



**RAKENTAMINEN**

Sirkka Koskela, Jyri Seppälä ja Jorma Leivonen

# Ympäristövaikutukset rakennusten ekotehokkuuden arvioinnissa

Jyri Seppälä ja Pekka Huovila

## Päätösanalyysin käyttö rakennusten ekotehokkuuden arvioinnissa



Sirkka Koskela, Jyri Seppälä ja Jorma Leivonen

Ympäristövaikutukset  
rakennusten ekotehokkuuden  
arvioinnissa

Jyri Seppälä ja Pekka Huovila

Päätösanalyysin käyttö  
rakennusten ekotehokkuuden  
arvioinnissa

Helsinki 2002

Julkaisu on saatavana myös Internetistä:  
<http://www.ymparisto.fi/palvelut/julkaisu/elektro/sy585/sy585.htm>

ISBN 952-11-1253-0 (nid.)  
ISBN 952-11-1254-9 (PDF)  
ISSN 1238-7312

Kansikuvat: Mikko Nurmi ja Antero Aaltonen

Paino:  
Edita Prima Oy, Helsinki 2002

Sirkka Koskela, Jyri Seppälä ja Jorma Leivonen

Ympäristövaikutukset  
rakennusten ekotehokkuuden  
arvioinnissa



# Alkusanat

Ympäristöministeriön ympäristöklusterin tutkimusohjelmassa toteutettiin vuosina 1999–2002 esitutkimus ja tutkimus rakennus- ja kiinteistöalan ekotehokkuudesta (REKOS) VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan ja Suomen ympäristökeskuksen yhteistyönä. Tämä raportti esittelee kokonaisuudessaan Suomen ympäristökeskuksen REKOS-hankkeessa tekemän työn, joka liittyi ympäristövaikutuksiin. Raportti tarkastelee rakennuksen elinkaaren merkittävimpiä ympäristönäkökoh-  
tia ja niiden arviointimenetelmiä. Työn tulokset ovat tiivistettynä luettavissa myös VTT:n julkaisemassa REKOS-tutkimuksen loppuraportissa (Rakennus- ja kiinteis-  
töalan ekotehokkuus, Ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 580, 2002).

Suomen ympäristökeskuksen tutkijat kiittävät REKOS-hankkeen rahoittajia, johto- ja projektiryhmän jäseniä työn ohjauksesta ja kaikkia muita työhön osallis-  
tuneita.

Helsingissä 10.7.2002

Sirkka Koskela, Jyri Seppälä ja Jorma Leivonen



# Sisällys

<b>Alkusanat</b> .....	<b>5</b>
<b>I Johdanto</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Rakennuksen ekotehokkuuden arviointi</b> .....	<b>10</b>
<b>3 Ympäristövaikutusten arvioinnin lähtökohdat</b> .....	<b>12</b>
<b>4 Kokonaismateriaalimäärien arviointi</b> .....	<b>15</b>
4.1 Perusta kokonaismateriaalimäärien laskentamenettelylle .....	15
4.2 Rakennusmateriaalien ja rakennukseen tarvittava kokonaismateriaalimäärä (KMM) .....	17
<b>5 Päästöjen vaikutusten arviointi</b> .....	<b>22</b>
5.1 Johdatus elinkaariarviointimenetelmään .....	22
5.2 Inventaario .....	22
5.3 Elinkaariarvioinnin mukainen vaikutusarviointimenettely .....	23
5.3.1 Vaikutusarvioinnin vaiheet .....	23
5.3.2 Tarkasteltavat vaikutusluokat .....	25
5.3.3 Vaikutusarvioinnin tulosten laskenta .....	25
5.4 Yksinkertaistettu päästöjen vaikutusarviointimalli .....	28
5.5 Vaikutusarviointimallin käytöstä rakennusten ympäristövaikutusten arvioinnissa .....	30
<b>6 Rakennuspaikan maan käytön vaikutusten arviointi</b> .....	<b>31</b>
<b>7 Esimerkki kerrostalon ympäristövaikutusten arvioinnista</b> .....	<b>33</b>
7.1 Lähtökohdat .....	33
7.2 Rakennukseen liittyvät kokonaismateriaalimäärät .....	34
7.3 Elinkaariarvioinnin mukaiset ympäristövaikutukset .....	35
7.3.1 Materiaalien valmistuksen ja energian kulutuksen päästöt .....	36
7.3.2. Vaikutusarviointi .....	37
7.4 Maan käytön ympäristövaikutusten arviointi .....	39
7.5 Kerrostalovaihtoehtojen ympäristövaikutusten kokonaisarvio .....	40
7.6 Tulokset vertailuarvoina .....	41
<b>8 Yhteenveto ja johtopäätökset</b> .....	<b>43</b>
<b>Kirjallisuus</b> .....	<b>46</b>
<b>Liitteet</b> .....	<b>47</b>
Liite1. Maan käyttö elinkaariarvioinneissa .....	47
Liitteen 1 kirjallisuus .....	51
<b>Kuvailulehdet</b> .....	<b>52</b>





# Johdanto

---

Yleisellä tasolla määriteltynä ekotehokkuudella tarkoitetaan tehokkuutta, jolla luonnonvaroja tai ekologisia resursseja käytetään inhimillisten tarpeiden tyydyttämiseen (esim. OECD, 1998). Ekotehokkuuskäsitettä rakentamisen näkökulmasta tarkasteltiin ennen varsinaista Rakennus- ja kiinteistöalan ekotehokkuus -hanketta (REKOS) VTT Rakennustekniikan ja Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) vuonna 1999 toteuttamassa esitutkimuksessa, joka on nimeltään ”Rakentamisen ja rakennusten ekotehokkuus”. Se toteutettiin samoin kuin REKOS-hanke ympäristöklusterin tutkimusohjelmassa. Esitutkimuksen tarkoituksena oli kehittää ekotehokkuuskäsitettä rakennusalan ja kiinteistö- ja rakennusalalla toimivien yritysten tarpeita silmällä pitäen siten, että siinä yhdistyvät ympäristönäkökohtia painottava ekotehokkuusajattelu ja rakennusten toimivuusajattelu. Perusajatus oli, että ekotehokkuusajattelua voidaan hyödyntää alan yritysten kestävä kehityksen mukaisessa kehitystyössä.

Esitutkimusta seurasi Rakennus- ja kiinteistöalan ekotehokkuus (REKOS)-tutkimushanke. Sen keskeisenä tavoitteena oli kehittää ekotehokkuuskonsepti rakennus- ja kiinteistöalan yritysten toiminnan menettelytavaksi yhdistämällä edellä mainittu rakennusten toimivuusajattelu ja elinkaariajattelu. Toimivuusajattelun lähtökohtia ja rakennuksen toimivuuden arvioinnissa käytettäviä ns. toimivuusominaisuuksia on käsitelty REKOS-hankkeen loppuraportissa Rakennus- ja kiinteistöalan ekotehokkuus (Ympäristöministeriö, Suomen ympäristö 580, 2002). Tässä raportissa keskitytään rakennuksen ympäristönäkökohtien arvioimiseen.

Elinkaariajatteluun perustuva kokonaisvaltainen ympäristöhaittojen tarkastelu on yleistynyt elinkeinoelämän piirissä. Sillä tarkoitetaan tuotteen tai palvelun tarkastelua ”kehdestä hautaan”-periaatteella. Tuotantoketjun kokonaisvaltaista arviointia varten on kehitetty elinkaariarviointimenetelmä (ISO 14040-sarja), jolla pyritään määrittämään tarvittavalla tarkkuudella ja laajuudella tuotteen tai tuotannon elinkaarenaikaisia päästöjä ja ympäristövaikutuksia.

REKOS-hanke toteutettiin VTT Rakennustekniikan, Suomen ympäristökeskuksen ja rakennus- ja kiinteistöalan yritysten yhteistyönä. VTT Rakennustekniikka on vastannut niistä hankkeen osaprojekteista, jotka käsittelevät rakennuksen ominaisuusjäsentelyä ja toimialakohtaisia ekotehokkuuden indikaattoreita. Myös pilottiprojektit, jotka tehtiin yhteistyössä rakennus- ja kiinteistöalan yritysten kanssa, toteutettiin VTT Rakennustekniikan johdolla. REKOS-hankkeessa Suomen ympäristökeskuksen tehtävänä oli:

- määrittää keskeiset ympäristönäkökohdat rakennuksen ekotehokkuuden arvioinnissa ja
- kehittää rakennusalalle ympäristövaikutusten arviointia eri rakennusvaihtoehtojen vertailuun.

Tässä raportissa esitetään rakennuksen ympäristövaikutusten arvioinnin lähtökohdat ja käytetyt menetelmät. Ympäristövaikutusten arviointimenettely on havainnollistettu kerrostaloesimerkin avulla. Raportin lopussa tarkastellaan edelleen esimerkin avulla ympäristövaikutustunnuslukujen hyödyntämistä rakennusvaihtoehtojen vertailussa. Lyhennelmä tästä raportista on julkaistu REKOS-hankkeen loppuraportissa.

# 2

## Rakennuksen ekotehokkuuden arviointi

Ekotehokkuus esitetään usein tuotoksen ja panoksen suhteena, jossa tuotos on tuotettujen palvelujen tai tuotteiden arvo ja panos ympäristöön kohdistuvien paineiden summa (OECD, 1998). Kaavana ilmaistuna:

$$\text{Ekotehokkuus} = \frac{\text{tuotteiden ja palveluiden arvo}}{\text{ympäristöön kohdistuvien paineiden summa}}$$

Ympäristöpaineilla tarkoitetaan kaikkia niitä merkittäviä ympäristövaikutuksia, jotka tuotteiden tai palveluiden tuottaminen aiheuttaa. Ympäristöpaineet voidaan ilmaista esimerkiksi elinkaariarvioinnin tuloksena, jossa useita erilaisia vaikutuksia on yhdistetty yhteen tai useampaan lukuun tai pelkästään jonkin kuormitustekijän (esim. hiilidioksidipäästön) arvolla, jos katsotaan, että se indikoi riittävästi aiheutettujen ympäristövaikutusten laatua tai määrää. Ympäristöpaineet voidaan esittää myös muilla ennalta sovitulla tunnusluvuilla.

Ekotehokkuus voidaan käsitteellisellä tasolla nähdä strategiana, jonka puitteissa yritykset mukauttavat toimintaansa vastaamaan paremmin kestävä kehityksen vaatimuksia. Näin tulkittuna se muodostaa viitekehityksen, jonka puitteissa yritykset asettavat tavoitteitaan erityisesti ympäristönäkökohtien huomioonottamiselle toiminnassaan ja tuotteissaan. Tuotekohtaisissa tarkasteluissa ekotehokkuuskäsitteestä voidaan johtaa mittareita, joiden avulla arvioidaan tuotteen ympäristömyötäisyyttä tai sen kehittymistä. *Ekotehokkuuden arvioinnissa ei ole kuitenkaan olemassa yleispäteviä mittareita. Tulokset riippuvat aina valitusta näkökulmasta, asetetuista tavoitteista ja siitä, millä perusteilla tuotoksia ja ympäristöpaineita arvioidaan.*

Rakennuksesta syntyy sen elinkaaren aikana monenlaisia vaikutuksia ympäristöön. Suuri osa näistä vaikutuksista määräytyy jo rakennuspaikkaa valittaessa ja rakennusta suunniteltaessa, mutta myös rakennuksen käytöllä ja kunnossapidolla on tärkeä merkitys kokonaisvaikutusten kannalta.

Rakennuksen aiheuttamia ympäristöpaineita voidaan arvioida energian ja luonnonvarojen käytön, ympäristöön kohdistuvien päästöjen sekä rakennuksesta aiheutuvien muiden ympäristövaikutusten perusteella. Erityisesti vaikutusarviointiin liittyy kuitenkin mittaus- ja arvostusongelmia, jotka vaikeuttavat kvantitatiivisten arvioiden tekemistä. Rakennuksestahan voi aiheutua sekä välittömiä että välillisiä muutoksia ympäristöön. Nämä muutokset ovat usein laadullisia ja ne voivat olla luonteeltaan paikallisia, alueellisia tai jopa globaaleja, vaihdella kestoltaan ja kohdistua eri tavoin eri ihmisryhmiin. Näiden vaikutusten arviointiin ja yhteismitallistamiseen liittyy väistämättä myös subjektiivista harkintaa.

Myös rakennuksen arvoa voidaan tarkastella useista eri näkökulmista ja painottaen sen ominaisuuksia eri tavoin. Tarkastelunäkökulman valinta riippuu ennen kaikkea siitä, millaisesta päätöksenteko- tai valintatilanteesta on kysymys ja kenen kannalta ekotehokkuutta arvioidaan. Esimerkiksi rakennuksen suunnittelija voi arvioida erilaisten rakennus- ja rakennevaihtoehtojen ekotehokkuutta valintoja tehdessään. Asunnon hankkija voi puolestaan haluta tehdä vertailuja vastaavien muiden asuntojen kanssa. Yrityksillä voi olla useita mahdollisuuksia järjestellä toimintojaan olemassa oleviin tai uusiin rakennuksiin.

Ekotehokkuutta arvioitaessa rakennuksen arvo voidaan määrittää sen kelpoisuus- ja toimivuusominaisuuksien perusteella. Huomio kohdistetaan tällöin niihin tarpeisiin, joita rakennuksella pyritään tyydyttämään. Rakennuksen **kelpoisuus - ja toimivuusarvo** muodostuu muun muassa rakennusten sisäoloja, turvallisuutta, käyttöikä, muuntojoustoa, viihtyvyyttä ja esteettömyyttä kuvaavista ominaisuuksista. Toimivuusarvon määrittelee viime kädessä rakennusta arvioiva taho (esim. omistaja, asunnon käyttäjä) sillä perusteella, miten rakennus palvelee hänen tarpeitaan ja miten hän arvostaa tarpeellisia pitämiensä ominaisuuksien toteutumista rakennuksessa.

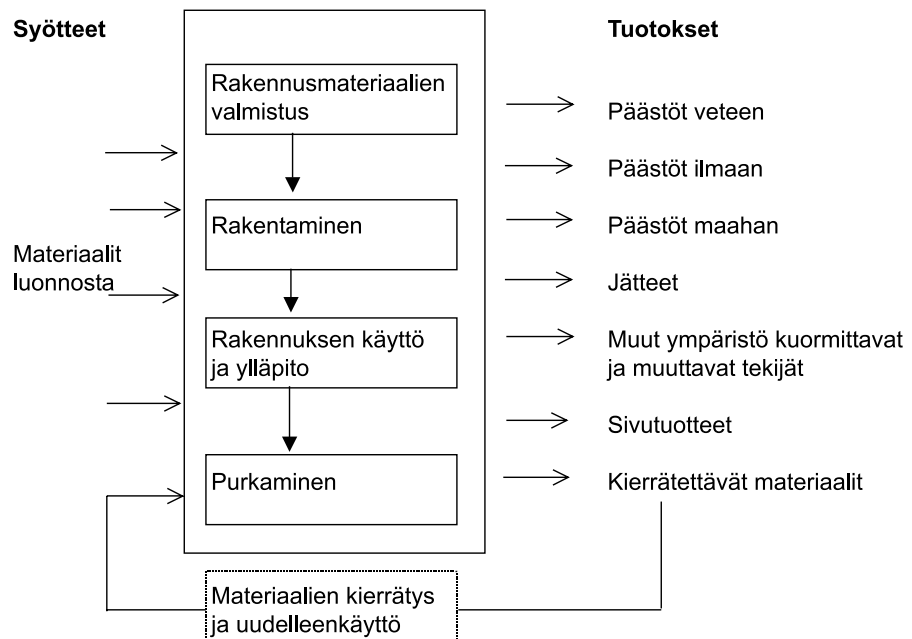
Erilaisten rakennusvaihtoehtojen toimivuusarvojen vertailussa päätöksentekijä joutuu arvioimaan samanaikaisesti lukuisia erimitallisia asioita. Toimivuusarvojen määrittämisen apuna tarvitaan systemaattisten edullisuusvertailumenetelmien käyttöä. Tällaisia menetelmiä on kehitetty nk. päätösanalyysin piirissä. Päätösanalyysi tarjoaa tekniikoita niin kelpoisuus- ja toimivuusominaisuuksien kuin ympäristövaikutusten erimitallisten tekijöiden yhdistämiseen. Suomen ympäristökeskuksessa on käytetty päätösanalyysiä muun muassa vesi- ja viemärlaitosten ekotehokkuuden arvioinnissa (Tenhunen ja Lohi, 2001).

# 3

## Ympäristövaikutusten arvioinnin lähtökohdat

Rakennus- ja kiinteistöalalla merkittävimmät ympäristövaikutukset syntyvät rakennusmateriaalien valmistuksen yhteydessä ja valmiiden rakennusten käytön ja ylläpidon aikana. Rakentaminen muuttaa myös monella tavalla maisemaa ja muuta ympäristöä niin rakennuspaikalla kuin lähiseudulla. Kun pitkä käyttöaika vielä otetaan huomioon, niin monia kymmeniä vuosia käytössä olevan rakennuksen käytön aikaiset päästöt nousevat suurimmaksi rasitteeksi ympäristölle (vrt. luku 7.3.2). Päästöt aiheutuvat pääosin energiankulutuksesta. Materiaalien valmistuksen ympäristökuormituksen osuus kokonaiskuormituksesta lisääntyy silloin, kun tarkastelun kohdetta ja rajoja laajennetaan yksittäisestä rakennuksesta käsittämään esimerkiksi koko Suomen rakennus- ja kiinteistöala. Ympäristövaikutukset muodostuvat silloin määrällisesti ja suhteiltaan erilaisiksi. Tästä laajemmasta näkökulmasta katsottuna rakennuskannan uusiminen ja korjausrakentaminen pitävät yllä jatkuvaa ja elinkeinoelämälle merkittävää materiaalien tuotantoa.

Tämän työn kohteena on yksittäisen rakennuksen, ei koko rakennus- ja kiinteistöalan, ympäristövaikutusten arvioiminen elinkaariajattelun pohjalta. Rakennuksen koko tuotejärjestelmä (rakennuksen elinkaari "kehdestä hautaan") sisältää luonnonvarojen oton, rakennusmateriaalien valmistuksen, rakentamisen, käytön, purkamisen ja materiaalien kierrätyksen, uudelleenkäytön tai loppusijoituksen kaatopaikalle (kuva 1). Edellä mainittuja toimintoja kutsutaan elinkaariarviointimenettely mukaisesti rakennuksen **elinkaarivaiheiksi**.



Kuva 1. Rakennuksen tuotejärjestelmä ja siihen liittyvät elinkaarivaiheet, syötöt ja tuotokset. Kuhunkin elinkaarivaiheeseen liittyy niissä tarvittavien raaka-aineiden tuotannot ja energiantuotannot polttoaineiden valmistuksineen.

Rakennustoiminnan elinkaarivaiheet ovat ympäristökuormittavuudeltaan ja kestoiltaan hyvin erilaiset. Koko rakennuksen elinkaaren aikana käyttövaihe, joka koostuu korjauksista ja kunnossapidosta sekä energiankäytöstä, on elinkaarivaiheen pitkäkestoisuuden vuoksi eniten ympäristöä kuormittava. Tähän vaiheeseen liittyy olennaisesti polttoaineiden valmistuksesta ja sähkön- ja lämmöntuotannosta aiheutuvat päästöt. Materiaalien valmistus-elinkaarivaihe käsittää rakennusmateriaalien ja -osien valmistuksen tuotantolaitoksissa, kun taas materiaalien valmistus rakennustyömaalla ja muu siellä tapahtuva toiminta sisältyy rakentamisen elinkaarivaiheeseen. Rakentamisvaiheen ja myöhemmin tapahtuvan purkuvaiheen osuudet päästöjen elinkaariarvioinnin mukaisista kokonaisvaikutuksista ovat yleensä vähäiset.

Rakennuksen merkittävimmät ympäristövaikutukset liittyvät luonnonvarojen oton yhteydessä tapahtuvaan maan käsittelyyn ja muokkaamiseen, rakennuspaikan maan käyttöön ja päästöihin. Uusiutumattomien luonnonvarojen otto saattaa merkitä myös sitä, että tulevilla sukupolvilla ei ole samanlaisia mahdollisuuksia hyödyntää luonnonvaroja kuin nykyisellä sukupolvella. Sama koskee myös uusiutuvia luonnonvaroja, jos niiden hyödyntäminen on suurempaa kuin niiden uusiutuminen. Luonnonvarojen otto ja sen aiheuttamat maansiirrot kytkeytyvät ennen kaikkea rakennusmateriaalien valmistukseen ja energiantuotantoon. Tässä työssä luonnonvarojen käytön ympäristövaikutuksia kuvataan materiaalivirtojen avulla. Lähtöaineistona materiaalivirtojen määrittämiselle käytetään Wuppertal Instituutin kehittämää tuotteiden materiaalipanosten arviointimenetelmää (Wuppertal, 1998). Materiaalipanoksessa yhdistyvät suorat **materiaalipanokset** ja tuotteeseen kuulumattomat ns. piilovirrat (ks. luku 4.1).

Materiaalipanos piilovirtoineen indikoi ympäristövaikutuksia, muun muassa maan muokkauksesta aiheutuvia monimuotoisuuden (biodiversiteetin) muutoksia ja materiaalien tuotannossa syntyviä päästöjä. Se toimii yhdenlaisena ekologisena mittarina tai tunnuslukuna luonnonvarojen käytön ympäristövaikutuksista. Materiaalipanos ei kuitenkaan kuvaa luonnonvarojen tai materiaalien varannon suuruutta tai niiden saatavuutta. Hyödynnettävien varantojen määrittäminen on vaikeaa, koska kysymys on usein paitsi luonnonvarojen riittävydestä myös siitä, missä määrin hyödyntäminen on taloudellisesti perusteltua. Esimerkiksi joidenkin metallien kohdalla on arvioitu, että helposti hyödynnettävät esiintymät on monin paikoin käytetty hyväksi, mutta varsinkin globaalista näkökulmasta katsottuna hankalasti hyödynnettäviä esiintymiä löytyy vielä runsaasti.

Vaikka luonnonvarojen riittävyden arviointi on vaikeaa, elinkaariarviointimetodologian piirissä on kehitetty siihen soveltuvia laskentamenettelyjä. Esimerkiksi uusiutumattomien luonnonvarojen merkitystä resurssien vähenemisongelmaan on arvioitu ns. resurssi-indeksin avulla (Guinee ja Heijungs, 1995). Indeksien lähtökohtana on, että uusiutumattomien luonnonvarojen keskinäinen tärkeys määräytyy kunkin raaka-aineen hyödynnettävissä olevasta kokonaisvarannosta (R) ja kulutusmäärästä (C) maailmalla. Kertomalla kussakin elinkaarivaiheessa käytettyjen uusiutumattomien luonnonvarojen j määrä vastaavalla painokertoimella  $w_j (= C_j / R_j^2)$  ja laskemalla näin saadut painotetut arvot yhteen, saadaan ko. elinkaarivaiheen uusiutumattomien luonnonvarojen resurssi-indeksi-arvo. Uusiutuvien luonnonvarojen laskentakaavassa otetaan puolestaan huomioon tarkasteltavan luonnonvaran uusiutumisenopeuden ylittävä käyttö.

Uudenlainen laskentatapa varantonäkökulmaan, jossa energiataloudelliset tekijät on pyritty huomioimaan, on esitetty Eco-indicator 99 vaikutusarviointimenetelmässä (Goedkoop ja Spriensma, 2000). Laskentatapa perustuu parametreihin, jotka kuvaavat jäljellä olevien mineraalien ja fossiilisten polttoainevarantojen laatua. Jäljellä olevien varantojen hyödyntäminen tarvitsee yhä enemmän energiaa tulevaisuudessa. Laskentamalli on vaihtoehtoinen tapa liittää resurssien saatavuus

mukaan elinkaaritarkasteluun. Menetelmän puutteena on kuitenkin se, että menetelmän muuttujajoukko on hyvin suppea ja siten sen ohjaava vaikutus rakennusmateriaalien käytössä on ainakin toistaiseksi rajattu.

Rakennusmateriaalien aiheuttamia ympäristövaikutuksia on ensisijaisesti lähestytty tässä työssä materiaalivirtatarkastelujen kautta. Lähestymistavan valinnan taustalla ei ole niinkään sen luonnontieteelliset perusteet kuin sen käytännölläisyys ja ohjaava vaikutus. Rakennusmateriaalien tuotannossa käytetyn **kokonaismateriaalimäärän** (KMM) laskemiseksi on tässä työssä kehitetty oma laskentamenettely. KMM ottaa huomioon rakennuksessa käytettyjen materiaalien ja piilovirtojen määrän lisäksi rakennuksen purkamisen jälkeisen materiaalien uudelleen käytön ja kierrätyksen. Materiaalien uudelleen käyttö vähentää luonnonvarojen käyttöä samanlaisen tuotteen tai jonkin muun tuotteen valmistuksessa. *Kokonaismateriaalimäärä sopii rakennusten materiaalien luonnonvarojen käytön määrittämiseen vain karkealla tasolla.* Tarkempia laskelmia varten arviointikohteen kaikki rakennusmateriaalit eri jalostusasteineen ja materiaalivirtoineen on selvitettävä tuotekohtaisesti (ks. luku 4.2).

Rakennuspaikan **maan käytön** ympäristövaikutusten arviointia on kehitetty elinkaariarviointimetodologian yhteydessä (ks. liite 1). Käytännössä arviointia kuitenkin vaikeuttaa sopivien ja helposti mitattavien vaikutusindikaattoreiden (mittareiden) puute. Kaikkia maan käytön vaikutuksia on mahdotonta mitata kvantitatiivisesti. Sen vuoksi maan käytön vaikutusten arviointi tänä päivänä niin elinkaari- kuin muissakin arvioinneissa toteutuu parhaiten arvioimalla paikallisia olosuhteita tapauskohtaisesti. Tapauskohtainen tarkastelu on valittu myös tässä työssä rakennuspaikan maan käytön ympäristövaikutusten arvioinnin perustaksi. Arvioinnissa käytetään apuna päätösanalyysin piirissä käytettyjä menetelmiä (ks. luku 6).

Kaikissa rakennuksen elinkaaren vaiheissa syntyy päästöjä ympäristöön. **Päästöjen kokonaisympäristövaikutuksia** arvioidaan elinkaariarvioinnissa sovellettavalla vaikutusarviointimenetelmällä (DAIA-malli, Seppälä 1999a,b), jossa lähtöaineiston muodostaa tuotteesta tai tuotannosta elinkaarivaiheittain kerätyt ympäristökuormitustekijät ts. ympäristöä muuttavat toimenpiteet. Kuormitustekijät ilmaistaan yleensä päästöinä ilmaan ja veteen (ks. luku 5).

# Kokonaismateriaalimäärien arviointi

## 4.1 Perusta kokonaismateriaalimäärien laskentamenettelylle

Rakennuksen materiaalivirta alkaa luonnonvarojen ostopaikoista ja materiaalien tuotannosta. Elinkaarensa päässä rakennusmateriaalit päätyvät rakentamisen ja rakennuksen käyttövaiheen jälkeen kierrätykseen tai loppusijoitukseen kaatopaikoille. Tällä hetkellä rakennuksen runko-osista vain metalli voidaan purkamisen jälkeen sellaisenaan käyttää hyödyksi suoraan ko. materiaalien (metallien) valmistuksessa. Muualla kuin materiaalien valmistuksessa hyödynnettäviä materiaaleja ovat kiviaines tierakentamisessa sekä jätetee energiantuotannossa.

Luonnonvarojen käytön vähentäminen tehostamalla tuotantoprosesseja ja kehittämällä materiaalien uudelleenkäyttöä ja kierrätystä on ekotehokkuuden parantamisessa keskeinen tavoite. Taustalla on ajatus, että mitä vähemmän luonnonvaroja käytetään, sitä vähemmän aiheutetaan haittaa ympäristölle. Rakennukseen käytettäviä materiaaleja ei kuitenkaan voida valita pelkästään uudelleenkäytön tai luonnonvarojen käytön näkökulmasta, koska materiaalien ominaisuudet poikkeavat niin paljon toisistaan, että ne eivät useinkaan ole toisilleen vaihtoehtoisia materiaalivalintoja. Valintatilanteessa ratkaisevia tekijöitä ovat muun muassa materiaalien käyttökohde ja sille asetetut tekniset ja muut laatuvaatimukset.

Rakennukseen liittyvää kokonaismateriaalimäärää (KMM) voidaan käyttää yhtenä ympäristökriteerinä erilaisten rakennusvaihtoehtojen vertailussa, sillä edellytyksellä, että vaihtoehdot täyttävät vertailukelpoisuudelle asetetut vaatimukset (ks. luku 7). Laskelmien pohjaksi tarvitaan rakennusmateriaalien kokonaismateriaalivirtaa kuvaavat lukuarvot, jotka muodostetaan luonnonvarojen käytön näkökulmasta käyttäen hyväksi Wuppertal Instituutin (1998) esittämän (kokonais)materiaalipanoksen käsitettä.

Wuppertalin menetelmässä materiaalipanoksella kuvataan kaikkea sitä luonnonvarojen määrää, jota ihminen ottaa käyttöönsä, muuntaa tai siirtää. Luonnonvarojen käytön laskelmien ulkopuolelle jää kaksi tärkeää luonnonvaraa, ilma ja vesi, koska niiden käyttö poikkeaa luonteeltaan muusta luonnonvarojen käytöstä. Kuitenkin esimerkiksi energiantuotannossa otetaan huomioon tuuli- ja vesivoimalla tuotettu energia, mutta ei ilma- ja vesiaineksen hyväksikäyttöä materiaalina (Ympäristöministeriö, 2000). Käytetyt luonnonvarojen määrät esitetään tuotetta tai materiaalia kohti. Materiaalipanoksella koostuu suorista panoksista (materiaalin valmistus lisä- ja apuaineineen) ja piilovirroista (mm. kaivostoiminnan sivukivimäärät, energiamineraalit).

Piilovirtakertoimilla kuvataan luonnonvarojen hyödyntämisen yhteydessä liikuteltavaa materiaalmäärää, joka ei sisälly itse tuotteeseen. Materiaalipanoksen laskentamenetelmässä piilovirrat ovat usein ei-kaupallisia ainevirtoja kuten maatalouden eroosio ja kaivostoiminnan sivukivet. Metsätaloudessa suorina panoksina ovat hakattu raakapuu ja piilovirtoja metsään jäävät hakkuutähteet kantoineen (bioottiset piilovirrat) ja eroosio (Veijalainen ja Pajuoja, 2000). Hakkuutähteiden käyttöä energiantuotannossa ei ole sen vähäisen merkityksen vuoksi vielä erotel-



tu metsätalouden suoriksi panoksiksi. Eroosio lasketaan metsätaloustoimenpiteistä johtuvan ravinteiden ja kiintoaineksen huuhtouman lisäyksenä. Luonnontilaisen maa-aineksen ensikertainen siirto ja palautumaton muunto sisältyy myös piilovirtoihin. Tuotteiden piilovirrat voivat sisältää elinkaariajattelun mukaisesti luonnonvaran käyttöönoton, jalostuksen ja kuljetuksen energian kulutuksen sekä muun tuotteisiin sitoutumattoman materiaalikäytön (Mäenpää ym., 2000). Kertomalla tuotteen materiaalmäärä piilovirtakertoimella saadaan käsitys materiaalin valmistuksen piilovirroista ja kun tuloon lisätään materiaalin määrä saadaan tulokseksi materiaalin tuotannossa tarvittu kokonaismateriaalipanos.

Tässä työssä on käytetty kokonaismateriaalmäärien (KMM) laskemiseen Wuppertal Instituutin piilovirtakertoimia (Schüz, 1998) tai Mäenpään ym. (2000) tutkimuksen kertoimia, jotka pohjautuvat edellä mainittuihin kertoimiin, mutta ovat joiltakin osin sovellettu Suomessa vallitseviin olosuhteisiin. Kerrostalon esimerkkilaskelmissa käytetyt piilovirtakertoimet on esitetty taulukossa 1 (ks. luku 7.2). Taulukkoon on erikseen merkitty piilovirtakertoimeen sisältyvä energiaineraalien määrä. Piilovirtakertoimet koostuvat maansirroista ja sähkön kulutuksesta, kuljetukset eivät sisälly kertoimiin.

Taulukko 1. Luonnonvarojen käytön piilovirtakertoimet tavallisimmille rakennusmateriaaleille.

	Piilovirtakerroin	Piilovirtakertoimeen sisältyvä energiamateriaali	Lähde
Betoni	0,33	0,11	2
Teräs	4,55		1
EPS	9,96	5,24	2
Bitumi	0,36		1
Tiili	1,11	0,28	2
Mineraalivilla	3,00	2,06	2
Kipsi	0,33		1
Sora	0,26	0,016	1
Puu	2,60	0,20	1
Lasi	2,00	0,85	2

Lähde:

1) Mäenpää ym. 2000: Bitumi- ja öljyliuskeet, sahatavara, kipsi, sora, teräsrakenteet

2) Wuppertal Institute 1998: Tiili, eristysaine (EPS), betoni (k.a.), lasi, mineraalivilla.

Wuppertalin menetelmässä materiaalien kokonaismateriaalipanos ( $TM_i$ ) lasketaan yhtälöllä:

$$TM_i = m_i + p_i * m_i \quad (1)$$

missä  $m_i$  on materiaalin  $i$  massa ja  $p_i$  on sitä vastaava piilovirtakerroin. Esimerkiksi eristysmateriaali (EPS) taulukosta 1. EPS:n piilovirtakerroin on 9,96 eli yhden eristysainetonnin valmistamiseen kuluu luonnonvaroja yhden tonnin lisäksi 9,96 kertaa 1 tonni eli 9,96 tonnia muita luonnonvaroja, niistä energiaineraalien osuus on 5,24 tonnia.

Wuppertalin menetelmän kokonaismateriaalipanosa voidaan myös esittää materiaalin ns. MI-kertoimen ja materiaalmäärän tulona, jolloin yhtälö (1) saa muodon

$$TM_i = MI_i * m_i \quad (2)$$

MI-kertoimet ovat materiaalikohdaisia ominaislukuja, jotka kuvaavat sitä kokonaismateriaalipanosta tonneina, joka tarvitaan yhden materiaalitonnin tuottamiseen.

Wuppertal Instituutti on esittänyt joillekin tuotteille piilovirtakertoimia, joissa kierrätys on otettu huomioon. Kierrätysprosentti edustaa kuitenkin Saksan olosuhteita eikä sen soveltuvuudesta Suomen oloihin ole varmuutta. Kertoimiin ei sisälly uudelleen käytön seurauksena toisen tuotteen valmistuksessa toteutuvaa luonnonvarojen säästöä eli ns. hyvitystä. Tässä työssä materiaalin käytön jälkeisen hyödyn huomioimiselle, koskemaan nimenomaan Suomen olosuhteita, on kehitetty laskentamenettely rakennuksen purkamisen jälkeen uudelleen käytetyille materiaaleille kuten teräkselle, kiviainekselle ja puulle (kokonaismateriaalimääräkertoimet, KMI).

## 4.2 Rakennusmateriaalien ja rakennukseen tarvittava kokonaismateriaalimäärä (KMM)

Rakennuksen purkamisen jälkeinen materiaalien kierrätys tai uudelleenkäyttö vähentää luonnonvarojen käyttöä joko samalla tai muilla toimialoilla tulevaisuudessa. Lisäksi se myös vähentää jätteiden määrää ja useissa tapauksissa myös muita päästöjä. Materiaalien kierrätys siis lisää ekotehokkuutta ja sen vuoksi materiaalien uudelleenkäytöstä voidaan perustellusti antaa hyvitystä rakennuksen aiheuttamaa luonnonvarojen kokonaiskäyttöä arvioitaessa. Ekotehokkuuden arviointimenetelmää varten tässä työssä on kehitetty kierrätettäville rakennusmateriaaleille ns. KMI-kertoimet, joissa on otettu huomioon ympäristöä säästävä materiaalin hyödyntäminen. Perustana kertoimille on materiaalien kokonaiskäyttö edellä mainituilla Wuppertalin piilovirtakertoimilla laskettuina. KMI-kertoimet eivät perustu luonnontieteellisiin mittausmenetelmiin. Periaatteiltaan ne kuitenkin ovat valtakunnallisen jätepolitiikan mukaisia, jonka tarkoituksena on tukea materiaalien uudelleenkäyttöä ja kierrätystä sekä ympäristöystävällisten materiaalien käyttöä.

Tärkeää on huomata, että KMI-kertoimia ei voi käyttää laajempien kokonaisuusien (sisältäen useita toimialoja) luonnonvarojen käytön laskemiseen kansantalouden tasolla (vrt. Mäenpää ym., 2000)<sup>1</sup>. Jos näin tehdään kierrätyksen hyödyt saattavat tulla lasketuksi mukaan kahteen kertaan. KMI-kertoimet on kehitetty nimenomaan yksittäisen rakennuksen tai muun vastaavan tuotteen kokonaismateriaalimäärän arvioimiseen ja eri rakennusten materiaalivalintojen yhteisvaikutusten vertailemiseen luonnonvarojen käytön näkökulmasta. *KMI on laskettu materiaalitonnin kohti eli kertomalla materiaalin määrä kertoimella saadaan materiaalin kokonaismateriaalimäärä (KMM).*

*Uusiutumattomille, kierrätettäville materiaaleille KMM ja KMI lasketaan ns. hyvitysmenettelyä käyttäen. Hyvitystä saadaan, kun materiaali korvaa jotain toista materiaalia, joka muutoin valmistettaisiin "neitseellisistä" raaka-aineista. Koska materiaalia käytetään hyväksi tavallaan kahteen kertaan, vaikkakin eri tarkoituksiin kuin se oli alun perin valmistettu, luonnonvaroja säästyy. Materiaalin *i* kokonaismateriaalimäärän arvioinnissa hyvitys tehdään vähentämällä arvioitavan materiaalin kokonaismateriaalipanoksesta (KMM<sub>i</sub>) hyvitettyä materiaalia *j* vastaava kokonaismateriaalipanos (KMM<sub>j</sub>).*

Joissakin tapauksissa hyvitykseen voidaan käyttää ns. laajennettua menettelyä ts. kierrätettävän materiaalin alkuperäisessä valmistuksessa otetaan huomioon neitseellisestä ja kierrätysmateriaalista tapahtuvat materiaalien valmistukset ja niiden olemassa olevat osuudet tuotannossa sekä näiden valmistusten erilaiset piilovirtakertoimet. Tämä menettely sopii metallien jalostuksessa kierrätettäville metalleille, koska myös malmipohjaisessa metallien tuotannossa (esim. teräs) käytetään ainakin kertaalleen käytettyä metalliromua.

<sup>1</sup> Kansallisten valtioiden luonnonvarojen kokonaiskäytön arvioinnissa käytetään TMR (Total Material Requirement) käsitettä, joka perustuu materiaalien ns. suoriin panoksiin ja piilovirtoihin.

Hyvitysmenettelyllä laskettuna uusiutumattoman, kierrätettävän materiaalin 1 kokonaismateriaalimäärä ( $KMM_1$ ) on:

$$KMM_1 = (m_1 + p_1 * m_1) - (m_{1,2} + p_2 * m_{1,2}) = MI_1 * m_1 - (MI_2 * m_{1,2}) \quad (3)$$

missä

$m_1$  = materiaalin 1 määrä

$p_1$  = materiaalin 1 piilovirtakerroin

$m_{1,2}$  = korvattavan materiaalin 2 määrä =  $K_{1,2} * m_1 * a_{1,2}$

$p_2$  = korvattavan materiaalin 2 piilovirtakerroin

$MI_1$  = materiaalin 1 MI-kerroin

$MI_2$  = materiaalin 2 MI-kerroin

$K_{1,2}$  = kierrätettävän materiaalin 1 määrä, jota käytetään korvaamaan materiaalia 2

$a_{1,2}$  = materiaalien 1 ja 2 korvaussuhde

Kierrätettävän materiaalin määrää kuvataan **kierrätysprosentilla**, jolla tarkoitetaan sitä materiaalin osuutta, joka käytöstä poiston jälkeen käytetään uudelleen joko vastaavan materiaalin valmistuksessa tai muussa toiminnassa korvaamaan jotakin toista materiaalia.

**Korvaussuhde** (a) kertoo korvattavan ja korvaavan materiaalin massojen suhteen. Esimerkkinä voidaan mainita, että jos materiaalia 1 kierrätetään 500 kg ja uudelleenkäytön ansiosta se korvaa 400 kg:a materiaalia 2, niin materiaalien 1 ja 2 korvaussuhde  $a_{1,2} = 400 \text{ kg} / 500 \text{ kg} = 0,8$ .

Mikäli tarkasteltavaa materiaalia  $i$  pystytään käyttämään kahdessa tai useammassa hyötykäyttötarkoituksessa, vähennetään näitä vastaavat hyvitysmäärät materiaalin  $i$  kokonaismateriaalimäärästä eli *uusiutumattoman, kierrätettävän materiaalin  $i$  kokonaismateriaalimäärä* ( $KMM_i$ ) lasketaan seuraavasti:

$$KMM_i = m_i + p_i * m_i - \sum_{j=1}^n (K_{i,j} * m_i * a_{i,j} + p_j * K_{i,j} * m_i * a_{i,j}) \quad (4)$$

Ennen kuin kierrätettävä materiaali korvaa jotain toista materiaalia tarvitaan usein materiaalin käsittelyä ja siihen liittyviä kuljetuksia. Nämä toimenpiteet kulltavat tietysti myös materiaalipanoksia, jotka tulee ottaa huomioon kokonaismateriaalimäärää laskettaessa. Edellisessä kaavassa 4 materiaalin  $i$  kokonaismateriaalimäärälle laskettu hyvitys, joka syntyy korvattavan materiaalin säästetyistä toiminnoista, pienenee korvaustoiminnoissa kulutettujen panosten määrällä. Kaavana ilmaistuna:

$$KMM_i = m_i + p_i * m_i - \sum_{j=1}^n (m_{i,j} + p_j * m_{i,j}) + \sum_{i=1}^n m_{i,j} + p_{i,j} * m_{i,j} \quad (5)$$

missä  $m_{i,j} = K_{i,j} * m_i * a_{i,j}$  ja  $p_{i,j}$  = kierrätettävän materiaalin käsittelyn piilovirtakerroin.

Yhtälöstä 5 lasketaan materiaalin  $i$  kokonaismateriaalikerroin  $KMI_i$  asettamalla tarkasteltava materiaalin määrä yhdeksi tonniksi (tai kiloksi) tai seuraavasti:

$$KMI_i = \frac{KMM_i}{m_i} \quad (6)$$

Betonille KMI:n laskenta perustuu yllä esitettyyn menettelyyn. Perusoletuksena on, että kaikki betoni valmistetaan neitseellisestä raaka-aineesta ja että rakennuksen käytön jälkeen vain osa betonista hyödynnetään kiviaineksena tierakentamisessa. Lisäksi oletetaan, että 1 tonni betonia korvaa saman verran hiekkaa ja soraa. Betonin kierrätettävyyden on siis otettu huomioon hyvityksenä maarakentamisen yhteydessä säästetyillä maa-ainesten ostoilla. Kierrätettävän betonin käsittelystä aiheutuvia materiaalipanoksia ei ole otettu huomioon niiden oletetun vähäisen merkityksen takia.

Valtioneuvoston päätös rakennusjätteiden käsittelystä (295/97) edellyttää, että vuonna 2000 puolet syntyvästä rakennusjätteestä on käsiteltävä ja ohjattava uudelleenkäyttöön. Valtakunnallisessa jätesuunnitelmassa (Ympäristöministeriö, 1998) tavoitteeksi on asetettu rakentamis- ja purkutoiminnan jätteiden hyötykäyttöasteen nostamista 70 %:iin vuoteen 2005 mennessä. Tällä perusteella betonin kierrätysprosentin arvioidaan tulevaisuudessa olevan 70 % eli kierrätettävän materiaalin osuus (K) alla olevassa kaavassa on 0,7.

Betonin KMI voidaan laskea seuraavilla lähtötiedoilla:

- $MI_1$  = betonin kokonaismateriaalipanoskerroin 1,33 (Wuppertal 1998)
- $MI_2$  = korvattavan materiaalin soran/hiekan kokonaismateriaalipanoskerroin 1,18 (Wuppertal 1998)
- $m_1$  = materiaalin määrä = 1 tonni
- $m_2$  = korvattavan materiaalin määrä = 1 tonni
- $K_{1,2}$  = kierrätettävän materiaalin osuus = 0,7
- $a_{1,2}$  = korvaussuhde = 1

Tulokseksi saadaan, että *betonin kokonaismateriaalimääräkerroin KMI on 0,504*. Koska betonin KMI on alle yhden, tarkoittaa se sitä, että rakennukseen käytetyn betonin määrästä vain noin puolet lasketaan mukaan rakennuksen kokonaismateriaalimäärään betonin kierrätettävyyden ansiosta.

Edellä esitettyä laskentatapaa voidaan käyttää kaikille niille kiviaineksille, jotka valmistetaan neitseellisistä materiaaleista. Kaavassa oletetaan, että myös hyvitetty toiminto tehdään neitseellisistä materiaaleista riippumatta siitä, onko kierrätysmateriaalia käytettävissä vai ei. Kaikki kiviaineksesta koostuvat rakennusmateriaalit saavat samanlaisen korvauksen tierakentamisesta kuin betoni. Tiilen ja mineraalivillan KMI:t lasketaan uusiutumattomina, kierrätettävänä materiaaleina yhtälön 5 perusteella. Yhtälön loppuosa eli kierrätyksestä aiheutuvat vaikutukset on oletettu nolaksi samalla tavalla kuin betonin kohdalla. Kummassakin tapauksessa hyvitetty kokonaismateriaalimäärä yhtä tiili- tai mineraalitonnia kohti on 0,826 tonnia ( $K_{1,2} * m_1 * a_{1,2} = 0,7 * 1,18 * 1$ ). *Tiilen ja mineraalivillan KMI-kertoimet ovat näin laskettuina 1,28 ja 3,17*.

Teräksen tuotanto koostuu monenlaisista terästuotteista, joiden laskennalliset piilovirtakertoimet ja tietysti myös kokonaismateriaalipanokset, ovat valmistusprosessien erilaisuuksien vuoksi toisistaan eroavia. Tässä yhteydessä rakennuksessa käytettyä terästä käsitellään ainoastaan yhtenä keskimääräisenä teräsmateriaalina eikä erillisinä terästuotteina. Teräksen kokonaismateriaalimäärä määritetään laajennettua menettelyä käyttäen, jolloin otetaan huomioon maailmanlaajuisen terästuotannon jakautuminen malmipohjaiseen ja romupohjaiseen tuotantoon. Maailmalla terästuotteista 60 % valmistetaan malmista ja 40 % romusta (Metallienjalostajat ry, 2001). Malmipohjaisessa tuotannossa käytetään lisäksi 20-25 % romua. Maailman teräksen tuotannossa romun osuus on siis noin 52% ja malmin osuus noin 48 %. *Teräksen kokonaismateriaalimäärä ( $S_T$ ) ilman hyvitystä voidaan laskea seuraavasti:*

$$S_T = m_T + p_T * m_T = c_{T,M} * (m_T + p_{T,M} * m_T) + c_{T,R} * (m_T + p_{T,R} * m_T) \quad (7)$$

missä

$m_T$  = teräksen määrä

$p_T$  = teräksen piilovirtakerroin

$c_{T,M}$  = malmipohjaisen tuotannon osuus = 0,48

$c_{T,R}$  = romupohjaisen tuotannon osuus = 0,52

$p_{T,M}$  = malmipohjaisesti valmistetun teräksen piilovirtakerroin = 5,97

$p_{T,R}$  = romupohjaisesti valmistetun teräksen piilovirtakerroin = 2,36

Yhtälöstä 7 voidaan johtaa edelleen teräksen piilovirtakerroimen yhtälö, joka on

$$p_T = c_{T,M} * p_{T,M} + c_{T,R} * p_{T,R} = 4,093 \quad (8)$$

Teräksen KMM:ssä ja KMI:ssä otetaan edelleen huomioon rakennuksesta poistettun teräksen päätyminen takaisin kierrätykseen. Teräksen kierrätysprosentiksi rakennuksen purkamisen jälkeen on arvioitu 80 – 90 %. Tästä uudelleen käytetyn teräksen määrästä lasketaan hyvitys ensin samalla periaatteella kuin kiviainesten kohdalla ts. kierrätettävälle teräkselle annetaan hyvitystä maailmalla tapahtuvien terästuotantojen (malmi- ja romupohjainen) suhteessa. Kuitenkin ennen kuin teräs on uudelleen käytettävissä, se joutuu romupohjaiseen tuotantoon, jonka luonnonvarojen käyttö täytyy ottaa huomioon kokonaismateriaalimäärää lisäävänä tekijänä (ks. kaava 5). Hyvitystä annetaan siis siitä, että terästä ei tarvitse valmistaa neitseellisestä materiaalista, mutta vähennetään hyvityksestä sen uudelleen valmistuksen materiaaliolos.

Teräksen kokonaismateriaalimäärä voidaan laskea yhtälön 5 avulla eli

$$KMM_T = m_T + p_T * m_T - (K_{T,M} * m_T * a_{T,M} + p_{T,M} * K_{T,M} * m_T * a_{T,M}) + (K_{T,R} * m_T * a_{T,R} + p_{T,R} * K_{T,R} * m_T * a_{T,R}) \quad (9)$$

Kun lähtökohdaksi otetaan yksi tonni terästä, jolloin  $m_T = 1$ ,  $K_{T,R} = 0,8$  ja  $a_{T,R} = 1$ , teräksen kokonaismateriaalikertoimeksi (KMI) saadaan 2,21. Muiden kierrätettävien metallien kokonaismateriaalimäärät voidaan laskea teräksen yhteydessä esitetyn menettelytavan mukaisesti.

Uusiutuvien, kierrätettävien materiaalien kokonaismateriaalimäärät lasketaan myös perusyhtälöllä 5 olettaen jälleen, että kierrätystoiminnot eivät aiheuta merkittäviä materiaaliolosia. Laskelmissa hyvitetään biomassalla perusolettamuksella, että uusiutuvien luonnonvarojen tuotanto on kestäväällä pohjalla. Puun kohdalla se tarkoittaa, että metsänkasvu on sopuoinnussa hakkuiden kanssa. Puutavaran piilovirtakerroin (Mäenpää ym.) koostuu biomassasta (2,32), eroosiosta (0,08) ja abiottisesta eli energian osuudesta (0,2). KMI-kerrointa laskettaessa saadaan hyvitystä uusiutuvasta luonnonvarasta, biomassasta, jolloin kertoimen piilovirtoiksi tulee 0,28 ja KMI on silloin 1,28.

Taulukko 2. Uudelleen käytettävien tai uusiutuvien rakennusmateriaalien kokonaismateriaalimääräkertoimet (KMI-kertoimet).

Rakennusmateriaali	KMI-kertoimet
Teräs	2,21
Betoni	0,50
Tiili	1,28
Mineraalivilla	3,17
Puutavara	1,28

Jätepuun käyttö energianlähteenä voitaisiin myös hyvittää samalla periaatteella kuin muita uusiutumattomia materiaaleja, mutta yhtä suuren korvaavan energiamuodon valinta on hankalaa, joten sitä ei ole harkittu tehtäväksi tässä yhteydessä.

Rakennuksen kokonaismateriaalimäärää on tässä työssä tarkasteltu Wuppertalin piilovirtakertoimien avulla. Tarkoituksena on ollut havainnollistaa KMM-laskentamenetelmän käyttöä. Kertoimet eivät välttämättä kuvaa Suomessa vallitsevaa tilannetta. *Tulevaisuudessa kertoimien laskentaa tulee kehittää siten, että se perustuu Suomessa valmistettavien rakennusmateriaalien omiin piilovirtakertoimiin. Laskentäsääntöjen, eli mitkä tekijät otetaan huomioon, tulee olla yhteneväiset materiaalien elinkaarilaskennan kanssa.*

# 5

## Päästöjen vaikutusten arviointi

Tuotteiden ympäristövaikutuksia arvioidaan tavallisesti päästötietojen perusteella. Menetelmiä tuotantoketjun, varsinkin ilmaan ja veteen menevien, päästöjen aiheuttamien ympäristövaikutuksien arvioimiseksi on kehitetty elinkaariarvioinnin yhteydessä. Tässä työssä elinkaariarviointia sovelletaan rakennuksen elinkaaren aikaisten päästöjen vaikutusten arviointiin.

### 5.1 Johdatus elinkaariarviointimenetelmään

*Elinkaariarviointi (life cycle assessment)* on menetelmä, jolla tuotteen tai toiminnon koko elinkaaren aikaisia ympäristökuormituksia ja niiden vaikutuksia arvioidaan. Arviointi tapahtuu määrittämällä käytetyt luonnonvarat, energiankulutus, aiheutuneet päästöt (maahan, veteen, ilmaan) sekä muut mahdolliset ympäristökuormitukset, ja arvioimalla näiden potentiaalisia vaikutuksia ympäristöön. Täydellisen elinkaariarvioinnin tekeminen on yleensä työläs, aikaa vievä prosessi johtuen monista tuotantoketjun toimijoista /toiminnoista ja useissa tapauksissa yksinkertaistetulla elinkaariarvioinnilla saavutetaan riittävän hyvä tarkkuus tuotteen ympäristökuormituksen ja -vaikutusten arvioimiseksi.

Elinkaariarviointi koostuu yleensä neljästä erilaisesta vaiheesta (ISO 14040-sarja), jotka ovat: tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, inventaario, vaikutusarviointi ja tulosten tulkinta. Tavoitteiden kanssa samanaikaisesti määritellään rajaukset ja toiminnallinen yksikkö, jota kohti inventaario- ja vaikutusarviointitulokset lasketaan. Inventaarioon kerätään ja luokitellaan kaikki tarvittava tietoa-aineisto materiaali- ja energiavirroista energian kulutukseen. Työn lopullisiin tuloksiin vaikuttaa olennaisesti tarkasteluun mukaan otetut yksikköprosessit. Yhdenkin merkittävän prosessin poisjättäminen muuttaa tuloksia ja niiden vertailukelpoisuutta muiden vastaavien inventaarioiden kesken. Ympäristövaikutusarviointi tehdään inventaariotietojen pohjalta tähän tarkoitukseen kehitettyjä malleja käyttäen. Tulosten tulkinnan näkökulma tulee asettaa jo työn tavoitteiden ja soveltamisalan yhteydessä.

### 5.2 Inventaario

Elinkaaritarkasteluun ja inventaariolaskentaan mukaan otettavien elinkaarivaiheiden valinta määräytyy työn tavoitteista ja soveltamisalasta samoin kuin inventaariotietojen keruu ja luokittelu. Yleensä tietojen keruu tapahtuu tuotantoketjun yksikköprosessien tietoja yhdistämällä. Energia- ja materiaali- ja energiavirtojen sekä päästöjen laskemiseen valittua yksikköä kohti voidaan käyttää tähän tarkoitukseen kehitettyjä tietokoneohjelmia. Tietolähteinä voivat olla tuotteita valmistavat yritykset tai/ja alan tietokannat.

Koska rakennusten elinkaaritarkasteluissa suurimmat päästöt syntyvät energian kulutuksesta, on laskelmissa käytetyillä sähkön- ja lämmöntuotantomalleilla merkittävä osuus tulosten muotoutumiseen. Tämän hankkeen yhteydessä sähkön ja kaukolämmön keskimääräiset ympäristöprofiilit kulutettua kilowattituntia

kohti on laskettu käyttämällä sähköenergiantuotannolle Suomen keskimääräistä sähköntuotannon jakaumaa vuonna 1998 sisältäen polttoaineiden hankinnan ja verkkohäviön (Tattari, 2000). Ympäristöprofiilit on laskettu hyödynjakomenetelmällä (Liikanen, 1999). Kiinteistö- ja rakennusalan elinkaaritarkasteluissa sähköntuotannon ominaispäästöinä voidaan käyttää Suomen keskimääräistä ympäristöprofiilia. Lämmöntuotannossa esiintyy kuitenkin niin paljon paikallisia vaihteluita ominaispäästöjen suhteen, että paikkakuntakohtaiset kaukolämmön tuotantotavat, polttoaineet ja päästöt on tarpeen selvittää energiankäytön ympäristövaikutuksia arvioitaessa (Tattari, 2000). Päästöjen erilaisuuteen vaikuttaa myös kaukolämmön ja sähkön yhteistuotannon osuus tuotetusta kaukolämmöstä ja niiden laskennallinen jakotapa.

Tilannetta voidaan havainnollistaa taulukolla 3, jossa on esitetty energiantuotannon päästöt ilmaan yhtä tuotettua kilowattituntia kohti Suomen keskimääräiselle sähkön- ja lämmöntuotannolle sekä muutamalle paikalliselle lämmöntuotantotavalle (Tattari, 2000). Pienetkin erot tuotantotapojen ominaispäästöissä yhtä kilowattituntia kohti luonnollisesti moninkertaistuvat, kun lasketaan rakennuksen vuosittaisen energiankulutuksen päästömääriä ja niiden pohjalta edelleen ympäristövaikutuksia (ks. luku 5.3.3).

Taulukko 3. Sähkön- ja lämmöntuotantotapojen ympäristökuormitus per 1 kWh vuonna 1998 (Tattari 2000).

Hki = Helsingin Energia Oy, Va = Vantaan Energia Oy, Jy = Jyväskylän Energiantuotanto Oy.

	Päästöt ilmaan g / 1 kWh				
	sähkö	lämpö	lämpö Hki	lämpö Va	lämpö Jy
CO <sub>2</sub>	231	251	235	220	327
CO	0,500	0,397	0,257	0,203	0,707
NO <sub>x</sub>	0,530	0,530	0,440	0,406	0,570
SO <sub>2</sub>	0,440	0,504	0,309	0,177	0,854
NM VOC	0,035	0,033	0,011	0,011	-0,050
CH <sub>4</sub>	0,669	0,722	1,114	1,168	-0,205
hiukkaset	0,701	0,567	0,701	0,461	0,479

## 5.3 Elinkaariarvioinnin mukainen vaikutusarviointimenettely

### 5.3.1 Vaikutusarvioinnin vaiheet

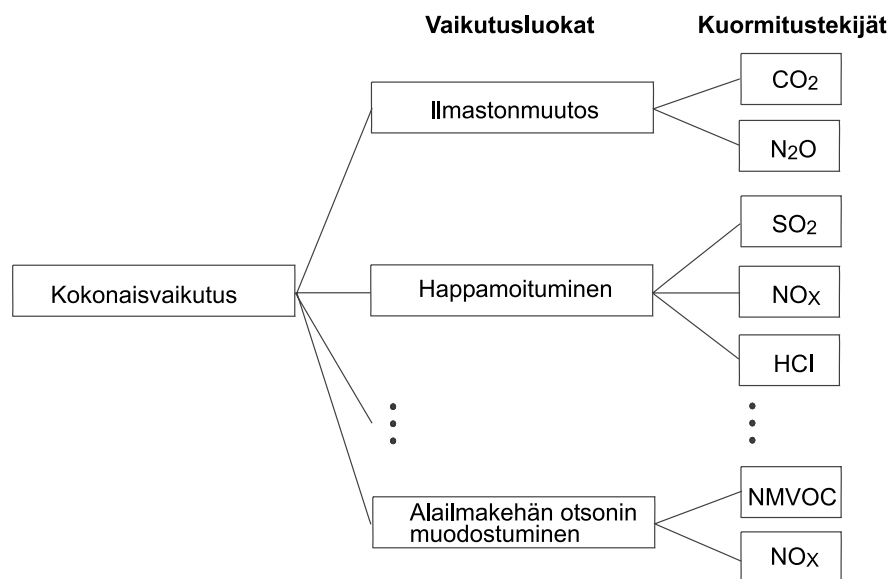
Elinkaariarvioinnissa on kehitetty inventaariotietojen tulkintaan erityinen vaikutusarviointi, jonka periaatteet on esitetty kansainvälisen standardisoimisjärjestön elinkaariarviointia koskevassa standardissa (ISO 14042). Vaikutusarvioinnin ensimmäisenä vaiheena on **luokittelu**, jossa inventaariossa kerätyt kuormitustekijät jaotellaan erikseen määriteltyihin vaikutusluokkiin tiedossa olevien syyseuraussuhteiden perusteella. Luonnehdinnassa eli **karakterisoinnissa** luokitellut tiedot lasketaan yhteen kussakin vaikutusluokassa, jolloin tulokseksi saadaan kunkin vaikutusluokan vaikutuksia kuvaava vaikutusluokkaindikaattoriluku. Näiden arvojen perusteella voidaan jo tehdä johtopäätöksiä erilaisten systeemien ja vaihtoehtojen merkityksestä ko. vaikutusluokkien seurausten aiheuttajana. Tulosten tulokinnan helpottamiseksi voidaan edelleen tehdä **normalisointi**, jossa karakterisoinnissa lasketut vaikutusluokkaindikaattoriarvot jaetaan jonkin tietyn alueen vastaavilla vaikutusindikaattoriarvoilla. Normalisoinnin perusteella nähdään, mihin



vaikutusluokkiin tarkasteltavalla systeemillä on suurin vaikutus. Erilaisten vertailujen helpottamiseksi saattaa olla aiheellista tehdä **painotus**, jossa eri vaikutusluokkien tiedot on yhdistetty kokonaishaitta- tai vaikutuspisteiksi.

Vaikutusluokkien valintaan, karakterisointiin ja normalisointiin sisältyy runsaasti valintoja ja epävarmuustekijöitä. Vaikutusarvioinnin kiistellyin vaihe on kuitenkin tietojen yhdistäminen kokonaisarvioksi. Vaikutusluokkien painojen määrittäminen eli arvottaminen, joka on edellytys kokonaisarvioinnin tekemiselle, perustuu käytännössä subjektiiviseen näkemykseen eri vaikutusluokkien keskinäisestä merkityksestä. Yleisesti voidaan sanoa, että vaikutusarvioinnin tulos on sitä herkempi kritiikille, mitä lähempänä se on kokonaisarviota. Usein vaikutusarviointi rajoitetaan vain karakterisointivaiheeseen. Toisaalta tulosten tulkinta ja lopullisten johtopäätösten teko edellyttää tavalla tai toisella eri vaikutusluokkatietojen yhdistämistä. Kokonaisarvioinnin lopputuloksen luotettavuus voidaan selventää ja ymmärrettävyyttä parantaa herkkyysanalyysien avulla.

Tarkasteltavan systeemin ympäristövaikutusten arviointia voidaan lähestyä hierarkkisen mallin avulla (kuva 2). Mallin lähtöaineiston muodostaa tuotteesta tai niin kuin tässä tarkastelussa rakennuksesta elinkaarivaiheittain kerätyt ympäristökuormitustekijät ts. ympäristöä muuttavat toimenpiteet. Nämä ilmaistaan yleensä päästöinä ilmaan ja veteen. Nämä toimenpiteet muodostavat mallin alimman tason ja samalla kriteeristön ympäristövaikutuksille. Erilaisia ympäristövaikutuskokonaisuuksia kuvaavat vaikutusluokat muodostavat hierarkian seuraavan tason. Arvioinnin päämäärä, kokonaisvaikutus, muodostaa mallin ylimmän tason.



Kuva 2. Vaikutusarviointimallin hierarkkinen kuvaus (Seppälä ym., 2002).

Tässä työssä elinkaariarvioinneissa sovellettavaa vaikutusarviointimenettelyä havainnollistetaan mallilla, josta käytetään nimitystä DAIA (Decision Analysis Impact Assessment). Mallin teoreettinen perusta on esitetty Seppälän julkaisuissa (1999a, 1999b). Mallissa on käytetty edellä esitettyjä ISO 14042 standardin mukaisia vaiheita ja Suomen oloihin sovellettuja kertoimia.

### 5.3.2 Tarkasteltavat vaikutusluokat

DAIA-mallin vaikutusluokat, joita tässä työssä käytetään, ovat seuraavat (Seppälä 1999b):

1) *Ilmastonmuutos*: Ilmastonmuutos tarkoittaa ns. kasvihuonekaasujen, joita ovat CO<sub>2</sub>, hiilidioksidi, CH<sub>4</sub>, metaani ja N<sub>2</sub>O, typpidioksidi, aiheuttamaa ilmakehän lämpenemistä. Ilmaston lämpeneminen on keskeisimpiä globaaleja ympäristöongelmia, jonka vaikutuksia on kuitenkin mahdotonta ennustaa tarkasti. Uhkana on, että ilmaston lämpeneminen saa aikaan merkittäviä muutoksia eri ekosysteemeissä ja myös ihmisen toiminta- ja elinmahdollisuuksissa (aavikoituminen, tulvat jne.).

2) *Happamoituminen*: Happamoitumisella tarkoitetaan luonnon vastustuskyvyn heikkenemistä happamoittavaa laskeumaa vastaan. Kullakin alueella on alueelle ominainen puskurikyky vastustaa happamoitumista. Se vaihtelee muun muassa alueen geologisten olojen mukaan. Suomi ja muut Pohjoismaat ovat erityisen herkkiä happamalle laskeumalle. Happamoituminen vaikuttaa muun muassa metsäkasvuun ja pienten vesiekosysteemien pH-tasoon. Erityisen uhanalaisia ovat latvapurojen eliölajit, metsäjärvet ja karujen metsien kasvillisuus. Lisäksi happamoituminen aiheuttaa rakennetussa ympäristössä materiaalivaurioita.

3) *Alailmakehän otsonin muodostuminen*: Ultravioletti (UV)-valon vaikutuksesta typen oksidit reagoivat VOC (orgaaniset haihtuvat yhdisteet)-yhdisteiden kanssa muodostaen terveydelle haitallisia foto-oksiantteja. Foto-oksiantteina tässä yhteydessä käsitellään vain alailmakehän otsonia. Suomessa havaittavat otsonipitoisuudet ovat keskimäärin korkeita (30-50 µg/m<sup>3</sup>) Keski-Eurooppaan verrattuna. Suomen tiheään asuttujen alueiden päästöistä voi suotuisissa olosuhteissa kesällä muodostua otsonia, mutta eniten maassamme havaittuihin korkeisiin otsonipitoisuuksiin vaikuttaa kaukokulkeutuminen. Otsoni heikentää metsän kasvua ja aiheuttaa viljelyksillä satotappioita. Samoin hengitysilmassa esiintyy usein otsonipitoisuuksia, joilla terveyshaitat ovat mahdollisia.

4) *Rehevöityminen*: Rehevöitymisen aiheuttaa ravinteiden (typpi ja fosfori) johtaminen vesistöihin tai maahan. Ravinteiden ansiosta biomassan tuotanto lisääntyy. Vesistöissä se johtaa happikatoon, joka vaikuttaa korkeimpiin eliöihin kuten kaloihin. Rehevöitymisen peruskriteerinä pidetään kasviplanktonin ja korkeampien vesikasvien lisääntynyttä tuotantoa (a-klorofyllipitoisuutena). Rehevöitymistä tarkastellaan vain vesiekosysteemin kannalta. Maaympäristössä tapahtuvaa rehevöitymistä ei oteta huomioon, koska sen oletetaan olevan Suomessa ongelmana vähäinen.

### 5.3.3 Vaikutusarvioinnin tulosten laskenta

DAIA-mallin vaikutusten laskenta noudattaa elinkaariarvioinneissa yleisesti käytettävää vaikutusarviointimallien laskentamenettelyä. Vaikutusarvioinnin perustana on karakterisoinnin tulos eli ns. vaikutusluokkaindikaattoritulos:

$$I_i(a) = \sum_{j=1}^m C_{i,j} * E_j(a), \quad i=1, \dots, n \quad (10)$$

missä

$I_i(a)$  = tuotteen a indikaattoritulos vaikutusluokassa  $i$

$C_{i,j}$  = päästöaineen  $j$  karakterisointikerroin vaikutusluokan  $i$  yhteydessä

$E_j(a)$  = tuotteen a aiheuttama aineen  $j$  päästö määrä

Karakterisointikertoimen ja aineen  $j$  päästön tulo ( $C_{i,j} * E_j(a)$ ) paljastaa eri päästöjen keskinäisen merkityksen vaikutusluokan  $i$  seurausten aiheuttajana (mitä suurempi luku, sen suurempi vaikutus ympäristöön).

Ympäristövaikutusten kokonaishaittaa kuvataan yhteenlasketuilla vaikutusluokkien vaikutuspisteillä. Tarkasteltavan tuotteen  $a$  päästöistä aiheutuva kokonaisvaikutusindikaattoritulos, kokonaisvaikutuspistemäärä  $V(a)$ , lasketaan seuraavalla yhtälöllä:

$$V(a) = \sum_{i=1}^n w_i * \frac{I_i(a)}{N_i} \quad (11)$$

missä

$w_i$  = vaikutusluokan  $i$  paino

$N_i$  = vaikutusluokan  $i$  normalisointikerroin

$I_i(a)$  = tuotteen  $a$  indikaattoritulos vaikutusluokassa  $i$

Vaikutusluokan  $i$  normalisointikerroin vastaa jonkin alueen kaikkien päästöjen vaikutusluokkaindikaattoritulosta.

Kullekin päästölle  $j$  voidaan myös laskea kokonaishaittapiste seuraavasti:

$$V_j(a) = \sum_{i=1}^n w_i * \frac{I_i(a)}{N_i} \quad (12)$$

Tässä työssä käytetyt DAIA-mallin vaikutusluokat, päästömuuttujat ja kertoimet on esitetty taulukoissa 4, 5 ja 6. Vaikutusarviointimallin kuormitustekijät (päästömuuttujat) ja niiden karakterisointikertoimet on esitetty taulukossa 4. Eri vaikutusluokkien normalisointitekijät, jotka vastaavat Suomen päästöjen vaikutusluokkaindikaattorituloksia, on esitetty taulukossa 5. Painokertoimet (taulukko 6) on otettu toisen työn (Seppälä, 1999b) yhteydessä tehdystä mielipidekyselystä, joka on tietyn asiantuntijajoukon näkemysten keskiarvo eri vaikutusluokkien haitallisuudesta ja parantamistoimenpiteiden kohdentamisen tärkeydestä Suomessa.

Taulukko 4. Vaikutusarvioinnissa käytetyt päästömuuttujat ja karakterisointikertoimet (Seppälä, 1999a).

Vaikutusluokka (indikaattorin yksikkö)	Kuormitustekijä	Karakterisointikerroin
Ilmastonmuutos (CO <sub>2</sub> ekv)	CO <sub>2</sub>	1
	CH <sub>4</sub>	21
	N <sub>2</sub> O	210
Happamoituminen (H <sup>+</sup> ekv)	SO <sub>x</sub>	0,01635
	NO <sub>x</sub>	0,00639
	NH <sub>3</sub>	0,02646
Otsonin muodostuminen (POCP)	NM VOC	0,209
	NO <sub>x</sub>	0,727
	CO	0,064
	CH <sub>4</sub>	0,003
Rehevöityminen (NP, PO <sub>4</sub> ekv.)	NO <sub>x</sub>	0,008
	NH <sub>3</sub>	0,023

POPC = Photochemical Ozone Creation Potential, NP = Nitrification Potential

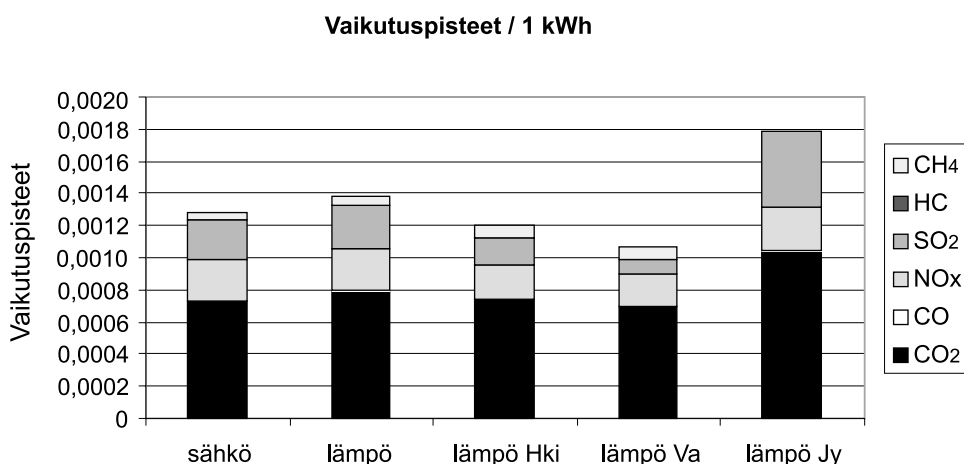
Taulukko 5. Vaikutusarvioinnissa käytetyt normalisointitekijät (Seppälä, 1999b).

Vaikutusluokka	Normalisointitekijä
Ilmastonmuutos	76 258 kt CO <sub>2</sub> ekv
Happamoituminen	4,212 kt H <sup>+</sup> ekv
Otsonin muodostuminen	253 kt POCP
Rehevöityminen	18,453 kt NP

Taulukko 6. Vaikutusarvioinnissa käytetyt vaikutusluokkapainot (Seppälä, 1999b).

Vaikutusluokka	Paino
Ilmastonmuutos	0,24
Happamoituminen	0,14
Otsonin muodostuminen	0,07
Rehevöityminen	0,17

DAIA-ympäristövaikutusmallin tulosten esittämistä graafisessa muodossa voidaan havainnollistaa kuvan 3 avulla. Siinä on esitetty DAIA-ympäristövaikutusmallia käyttäen yhtä kilowattituntia kohti lasketut vaikutuspisteet Suomen keskimääräiselle sähkön- ja lämmöntuotannolle sekä muutamalle paikalliselle lämmöntuotantotavalle. Pohjana ovat samat päästötiedot, jotka on aiemmin esitetty luvun 5.2 taulukossa 3. Suomen keskimääräiset sähkön- ja lämmöntuotantotavat ovat ympäristövaikutuksiltaan suunnilleen samansuuruiset. Helsingin Energia Oy:n, Vantaan Energia Oy:n ja Jyväskylän Energiantuotanto Oy:n kaukolämmön ominaispäästöjen (Tattari, 2000) ympäristövaikutuspisteiden vaihteluväli sen sijaan on selvästi suurempi kuin edellä mainittujen keskimääräisten sähkön- ja lämmöntuotannon ero. Suurempi vaihteluväli johtuu muun muassa erilaisista polttoaineista.



Kuva 3. Sähkön- ja lämmöntuotantotapojen vaikutuspisteet per 1 kWh vuonna 1998. Hki = Helsingin Energia Oy, Va = Vantaan Energia Oy, Jy = Jyväskylän Energiantuotanto Oy.

Kansainvälisesti elinkaariarviointien vaikutusarviointi on vilkkaan kehityksen kohteena. Vaikutusarvioinneissa pyritään yhä enemmän todellisiin vaikutusarviointeihin, jolloin mallin tulokset antavat oikeamman perustan johtopäätösten tekemiselle. Tosiasia on, ettei Euroopan eri osissa tapahtuville päästöille voi käyttää samoja karakterisointikertoimia ilmastonmuutosta ja yläilmäkehän otsonin tuhoutumista aiheuttavien päästöjen lukuun ottamatta. Tulevaisuuden suunta-

uksena on käyttää ns. maakohtaisia karakterisointikertoimia päästöille, jotka aiheuttavat happamoitumista, alailmakehän otsonin muodostumista ja rehevöitymistä (ks. Potting et al., 2002). DAIA -malli, jossa karakterisointikertoimet on määritelty Suomen päästöjen aiheuttamien vaikutusten näkökulmasta, on tämän suuntauksen mukainen malli. DAIA:ssa, samoin kuin muissakin vaikutusarviointimalleissa, karakterisointikertoimet tulee päivittää kulloisenkin parhaan käytettävissä olevan tietämyksen mukaisesti. Sama koskee normalisointikertoimia ja vaikutusluokkien painokertoimia. *Mallit ja niiden kertoimet eivät siis ole mitenkään pysyviä, vaan ajan suhteen muuttuvia.*

Vaikutusluokkien painojen käyttö on välttämätön edellytys sille, että eri vaikutusluokkien indikaattoritulokset voidaan yhdistää kokonaisvaikutusindikaattorituloksiksi, kokonaisvaikutuspisteiksi. Painoilla on erikoisen suuri merkitys kokonaisvaikutuspistemääriin. Koska painot ovat luonteeltaan subjektiivisia, tulee laskettuihin kokonaisvakuutusasteisiin suhtautua sen mukaisesti. Erilaisten vaihtoehtojen kokonaisvaikutuspistemäärien erojen tulee olla selvät (lähes kertaluokkia) ennen kuin niiden perusteella on syytä tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä vaihtoehtojen välisistä eroista. Vaikutusluokkien painot saadaan käytännössä erilaisten arvottamistehtävien perusteella, johon osallistuu tietty ihmisjoukko. Arvottamistulokset heijastavat yleistä tietämystä ympäristöongelmista ja arvottamiseen osallistuneiden ihmisten arvomaailmaa. Ennen johtopäätösten tekemistä on suositeltavaa laskea mallin kokonaisvaikutuspisteet erilaisilla painojakaumilla. Mikäli vertailtavien vaihtoehtojen paremmuusjärjestys säilyy samana eri painoilla laskettuna, johtopäätösten tekemisille on olemassa paremmat edellytykset.

Lähtötilaisuudessa DAIA-mallin kertoimet muuttuvat. Lisäksi muutoksia on tulossa vaikutusluokkien kattavuuteen. Ainakin ekotoksisuus tulisi tavalla tai toisella sisällyttää malliin tässä työssä esitettävien ns. neljän perusvaikutusluokan lisäksi.

## **5.4 Yksinkertaistettu päästöjen vaikutusarviointimalli**

Edellä esitettyä vaikutusarviointimallia voidaan yksinkertaistaa niin, että se sopii mille tahansa rakennusalan tuotteelle, jonka tuotantoketjun tai elinkaarivaiheen päästöt ovat tiedossa. Vaikutusarvioinnissa on yleensä mukana sekä ilmaan että veteen menevät päästöt, mutta tässä yksinkertaistetussa laskentamallissa on huomioitu vain ilmaan menevät päästöt. Päästöjen karakterisointikertoimet, normalisointitekijät ja vaikutusluokkien painokertoimet (ks. luku 5.3.3) on yhdistetty yhdeksi kertoimeksi (taulukko 7). Vaikutusluokan vaikutuspisteet lasketaan kertomalla päästö taulukossa esiintyvällä kertoimella:

$$\text{Päästö (kg) * kerroin} = \text{päästön aiheuttamat vaikutuspisteet ko. vaikutusluokassa}$$

Kokonaisvaikutuspisteet saadaan laskemalla yhteen kaikkien vaikutusluokkien pisteet.

Taulukko 7. Vaikutuspisteiden laskennassa käytetyt kertoimet vaikutusluokittain.

	Päästö	Kerroin
Ilmastonmuutos	CO <sub>2</sub>	0,003147
	CH <sub>4</sub>	0,066091
	N <sub>2</sub> O	0,660914
Happamoituminen	SO <sub>2</sub>	0,543447
	NO <sub>x</sub>	0,212393
	NH <sub>3</sub>	0,879487
Alailmakehän otsonin muod.	NM VOC	0,057826
	NO <sub>x</sub>	0,201146
	CO	0,017708
	CH <sub>4</sub>	0,000830
Rehevöityminen	NO <sub>x</sub>	0,073701
	NH <sub>3</sub>	0,211890

Energian kulutuksen ympäristövaikutukset arvioidaan päästöjen avulla. Se voidaan tehdä joko vaikutusarvioinnin laskentamallia käyttäen tai taulukossa 8 esitettyjen vaikutuspistekertoimien avulla. Kyseisten kertoimien arvot on saatu sijoittamalla energiantuotannon päästöt edellä mainittuun laskentamalliin. Tulokset on esitetty myös kuvassa 3. Energian kulutuksen vaikutuspisteinä ilmaistut ympäristövaikutukset saadaan kertomalla energiamäärä vaikutuspistekertoimella.

Taulukko 8. Energiankulutuksen vaikutuspistekertoimet.

ENERGIA *	Vaikutuspistekerroin / kWh
1998	
Sähköenergia	
- Suomen keskimääräinen profiili	0,00128
Lämpöenergia	
- Suomen keskimääräinen profiili	0,00138
- Helsingin Energia Oy	0,00120
- Vantaan Energia Oy	0,00107
- Jyväskylän Energiantuotanto Oy	0,00177

\* Lähde:

Tattari, K. 2000. Sähkön ja kaukolämmön ympäristöprofiilit vuonna 1998 hyödynjakomenetelmällä.

## **5.5 Vaikutusarviointimallin käytöstä rakennusten ympäristövaikutusten arvioinnissa**

Luvussa 4 oletettiin, että rakennusmateriaalien kokonaismateriaalimäärä (KMM) antaa perustan rakennuksen rakennusmateriaalien valinnalle, kun halutaan minimoida rakennusmateriaalien käytön ympäristövaikutukset. Toinen vaihtoehtoinen tapa arvioida rakennuksen materiaalivalintojen ympäristömyötäisyyttä, on laskea edellä esitetyn DAIA-mallin mukaiset päästöjen kokonaisvaikutuspisteet rakennusmateriaaleille ja summata ne rakennuksen kokonaisvaikutuspisteiksi. Edellytyksenä on, että rakennusmateriaaleille löytyy tarvittavat päästöarviot rakennusmateriaalien raaka-aineiden hankinnasta niiden valmistukseen. Jotta laskenta ottaisi huomioon myös rakennusmateriaalien kierrätyksen ja mahdollisen hyötykäytön, laskennassa on syytä soveltaa yhtälön 5 mukaista hyvitysmenettelyä.

Päästöjen vaikutusarviointimallin selvin sovelluskohde rakennuksen ympäristövaikutusten arvioinnissa on nimenomaan rakennuksen käyttövaihe, johon keskittyy rakennuksen suurimmat päästöt välillisesti energiantuotannon kautta. Mikäli tarkasteltavien talovaihtoehtojen käyttämät energiamäärät eivät eroa sähkön- tai lämmöntuotannon tuotantoprofiilin suhteen toisistaan, energiankulutusta voidaan käyttää suoraan rakennuksen käytön ympäristövaikutusten arviointiin. Toisin sanoen päästöjen ympäristövaikutusarviointia ei tällöin tarvitse tehdä.

# Rakennuspaikan maan käytön vaikutusten arviointi

# 6

Rakennuksen sijainnista aiheutuvia ympäristövaikutuksia ohjataan erityisesti kaavoituksella. Lainmukaisessa ja hyvässä maankäytön kaavassa huomioidaan muun muassa luonnon- ja kulttuuriarvot, virkistysalueiden riittävyys, ympäristöterveyden laatuvaatimukset ja palveluiden alueellinen saatavuus (Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/99, 54§). Kaavoituksen yhteydessä rakentamiseen tarkoitettua aluetta tarkastellaan osana suurempaa kokonaisuutta ja alueen käytöstä päätehtään jo ennen rakentamisen aloittamista.

Maan käyttö on yhdistetty moniin ympäristövaikutuksiin, joita ovat mm.

- vaikutukset maaperän fysikaalis-kemialliseen laatuun
- vaikutukset biologiseen diversiteettiin (monimuotoisuuteen)
- vaikutukset esteettisiin arvoihin sekä virkistys- ja kulttuuriarvoihin.

Näitä vaikutuksia ei ole tavallisesti huomioitu elinkaariarvioinneissa ja syynä siihen on ollut pääasiassa sopivien vaikutusindikaattoreiden puute. Maan käytön ympäristövaikutukset muodostavat kuitenkin tärkeän vaikutusluokan, joka tulevaisuudessa olisi hyvä saada liitettyksi useammin elinkaariarviointitarkasteluiden yhteyteen. Liitteessä 1 on esitetty kirjallisuuskatsaus maan käytön arviointimenetelmistä elinkaariarvioinneissa.

Tässä työssä lähdetään siitä, että maan käyttöön liittyvät vaikutukset pisteytetään olemassa olevan tietämyksen perusteella. Pisteytyksessä käytetään esimerkiksi suoraan painotusmenetelmää. Asiantuntijat tutustuvat rakennusvaihtoehtojen maan käytön seurauksiin, kirjaavat ne avoimesti näkyviin ja asettavat kunkin vaihtoehdon mukaisille seurauksille haittojen suuruutta kuvaavat ns. haittapisteet (ks. tämän julkaisun toisessa osassa esitetty päätösanalyysin käyttö). Esimerkiksi eri vaihtoehtojen seuraukset maaperän fysikaalis-kemialliseen laatuun, monimuotoisuuteen ja viihtyvyyteen (sis. esteettiset sekä kulttuurilliset arvot) pisteytetään skaalassa 0-100. Paras vaihtoehto saa arvon 0 ja huonoin 100. Muut vaihtoehdot saavat pisteet näiden välistä. Eri vaikutusluokkien pistemäärät voidaan yhdistää vaihtoehdon kokonaishaittapisteeksi seuraavasti:

$$V(a) = \sum_{i=1}^3 w_i * v_i(a) \quad (13)$$

missä  $v_i(a)$  = vaihtoehdon  $a$  aiheuttama haittapiste (0-100) vaikutusluokassa  $i$  (1 = vaikutukset maaperän fysikaalis-kemialliseen laatuun, 2 = vaikutukset monimuotoisuuteen, 3 = vaikutukset esteettisiin arvoihin sekä viihtyvyys- ja kulttuuriarvoihin) ja  $w_i$  on ko. vaikutusluokkien paino.

Vaikutusluokkien painojen määrittämiseen on kehitetty erilaisia menetelmiä ns. päätösanalyysin piirissä (ks. esim. Seppäläinen ja Hämäläinen, 1986). Yksinkertaisin menetelmä on edellä esitetty suora painotusmenetelmä eli painot saavat arvot 0-100. Painojen määrittämisessä tulee ottaa huomioon kuitenkin se, kuinka painotettavien luokkien vaikutukset eroavat eri vaihtoehtojen kesken. Mikäli parhaimman ja huonoimman vaihtoehdon välillä vaikutusluokan erot ovat hyvin pieniä, ko. vaikutusluokka saa pienemmän painoarvon suhteessa muihin vaiku-



tusluokkien painoihin kuin jos vaihtoehtojen erot olisivat suuria ko. vaikutusluokassa. Vaikutusluokkien painoja ei siis arvioida vaikutusluokkien "yleisen" tärkeyden perusteella, vaan painot tulee asettaa olemassa olevan vaihtoehtojoukon vaikutuserojen perusteella. Painojen määrittämistä on käsitelty 7. luvun esimerkissä.

Edellä esitettyä ns. päätösanalyttistä ratkaisumallia on mahdollista käyttää vain jos tarkastelussa on mukana vähintään kaksi vertailtavaa vaihtoehtoa. Vaihtoehtona voidaan ymmärtää myös saman kohteen eri ajankohtana olevaa tilannetta, jolloin tarkastelun tavoitteena on esimerkiksi verrata tietyn rakennuksen ajallista kehittymistä ympäristönäkökohtien suhteen.

# Esimerkki kerrostalon ympäristövaikutusten arvioinnista

# 7

## 7.1 Lähtökohdat

Elinkaariarviointimenetelmän käyttöä päästöjen ympäristövaikutusten arvioinnissa havainnollistetaan kerrostalon rakentamiseen liittyvän esimerkin avulla. Luvun lopussa esitetyssä talovaihtoehtojen vertailuesimerkissä on tehtävänä valita kolmesta erilaisesta kerrostalovaihtoehdosta ympäristömyötäisin. Kunkin kerrostalovaihtoehdon toimivuus- ja kelpoisuusominaisuuksien oletetaan olevan samanarvoisia. Talovaihtoehto 1:n lähtötiedot ja siihen liittyvät ympäristövaikutuslaskelmat esitetään yksityiskohtaisesti. Talovaihtoehtojen 2 ja 3 osalta esitetään vain kunkin vaikutusarviointikokonaisuuden lopputulokset. Tulosten avulla on tarkoitus havainnollistaa päätösanalyttistä lähestymistapaa parhaan talovaihtoehdon valinnassa.

Kerrostalovaihtoehto 1 vastaa teoreettisesti laskettua LVIS-2001 tyyppikerrostaloa. Kyseessä oleva Tyyppitalo edustaa betonista rakennettua keskivertokerrostaloa. Sen alkuperäiseen inventaariolaskentaan on käytetty VTT:n Rakennustekniikan LCA-HOUSE-ohjelmaa ja tulokset on esitetty erillisessä julkaisussa (Vares, 2001). Tähän inventaarioon on otettu mukaan suurin osa Tyyppitalon runkorakenteiden inventaariotiedoista, mutta joitakin määrällisesti pieniä materiaali-eräitä on jätetty laskennan yksinkertaistamiseksi pois.

Tässä esitettyjä arviointimenettelyjä voidaan soveltaa minkä tahansa rakennuksen ympäristövaikutuksien arviointiin. Erilaisille talotyypeille (esim. asuintalot, toimistotalot jne.) lasketut tulokset mahdollistavat niiden käyttämisen vertailuarvoina samantyyppisten talojen ympäristövaikutusten arvioinnissa. Sitä vastoin erityyppisten talojen ympäristömyötäisyyttä ei ole mahdollista elinkaariarviointimenetelmällä verrata keskenään, koska niiden toiminnallinen yksikkö on erilainen.

Tyyppitalo on 3-kerroksinen betonista valmistettu asuinkerrostalo, jossa on 17 asuntoa (Varje, 2001). Sen bruttopinta-ala on 1 346 m<sup>2</sup> ja tilavuus 4 293 m<sup>3</sup>. Asuinkerrostalon tyyppirakenteitten määrittämisessä on käytetty pohjana 90-luvun alussa LVIS-2000 tutkimusohjelman kerrostalon rakenteita. Tyyppitalon tila- ja mittatiedot on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Tyyppitalon tila- ja mittatiedot.

Mittasuure	Arvo
Leveys	15,94 m
Pituus	28,14 m
Kerroskorkeus	3 m
Huonekorkeus	2,7 m
Bruttoala	1 346 m <sup>2</sup>
Tilavuus	4 293 m <sup>3</sup>
Ulkoseinien pinta-ala – etelä ja pohjoinen	439 m <sup>2</sup>
Ulkoseinien pinta-ala – länsi ja itä	250 m <sup>2</sup>
Ikkunoitten pinta-ala – etelä ja pohjoinen	78 m <sup>2</sup>
Ikkunoitten pinta-ala – länsi ja itä	44 m <sup>2</sup>
Ulko-ovien pinta-ala – pohjoinen	3 m <sup>2</sup>

## 7.2 Rakennukseen liittyvät kokonaismateriaalimäärät

Rakentamisesta aiheutuviin ympäristövaikutuksiin voidaan periaatteessa vaikuttaa valitsemalla rakennukseen sellaiset materiaalit, joiden kokonaisympäristövaikutukset kaikki elinkaaren vaiheet huomioon ottaen ovat mahdollisimman vähäiset. Kerrostalovaihtoehtojen 1, 2 ja 3 rakennusmateriaalien ympäristövaikutuksia arvioidaan rakennusten kokonaismateriaalimäärän perusteella (ks. luku 4). Rakennuksen kokonaismateriaalimäärä saadaan laskemalla yhtälöllä 5 kullekin rakennusmateriaalille sitä vastaava kokonaismateriaalimäärä KMM. Mikäli rakennusmateriaaleille on laskettu valmiiksi ns. kokonaismateriaalikerroin (KMI), KMM saadaan yksinkertaisesti kertomalla rakennusmateriaalin määrä sitä vastaavalla KMI-kertoimella. Laskemalla rakennuksen kaikkien rakennusmateriaalien määrät yhteen saadaan rakennuksen kokonaismateriaalimäärä KMM. Mitä suurempi rakennuksen KMM, sitä suurempi on rakennuksen rakennusmateriaalien aiheuttama ympäristökuormitus.

Kerrostalovaihtoehdon 1 rakennusmateriaalit ja niiden käyttömäärät rakennuksessa sekä niitä kohti lasketut kokonaismateriaalimäärät ( $KMM = KMI \cdot m$ ) on esitetty taulukossa 10. Taulukossa on myös esitetty vertailumielessä vastaavat Wuppertalin kokonaismateriaalimäärät ( $TM = m + \text{piilovirtakerroin} \cdot m$ ). Tässä työssä kehitetty kokonaismateriaalimääräkertoimen, KMI:n laskenta perustuu Wuppertalin MI-kertoimeen. KMI:ssä otetaan piilovirtojen lisäksi huomioon rakennusmateriaalien hyötykäyttö.

Taulukko 10. Kerrostalovaihtoehdon 1 rakennusmateriaalien kokonaismateriaalimäärä ilman käytön jälkeistä hyvitystä (ns. Wuppertalin TM) ja hyvityksen kanssa (KMM).

	Kerrostalo I (t)	Piilovirta- kerroin	Lähde	TM (t)	KMI- / MI- kerroin	KMM (t)
Betoni	1 355	0,33	2	1 802	0,50	677
Teräs	11	4,55	1	64	2,21	25
EPS	1	9,96	2	15	10,96	15
Bitumi	6	0,36	1	8	1,36	8
Tiili	25	1,11	2	52	1,28	32
Mineraalivilla	18	3,00	2	72	3,17	57
Kipsi	20	0,33	1	26	1,33	26
Sora	171	0,26	1	215	1,26	215
Puutavara	3	2,60	1	11	1,28	4
Lasi	1,2	2,00	2	4	3,00	4
<b>Yhteensä</b>	<b>1 611</b>			<b>2 268</b>		<b>1063</b>

Lähde:

1) Mäenpää ym. 2000: Bitumi- ja öljyliuskeet, sahatavara, kipsi, sora, teräsrakenteet.

2) Wuppertal Institute 1998: Tiili, eristysaine (EPS), betoni (k.a.), lasi, mineraalivilla.

Kun käytön jälkeen kierrätettävälle materiaalmäärälle annetaan hyvitykset käyttämällä laskuissa kiviaineksille, puulle ja teräkselle KMI-kertoimia, saadaan talovaihtoehdon 1 kokonaismateriaalimääräksi (KMM) 1 063 tonnia (taulukko 10). Vastaavan laskentametodin soveltaminen talovaihtoehdoille 2 ja 3 tuottaa kokonaismateriaalimääräksi 990 ja 1210 tonnia. Laskelmien perusteella talovaihtoehdon 2 rakennusmateriaalivalinnat ovat siis kokonaisuudessaan ympäristön kannalta parhaat.

Taulukosta 10 huomataan, että tässä työssä kehitetty menetelmä kokonaismateriaalimäärän (KMM) laskemiseksi tuottaa varsinkin betonin osalta hyvin erilaisen lopputuloksen kuin Wuppertalin menetelmä (TM). Toisin sanoen erilaiset menetelmät johtavat vertailuissa myös erilaisiin talovaihtoehtojen priorisointiin.

Rakennuksen elinkaaren alkuvaiheiden ts. rakennuksen pystyttämisen jälkeen luonnonvaroja kulutetaan myös sen käytön aikana. Suurimmat materiaalmäärät liittyvät korjausrakentamiseen ja energian käyttöön. Korjausrakentaminen on jätetty kerrostaloesimerkin rajausten ulkopuolelle, mutta energiantuotannon luonnonvaroiksi voidaan luokitella energiamineraalit. Kiinteistö- ja huoneistosähkön kulutusarviot ovat 47 930 kWh / vuosi ja kaukolämpöä 176 440 kWh / vuosi (Vares, 2001). Tyypitalon energiamineraalien käyttö rakennuksen kuluttamaa energiamäärää kohti yhden vuoden aikana on esitetty taulukossa 11. Piilovirtakertoimet ovat Mäenpään ym. (2000) tutkimuksesta. Polttoaineiden määrät yhtä tuotettua kilowattituntia kohti on Suomen keskimääräisestä sähkön- ja lämmön tuotantomallista (Tattari, 2000).

Taulukko 11. Talovaihtoehdon I energian käytön kokonaismateriaalimäärä yhden vuoden aikana.

	Piilovirta- kerroin*	Sähkö (t)	Piilovirrat (t)	Lämpö (t)	Piilovirrat (t)	KMM (t)
Kivihili	2,3	1,9	4,4	7,0	16,0	29,3
Öljy	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1	0,9
Maakaasu	0,3	0,6	0,2	7,2	2,1	10,2
Turve	0,3	1,6	0,5			2,1
Uraani	15 250	0,000003	0,042			0,042
Yhteensä		4,6	5,3	14,3	18,3	42,6

\* Mäenpää ym. 2000.

Taulukon 10 ja 11 tulokset antavat kuvan rakennusmateriaalien valinnan merkityksestä verrattuna energiaratkaisun merkitykseen elinkaaren näkökulmasta katsottuna. Jos rakennuksen käyttöäksi valitaan 100 vuotta, rakennuksen käytön aikaisten polttoaineiden kokonaismateriaalimäärät muodostuvat nelinkertaisiksi rakennusmateriaalien kokonaismateriaalimäärään nähden. Tätä tietoa voidaan hyödyntää, kun mietitään eri vaikutuskokonaisuuksien keskinäistä merkitystä punnittaessa ympäristönäkökulmasta parhaan kerrostalovaihtoehdon valintaa (ks. luku 7.5).

Energian käytön yhteydessä tässä työssä kehitetty menetelmä kokonaismateriaalimäärien laskemiseksi tuottaa käytännössä saman tuloksen kuin Wuppertalin menetelmä, koska polttoaineiden käyttöön ei liity käytännössä energian tuotannon jälkeistä hyötykäyttöä. Taulukon 11 laskelmissa on siis oletettu, että energian tuotannossa syntyvän jätteen hyötykäytön on polttoaineiden ja niihin liittyvien piilovirtojen kokonaismäärään nähden mitätön.

Talovaihtoehdojen 2 ja 3 energian käytön kokonaismateriaalimääräksi yhden vuoden aikana saatiin 47 t ja 43 t. Talovaihtoehdon 2 rakenneratkaisut eivät mahdollistaneet yhtä hyvää energiaratkaisua kuin talojen 1 ja 3 rakenneratkaisut mahdollistivat.

### 7.3 Elinkaariarvioinnin mukaiset ympäristövaikutukset

Kerrostalovaihtoehdojen paremmuutta ympäristönäkökohdista voidaan lähestyä myös elinkaariarvioinnin tietoaineiston pohjalta. Tyypitalon elinkaaritarkastelun perusrajakset sisältävät toiminnot, jotka liittyvät luonnonvarojen ottoon, materiaalien ja polttoaineiden valmistukseen ja rakennuksen käyttövaiheen energiankulutukseen.

Tyypitalon inventaarioon sisältyy:

- materiaalien luonnonvarojen otto
- runkomateriaalien valmistus

- lämpö- ja sähköenergian käyttö
- runkomateriaalien kierrätys ja uudelleenkäyttö

ei sisälly:

- varsinainen rakennusvaihe
- rakennuksen sisärakenteiden valmistus
- käytön aikainen korjausrakentaminen eikä
- rakennuksen purkaminen.

Elinkaarimenetelmässä referenssiyksikkö, jota kohti tuotejärjestelmän energia- ja materiaalivirrat lasketaan, on ns. toiminnallinen yksikkö. Tämän elinkaari-tarkastelun **toiminnallinen yksikkö** on kerrostalo.

### 7.3.1 Materiaalien valmistuksen ja energian kulutuksen päästöt

Rakennuksen elinkaaritarkastelun ympäristövaikutusarvioinnissa tulisi ottaa huomioon kaikissa eri elinkaarivaiheissa syntyvät päästöt. Kerrostalon valintaesimerkissä tarkastellaan kuitenkin vain materiaalien valmistuksen ja energian käytön päästöjä. **Materiaalien valmistuksen ympäristökuormitus** on laskettu tärkeimmille runkorakenteille, joita ovat betoni, teräs, sahatavara, polystyreeni, kipsi, bitumi-huopa, mineraalivilla, ikkunoiden tasolasi, hiekka ja sora. Edellä mainittujen rakennusmateriaalien inventaariotiedot ovat VTT Rakennustekniikan LCA-House tietokannasta. Tulokset on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Kerrostalovaihtoehdon I rakenteitten valmistusten yhteenlasketut mukaan otetut päästöt ilmaan.

Päästöt ilmaan	kg
CO <sub>2</sub>	183 000
CH <sub>4</sub>	500
SO <sub>2</sub>	164
NO <sub>x</sub>	590
NM VOC	80
CO	660

Kerrostalovaihtoehdon 1 rakennusmateriaalien valmistuksen kokonaispäästötu-  
lokset eroavat Vareksen (2001) raportin LVIS-2001 tyyppitalon tuloksista jonkin  
verran. Syynä tähän on se, että Vareksen tutkimuksen laskelmat ovat yksityiskoh-  
taisempia ja sisältävät tärkeimpien rakennusmateriaalien lisäksi myös muita ra-  
kennuksessa käytettyjä materiaaleja. Tulosten suuruusluokat ovat kuitenkin  
samat. Tästä esimerkkinä voidaan mainita, että LVIS-2001 tyyppitalon tuloksissa  
rakennuksen vuoden energian käytön osuus CO<sub>2</sub> ekvivalenteina laskettuna on  
noin 20 % materiaalien valmistuksesta. Tässä esitetyn laskelman mukaan vastaa-  
van energian osuus on 22 % materiaalien valmistuksesta.

Kerrostalojen **energiankulutuksen ympäristökuormat** ja -vaikutukset on ar-  
vioitu yhden vuoden ajalta. Suomen ilmastollisista oloista johtuen rakennuksen  
lämmittämiseen tarvittavan energiantuotannon päästöt tyyppitaloa kohti ovat  
suuremmat kuin rakennuksessa tarvittavan kiinteistö- ja huoneistosähkön. Kiin-  
teistösähkön kulutukseen on otettu mukaan pihavalaistus, pesula, autopaikat,  
pumput ja IV-koneet. Huoneistosähkoon kuuluvat huoneistokohtainen valaistus,  
pyykinpesu, astianpesu, viihde, liesi, jääkaappi ja pakastin.

Kerrostalo 1:n sähkön- ja lämmöntuotannon ja käytön vuosittainen ympäris-  
tökuormitus on esitetty taulukossa 13. Sähkönkulutuksen päästöt ilmaan on las-  
kettu Suomen keskimääräisen sähköntuotannon päästökertoimilla. Taulukossa säh-  
kön ja lämmön ominaispäästökertoimet (Tattari, 2000) yhtä kilowattituntia kohti  
on kerrottu tyyppitalon vuosittaisella energiankäytöllä (Vares, 2001). Lämmöntuo-

tannon ympäristökuormitus on laskettu Vantaan kaukolämpökeskuksen päästökertoimilla. Päästökertoimissa ovat mukana polttoaineiden valmistuksen päästöt sekä verkkohäviö.

Taulukko 13. Kerrostalovaihtoehdon I sähkön- ja lämmöntuotannon ja käytön vuosittainen ympäristökuormitus. Sähkönkulutus 47 930 kWh/a ja kaukolämmön kulutus 176 440 kWh/a.

Päästö ilmaan	Ominaispäästökertoimet / l kWh		Kerrostalon vuosittaisen energiankulutuksen päästöt ilmaan		
	Sähkö	Lämpö	Sähkö	Lämpö	
CO <sub>2</sub>	g	231	220	10544600	38816800
CO	g	0,500	0,203	9730	35817
NO <sub>x</sub>	g	0,530	0,406	19460	71635
SO <sub>2</sub>	g	0,440	0,177	8484	31230
HC	g	0,035	0,011	527	1941
CH <sub>4</sub>	g	0,669	1,168	55982	206082
hiukkaset	g	0,701	0,461	22096	81339
metallit *	mg	0,112	0,053	2540	9351

\*metallit: As, Hg, Cd, Cr, Pb

Lähde: Tattari, K. 2000. Sähkön ja kaukolämmön ympäristöprofiilit vuonna 1998 hyödynjakomenetelmällä.

Kaikille kerrostalovaihtoehdoille käytetään samoja energiatuotantoratkaisuja. Sen sijaan sähkön- ja lämmönkulutusmäärät vaihtelevat eri vaihtoehtojen kesken. Talovaihtoehdossa 2 sähkönkulutus on 40 910 kWh/a ja kaukolämmön kulutus 156 470 kWh/a. Talovaihtoehdolle 3 ne ovat 50 810 kWh/a ja 196 120 kWh/a.

### 7.3.2. Vaikutusarviointi

Elinkaaritarkastelun vaikutusarviointi tehdään DAIA-vaikutusarviointimallilla (ks. luku 5.3). Vaikutusarvioinnissa ympäristövaikutusten kokonaisuutta kuvataan yhteenlasketuilla vaikutusluokkien vaikutuspisteillä. Vaikutuspisteet lasketaan yhtälöillä 10 ja 11.

Kerrostalovaihtoehdon 1 vaikutusarvioinnin tulokset on esitetty taulukoissa 14 ja 15. Vaikutuskerrointaulukko, jossa paino- ja karakterisointikerroin ja normalisointitekijä on yhdistetty yhdeksi kertoimeksi, on esitetty luvussa 5.4. Laskenta taulukon avulla tapahtuu siten, että päästö (kiloina) kerrotaan vaikutusluokan ko. kertoimella, jolloin tuloksena on päästön aiheuttamat vaikutuspisteet ko. vaikutusluokassa. Kokonaisympäristövaikutus saadaan laskemalla kaikki vaikutuspisteet yhteen.

Taulukko 14. Kerrostalovaihtoehdon I materiaalien valmistuksen mukaan otettujen päästöjen vaikutuspisteet vaikutusluokittain (DAIA-malli).

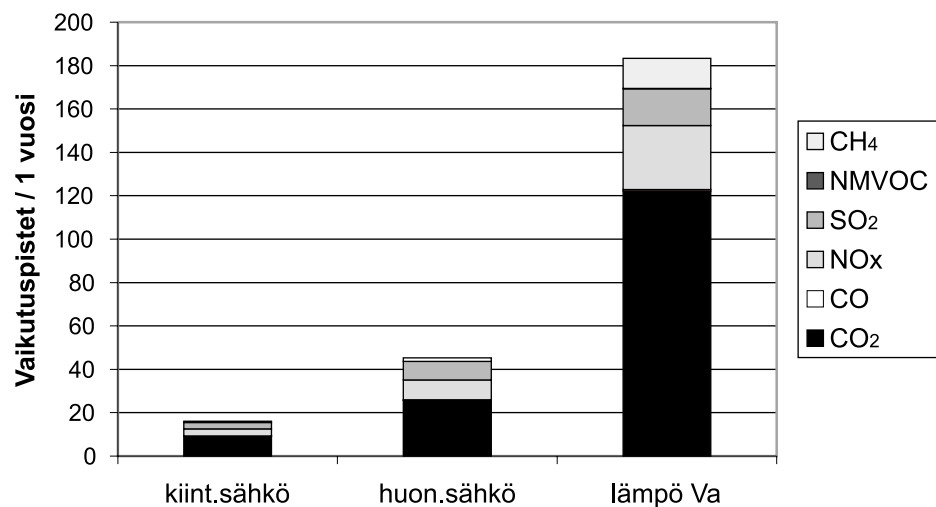
Vaikutusluokka	Vaikutuspisteet / Kerrostalo	
	Materiaalien valmistus	
Ilmastonmuutos	CO <sub>2</sub>	575,940
	CH <sub>4</sub>	33,046
Happamoituminen	SO <sub>2</sub>	89,299
	NO <sub>x</sub>	125,312
Otsonin muodostuminen	NM VOC	4,600
	NO <sub>x</sub>	118,676
	CO	11,683
	CH <sub>4</sub>	0,415
Rehevöityminen	NO <sub>x</sub>	43,483
Yhteensä		1002,454

Talovaihtoehdoille 2 ja 3 lasketut vastaavat rakennusmateriaalien valmistuksen kokonaisvaikutuspisteet ovat 960 ja 1100. Tulokset osoittavat samaa priorisointijärjestystä rakennusvaihtoehtojen välillä kuin kokonaismateriaalimäärälaskelmat (ks. luku 7.2). Toisaalta rakennusmateriaalien vaikutuspisteiden laskennasta puuttuvat materiaalien hyötykäyttöön liittyvät hyvitykset. Materiaalien aiheuttamien päästöhaittojen ympäristövaikutusten arvioinnissa tulisi ottaa niiden hyötykäytöstä aiheutuvat hyvitykset vastaavasti huomioon kuin kokonaismateriaalimäärälaskelmissa. Tämän työn puitteissa ei ole ollut kuitenkaan mahdollista tehdä erillisiä elinkaariarvioita materiaalien hyötykäyttötoiminnoille.

Taulukko 15. Kerrostalovaihtoehdon 1 vuosittaisen energian käytön vaikutusluokkien pisteet (DAIA-malli).

Vaikutusluokka		Vaikutuspisteet / l v		
		Sähkö	Lämpö	Yhteensä
Ilmastonmuutos	CO <sub>2</sub>	34,845	122,165	157,010
	CH <sub>4</sub>	2,119	13,620	15,739
Happamoituminen	SO <sub>x</sub>	11,461	16,972	28,433
	NO <sub>x</sub>	5,395	15,215	20,610
Otsonin muodostuminen	NMVOC	0,097	0,112	0,209
	NO <sub>x</sub>	5,110	14,409	19,519
	CO	0,424	0,634	1,059
	CH <sub>4</sub>	0,027	0,171	0,198
Rehevöityminen	NO <sub>x</sub>	1,872	5,280	7,152
Yhteensä		61,351	188,577	249,928

Kerrostalovaihtoehdossa 1 kulutetun lämpömäärän tuotannosta aiheutuvat ympäristövaikutukset ovat noin 2,5 kertaa suuremmat kuin sähköntuotannon vaikutukset (taulukko 15, kuva 4). Energiantuotannon vaikutus ilmastonmuutokseen näkyy selvästi myös vaikutusarvioinnin tuloksissa ja merkittävimpänä kuormitustekijänä on luonnollisesti hiilidioksidi, CO<sub>2</sub> ja sen jälkeen rikkidioksidi, SO<sub>2</sub> ja typenoksidit, NO<sub>x</sub>.



Kuva 4. Kerrostalovaihtoehdon 1 energian käytön aiheuttamat kokonaisvaikutukset / 1 vuosi päästömuuttujineen. Sähköenergian käyttö on jaettu kiinteistösähköön ja huoneistosähköön.

Kaikissa kerrostalovaihtoehdoissa on samat energiantuotantolähteet. Käytämällä taustalla olevien energiatuotantomuotojen ominaisvaikutuskertoimia (sähkölle 1,280 vaik. piste/kWh ja lämmölle 1,069 vaik. piste/kWh) saadaan talovaihtoehdon 2 energian käytön kokonaisvaikutuspisteiksi yhden vuoden aikana 219, 989 pistettä ja talovaihtoehdolle 2 puolestaan 274,648 vaikutuspistettä.

## 7.4 Maan käytön ympäristövaikutusten arviointi

Periaatteessa elinkaariarviointeihin pitäisi liittää rakennuksen eri elinkaarivaiheisiin liittyvät maan käyttöä muuttavat tekijät. Olemassa olevat rakennusmateriaalien elinkaariarviointit eivät näitä tietoja kuitenkaan sisällä. Syynä on yksinkertaisesti se, ettei tämän alueen tietoja ole osattu kerätä tai arvioida.

Tässä työssä on lähdetty siitä oletuksesta, että materiaalin valmistukseen liittyvät maan käyttövaikutukset sisältyvät yhtenä vaikutusalueena materiaalien kokonaismateriaalimääräarvioihin. Sen sijaan itse rakennuksen maan käyttövaikutukset otetaan huomioon erikseen läpikäytävällä, päätösanalyttisellä vaikutusarviointimenettelyllä. Toimimalla luvussa 6 esitetyn menettelytavan mukaisesti tarkasteltaville kerrostalovaihtoehdoille saadaan taulukon 16 vaikutuspisteet kullekin osavaikutusluokalle.

Taulukko 16. Maan käytön vaikutusten pisteet eri kerrostalovaihtoehdoille (V1 = kerrostalovaihtoehto 1, V2 = kerrostalovaihtoehto 2 ja V3 = kerrostalovaihtoehto 3).

Vaikutukset	Vaikutuspisteet		
	V1	V2	V3
maaperän fysikaalis-kemialliseen laatuun	0	60	100
monimuotoisuuteen	0	100	100
esteettisiin arvoihin sekä virkistys- ja kulttuuriarvoihin	100	20	0

Kullekin vaikutusluokalle määritellään myös viiden asiantuntijan antamat keskiarvopainot. Ennen painojen antamista asiantuntijat tutustuvat käytettävissä olevaan ympäristövaikutusmateriaaliin ja keskustelevat eri vaihtoehtoihin liittyvistä ympäristönäkökohdista. Tässä esimerkkitapauksessa parhaimman ja huonoimman vaihtoehdon välillä ei ole juurikaan eroja maaperän fysikaalis-kemiallisen laadun ja monimuotoisuuden osalta. Sen sijaan esteettisten sekä virkistys- ja kulttuuristen näkökohtien valossa parhaimman ja huonoimman vaihtoehdon välillä on olemassa suuretkin erot. Kukin asiantuntija antaa kullekin vaikutusluokalle painot ns. suoraa painotusta käyttäen. Huonoin saa arvon 100 ja muiden painot suhteutetaan siihen. Eri asiantuntijoiden antamista painoista lasketaan vaikutusluokkien keskiarvopainot, jotka ovat:

- vaikutukset maaperän fysikaalis-kemialliseen laatuun 10
- vaikutukset monimuotoisuuteen 10
- vaikutukset esteettisiin arvoihin sekä virkistys- ja kulttuuriarvoihin 100

Lopuksi lasketaan yhtälöllä 12 kullekin rakennusvaihtoehdolle maan käytön ympäristövaikutusten kokonaisarvot. Kerrostalovaihtoehdolle 1 saadaan 10 000 vaikutuspistettä. Vaihtoehdolle 2 ja 3 saadaan 3 600 ja 2 000 pistettä. Eli vaihtoehto 1 on selvästi heikoin maan käytön ympäristövaikutusten suhteen.



## 7.5 Kerrostalovaihtoehtojen ympäristövaikutusten kokonaisarvio

Kerrostalovaihtoehtojen valintaa ympäristövaikutuksien perusteella lähestytään edellä esitettyjen tulosten avulla. Valintakriteereinä ovat rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset, rakennuksen käytön aiheuttamat ympäristövaikutukset ja rakennuksen maan käyttöön liittyvät ympäristövaikutukset. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutuksia mitataan kokonaisuutena kuvaavien tulosten avulla. Rakennuksen käytön aikaiset ympäristövaikutukset liittyvät käytetyn energian vaikutuksiin, minkä takia tämän valintakriteerin lähtökohtana ovat energian tuotannon elinkaarenaikaisten päästöjen vaikutuspisteet DAIA-mallilla laskettuna. Rakennuksen maan käytön ympäristövaikutuksia arvioidaan asiantuntijoiden eri vaihtoehdoille antamien arvottomien tulosten perusteella.

Taulukossa 17 on esitetty kohdista 7.2-7.4 kerätyt päätökriteerien tulokset kullekin kerrostalovaihtoehdolle. Tuloksista on vaikea sanoa, mikä on kaikkien ympäristövaikutuskriteerien valossa paras. Kerrostalovaihtoehto 3 on vaihtoehtoon 2 nähden parempi rakennuksen maan käytön vaikutusten osalta, mutta huonompi kahden muun ympäristövaikutuskriteerin osalta.

Onko edellä esitettyjen tietojen valossa vaihtoehto 2 parempi vaihtoehtoon 3 verrattuna tai päinvastoin? Vastaus riippuu siitä kuinka painotamme eri ympäristövaikutuskriteereitä toisiinsa nähden. Päätösanalyysi tarjoaa tällaisiin tilanteisiin tekniikoita, jotka helpottavat ongelmaan ratkaisua. Seuraavassa esitetään yksinkertainen päätösanalyttinen ratkaisumalli.

Eri ympäristövaikutuskriteereille lasketut vaihtoehtojen tunnusluvut ovat eri yksiköissä, eivätkä ole siis keskenään vertailukelpoisia. Moniattribuuttisen arvoteorian mukaan kunkin kriteerin mitatut arvot tulee normeerata siten, että huonoin vaihtoehto saa kussakin kriteerissä arvon 100 ja parhain arvon 0. Taulukossa 18 on esitetty kerrostalovaihtoehtojen muunnetut arvot kunkin ympäristökriteerin suhteen.

Taulukko 17. Kokoomataulukko eri kerrostalovaihtoehtojen ympäristövaikutusnäkökohdista (V1 = kerrostalovaihtoehto 1, V2 = kerrostalovaihtoehto 2 ja V3 = kerrostalovaihtoehto 3).

Ympäristövaikutuskriteeri	Tulokset		
	V1	V2	V3
Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset (kokonaisuutena mitattuna tonneina)	1063	990	1210
Rakennuksen käytön ympäristövaikutukset (energian käytön päästöjen kokonaisvaikutuspisteet / a)	250	220	275
Rakennuksen maan käyttöön liittyvät ympäristövaikutukset (arvottomien vaikutuspisteet)	10000	3600	2000

Taulukko 18. Kerrostalovaihtoehtojen ympäristökriteerien arvot kussakin kerrostalovaihtoehdossa, kun tulokset on muunnettu moniattribuuttisen arvoteorian mukaisesti asteikolle 0-100.

Ympäristövaikutuskriteeri	Tulokset		
	V1	V2	V3
Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset	33	0	100
Rakennuksen käytön ympäristövaikutukset	55	0	100
Rakennuksen maan käyttöön liittyvät ympäristövaikutukset	100	35	0

Ympäristökriteerien arvojen skaalamuunnoksen jälkeen tehtävänä on määrittää kriteerien painot. Moniattribuuttisen arvoteorian mukaisesti painojen summan tulee olla 1 (tai esim. 100). Kohdassa 7.2 saatiin kerrostalovaihtoehdon 1 rakennusmateriaalien kokonaismateriaalimääräksi 1063 tonnia ja rakennuksen energian käytön kokonaismateriaalimääräksi 43 tonnia vuodessa. Ottamalla rakennuksen käyttöikäksi 100 vuotta, saadaan energian käytön materiaalmäärä noin neljä kertaa suuremmaksi kuin mitä rakennusmateriaalien materiaalmäärä on. Tätä suhdetta voidaan käyttää karkeana mittana ko. ympäristökriteerien painojen suhteena eli rakennuksen käytön ympäristövaikutusten muutos "tyyppitalon" tasosta katsotaan olevan neljä kertaa tärkeämpää kuin parantaa samalla muutosprosentilla rakennusmateriaalien ympäristövaikutuksia "tyyppitalon" tasosta.

Jos rakennusmateriaalin ympäristövaikutuskriteerille valitaan painoarvo 0,15, niin rakennuksen käytön ympäristövaikutuskriteerille tulee olla edellä esitetyn suhdeluvun perusteella 0,6. Koska kaikkien ympäristökriteerien painojen summan täytyy olla 1, niin rakennuksen maan käytön vaikutusten painoksi jää 0,25. Jos päätöksentekijä hyväksyy tällaisen painojakauman hän voi laskea kullekin vaihtoehdolle a kokonaisympäristövaikutuksia kuvaavan vaikutuspisteen seuraavalla yhtälöllä:

$$V(a) = \sum_{i=1}^3 k_i * x_i(a) \quad (14)$$

missä

$k_i$  = ympäristövaikutuskriteerin  $i$  paino

$x_i(a)$  = vaihtoehdon  $a$  ympäristövaikutuskriteerin  $i$  arvo skaalassa 0 - 100

Edellä esitettyjen lukuarvojen perusteella kerrostalovaihtoehdon 1 vaikutuspisteeksi saadaan 64, 2. kerrostalovaihtoehdon 9 ja 3. vaihtoehdon 75. Eli paras vaihtoehto on 2.

Tosiasia on, että rakennuksen maan käytön ympäristövaikutuksia on erittäin vaikea painottaa ko. kahteen muuhun ympäristövaikutuskriteeriin nähden, koska vaikutukset ovat hankalasti mielletävissä ja ne ovat toisiinsa nähden vaikeasti verrattavissa. Tämän takia ennen lopullisia johtopäätösten tekemistä on tarpeellista tehdä herkkyystarkasteluja ympäristövaikutuskriteerien painojen osalta. Valitaan kriteerien painojen lähtökohdaksi, että rakennuksen maan käytön ympäristövaikutuksen paino on puolet painojen summasta eli 0,5. Tällöin rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten painoksi tulee 0,1 ja rakennuksen energian käytön ympäristövaikutusten painoksi 0,4. Tällä painojakaumalla saadaan seuraavat vaikutuspisteet: vaihtoehto 1 : 76 pistettä, vaihtoehto 2 : 18 pistettä ja vaihtoehto 3 : 50 pistettä. Vaihtoehtojen järjestys muuttui, mutta vaihtoehto 2 säilyi edelleen parhaana vaihtoehtona.

## 7.6 Tulokset vertailuarvoina

Kun rakennuksille lasketaan edellä esitettyjä vaikutuspisteitä, ainoastaan vertailtavien kohteiden vaikutuspisteiden erolla on merkitystä. Yksi tapa parantaa vaikutuspisteiden tulkintaa on laskea ns. tyypillisille rakennuksille edellä esitettyjä ympäristövaikutuksia kuvaavia tunnuslukuja, jolloin ne muodostavat tietynlaisen kiinnepohjan suuruusluokille ja parantavat kulloinkin laskettavien tulosten ymmärrettävyyttä.

Samantyyppisten rakennusten vertailuarvoina käytettynä tulokset tulee laskea pinta-alaa tai kuutiota kohden. Tässä on valittu yksiköksi rakennuksen pinta-ala. Tyyppitalon tulokset edustavat keskivertoasuinkerrostalon arvoja luonnonvarojen käytöstä, materiaalien valmistuksesta ja energian kulutuksesta (taulukko 19).

Huomautettakoon vielä, että rakennusten vertaileminen on mahdollista vain, jos laskelmat on tehty samoin perustein ja niiden toiminnallinen funktio on samanlainen.

Taulukko 19. LVIS-2001 tyyppitalon ympäristövaikutuksia kuvaavia tunnuslukuja rakennuksen pinta-alayksikköä ja yhden vuoden energian käyttöä kohti laskettuna.

Kokonaismateriaalimäärä (t / m <sup>2</sup> )	
rakennusmateriaalit	0,80
energiamineraalit	0,032
Rakennusmateriaalien valmistus (vaik.pist. / m <sup>2</sup> ) <sup>(1)</sup>	
Energian käyttö vuodessa (vaik.pist. / m <sup>2</sup> )	
sähkö <sup>(2)</sup>	0,046
kaukolämpö <sup>(3)</sup>	0,14

<sup>(1)</sup> Tulos ei sisällä rakennusmateriaalin hyötykäytön hyvitystä

<sup>(2)</sup> Suomen keskimääräinen sähköntuotantoprofiili

<sup>(3)</sup> Vantaan Energia Oy

## Yhteenveto ja johtopäätökset

Työn tarkoituksena on ollut määrittää keskeiset rakennukseen liittyvät ympäristönäkökohdat, joilla on merkitystä rakennuksen aiheuttaman ympäristöpaineen ja ekotehokkuuden arvioinnissa. Lisäksi tavoitteena oli kehittää rakennusalalle ympäristövaikutusten arviointimenettely, joka soveltuu eri rakennusvaihtoehtojen vertailuun. Rakennusten ympäristönäkökohdat painottuvat tämän työn perusteella kolmeen kokonaisuuteen: rakennusmateriaalien valintaan, rakennuksen energian käyttöön ja rakennuspaikan maan käyttöön.

### **Kokonaismateriaalimäärät**

Rakennukseen tai yksittäisiin rakenteisiin käytettävät materiaalmäärät antavat jo sellaisenaan suuntaa rakennuksen ympäristövaikutuksista. Ympäristömyötävyyteen tähtäävässä rakennusteknisessä suunnittelussa yhtenä indikaattorina voidaan käyttää rakentamisessa käytettävien kokonaismateriaalien määrää, jolloin lähtökohtana on materiaalien käytön optimointi tai minimointi siten, että lopputuote täyttää sille asetetut erilaiset vaatimukset. Materiaalien määrää arvioitaessa on oleellista, että eri materiaaleista aiheutuvat erilaiset ns. piilovirrat ja niiden erilaiset kierrätysmahdollisuudet otetaan huomioon.

Tämän työn yhteydessä kehitetty rakennusmateriaalien kokonaismateriaalimäärän laskentamenettely ottaa huomioon ns. piilovirtojen lisäksi rakennusmateriaalien kierrätystä seuraavat hyvitykset. Laskentakaava, vaikka se on kehitetty koskemaan rakennusmateriaaleja, on yleistettävissä ja soveltuu kaikille kierrätettäville materiaaleille. Rakennuksen kokonaismateriaalimäärää on havainnollistettu Wuppertal Institutin esittämien piilovirtakertoimien avulla. Tulevaisuudessa laskentaa tulee kehittää siten, että se perustuu Suomessa valmistettavien rakennusmateriaalien omiin piilovirtakertoimiin. Laskentasääntöjen, eli mitkä tekijät laskennassa otetaan huomioon, tulee olla yhteneväiset materiaalien elinkaarilaskennan kanssa.

### **Energian käyttö**

Rakennuksen käytön aikaiset ympäristövaikutukset muodostuvat suurimmaksi osaksi käytetyn energian tuotannosta aiheutuvien vaikutusten perusteella, minkä vuoksi ne soveltuvat hyvin indikaattoriksi arvioitaessa eri rakennusvaihtoehtojen edullisuutta ympäristön kannalta. Erilaisten rakennusten tai rakennusvaihtoehtojen keskinäinen vertailu energian käytön ympäristövaikutusten suhteen onnistuu käytännössä rakennusten energiakäyttötietojen (kWh/a) perusteella ilman varsinaisia vaikutuslaskelmia. Mikäli tarkasteluissa on tarvetta arvioida erilaisten energiatuotantomuotojen ympäristövaikutuksia, elinkaariarvioinnin yhteydessä kehitetyt vaikutusarviointimallit antavat tällaisille tarkasteluille menetelmällisen pohjan.

## **Maan käyttö**

Maan käyttöön liittyvät näkökohdat ratkaistaan pääosin maan käytön suunnittelun yhteydessä. Tällöin korostuvat muun muassa luonnon- ja kulttuuriarvoihin, virkistysalueiden riittävyys, palvelujen saatavuuteen ja ympäristöterveyteen liittyvät vaikutukset, joiden merkityksestä voi vallita hyvinkin erilaisia käsityksiä. Tällaisille, usein laadullisille ja subjektiivisten arvostusten varaisille vaikutuksille on vaikea löytää systemaattisia kvantitatiivisia indikaattoreita, minkä vuoksi lähestymistapana käytetäänkin useimmiten kansalaisten osallistumiseen ja poliittiseen päätöksentekoon perustuvia suunnittelu- ja päätöksentekomenettelyjä. Maan käyttöön liittyvät vaikutukset voivat nousta myös rakennusallalla keskeiseksi kysymykseksi muun muassa suunniteltaessa olemassa olevan rakennuskannan eri käyttövaihtoehtoja tai harkittaessa uudisrakentamisen ja korjausrakentamisen edullisuutta ympäristön kannalta.

Rakennuksen maan käytön ympäristövaikutuksien arviointiin ei ole olemassa tieteellisesti perusteltavia kvantitatiivisia arviointimenetelmiä. Tässä työssä on lähdetty siitä, että rakennuksen maan käyttöön liittyvien vaikutusten arviointiin voidaan käyttää yksinkertaista, olemassa olevaan tietämykseen ja asiantuntijoiden käsityksiin perustuvaa erittelevää lähestymistapaa, jossa voidaan hyödyntää päätösanalyysin piirissä kehitettyjä menetelmiä. Arviointitapaa voidaan käyttää vain kun verrataan kahta tai useampaa rakennusvaihtoehtoa toisiinsa. Arvioinnin taustalla on aina oltava tapauskohtaiset tiedot.

## **Elinkaariarviointi**

Elinkaariarviointi päästötietoineen tarjoaa vaihtoehtoisen tavan rakennusmateriaalien ympäristövaikutusten arviointiin. Elinkaariarvioinnit tarjoavat kokonaismateriaalimääriin perustuvaa laskentamenettelyä systemaattisemman ja tarkemman lähestymistavan erityisesti rakennuksesta aiheutuvien päästöjen arviointiin. Rakennusmateriaalien elinkaariarvioinnit painottuvat kuitenkin nykyisin vain päästötietoihin. Elinkaariarviointien yhteydessä kehitettyä vaikutusarviointimenetelmää käytettäessä tuleekin muistaa, että vain osa rakennusmateriaalien ympäristöä muuttavista ja kuormittavista tekijöistä vaikutuksineen pystytään arvioimaan. Lisäksi elinkaariarvioinnin soveltajan tulee varmistua, että ympäristövaikutusten taustalla olevien rakennusmateriaalien elinkaari-inventaariotiedoissa on otettu huomioon materiaalien kierrätyksestä johtuvat hyvitykset.

Elinkaariarvioinnin avulla voidaan myös arvioida luonnonvarojen riittävyttä. Hyödynnettävien varantojen määrittäminen on kuitenkin yleisesti ottaen vaikeaa, koska käytännössä luonnonvarojen hyödyntämistä ohjaavat teknologian kehitys ja taloudelliset tekijät. Eräs varantojen laskentatapa perustuu ns. resurssiindeksiin, jossa uusiutumattomien luonnonvarojen keskinäinen tärkeys määräytyy kunkin luonnonvaran hyödynnettävissä olevasta kokonaisvarannosta ja kulutusmäärästä maailmalla. Muitakin vaihtoehtoisia menetelmiä on kehitetty. Tämän työn yhteydessä luonnonvarojen varantoja ei ole kuitenkaan käsitelty.

Elinkaariarvioinneissa sovellettavia vaikutusarviointimenettelyjä on tarjolla useita. Tässä työssä vaikutusarviointien laskemisessa on käytetty Suomen olosuhteet karkeasti huomioon ottavaa vaikutusarviointimallia (ns. DAIA-mallia). Malli perustuu yleisesti elinkaariarvioinneissa käytettyihin laskentasääntöihin. Kansainvälinen kehitystoiminta on kuitenkin vilkasta ja on oletettavaa, että lähitulevaisuudessa vaikutusarvioinnissa käytettävälle kertoimille on nykyistä selvästi paremmat tieteelliset perusteet. Vaikutusarviointimenetelmien käyttäjien tulisi varautua päivittämään käyttämiensä mallien kertoimet ja vaikutusluokat siten, että malli vastaa kunkin hetken parasta käytäntöä.

Mallien herkkyyksanalyysien tekeminen on välttämätöntä ennen lopullisten johtopäätösten tekemistä. Lisäksi on suositeltavaa tehdä laskennat myös vaihtoehtoisilla malleilla. Suomessa tapahtuvan rakentamisen ympäristövaikutusten arvioinnissa tulisi kuitenkin pitäytyä malleissa, jossa otetaan huomioon Suomen ja sen lähialueen ympäristöolosuhteet.

Tässä työssä käytetyn DAIA-vaikutusarviointimallin avulla voidaan arvioida paitsi rakennuksesta aiheutuvan kuormituksen merkitystä eri vaikutusluokkien kannalta myös ympäristövaikutusta kokonaisuutena. Kokonaisvaikutusta arvioidaessa joudutaan ottamaan kantaa muun muassa eri vaikutusluokkien, esimerkiksi ilmastomuutoksen, happamoitumisen tai alailmakehän otsonimuodostuksen keskinäiseen merkitykseen. Vaikutusluokkien painottaminen perustuu käytännössä asiantuntijoiden nykyisiin käsityksiin niiden keskinäisestä merkityksestä. Tällaiset subjektiiviset arviot ovat luonnollisesti varsin alttiita kritiikille ja voivat muuttua tietämyksen lisääntyessä tai esimerkiksi alueellisten ja globaalien vaikutusten painotuksen muuttuessa.

Rakennuksen kokonaisvaikutusta kuvaavaa indikaattoria, ts. rakennuksen vaikutuspisteitä, voidaan käyttää samaan tapaan kuin materiaalivirta- tai energia-tarkastelujakin. Menettelyn etuna yksinkertaistetumpiin tarkasteluihin nähden on se, että vaikutusarvioinnissa selvitetään yksilöidysti rakennuksen aiheuttama kuormitus ja sen yhteys erilaisiin ympäristövaikutuksiin, jolloin muun muassa kehittämistoimet voidaan suunnata ympäristön kannalta keskeisiin kysymyksiin.

Kattavan elinkaariarvioinnin tekeminen vaatii paljon työtä ja asiantuntemusta, minkä vuoksi sen käyttö yksittäisten rakennusten ympäristövaikutusten arviointiin tulee kysymykseen vain poikkeustapauksissa. Sen käyttöalana voitaisiinkin nähdä ennen kaikkea parannuskohteiden kartoittaminen rakennusalalla ja rakennustuoteteollisuudessa. Tulosten käyttöön esimerkiksi rakennusten tai rakentamisen ympäristömyötäisyyden vertailussa tulee ainakin toistaiseksi suhtautua varauksellisesti muun muassa alueellisissa olosuhteissa olevista eroista, laskelmiin liittyvistä arvostus- ja epävarmuustekijöistä sekä yhtenäisten arviointikriteerien puutumisesta johtuen.

## **Rakennuksen kokonaisympäristövaikutuksen arviointi**

Tässä työssä esitettyjen laskentamenetelmien avulla erilaisten rakennusvaihtoehtojen ympäristövaikutukset voidaan arvioida kolmesta näkökulmasta, jotka ovat rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset, rakennuksen energian käytön päästöjen vaikutukset ja rakennuspaikan maan käytön ympäristövaikutukset. Eri vaihtoehtojen numeerisia vaikutusarvoja voidaan verrata keskenään ainoastaan saman vaikutusryhmän sisällä. Yhteen niitä ei voi laskea, koska lukujen kuvaamat vaikutukset ovat yhteismitattomia. Vaikutuspisteiden laskeminen eri vaikutusluokille saattaa antaa riittävät perusteet rakennusvaihtoehtojen vertailulle ympäristönäkökohtien perusteella. Usein kuitenkin törmätään tilanteeseen, jossa eri vaikutusluokat tulisi pysyttyä yhteismitallistamaan toisiinsa nähden, jotta eri vaihtoehtojen paremmuus selviäisi. Käytännössä rakennuksen kokonaisvaikutusten arviointi edellyttää vaikutusluokkien välistä arvottamista, mikä voidaan tehdä päätösanalyysin piirissä kehitettyjen menetelyjen avulla.

Työssä on esimerkin avulla hahmotettu kerrostalovaihtoehtojen valintaan liittyvä päätöksentekotilannetta, jossa tavoitteena on löytää ympäristön kannalta paras kerrostaloratkaisu. Kullekin kerrostalovaihtoehdolle on arvioitu esitettyjä menetelmiä hyväksikäyttäen numeeriset vaikutusarvot kullekin ympäristövaikutuskokonaisuudelle. Erilaiset vaikutukset yhdistetään päätösanalyttisen lähestymistavan kautta kunkin kerrostalovaihtoehdon kokonaisvaikutuspisteiksi, jotka antavat perustan vaihtoehtojen paremmuusjärjestyksen asettamiseen. Esitettyä menetelytapaa voidaan soveltaa minkä tahansa rakennustyypin parhaan vaihtoehdon valintaan.

# Kirjallisuus

- Guinée, J. B. & Heijungs, R. 1995. A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 14, no. 5, pp.917-925.
- Goedkoop, M. & Spriensma, R. 2000. The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report. PRè Consultants B.V. Amersfoort.
- Häkkinen, T., Huovila, P., Tattari, K., Vares, S., Seppälä, J., Koskela, S., Leivonen, J., Pylkkö, T. 2002. Rakennus- ja kiinteistöalan ekotehokkuus. Helsinki, Ympäristöministeriö. Suomen ympäristö 580. 162 s.
- ISO 14 040. 1997. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki.
- ISO 14 041. 1998. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely sekä inventaarioanalyysi. Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki.
- ISO 14 042. 2000. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaikutusarviointi. Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki.
- Liikanen, J. 1999. Yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon päästöjen jakaminen. Tutkimuksia ja raportteja 19/1999. Kauppa- ja teollisuusministeriö. 76 s.
- Metallien jalostajat ry. 2002. Henkilökohtainen tiedonanto.
- Mäenpää, I., Juutinen, A., Puustinen, K., Rintala, J., Risku-Norja, H., Veijalainen, S., Viitanen, M., 2000. Ekotehokas Suomi-projekti. Luonnonvarojen käyttö Suomessa, luonnos 4.2.2000, <http://thule.oulu.fi/ecoef>.
- Mäenpää, I., Juutinen, A., Puustinen, K., Rintala, J., Risku-Norja, H., Veijalainen, S., Viitanen, M., 2000. Ekotehokas Suomi-projekti. TMRFIN, Suomen luonnonvarojen käytön tilastointijärjestelmä, <http://thule.oulu.fi/ecoef>.
- OECD. 1998. Eco-efficiency. Paris, The Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Potting, J., Klöpffer, W., Seppälä, J., Norris, G. & Goedkoop, M. 2001. Best available practice in life cycle impact assessment of climate change, stratospheric ozone depletion, photo-oxidant formation, acidification, and eutrophication. In: Udo de Haes, H.A., Jolliet, O., Finnveden, G., Goedkoop, M., Hauschild, M., Hertwich, Hofstetter, P., Klöpffer, W., Krewitt, W., Lindeijer, E. W., Mueller-Wenk, R., Olson, S.I., Pennington, D.W., Potting, J. & Steen, B. (eds.) *Towards best practice in life cycle impact assessment – report of the second SETAC-Europe working group on life cycle assessment (forthcoming)*. Pensacola, Society of Environmental Toxicology and Chemistry.
- Seppälä, J. 1999a. Decision analysis as a tool for life cycle impact assessment. Julk.: Klöpffer, W. & Hutzinger (toim.), *LCA Documents, Vol 4. Eco-Inforna Press, Landsberg*. S. 174.
- Seppälä, J. 1999b. Vaikutusten laskenta elinkaariarvioinnissa – vertailtavana DAIA- ja Ekoindikaattori 95 –menetelmät. Helsinki, Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristökeskuksen moniste 172. 38 s.
- Seppälä, J., Koskela, S., Melanen, M. & Palperi, M. 2002. The Finnish metals industry and the environment. *Resources, Conservation and Recycling* 35 (2002) 61-76.
- Seppäläinen, T.O. & Hämäläinen, R.P. 1986. Päätösanalyysi ja sen energiapoliittiset sovellukset. TKK OFFSET, Otaniemi. Teknillinen korkeakoulu, systeemianalyysin laboratorion tutkimusraportti B8.
- Tattari, K. 2000. Sähkön ja kaukolämmön ympäristöprofiilit vuonna 1998 hyödynjakomenetelmällä.
- Tenhunen, J. & Lohi, T-K, 2001. Ekotehokkuus vesihuollossa. Suomen ympäristö 488. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.
- Ympäristöministeriö. 1998. Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2005. Helsinki, Ympäristöministeriö. Suomen ympäristö 260. 243 s.
- Ympäristöministeriö. 2000. Luonnonvarojen kokonaiskäyttö Suomessa. Suomen ympäristö 428. Ympäristöpolitiikka. Helsinki.
- Vares, S. 2001. Kerrostalossa käytettyjen materiaalien ympäristövaikutukset, LVIS-2001-tyyppi-kerrostalo. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo.
- Valtioneuvosto. 1999. Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999).
- Veijalainen, S. & Pajujoja, H. 2000. Ekotehokas Suomi-projekti. Osaraportti 3. Metsätalouden materiaalityyppien 1970-1997. <http://thule.oulu.fi/ecoef>
- Wuppertal Institute. 1998. <http://www2.wupperinst.org/Projekte/mipsonline/index.html>, MI-werte.pdf, 17.7.1998.

## Liite I. Maan käyttö elinkaariarvioinneissa

Maan käytöllä on monia vaikutuksia ekosysteemiin – biodiversiteettiin (monimuotoisuuteen), ekologiin toimintoihin ja luonnonvaroihin - ja sen laatuun. Näitä vaikutuksia ei ole tavallisesti huomioitu elinkaariarvioinneissa ja syynä siihen on ollut pääasiassa sopivien vaikutusindikaattoreiden puute. Maan käytön ympäristövaikutukset muodostavat kuitenkin tärkeän vaikutusluokan, joka tulisi sisällyttää erikoisesti maa- ja metsätaloustuotteiden, elinkaariarviointeihin.

Käytännössä ihmisen maahan kohdistuva toiminta voi joko muuttaa vallitsevaa maatyyppeä (esim. pellon raivaus), huonontaa maanlaatua (maaperän köyhtyminen) tai hävittää maatyypin kokonaan (esim. rakentaminen). Usein maan käytön aiheuttamat ympäristövaikutukset ovat kuitenkin pienimuotoisia, itsessään monimutkaisia kokonaisuuksia ja vaikeita tai jopa mahdottomia mitata. Sen vuoksi menetelmän tai menetelmien – jotka riittävästi pystyisivät mallintamaan näitä moni-dimensionaalisia vaikutuksia LCA:ssa – kehittäminen on ollut työlästä ja vaikeaa. Tulevaisuudessakin tarvitaan tutkijoiden ja muiden osapuolten yhteistyötä maankäytön ympäristövaikutusten arvioimisen kehittämisessä ja harmonisoinnissa.

### Maanlaadun muuttuminen ja toiminnan aikainen vaikutus

Maankäyttö on yhdistetty moniin ympäristövaikutuksiin, joita ovat mm.

- vaikutukset maan fysikaaliseen laatuun (irreversiibelit ja reversiibelit muutokset)
- vaikutukset biologiseen diversiteettiin
- vaikutukset esteettisiin arvoihin sekä virkistys- ja kulttuuriarvoihin ja lisäksi esimerkiksi metsätaloudessa ja maanviljelyksessä
- vaikutukset maa-alueen tuottavuuteen (esim. ravinteiden ja humuksen vähentyminen maaperässä)
- vaikutukset globaaliin hiilikiertoon kuten hiilivarastoon metsäalueella
- vaikutukset luonnonvarojen tuottoon tulevaisuudessa - lisääntyvä ravinnontarve, uusiutuvan energian ja uusiutuvien materiaalien tarve tekee produktiivisesta maa-alueesta tärkeän luonnonvaran.

LCA-asiantuntijoiden (SETAC 1996) keskuudessa on päästy yksimielisyyteen maankäytön arvioimisen lähtökohdista ja hyväksytty kaksi toisistaan poikkeavaa maankäytön vaikutusten tarkastelutapaa, joita voidaan hahmottaa kuvassa 1 esitetyllä piirroksella (Weidema & Lindeijer 1998, Lindeijer ym. 1998). Asiantuntijoiden mukaan maankäytön ympäristövaikutuksia voidaan arvioida joko maanlaadun nettomuutoksen (net change) kautta tai maan haltuunoton ja siinä harjoitettavan toiminnan (land occupation) kautta. Nettomuutoksella tarkoitetaan ympäristön laatua kuvaavan indikaattorin arvon muutosta.

Maanlaadun muuttumisella (land transformation) tarkoitetaan prosessia, joka muuttaa kasvillisuutta, eläimistöä ja maaperää alkuperäisestä tilasta (A, ks. kuva 1) muuttuneeseen tilaan (B, C tai D). Muuttunut tila (esim. B) voi olla väliaikainen niin, että toiminnan jälkeen maa käy läpi ns. relaksaatioajan ( $t_2 \rightarrow t_3$ ). Tänä aikana alue voidaan pitää luonnontilassa tai sille voidaan tehdä toimenpiteitä, jotka edistävät toivotun tilan saavuttamista. Lopulta maa saavuttaa uuden ”pysyvän” tilan (D), joka voi olla alkuperäistä tilaa huonompi, yhtä hyvä tai jopa parempi. Ajallisesti muutosprosessit voivat olla äkillisiä (kuten kohdassa  $t_1$ ) tai vähittäisiä (kuten ihmistoiminnan aikana  $t_1 \rightarrow t_2$ ).

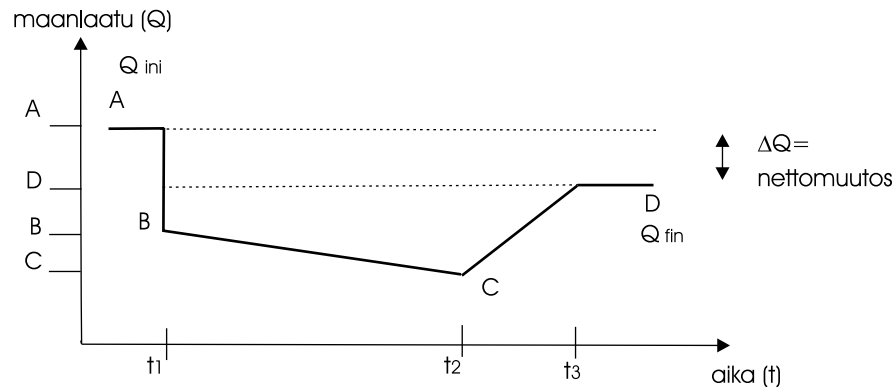
Kaavana ilmaistuna:

maankäytön muutos = pinta-ala \*  $\Delta Q$  (nettomuutos)

$\Delta Q = Q_{\text{ini}} - Q_{\text{fin}}$ , missä  $Q_{\text{ini}}$  kuvaa maanlaatua lähtötilanteessa ja  $Q_{\text{fin}}$  lopputilanteessa.



Toiminnan aikaiset vaikutukset (land occupation) tarkoittaa kasvillisuuden, eläimistön ja maaperän säilyttämistä tilassa, joka on erilainen kuin se "pysyvä" tila, joka saavutetaan relaksaatioajan jälkeen. Nämä vaikutukset sisältävät maan haltuunoton ja toiminnan aikavälillä  $t_1$  ja  $t_2$ . Toiminta viivästyttää relaksaatioajan (lepo- tai korjausvaiheen) alkamista ja molempien vaiheiden aikana maan tila on erilainen kuin toiminnan jälkeen saavutettavassa potentiaalisessa "pysyvässä" tilassa (D).



Kuva 1. Maanlaadun muuttuminen (land transformation), nettomuutos (net change) ja toiminnan vaikutus (land occupation) (Weidema & Lindeijer 1998, Lindeijer ym. 1998). A = alkuperäinen tila, B, C ja D = muuttunut tila.

### LCA:ssa käytettyjä menetelmiä

Maankäytön LCA-laskennassa on kehitetty erilaisia metodologisia lähestymistapoja, joista osa perustuu pääasiassa biodiversiteetin muutosten analysointiin. Biodiversiteetti sisältyy useimpiin muihinkin menetelmiin, vaikka tiedetään, että se on erittäin hankala asia mitattavaksi, ei ainoastaan lajien suuren lukumäärän vaan myös luonnon oman dynamiikan vuoksi. Osa menetelmistä ottaa huomioon sekä kasvit, eläimet että fysikaalis-kemialliset vuorovaikutukset maaperässä. Tiettyjen indikaattorilajien käyttö on tavallista ns. ylhäältä alas (top-down)-lähestymistavoissa. Indikaattorilajien avulla pyritään mittaamaan muutoksia biodiversiteetissä ja ekosysteemin tuottavuudessa.

Yleisesti käytettäviä menetelmiä maankäytön vaikutusten arvioimiseen ovat esittäneet mm. Lindeijer ym. (1998), Köllner (2000), Baitz ja Kreissig (1998), Muyes ym. (2001) ja Schenk (2001). Lisäksi erikoisesti maatalousmaan käytöstä aiheutuvien vaikutusten arvioimista ovat kehittäneet Mattsson ym. (1998) sekä Cowell ja Clift (2000). Metsätalouden elinkaariarvioinneissa voidaan käyttää yleisten menetelmien lisäksi menetelmiä, jotka perustuvat kestäväen kehityksen indikaattoreihin tai mm. Springerin ym. (1998) ja Swanin (1998) esittämiin ajatuksiin (Berg ym. 2001).

Useissa edellä mainituissa menetelmissä maankäytön vaikutuksia kuvataan sekä kvantitatiivisesti että kvalitatiivisesti. Käytetyt tiedot ovat joko mitattuja, laskettuja tai arvioituja. Inventaarioissa maa-alueen käyttö ilmoitetaan aina kvantitatiivisesti. Maa-ala voidaan spesifioida myös tarkemmin maatyypin mukaan. Yksikkö on useimmiten pinta-alayksikkö, pinta-alayksikkö/aika tai maaperän tilavuus. Toiminnallinen yksikkö valitaan menetelmän mukaan.

LCA:n vaikutusarviointiosiossa maankäytön vaikutuksia arvioidaan useamassa vaiheessa. Vaikutusluokkien valinnan yhteydessä määritetään mukaan otettavat ympäristövaikutukset sekä niitä kuvaavat indikaattorit. Karakterisoi-

vaiheessa vaikutusten määrittämisessä täytyy pitää mielessä myös mahdollisuus erilaisten maankäyttötapojen keskinäiseen vertailuun. Lindeijer (2000) painottaa kahta seikkaa maankäytön arvioimisessa. Ensiksikin tulee selvittää, missä määrin maan käyttö aiheuttaa irreversiibejä maaperän muutoksia ja toiseksi, minkälaisia indikaattoreita voidaan käyttää kuvaamaan maankäytön vaikutuksia elinkaariarvioinneissa. Useimmat lähestymistavat nykyään tähtäävät yhteen tai muutama indikaattoriin tai indeksiin. Valintatilanteessa rajoittavaksi tekijäksi muodostuu kuitenkin usein luotettavan tiedon saanti.

### **Maankäytön vaikutusluokkia ja indikaattoreita**

Tässä kappaleessa esitetään lyhyesti ja erittäin valikoidusti edellä mainittujen menetelmien periaatteita, vaikutusluokkia ja indikaattoreita. Perusteellisemmin menetelmiin voi tutustua käyttäen apuna tutkijoiden alkuperäisiä dokumentteja tai kirjallisuusluettelon lähteitä.

Weidema ja Lindeijer (2001) ovat esittäneet maankäytön vaikutuksille indikaattoreita, jotka kuvaavat 1) biogeokemiallista substanssia ja energiasyklejä, 2) ekosysteemin tuottavuutta, 3) biodiversiteettiä, 4) kulttuurisia arvoja ja 5) lajiston muuttoa ja pirstoitumista. He erottavat toisistaan käytön aikaiset vaikutukset ja pysyvät (toiminnan lopettamisen jälkeiset) vaikutukset toisistaan (ks. kuva 1). Weideman ja Lindeijerin tarkastelun näkökulma on toiminnan aikaisissa vaikutuksissa.

Minkä tahansa maankäytön vaikutukset ( $I_{occ}$ ) voidaan laskea kaavalla (Weidema & Lindeijer, 2001):

$$I_{occ} = A * t_i * (Q_{pot} - Q_{act}) / s_i,$$

missä A on maa-ala,  $t_i$  on maankäytön aika (sisältäen relaksaatioajan),  $Q_{pot}$  on indikaattoriarvo relaksaatiopotentialille, jolla tarkoitetaan relaksaatioajan jälkeistä todennäköistä tilaa tulevaisuudessa,  $Q_{act}$  on indikaattoriarvo ihmistoiminnan aikana ja  $s_i$  on suoran kulmakerroin, joka kuvaa relaksaation aikaista indikaattorin arvon lähestymistä  $Q_{pot}$ .

Biodiversiteetin muutosten kuvaamiseen Köllner (2000) on kehittänyt karakterisointitekijän SPEP (Species-Pool Effect Potential), jota käytetään mittarina maankäyttötoimenpiteiden vaikutusten arvottamiseen. Menetelmä ei sisällä kvalitatiivista tietoa ja mitattavana loppupisteen suureena käytetään putkilokasvien määrää lajistossa. Menetelmä kuvaa lajien välistä dynamiikkaa ja samalla biodiversiteetin muutosta putkilokasvien avulla. Esimerkiksi rakentaminen ja maanviljely vaikuttavat negatiivisesti lajikokoelmaan, kun taas sekametsä ja kesanto vaikuttavat positiivisesti. Vaikutuksia voidaan tarkastella sekä paikallisesti että alueellisesti, jossa myös maankäytön aika huomioidaan, mutta aikaskaala on lyhyt. Menetelmä soveltuu yleisesti elinkaariarviointeihin.

Lindeijer (1998) on valinnut paikallisen biodiversiteetin ja ns. life-support (elämää ylläpitävän) - toiminnon käytetyn maa-alueen maanlaadun indikaattoreiksi elinkaariarvioinneissa. Paikallinen biodiversiteetti mitataan putkilokasvien (S) levinneisyyden muutoksen avulla ja ilmaistaan parametrillä  $\alpha$ . Alfa voidaan laskea kaavalla:

$$S_{map} - S_{ref cell} = \alpha * \log (A_{map} / A_{ref cell})$$

Map-alaviite viittaa lajien lukumäärään (S) näytealueella (A) ja ref cell-alaviite vastaavia referenssiarvoja. Alfa ilmaisee suoraan biodiversiteettitilanteen alueella maankäyttö mukaan luettuna. Life support- funktio mitataan vapaan netto primäärituotanto (fNPP) - termin avulla. fNPP on se määrä biomassaa, joka jää jäljelle mahdollisen sadonkorjuun jälkeen.

Sekä kerrointa alfa että fNPP:tä verrataan referenssiarvoihin, jotka koostuvat häiriintymättömien alueiden vastaavista lajimäärien, pinta-alojen ja biomassan tuotannon tutkimustuloksista. Indikaattoreiden referenssiarvojen oletetaan olevan korkeampia kuin mitatut arvot. fNPP on perustaltaan hyvä ja tarkoituksenmukainen indikaattori, mutta sisältää epävarmuuksia, sillä NPP:n (netto primäärituotannon) arvioiminen on vaikeaa. Putkilokasvien lukumäärään perustuva biodiversiteetti- indikaattorikin kattaa vain osan todellisesta biodiversiteetistä.

Baitz ja Kreissig (1998) ovat kehittäneet maankäytön arviointiin menetelmän, jossa maanlaatu ja sen muutokset luonnehditaan ekosysteemin fysikaalisten funktioiden avulla. Useimmat niistä ovat paikkasidonnaisia ja funktioiden perustaksi tarvitaan suhteellisen paljon informaatiota. Menetelmässä maankäyttöalue jaetaan pienempiin homogeenisiin osiin ja ne ryhmitellään tietyn maankäyttötyypin tai kasvillisuuskoostumuksen mukaan. Muutos laadussa tutkitaan muun muassa seuraavien funktionaalisten luokkien avulla, joille kaikille on ehdotettu tieteellisesti mitattavia suureita:

- maaperä (eroosioresistanssi, suodatus- ja puskurointikyky, mikrobiotinen muuntuminen)
- vesi (pohjaveden muodostus ja suojele)
- ilma
- lajien, maiseman ja asukkaiden suojele
- kestävän kehityksen mukainen tuotanto maataloudessa/ metsätaloudessa.

Elinkaariarviointiin ja päätöksentekoon tarkoitetuista biodiversiteetti-indikaattoreista on keskusteltu myös USA:ssa (Schenck, 2000), jossa luonnonsuojeluyhdistykset, hallinnon ja elinkeinon edustajat sekä tutkijat ovat miettineet yhdessä maankäytön indikaattoreita. Tavoitteena on ollut laatia suhteellisen lyhyt lista ja helposti laskettavat mittarit, jotka soveltuisivat käytettäväksi maailman laajuisesti. Useimmat listan indikaattoreista liittyvät suojeltaviin tai uhanalaisiin lajeihin ja niiden kasvuolosuhteisiin. Mittareina käytetään suojeltavien lajien määriä ja kasvupaikkojen pinta-aloja ottaen huomioon pirstoutuminen ja suojeltavien eläinlajien esiintymispaikkojen yhteys vesistöihin. Maaperän laatua kuvataan orgaanisen hiilen määrällä ja vesistöjen hydrologista funktiota vesivarojen vähentymisellä. Lisäksi mukana on teiden määrä alueella ja luonnonvaraisen maa-alueen suhde käsiteltyyn maa-alueeseen.

Erikoisesti maatalousmaan indikaattoreiksi on ehdotettu eroosiota, orgaanisen aineen määrää, maaperän rakennetta, pH:ta, maaperän fosfori- ja kaliumtasoja sekä vaikutuksia biologiseen diversiteettiin (Mattsson ym. 1998). Tutkijoiden mukaan nämä indikaattorit antavat hyvän kuvan maaperän pitkäaikaisesta hedelmällisyydestä ja biologisesta diversiteetistä. Osa indikaattoreista voidaan mitata, osa arvioidaan kvalitatiivisesti kuvailemalla. Cowell ja Clift (2000) suosittelevat maatalousmaan käytön indikaattoreiksi maamassaa, ravinteita, rikkaruohoja ja rikkaruohon siemeniä, patogeenejä, ravinteita, suoloja, pH:ta, orgaanista ainetta ja maaperän rakennetta.

# Liitteen 1 kirjallisuus

- Baitz, M., Kreissig, J. & Schöch, C. 1998. Method to integrate land use in life cycle assessment. IKP, University of Stuttgart.
- Berg, S., Lindholm, E-L. (Skogforsk, Sweden), Alvarado, F, Backlund, B. (STFI, Sweden), Kaila, S. (Metsäteho, Finland), Wessman, H., Hohenthal, C. (KCL, Finland), 2001. Evaluating Land Use Oriented LCA Methods and Associated Indicators (in print).
- Cowell, S. J. & Clift, R. 2000. A methodology for assessing soil quantity and quality in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* Vol. 8 (4) pp. 321 – 331.
- Köllner, T. 2000. Species-pool effect potentials (SPEP) as a yardstick to evaluate land-use impacts on biodiversity. *Journal of Cleaner Production* Vol. 8 (4) pp. 293-312.
- Lindeijer, E. W., van Kampen, M., Fraanje, P. J., van Dobben, H. F., Nabuurs, G. J., Schouwenberg, E. P. A. G., Prins, A. H., Dankers, N. & Leopold, M. F. 1998. Biodiversity and life support indicators for land use impacts in LCA. Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement, Road and Hydraulic Engineering Division. Publication series raw materials, Nr 1998/07.
- Lindeijer, E. 2000. Review of land use impact methodologies. *Journal of Cleaner Production* Vol. 8 (4) pp. 273-282.
- Mattsson, B., Cederberg, C. & Ljung, M. 1998. Principles for Environmental Assessment of Land Use in Agriculture. Institutet för livsmedel and bioteknik. SIK-Rapport Nr 642. Gothenburg.
- SETAC-Europe. 1996. Udo de Haes, H.A., editor. Towards a methodology for life cycle impact assessment. Belgium.
- Shenck, R. C. 2001. Land Use and Biodiversity Indicators for Life Cycle Impact Assessment. *International Journal of LCA* 6 (2) pp. 114-117.
- Weidema, B. P. & Lindeijer, E. 2001. Physical impacts of land use in product life cycle assessment. Final report of the EURENVIRON-LCAGAPS sub-project on land use. Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark. 16.3.2001. IPL-033-01.

# Kuvailulehti

Julkaisija	Suomen ympäristökeskus	Julkaisu-aika Joulukuu 2002
Tekijä(t)	Sirikka Koskela, Jyri Seppälä ja Jorma Leivonen	
Julkaisun nimi	Ympäristövaikutukset rakennusten ekotehokkuuden arvioinnissa	
Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut	Julkaisu on saatavana myös internetistä. <a href="http://www.ymparisto.fi/palvelut/julkaisu/elektro/sy585/sy585.htm">http://www.ymparisto.fi/palvelut/julkaisu/elektro/sy585/sy585.htm</a>	
Tiivistelmä	<p>Rakennusten ekotehokkuuden määrittämisessä tarvitaan ympäristövaikutusten kokonaisarviointia, johon ei ole olemassa yleispätevää menetelmää. Tutkimuksessa on tarkasteltu rakennusten elinkaaren tärkeimpiä ympäristönäkökohtia ja niiden arviointimenetelmiä. Menetelmien käyttöä on havainnollistettu teoreettisten esimerkkien avulla. Työssä on kehitetty myös materiaalin valmistukseen liittyvä kokonaisuusmateriaalimäärän laskentamenettely, joka ottaa huomioon ns. piilovirrat ja kierrätyksestä saadut hyvitykset. Päästöjen arviointiin sovellettiin elinkaariarviointia. Päätöksentekotilanteessa rakennusvaihtoehtojen kokonaisympäristövaikutusten vertailuun sovellettiin päätösanalyttistä lähestymistapaa. Indikaattoreina vertailussa käytettiin kokonaisuusmateriaalimäärää, energian kulutusta sekä tapauskohtaista maan käytön tarkastelua. Tulevaisuudessa arviointimenetelmien kertoimia tulee kehittää Suomen olosuhteita vastaaviksi.</p>	
Asiasanat	ekotehokkuus, elinkaariarviointi, vaikutusarviointi, rakentaminen, rakennusaineet	
Julkaisusarjan nimi ja numero	Suomen ympäristö 585	
Julkaisun teema	Rakentaminen	
Projektihankkeen nimi ja projektinumero		
Rahoittaja/ toimeksiantaja		
Projektiryhmään kuuluvat organisaatiot		
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-1253-0 (nid.) 952-11-1254-9 (PDF)
	Sivuja 82	Kieli Suomi
	Luottamuksellisuus Julkinen	Hinta 12 e
Julkaisun myynti/ jakaja	Edita Publishing Oy, PL 800, 00043 EDITA, vaihde 020 450 00, Asiakaspalvelu: puh. 020 450 05, telefax 020 450 2380, sähköpostiosoite: asiakaspalvelu@edita.fi, www-palvelin: <a href="http://www.edita.fi/netmerket">http://www.edita.fi/netmerket</a>	
Julkaisun kustantaja	Suomen ympäristökeskus, PL 140, 00251 Helsinki	
Painopaikka ja -aika	Edita Prima Oy, Helsinki 2002	

# Presentationsblad

Utgivare	Finlands miljöcentral	Datum December 2002
Författare	Sirikka Koskela, Jyri Seppälä och Jorma Leivonen	
Publikationens titel	Miljökonsekvenser vid bedömning av byggnaders ekoeffektivitet	
Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt	Publikationen finns även på internet. <a href="http://www.ymparisto.fi/palvelut/julkaisu/elektro/sy585/sy585.htm">http://www.ymparisto.fi/palvelut/julkaisu/elektro/sy585/sy585.htm</a>	
Sammandrag	<p>Vid definition av ekoeffektiviteten hos byggnader behöver man en helhetsbedömning av miljökonsekvenserna och för denna bedömning finns det ingen generell metod. I denna undersökning har man undersökt de viktigaste miljökonsekvenserna under en byggnads livscykel och metoder för att bedöma dem. Användningen av metoderna har åskådliggjorts med hjälp av teoretiska exempel. I undersökningen har man även utvecklat en metod för att beräkna den totala mängden material i anslutning till framställningen av byggnadsmaterialet. Metoden beaktar så kallade dolda materialströmmar och kreditering för materialåtervinning. Vid bedömning av utsläpp användes livscykelanalys. Vid beslutssituationer, då de totala miljökonsekvenserna hos alternativa byggnader skulle jämföras, använde man beslutsanalytisk metodik. I jämförelsen användes som indikatorer den totala mängden material, energiförbrukningen och en granskning av markanvändningen från fall till fall. I framtiden bör bedömningsmetodernas koefficienter anpassas till finländska förhållanden.</p>	
Nyckelord	ekoeffektivitet, livscykelanalys, miljökonsekvensbedömning, byggande, byggnadsmaterial	
Publikationsserie och nummer	Miljön i Finland 585	
Publikationens tema	Byggande	
Projektets namn och nummer		
Finansiär/ uppdragsgivare		
Organisationer i projektgruppen		
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-1253-0 952-11-1254-9 (PDF)
	Sidantal 82	Språk Suomi
	Offentlighet och andra villkor Offentlig	Pris 12 EUR
Beställningar/ distribution	Edita Publishing Ab, PB 800, FIN-00043 EDITA, Finland Postförsäljningen: Telefon + 358 20 450 05, telefax + 358 20 450 2380 e-mail: <a href="mailto:asiakaspalvelu@edita.fi">asiakaspalvelu@edita.fi</a> , www-server: <a href="http://www.edita.fi/netmarket">http://www.edita.fi/netmarket</a>	
Förläggare	Finlands miljöcentral, PL 140, 00251 Helsingfors	
Tryckeri/ tryckningsort och -år	Edita Prima Ab, Helsingfors 2002	

# Documentation page

Publisher	Finnish Environment Institute	Date December 2002
Author(s)	Sirkka Koskela, Jyri Seppälä and Jorma Leivonen	
Title of publication	Environmental impacts in assessing the eco-efficiency of buildings	
Parts of publication/ other project publications	The publication is also available in the internet. <a href="http://www.ymparisto.fi/palvelut/julkaisu/elektro/sy585/sy585.htm">http://www.ymparisto.fi/palvelut/julkaisu/elektro/sy585/sy585.htm</a>	
Abstract	<p>To determine the eco-efficiency of buildings, a total assessment of environmental impacts is needed, but there exist no universal methods for this. In this study, the most important environmental aspects of buildings and their assessment methods are presented. The use of the methods is visualized with theoretical examples. In the study, a calculation procedure of the total material requirement concerning the manufacture of building materials was also developed, which takes into account so called hidden flows and credits from recycling. Life cycle assessment was applied for assessing emissions. In decision making for comparing building alternatives, decision analysis approach was applied. The used indicators were the total material requirement, the energy consumption and the case-specific land use. In the future it is necessary to develop coefficients of the assessment method to better correspond to the Finnish circumstances.</p>	
Keywords	eco-efficiency, life cycle assessment, environmental impact assessment, construction, building materials	
Publication series and number	The Finnish Environment 585	
Theme of publication	Building	
Project name and number, if any		
Financier/ commissioner		
Project organization		
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-1253-0
		952-11-1254-9 (PDF)
	No. of pages 82	Language Finnish
	Restrictions Public	Price 12 EUR
For sale at/ distributor	Edita Publishing Ltd. P.O.Box 800, FIN-00043 EDITA, Finland Phone +358 20 450 00, telefax +358 20 450 2380, e-mail: <a href="mailto:asiakaspalvelu@edita.fi">asiakaspalvelu@edita.fi</a> www-server: <a href="http://www.edita.fi/netmarket">http://www.edita.fi/netmarket</a>	
Financier of publication	Finnish Environment Institute, P.O.BOX 140, 00251 Helsinki, Finland	
Printing place and year	Edita Prima Ltd, Helsinki 2002	





