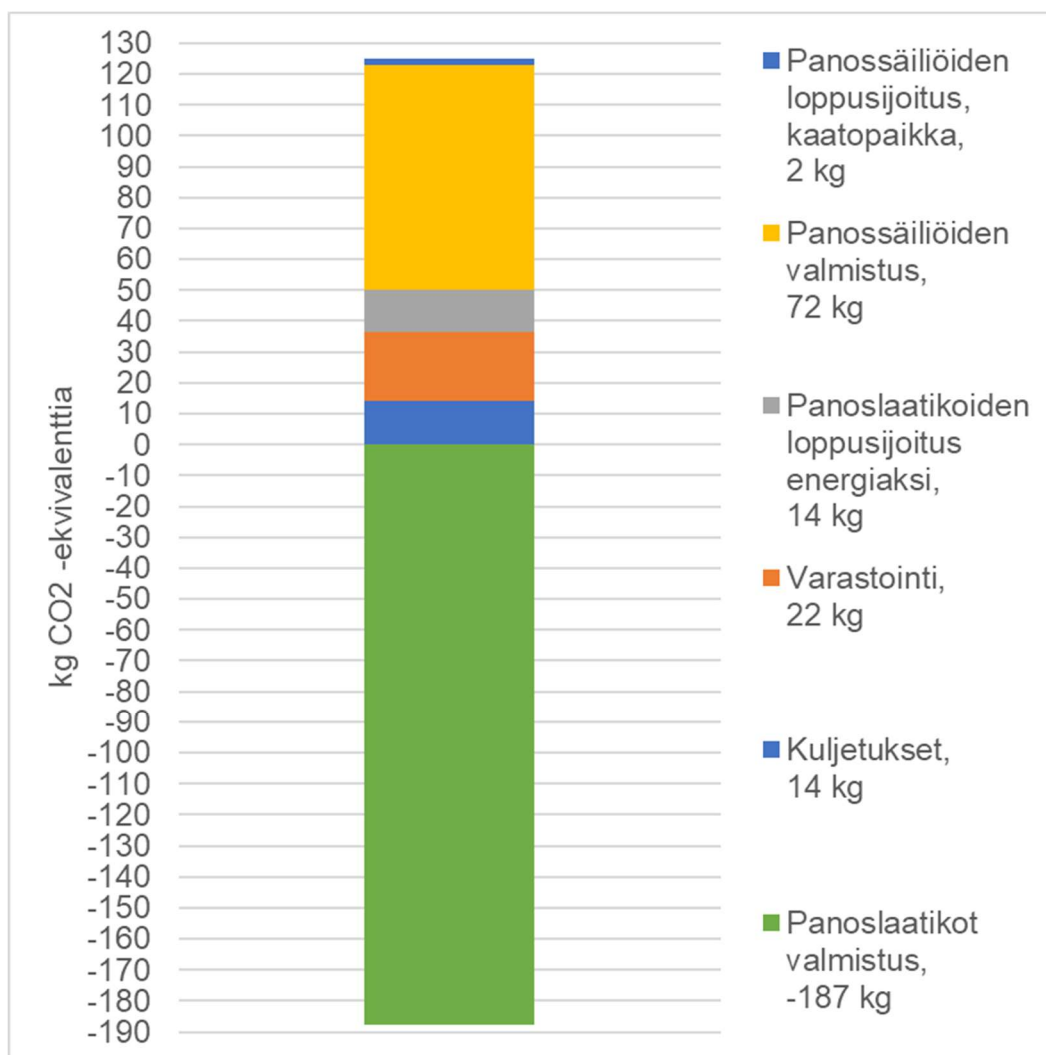


Kuva 12. Panospakkausten päästöjen jakautuminen toiminnallista yksikköä kohden

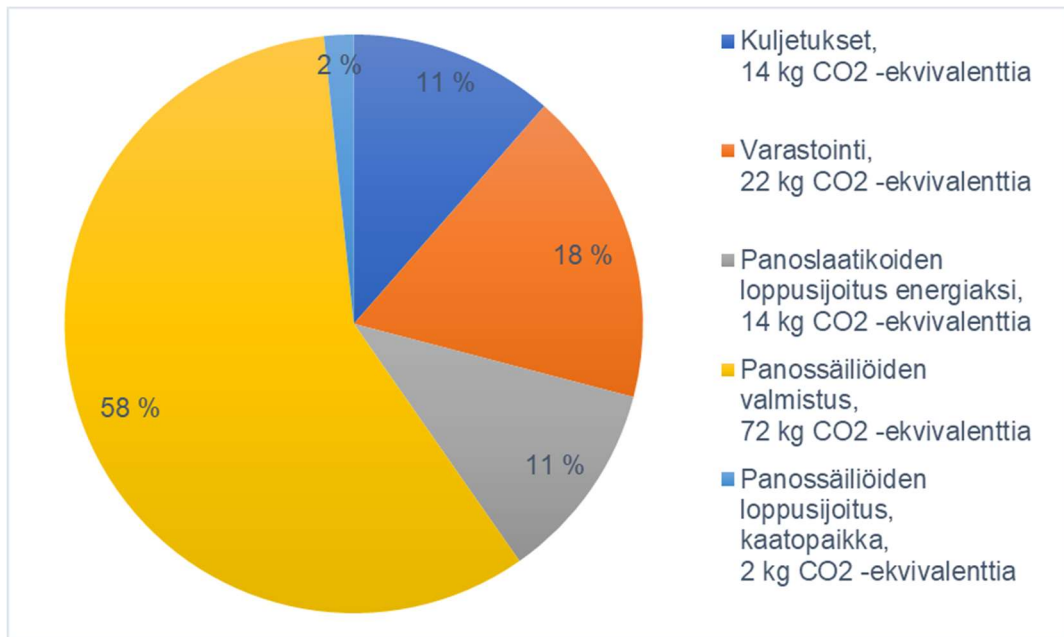
6.2 Panospakkausten varastotiheyden kasvattaminen

Panospakkausten varastointitiheyden kasvattaminen kolmanneksella pienentää 7 kg CO₂-ekvivalenttia/toiminnallinen yksikkö ilmastonmuutosvaikutustaan tämän jälkeen negatiivinen -63 kg CO₂-ekvivalenttia/toiminnallinen yksikkö.

sikkö. Kuvasta 14. näkee varastointitiheyden panospakkausten elinkaarivaiheiden ilmastonmuutosvaikutuksen. Kuvassa 15. esitellään päästöjen prosentuaalisten osuuksien muutokset. (Liite 11.)



Kuva 13. Suuremmalla varastointitiheydellä panospakkausten elinkaaren vaiheiden ilmastonmuutosvaikutus toiminnallista yksikköä kohden



Kuva 14. Varastointitiheyden kasvattamisen vaikutus panospakkauksen päästöjakaumaan toiminnallista yksikköä kohden

6.3 Panospakkausten panossäiliöiden ilmastonmuutosvaikutus ja käyttö sekundäärisenä raaka-aineena

Panospakkausten panossäiliöiden materiaalien hyödyntämisellä on ainoastaan vähäiset vaikutukset suoriin hiilidioksidipäästöihin. Lujitemuovin käytölle sementin raaka-aineena ei ole määritetty, kuinka paljon se sitoo alkuperäisen materiaalin ilmastoaa lämmittävistä kaasuista. Tästä seuraa, että ei pystytä arvioimaan kuinka paljon panospakkausten raaka-aineisiin sitoutuneista ilmastomuutokseen vaikuttavista kaasuista vapautuu, jos panospakkausten materiaali käytettäisiin sementin raaka-aineena.

6.4 Biomateriaalien käytettävyys panospakkausten ilmastonmuutosvaikutuksen pienentämiseksi

Nykyisen panospakkauksen ilmastonmuutosvaikutuksen ollessa negatiivinen, on mahdollista, että pienemmän ilmastonmuutosvaikutuksen saavuttaminen uudella pakkauskonstruktioilla on haastavaa. Panospakkausten ilmastonmuutosvaikutuksen pienentämiseksi uuden pakkauksen tulee olla biomateriaali, joka sitoo itseensä hiiltä ja jonka valmistuksessa ei käytetä runsaasti energiaa ja kemikaaleja. Ilmatiiveyden saaminen sisäpakkaukseen öljypohjaisesta muovista valmistetulla puolijohtavalla muovipussilla on järkevää, kun huomioidaan käytettävän muovipussin suhteellisen pieni massa, tasalaatuisuus ja ruudin

säilyvyyden paranemin. Ulkopakkauksen tulisi olla biomateriaali, joka sitoo itseensä runsaasti hiiltä. Lisäksi varastointitiheyden tulisi olla suurempi kuin nykyisellä konstruktiolla.

Esimerkiksi pultruusiolasikuituputken kehittäminen ei todennäköisesti pienentäisi panospakkauksen ilmastonmuutosvaikutusta. Biokomposiiteilla ei tällä hetkellä päästä vastaaviin lujuuksiin kuin lasikuitukomposiitilla. Tästä seuraa, että panossäiliön seinävahvuutta täytyisi kasvattaa, jolloin panoslaatikossa vähintään säiliön tuentaa tarvitsisi muuttaa tai mahdollisesti jopa suurentaa panoslaatikkoa. Seinävahvuuden kasvattamisesta seuraa suurempi materiaalikulutus. Biokomposiittien valmistuksessa tarvitaan vahvoja kemikaaleja ja energian kulutus voisi kasvaa suuremmaksi per panossäiliö kuin nykyisellä valmistustavalla. Tästä syystä pelkästään nykyisen panossäiliön korvaamista biokomposiittisäiliöllä ei ole mielekästä lähteä tutkimaan, vaan tulee tutkia, kuinka panospakkausta kehitetään kokonaisuutena.

Ilmastonmuutosvaikutukseltaan pienemmän pakkausvaihtoehdon valmistaminen vaatii hyvää suunnittelua, koska nykyisen panospakkauksen puulaatikon kyky sitoa itseensä hiiltä on suuri. Tässä työssä ei laskettu vaihtoehdoiselle pakkaukselle ilmastonmuutosvaikutusta, koska liian monia suureita olisi jouduttu arvioimaan, kuten esimerkiksi valmistukseen käytettävä energia, pakkauksen todennäköiseen massa ja jätevirrat.

7 TULOSTEN TARKASTELU

Panospakkauksessa panoslaatikko on ekologinen ja hyvin uudelleenkäytettävä. Puupakkauksena panoslaatikon hiilidioksidiekvivalentti on negatiivinen, koska se säilyttää puumateriaalin sisältämän hiilen eikä vapauta sitä luontoon. Pakkausmateriaalien lisäksi tulee huomioida pakkauksien varastoitavuus. Erittäin pitkään varastoitavissa tuotteissa, kuten panospakkaukset, varastoinnin energiankulutuksella on merkitystä ilmastonmuutosvaikutuksen kannalta.

Nykyisellä konstruktiolla pakkausmateriaaleista panossäiliöiden osuus päästöistä on 55 %, 72 kg CO₂ -ekvivalenttia/16 kpl panossäiliöitä, kun taas varastoinnin osuus päästöistä on 22 %, 29 kg CO₂ -ekvivalenttia/varastoinnin energian kulutus 30-vuodessa. Varastointitiheyden kasvattaminen kolmasosalla

vähentää varastoinnin ilmastoalämmittävää vaikutusta 7 kg CO₂ -ekvivalenttia/toiminnallinen yksikkö. Panospakkauksien määrää yhtä lavapaikkaa kohden olisi mahdollista lisätä, jos panospakkausten lavakorkeutta saataisiin madallettua. Lavakorkeutta olisi mahdollista madaltaa, jos panoslaatikot pystytettiin pakkaamaan lavalle kapeimmalle sivulleen, 280 mm. Tällöin EUR-lavalle, joka on 1200 mm leveä, mahtuu 4 panoslaatikkoa rinnan. Kokonaislavakorkeus olisi tällöin noin 1190 mm.

Ennen kuin lavapakkaukseen tehdään edellä esitetty muutos, tulee tutkia kestääkö nykyinen panoslaatikko aikaisempaa nähden eri suunnasta tulevan rasituksen vai täytyykö puulaatikon rakennetta muuttaa. Tulee myös huomioida, kuinka monen lavapakkauksen massan rasituksen alin lavapakkaus kykenee kantamaan. Pitää myös tutkia täytyykö panossäiliön tuentaa muuttaa, kun laatikko pakataan eri kyljelle kuin nykyisin. Lisäksi pakkaus- ja varoitusmerkintöjen paikka tulee siirtää, jotta ne näkyvät.

Esitetyn kaltainen muutos vähentäisi varastoinnin prosentuaalista päästöosuutta 18 % ja pienentäisi ilmastonmuutosvaikutusta 7 kg CO₂ -ekvivalenttia/toiminnallista yksikköä kohden. Tällöin panospakkausten ilmastonmuutosvaikutus olisi negatiivinen -63 kg CO₂ -ekvivalenttia/toiminnallinen yksikkö.

Panossäiliöiden valmistus on merkittävin materiaalien päästölähde. Panossäiliöiden ilmastonmuutosvaikutus on 72 kg CO₂ -ekvivalenttia/16 panossäiliötä, joka on 55 % nykyisen konstruktion panospakkausten päästöistä. Panossäiliön ilmastonmuutosvaikutuksen pienentämiseksi lyhyellä aikavälillä helpoin ratkaisu on, että murskattu jäte toimitetaan sementin raaka-aineeksi, mikäli lasikuitujätteen keräily on saatu onnistumaan. Panossäiliöt murskataan nykyisinkin ennen loppusijoitusta kaatopaikalle. Sementin raaka-aineena käytettävät lasikuitutuotteet murskataan, joten panossäiliön pultruusiolasikuituosan loppukäsittelyä ei tarvitsisi muuttaa, vaikka ne saataisiin toimitettua sementin raaka-aineeksi.

Panospakkausten negatiivinen ilmastonmuutosvaikutus syntyy panoslaatikoiden puumateriaalin sitomasta hiilestä. Muilla biomateriaaleilla on haastavaa päästä yhtä pieneen ilmastonmuutosvaikutukseen, johtuen kuusilaudan matalasta jalostusasteesta.

Nykyinen panossäiliö ei ole täysin optimaalinen lähes ilmatiiviinä säiliönä käytötarkoitukseensa, joten panossäiliön kehittäminen ilmatiiviiksi parantaisi ruudien säilyvyyttä. Panospakkauksen ominaisuuksien optimoinnin ja panossäiliöiden suuren ilmastoalämmittävän vaikutuksen takia, panospakkauksen rakenteellinen uudistaminen olisi järkevää. Panospakkausta tulee kehittää kokonaisuutena, vaikka panoslaatikko sekundaaripakkauksena toimii hyvin ja on ilmastoystävällinen. Panospakkauksen tulee täyttää seuraavat ominaisuudet: sisäpakkauksen tulee olla ilmatiivis, puolijohtava ja ruudien kanssa yhteensopiva. Sen pakkauksen osan, johon ruutipanokset pakataan, tulee olla mitansa pitävä, lieriön sisähalkaisijan tarkkuus tulee olla $\pm 0,2$ mm ja sisäkorkeuden osalta $\pm 1,0$ mm. Panospakkauksen tulee estää räjähdysten välittyminen toiseen ruutipanokseen. Lisäksi pakkausta suunniteltaessa tulee huomioida varastointitiheys ja panospakkauksen käsiteltävyys ilman koneapua.

Kirjallisuuskatsauksen ja haastatteluiden perusteella helpoin tapa ratkaista ilmatiiveys ja puolijohtavuus olisi käyttää sisäpakkauksena puolijohtavaa ilmatiivistä muovipussia. Tällöin tarvitaan luotettava kylmäsaumaustekniikka, jotta saumasta ei tule pussin ilmatiiveyden heikkoa kohtaa. Nykytekniikalla pussiin olisi mahdollista myös liittää älytekniikkaa esimerkiksi lämpötila- ja kaasundiakaattorit. Lämpötila-aika-indikaattorit toimivat siten, että jos tuote on säilytetty väärässä lämpötilassa, indikaattorin väri vaihtuu. Kaasuindikaattorilla voitaisiin mitata pakkauksen ilmatiiveyttä. Indikaattoreiden haasteena on, miten ne toimivat erittäin pitkäaikaisessa säilytyksessä. Ulkopakkauksena voitaisiin käyttää esimerkiksi puristekuituista säiliötä, jonka ominaisuuksia on parannettu liisäaineilla. Pakkaukseen olisi integroitu kantohihna, joka helpottaisi pakkauksen käsittelyä silloin, kun se ei ole lavalla.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lyhyellä aikavälillä helpoin tapa pienentää panospakkausten ilmastonmuutosvaikutusta on varastointitiheyden kasvattaminen kolmanneksella. Varastointitiheyden kasvattaminen vaatii luultavasti panoslaatikon kehittämistä, jotta pakkaus kestää kapealle korkealle sivulle tulevan painorasituksen. Varastointitiheyden kasvattamisella kolmanneksella pienentää 12 % panospakkausten ilmastonmuutosvaikutusta. Ruudin säilyvyyden parantamiseksi tulisi testata mahtuuko nykyisen panossäiliön sisään puolijohtava ilmatiivis muovipussi. Mikäli putruusiolasikuidun uudelleen käyttö sementin sekundaarisena materiaalina mahdollistuu, se pienentäisi merkittävästi panospakkausten ilmastonmuutosvaikutusta, koska panossäiliön raaka-aineiden ilmastonmuutosvaikutus pieneneisi uusiokäytön myötä.

Nykyisen panospakkauksen ollessa ilmastonmuutosvaikutuksiltaan negatiivinen, on haastavaa saavuttaa panospakkausta kehittämällä ilmastonmuutosvaikutuksiltaan pienempää panospakkausta. Koska panospakkauksen panossäiliö on ainoastaan lähes ilmatiivis, olisi ruudin säilyvyyden kannalta hyvä kehittää panospakkausta. Panospakkausta kehittämällä on päästävissä ilmatiiviseen, kevyempään ja suuremman varastointitiheyden mahdollistavaan ratkaisuun. Tällöin kuljetusten ja varastoinnin päästöt vähenevät panospakkausta kohden, jolloin panospakkauksen materiaalin ei tarvitse olla yhtä pieni ilmastonmuutosvaikutuksiltaan kuin nykyisin.

LÄHTEET

Abhiram, Y., Das, A. & Sharma, K. 2021. Green composites for structural and non-structural applications: A review. *Materials Today: Proceedings*. Elsevier. E-julkaisu. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 8.6.2021].

Abou-Kandil, A., Darwish, N., Moustafa, H. & Youssef, A. 2019. Eco-friendly polymer composites for green packaging: Future vision and challenges. *Composites, Part B*. Elsevier. E-julkaisu. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 8.6.2021].

Ala-Viikari, J. 2021. Puupakkaukset. Teoksessa Lehtinen, L. (toim.) *Kestävä pakkaus*. Forssa: Suomen Pakkausyhdistys ry, 162–1165.

Alemaskin, K., George, M., & Mussone, P. 2016 Enzymatically treated natural fibres as reinforcing agents for biocomposite material: mechanical, thermal, and moisture absorption characterization. *Journal of Material Sci* 51. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 9.3.2022]. 2677–2686.

Aminabhavim, T., Appels, L., Dewil, R., & Kamali, M. 2021. Nanostructured materials via green sonochemical routes – Sustainability aspects. *Chemosphere* 276. Elsevier Ltd. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 31.3.2022].

Alcayde, A., Baños, R., Parra-Meroño, M. & Wandosell, G. 2021. Green Packaging from Consumer and Business Perspectives. *Sustainability* 2021, 13(3). Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/su13031356> [viitattu 8.6.2021].

Antikainen, R. 2010. Elinkaarimetodiikkojen nykytila, hyvät käytännöt ja kehitystarpeet. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 7/2010. Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/39822> [viitattu 8.6.2021].

Asetus vaarallisten tavaroiden kansainvälisistä tiekuljetuksista tehdyn eurooppalaisen sopimuksen voimaansaattamisesta. SopS 9.3.1979/23.

FlexFormTechnologies. 2013. Applications. Saatavissa: <https://www.flexformtech.com/Auto/Applications/> [viitattu 24.4.2022].

Bare, J., Hofstetter, P., Pennington, D. & de Haes, H. 2000. Midpoints versus Endpoints: The Sacrifices and Benefits. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Life Cycle Impact Assessment Workshop. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 16.3.2022].

Beylot A., Corrado S., Crenna E., Sala S., Sanyé-Mengual E. & Secchi M. 2019. Indicators and assessment of the environmental impact of EU consumption, Consumption and Consumer Footprints for assessing and monitoring EU policies with Life Cycle Assessment. Science for Policy report by the Joint Research Centre (JRC), the European Commission's science and knowledge service. Saatavissa: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/Science_for_policy_report_final_on_line.pdf [viitattu 16.3.2022].

- Biomuoviopas. 2020. Muovipoli Oy & Muoviteollisuus ry. Saatavissa: https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit_ja_ymparisto/biomuovit/ [viitattu 26.7.2021].
- Bix, L., De la Fuente, J. & Lockhart, H. 2009. Packaging design and development. Teoksessa: Yam, K. The Wiley Encyclopedia of Packaging Tehnology. 3. painos. E-kirja. John Wiley & Sons, Incorporated. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 1.9.2021].
- Blom, D. & Dufta, K. 2016. Lujitemuovijätteen materiaalin ja energian kierrätys sementtiuunissa. Mikkeli: Mikkelin Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-588-548-7> [viitattu 8.6.2021].
- Chamberlain, D. & Kirwan, M. 2014. Paper and paperboard – raw materials, processing and properties. Kirwan, M. (toim.) Handbook of Paper and Paperboard Packaging Technology. 2. painos. John Wiley & Sons, Incorporated. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 17.1.2022].
- Eco Impact Calculator for composites. s.a. Terms and Conditions. Saatavissa: <https://ecocalculator.eucia.eu/Account/TermsAndConditions> [viitattu: 6.9.2021].
- Foster, G. 2009. Boxes, Corrugated. Teoksessa: Yam, K. The Wiley Encyclopedia of Packaging Tehnology. 3. painos. E-kirja. John Wiley & Sons, Incorporated. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 1.9.2021].
- GaBi Paper Clip Tutorial. s.a. Introduction to LCA and modelling using GaBi. PE international sustainability performance. Saatavissa: https://gabi.sphera.com/fileadmin/gabi/GaBi_Learning_Center_Paperclip_Tutorial_Part1.pdf [viitattu: 25.10.2021].
- Donghwan C., Drzal L. & Hyun-Joong, K. 2013. Surface treatment and characterization of Natural Fibers: Effects on the Properties of Biocomposites. Teoksessa: Goda, K., Kuruvilla, J., Malhotra, S., Sabu, T. & S., Skreekala, M. (toim.) Polymer Composites, Biocomposites. John Wiley & Sons, Incorporated. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 7.3.2022].
- Emblem, A. 2012 Packaging and society. Teoksessa: Emblem, A. & Emblem, H. (toim.) Packaging technology, Fundamentals, materials and processes. USA, Philadelphia: Elsevier Science & Technology, 3–9. Saatavissa: Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 1.9.2021].
- EU jätedirektiivi 19.11.2008/98/EY.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 20.10.2010/995
- Goda, K., Kuruvilla, J., Malhotra, S., Sabu, T. & S., Skreekala, M. 2013. Advances in Polymer Composites: Biocomposites – State of Art, New Challenges, and Opportunities. Teoksessa: Goda, K., Kuruvilla, J., Malhotra, S., Sabu, T. & S., Skreekala, M. (toim.) Polymer Composites, Biocomposites. John Wiley & Sons, Incorporated. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 16.9.2021].

Jitendra, T., Kwang, K. & Rajanish, T. 2011. Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices. Progress in Materials Science. Elsevier Ltd. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 31.3.2022].

Hallituksen esitys HE 25.3.2021/40 vp. Hallituksen esitys eduskunnalle laiksi jätelain ja eräiden siihen liittyvien lakien muuttamisesta.

Holappa, T. 2021. Paperisäkit. Teoksessa Lehtinen, L. (toim.) Kestävä pakkaus. Forssa: Suomen Pakkausyhdistys ry, 107–111.

Hovi, R. 2021. Paperipakkaukset. Teoksessa Lehtinen, L. (toim.) Kestävä pakkaus. Forssa: Suomen Pakkausyhdistys ry, 74–77.

Huhtala, K. 2021. T&K. Haastattelu 7.6.2021. Puolustusvoimien logistiikkalaitoksen esikunta.

Jokela, E., Koivula, H. & Kuusipalo, J. 2021. Pakkausmateriaalien ja pakkaus-ten testaaminen ja tutkimus. Teoksessa Lehtinen, L. (toim.) Kestävä pakkaus. Forssa: Suomen Pakkausyhdistys ry, 421–431.

Jokela, E. & Ympäristöryhmä 2021. Aaltopahvi. Teoksessa Lehtinen, L. (toim.) Kestävä pakkaus. Forssa: Suomen Pakkausyhdistys ry, 93–105.

Jokela, E. 2021. Aaltopahvien testausmenetelmiä. Teoksessa Lehtinen, L. (toim.) Kestävä pakkaus. Forssa: Suomen Pakkausyhdistys ry, 428–431.

Järvinen, L. 2021. Kartonkipakkaukset. Teoksessa Lehtinen, L. (toim.) Kestävä pakkaus. Forssa: Suomen Pakkausyhdistys ry, 79–91.

Jätelaki 17.6.2011/646

Kangas, H. 2021. Introduction – What are bio-based nanomaterials?. Forest-BioFacts. WWW-dokumentti. Päivitetty 8.3.2021. Saatavissa [viitattu 28.9.2021].

Koivula, H. & Kuusipalo, J. 2021. Pakkauksen läpäisevyys ja barriereeri vaatimukset. Teoksessa Lehtinen, L. (toim.) Kestävä pakkaus. Forssa: Suomen Pakkausyhdistys ry, 42–59.

Kääntee, U. 2021. Kestävän kehityksen päällikkö. Sähköpostikeskustelu 24.–25.8.2021. Finnsementti Oy.

Laki jätelain muuttamisesta 5.11.2021/917

Laki puutavaran ja puutuotteiden markkinoille saattamisesta 13.12.2013/897

LCI Data for Life Cycle Assessment (LCA). 2019. ThinkStep. Saatavissa: https://youtu.be/LZiPd9_wjbg [viitattu 6.9.2021].

Leimu, M. 2021. Järjestelmän rajaaminen ja yksikköprosessit kuvaava prosessikaavio. Puolustusvoimien logistiikkalaitoksen esikunta.

Lepistö, T. 2014. Luonnonkuitukomposiitit. A: Tutkimuksia ja raportteja – research reports 89. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu.

Life Cycle Impact Assessment Guide: Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment (LCA) (2010). The guide provides an overview of the impact assessment methods existing in 2010, and their main features.

Life Cycle Impact Assessment Guide: [Framework and requirements for Life Cycle Impact Assessment \(LCIA\) models and indicators \(2010\)](#). The guide provides the list of criteria to be used in assessing the impact assessment models and indicators, in terms of scientific robustness and stakeholder acceptability.

Lepistö, T. 2014. Luonnonkuitukomposiitit. Tutkimuksia ja raportteja – research reports 89. Mikkelin ammattikorkeakoulu, Mikkeli. Saatavissa:

Lindqvist, V. & Paltakari, J. 2020. Corrugated board. ForestBioFacts. WWW-dokumentti. Päivitetty 9.11.2020. Saatavissa <https://forestbiofacts.com/natural-fibre-products/paperboards/containerboard/corrugated-board/> [viitattu 17.2.2021].

Martikainen, T. 2021. Sektorijohtaja. Sähköpostiviesti. 10.6.2021. Puolustusvoimien logistiikkalaitoksen esikunta.

Matuana, I. & Stark, N. Trends in sustainable biobased packaging materials: a mini review. Materials Today Sustainability 15 (2021) 100084. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi> [viitattu 23.3.2022].

Mäntymaa, J. 2021. Järjestelmänsinööri. Haastattelu. 7.7.2021. Puolustusvoimat.

Palttari, J. 2020. Pulps used in FBB. ForestBioFacts. Päivitetty 9.11.2020. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi> [viitattu 13.3.2022].

Pirinen, S. 2021 Panospakkauksen elinkaarianalyysi. 2.7.2021. Exel Composites Oy.

Puolustusvoimien ympäristöstrategia 2021-2032. s.a. Puolustusvoimat. PDF-julkaisu: https://puolustusvoimat.fi/documents/1948673/2015387/PV_ympa%CC%88risto%CC%88strategia_julkaisu_final.pdf/3182904c-9388-f22a-2cd5-ab2f084a7cc5/PV_ympa%CC%88risto%CC%88strategia_julkaisu_final.pdf?t=1613716603879 [viitattu 7.6.2021].

Puusa, A. 2020. Haastattelutyypit ja niiden metodiset ominaisuudet. Teoksessa: Juuti, P & Puusa, A. (toim.) Laadullisen tutkimuksen näkökulmat ja menetelmät. Gaudemus Oy. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 8.9.2021].

Rilay, A. 2012. Paper and paperboard packaging. Teoksessa: Emblem, A. & Emblem, H. (toim.) Packaging technology, Fundamentals, materials and processes. USA, Philadelphia: Elsevier Science & Technology 179–239. E-kirja. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 1.9.2021].

SFS-EN ISO 14040. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet.

SFS-EN ISO 14044:2006/A2:2018. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja.

SFS-EN ISO 16640:2017/AC:2017. Bio-based products. Bio-based carbon content. Determination of the bio-based carbon content using the radiocarbon method.

SFS-EN ISO 16785-1. Bio-based products. Bio-based content. Part 1: Determination of the bio-based content using the radiocarbon analysis and elemental analysis.

Soilampi, V & Valkeapää, K. 2021. Wood can be turned into a variety of products. Forest Bio Facts. Päivitetty 22.9.2021. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/introduction-to-forest-based-bioeconomy/versatile-products-out-of-wood/> [viitattu 17.1.2022].

Sun, X. 2005. Overview of Plant Polymers: Resources, Demands, and Sustainability. Teoksessa Sun, X. & Wool, R. (toim.) Bio-Based Polymer and Composites. Elsevier Science & Technology. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 13.8.2021].

Säilä, A. 2021. Pakkaus. Teoksessa Lehtinen, L. (toim.) Kestävä pakkaus. Forssa: Suomen Pakkausyhdistys ry, 11–21.

Syvänne, J. 2021. Muovipakkaukset. Teoksessa Lehtinen, L. (toim.) Kestävä pakkaus. Forssa: Suomen Pakkausyhdistys ry, 134–161.

Tavoitteena kartoittaa toimiva reitti komposiittimateriaalin kierrättämiseksi. s.a. Muoviteollisuus ry. Saatavissa: [Tavoitteena kartoittaa toimiva reitti komposiittimateriaalin kierrättämiseksi | Muoviteollisuus ry \(plastics.fi\)](https://tavoitteena.kartoittaa.toimiva.reitti.komposiittimateriaalin.kierrattamiseksi|muoviteollisuus.ry(plastics.fi)) [viitattu 15.9.2021.]

Tietoa elinkaariarvioinnista (LCA) ja elinkaariklinikatoimintamallista pk-yrityksille. 2017. Suomen Ympäristökeskus. Saatavissa: <https://www.syke.fi/download/noname/%7B032490FA-19DF-4E5A-A40F-88E22B86DA20%7D/132057> [viitattu 29.6.2021.]

Valtioneuvosten asetus kaatopaikoista 2.5.2013/331

Vainio, T. 2021. Puulaatikko, määrä 1200 kpl. Rakennuspalvelu Jurva Rinne Ky.

Varis, R. 2020a. Applications of plywood. Forest Bio Facts. Päivitetty 5.11.2022. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/wood-products/plywood/applications-of-plywood/> [viitattu 2.3.2022].

Varis, R. 2020b. Special and processed plywood. Forest Bio Facts. Päivitetty 5.11.2022. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/wood-products/plywood/special-and-processed-plywood/> [viitattu 2.3.2022].

Varis, R. 2020c. Technical properties of plywood. Forest Bio Facts. Päivitetty 5.11.2022. Saatavissa: <https://forestbiofacts.com/wood-products/plywood/technical-properties-of-plywood/> [viitattu 2.3.2022].

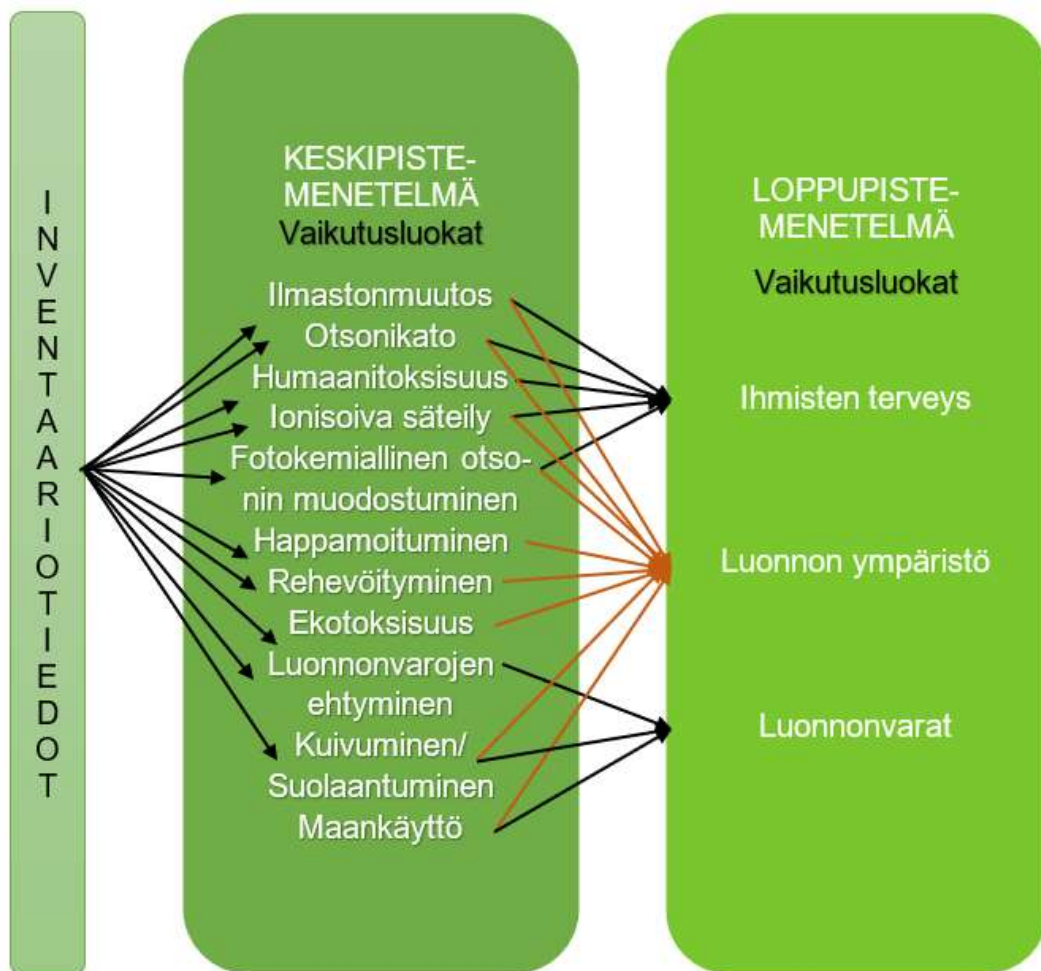
Walaa, I. 2018. Midpoint and endpoint impact categories in Green building rating systems. Journal of Cleaner Production 182. Elsevier. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 16.3.2022].

YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ELINKAARIARVIOINTI (LCA)

Ympäristövaikutusten elinkaariarviointi on menetelmä, jonka avulla määritetään materiaalin tai palvelun koko elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset raaka-aineen hankinnasta loppusijoitukseen asti tai raaka-aineen hankinnasta valmiiksi tuotteeksi. Ympäristövaikutuksia voidaan arvioida esimerkiksi kasvi-huonekaasujen ilmastoa lämmittävänä vaikutuksena, jolloin tulos ilmoitetaan hiilijalanjälkenä. Kansainvälisesti hyväksytty menetelmä tehdä elinkaariarviointia perustuu muun muassa standardeihin SFS-EN ISO 14040 ja SFS-EN ISO 14044:2006. ISO 14040 määrittää elinkaariarvioinnin yleisen sisällön ja ISO 14044:2006 kuinka laskenta suoritetaan. Ympäristövaikutusten elinkaariarviota käytetään tuotesuunnitteluun ja -kehittämiseen, strategiseen suunnitteluun sekä päätöksenteon tukena ja markkinoinnissa. (SFS-EN ISO 14040: 2006 + A1: 2018 7–8; ISO 14044:2006.)

Ympäristövaikutusten elinkaariarvioinnin vaikutusluokat

Elinkaariarvioinnissa valitaan tutkittavaan ympäristökysymykseen sopiva vaikutusluokka. ISO-standardit 14040:2016 ja 14044:2016, 26–27, eivät määrittele, millaisia vaikutusluokkia on ja miten niitä tulisi käyttää, vaan vaikutusluokat tulee nimetä kuvaavasti ja siinä käytettävät vaikutusluokkaindikaattorit valitaan itse. Kuitenkin vaikutusluokat ovat vakiintuneita. Esimerkiksi ISO/TR 14047:2012(E), (s. 6) mukaan vaikutusluokkia ovat keskipistemallissa esimerkiksi ilmastonmuutos, happamoituminen ja humaanitoksisuus. Loppupistemallissa vaikutusluokkia ovat muun muassa ihmisen terveys, luonnonvarat ja luonnonympäristö (Framework 2010, 3.). Kuvassa 15 esitellään vaikutusluokkien suhdetta toisiinsa keskipiste- ja loppupistemallissa.



Kuva 15. Vaikutusluokkien suhde toisiinsa (ILCD 2010, 3)

Vaikutuksen arvioinnin laskenta, keskipiste- vai loppupistemalli

Vaikutuksen arvioinnin laskentaan on useita eri laskentamenetelmiä. Näitä menetelmiä tutkitaan ja kehitetään tiedeyhteisöissä erilaisiin käyttötarpeisiin. Laskentamenetelmät jaetaan kahteen pääluokkaan ympäristövaikutusten vaikutusluokkien mukaan: ongelmakeskeinen lähestymistapa eli keskipistemenetelmä ja vahinkosuuntautunut lähestymistapa eli loppupistemenetelmä. Mallien eroa kuvaa hyvin se, että loppupistemallissa arvioidaan vahinkoja (damages) ja keskipistemallissa vaikutusluokkien tuloksia (impact category results). (Antikainen 2010, 24; GaBi, 20–21.)

Vaikutuksien arvioinnin laskentamenetelmän valinta on tärkeässä roolissa vertailukelpoisten tulosten saamiseksi. Laskentamenetelmien vaikutuksen arvi-

ointi perustuu usein tietyn maanosan olosuhteisiin. Ilmasto- ja ympäristöolosuhteet ovat merkittävässä roolissa haitallisten aineiden kulkeutumisessa ja vaikutuksessa ympäristöön. Tämän takia laskentamenetelmän tulee vastata alueellisia olosuhteita mahdollisimman hyvin. (Antikainen 2010, 24–26.)

Keskipistemallia pidetään luotettavampana, koska syy-seuraussuhteet ovat tarkemmin laskettavissa kuin loppupistemallissa. Loppupistemallia käyttäessä inventaariotietojen tulisi olla tuotannosta mitattuja tietoja, jotta lähtötietojen oikeellisuus tasapainottaisi mallin laskennassa tehtävien oletuksien epävarmuustekijöitä. Esimerkiksi keskipistemallissa ilmastonmuutos ilmaistaan ilma-kehää lämmittävänä vaikutuksena hiilidioksidiekvivalenttina, kun loppupistemallissa arvioidaan ilmaston lämpenemisen vaikutuksia ihmisen terveyteen tai luonnonvaroihin. Nämä kaksi lähestymistapaa ovat toisiaan täydentäviä, joten niitä usein käytetään yhdessä elinkaariarviointia tehdessä (Walaa 2018, 784; Antikainen 2010, 24–25.)

Vaikutusluokat

Keskipistemomenetelmän vaikutusluokkia ovat muun muassa ilmastonmuutos, otsonikato, humaanitoksisuus, ionisoiva säteily, happamoituminen ja rehevöityminen (ILCD 2010, 3).

Ilmastonmuutos, englanniksi Global Warming Potential, lyhenne GWP, mittayksikkönä, kg CO²-ekvivalentti. (Beylot ym 2019, 9). Kaikkien kasvihuonekaasujen ilmasto lämmittävä vaikutus suhteutetaan hiilidioksidin vaikutukseen, esimerkiksi metaanin kerroin on 25 (GaBi, 20).

Otsonikato, Ozone depletion potential, lyhenne OPD, mittayksikkö kg CFC-11 ekvivalenttia. OPD ilmaisee stratosfäärissä otsonikerroksen otsonin hajoamisvaikutusta. Otsonia heikentävät fluori-kloori-hiilivedyt (CFC) ja typen oksidit (NOx). Stratosfäärissä muodostunut otsoni suojaa maapalloa UV-säteilyn vaikutuksilta. (Beylot ym 2019, 9; GaBi, 83.)

Humaanitoksisuus, Human toxicity, lyhenne HT, mittayksikkö, kg 1,4-DB ekv. Humaanitoksisuus jaotellaan yleensä akuuttiin, subakuuttiin/subkrooniseen ja

krooniseen toksisuuteen, joita määrittelevät vaikutuksen kesto ja tiheys. Myrkyllisyyttä kuvaava kg DCB ekv muodostetaan suhdepohjaisesti vertailuaine 1,4 diklooribentsoliin ($C_6H_4Cl_2$) eli eri aineiden myrkyllisyys suhteutetaan diklooribentsoliin. Toksisuuspotentiaalin epävarmuustekijät johtuvat erilaisista altistumisajoista ja -tavoista.

Ekotoksisuus, Eco toxicity (ETX) 1 kg 1,4-DB ekv. Arvioidaan haitallisia vaikutuksia ekosysteemiin. Jaetaan kahteen osaan maaperän ja vesiympäristön ekomyrkyllisyyspotentiaaliin. Jaotellaan yleensä akuuttiin, subakuuttiin/subkrooniseen ja krooniseen toksisuuteen, joita määrittelevät vaikutuksen kesto ja tiheys.

Hiukkaset, (hengitysvaikutukset), Particulate Matter (PM), mittayksikkö kg per PM_2 emissio. Mittaa hiukkaspäästöjen ja sen esiasteiden (NO_x , typen oksidit ja SO_2 , rikkidioksidi) aiheuttamaa haitallista vaikutusta ihmisten terveyteen. Keskimäärin, mitä pienempi hiukkanen, sitä vaarallisempi se on, koska se pääsee kulkeutumaan syvälle keuhkoihin. Tulos kuvaa PM-emission aiheuttamaa kuolleisuuden muutosta ilmaistuna taudinilmaantuvuutena. (Beylot ym. 2019, 9.)

Ionisoiva säteily, Ionising radiation, mittayksikkö, kg-Bq U235 ekvivalentti. Ionisoivalle säteilylle altistuneet molekyylit ja solut voivat muuttua rakenteellisesti, vahingoittua ja suurilla annoksilla solut voivat kuolla. Pienillä annoksilla ionisoiva säteily voi vahingoittaa soluja, jotka kuitenkin paranevat itsestään, esimerkiksi auringon polttama iho. Pitkäaikainen matalatasoinen altistus voi myös aiheuttaa pysyviä solumuutoksia. Suuret kerta-annokset voivat vaikuttaa geeniperimään ja jopa tappaa. Ionisoiva säteily voi olla vaarallista myös kasveille ja eläimille. (Beylot ym. 2019, 9.)

Fotokemiallisen otsonin muodostuminen, Photochemical oxidation (POCD), kg NMVOC ekvivalentti. Tämä ilmaisee otsonin pitoisuutta alailmakehässä. Fotokemiallisen otsonin muodostuminen alailmakehässä on reaktiivisuutensa takia vahingollista kasvillisuudelle, eläimille ja materiaaleille. Otsoni on suurina pitoisuuksina ihmisille vaarallista. (Beylot ym. 2019, 9; GaBi, 82.)

Happamoituminen, Acidification (AP), kg SO₂ ekvivalentti. Happamoitumis-
potentiaali kuvaa yhdisteiden kykyä vastaanottaa ja vapauttaa vetyioneja (H⁺).
Typhen ja rikin oksidit happamoittavat veden ja maaperän. Haittoja ovat muun
muassa ravinteiden huuhtoutuminen ja metallien liukeneminen mineraaleista
maaperään. (Beylot ym. 2019, 9: GaBi, 80–81.)

Rehevöityminen, Eutrophication (EP), jaetaan kolmeen luokkaan: maaperän,
makean veden ja meriveden rehevöitymiseen, mittayksikkö maaperällä mol N
ekvivalentti (mooli on ainemäärän yksikkö, N on typpi), makealla vedellä kg P
(fosfori) ekvivalentti ja merivedellä kg N ekvivalentti. Rehevöityminen on ravin-
teiden rikastumista maalla tai vedessä. Rehevöitymistä aiheuttavat pääsään-
töisesti fosfori, P ja typpi, N. Niiden pääasiallinen lähde ovat lannoitteet ja jäte-
vesi. Ravinteiden lisääntyminen aiheuttaa ravinteikkaasta maasta pitävien
kasvien kasvun lisääntymistä, jolloin ne syrjäyttävät alkuperäislajit. Vesiympä-
ristössä levät kasvavat liian nopeasti, jolloin veden happipitoisuus laskee ka-
loille liian pieneksi. (Beylot ym. 2019, 9; GaBi, 81.)

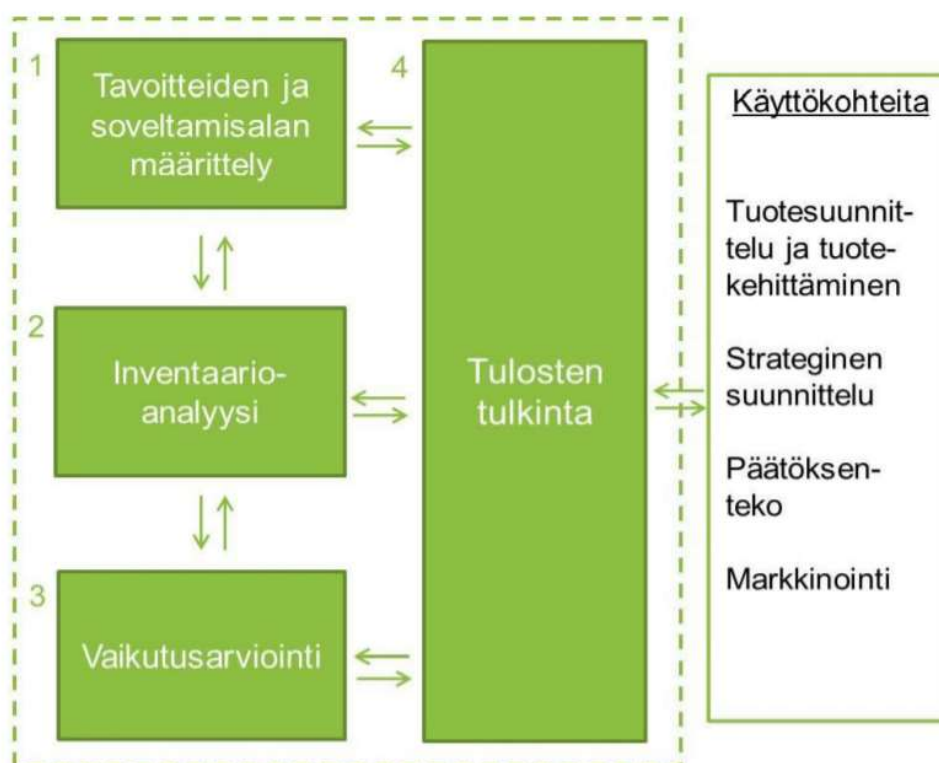
Loppupistemenetelmiä ovat luonnonvarojen ehtyminen, ihmisen terveys ja
luonnon monimuotoisuus. Luonnonvarojen ehtymisen vaikutusluokka kuvaa
uusiutumattomien raaka-aineiden maailmanlaajuista vähenemistä. Luonnon-
varojen ehtymisen potentiaali kattaa kaikki elottoman luonnon raaka-aineet,
jotka eivät ole uusiutuvia, kuten malmimineraalit, raakaöljyn ja mineraaliraaka-
aineet. Uusiutumattomalla tarkoitetaan tässä tapauksessa vähintään 500 vuo-
den uusiutumisaikaa. (GaBi s.a., 85.)

Ihmisen terveys, yksikkönä DALY (Disability-Adjusted Life Years), on ihmisen
terveyden indikaattori, jolla mitataan kuolleisuuden kasvua ja terveiden elin-
vuosien vähenemistä. Ihmisen hyvinvointiin ja terveyteen vaikuttavat paljon il-
mastomuutos ja hiukkaspäästöt. (Beylot ym. 2019, 28.)

Luonnonympäristöä kuvaa paremmin luonnon monimuotoisuus englanniksi
ecosystem quality, yksikkönä PDF, disappeared fraction species over a cer-
tain area, during a certain period of time. Luonnon monimuotoisuuden heikke-
nemiseen vaikuttavat voimakkaasti maankäyttö ja ilmastonmuutos. (Beylot
ym. 2019, 27.)

Ympäristövaikutuksien elinkaariarvioinnin vaiheet

Ympäristövaikutuksien elinkaariarviointi jakautuu neljään vaiheeseen, jotka ovat tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, inventaarioanalyysi, vaikutusten arviointi ja tulosten tulkinta (kuva 16). Elinkaariarviointi on iteratiivinen prosessi, jossa tarkastellaan jokaisessa vaiheessa ovatko kerätyt tiedot ja arviointi suhteessa tavoitteisiin ja soveltamisalaan vai tarvitaanko oikeellisen tuloksen saamiseksi vielä lisää inventaario tietoja. (SFS-EN ISO 14040, 8–10.)



Kuva 16. Inventaarioanalyysin vaiheet (Tietoa elinkaariarvioinnista 2017, 3)

Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely

Ympäristövaikutuksien elinkaariarviointi alkaa tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyllä. Määrittelyn tulee vastata kysymyksiin, miksi selvitystä tehdään, mihin arviointia käytetään, mikä on kohdeyleisö ja julkaisumuoto ja tulevatko arvioinnin tulokset omaan vai julkiseen käyttöön. (SFS-EN 14044:2016 + A1:2018, 15.)

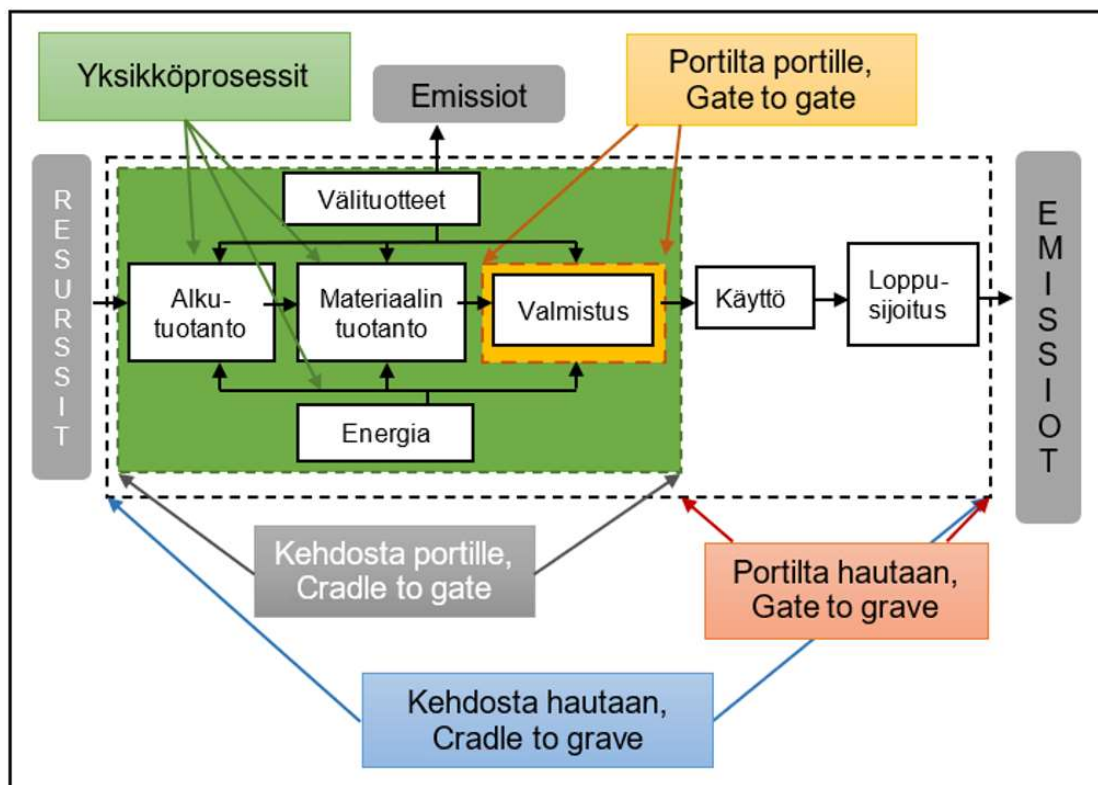
Tämän jälkeen valitaan toiminnallinen yksikkö, joka vastaa arvioinnin tarpeita. Toiminnallinen yksikkö voi olla esimerkiksi palvelu tai tuote. Mikäli elinkaariarvioinnissa tehdään vertailua, tulee valita samaa asiaa vastaava vertailuyksikkö. Järjestelmä rajataan tavoitteiden mukaisesti, minkä hahmottamista helpottaa prosessikaavion käyttö. Prosessikaavion avulla on helpompi esittää yksinkertaisesti yksikköprosessien osa-alueet. Elinkaariarviointi on iteratiivinen prosessi, jossa prosessissa edetessä palataan tarvittaessa tarkentamaan tai korjaamaan esimerkiksi lähtötietoja, prosessin rajoja tai toiminnallista yksikköä, koska prosessin edetessä voi ilmetä uusia huomioonotettavia asioita. (SFS-EN ISO 14044: 2016 + A1: 2018, 16.)

Mikäli laskennassa halutaan jättää huomiotta joitain elinkaaren vaiheita, prosesseja, syötteitä tai tuotoksia, syyt tulee kirjata perustellusti ylös. Elinkaariarvioinnin tulee systemaattisesti kuvata tuotteen tai palvelun ympäristövaikutukset raaka-aineen hankinnasta loppusijoitukseen asti, huomioiden erilaiset massa- ja energiavirrat, jotka ovat ympäristön kannalta merkityksellisiä. (SFS-EN ISO 14044: 2016 + A1: 2018, 16–17.)

Mikäli elinkaariarvioinnissa vertaillaan kahta tuotetta tai palvelua, tulee varmistaa, että ne ovat vertailukelpoisia. Toiminnallisten yksiköiden tulee vastata toisiaan. Jos vertaillaan esimerkiksi lasi- ja muovipullon ympäristövaikutuksia, tulisi toiminnalliseksi yksiköksi valita yksi pullo, koska lasipullon massa on huomattavasti suurempi kuin muovipullon massa. Jos toiminnalliseksi yksiköksi valittaisiin lasipullon massa, tällöin vertailtaisiin useamman muovipullon ympäristövaikutuksia yhden lasipullon ympäristövaikutuksiin. (ISO 14044: 2006 + A1: 2018. 19.)

Järjestelmän rajaus, sisällytä edelliseen kappaleeseen

Järjestelmän rajaus määrittää ympäristövaikutuksien elinkaariarvioinnin yksikköprosessit. Rajauksen tulee noudattaa elinkaariarvioinnin tavoitteita. Valitun rajauksen syyt tulee kirjata yksityiskohtaisesti, miten yksikköprosessit ja tuotteet ovat valikoituneet arviointiin. (ISO 14044: 2006 + A1: 2018, 16.)



Kuva 17. Järjestelmän rajausvaihtoehtoja (mukaellen GaBi s.a., 15)

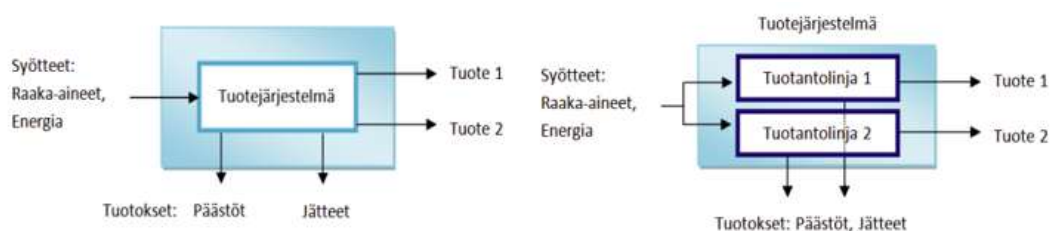
Kuvassa 17. esitellään tyypillisimpiä järjestelmän rajausvaihtoehtoja. Kehdosta hautaan -rajaus sisältää kaikki materiaali- ja energiavirrat alkutuotannosta, logistiikasta ja käytöstä tuotteen loppusijoitukseen asti. Kehdosta portille -rajaus sisältää kaikki materiaali- ja energiavirrat logistiikan alkutuotannosta valmiiksi tuotteeksi asti. Tätä mallia käytetään tuotannon kehittämiseen. Portilta hautaan -rajaus sisältää tuotteen kaikki ympäristövaikutukset tuotantolaitoksen portilta loppusijoitukseen asti. Portilta portille rajaus sisältää ainoastaan yhden tuotteen tuotanto-osuuden ympäristövaikutukset. (GaBi s.a., 14–15.)

Järjestelmän rajauksen jälkeen pystytään tekemään prosessikaavio, mikä helpottaa yksikköprosessien, tuote- ja energiavirtojen hahmottamista. Yksikköprosessit kuvataan raaka-aineiden tai välivalmisteiden vastaanottamisesta tuotannon aikaiseen prosessointiin ja välivalmisteiden tai lopputuotteiden määränpäähän asti. Pyrkimyksenä on, että tuotejärjestelmään tulee sisään ja

lähtee ulos pelkkiä perusvirtoja. Tämä helpottaa merkityksellisten syötteiden tunnistamista. Laskennassa käytettävät syötteet valitaan massan, energian ja ympäristövaikutuksien merkittävyyden perusteella. (ISO 14044:2006 + A1:2018, 16–17.)

Allokointi

Allokoinnissa jaetaan yksikköprosessin tai tuotejärjestelmän syöte-, energia- ja jätevirrat useamman tuotejärjestelmän välillä. Tavoitteena on, ettei allokoointia tarvitsisi tehdä. Allokointia käytetään tilanteissa, jossa ei voida suoraan osoittaa, mikä on yksikköprosessin osuus käytetyistä syöte-, energia- tai jätevirroista. Allokointia joudutaan useasti käyttämään tilanteissa, jossa tuotejärjestelmässä syntyy useita tuotteita, tuotejärjestelmä vastaan ottaa yhtä aikaa useita jätetuotteita tai tuotteita/ jätteitä kierrätetään seuraavaan tuotejärjestelmään. Allokointia voidaan välttää esimerkiksi jakamalla prosessi alaprosesseihin (kuva 18). Alaprosesseja voidaan käyttää, mikäli eri tuotantolinjojen syötteet ja jätteet tunnetaan. (MTT 2012, 23–25.)



Kuva 18. Prosessin jakaminen alaprosesseikseen (MTT 2012, 30).

Inventaarioanalyysi

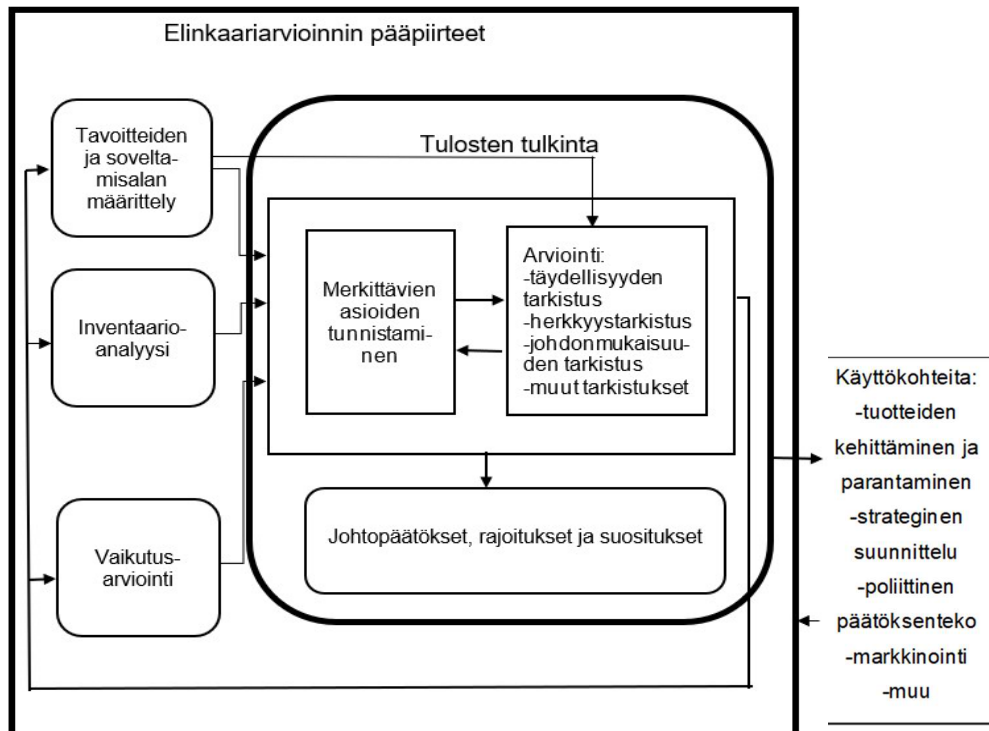
Inventaarioanalyysissä selvitetään sisään tulevat raaka-aine- ja energiavirrat, sekä lopputuotemateriaalit ja jätteet. Lisäksi lähtötiedoista tulee ilmetä, ovatko ne mitattuja, laskettuja vai arvioituja. Mikäli tietoa kerätään useista lähteistä, tulee varmistaa tietojen yhdenmukainen käsittely. Prosessikaaviot, joissa mallinnetaan yksikköprosessit ja niiden suhteet, helpottavat yhdenmukaisuuden todentamista. Yksikköprosessien selkeät kuvaukset syötteiden ja tuotteiden

osalta helpottavat yhdenmukaisuuden tarkistamista. Yksikköprosessien tietojen taulukoiminen ja laskentamenetelmien kuvaaminen ovat tärkeitä yhdenmukaisuuden varmistamiseksi. (ISO 14044: 2006 + A1: 2018, 19–20.)

Tietojen oikeellisuus tarkastetaan tietojen keräämisen aikana, jotta ne vastaavat laadullisesti käyttötarkoitustaan. Tiedot suhteutetaan toiminnalliseen yksikköön. Mikäli ympäristövaikutusten elinkaariarvioinnissa vertaillaan tuotteita, tulee varmistaa tulosten keruun ja käsittelyn aikana, että tiedot ovat oikeita suhteessa toisiinsa. (ISO 14044: 2006 + A1: 2018, 22.)

Vaikutusten arviointi

Elinkaariarvioinnissa tulosten tulkinnassa varmistetaan laskennassa käytettävien tietojen riittävyys ja oikeat rajaukset. Kuvassa 19 nähdään tulkintavaiheen eri osien suhde elinkaariarvion (LCA) muihin vaiheisiin (SFS- EN ISO 14044: 2006 + A1: 2018, 32). Kriittiseen tulosten tulkintaan kuuluu merkittävien asioiden tunnistaminen. Tällä varmistetaan, että rajaukset ja tulkinnat tehdään alussa määriteltyjen tavoitteiden ja soveltamisalan mukaan. Arvioinnissa esitetään tulosten luotettavuus ja esitetään tulkinta kohdeyleisölle. Täydellisyystarkastuksessa varmistetaan, että kaikki tarvittavat lähtötiedot ovat olleet käytettävissä tulkintaa tehdessä. Mikäli oleellisia lähtötietoja puuttuu, tulisi inventaarioanalyysi ja vaikutustenarviointi tehdä uudelleen. (SFS- EN ISO 14044: 2006 + A1: 2018, 25–32.)



Kuva 19. Tulosten tulkintavaihteen osien suhde elinkaariarvioinnin (LCA) muihin vaiheisiin. (ISO 14044:2006+A1:2018, 32.)

Tulosten arviointi

Arviointivaiheessa tarkastellaan elinkaariarvioinnin tulosten luotettavuutta. Arviointi tehdään tavoitteiden ja soveltamisalan mukaan. Arviointiin kuuluu täydellisyyden, herkkyuden ja johdonmukaisuuden tarkastus. Täydellisyyden tarkastuksella varmistetaan, että tulosten tulkintaan tarvittavat lähtötiedot ovat saatavilla ja ne ovat riittäviä. Jos merkittävää tietoa puuttuu tai se on vajaavaista, tulee punnita tiedon tarpeellisuus tavoitteiden saavuttamisen ja soveltamisalan kannalta. (SFS- EN ISO 14044: 2006 + A1: 2018, 31–33.)

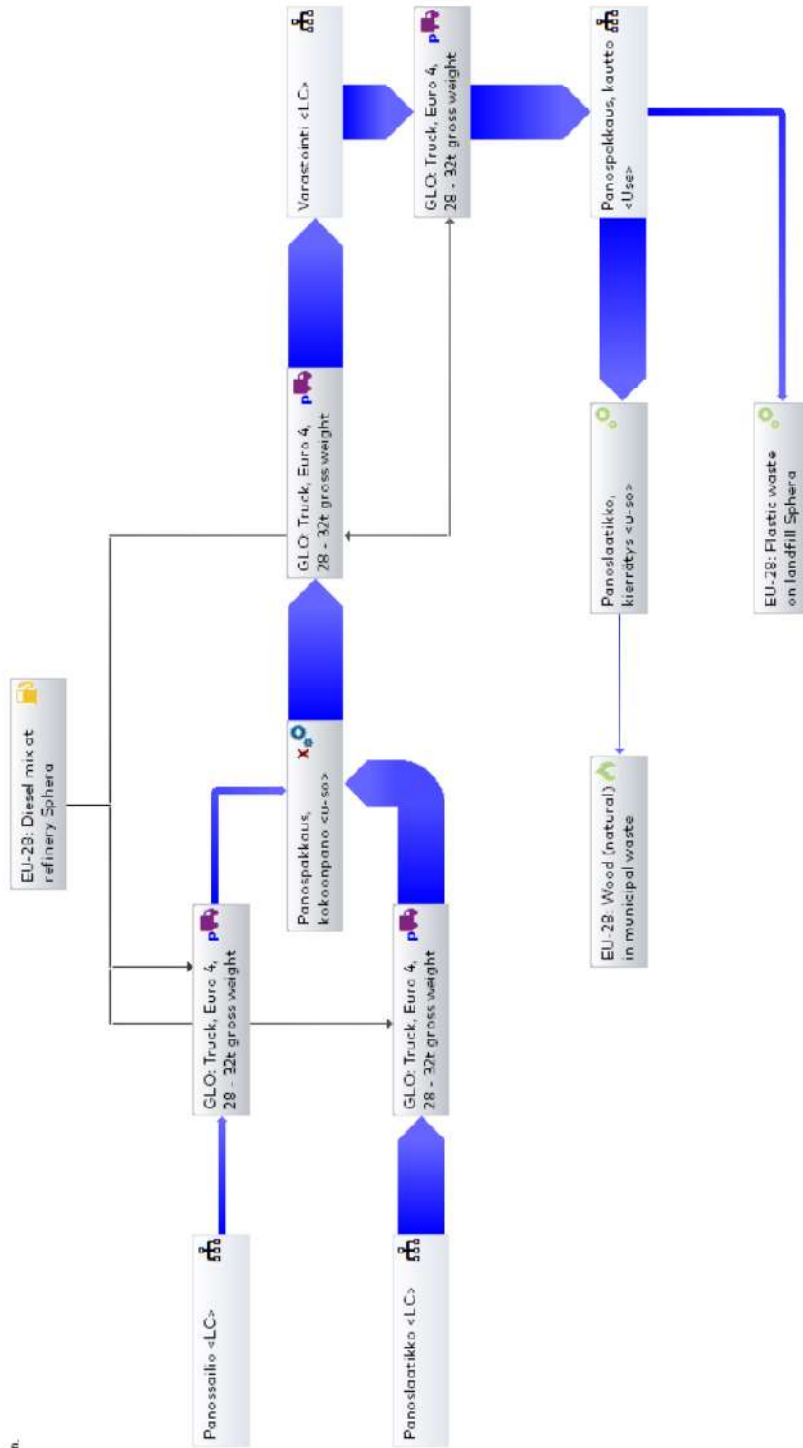
Herkkyystarkastuksessa arvioidaan lopputulosten ja päätelmien luotettavuus. Herkkyystarkastuksessa huomioidaan arvioinnin tavoitteet ja soveltamisala, eri vaiheiden tulokset ja asiantuntija-arviot ja aiemmat kokemukset, mikäli ne ovat käytettävissä. Mikäli ympäristövaikutuksen elinkaariarviointi käytetään julkisesti esitettävän vertailuväitteen tukena, arviointiosassa tulee olla yksityiskohtainen herkkyystarkasteluun perustuva lausunto. Herkkyystarkastelu on erityisen tärkeä, kun verrataan eri vaihtoehtoja toisiinsa. Johdonmukaisuuden tarkastuksessa määritellään, vastaavatko menetelmät ja lähtötiedot tavoitteita ja soveltamisalaa. (SFS- EN ISO 14044: 2006 + A1: 2018, 34–35.)

PANOSPAKKAUSTEN ELINKAARIARVIOINNIN PROSESSIKAAVIO GABILLA

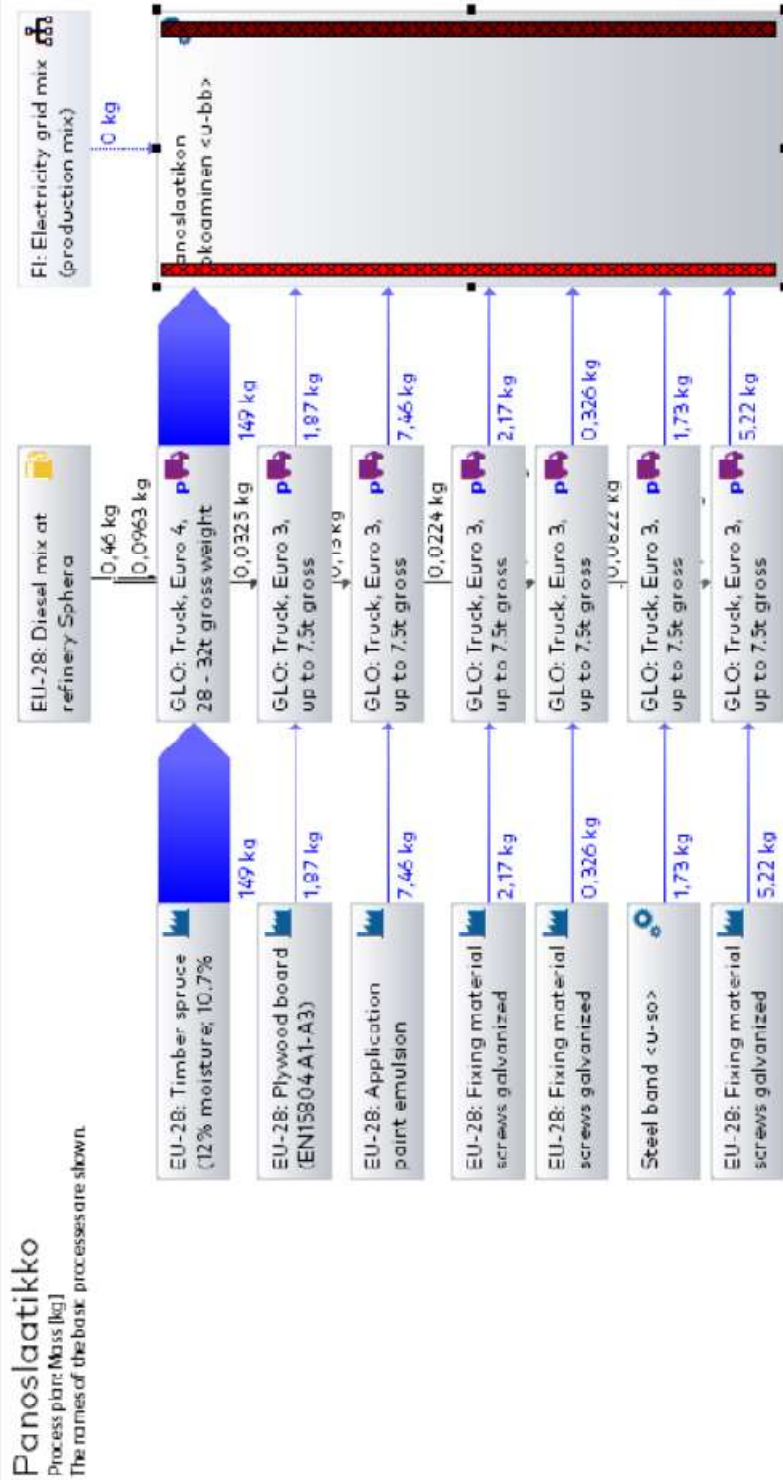
Selection: DE: Wood (n

Panospakkausten elinkaari

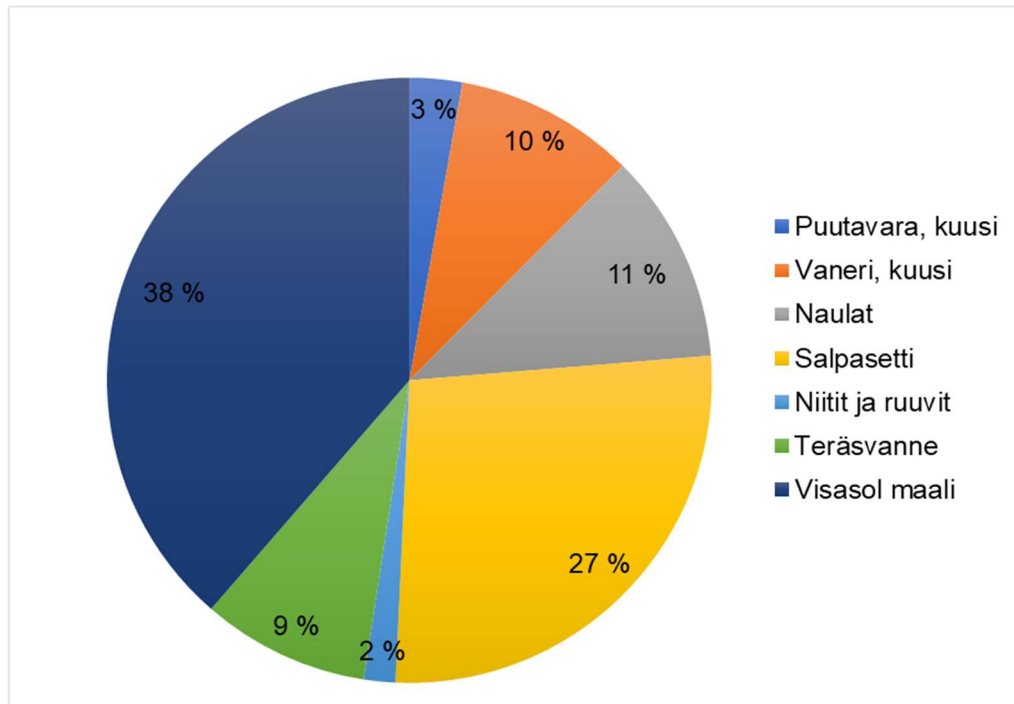
Process plan: Mas (lig)
The names of the basic processes are shown.



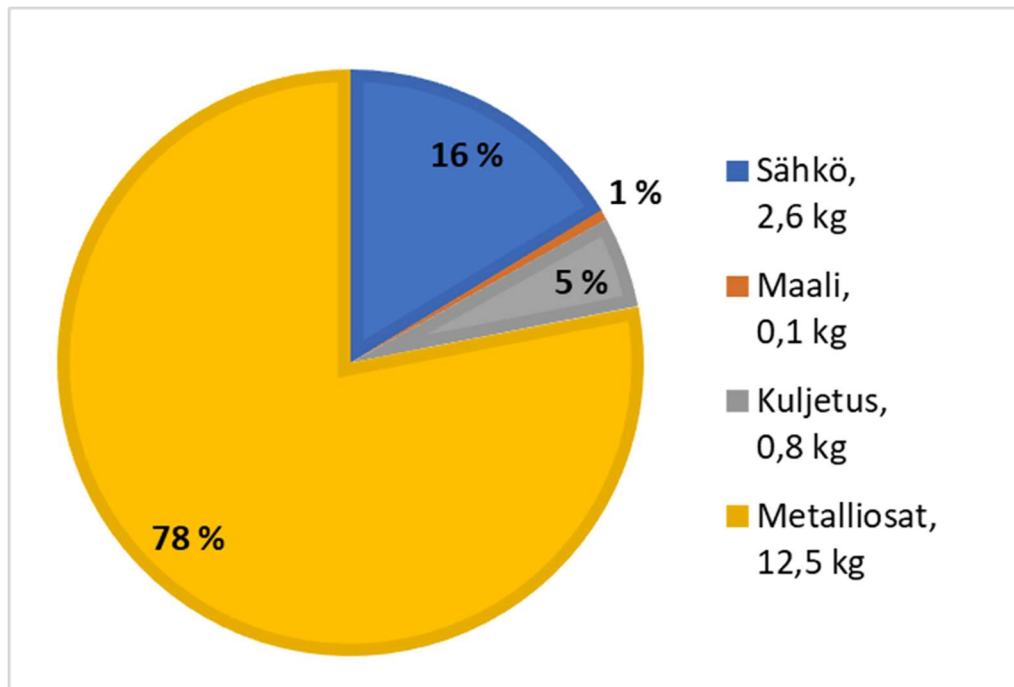
Panoslaatikko <LC> kohta pitää sisällään seuraavat tiedot



PANOSLAATIKON MASSAN JA ILMASTONMUUTOSVAIKUTUKSEN PROSENTUAALISET OSUUDET ARVIOIDESSA ELINKAARIARVIOON MUKAAN OTETTAVAT OSA-ALUEET

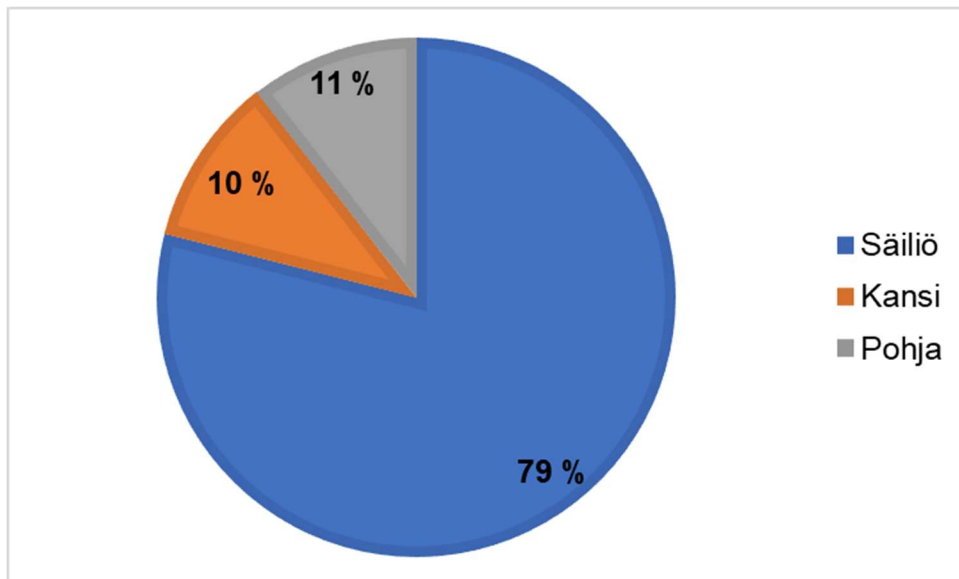


Kuva 20. Panoslaatikon raaka-aineiden massojen mukaiset prosentuaaliset osuudet.

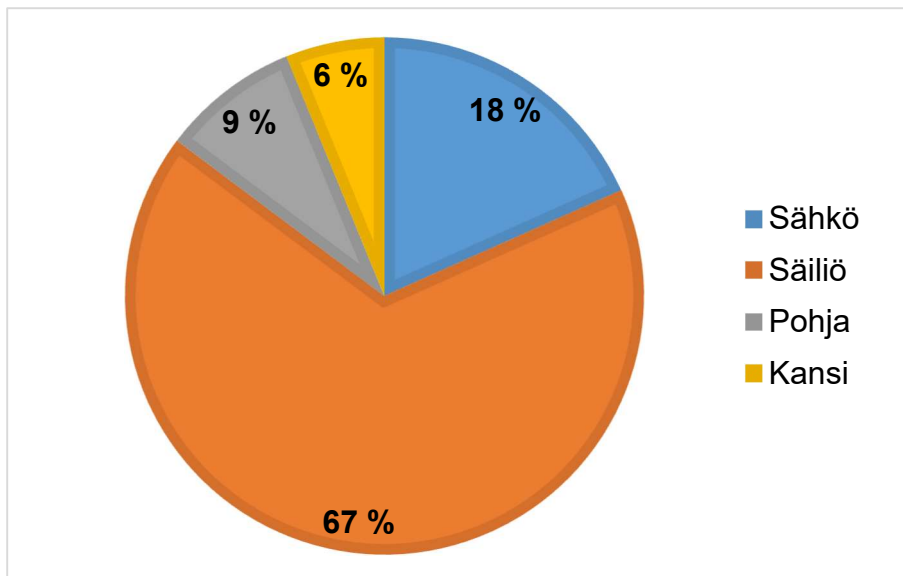


Kuva 21. Panoslaatikon päästöjen prosentuaaliset osuudet kg CO₂ ekvivalentteina.

PANOSSÄILIÖN MASSAN JA ILMASTONMUUTOSVAIKUTUSTEN PROSENTUAALISET OSUUDET ARVIOIDESSA ELINKAARIARVIOON MUKAAN OTETTAVAT OSA-ALUEET



Kuva 22. Panossäiliön raaka-aineiden massojen mukaiset prosentuaaliset osuudet.



Kuva 23. Panossäiliön päästöjen prosentuaaliset osuudet kg CO₂ ekvivalentteina.

ECOCALCULATORILLA YHDEN PANOSSÄILIÖN PUTKEN ILMASTON- MUUTOSVAIKUTUS

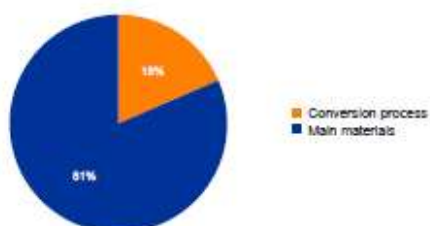
Eco Report

Product: tube 169/165

Date: 6/30/2021



Carbon Footprint



Carbon Footprint:

4.66 kg

Cumulative energy demand:

88.20 MJ

The International Reference Life Cycle Data Systems (ILCD)

The total score of 1 tube 169/165 is calculated with the ILCD 2011 midpoint+ (v1.06) methodology.

Category	Amount	Unit
Climate change	4.60e+0	kg CO2 eq
Ozone depletion	4.70e-7	kg CFC-11 eq
Human toxicity, non-cancer effects	3.38e-7	CTuh
Human toxicity, cancer effects	3.00e-7	CTuh
Particulate matter	2.03e-3	kg PM2.5 eq
Ionizing radiation HH	2.58e-1	kBq U235 eq
Ionizing radiation E (interim)	2.16e-4	CTUe
Photochemical ozone formation	3.26e-2	kg NMVOC eq
Acidification	1.86e-2	molc H+ eq
Terrestrial eutrophication	3.92e-2	molc N eq
Freshwater eutrophication	1.54e-4	kg P eq
Marine eutrophication	3.70e-3	kg N eq
Freshwater ecotoxicity	1.18e+2	CTUe
Land use	3.17e+0	kg C deficit
Water resource depletion	3.02e-3	m3 water eq
Mineral, fossil & ren resource depletion	7.83e-5	kg Sb eq

This Eco Report is based on European Industry average figures. Third-party verification has not been performed and this report is not an Environmental Product Declaration (EPD). Environmental declarations from different programs may not be comparable. For full details behind the used methodology, please visit <http://www.euCIA.eu>. Owner of this Eco Report: Exel Composites.

ECOCALCULATORILLA YHDEN PANOSSÄILIÖN KANNEN ILMASTON- MUUTOSVAIKTUS

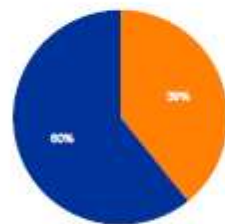
Eco Report

Product: Plastic lid

Date: 6/30/2021



Carbon Footprint



Conversion process
Main materials

Carbon Footprint:

0.52 kg

Cumulative energy demand:

15.73 MJ

The International Reference Life Cycle Data Systems (ILCD)

The total score of 1 Plastic lid is calculated with the ILCD 2011 midpoint+ (v1.06) methodology.

Category	Amount	Unit
Climate change	5.17e-1	kg CO2 eq
Ozone depletion	1.83e-8	kg CFC-11 eq
Human toxicity, non-cancer effects	1.91e-8	CTuh
Human toxicity, cancer effects	5.30e-9	CTuh
Particulate matter	2.12e-4	kg PM2.5 eq
Ionizing radiation HH	3.55e-2	kBq U235 eq
Ionizing radiation E (interim)	3.17e-7	CTUe
Photochemical ozone formation	1.61e-3	kg NMVOC eq
Acidification	2.14e-3	molc H+ eq
Terrestrial eutrophication	3.82e-3	molc N eq
Freshwater eutrophication	2.41e-5	kg P eq
Marine eutrophication	3.87e-4	kg N eq
Freshwater ecotoxicity	2.21e-1	CTUe
Land use	1.99e-1	kg C deficit
Water resource depletion	1.28e-3	m3 water eq
Mineral, fossil & ren resource depletion	2.53e-6	kg Sb eq

This Eco Report is based on European Industry average figures. Third-party verification has not been performed and this report is not an Environmental Product Declaration (EPD). Environmental declarations from different programs may not be comparable. For full details behind the used methodology, please visit <http://www.euCIA.eu>. Owner of this Eco Report: Exel Composites.

ECOCALCULATORILLA YHDEN PANOSSÄILIÖN POHJAN ILMASTON- MUUTOSVAIKTUS

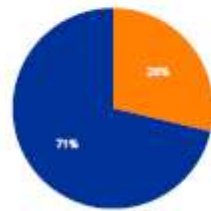
Eco Report

Product: Plastic bottom

Date: 6/30/2021



Carbon Footprint



Conversion process
Main materials

Carbon Footprint:

0.75 kg

Cumulative energy demand:

17.75 MJ

The International Reference Life Cycle Data Systems (ILCD)

The total score of 1 Plastic bottom is calculated with the ILCD 2011 midpoint+ (v1.06) methodology.

Category	Amount	Unit
Climate change	7.48e-1	kg CO2 eq
Ozone depletion	4.39e-8	kg CFC-11 eq
Human toxicity, non-cancer effects	5.42e-8	CTuh
Human toxicity, cancer effects	1.15e-8	CTuh
Particulate matter	4.54e-4	kg PM2.5 eq
Ionizing radiation HH	5.34e-2	kBq U235 eq
Ionizing radiation E (Interim)	4.57e-7	CTUe
Photochemical ozone formation	2.16e-3	kg NMVOC eq
Acidification	4.10e-3	molc H+ eq
Terrestrial eutrophication	6.33e-3	molc N eq
Freshwater eutrophication	4.63e-5	kg P eq
Marine eutrophication	6.06e-4	kg N eq
Freshwater ecotoxicity	4.73e-1	CTUe
Land use	6.55e-1	kg C deficit
Water resource depletion	1.99e-3	m3 water eq
Mineral, fossil & ren resource depletion	2.94e-5	kg Sb eq

GABILLA YHDEN PANOSSÄILIÖN ILMASTONMUUTOSVAIKUTUS

CML2001	kg CO2 eq.					
		Panossailio <LC>	Panossailio <LC>	Panossailio <LC>	Panossailio <LC>	Panossailio
			EU-28: Electricity grid	Putki	Pohja	Kansi
Flows	Flows	4,8	0,9	3,2	0,4	0,3

ELINKAARIARVIOINTIIN KÄYTETTÄVÄT LASKENTAOHJELMISTOT

Ensimmäinen laskentaohjelmisto EcoCalculator eli Eco Impact Calculator for Composites on eurooppalainen ympäristövaikutusten elinkaariarvioinninohjelmisto. Se on kehitetty eurooppalaisten komposiittituottajien tarpeeseen. Laskentaohjelmisto perustuu ISO 14040 ja 14044: 2006 standardeihin. Tietokantana on SimaPro 8.0.2., jota täydennetään komposiittivalmistajilta kerättävillä tiedoilla. Ympäristövaikutusluokkina käytetään hiilijalanjälkeä ja kumulatiivista energiamäärää, joka lasketaan ILCD keskipiste (v1.06) menetelmällä. (Eco Impact s.a.)

Toinen on GaBi -ohjelmiston (ThinkStep) tietokannat sisältävät 15 000 suunnitelmaa ja prosessia. GaBi:n tietokannat perustuvat pääosin todellisiin teollisuuden prosesseihin ja materiaaleihin. Tietokantojen tietoja ylläpidetään jatkuvasti, joten uusimmat teknologiat ja materiaalitiedot ovat käytössä. Kansainvälinen laadunvalvontayritys Dekra valvoo, että käytössä on paikkansapitävät tietokannat ja toimivat laskentamenetelmät. Lisäksi Dekra varmistaa, että tietojen dokumentointi on asianmukaista ja läpinäkyvää. (LCI Data 2019.) Ohjelmistossa on huomioitu Euroopan ja G 20 -maiden energiapolitiikka ja sen vaikutus paikallisesti uusiutuvan energian tuotantomäärässä ja sen kehittämisessä (Databases, Data Insights). GaBi:ssa tehdyt elinkaariarvioinnit perustuvat ISO-, EN-, ILCD ja EF-standardeihin. (GaBi LCA Databases s.a.)

