

Alueellisen ekotehokkuuden määrittely

Pekka Lahti

Jukka-Heinonen

Ari Nissinen

Jari Rantsi

Jyri Seppälä

Eeva Säynäjoki



Kaupunkien ja kuntien aluetasoiset ekolaskurit

VTT Tutkimusraportti VTT-R-00939-12

Espoo 2012

kansikuva: New York, Bryant Park 23.3.2011 P. Lahti



Esipuhe

Tämä raportti on osa KEKO A -projektin (Kaupunkien ja kuntien aluetasoiset ekolaskurit) työpakettia 1 (TP1). Työpaketin tarkoitus on selvittää alueellisen ekotehokkuuden määritelmää ja mittaamista. Projektia rahoittavat Tekes, Aalto-yliopisto, SYKE, VTT, Helsingin, Espoon, Vantaan, Tampereen, Lahden, Kuopion ja Joensuun kaupungit, Skanska Kodit Oy, YIT Rakennus Oy ja ympäristöministeriö. Työpaketin osana on tehty kirjallisuus- ym. lähteisiin perustuva katsaus alueellisen ekotehokkuuden määrittelyihin ja laskentatapoihin. Selvitys on tehty VTT:n johdolla, VTT:n (johtava tutkija Pekka Lahti), Aalto-yliopiston (tutkijat Jukka Heinonen ja Eeva Säynäjoki), ja SYKE:n (erikoistutkija Ari Nissinen, professori Jyri Seppälä ja tutkija Jari Rantsi) tutkijoiden yhteistyönä.

Kaupunkien ja kuntien aluetasoiset ekolaskurit KEKO A

TP 1. ALUEELLISEN EKOTEHOKKUUDEN MÄÄRITELMÄ JA MITTAAMINEN

Osaraportti 1: ALUEELLISEN EKOTEHOKKUUDEN MÄÄRITTELY

1.1 Alueellisen ekotehokkuuden määrittelmä

Alueellisen ekotehokkuuden määrittely on osa ekotehokkuuden arviointimenettelyä (kuva 1). Se on välttämätön lähtökohta ennen kuin arviointia voidaan operationalisoida ja muodostaa sitä kautta käytännön kaupunkisuunnittelua, -rakentamista ja -kehittämistä palvelevia ekolaskureita.

ALUEELLISEN EKOTEHOKKUUDEN ARVIOINTI



Kuva 1. Alueellisen ekotehokkuuden arvioinnin eteneminen.

Määritelmän on oltava riittävän selkeä ja yksiselitteinen, jotta siitä voidaan johtaa sitä kuvaavia mittareita ja laskureita. Seuraava määritelmä on kehitetty tämän projektin tarpeisiin ja se tulee todennäköisesti kehittymään ja tarkentumaan projektin myöhemmissä vaiheissa.

Alueellinen ekotehokkuus on tietyn alueen rakennetun ja luonnonympäristön ominaisuus, joka kuvaa alueen aine- ja energiavirtoja sekä taseita kiinnittäen erityistä huomioita ihmisen eloonjäämisen ja elämän laadun kannalta tärkeisiin osatekijöihin. Ekotehokkuus mittaa materiaalien ja energian kulutusta, niihin liittyviä päästöjä, jätteitä ja kierrätystä sekä ekojärjestelmäpalvelujen tarjontaa.

Määritelmän avainsanoja ovat ”alue”, ”ihminen”, ”rakennettu ja luonnonympäristö”, ”aine- ja energiavirrat” ja ”tärkeä”. Ne määritellään ja niiden käyttö perustellaan seuraavassa:

- *Alue* on maantieteellisesti rajattu, sekä maa- että vesialueita sisältävä maapallon pinta-alan osa. Se voi olla vapaasti karttaan piirretyn rajaviivan rajaama tai esimerkiksi hallinnollisten rajojen määrittelemä alue. Tässä yhteydessä tarkoitetaan useimmiten toiminnallisesti rajattuja yhdyskuntia, kuten työssäkäyntialueita, kuntia tai kunnanosia, kaupunkiseutuja tai maakuntia, joissakin tapauksissa koko maata tai laajempiakin alueita. Alueellisen rajauksen perusteluna voivat olla myös maan- tai luonnontieteelliset ominaisuudet, kuten valuma-alue (esimerkiksi Itämeren valuma-alue), tietty vesistöreitti tai sen reunavyöhyke (esimerkiksi Kokemäenjoen laakso), geologinen muodostuma (esimerkiksi Salpausselkä), ilmasto- tai metsätyyppi (esimerkiksi havumetsävyöhyke) tai biotooppi (esimerkiksi liito-oravan elinpiiri).
- *Ihminen* on alueellisen ekotehokkuuden määrittelijä ja kokija (subjekti) ja samalla monien alueen ekotehokkuutta mittaavan vaikutuksen kohde (objekti). Arvioitavan alueen ihmiset ovat siellä asuvia, työssäkäyviä tai vierailevia. Ihmisen mukanaolo alueellisen ekotehokkuuden määritelmässä on välttämätöntä, koska luonnolla ilman ihmistä ei ole ekotehokkuuden tiedostajaa tai mittaajaa eikä tarvetta olla ekotehokas. Historiassa eliölajien kehitys sisältää levinneisyyden ja runsauden voimakastakin vaihtelua. Lajeja ”syntyy”, ne sopeutuvat muuttuneisiin olosuhteisiin, muuntuvat ja myös häviävät ilman että lajin yksilöt sitä tiedostavat.
- *Rakennettu ja luonnonympäristö* (tai luonto) ovat se ihmisen elinympäristö, johon kuuluvat sekä ihmisen tuottamat esineet (artefaktit) että luonnostaan (ilman ihmisen vaikutuksia) esiintyvät ja ihmisen tuottamat tai muokkaamat luontoelementit. Puistot ja muut viher- (tai siniviher-)alueet (olivatpa ne voimakkaasti muokattuja ja geometrisiä kaupunkipuistoja tai puutarhoja tai ns. luonnonmukaisia puistoja tai vesialueita) ovat ilmeisimpiä kaupunkien luontoalueita, mutta myös rakennukset ja sitä kautta kokonaiset kaupungit voidaan nähdä osana ihmisen muokkaamaa luontoa. Luonnonympäristöön kuuluvat sekä elollinen että eloton luonto. Luonnonympäristöön (luontoon) kuuluvat myös ihmiset biologisina olentoina. Luonnonympäristöä ja sen ilmiöitä tutkivia tieteitä ovat mm. biologia, geologia ja meteorologia. Kaupunkiekologia tutkii erityisesti rakennetuissa ympäristöissä esiintyviä ekologisia ilmiöitä.
- *Aine- ja energiavirrat* ovat fyysisen maailman muutosten ja vuorovaikutuksien perusosia, sen syitä ja seurauksia. Ihminen on osa luontoa, vaikuttaa luontoon ja luonto ihmiseen. Ekotehokkuuden kannalta on olennaista kiinnittää huomio molempiin

vaikutussuhteisiin. Vuorovaikutuksessa ihminen ottaa luonnosta raaka-aineita, jalostaa ja käyttää niitä omiin tarkoituksiinsa, jolloin tapahtumaketjun aikana päätavoitteen (esimerkiksi asuinolosuhteiden paranemisen) ohella ilmenee monenlaisia sivuvaikutuksia (kuten luontoon kulkeutuvia päästöjä ja jätteitä), jotka ovat ekotehokkuuden kannalta tärkeitä ominaispiirteitä.

- *Tärkeä* on ominaisuus, jolla on olennainen merkitys ihmisen elinolosuhteissa ja jopa eloonjäämisessä. Tässä yhteydessä viitataan erityisesti kasvihuonekaasujen pitoisuuden (hiilijäljen) jatkuvaan kasvuun ilmakehässä, mikä saattaa vaarantaa ihmisyyhteisöjen eloonjäämismahdollisuuksia pitkällä aikajaksolla. Lyhyellä aikavälillä kriittisiä tekijöitä ovat ihmisen terveyteen vaikuttavat ominaisuudet (myrkylliset aineet, onnettomuusriskit jne.), mutta ne voidaan rajata myös ekotehokkuuskäsitteen ulkopuolelle, erillistarkasteluissa huomioon otettaviksi, koska terveellisyyteen liittyvillä ympäristöarvioilla on oma arviointiperinteensä. Ekotehokkuuteen liittyvät ominaispiirteet eivät kaikki ole välttämättä elintärkeitä, mutta ekotehokkuuden arvioimisessa voidaan asettaa niille tekijöille, joilla on läheinen kytkeä eloonjäämisen kannalta tärkeisiin ominaisuuksiin, suurempi paino kuin muille.

1.2 Määritelmän perustelut ja tausta-aineisto

1.2.1 Tutkimusohjelman määrittelyt

KEKO A -hankkeen tutkimusohjelmassa (2.11.2010) alueellisen yhdyskuntarakentamisen ekotehokkuus on rajattu ja määrittely alustavasti aihetta kuvailevien käsitteiden joukolla:

"alueellinen yhdyskuntarakentamisen ekotehokkuus ja hiilijälki; korttelitasolta kaupunkiseututasolle ml. maakunnalliset ja valtakunnalliset yhdistelmät; ekotehokkuuden määrittely kaupunkirakentamisen materiaali- ja energiavirtojen pohjalta ottaen huomioon erityisesti ilmastomuutoksen haittavaikutusten vähentäminen ja ehkäisy; ekotehokkuuden mittareina energiankulutus, päästöjen, erityisesti kasvihuonekaasujen määrä, uusiutuvien energialähteiden osuus, jätteiden määrä ja kierrätys, hiilinielut, ekosysteemivaikutukset; menettelytavat ja työkalut alueellisten kehityshankkeiden suunnittelijoille, kehittäjille ja päättäjille".

Projektisuunnitelmassa (ks. johtoryhmän pöytäkirja 15.2.2011) määrittelytehtävän tavoitetta täsmennettiin seuraavasti:

"tuloksena: mahdollisimman selkeä, tiivis ja kattava aluetasoisien ekotehokkuuden määritelmä, joka on samalla riittävän mitattava ja voi toimia ekolaskurin pohjana. Määritelmä ottaa myös kantaa kahteen tarpeeseen:

a) yleispätevä ekotehokkuus ("norminomainen", vertailukelpoisia tuloksia tuottava ja kansallisten/kansainvälisten tavoitteiden edistymistä seuraava (esim. CO₂ekv/asukas, a)

b) paikalliseen ja tilanteen mukaiseen tarpeeseen mukautuva yksilöllinen ekotehokkuus (ottaa huomioon myös elämäntapaerot)."

Tämän jälkeen tehtävä jaettiin vielä osatehtäviksi:

"Tarkastellaan ja määritellään erikseen kukin niistä osatekijöistä, jotka edellä on sovittu ekotehokkuuteen sisältyviksi (keskeisimpinä: energia- ja materiaalihokkuus, hiilikaasut/hiilijälki ja muut päästöt, uusiutuvien energialähteiden osuus, ekosysteemipalvelujen käyttö).

Selvennetään myös "aluetasoisuuteen" liittyvät rajaukset (esim. rakennus- ja materiaalitasoiset tarkastelut ovat mukana mikäli niillä on selvä yhteys aluetasoiin ominaisuuksiin, kuten puun, betonin, lasin ja metallin käytön yhteydet talotyyppeihin ja talojen käyttötarkoituksiin, sitä kautta korttelityyppeihin ja aluetehokkuuteen).

Määrittelyt ottavat myös kantaa erilaisten aluetasojen taserajoihin, jotka ekolaskureissa tulee ottaa huomioon:

- a) kortteli
- b) kaupungin tai kunnan osa (asuntoalue, keskusta-alue, kauppakeskittymä, teollisuusalue, virkistysalue, liikennealueet)
- c) kaupunkiseutu tai seutukunta, maakunta tai seutu
- e) koko maa
- f) rajavyöhykkeet.

Tässä yhteydessä pyritään myös ottamaan kantaa taserajojen yli vuotavien vaikutusten huomioon ottoon.

Arvioidaan myös mitkä alueelliset ominaisuudet ovat niitä joilla on merkittävä vaikutus alueiden ekotehokkuuteen (ekolaskureiden mittaamiin tunnuslukuihin) ja mitkä niistä ovat sellaisia, joihin vaikutetaan yhdyskuntasuunnittelussa ja siihen liittyvässä muussa päätöksenteossa (vaikuttavuusnäkökulma)."

Tutkimuskohteen sisällön määrittelyn kannalta avainsanoja ovat siis ekotehokkuus ja hiilijälki, joita tarkastellaan aluetasolla ja yhdyskuntarakenteen näkökulmasta.

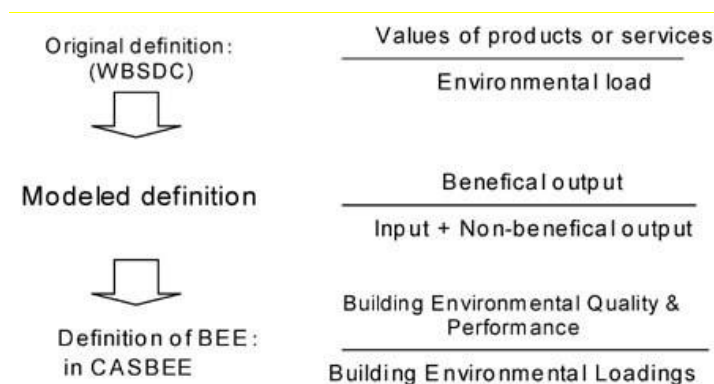
1.2.2 Ekotehokkuuden määritelmiä kirjallisuudesta

Ekotehokkuuden määrittelyjä on useita. Käsite on lyhennys sanoista ekologinen tehokkuus. Sen kehitti alun perin liikeyrityksiä varten World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)¹ vuonna 1991, jolloin nähtiin tarve yhdistää kestävä kehitys ja taloudellisen toiminnan tavoitteet yhden yksittäisen käsitteen alle. Silloin ekotehokkaat yritykset määriteltiin sellaisiksi, jotka tuottavat yhä hyödyllisempiä tuotteita ja palveluita – siis lisäarvoa – samaan aikaan kun jatkuvasti vähentävät voimavarojen kulutustaan ja

¹ World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) on noin 150 kansainvälisen, kestävä kehitykseen sitoutuneen yrityksen yhteisö, joka kehittää mm. yritysten ekotehokkuuden mittareita ja julkaisee aihetta koskevia selvityksiä. Yritykset ovat sitoutuneet ympäristönsuojeluun, sosiaaliseen tasa-arvoon ja taloudelliseen kasvuun eli kestäväan kehitykseen. Yrityksiä on noin 30 eri maasta ja niiden toimialat kattavat noin 20 eri tuotannon alaa. WBCSD on myös kehittänyt ekotehokkuuden mittareita, joita sen jäsenyritykset ovat testanneet. (WBCSD 2000, s. 32)

aiheuttamia saasteita². Myöhemmin ja yleisemmin kuin vain yrityksiä koskevaksi ja hieman laajentaen käsite ekotehokkuus (eco-efficiency) määriteltiin näin: "se tarkoittaa tuotteiden ja palveluiden tuottamista yhä vähemmällä voimavarojen käytön, jätteiden ja saasteiden määrällä"³. WBCSD on määritellyt ekotehokkuuden myös yksityiskohtaisemmin seuraavasti: "Ekotehokkuus saavutetaan kilpailukykyisesti hinnoitelluilla tuotteilla ja palveluilla, jotka tyydyttävät ihmisten tarpeet ja tuottavat elämän laatua samalla kun ne yhä enemmän vähentävät elinkaaren aikaisia ekologisia vaikutuksiaan ja voimavarojen käytön intensiteettiään vähintään sellaiselle tasolle, jonka arvioidaan vastaavan maapallon ekologista kantokykyä. Lyhyesti, se tarkoittaa uusien arvojen tuottamista vähemmällä vaikutuksilla."⁴

WBCSD:n ekotehokkuusmääritelmän muunnosta tai jatkokehitystä on sovellettu mm. CASBEE-arviointityökalun arviointiperiaatteissa⁵:



Kuva 2. Ekotehokkuuden määritelmän tausta CASBEE -työkalussa (CASBEE 2012).

Ekotehokkuuden taustalla voimakkaasti vaikuttava elinkaariajattelu ja siten koko ekotehokkuuden käsite voidaan kuitenkin nähdä liian sidonnaisena tuotteisiin ja palveluihin. Ekotehokkuuden tulisi olla sovellettavissa kaikkeen toimintaan ja talouteen. Esimerkiksi eri teollisuudenalojen tai vaihtoehtoisten poliittisten ratkaisujen ekotehokkuutta olisi tärkeää pystyä arvioimaan ja vertailemaan. Tällaisissa tarkasteluissa ekotehokkuus voidaan nähdä taloudellisen toiminnan tuotoksen ja ympäristövaikutusten suhdelukuna. Suhdeluku voi olla joko ympäristötuottavuus (environmental productivity), jonka osoittaja on taloudellinen suorite

² "...eco-efficient companies as those which create ever more useful products and services – in other words, which add more value – while continuously reducing their consumption of resources and their pollution" (Schmidheiny & WBCSD 1992) (yllä oleva suomennos P. Lahti)

³ "It means creating more goods and services with ever less use of resources, waste and pollution" (WBCSD 2000, s. 1) (yllä oleva suomennos P. Lahti)

⁴ "Eco-efficiency is achieved by the delivery of competitively-priced goods and services that satisfy human needs and bring quality of life, while progressively reducing ecological impacts and resource intensity throughout the life-cycle to a level at least in line with the earth's estimated carrying capacity. In short, it is concerned with creating more value with less impact." WBCSD 1993 (yllä oleva suomennos P. Lahti)

⁵ CASBEE on japanilainen, alun perin rakennusten ympäristöarviointia varten kehitetty työkalu, josta on tehty myös alueellisia versioita CASBEE UD ja CASBEE-City ja jossa arviointi perustuu rakennuksen ekotehokkuuden BEE (Building Eco-Efficiency) määrittelyyn (CASBEE 2012, <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/backgroundE.htm>)

ja nimittäjä ympäristövaikutukset (economic performance per environmental impact), tai sen käänteisluku ympäristöintensiteetti (environmental intensity), jonka osoittaja on ympäristövaikutukset ja nimittäjä taloudellinen suorite (environmental impact per economic performance). (Wursthorn et al. 2011)

Ekotehokkuuden arvioiminen edellyttää vahvasti indikaatiivisten parametrien⁶ käyttöä. OECD:n mukaan indikaattori on parametri tai parametreista johdettu arvo, joka tarjoaa tarkasteltavan ilmiön tilasta sellaista tietoa, joka ei rajoitu vain parametrin itsensä arvoon. Ekotehokkuuden arvioinnissa käytetään laajaa kirjoa erilaisia indikaattoreita⁷, mutta hyödynnettävien parametrien valintaa rajoittaa usein tiedon saatavuus. Osin tästä syystä ekotehokkuuden indikaattoreita ei ole määritelty ja kiinnitetty edes tiedeyhteisön keskuudessa. Yleisesti hyväksytyjä ekotehokkuuden indikaattoreita ovat esimerkiksi materiaalien ja energian kulutus, ympäristölle haitalliset päästöt, kierrätettävyyden, uusiutuvien energialähteiden käyttö, käyttökestävyys ja palvelusuurite. Ekotehokkuutta voidaan arvioida joko absoluuttisena arvona tai suhteessa johonkin vertailuarvoon. (Wursthorn et al. 2011)

Jos ekotehokkuuden ainoaksi indikaattoriksi valitaan ympäristöintensiteetti ja sen nimittäjä taloudellinen suorite määritellään vertailukelpoiseksi taloudellisen suoritteen perusyksiköksi, ekotehokkuuden arvioimiseen tarvittavat parametrit ovat ympäristövaikutuksia indikoivia kuvaavia kulutuksen, päästöjen ja kierrätysasteen mittaustuloksia. Indikaattoreita on runsas joukko. Pelkästään teollisuuden päästöt ilmaan ja vesistöihin jakautuvat Euroopan epäpuhtauspäästökisterin luettelon mukaan noin viiteenkymmeneen eri saastetyyppiin (liite 1).

Elinkaariperusteisen ympäristövaikutusten arvioinnin mukaan kokonaispäästöt voidaan jakaa tuotteiden ja palvelusten (a) tuotannon aikaisiin ja (b) käytön aikaisiin päästöihin. Rakennusmateriaalien tuotannon aikaisista ympäristövaikutuksista on myös laadittu luetteloita, joissa on noin neljäkymmentä erilaista rakennusmateriaalia (ks. esimerkiksi energiankulutukset ja hiilidioksidiekvivalenttipäästöt Lahti et al. 2008, liite 2). Ominaisvaikutukset perustuvat aina ao. teollisen kulttuurin, paikan ja ajankohdan mukaisiin tuotantoteknologiaan ratkaisuihin ja muuttuvat nopeasti uusiin tekniikoihin siirtymisen jälkeen.

Ilmakehään ja vesistöihin kohdistuvien päästöjen lisäksi on otettava huomioon päästöt maaperään. Tämä on entistä tärkeämpää rakennetuilla alueilla, joissa yhä useammin arvioidaan vanhojen teollisuus-, varasto-, satama- ym. liikennealueiden uudelleenkäyttöä. Pilaantuneiden maiden arvioinnissa pitäisi olla käytettävissä nykyisten tuotantomenetelmien ja raaka-aineiden lisäksi ehkä hyvinkin vanhojen menetelmien ja aineiden ominaisuustietoja tai selvittävät ne paikkakohtaisilla erityistutkimuksilla.

Ekotehokkuutta on määritelty ja eritelty tuoreessa kansainvälisessä tutkimuksessa ja alan julkaisuissa runsaasti. Monet niistä toistavat eri muodoissaan WBCSD:n edellä referoitua, "alkuperäistä" määritelmää, mutta täsmentävät sitä esimerkiksi osaindikaattorien erittelyn kautta.

⁶ Ilmaisulla viitattaneen sellaisiin muuttujiin, joiden kuvaamista ilmiöistä ja niiden yhteyksistä ekotehokkuuteen on tutkimuksellista ja mitattavaa näyttöä.

⁷ Indikaattori on ilmiötä, erityisesti asiantilojen muutoksia kuvaava osoitin. Koska osoitin -sana ei ole kovin laajalti yleistynyt, käytetään tässä raportissa enimmäkseen käsitettä indikaattori.

Vuoden 2011 Ecological Economics'issa on ekotehokkuuden todettu liittävän yhteen taloudellisen tehokkuuden ja ympäristötehokkuuden (Wursthorn, Poganietz & Schebek 2011). Sen mukaan ekotehokkuuden käsitettä voidaan siis hyödyntää tunnistettaessa ja toteutettaessa toimia, jotka samanaikaisesti parantavat taloudellista tehokkuutta ja vähentävät ympäristövaikutuksia.

Vuoden 2010 Journal of Cleaner Production'issa ekotehokkuus on määritelty olevan jotakin, joka saavutetaan tuottamalla ihmisten tarpeet tyydyttäviä ja elämänlaatua lisääviä tuotteita ja palveluita vähentäen samalla progressiivisesti tuotteiden ja palveluiden koko elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia maapallon ekologisen kantokyvyn tasolle saakka (Van Caneghem, Block, Van Hooste & Vandecasteele 2010). Siten tulkitettavan ekotehokkuuden luotettava arviointi edellyttää taloudellisen toiminnan ja siitä aiheutuvien ympäristövaikutusten yhtäaikaista seuranta- ja tarkastelun perusteellisuuden, systemaattisuuden ja johdonmukaisuuden takaavien indikaattoreiden avulla. Indikaattoreiden on huomioitava ympäristövaikutusten osalta kahdeksan vaikutusluokkaa: (1) ilmastonmuutos, (2) happamoituminen, (3) foto-oksidanttien muodostuminen, (4) ihmisille myrkylliset aineet, (5) vesistömyrkyt, (6) rehevöityminen, (7) energiankulutus ja (8) jätteiden tuottaminen. (Van Caneghem et al. 2010)

Kussakin edellä luetelluista vaikutusluokista samaan ilmiöön liittyvät saasteet yhteismitallistetaan (ks. kohta Yhteismitallistaminen). Ilmastonmuutosta kiihdyttävät kasvihuonekaasupäästöt (CO_2 , SF_6 , HFC:t, N_2O , CH_4 ja PFC:t) suhteutetaan keskenään GWP-kertoimien (Global Warming Potential) avulla CO_2 -ekvivalenteiksi. Happamoitumista aiheuttavat SO_2 -, NO_x -, ja NH_3 -ilmansaasteet yhteismitallistetaan AP-kertoimin (Acidification Potential) SO_2 -ekvivalenteiksi ja fotokemiallista savusumua muodostavat SO_2 -, NO_x -, CH_4 - ja VOC-päästöt POCP-kertoimin (Photochemical Ozone Creation Potentials) etyleeniekvivalenteiksi. Samoin ihmisille myrkylliset PAH-, dioksiini-, furaani-, pienhiukkas-, SO_2 -, kadmium- ja arseenipäästöt lasketaan yhteen HTP-kertoimilla (Human Toxicity Potential) ja vesistömyrkyt FAETP-kertoimilla (Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential) painotettuina. Rehevöitymistä aiheuttavat NH_3 - ja NO_x -ilmansaasteet sekä vesistöihin laskettavat tai kulkeutuvat fosfori- ja typpipäästöt muunnetaan EP-kertoimien (Eutrophication Potential) avulla PO_4 -ekvivalenteiksi. (Van Caneghem et al. 2010) Kunkin kategorian ekotehokkuusindikaattori tuotetaan jakamalla yhteismitallistetut ja yhteenlasketut päästöt sopivalla taloudellisen toiminnan indikaattorilla. Vastaavasti energiankulutuksen ja jätteiden tuottamisen indikaattorit saadaan jakamalla kokonaisenergiankulutus ja yhteen lasketut primäärijätteet samaisella taloudellisen toiminnan indikaattorilla.

Vuoden 2005 Journal of Industrial Ecology'n ekotehokkuuden erityisnumerossa ekotehokkuus on määritelty kestävyysanalyysin instrumentiksi, joka osoittaa taloudellisen toiminnan arvon ja ympäristövaikutusten välisen empiirisen yhteyden (Gjalt Huppés & Masanobu Ishikawa 2005). Tämän yhteyden tunnistaminen johtaa normatiivisiin pohdiskeluihin siitä, kuinka paljon ympäristön laatutekijöitä yhteisö on halukas uhraamaan taloudellisen hyvinvoinnin lisäämiseksi, tai käänteisesti, minkälaisia myönnytyksiä kansantaloudessa tulisi tehdä tietyn ympäristön laatutason saavuttamiseksi tai säilyttämiseksi. Talouskasvun ja ympäristön pilaantumisen välinen yhteys ei ole kuitenkaan yksinkertainen ja yksioikoinen. Yksittäisten ympäristövaikutusten yhdistäminen ympäristön laadun heikkenemisen käyttökelpoiseksi kokonaisindikaattoriksi edellyttää ensinnäkin ympäristövaikutusten arvioimisen

standardisointia ja kokonaisindikaattorin tarkkaa määrittelyä sekä toiseksi tähän indikaattoriin sidotun ekotehokkuus-nimisen kestävyysanalyysin instrumentin vahvuuksien, heikkouksien ja rajoitusten tunnistamista. (Huppes & Ishikawa 2005)

OECD on vuonna 1995 vertailut erilaisia tapoja mitata ekologisten tai ympäristöllisten tavoitteiden saavuttamista. Ekotehokkuus todettiin tällöin paremmaksi mittariksi kuin esimerkiksi ekologinen jalanjälki (Brandsma 1996, OECD 2001). OECD on määritellyt ekotehokkuutta mm. seuraavasti:

- "A management strategy based on quantitative input-output measures which seeks to maximise the productivity of energy and material inputs in order to reduce resource consumption and pollution/waste per unit output and to generate cost saving and competitive advantage. Eco-efficiency is also seen by some as a framework for redirecting the goals and assumptions driving corporate, and potentially government and household, behaviour" (OECD 1997). OECD määritteli myöhemmin ekotehokkuuden tunnusluvun seuraavasti: tuotteiden ja palvelujen arvo jaettuna aiheutetuilla ympäristöhaitoilla (OECD 1998 ja 2008).

- "Ekotehokkuus on kvantitatiivisiin panos-tuotosmittauksiin perustuva toimintastrategia, jolla pyritään maksimoimaan energian ja materiaalien tuottavuus. Tavoitteena on vähentää resurssien kulutusta ja päästöjä tuotantoyksikköä kohti ja samalla tuottaa kustannussäästöjä ja kilpailuetua. Ekotehokkuus voidaan nähdä myös yritysten viranomaisten ja kotitalouksien käyttäytymistä ohjaavana lähestymistapana, jolla pyritään tavoitteiden ja asenteiden muuttamiseen ympäristömyötäisiksi". (KTM 1998, s. 14, perustuen em. OECD:n määrittelyyn 1997)

Ytimekkäämpiä versioita em. OECD-peräisistä määritelmistä ovat mm. seuraavat:

- "Ekotehokkuuden...tavoitteena on tuottaa enemmän vähemmästä" (KTM 1998, s. 9)

- "Ekotehokkuudella tarkoitetaan toimintaa, jonka tavoitteena on tuottaa enemmän palvelua ja hyvinvointia vähemmällä luonnonvarojen kulutuksella" (Rissa 2001, s. 30)

Kahden vuoden välein pidettävä kansainvälinen ekotehokkuuskonferenssi (E/E 2010) on määritellyt ekotehokkuuden ympäristöhaitat jaettuna taloudellisella arvonlisäyksellä (kansantalouden tasolla bruttokansantuotteena). Periaatteessa ekotehokkuuskäsitteessä ympäristöasiat voivat olla joko nimittäjässä tai osoittajassa, ja vastaavasti taloudellinen tekijä osoittajassa tai nimittäjässä.

Alueellisen ekotehokkuuden mittarina on myös käytetty alueen muodostaman taloudellisen arvonlisäyksen ja alueen käyttämien energia- ja materiaalipanosten aiheuttamien ympäristövaikutusten välistä suhdelukua. Ympäristövaikutusten arvioinnissa otetaan siis myös alueen ulkopuolella tapahtuvat välilliset vaikutukset siltä osin kuin on kyseessä alueelle tuotavat tuotteet ja palvelut. Mukana ovat kaikki alueella käytettävien tuotteiden ja palvelujen elinkaariset vaikutukset, mutta pois jäävät alueen ulkopuolelle toimitettujen tuotteiden ja palvelujen vaikutukset. (Seppälä et al. 2005)

Ympäristövaikutusten ja taloudellisen toiminnan keskinäisyhteyksiä on ekotehokkuuskäsitteen ohella tarkasteltu myös käsitteen irtikytkentä avulla. Irtikytkentä (decoupling) kuvaa ilmiötä, jossa taloudellinen kasvu riippuu yhä vähemmän ympäristöön haitallisesti vaikuttavien

toimien (kuten fossiilisten energialähteiden käytön tai päästöjen) kasvusta ja sitä kautta myös ekotehokkuuden toteutumista. Jos ympäristövaikutukset vähenevät tai kasvavat vähemmän kuin taloudellisen toiminnan arvo, irtikykentä toteutuu. Absoluuttinen irtikykentä tarkoittaa sitä, että ympäristövaikutusten kokonaismäärä vähenee ja suhteellinen irtikykentä sitä, että ympäristövaikutukset vähenevät suhteessa tuotettujen tavaroiden tai palvelusten määrään, jolloin niiden kokonaismäärä saattaa edelleen kasvaa, mutta vähemmän kuin niitä aiheuttava taloudellinen toiminta tai talouskasvun kautta saavutettava hyöty. (Van Caneghem et al. 2010)

Irtikytkeytymisen jatkuessa voimakkaasti, ekotehokkuuden mittaaminen suhteessa taloudelliseen kasvuun menettää vastaavasti merkitystään ja rinnalle tai tilalle on kehitettävä muita vertailukohteita ja mittareita. On mahdollista kuvitella tilanne, jossa taloudellinen kasvu jatkuu ilman muutoksia (negatiivisissa) ympäristövaikutuksissa tai jopa niin, että (negatiiviset) ympäristövaikutukset pienenevät ja, ainakin teoriassa, lähestyvät nollaa. Tällöin ympäristövaikutusten ja taloudellisen tuloksen välinen suhdeluku on tulkittava uudella tavalla.

Ekotehokkuus -käsitettä on käytetty apuna myös muiden "eko-käsitteiden" määrittelyssä. "Ekotuotetta voidaan määritellä myös ekotehokkuuden avulla, niin että ekotuotteen ekotehokkuus on suurempi kuin valtaosalla muita samaan käyttötarkoitukseen markkinoilta löytyviä tuotteita" (Nissinen 2004). Ekotuotteen yhteydessä on käytetty mm. seuraavaa määritelmää:

- "Ekotehokkuus = Palvelusuurite/Haitalliset ympäristövaikutukset" (Honkasalo 2010).

"Ympäristövaikutusten ohella ekotehokkuudelle on siis olennaista myös se, miten hyvin tuote palvelee käyttäjää, eli miten suuri hyöty siitä on käyttäjälle." (Nissinen 2004).

Ekotuote eli ympäristöä säästävä tuote voidaan määritellä seuraavasti: "Ekotuotteen haitalliset ympäristövaikutukset ovat pienempiä kuin valtaosalla muita samaan käyttötarkoitukseen markkinoilta löytyviä tuotteita. Ympäristövaikutuksia tarkastellaan tällöin tuotteen koko elinkaaren aikana, eli raaka-aineiden hankinnasta valmistukseen, käyttöön ja loppukäsittelyyn. Ympäristövaikutuksissa otetaan huomioon luonnonvarojen käyttö, ihmisten terveys ja ekologiset seuraukset." (YM 1993, katso myös SFS 1997).

1.2.3 Ekotehokkuuden rinnakkaiskäsitteitä

Kestävä kehitys on YK:n alaisen ns. Brundtlandin komitean vuonna 1987 maailmanlaajuisesti lanseeraama käsite, joka pyrkii yhdistämään ympäristön kannalta, taloudellisesti ja sosiaalisesti kestävä kehittäminen periaatteet yhden käsitteen alle. "Ympäristön" kannalta kestävä on usein määritelty myös "ekologisesti" kestäväksi. Nämä kestävä kehityksen kolme pilaria (joita on viime vuosina ruvettu nimittämään myös yrityksen taloudellisen tuloksen analogiana "kolmoistulokseksi" eli "triple bottom line") on laajalti hyväksytty ja otettu lähes kaikkien kehittämishankkeiden itsestään selväksi perustaksi. Suomen hallitus laati oman kestävä kehityksen ohjelmansa vuonna 1998 (Hallituksen...1998), jossa kestävä kehitys oli kuvattu kolmeksi toisiaan leikkaavaksi ympyräksi "talous", "ympäristö" ja "sosiaalinen". Saksalainen Wuppertal Instituutti lisäsi omaan kestävä kehityksen määritelmäänsä neljännen ulottuvuuden "institutionaalinen", jota perusteltiin sillä, että hyväksi todetut kehittämisehdotukset pitää saada myös hyväksytyksi, jotta ne voidaan toteuttaa (ks. esim. Lahti et al. 2006, s. 31–32).

Ekologiseen kestävyys käsitteeseen liittyvä käsite on ekologinen jalanjälki, jonka alun perin kehittivät kanadalainen William Rees ja saksalainen Mathis Wackernagel yhdessä vuosina 1991–92. Sen aiempi versio oli ”asianmukainen kantokyky” (appropriated carrying capacity), joka yksinkertaistettiin jalanjälki -käsitteeksi ja joka sittemmin on levinnyt laajaan yleiseen käyttöön. World Wildlife Foundation (WWF) julkaisee toistuvasti Living Planet -raporttia, jossa mm. vertaillaan eri maiden jalanjälkiä biologiseen kantokykyyn ja toisiinsa. Sen mukaan maapallon kantokyky pitkällä aikajaksolla on 1,8 hehtaaria asukasta kohti, kun todellinen jalanjälki tällä hetkellä (2007) on 50 % suurempi eli n. 2,7 hehtaaria – Suomessa 7,6 ha ja Yhdysvalloissa noin 8 ha. Nykyistä tuotannon ja kulutuksen kasvuvauhtia seuraten vuonna 2030 tarvittaisiin kaksi maapalloa nykyisen yhden sijasta. Jalanjäljellä havainnollistetaan sitä laskennallista biosfäärin kykyä palautua samalle tasolle, jossa se oli ennen (tietynä ajankohtana vallinnutta luonnonvarojen ja tuotokyvyn tasoa). Sitä mitataan globaaliehtaareina, joka kuvaa sitä biologisesti tuottavaa maa- ja merialuetta, joka tarvitaan sekä yhteisön käyttämien luonnonvarojen tuottamiseen että tuottamien päästöjen ja jätteiden hoitamiseen (palauttamiseen luonnon kiertokulkuun).

Kestävän kehityksen laajuus ja kaikenkattavuus on tehnyt sen käytäntöön sovellettavuudesta hankalaa. Lähes kaikki ominaisuudet mitä arvioitavaan kehittämissivaihtoehtoon voidaan kiinnittää, voidaan katsoa kuuluvan jonkin em. kolmen ulottuvuuden alle ja tätä kautta edellyttää liitettäväksi arviointiin. Siinä tapauksessa käsite lähestyy tai samaistuu tällöin jo perinteisiin kaikenkattaviin arviointiattribuutteihin tai laatusanoihin, kuten ”hyvä”, jolloin sen oma erityislaatu katoaa (ks. esim. Heinonen & Lahti 2002). Sama ongelma koskee myös ekotehokkuuskäsitettä, jos sen sisältöä laajennetaan kattamaan kaikki arvioitavan kohteen laadulliset ominaisuudet kuten väistämättä käy kun käytetään käsitettä ”elämän laatu”.

Ekologia on oppi elävistä organismeista, niiden keskinäisistä suhteista ja ympäristöistä (ks. esim. Niemelä et al. 2011 tai wikipedia hakusanoilla ecology ja ekologia), tarkemmin määriteltynä tieteellistä tutkimusta niistä prosesseista, jotka vaikuttavat organismien levinneisyyteen ja runsauteen, organismien omaan ja organismien välisiin vuorovaikutuksiin sekä energian ja aineen muuntumiseen ja virtoihin. Kaupunkiekologia (urban ecology) yhdistää perus- ja soveltavaa tutkimusta kaupunkiekoljärjestelmäpalvelujen (urban ecosystem services)⁸ monien ulottuvuuksien tutkimukseen ja valaisemiseen (McDonnell 2011) ja se voidaan ymmärtää sekä koko kaupunkijärjestelmän ekologiana (joka sisältää sekä luonnon että ihmisen rakentamat järjestelmät, ecology of cities) että perinteisemmin luontojärjestelmien esiintymisenä kaupungeissa, ecology in cities (ks. esim. Niemelä et al. 2011).

Ekologia on luonnontieteisiin kuuluva tieteenala, jota voidaan arvioida kriittisesti sen perusteella lisäksi se ymmärrystämme tarkasteltavista luonnonilmiöistä ja perustuuko se luotettaviin ja täsmällisiin empiirisiin havaintoihin.

⁸ Sana ekosysteemi (lyhennys käsitteestä ekologinen systeemi eli ekologinen järjestelmä) on jostain syystä (ainakin toistaiseksi) jäänyt suomenkieleen, vaikka tarjolla olisi vastine ekoljärjestelmä. Tämä koskee yhtä hyvin tieteellisiä julkaisuja kuin biologian oppikirjojakin (esim. Lahti, Tolonen & Valste 2007). Sama tilanne on käsitteen ekosysteemi palvelu (ekoljärjestelmä palvelu) kohdalla. Tässä kuvauksessa on käytetty molempia versioita.

Vaikka vahvan korrelaation tunnistaminen loisi tukevan pohjan ilmiön ennustamiselle, se ei välttämättä lisää ymmärrystä ilmiöstä (Haila 1991)⁹. Samalla logiikalla ymmärryksen lisääminen ilmiöstä ei aina paranna sen ennustettavuutta. Ekologiaa voidaan luonnehtia täsmälliseksi (eksaktiksi) vain, jos perustelu on lähtöisin tieteenalan harjoittamisen kautta määritellyistä tavoitteista. (Haila 1991)

Kehitys on ekologisesti kestävä, jos luonnon kasvuvoimaa ei loukata peruuttamattomasti (Haila 1995). Haitallisen muutoksen tyyppisiä ovat saastumisen, elinympäristöjen häviämisen ja ympäristötyyppien köyhtymisen. Yksittäisiä tapauksia arvioitaessa tietyn näkökulman mukainen kriteeri voidaan nostaa ylitse muiden. Kestävän kehityksen ekologisten perustan arvioinnin ja seurannan kriteerejä ovat:

1. saastumistilanteen arviointi ja seuranta
2. elinympäristöjen säilymisen arviointi ja seuranta (ympäristötyyppien/suojelutarpeen inventointi)
3. ympäristötyyppien rikkauden arviointi ja seuranta (ja hallitun hoitamattomuuden periaate)
4. lajistoseuranta, erityisesti indikaattorilajit. (Haila 1995)

Hallitun hoitamattomuuden periaate tarkoittaa sitä, että luonto jätetään silleen hyvin pienessäkin mittakaavassa kaikkialla, missä sitä ei nimenomaan tarvitse muokata, leikata tai myllertää, elinympäristöjen runsauden ja luonnon monimuotoisuuden säilyttämiseksi. Yleiskaavat ja osayleiskaavat ovat niitä kuntien maankäyttöä ohjaavia välineitä, joiden avulla voitaisiin turvata kunnan alueella tyypillisten ja harvinaisten luontotyyppien suojelu. Alueelle luonnostaan ominaisten luontotyyppien suojelu voitaisiin sisällyttää puisto- ja viheralueiden suunnitteluun omaksumalla asemakaavoituksen yhdeksi tavoitteeksi perustaa alueelle luonnonmukaisia puistoja. Myös eri alueiden alttius tunnetuille saastelähteille tulisi huomioida kaavoituksessa. (Haila 1995)

Ekojärjestelmällä (ekosysteemillä) tarkoitetaan luonnonolosuhteiltaan suhteellisen yhtenäisen alueen eliöiden ja elottomien ympäristötekijöiden muodostamaa toiminnallista kokonaisuutta¹⁰. Koko maapallo voidaan käsittää yhdeksi ekojärjestelmäksi, jonka sisällä on monenkokoisia ja monenlaisia "alaekojärjestelmiä". Esimerkkejä ovat ilmakehä, valtameret, jokin nimetty saari, vesireitti, valuma-alue, rannikkovyöhyke, metsänreuna tai jokilaakso. Ekojärjestelmät hyödyntävät ympäristössään saatavilla olevaa energiaa pääosin yhteyttämisen avulla (eli fotosynteesillä auringonsäteilystä) mutta myös kemiallisesti kemosynteesin (epäorgaanisten aineiden hapettamisen) avulla. Aurinkoenergia on tästä syystä keskeisessä asemassa ekojärjestelmien toiminnan kannalta.

Ekojärjestelmäpalveluilla (ekosysteemipalveluilla) tarkoitetaan sellaisia luonnonolosuhteiden tarjoamia aineellisia tai aineisiin liittyviä ominaisuuksia, joista on ihmisyhteisöille hyötyä. Esimerkkejä näistä ovat puhdas ilma ja vesi, kasvuolosuhteiltaan suotuisat maaperä ja vesistöt, syötäväksi tai lääkeaineiksi kelpaavat kasvit, hedelmät, marjat ja sienet, riistaeläimet,

⁹ Lähteessä Tampereen yliopiston ympäristöpolitiikan professori Yrjö Haila arvioi Peter J. Grubbin ja John B. Whittakerin teosta *Toward a more exact ecology*.

¹⁰ Määritelmä on tätä kuvausta varten tehty mukaelma biologian oppikirjan määrittelystä (Lahti, Tolonen & Valste 2007)

vesistöt kulkureitteinä, ilmasto-olosuhteiden tarjoamat lämpötilat, tuulet, kosteus, luonnon tarjoamat virkistys-, esteettiset ja muut kulttuurielämykset jne. Ne ovat luonnontuotteita, jotka ovat tarjolla ihmisestä riippumatta mutta ihmiselle hyödyllisiä. Käytännössä kaikki eliöt ovat keskinäisissä vuorovaikutussuhteissa, joten periaatteessa kaikki eliöt ovat ainakin välillisesti ihmiselle hyödyllisiä. Osa niistä kuitenkin koetaan muita tärkeämmiksi koska ne vaikuttavat välittömämmin tai voimakkaammin ihmisen eloonjäämiseen. Ihminen voi omalla toiminnallaan vaikuttaa ekojärjestelmäpalvelujen muodostumiseen ja tarjontaan, josta syystä kaikkia ihmisen toimenpiteitä voidaan arvioida ekojärjestelmäpalvelujen ylläpidon ja säilymisen näkökulmasta.

Ekojärjestelmäpalvelujen mittaamiseen on kehitetty mm. pinta-alaperusteisia indikaattoreita. Esimerkiksi "biotooppisessa aluetekijässä" (biotope area factor BAF) suhteutetaan ekojärjestelmäpalvelujen kannalta positiivisesti toimiva maa-ala alueen kokonaispinta-alaan¹¹.

BAF (biotooppinen aluetekijä) = ekologisesti tehokas alue / kokonaismaa-ala

Ekologisesti tehokkaiksi alueiksi luetaan kaikkien maan pinnalla olevien viheralueiden lisäksi viherkatot ja -seinät, joilla voidaan kompensoida muista syistä vähäisiksi jääviä viheralueita. Ekologisesti merkittäviksi vaikutuksiksi lasketaan positiiviset mikroilmastovaikutukset ml. ilman hygieeninen laatu, maaperän ja vesiolosuhteiden toimivuuden varmistuminen sekä kasvien ja eläimien elinolosuhteille sopivien alueiden lisääntyvä tarjonta. Em. tekijöiden arvioimisessa käydään läpi seuraavia osatekijöitä: haihduttamiskyky (lisää ilman suhteellista kosteutta), pölynsitomiskyky (poistaa ilmasta terveydelle haitallisia ainesosia), sadeveden suodatus- ja varastointikyky, maaperän kyky suodattaa, estää ja kuljettaa haitallisia aineita sekä kasveille ja eläimille sopivien alueiden määrä. Näillä kriteereillä pienimmän painoarvon (0,0) saavat asfaltti- ja betonipinnat, suurimman (1,0) maaperään yhteydessä olevat viheralueet. Näiden välissä ovat mm. viherseinät (0,5) ja viherkatot (0,7). Erityyppisille ja erilaisilla aluetehtävillä rakennetuille alueille on määritelty omat BAF-rajat, jolloin esimerkiksi asuinalueilla, joilla maan rakennuskäytön tehokkuusluku (site occupancy index, joka on rakennetun ja koko maa-alan suhde) on alle 0,37 BAF pitää olla vähintään 0,6, kun taas 0,5 ja sitä tehokkaammin rakennetuilla alueilla BAF pitää olla vähintään 0,3. (Becker et al. 1990)

Kaupunkien ekologiaa voidaan lähestyä myös ihmisen ja luonnon vuorovaikutuksen näkökulmasta. Kaupunki on inhimillinen luomus, ihmisperäinen artefakti, joka ei sinänsä ole lainkaan sen luonnottomampi kuin esimerkiksi muurahaispesä (Haila 2008). Kaupunki voidaan nähdä geologisena muodostumana, joka tehostaa yhteisöjen mahdollisuuksia varastoida energiaa ja ohjata sen käyttöä. Esimerkiksi rakennukset voidaan tulkita aiemmin tehdyn työn, eli aiemman energiankäytön kiteytyneiksi tuotteiksi, jotka lämpöeristyksensä avulla säästelevät energian tarvetta, ja jotka tarjoamiensa ruoan säilytysmahdollisuuksien

¹¹ The biotope area factor (BAF) designates the ratio of areas of a site that have a positive effect on the ecosystem or an effect on the development of the biotope of a site in relation to the entire area of the site with regard to developed sites. Contrary to other parameters, such as the designation of the level of soil sealing or the parts of a site that are to be left unsealed, the BAF takes not only the areas covered solely by vegetation on undisturbed soil into account, even though these naturally have the highest significance for protecting the function of the ecosystem. Instead, a certain factor, which depends on the type of sealing, is also included for paved surfaces as well as for roofs and windowless external walls if they have vegetation on them. (Becker et al 1990)

kautta tehostavat energian varastointia. Biopoliittisen ajatustavan logiikalla kaupunkeja tulisi suunnitella funktionaalisesti, palvelemaan väestön elinvoimaa, terveyttä, työkykyä ja hyvinvointia. Valtiollinen keskusvalta harjoittaa kuitenkin tyypillisesti sisäistä kolonisaatiota, eli valtakunnan luonnonvarojen mahdollisimman järjestelmällistä valjastamista valtakunnan vaurastumisen palvelukseen. Kaupunki on vuosisatojen saatteessa tuottanut suoraan ja epäsuorasti ne dramaattisimmat ympäristömuutokset, joiden vuoksi ihmiskunnan toiminta maapallolla muistuttaa sotaa muuta luontoa vastaan. (Haila 2008)

Vaikka kaupunki on kasvanut esiin ympäristöstään ja nykyisten kaupunkien ympäristön muodostaa enenevässä määrin koko maapallo, kaupungit ovat riippuvaisia ympäristöstään sitä tiiviimmin mitä suuremmaksi ne kasvavat. Olennaista on se, millaisiksi ihmisyhteisöt ovat toimeentulonsa ekologiset ehdot tulkinneet, millaisessa roolissa luonto esiintyy näissä tulkinnoissa ja minkälaisilla valinnoilla yhteisöt pyrkivät parantamaan toimeentulonsa ekologisia ehtoja. Nykykaupunkien elinvoimaisuuden perustana on maapallon biosfäärin elinvoimaisuus. Elinvoimaisuuden vastakohtana voidaan nähdä haavoittuvuus, jonka vähentämisen tulisi olla rationaalisen ja tulevaisuuteen suuntautuvan luontopoliittikan perusta. Kaupunkien elinvoimaisuutta tulisi siis vaalia ennakoimalla ja torjumalla maapallon biosfäärin haavoittuvuutta aiheuttavia tekijöitä. Kaupunkien ekologinen merkitys on nykymaailmassa suurempi kuin koskaan ennen. (Haila 2008)

Biosfääripoliittikka on tilannesidonnaista ja suhtautuu sen puitteissa kriittisesti lineaariseen, funktionaaliseen optimointiin tukeutuen alan asiantuntijoihin¹². Uudenlaiset rakenteet ja niiden mahdollistamat uudenlaiset symbolisesti merkitykselliset toiminnot voisivat sen sijaan avata tilaa biosfääripoliitikalle. Puhdas funktionaalisuus ei kelpaa kaupunkisuunnittelussa korvikkeeksi entisaikojen valtaa pönkittäväälle ekologisen tilan raivaamiselle, koska funktionaalisuus on aina sidoksissa ennalta määriteltäviin tarkoituseriin, mutta kaupunkien rakenteet ja kaupungit kokonaisuudessaan ovat moniaineeksisiä. Vaikka kaupunki ei ole enää nykyisin itsenäinen taloudellinen ja luontopoliittinen yksikkö, kaupungit ovat luultavasti merkityksellisempiä kuin koskaan aikaisemmin ihmisten elämäntapojen ja käytännöllisten valintojen symbolisia merkityksiä määrävänä todellisuuden piirinä. (Haila 2008)

1.2.4 Ekotehokkuuden matemaattisia määrittelyjä

Yhdyskuntarakenteen kestävyteen kohdistuvassa European Science Foundationin COST Action C8 Sustainable Urban Infrastructure -hankkeessa (Lahti et. al 2006, s. 30) on käytetty OECD:n käyttämää määritelmää, joka vastaa edellä siteerattujen WBCSD:n määritelmien sisältöä ja jonka mukaan ekotehokkuus on elämän laadun suhde ympäristöhaittoihin, voimavarojen käyttöön ja kustannuksiin (1):

$$\text{Eco-efficiency} = \frac{\text{Quality of life}}{\text{Harm to the environment} * \text{Resource use} * \text{Cost}} \quad (1)$$

¹² Haila viittaa mm. matemaatikko Ivar Ekelandiin (2004), joka toteaa vahvassa optimointiajattelun kritiikissään, että optimointi ei sovellu lainkaan yhteiskunnallisen kehityksen kokonaisuuteen. Esimerkiksi luonnonvarojen hoidossa optimointi osoittautuu Walkerin ja Saltin (2006) mukaan käytännössä mahdottomaksi.

Määrittely on puettu matemaattisen kaavan eli osamäärän muotoon. Sen ydinviesti on se, että osoittajassa olevaa tekijää (elämän laatua), pyritään lisäämään kun taas nimittäjässä olevia tekijöitä (ympäristöhaittoja, voimavarojen kulutusta ja kustannuksia) vähentämään. Kumpikin näistä muutoksista lisää ekotehokkuutta, koska niiden suhdeluku (osamäärä) kasvaa. Suhdeluku voidaan yhtä hyvin määritellä edellisen käänteislukuna, jolloin ekotehokkuus kasvaa kun suhdeluku pienenee.

Ekotehokkuuden arvioinnissa tai mittaamisessa kyseessä on aina molempien puolien samanaikainen huomioon otto, mikä onkin toinen "kaavan" oleellisista viesteistä. Ekotehokkuus ei välttämättä parane, jos kiinnitetään huomio vain osoittajan maksimointiin tai nimittäjän minimointiin. Jos voimavarojen kulutusta vähennetään mutta samalla elämän laatu heikkenee samaan tai nopeampaan tahtiin, ekotehokkuus huononee. Tätä määrittelyä kaupunkiympäristöön sovellettuina käytettiin myös tätä tutkimusta edeltävässä tutkimuksessa joka koski Helsingin kaupungin kaavoituksen ekotehokkuustyökalua (Lahti et al. 2010, s. 6), jossa määriteltiin kaupunkiympäristön ekotehokkuus yleistä kaavaa konkreettisemmin näin (2):

$$\text{kaupunkiympäristön ekotehokkuus} = \frac{\text{kaupunkiympäristön tuottama elämän laatu (palvelut ja tuotteet)}}{\text{kulutetut luonnonvarat ja uusiutumattomat energiavarat * päästöt * jätteet}} \quad (2)$$

Verrattuna WBCSD:n määrittelyyn tai OECD:n esittämään yleiseen ekotehokkuuden "kaavaan" eroja on kolme:

- 1) Elinympäristön laatu on täsmennetty kaupunkiympäristön tuottamiksi palveluiksi ja tuotteiksi
- 2) Voimavarojen kulutus on täsmennetty luonnonvarojen ja (erityisesti) uusiutumattomien energiavarojen kulutukseksi ja ympäristöhaitat on täsmennetty päästöiksi ja jätteiksi
- 3) Kustannukset on jätetty pois.

Täsmennykset johtuvat tarpeesta rajoittaa "ekotehokkuuden kovaan ytimeen" eli ekotehokkuuden kaikista oleellisimmiksi katsottuihin osatekijöihin sekä samalla mahdollisimman konkreettisiin ja kohtuullisen helposti kaupunkiympäristössä havaittaviin, arvioitaviin tai mitattaviin tekijöihin. Tarkemmat perustelut em. täsmennyksiin (1–3) ovat:

- 1) Helsingin kaupungin kaavoituksen tarpeisiin laaditussa arviointityökalussa ei elämän tai elinympäristön laatua pyritä kokonaisuutena arvioimaan tai mittaamaan, koska edellytetään, että kaupunkisuunnittelijalla on oman kokemuksensa ja ammattitaitonsa puitteissa riittävästi tietoa ja välineitä arvioida sitä, miten kaupunkiympäristöstä saadaan laadullisesti (toiminnallisesti, esteettisesti jne.) tyydyttävä. Jos halutaan kiinnittää huomiota nimenomaan kaupunkialuetta koskevan suunnitelman ekotehokkuuden parantamiseen, on kuitenkin samalla pidettävä huolta siitä, ettei samalla huononnetta elinympäristön laatua. Jos siitä ei voida olla varmoja, on syytä tehdä erillinen laadun muutoksia koskeva arvio, joka liitetään ekotehokkuusarvioon tulevan päätöksenteon pohjaksi. Ekotehokkuustyökalu ei siis tarjoa uutta viisastenkiveä rakennetun ympäristön joskus hyvinkin hankalaksi osoittautuviin laadun arviointiongelmiiin. Käytännössä ekotehokkuuden arviointi helpottuu jos arvioinnin kohteena

olevien vaihtoehtoisten suunnitteluratkaisujen laadulliset ominaisuudet pysyvät suurin piirtein samalla tasolla. Silloin laadun arvioinnin yksityiskohtiin ei tarvitse erikseen paneutua. Jos merkittäviä eroja jää, on ne syytä kuvata esimerkiksi visuaalisesti ja sanallisesti.

Mitattavuusperustelusta huolimatta määritelmään on kuitenkin jätetty tietty osa vaikeasti mitattavasta "kaupunkiympäristön tuottamasta elämän laadusta". Se on täsmennetty "kaupunkiympäristön tuottamiksi palveluiksi ja tuotteiksi", joka konkretisoi elämän laatua huomattavasti. Kaupunkiympäristön laadun arviointi on tässä muodossa mukana siksi, että halutaan varmistaa se, että voimavarojen kulutusta ja aiheutettuja haittoja voidaan verrata samaan aikaan saavutettavaan hyötyihin. Säästäminen tai haittojen pienentäminen eivät ole itsetarkoituksia, jos samalla unohdetaan toiminnan (tässä: kaupunkiympäristön rakentamisen) alkuperäinen tarkoitus eli ne syyt miksi kaupunkeja ja muita yhdyskuntia ylipäänsä rakennetaan. Voimavarojen säästö on siis perusteltua, mikäli samalla ei aiheuteta sellaista laadun heikkenemistä, että se vaikuttaa kokonaisekotehokkuuden heikkenemiseen. Poikkeuksena ovat sellaiset tapaukset, joissa lähestytään "pakkosäästämistä" eli tilannetta jossa arvokkaat ja saatavilla olevat luonnonvarat uhkaavat ehtyä tai elinolosuhteet käydä sietämättömiksi. Silloin elämänlaadun todennäköistä tai vähintään tilapäistä laskua ei ehkä voida tai halutakaan välttää, koska sen sijaan halutaan välttyä myöhemmiltä, mahdollisesti vielä suuremmilta elinympäristön laadun heikkenemiseltä. Tällaista ympäristöolosuhteiden laadun pysyvän heikkenemisen torjumisen välttämättömyyttä voidaan kutsua ekologiseksi imperatiiviksi¹³, jonka mukaisessa tilanteessa ekotehokkuuden eri osatekijöiden keskinäiset painoarvot voivat muuttua jyrkästikin totutuista (ks. kohdat 1.2.5 ja 1.2.6).

Kaupunkiympäristön tuottamilla palveluilla ja tuotteilla tarkoitetaan niitä fyysisiä tiloja, joita rakennettu ympäristö tarjoaa eri toiminnoille (asumiselle, työnteolle, kaupankäynnille, terveyden- ja sairaanhoidolle, hallinnolle, turvallisuuspalveluille, kulttuuri-, urheilu-, ulkoilu- ym. vapaa-ajan toiminnoille jne. niin sisä- kuin ulkotiloissakin). Fyysiset rakenteet ovat se välitön tulos, jonka toteuttamiseen kaupunkisuunnittelu tähtää. Ne mahdollistavat omalta osaltaan kaikki ne toiminnot, jotka ao. fyysisiä tiloja tarvitsevat.

Suomen ilmasto-olosuhteissa sisätilat ovat lähes kaikissa ihmisen toiminnoissa toimintakyvyn perusedellytyksiä ja siksi niiden tarjontaa voidaan pitää ehkä kaikkein tärkeimpänä yksittäisenä kaupunkiympäristön tuottamien palvelujen ja tuotteiden mittarina. Yksinkertaisimmillaan tämä mittari on alueelle rakennettavan kokonaiskerrosalan määrä (kerros-m² tai kem). Se voidaan tarvittaessa eritellä asuntojen ja toimitilojen kerrosaloiksi tai vielä tarkemmin toimialoittain. Kerrosalan käyttö kaupunkiympäristön tarjoamien tuotteiden ja palvelujen edustajana perustuu oletukseen, että muu fyysinen ympäristö, erityisesti perusrakenteet seuraavat rakennuskannan mukana esimerkiksi keskimääräisoletuksen mukaan arvioituna. Jos oletetaan, että vertailtavien suunnitelmavaihtoehtojen muu kuin kerrosalan ja sitä vastaavan perusrakenteen määrään perustuva ympäristön laatu ei juuri vaihtelee, voidaan ekotehokkuusarviot laskea yksinkertaisesti kokonaiskerrosalan neliömetriä kohti. Silloin myöskään vertailuvaihtoehtojen kokoerot eivät vaikuta ekotehokkuuden

¹³ vastaavaa käsitettä on käytetty mm. Wuppertal Instituutin neliluotteisessa kestävä kehityksen määrittelyssä, jossa jokaisen ulottuvuuden kärki (tetraedrin kulma) on määritelty "imperatiiviksi" eli taloudelliseksi, ekologiseksi, sosiaalisesti ja institutionaaliseksi imperatiiviksi ja kärkien väliset särmät muilla tärkeiksi katsotuilla ominaisuuksilla, kuten talouden ja ekologian välinen suhde ekotehokkuudeksi (ks. Lahti et al. 2006, s. 31–32).

tunnuslukuun eli vaikutukset per kerrosneliö ovat vertailukelpoisia. Kerrosneliöiden sijasta voidaan käyttää myös rakennustilavuutta (rakennus-m³), joka ottaa paremmin huomioon sisäkorkeuksiltaan erilaiset tilat. Suhteuttajana voidaan käyttää myös asukas- ja työpaikkalukuja, jotka kuvaavat kohteen kykyä asuttaa tai tarjota työtiloja uusille asukkaille ja toimipaikoille. Jokaisella mittarilla on omat etunsa ja puutteensa, jotka on syytä tiedostaa ekotehokkuuden tunnuslukuja määrättäessä ja laskettaessa.

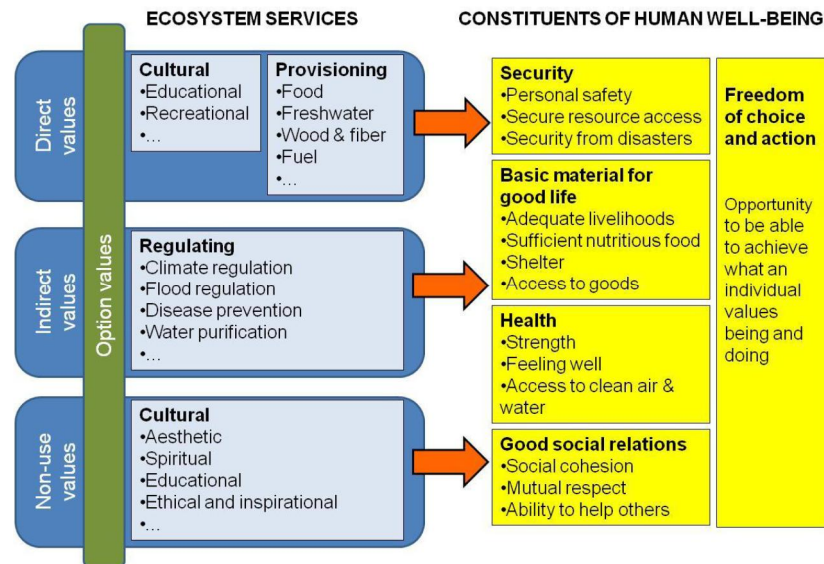
2) Täsmennys uusiutumattomiin energialähteisiin johtuu siitä, että kaikki energiamuodot eivät ole ekotehokkuuden kannalta samanarvoisia. Energiansäästö yleisenä ja erittelemättömänä tavoitteena ei ole riittävä ja voi jopa johtaa harhaan. Esimerkiksi aurinko- tai tuulienergiaa ei ole syytä säästää kuten fossiilisia polttoaineita. Kaikkien energialähteiden yhteenlasku hämärtäisi ekotehokkuuden lisäämisen kannalta olennaista (sen kovan ytimen mukaista) tavoitetta: vähentää riippuvuutta rajallisista fossiilisista ja monia haittoja aiheuttavista energialähteistä. Ympäristöhaittojen täsmennys päästöiksi ja jätteiksi johtuu osittain samoista syistä. Päästöt ilmakehään johtuvat lähinnä uusiutumattomien energialähteiden käytöstä ja niistä ylivoimaisesti merkittävimmäksi katsotaan nykyisin kasvihuonekaasupäästöt. Päästöistä on myös saatavilla jo melko runsaasti mitattavaa ja arviointimalleissa hyödynnettävää tietoa. Sama koskee jätteitä, jotka ovat sekä yhdyskuntien rakentamisen että toiminnan määrällisesti merkittäviä aineellisen kiertokulun osatekijöitä, ja joilla on myös merkittäviä yhteyksiä yhdyskuntien energiantuotantoon (esimerkiksi biojätteiden hyödyntämisen kautta).

3) Kustannuksien arviointi on jätetty pois kahdesta syystä. Ensimmäinen koska kustannukset mittaavat käytännössä suurelta osin voimavarojen (kuten materiaalien ja energian) kulutusta jolloin syntyy päällekkäisyyttä. Saman asian kahteen kertaan mittaaminen vääristää ja hämärtää tulosta samalla kuin se heikentää tuloksen käyttökelpoisuutta päätöksenteossa. Toiseksi kustannusten arviointiin on tarjolla runsaasti vakiintuneisiin käytäntöihin perustuvia arviointitapoja, mm. yhdyskuntatalous-, kaavatalous-, kustannusarviointi- ym. laskentamenetelmiä, jolloin niitä on tarpeetonta sisällyttää ekotehokkuuden arviointityökaluun. Kustannusarviot, kannattavuus- ym. taloudellisuuslaskelmat voidaan ja on usein syytäkin ottaa ekotehokkuusarvion rinnalle päätöksenteossa, samaan tapaan kuin elinympäristön laadun arvioinnit.

Ympäristövaikutusten ja talouden keskinäiskytkennät ovat merkittäviä mm. kahden kansainvälisesti hyvin tunnetun ja laajan selvityksen perusteella. Sir Nicholas Sternin tunnetun ilmastoraportin (2006) mukaan ympäristötietoinen teknologia stimuloi taloutta ja on ennen pitkää taloudellisen kasvun moottori. McKinseyn raportin (2009)¹⁴ mukaan kasvihuonekaasujen vähentämistoimien joukossa on runsaasti sellaisia, jotka samalla vähentävät kustannuksia, mikä osoittaa sen, että ympäristöasioiden huomioon otto ei välttämättä tule kalliiksi edes lyhyellä aikavälillä. Kestävän kehityksen kahta ehkä tärkeimmäksi koettua tavoitetta (ekologiaa ja taloutta) voidaan siis edistää yhtä aikaa jos valitaan oikeat toimenpiteet. Myös ekosysteemipalvelujen taloudellinen merkitys on havaittu merkittäväksi, koska - vain yhtenä esimerkkinä - luonnon tuottamien ilmaisipalvelujen

¹⁴ Pathways to a Low-Carbon Economy, Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve. McKinsey & Company. January 2009. 190 p.
<http://globalghgcostcurve.by.mckinsey.com/>

korvaaminen itse tuotetuilla saattaa maksaa paljonkin jos edes on mahdollista (kuva 3, Spurgeon & Gallagher 2011).



Kuva 3. WBCSD:n määrittelyssä ekosysteemipalveluilla, taloudella ja hyvinvoinnilla on merkittäviä keskinäisyydentekijä (Spurgeon & Gallagher 2011).

Elinympäristön laadun suhteutus ekotehokkuuden kovan ytimen muutokseen voidaan kuvata edellä kuvattuun nähden käänteisesti eli niin, että arvioidaan suhteellisia vaikutuksia, esimerkiksi energiankulutusta tai päästöjä asukasta, työpaikkaa, asunto- tai kerrosneliötä kohti (3). Tällöin ekotehokkuusmittarit ovat edellä esitettyjen kaavojen käänteislukuja, jolloin ekotehokkuus paranee kun suhdeluku pienenee. "Elinympäristön laadun", "hyötyjen" ja "hyötyjen" edustajina toimivat tällöin asukkaat, työntekijät ja rakennettavat asunto- ym. neliot. Kaupunkiympäristön ekotehokkuus koostuu tässä tapauksessa useasta erilaisesta osatehokkuudesta: energiatehokkuudesta, materiaaltehokkuudesta, päästötehokkuudesta jne.

Arvioitavan kohteen ekotehokkuus voidaan myös määrittellä suhteellisenä lukuna (4), jossa otetaan huomioon ekotehokkuuden arviointikriteerien kokonaisuus ja niiden keskinäiset painot.

$$\text{kaupunkiympäristön ekotehokkuus} = \frac{\text{kulutetut luonnonvarat ja uusiutumattomat energiavarat + päästöt + jätteet}}{\text{asukas- ja työpaikkamäärä tai kokonaiskerrosala}}$$

(3)

$$\text{arvioitavan asian ekotehokkuus} = 100 \pm \frac{\sum \text{kriteerin paino} * \text{arvioitavan asian paino ao.kriteerillä}}{\sum \text{kaikkien kriteerien painojen summa}} \quad (4)^{15}$$

Luonnonvaroihin sisältyvät ekotehokkuusarvioinnissa sekä materiaali- että energiavarat tai oikeastaan muutokset niissä eli materiaali- ja energiavirrat rakennetun ja luonnonympäristön välillä. Kyse on sekä tase- että virtalaskelmista. Tämä lähestymistapa vastaa kaupunkiympäristön aineenvaihdunta -käsitettä (urban metabolism), jossa pyritään luomaan kokonaiskuva niistä materiaali- ja energiavirroista, joita kaupunkiympäristön tuottaminen ja käyttö edellyttävät ja synnyttävät koko elinkaarensa aikana. Ekotehokkuustarkastelun keskiössä ("kovassa ytimessä") ovat energiavirroista erityisesti uusiutumattomat energialähteet ja päästöistä kasvihuonekaasut.

Tarkastelun painopisteeseen ovat nousemassa myös ne haitat, jotka aiheutuvat ekojärjestelmäpalveluille eli luonnon "itsestään" ja "ilmaiseksi" tuottamille palveluille. Viimeksi mainittu tekijäryhmä sisältää mm. tarkastelualueella esiintyvän puhtaan ilman ja veden, suotuisat lämpötilat, maaperä- ym. kasvuolosuhteet, marjojen, sienien, riistan ym. alueellisen esiintymisen. Osa niistä voi olla kohtuullisen helposti mitattavia tekijöitä mutta osa jäänee vaikeasti mitattaviksi. Jälkimmäisiin lukeutuvat ainakin luonnon monimuotoisuus ja sellaiset usein monimutkaiset vuorovaikutusmekanismit, jotka vaikuttavat siihen millaisiksi elinolosuhteet lopulta kussakin paikassa muodostuvat. Niiden suhteen ei useinkaan ole tarjolla helppoja ja käyttökelpoisia mittareita, mutta arviointia voidaan edistää asiantuntija-arvioilla tai tarvittaessa erillisselvityksillä. Joka tapauksessa hankaliakin tapauksia varten on mahdollista varata paikka arviointikehikossa, jolloin esimerkiksi ekosysteemipalveluja koskevat muualla tehdyt arviot voidaan liittää kokonaisarvioon.

Ekojärjestelmäpalvelujen mukaan ottoa arviointityökaluun voidaan perustella myös sillä, että niiden poisjättämisen tapauksessa "ympäristöhaittoja" koskeva tekijäryhmä kutistuisi usein vain päästöjen ja jätteiden määrälliseen arviointiin.

1.2.5 Yhteisvaikutuksen arviointi, painotukset ja yhteismitallistaminen

Teoreettisessa mielessä voidaan edellä esitettyjä matemaattiselta näyttävien kaavojen "kerto- tai yhteenlaskuja" kritisoida eri näkökulmista. Kun luonnonvarojen kulutuksen ja ympäristöhaittojen yhteisvaikutus mitataan niiden tulona, voi jommankumman tulotekijän hyvin pieni arvo mitätöidä toisessa tulotekijässä mitatun suurenkin arvon ja (teoreettisessa) ääritapauksessa nollata sen. Mikäli kaava olisi "summamuotoa" (siis: kulutetut luonnonvarat +

¹⁵ kaava on muunnelma seuraavista kaavoista (Nikkanen et al. 2011):

$$\text{impact of indicator} = 100 \pm \frac{\sum (\text{category's weight} * \text{indicators weight on category})}{\sum (\text{total weight of all categories})}$$

$$\text{total impact of indicators} = \frac{\sum (\text{indicators value})}{\text{number of indicators}}$$

ympäristöhaitat), olisivat molempien tekijäryhmien vaikutukset kokonaisuuteen toisistaan riippumattomia. Jos toinen osatekijä on lukuarvoltaan suuri, on sen vaikutus summaankin yhtä suuri. Toisaalta summamuotoinen laskenta edellyttää aina summattavien osatekijöiden yhteismitallisuutta, eli samaa laatuyksikköä, mikä on käytännössä saavuttamaton ihanne. Painomitoissa olevia tekijöitä voidaan periaatteessa laskea yhteen, mutta ei ole mieltä laskea luonnonvarojen kulutuksen kiloja ja päästöjen kiloja yhteen, ei edes hyvin erilaisten ja ominaispainoltaan hyvin eri tasolla olevien rakennusmateriaalien kulutusta. Kilon kulutus sora tai alumiinia ja kilon suuruinen hiilidioksidipäästö ovat tuskin millään kriteerillä ekotehokkuudeltaan samanarvoisia. Näennäisestä yhteismitallisuudesta huolimatta käytännössä jouduttaisiin erilaisia kiloja painottamaan sen mukaan miten arvokkaina, harvinaisina, riittävyden ja käyttötarkoituksen kannalta kriittisinä tai vaikutuksiltaan vahingollisimpina niitä kutakin pidetään.

Ilmastovaikutusten näkökulmasta on kehitetty erilaisten kasvihuonekaasupäästöjen painotusmenettely, jonka tuloksena saadaan hiilidioksidiekvivalentti CO₂ekv. Siinä eri kasvihuonekaasujen kilomääriä painotetaan yhteenlaskussa eri kertoimilla (ks. kohta hiilijälki). Samaan tapaan on kehitetty vastaavat SO₂- ja TOPP-ekvivalentit. Edellinen (SO₂ekv) kuvaa happamoitumista ja lasketaan SO₂, NO_x, HCl, HF, NH₃ ja H₂S -päästöistä ja jälkimmäinen (TOPPEkv = tropospheric ozone precursor potential) otsonin O₃ muodostumista esiasteestaan lähellä maata olevassa ilmakehässä, mikä voi aiheuttaa esim. savusumua kesällä ja lasketaan massaperusteisesti CO, NMVOC (non-methane volatile organic compounds), NO_x ja CH₄ -päästöistä (GEMIS glossary 2010). Mikäli luonnonvarojen ja päästöjen mittauksessa tulevat kyseeseen muutkin kuin painomitat, vaikeutuu yhteenlasku entisestään. Kiloja, metrejä tai sekunteja ei voi yhteenlaskea, sen sijaan niistä voidaan muodostaa tuloja tai osamääriä, kuten mittayksiköissä ominaispaino kg/m³, nopeus m/s tai voima kg*m/s². Osa tällaisista yhdistelmämittareista saattaisi teoriassa olla käyttökelpoinen jonkin tai joidenkin ympäristöominaisuuksien kuvaajana, mutta edelleenkin vaikeaksi tai ratkaisemattomaksi ongelmaksi jäisi "kaikkien" tärkeiksi katsottujen ympäristöominaisuuksien yhteisen mittayksikön muodostaminen.

Edellä oleva "yhteen- ja kertolaskumuotoja" koskeva pohdiskelu on tässä yhteydessä kuitenkin melko teoreettista ja käytännön tarpeille vierasta. Ekotehokkuuden arviointia varten kehitettävä käytännönläheinen ja uskottava "ekolaskuri" ei voi sisältää edellä kuvatuunlaisia monimutkaisia, useamman eri laatuysikön suoria yhteen- tai kertolaskuja. Sen sijaan ekotehokkuuden eri osatekijöitä eli arviointikriteerejä (materiaalien kulutusta, energiankulutusta, uusiutuvien energialähteiden osuutta energiantuotannossa, jätteiden ja kierrätyksen määrää ja ekosysteemivaikutuksia) voidaan "yhteismitallistaa" painottamalla kutakin osatekijää sen mukaan, miten tärkeinä niitä pidetään kokonaisekotehokkuuden muodostumisessa.

Useampien ilmiöiden ja muutosten samanaikainen huomioon otto edellyttää jonkinlaista "yhteismitallistamista". Edellä on kuvattu yhteen- ja kertolaskujen matemaattisia edellytyksiä ja niihin liittyviä ongelmia sekä esimerkkejä kasvihuonekaasujen, happamoitumisyhdisteiden ja otsonin muodostumista edistävien aineiden yhteismitallistamisesta.

Silloin kun kyseessä on eriaikoina ilmenevien vaikutusten yhteismitallistaminen, yleinen käytäntö on diskonttaus. Siinä tulevaisuudessa ilmenevät hyödyt tai haitat arvioidaan yleensä

vähemmän tärkeiksi kuin nykyhetkessä tapahtuvat. Tämä tilanne on lähes poikkeuksetta rahassa mitattavien vaikutusten (kuten menojen tai tulojen) tapauksessa. Tänäpäin saatu sata euroa on arvokkaampi kuin 50 vuoden päästä saatava. Vaikka diskonttaus korko olisi vain 5 %, 100 euron arvo laskee 50 vuodessa tasolle 7,70 euroa. Muutoksen suunta voi periaatteessa olla päinvastainenkin, eli tulevaisuudessa tapahtuvat muutokset (kuten kasvihuonekaasupitoisuuden kasvu) arvostetaan tärkeämmiksi kuin nykyiset, jolloin diskonttaus korko olisi negatiivinen. Tätä voidaan perustella sillä, että kasvihuonekaasun kertyminen ilmakehään huonontaa kiihtyvällä vauhdilla ihmisen kannalta suotuisia sääolosuhteita ja sitä kautta elinolosuhteita. Merkityksen muuttumisen voimakkuutta voidaan säädellä laskennassa käytettävän korkokannan avulla. Yhteiskunnallisissa investoinneissa käytetään yleisesti 4–6 % korkokantaa kun taas yksityistaloudellisessa laskennassa esim. 6–20 % korkokantaa. Negatiivisia korkokantoja ei juuri ole käytetty.

Ylivoimaisesti yleisin ratkaisu useiden hyvin erityyppisten vaikutustekijöiden yhteismitallistamiseen on ollut painokertoimien käyttö. Niiden avulla voidaan enemmän ja vähemmän merkitykselliset asiat saattaa samalle asteikolle ja yhteenlaskukelpoiksi. Menettely vastaa sitä käytännön tapaa, mitä jokainen päätöksentekijä joutuu soveltamaan tehdessään arkipäiväisiäkin valintoja esimerkiksi ajankäyttönsä tai ruokaostostensa suhteen. Tärkeimmiksi ja halutuimmiksi koetut asiat saavat tällöin suuremman painoarvon ja painavat ratkaisussa enemmän kuin muut. Matemaattinen painoarvojen määrittäminen ei tee painotuksesta sen objektiivisempää kuin muunlaiset painotusmenettelyt. Se on vain kvantifioitua (määrämitallistettua), operationalisoitua (helpommin jatkokäsiteltäväksi tehtyä) ja näkyväksi tehtyä subjektiivisten arvostusten asettelua. Avoimuus ja läpinäkyvyys ovat erittäin vaikutusarvioinnin perusedellytyksistä silloin kun halutaan, että useampia ihmisiä koskevista arvioinneista ja niiden oikeellisuudesta halutaan keskustella ennen yhteisiä päätöksiä. Arviointien tukena ja taustalla voi olla runsaastikin objektiivisesti ja fysikaalisin suurein mitattua tutkimustietoa, mutta niiden merkitystä arvioidaan henkilökohtaisen kokemuksen ym. subjektiivisten mielikuvien perusteella.

Eräs tapa lähestyä ilmiöiden merkittävyyden arviointia on luokitella niitä esimerkiksi tärkeiksi ja vähemmän tärkeiksi. "Tärkeitä" voidaan kutsua vaikkapa avain- tai ydinindikaattoreiksi.

OECD on määritellyt ympäristön tilaa kuvaavat avainindikaattorit (key indicators) ja jakanut ne kahteen luokkaan (OECD 2008):

- a) ne joihin löytyy jo tällä hetkellä perustiedot useimmissa OECD-maissa
- b) ne jotka edellyttävät lisäselvityksiä

Avainindikaattorit on valittu OECD:n ympäristöindikaattorien ydinjoukosta (core set of environmental indicators) sillä perusteella, että niillä on yhteyttä merkittäviin politiikkavalintoihin (policy relevance) 2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen ympäristöhaasteiden näkökulmasta, mukaan lukien saastuminen ja luonnonvarojen käyttö ja että ne ovat analyttisesti mahdollisimman eheitä (analytical soundness) ja mitattavia (measurability). Molempiin kategorioihin (a ja b) kuuluu viisi ilmiötä kahdesta ryhmästä (saastuminen sekä luonnonvarat ja omaisuus), mutta niitä kuvaavat indikaattorit vaihtelevat kategorioiden a ja b välillä (kuva 4):

OECD set of key environmental indicators		
POLLUTION ISSUES	Available indicators*	Medium term indicators**
Climate change	1. CO2 emission intensities Index of greenhouse gas emissions	Index of greenhouse gas emissions
Ozone layer	2. Indices of apparent consumption of ozone depleting substances (ODS)	Same, plus aggregation into one index of apparent consumption of ODS
Air quality	3. SO _x and NO _x emission intensities	Population exposure to air pollution
Waste generation	4. Municipal waste generation intensities	Total waste generation intensities, Indicators derived from material flow accounting
Freshwater quality	5. Waste water treatment connection rates	Pollution loads to water bodies
NATURAL RESOURCES & ASSETS		
Freshwater resources	6. Intensity of use of water resources	Same plus sub-national breakdown
Forest resources	7. Intensity of use of forest resources	Same
Fish resources	8. Intensity of use of fish resources	Same plus closer link to available resources
Energy resources	9. Intensity of energy use	Energy efficiency index
Biodiversity	10. Threatened species	Species and habitat or ecosystem diversity Area of key ecosystems

* indicators for which data are available for a majority of OECD countries and that are presented in this report

** indicators that require further specification and development (availability of basic data sets, underlying concepts and definitions).

Kuva 4. OECD:n ympäristön tilaa kuvaavat avainindikaattorit (key environmental indicators) kahdessa, tietojen saatavuuden ja kehittämistarpeen mukaisessa luokassa: Available indicators (a) ja Medium term indicators (b). (OECD 2008 a)

PÄÄSTÖT

- Ilmaston muutos - CO₂ päästötiheydet (intensities), kasvihuonekaasupäästöt
- Otsonikerros - selvästi otsonia hävittävien aineiden (ODS) kulutus
- Ilman laatu - SO_x ja NO_x-päästöjen tiheys
- Jätteiden määrä - yhdyskuntajätteen tiheys
- Makean veden laatu - jäteveden käsittelyn piirissä olevien osuus

LUONNONVARAT

- Makean veden varat - vesivarojen käytön tiheys
- Metsävarat - metsävarojen käytön tiheys
- Kalavarat - kalavarojen käytön tiheys
- Energiavarat - energiankäytön tiheys
- Monimuotoisuus - uhanalaiset lajit

Toiseen eli lisäselvityksiä edellyttävien kategoriaan (b) ja niiden mittareihin kuuluvat seuraavat:

PÄÄSTÖT

- Ilmaston muutos - kasvihuonekaasupäästöt
- Otsonikerros - kuten (a) ja lisäksi yhdistetty ODS-osoitin
- Ilman laatu - ilman saasteille altistuva väestö




- Jätteiden määrä - jätteiden kokonaistiheys, materiaalivirtalaskennasta saatava indikaattori

- Makean veden laatu - vesialueisiin kohdistuva saastumiskuorma

LUONNONVARAT

- Makean veden varat - kuten (a) mutta alueellistettuina
- Metsävarat - kuten (a)
- Kalavarat - kuten (a) mutta läheisempi kytkentä paikallisiin varoihin
- Energiavarat - energiatehokkuusosoitin
- Monimuotoisuus - lajit ja niiden elinpiirit tai ekojärjestelmän monimuotoisuus, avainekojärjestelmien alueet

Toinen tapa ilmaista ympäristön tilaa kuvaavien ilmiöiden huolestuttavuutta (eli tärkeyttä tulevan kehityksen suunnan näkökulmasta) on luokittelu hyvin, keskinkertaisesti tai huonosti hoidettuihin asioihin (kuva 5):

	 [Vihreä valo]	 [Keltainen valo]	 [Punainen valo]
Ilmastonmuutos		<ul style="list-style-type: none"> • Kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen BKT-yksikköä kohden 	<ul style="list-style-type: none"> • Globaalit kasvihuonekaasupäästöt • Lisääntyvät todisteet käynnissä olevasta ilmastonmuutoksesta
Biodiversiteetti ja uusiutuvat luonnonvarat	<ul style="list-style-type: none"> • Metsät OECD-maissa 	<ul style="list-style-type: none"> • Metsänhoito • Suojeluala 	<ul style="list-style-type: none"> • Ekosysteemin laatu • Ekosysteemin laatu • Leviävät vieraat lajit • Trooppiset metsät • Laittomat hakkuut • Ekosysteemin sirpaloituminen
Vesi	<ul style="list-style-type: none"> • Veden pistelähdesaastuminen OECD-maissa (teollisuus, kunnat) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pintaveden laatu ja jätevedenkäsittely 	<ul style="list-style-type: none"> • Veden vähyys • Pohjaveden laatu • Maatalouden veden käyttö ja saastuttaminen
Ilmanlaatu	<ul style="list-style-type: none"> • OECD-maiden SO₂- ja NO_x-päästöt 	<ul style="list-style-type: none"> • PM ja maan tasolla oleva otsoni • Maantiekuljetusten päästöt 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaupunkien ilmanlaatu
Jätteet ja vaaralliset kemikaalit	<ul style="list-style-type: none"> • Jätteidenkäsittely OECD-maissa • OECD-maiden freonipäästöt 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuntien tuottamat jätteet • Kehitysmaiden freonipäästöt 	<ul style="list-style-type: none"> • Vaarallisten jätteiden käsittely ja kuljetus • Jätteidenkäsittely kehitysmaissa • Ympäristössä ja tuotteissa olevat kemikaalit

Kuva 5. OECD:n ympäristökatsauksen mukaan ympäristön tilaa koskevien tietojen puutteita on vielä runsaasti. Kiireellisimpiä ovat "punaisen valon" sarakkeessa mainitut, joista monet koskevat myös kaupunki- ym. rakennettuja alueita (OECD 2008 b)

SELITYKSET: *Vihreä valo* = ympäristöongelmat, jotka on hoidettu hyvin tai joiden hallinnassa on tapahtunut merkittävää parannusta viime vuosina, mutta joiden suhteen maiden tulee olla jatkossakin valppaina. *Keltainen valo* = ympäristöongelmat, jotka ovat edelleen haasteellisia, mutta joiden hallinta paranee, tai joiden tila on tällä hetkellä epävarma tai joista on huolehditu ennen hyvin mutta nykyään huonommin. *Punainen valo* = ympäristöongelmat, joita ei hallita hyvin, jotka ovat pahoja tai pahenevat ja jotka vaativat nopeaa toimintaa. Kaikki suuntaukset ovat globaaleja, ellei toisin mainita.

Elinkaariarvioinnissa (LCA = life cycle assessment) on kehitetty tuotteiden ja palveluiden mittaamiseen ympäristövaikutusten arviointimenetelmiä, joissa on kansainvälisen tutkijayhteisön pohdiskelujen kautta päädytty suosittamaan erilaisten ympäristövaikutusluokkien käyttöä. Ympäristövaikutusluokat kuten ilmastonmuutos, happamoituminen ja vesistöjen rehevöityminen kuvaavat erikseen sovittujen kuormitustekijöiden (esim. rikkidioksidipäästöjen) aiheuttamaa syy-seurausketjua niihin liittyvine vaikutuksineen. Yleisesti käytettyjä vaikutusluokkia niitä synnyttävine päästöineen ja muine tekijöineen ovat:

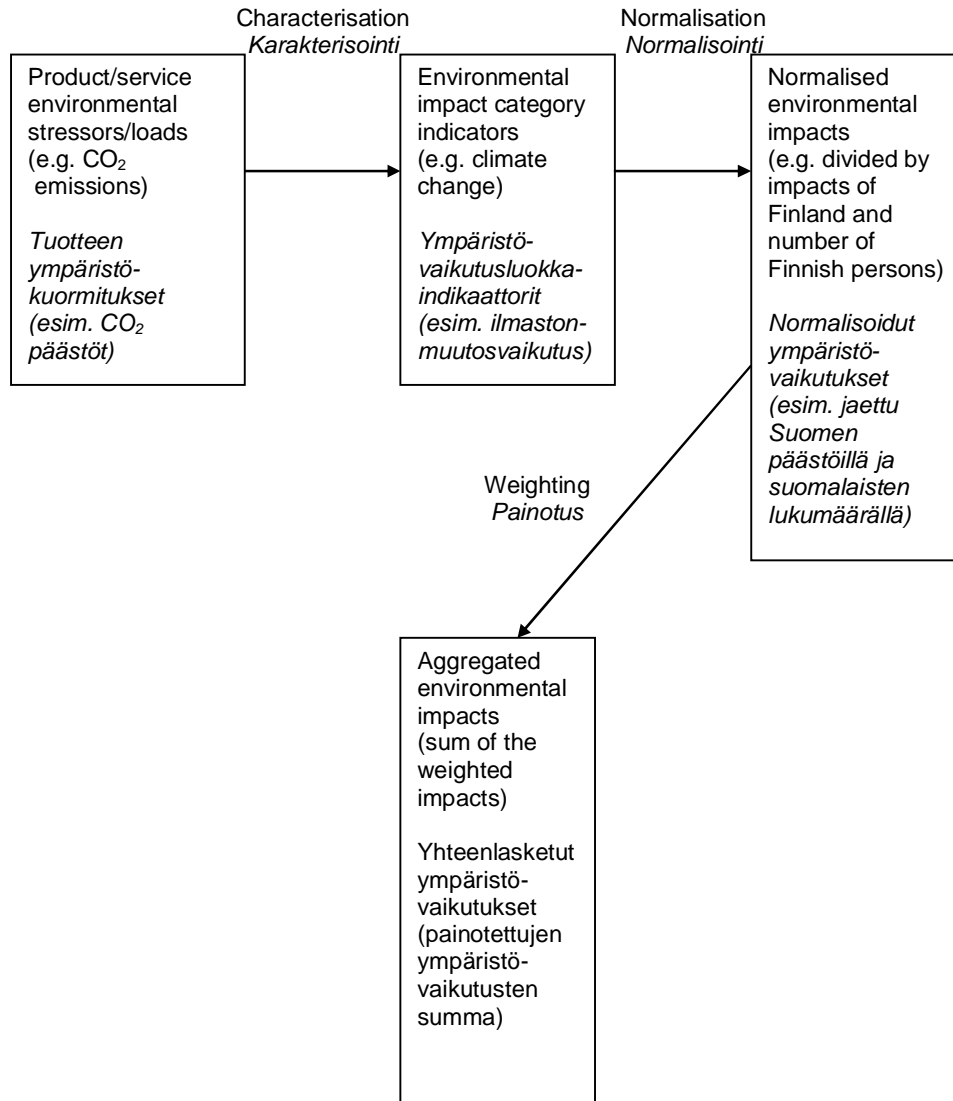
- ilmastonmuutos (CO₂, N₂O, CH₄, F-kaasut)
- yläilmakehän otsonin tuhoutuminen (F-kaasut)
- happamoituminen (SO₂, NO_x, NH₃)
- aläilmakehän otsonin muodostuminen (NO_x, NMVOC)
- kasvillisuus
- ihmisen terveys
- rehevöityminen (N (veteen), P (veteen), NO_x, NH₃)
 - vedet
 - maaympäristö
- pienhiukkaset (primäärihiukkaset PM, sekundäärihiukkaset (SO₂, NO_x, NH₃))
- säteily
- ekotoksisuus (raskasmetallit, orgaaniset yhdisteet, ...)
 - makea vesi
 - merivesi
 - maaympäristö
- toksisuusvaikutukset ihmiseen (raskasmetallit, orgaaniset yhdisteet, ...)
- luonnon monimuotoisuus (maankäyttömuutokset, päästöt)
- maan tuottavuuden heikkeneminen (maankäyttömuutokset)
- luonnonvarojen heikkeneminen (raaka-aineiden otto)
 - uusiutumattomat
 - metallit
 - muut mineraalit
 - fossiiliset polttoaineet
 - uusiutuvat
 - bioperäiset
 - vesi

Elinkaariarvioineissa käytettyjen menetelmien avulla kullekin ympäristövaikutuksia synnyttävälle aktiviteetille voidaan laskea sen aiheuttamat ympäristövaikutukset eri vaikutusluokkaindikaattoreina. Indikaattoriarvojen arviointi pyritään tekemään tieteellisiin tosiasioihin perustuen.

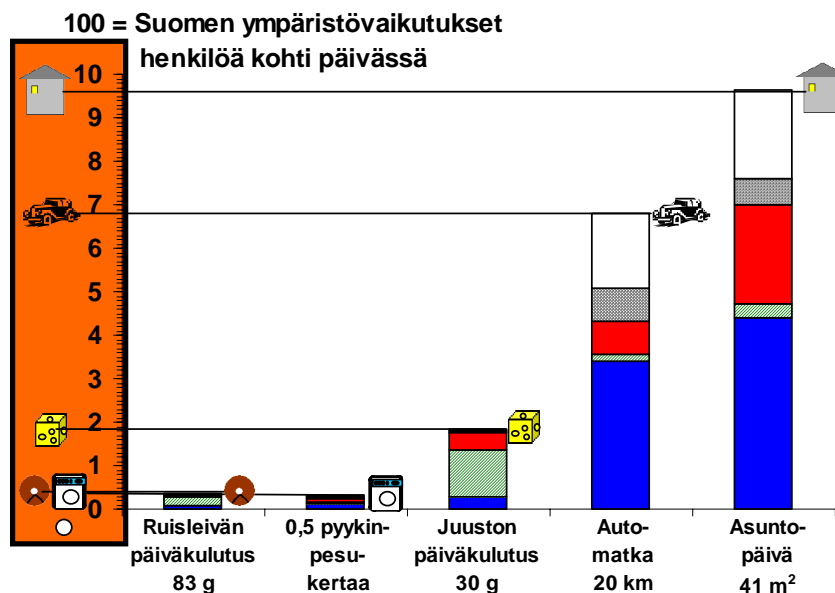
1.2.6 Erilaisten ympäristönäkökohtien yhdistämisestä

Edellä esitetyissä ekotehokkuuden yhtälöissä kriittisinä tekijöinä ovat mukaan otettavat ympäristönäkökohdat ja se kuinka nämä erilaiset ympäristönäkökohdat yhdistetään nimittäjässä tai osoittajassa. Kaikkein aggregoiduin (yhdistellyin) muoto on yksi lukuarvo, jossa erilaiset ympäristövaikutukset on tehty toisiinsa nähden yhteismitalliseksi. Tähän ei ole olemassa objektiivista kaikkien hyväksymää tieteellistä perustaa, vaan kyse on subjektiivisista valinnoista eri ympäristövaikutusten tärkeydestä ja siihen liittyvästä arvottamisesta (ks. myös kohta 1.2.5). Lukuarvojen subjektiivisuuden takia on tyypillistä, että ympäristövaikutukset esitetään omina indikaattoriarvoinaan. Tällöin ekotehokkuutta kuvaavat tunnusluvut (esim. arvonlisäys jaettuna ympäristövaikutuksilla) joudutaan esittämään erikseen kullekin ympäristövaikutusindikaattorille.

Esimerkiksi Mittatikka-hankkeessa (Mittatikka 2009) pyrittiin kuitenkin ympäristövaikutusten yhdistämiseen, jotta kuluttajille voitaisiin kertoa havainnollisesti kulutuksen ja erilaisten tuotteiden ympäristövaikutuksista. Ympäristövaikutukset normalisoitiin suhteuttamalla ne Suomen ympäristövaikutuksien kokonaisuuteen ja painotettiin asiantuntijoiden antamalla painokertoimilla (kuva 6). Tuloksena oli aggregoitu ympäristövaikutusten mittari, josta näkyi myös kunkin ympäristövaikutusluokan suhteellinen merkitys (kuva 7). Mittatikka sisältää nykymuodossaan vain viisi ympäristövaikutusluokkaa, eikä se kuvaa riittävästi alueidenkäytön vaikutuksia.



Kuva 6. Mittatikka-lähestymistapa elinkaariarvioinnilla määritettyjen ympäristövaikutusten yhdistämiseksi yhdeksi indikaattoriksi (Mittatikka 2009).



Ympäristövaikutukset ja niiden painotukset (suluissa):

- Primäärienergiankulutus (0,18)
- Alailmakehän otsonin muodostuminen (0,10)
- Happamoituminen (0,16)
- Vesien rehevöityminen (0,26)
- Ilmastomuutos (0,30)

Kuva 7. Esimerkki "Mittatiku" käyttämästä ympäristövaikutusten eri tekijöiden painotusmenettelystä Suomessa (Mittatikk 2009). Siinä suhteutetaan toisiinsa viisi erilaista ympäristövaikutusta (pylväsosien väri- ja grafiikkasymbolit) niiden "tärkeyden" mukaan. Tärkeyttä kuvaavat painoarvot on kerrottu kaavion alaosassa desimaaliluvuilla, joiden summaksi tulee 1. Ilmastomuutos (0,30) on siten arvioitu kolme kertaa tärkeämmäksi kuin alailmakehän otsonin muodostuminen (0,10) ja lähes kaksi kertaa tärkeämmäksi kuin happamoituminen (0,16). Painokertoimet perustuvat noin sadan ympäristöasiantuntijan näkemysten keskiarvoon. Toisaalta arviointi suhteutetaan aina suomalaisen keskimääräiseen päivittäiseen ympäristövaikutukseen, jota kuvaa luku 100. Kaavion esimerkissä yhden "asuntopäivän" ympäristövaikutus (noin 9,6) on siten vajaat 10 % ja "autopäivän" (noin 6,8) vaikutus vastaavasti vajaat 7 % keskimääräisen suomalaisen kokonaisvaikutuksista. Vastaavalla tavalla voidaan esittää minkä tahansa tuotteen ympäristövaikutukset, jos siitä on tehty elinkaariarviointi.

Mittatikkuihin sisältyvien tällä hetkellä tärkeiksi koettujen ympäristövaikutuksien lisäksi on olemassa joukko muitakin ympäristövaikutuksia, joiden liittämistä Mittatikkuihin harkitaan myöhemmin kun tieto niiden vaikutuksista täsmentyy. Tällaisia ovat mm. uusiutumattomien luonnonvarojen ehtyminen, ihmisten terveydelle vaarallisille aineille altistuminen, pienhiukkasten päästöt, ekotoksisuus (ympäristölle vaarallisten kemikaalien haitallisia vaikutuksia eliöille ekosysteemeissä), myrkyt, maankäyttö (joka vaikuttaa luonnon monimuotoisuuteen) sekä yläilmakerroksen otsonikerroksen heikentyminen (Mittatikkuihin 2009 ja Nissinen et al. 2007)

Matemaattisesti ilmaistuna, erilaisten ympäristövaikutusten yhdistämisessä voidaan elinkaariarvioinnissa käyttää seuraavaa yhtälöä (Seppälä ja Hämäläinen 2001):

$$EI(A) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{I_i(A)}{R_i} \tag{5}$$

missä	$EI(A)$	=	toiminnan tai toimintojen A aiheuttama ekoindeksi
	$I_i(A)$	=	A:n aiheuttama vaikutusluokan i indikaattoriarvo
	w_i	=	vaikutusluokan i painokerroin
	R_i	=	vaikutusluokan i referenssi-indikaattoriarvo

Referenssiarvo kuvaa jonkin valitun alueen R vaikutusluokan indikaattoriarvoa, jonka kaikki alueen toiminnot aiheuttavat. R_i :n laskennan perusteet ovat samat kuin $I_i(A)$:n laskennassa. Painokertoimet w_i kertovat eri vaikutusluokkien keskinäisiä tärkeyseroja. Painokertoimet määritetään arvottamisen avulla eikä sen tekemiseen ole yhtä ja oikeaa menetelmää. Yhtälön (5) mukaista menettelyä on käytetty mm. ENVIMAT-mallissa (Seppälä et al. 2009).

Edellä esitetyn yhtälön erikoistapaus on sveitsiläinen ns. ecoscarsity- menetelmä (kaavat 6-7 ja kuva 8). Siinä luonnonvarojen kulutuksen ja päästöjen tärkeyden arvioinnissa käytetään harvinaisuus- tai niukkuusmittaa (kulutusta suhteessa varantoon) tai ilmiön vakavuusastetta kuvaavaa kriittisten raja-arvojen läheisyysmittaa. Esimerkiksi alueellisten voimavarojen ja päästöjen määrää voidaan verrata vastaaviin seudulla käytettävissä oleviin keskimääräisiin tai kriittisiksi tasoiksi määriteltyihin lukuarvoihin¹⁶:

$$\text{eco - factor} = \frac{1EP}{F_k} \cdot \frac{F}{F_k} \cdot c \tag{1}$$

$$= 1EP \cdot \underbrace{K}_{\text{Characterisation (optional)}} \cdot \underbrace{\frac{1}{F}}_{\text{Normalisation}} \cdot \underbrace{\left(\frac{F}{F_k}\right)^2}_{\text{Weighting}} \cdot \underbrace{c}_{\text{Constant (1e12 UBPa)}} \tag{2}$$

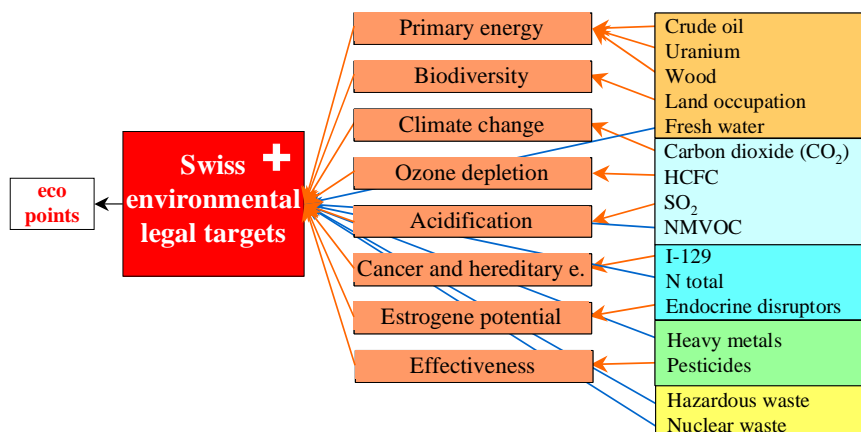
EP : eco - point (the unit)

F : current flow

F_k : critical flow

¹⁶ Esimerkiksi Sveitsissä on kehitetty luonnonvarojen kulutusta ja päästöjen arvioimista varten eräänlainen seudullinen niukkuusmittari tai laskentakaava (Swiss regional scarcity formula). Sen ydinajatus on se, että tarjolla olevien voimavarojen määrä vaihtelee seuduittain jolloin niukkuus on suhteutettava aina paikallisiin olosuhteisiin. Sama koskee esimerkiksi päästöjä, joiden vaikutusten määrä riippuu tarkastelualueen maantieteellisistä perusominaisuuksista.

Yllä olevassa yhtälössä kuvataan vain yhden vaikutusluokan lukuarvoa ekoindeksissä. Eli kun lasketaan A:n ekoindeksi lasketaan eri vaikutusluokkien eco-factorit yhteen. Edelleen yhtälössä EP vastaa yhtälön (4) vaikutusluokkaindikaattorilukua I_i ja F_k referenssitekijää R_i . Painokertoimena w_i on siis F/F_k , joka vastaa ns. "distance-to-target" -painotusmenetelmää. Tämä painotusmenetelmä on pätevä kuitenkin vain jos F_k arvotille pystytään arvioimaan kullekin vaikutusluokalle samanarvoiset kriittiset virrat (Seppälä & Hämäläinen 2001).



Kuva 8. Sveitsiläinen luonnonvarojen käytön, päästöjen ja jätteiden aiheuttamisen seudulliseen esiintymistiheyteen tai saatavuuteen eli niukkuuteen (scarcity) perustuva arvioinnin matemaattinen mittari ja yhteenlaskettuun ekologisuuteen (tuloksena "ekopisteet" eli "eco-points") tähtäävä arviointikehikko, jossa on kahdeksan arviointikriteeriä ja niille kullekin 2–5 erillistä mittaria (Frischknecht et al. 2006).

Erilaatuisten ekotehokkuuden osatekijöiden yhteenlaskussa käytettyjä painotusmenettelyjä on useita. Edellä esimerkein kuvatut painokerroinmenettelyt lienevät yleisimpiä. Painotus voidaan "ohittaa" menettelytavalla, jossa kaikissa arvioitavissa asiakokonaisuuksissa (esimerkiksi maansiirroissa, rakennusten energiankulutuksessa, hulevesien hoidossa jne.) laskettavat pisteet ovat samanpainoisia, mutta jaossa olevien pisteiden määrä vaihtelee. Tärkeimmissä ekotehokkuuteen vaikuttavissa asiakokonaisuuksissa on jaossa enemmän pisteitä kuin vähemmän tärkeissä. Jaettavien pisteiden määrään voidaan päätyä subjektiivisen merkitysarvioinnin kautta suoraan tai konstruoimalla se ao. asiakokonaisuuteen vaikuttavien ekotehokkuuden osatekijöiden (arviointikriteerien) erillispainojen kautta. Jos arviointikriteereihin kuuluvat esimerkiksi materiaali-, energia- ja päästöominaisuudet, on niissä asiakokonaisuuksissa (kuten maansiirroissa tai rakennusten energiankulutuksessa), joissa materiaaleja ja energiaa kuluu paljon tai syntyy runsaasti päästöjä, jaossa paljon ekotehokkuuspisteitä. Pisteet voivat olla joko positiivisia tai negatiivisia sen mukaan, miten paljon "normaalikäytännöstä" tai keskiarvotapauksesta arvioitava kohde poikkeaa. Tällaista menettelytapaa on käytetty Helsingin ja Tampereen kaupunkien HEKO/TEKO-arviointityökalussa (Lahti et al. 2010 ja Nikkanen et al. 2011).

Ilmastovaikutusten torjuntaa pidetään yleisesti kaikkein keskeisimpänä tavoitteena ihmisen luomien järjestelmien ja ekojärjestelmien mahdollisimman häiriintymättömän keskinäisvuorovaikutusten ja ihmisen elinolosuhteiden säilymisen kannalta (ks. esim. OECD

2008). Lukuisat kansainväliset sopimukset ja niitä tukevat kansalliset tavoiteohjelmat osoittavat ilmastomuutoksen torjunnan yhteiskunnallista tärkeyttä (painoarvoa). Tästä syystä kehitettävän työkalun ekotehokkuuden arviointikriteerien painotuksissa on suuri paino asetettava energiatehokkuudelle, uusiutumattomien energialähteiden käytölle ja kasviuonekaasupäästöjen määrälle. Saattaa olla, että sama koskee ennen pitkää myös ekojärjestelmävaikutuksia, mutta sen osalta tarvitaan lisää perusteluja ja mielellään myös mitattavampia arviointimenettelyjä.

Ekotehokkuutta kuvaavia mittareita voidaan kutsua ekotehokkuuden indikaattoreiksi tai osoittimiksi. Indikaattori on osoitin tai mittari jonkin asiantilan tai muutoksen määrälliseksi tai laadulliseksi kuvaamiseksi. Energiankulutus on yksi, uusiutumattomien energialähteiden osuus energiankäytössä toinen, kasviuonekaasupäästöjen määrä on kolmas, materiaalien kulutus neljäs ekotehokkuutta kuvaava osoitin jne. Kukin indikaattori mittaa sen ekotehokkuustekijän muutosta, jota varten mittari sen käyttämine mittayksiköineen on muodostettu. Mittarin ja sen kuvaaman ilmiön vastaavuus tulisi olla mahdollisimman hyvä, jotta indikaattorilla voidaan kuvata ilmiötä luotettavasti. Myös mahdollisimman pieni päällekkäisyys indikaattoreiden (osoittimien) kesken on suotavaa. Täydellistä erillisyyttä on mahdoton saavuttaa koska vaikutustekijät ovat toisiinsa monin tavoin kytkeytyneitä ja moni tekijä toisistaan riippuvaisia (esimerkiksi energiatehokkuus ja uusiutuvien energialähteiden käyttö).

1.2.7 Hiilijälki

Jo muutaman miljoonan vuoden ajan ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on ollut alhaisimmillaan maapallon historiassa, ja maan pinnalla on vallinnut niin kutsuttu suuri jääkausi. Viimeisten 250 vuoden aikana, yhdessä geologisessa silmänräpäyksessä, ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on kuitenkin noussut 250 ppm:sta (tilavuuden miljoonasosasta) yli 390 ppm:aan. Rajun muutoksen on aiheuttanut 1700-luvun puolivälissä käynnistynyt teollistuminen ja fossiilisten polttoaineiden hyödyntäminen. Hiilidioksidin lisäksi maapallon keskilämpötilaa nostavat ihmisen toiminnan seurauksena 82 muuta kasviuonekaasua. IPCC:n määrittämien ilmastonlämmityspotentiaali(GWP)-kertoimien avulla eri kasviuonekaasut voidaan muuntaa yhteenlaskukelpoisiksi hiilidioksidiekvivalenteiksi, mikä helpottaa eri kasviuonekaasupäästöjen yhteisvaikutuksen arviointia. Yhdisteiden erilaisesta pysyvyydestä ilmakehässä johtuen GWP-kertoimet on määritelty erikseen 20, 100 ja 500 vuoden tarkastelujaksoille. UNFCCC:n Kioton-konferenssissa vuonna 1997 sovittiin, että alueellisten kasviuonekaasupäästölaskelmien GWP-kertoimina käytetään 100 vuoden tarkastelujakson arvoja. (UNFCCC 2008, Lounasheimo 2009)

Auringon infrapunasäteilyä tehokkaasti absorboiva vesihöyry on maan ilmakehän tärkein kasviuonekaasu joka aiheuttaa 64 % luonnollisesta, nykyisenkaltaisen elämän mahdollistavasta kasviuoneilmioistä. Siitä huolimatta vesihöyryä ei lueta ilmastosaasteeksi, koska ihmisen aiheuttamien vesihöyrypäästöjen ilmastomuutosvaikutus on mitättömän pieni eikä sitä huomioida päästölaskelmissa. Ilmakehään luonnostaan höyrystyvän veden määrä kuitenkin kasvaa maapallon keskilämpötilan noustessa, jolloin lisääntynyt vesihöyrymäärä lämmittää ilmakehää edelleen ja voimistaa kasviuoneilmioitä positiivisella palautemekanismeilla. Alueellisissa kasviuonekaasupäästölaskelmissa huomioidaan

tavallisesti kolme yleisintä kasvihuonekaasua: hiilidioksidi CO₂, metaani CH₄ ja typpioksiduuli N₂O, jota kutsutaan myös dityppimonoksidiksi tai ilokaasuksi. Muita kasvihuonekaasuja ovat otsoni ja fluoriyhdisteet. (Karttunen & al. 2008, Lounasheimo 2009)

Hiilijäljellä tarkoitetaan toimenpiteen aiheuttamia hiilidioksidiekvivalenteina (CO₂ekv) mitattavien kasvihuonekaasupäästöjen yhteismäärää hankkeen elinkaaren aikana. Hiilidioksidiekvivalentin laskennassa metaani (CH₄)-tonni kerrotaan yleensä luvulla 21 ja dityppioksidi (N₂O)-tonni luvulla 310 ennen yhteenlaskua hiilidioksiditonniin kanssa, koska näiden kaasujen vaikutus ilmakehän lämpenemiseen on arvioitu näiden lukujen osoittamaa kerrointa suuremmaksi kuin hiilidioksidin. Kertoimissa on otettu huomioon keskimäärin 100 vuoden pituinen aikajakso, jolloin vaikutukset ilmenevät. Jos aikaväliksi otettaisiin 20 vuotta, kertoimet olisivat metaanilla 72 ja typpioksiduulilla 289. Metaani kestää ilmakehässä keskimäärin 12 vuotta, dityppioksidi 114 vuotta ja hiilidioksidi satoja vuosia. Hiilidioksidista puolet häipyä 30 vuodessa, 70 % muutamassa vuosisadassa ja 20 % säilyy vuosituhsia. Kioton pöytäkirjassa on em. kaasujen lisäksi käsitelty seuraavia kasvihuonekaasuja: rikkiheksafluoridi SF₆, fluorihilivety HFC ja perfluorihilivety PFC (IPCC 2007, National Geographic 2008, Kioton pöytäkirja 2004).

Taulukko 1: Yleisimpien kasvihuonekaasujen pysyvyys ilmakehässä ja ilmastolämmityspotentiaalit.

Kasvihuonekaasu	Kemiallinen kaava	Pysyvyys ilmakehässä	GWP 20 vuotta	GWP 100 vuotta	GWP 500 vuotta
Hiilidioksidi	CO ₂	vaihtelee	1	1	1
Metaani	CH ₄	9-15 vuotta	56	21	6,5
Typpioksiduuli	N ₂ O	120 vuotta	280	310	170
HFC-23	CHF ₃	264 vuotta	9 100	11 700	9 800
HFC-32	CH ₂ F ₂	5,6 vuotta	2 100	650	200
HFC-41	CH ₃ F	3,7 vuotta	490	150	45
HFC-43-10mee	C ₅ H ₂ F ₁₀	17,1 vuotta	3 000	1 300	400
HFC-125	C ₂ HF ₅	32,6 vuotta	4 600	2 800	920
HFC-134	C ₂ H ₂ F ₄	10,3 vuotta	2 900	1 000	310
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	14,6 vuotta	3 400	1 300	420
HFC-143	C ₂ H ₃ F ₃	1,5 vuotta	460	140	42
HFC-143a	C ₂ H ₃ F ₃	3,8 vuotta	1 000	300	94
HFC-152a	C ₂ H ₄ F ₂	48,3 vuotta	5 000	3 800	1 400
HFC-227ea	C ₃ HF ₇	36,5 vuotta	4 300	2 900	950
HFC-236fa	C ₃ H ₂ F ₆	209 vuotta	5 100	6 300	4 700
HFC-245ca	C ₃ H ₃ F ₅	39 605 vuotta	1 800	560	170
Rikkiheksafluoridi	SF ₆	3 200 vuotta	16 300	23 900	34 900
Perfluorometaani	CF ₄	50 000 vuotta	4 400	6 500	10 000
Perfluoroetaani	C ₂ F ₆	10 000 vuotta	6 200	9 200	14 000
Perfluoropropaani	C ₃ F ₈	2 600 vuotta	4 800	7 000	10 100
Perfluorobutaani	C ₄ F ₁₀	2 600 vuotta	4 800	7 000	10 100
Perfluorosyklobutaani	c-C ₄ F ₈	3 200 vuotta	6 000	8 700	12 700
Perfluoropentaani	C ₅ F ₁₂	4 100 vuotta	5 100	7 500	11 000
Perfluoroheksaani	C ₆ F ₁₄	3 200 vuotta	5 000	7 400	10 700

Suurin osa hiilijäljestä aiheutuu useimmissa tapauksissa polttoaineiden käytöstä energiantuotantoon, kuten talojen lämmitykseen, jäähdytykseen, valaistukseen ja liikenteeseen. Yhdyskuntarakentamisessa energiaa kuuluu kuitenkin jo rakennusmateriaalien ja raaka-aineiden valmistuksessa, kuljetuksissa työpaikalle ja varsinaisessa rakentamisessa.

Nettahiilijäljessä mukaan lasketaan myös toimenpiteessä tarvittaviin välineisiin ja toiminnan tuloksena syntyviin fyysisiin esineisiin sitoutunut hiili, esimerkkinä puutavara ja puupohjaiset rakennusaineet. Samoin mukaan tulisi laskea hiilijälki joka syntyy kaikkien em. esineiden kunnossapidon ja korjauksen aikana sekä silloin kun tuotteet muuttuvat elinkaarensa päässä jätteeksi, tai siirtyvät kierrätyksen kautta uudelleenkäyttöön.

Mikäli toimenpiteen elinkaaren aikana rakenteisiin ja muihin fyysisiin esineisiin sitoutunut hiili on suurempi kuin elinkaaren aikainen hiilipäästö, toimenpiteen hiilijälki on negatiivinen eli ilmakehästä poistuu enemmän hiiltä kuin siihen purkautuu, mikä parantaa maapallon CO₂ekv-tasetta ja jarruttaa ilmasto-vaikutuksen kehittymistä huonoon suuntaan. Elinkaaren pituuden määrittämiseen liittyy monia arviointiongelmia: mikä on tuotteen todennäköinen todellinen elinikä ja miten siihen vaikuttavat muuttuvat olosuhteet, käyttäjien yksilölliset käyttötavat, muuttuvat elämäntilanteet jne., mitä oletetaan luonnosta poistetun biomassan (esimerkiksi hakatun puun) tilalle syntyvän uuden biomassan hiilidioksidin sitomisprosessista (määrä ja nopeus) jne.

IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories tarjoaa tarkat ohjeet YK:n ilmastonmuutoksen puitesopimuksen (UNFCCC) allekirjoittaneiden osapuolten vuosittaiseen kansallisten kasvihuonekaasupäästöjen laskentaan. Viimeisin versio yleisohjeesta on julkaistu vuonna 2006. Ohjeistus kattaa energiantuotannon, teollisuusprosessien, kemikaalien käytön, maa- ja metsätalouden, muun maankäytön sekä jätteistä syntyvät kasvihuonekaasupäästöt. IPCC:n metodologia on kansainvälisesti tunnustettu ja yleisohje määrittelee yleisesti käytetyt eri polttoaineiden päästökertoimet hiilidioksidille ja muille kasvihuonekaasuille (tavallisimmat fossiilisten polttoaineiden päästökertoimet hiilidioksidille, taulukko 2)

Taulukko 2: Fossiilisten polttoaineiden päästökertoimia hiilidioksidille (IPCC 2006, IPCC 2011).

Polttoaine	Päästökerroin hiilidioksidille (g/MJ)
kivihiili	93,7
turve	104,8
maakaasu	54,8
raskas polttoöljy	78,4
kevyt polttoöljy	73,7
dieselöljy	73,6
benssiini	72,9
nestekaasu	64,7
koksi	106,9
koksikaasu	41,1
masuunikaasu	261,1
fossiiliperäinen yhdyskuntajäte	157,4

Paikallistasoista hiilijälkeä laskettaessa valitaan ensin tarkasteltava maantieteellinen alue tai muu systeemi. Laskentamallin valinta asettaa vaatimukset tiedon hankkimiselle, tai usein päinvastoin, tiedon saatavuus asettaa rajoituksia laskentamallin valinnalle. Kun laskentamalli on valittu, kerätään tarvittavat tiedot esimerkiksi energiantuotannon ja liikenteen käyttämistä polttoaineista, elintarviketuotannosta, asumisesta ja jätehuollosta. Laskennan tuloksena

saadaan arvio tarkasteltavan alueen tai systeemin päästölukemista mallin taustaoletusten ja näkökulman mukaisesti laskettuna. Keskeisimpiä mallin näkökulmaan liittyviä kysymyksiä ovat, tarkastellaanko alueen tai systeemin kasvihuonekaasupäästöjä tuotanto- vai kulutuslähtöisesti ja kuinka kattavasti tarkasteltavien osasysteemien koko elinkaaren aikaiset epäsuorat päästöt huomioidaan. (Lounasheimo 2009)

Parhaimmatkaan kasvihuonekaasupäästöjen laskentamallit eivät kuvaa täydellisesti todellisia tutkittavia järjestelmiä tai tuota täysin virheettömiä tuloksia. Laskentamallit ovat yleistyksiä tai yksinkertaistuksia ja sisältävät aina oletuksia, usein myös osittain virheellisiä oletuksia. Laskentamallien tietovaatimusten ja tiedon saatavuuden väliset kuilut saattavat johtaa epävarmuutta entisestään lisääviin ekstrapolointiin ja interpolointiin. Kuntien maailmanlaajuisen ympäristöjärjestö ICLEI:n mukaan aluetasoiisiin kasvihuonekaasupäästölaskelmiin tarvittavaa paikallistason tietoa on usein niin huonosti saatavilla, että alueellisissa mallinuksissa joudutaan tavallisesti yhdistelemään valtakunnallista ja alueellista tietoa. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories:ssa luetellaan keskeisimmät kasvihuonekaasupäästölaskelmia vaikeuttavat epävarmuustekijät.

Päästötietojen saatavuuteen ja päästöjen mittaamiseen liittyvät ongelmat heikentävät merkittävästi laskelmien luotettavuutta. Usein esimerkiksi teollisuuslaitosten päästöt tunnetaan vain normaalikäytön ajalta, jolloin käynnistys- ja alasajovaiheiden päästöt jäävät huomioimatta tai arvailujen varaan. Mittausvirheet tuottavat virheellisiä päästölaskelmia, ja joskus oikeinkin mitatut päästöarvot voivat olla niin pieniä, ettei laskentamallin tarkkuus riitä niiden huomioimiseen. Myös virheelliset päästöluokittelut ja tilastolliset satunnaisvirheet lisäävät päästölaskelmien epävarmuutta. (IPCC 2006, ICLEI 2008)

Lähteet ja viitteet

Becker, Giseke, Mohren & Richard (1990). The Biotope Area Factor as an Ecological Parameter. Principles for Its Determination and Identification of the Target. Excerpt from Landschaft Planen & Bauen. Berlin, December 1990. 24 p.

Brandsma Erik H. (1996). More or Less Sustainable? "Changing Consumption and Production Patterns" UN Economics and Finance Branch, Division for Sustainable Development, Brazil - Norway Workshop Sustainable Production and Consumption - Patterns and Policies. Brasilia, Brazil 25–28 November 1996. (UN website publication 24 March 2003).
<http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/consumption/cp6.htm>

CASBEE (2012). The Background to CASBEE Development. (CASBEE Home page, Updated February 8, 2012). Japan GreenBuild Council (JaGBC) / Japan Sustainable Building Consortium (JSBC), <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/backgroundE.htm>

E/E 2010. www.eco-efficiency-conf.org/content/2010.conference_statement.shtml.

Ekotehokkuus ja factor-ajattelu (1998). Kauppa- ja teollisuusministeriön työryhmä- ja toimikuntaraportteja 1/1998. 45 s.

Frischknecht, Rolf, Roland Steiner, Braunschweig Arthur, Egli Norbert & Hildesheimer Gabi (2006). Swiss Ecological Scarcity Method: The New Version 2006. 4 p.

Gemis Glossary (2010). <http://www.gemis.de/en/glossary.htm>

Haila, Yrjö (1991). Reviews: Exact Ecology. Ecology, Vol. 72, No. 3, p. 1172.

Haila, Yrjö (1995). Kestävän kehityksen luontoperusta; Mitä päättäjien tulee tietää ekologiasta? Suomen kuntaliitto. 89 s.

Haila, Yrjö (2008). Kaupunki luonnonmuodostumana. Yhteiskuntasuunnittelu (2008) vol. 46: 1.

Hallituksen kestävän kehityksen ohjelma. Valtioneuvoston periaatepäätös ekologisen kestävyysedistämistä. 1998. Suomen ympäristö 254. Helsinki. 51 s.

Heinonen, S. & Lahti, P. (2002). Sustainable, Competitive or Good Cities - Bake a Cake or Make a Fake? Futura Volume 21, 2/2002, p. 109–121. ISSN 0785-5494 (print), ISSN 1459-0549 (pdf)

Honkasalo, Antero 2001. Ekotehokkuus, tuotepolitiikka ja ympäristöpolitiikan ohjauskeinot. Helsingin kauppakorkeakoulun julkaisuja, B-37.

Huppes, Gjalt & Masanobu Ishikawa (2005). Why Eco-efficiency? Journal of Industrial Ecology, volume 9, number 4, pages 2-5 (Editorial).

ICLEI (International Council for Local Environmental Initiatives) (2008). Local Governments for Sustainability: International Local Government GHG Emissions Analysis Protocol. Verkkojulkaisu Viitattu 1.7.2011. Saatavilla: <http://www.iclei.org>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 1 General Guidance and Reporting. . Verkkojulkaisu Viitattu 1.7.2011. Saatavilla: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). Fourth assessment report, Working Group I Re-port "The Physical Science Basis". 996 p (Chapter 2 Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. p. 129–234).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2011). National Greenhouse Gas Inventories Programme. NGGIP Publications. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Verkkojulkaisu Viitattu 1.7.2011. Saatavilla: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>.

Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E. & Manner O. (2008). Ilmakehä, sää ja ilmasto. Otava, Keuruu 2008.

Kiotoon pöytäkirja ilmastonmuutoksesta 2002. <http://europa.eu/scadplus/leg/fi/lvb/l28060.htm>

Lahti, Pekka, Enrique Calderón, Phillip Jones, Michiel Rijsberman & Jan Stuij (editors) (2006) Towards Sustainable Urban Infrastructure. Assessment, Tools and Good Practice. European Science Foundation ESF/COST Publication. Helsinki 2006. 336 p. ISBN 978-92-898-0035-8.

Lahti P., Nieminen J. & Virtanen M. (2008), Ekotehokkuuden arviointi ja lisääminen Helsingissä. Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston yleissuunnitteluosaston selvityksiä 2008:2, VTT Tutkimusraportti VTT-R-05674-08. Edita Prima Oy, Helsinki. ISSN 1458-9664, ISBN 978-952-223-254 -0. 106 s. verkkojulkaisuna myös http://www.hel2.fi/ksv/julkaisut/yos_2008-2.pdf

Lahti, P., Nieminen J., Nikkanen A. & Puurunen E. (2010). Helsingin kaavoituksen ekotehokkuustyökalu (HEKO). Espoo 31.8.2010. Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston yleissuunnitteluosaston selvityksiä 2011:21, VTT Tutkimusraportti VTT-R-06550-10. 96 s. ISSN 1458-9664. http://www.hel2.fi/ksv/julkaisut/yos_2011-21.pdf

Lahti, Kimmo, Pasi Tolonen & Juha Valste (2007). Biologia. Elämä. WSOY. 296 s. ISBN 9789510280249.

Lounasheimo, J. (2009). Kasvihuonekaasupäästöjen alueellisten laskentamenetelmien vertailua. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta, Seutu- ja ympäristötieto: YTV-julkaisu. Helsinki 2009.

McDonnell Mark (2011), The History of Urban Ecology, An Ecologist's Perspective (in Niemelä et al. 2011, p. 5–13)

Mittatikku (2009). Mittatikku - väline ympäristövaikutusten havainnollistamiseen. www.ymparisto.fi/mittatikku (päivitetty 8.6.2009).

National Geographic 2008, Special report, Changing Climate (May 2008).

Niemelä Jari, Jürgen H. Breuste, Glenn Guntenspergen, Nancy E. McIntyre, Thomas Elmqvist & Philip James (editors) (2011), Urban Ecology. Patterns, Processes, and Applications. Oxford University Press. 374 p. ISBN 978-0-19-956356-2.

Nieminen, J., Lahti, P., Nikkanen, A., Mroueh, U-M., Tukiainen, T., Shemeikka, J., Huovila, P., Pulakka, S., Cao G., Sun N., Lylykangas K., Liu N. Wu D. & Sun Y. Miaofeng Mountain Town EcoCity. VTT 2010. 249 p.

Nikkanen, Antti, Puurunen Eero & Lahti, Pekka (2011). It takes only two hours to get rough estimate of urban eco-efficiency. World Sustainable Building Conference SB11, Helsinki October 18-21, 2011. Printed Proceedings (Short papers), Vol 2, p. 66–67. Electronic (Full Papers) Proceedings, p. 259–268.

Nissinen, Ari (2004). Julkisten hankintojen ympäristöopas. Suomen ympäristökeskus, Ympäristöopas 113. Edita Publishing Oy, Helsinki. 79 s. ISBN 952-11-1625-0.
www.ymparisto.fi/julkaisut

Nissinen A, Grönroos J, Heiskanen E, Honkanen A, Katajajuuri J-M, Kurppa S, Mäkinen T, Mäenpää I, Seppälä J, Timonen P, Usva K, Virtanen Y and Voutilainen P 2007. Developing benchmarks for consumer-oriented LCA-based environmental information on products, services and consumption patterns. *Journal of Cleaner Production* 15(6): 538–549.

OECD/EPOC(97)3/REV1 (1997)

OECD (2008). *Eco-efficiency*. Paris.

OECD (2008 a). *Key environmental indicators 2008*, OECD Environment Directorate, Paris, France. 36 p. <http://www.oecd.org/dataoecd/20/40/37551205.pdf>. (3.5.2011)

OECD (2008 b). *OECD Environmental Outlook to 2030 Summary in Finnish*
OECD:n ympäristökatsaus vuoteen 2030 saakka. Suomenkielinen tiivistelmä 6 s.
<http://www.oecd.org/dataoecd/30/59/40203336.pdf>

OECD (2008 c). *Environmental Outlook to 2030*, OECD Environment Publication, 05 Mar 2008. 520 p. ISBN 9789264040519 (PDF), 9789264040489 (print) <http://www.oecd-ilibrary.org/docserver/download/fulltext/9708011e.pdf?expires=1304505261&id=id&accname=ocid46013614&checksum=5446378D17654EF12004055B93838178>

Passivhaus-Bauteilkatalog 2008. Ökologisch bewertete Konstruktionen (Details for Passive Houses, A Catalogue of Ecologically Rated Constructions) 2008, Springer-Verlag/Wien. 337 p.

Pathways to a Low-Carbon Economy, Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve. McKinsey & Company. January 2009. 190 p.
<http://globalghgcostcurve.bymckinsey.com>

Rees, William E. (1992). Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanisation* 4 (2): 121–130.

Rissa Kari (2001). *Ekotehokkuus - enemmän vähemmästä*. Ympäristöministeriö, Edita Oyj, Helsinki 208 s.

Schmidheiny, Stephan & the Business Council for Sustainable Development (1992) *Changing Course, A Global Business Perspective on Development and the Environment*. MIT Press. April 1992. 373 p. ISBN 0-262-69153-1.

Seppälä, J. & Hämäläinen, P. 2001. On the Meaning of the Distance-to-Target Weighting Method and Normalisation in Life Cycle Impact Assessment. *Int. J. LCA* 6(4) 211–218.

Seppälä, J., Melanen, M., Mäenpää, I., Koskela, S., Tenhunen, J. & Hiltunen, M.-R. 2005. How to measure and monitor the eco-efficiency of a region. *Journal of Industrial Ecology* 9(4): 117–130.

Seppälä, J., Mäenpää, I., Koskela, S., Mattila, T., Nissinen, A., Katajajuuri, J.-M., Härmä, T., Korhonen, M.-R., Saarinen, M. & Virtanen, Y. 2009. Suomen kansantalouden materiaalivirtojen ympäristövaikutukset ENVIMAT-mallilla (Assessment of the environmental impacts of material flows caused by the Finnish economy with the help of the ENVIMAT model). *Suomen ympäristö 20/2009*, Suomen ympäristökeskus.

SFS 1997. SFS-EN ISO 14040. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Vahvistettu 1997-09-22.

Spurgeon, James & David Gallagher (2011). *Corporate Ecosystem Valuation. Additional Notes A. Selected Ecosystem Valuation Concepts and Issues*. WBCDC Ecosystems. ERM Ltd, January 2011. 6 p.

Stern Review: The Economics of Climate Change. HM treasury (2006). Verkkojulkaisu, tulostettu 13.12.2006. 575 p. + app. http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/

Van Caneghem, J, Block, C, Van Hooste, H & Vandecasteele C. (2010). Eco-efficiency trends of the Flemish industry: decoupling of environmental impact from economic growth. *Journal of Cleaner Production* 18 (2010) 1349–1357.

Wackernagel, Mathis (1991) "Land Use: Measuring a Community's Appropriated Carrying Capacity as an Indicator for Sustainability;" ja "Using Appropriated Carrying Capacity as an Indicator, Measuring the Sustainability of a Community." Report I & II to the UBC Task Force on Healthy and Sustainable Communities, Vancouver.

Wackernagel, M. (1994). *Ecological Footprint and Appropriated Carrying Capacity: A Tool for Planning Toward Sustainability* (PhD thesis). Vancouver, Canada: School of Community and Regional Planning. The University of British Columbia.

WBSCD (The World Business Council for Sustainable Development) (2000). *Eco-efficiency, Creating more value with less impact*. 34 p. ISBN 2-940240-17-5. http://www.wbcsd.org/DocRoot/BugW/jalu0wHL0IMoiYDr/eco_efficiency_creating_more_value.pdf

WBSCD (The World Business Council for Sustainable Development) (1993), <http://www.ec.gc.ca/ecocycle/issue6/en/p2.cfm>

Wursthorn, Sibylle, Poganietz, Witold-Roger & Schebek, Liselotte. 2011. Economic-environmental monitoring indicators for European countries: A disaggregated sector-based approach for monitoring eco-efficiency. *Ecological Economics* 70 (2011) p. 487–496.

YM (1993). *Valtion materiaalihankinnat ja ympäristö*. Työryhmän mietintö 1/1993. Ympäristöministeriö, Helsinki.

Liite 1

Euroopan epäpuhtauspäästörekisterin (EPER) listaus teollisuuden päästöistä ilmaan ja vesiin.

1. Kaasut, erityisesti kasvihuonekaasut	ilma	vesi
CH4	x	
CO	x	
CO2	x	
HFC:t	x	
N2O	x	
NH3	x	
NM VOC	x	
NOX (NO2:na)	x	
PFC:t	x	
SF6	x	
SOx (SO2:na)	x	
kokonaistyyppi N		x
kokonaisfosfori P		x
2. Raskasmetallit	ilma	vesi
Arseeni ja sen yhdisteet (As:na)	x	x
Kadmium ja sen yhdisteet (Cd:na)	x	x
Kromi ja sen yhdisteet (Cr:na)	x	x
Kupari ja sen yhdisteet (Cu:na)	x	x
Elohopea ja sen yhdisteet (Hg:na)	x	x
Nikkeli ja sen yhdisteet (Ni:na)	x	x
Lyijy ja sen yhdisteet (Pb:na)	x	x
Sinkki ja sen yhdisteet (Zn:na)	x	x
3. Klooratut orgaaniset aineet	ilma	vesi
Dikloorietaani-1,2 (DCE)	x	x
Dikloorimetaani (DCM)	x	x
Kloorialkaanit (C10-13)		x
Heksaklooribentseeni (HCB)	x	x
Heksaklooributadieeni (HCBd)		x
Heksakloorisykloheksaani (HCH)	x	x
Halogenoidut orgaaniset yhdisteet (AOX:na)		x
Dioksiinit (PCDD) ja furaanit (PCDF) (TEQ:na eli myrkyllisysekvivalentteina)	x	
Pentakloorifenoli (PCP)	x	
Tetrakloorietyyleeni (PER)	x	
Tetrakloorimetaani (TCM)	x	
Triklooribentseenit (TCB)	x	
Trikloorietaani-1,1,1 (TCE)	x	
Trikloorietyyleeni (TRI)	x	
Trikloorimetaani (kloroformi)	x	
4. Muut orgaaniset aineet	ilma	vesi
Bentseeni	x	
Bentseeni, tolueneeni, etyylibentseeni ja ksyleeni (BTEX:na)		x
Bromattu difenyylietteri		x
Orgaaniset tinayhdisteet (kokonaistina Sn)		x
Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH-yhdisteet)	x	x
Fenolit (kokonaishiilenä C)		x
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC)		x
5. Epäorgaaniset aineet		
Kloridit (kokonaiskloorina Cl)		x
Kloori ja sen epäorgaaniset yhdisteet (kuten HCl)	x	
Syanidit (syaani-ioneina, CN)		x
Fluoridit (kokonaisfluorina F)		x
Fluori ja sen epäorgaaniset yhdisteet (HF:na)	x	
HCN	x	
PM10	x	

(Wursthorn et al. 2011)

Liite 2

Esimerkkejä asuinympäristön materiaali-, energia- ja kasvihuonekaasupäästövaikutuksista (Lahti et al. 2008)

Taulukko 1. Asuinympäristön (asuinrakennusten, asuntoalueen palvelujen, liikenne-, vesi- ja energiahuollon verkkojen) rakentamisen edellyttämät materiaalivirrat keskimääräisessä suomalaisessa asuinympäristössä asunoneliötä kohti (Lahti & Halonen 2006):

puuta	132 kg
betonia	927 kg
muuta kiviaineista	1 395 kg
asfalttia	53 kg
lasia	8 kg
muovia ym. öljypohjaisia aineita	18 kg
metalleja	40 kg

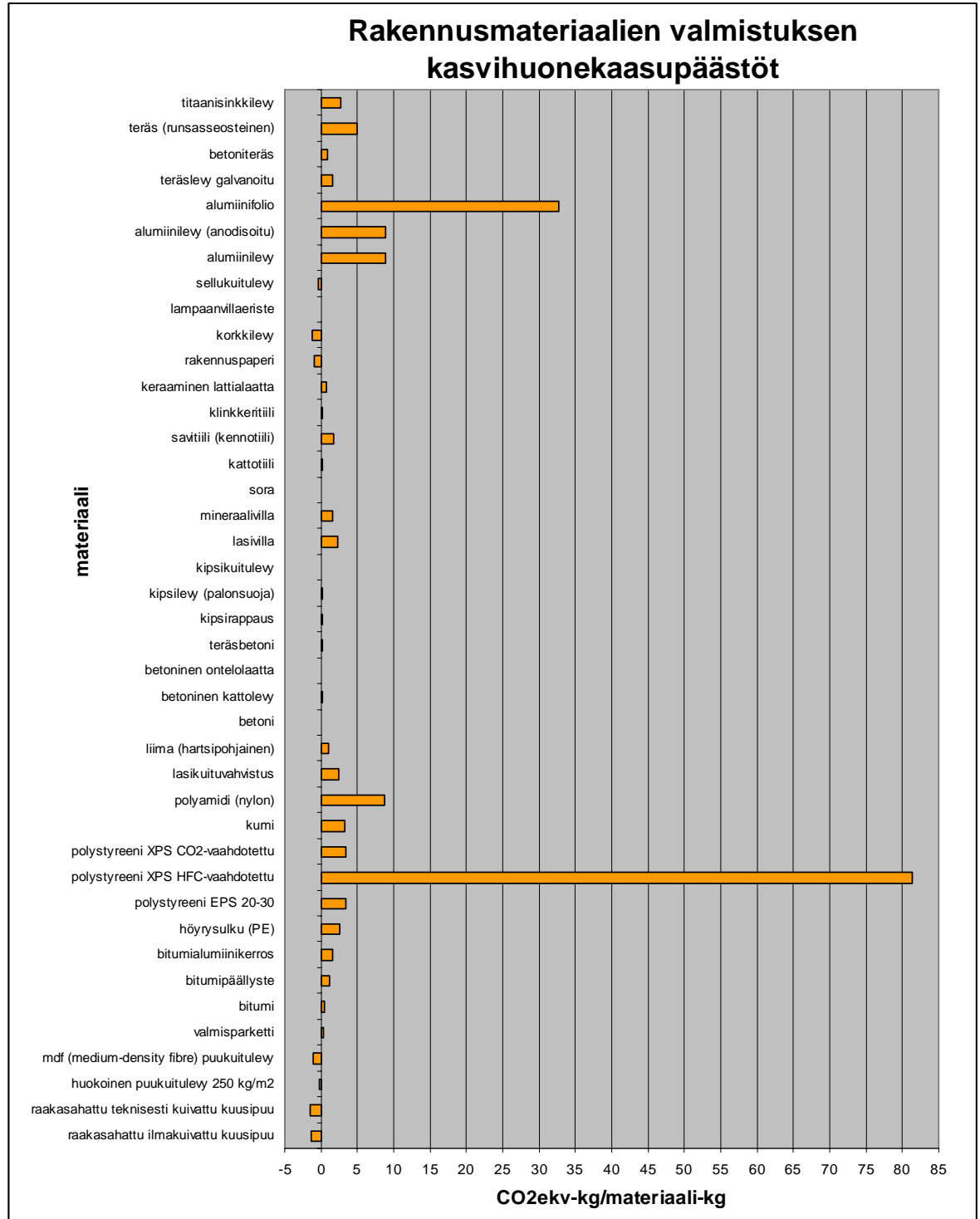
Taulukko 2. Rakennusmateriaalien valmistuksen edellyttämä energiamäärä vaihtelee seuraavasti (Lahti & Kivistö 1979):

alumiini	63,3 kWh/kg
teräs (malmista)	8,4 kWh/kg
teräs (kierrätetty)	3,3 kWh/kg
kupari	13,7 kWh/kg
sementti	1,3 kWh/kg
sora	0,1 kWh/kg
kalkki	1,6 kWh/kg
lasi	5,1 kWh/kg
posliini	6,3 kWh/kg
betoni (valmisbetoni)	0,2 kWh/kg
betoni (elementtinä)	0,4 kWh/kg
kevytbetoni	0,3 kWh/kg
tiili (poltettu savitiili)	0,9 kWh/kg
tiili (kalkkihiekka)	0,3 kWh/kg
mineraalivilla (kivestä)	3,0 kWh/kg
mineraalivilla (lasista)	6,9 kWh/kg
muovi (keskimäärin)	25,0 kWh/kg
muovi (alin arvo)	22,0 kWh/kg
muovi (ylin arvo)	29,0 kWh/kg
puutavara (sahatavara)	0,7 kWh/kg
puulevy	4,1 kWh/kg
paperi	12,5 kWh/kg

Taulukko 3. Materiaalien valmistukseen kuluva luonnonvarojen määrä yhtä valmista materiaalikiloa kohti (Wuppertal Instituutin ja Michael Lettenmeierin laskelmien mukaan, ks. Rissa 2001, s. 63):

lasi	1–3 kg
puu	2–12 kg
paperi	3–15 kg
pahvi	3–15 kg
muovi	5–20 kg
puuvilla	20–160 kg
teräs	7 kg
alumiini	61 kg
kupari	250 kg
kulta	540 000 kg

Kaavio 1. Rakennusmateriaalien kasvihuonekaasupäästöjä (CO₂ekv-kg/materiaali-kg) (Passivhaus-Bauteilkatalog 2008, s. 330–331):.



Kaavio 2. Rakennusmateriaalien kasvihuonekaasupäästöjä ilman polystyreeniä XPS HFC-vaahdotettuna ja alumiinifoliota (CO2ekv-kg/materiaali-kg) (Passivhaus-Bauteilkatalog 2008, s. 330–331).

