

KESTÄVÄN KEHITYKSEN KVANTITATIIVISET ARVIOINTIMENETELMÄT TULEVAISUUDEN-TUTKIMUKSESSA

Jarmo Vehmas & Jyrki Luukkanen

Tiivistelmä

Tässä artikkelissa luodaan katsaus Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa kehitettyihin kestäväen kehityksen arviointimenetelmiin. Dekompositioanalyysi ja sitä varten kehitetyt laskentamenetelmät ovat toimineet lähtökohtana ASA-lähestymistavalle (*Advanced Sustainability Analysis*), ja näiden pohjalta on edelleen kehitetty kokonaan uusia menetelmiä kuten esimerkiksi Kestäväen kehityksen ikkuna (*Sustainability Window*, SuWi-analyysi), LINDA-mallintaminen (*Long-term Integrated Development Analysis*) ja synergia/trade-off-analyysi. Näistä erityisesti LINDA on tarkoitettu erilaisten skenaarioiden laatimiseen, mutta muitakin Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa kehitettyjä menetelmiä voidaan käyttää esimerkiksi trendianalyysiin perustuvien kvantitatiivisten skenaarioiden laatimisen lähtökohtana. Metodologista kehitystyötä on harjoitettu Tulevaisuuden tutkimuskeskuksen tutkimushankkeissa, ja kehitystyö jatkuu edelleen.

Avainsanat: kestävä kehitys, dekompositioanalyysi, kestäväen kehityksen ikkuna, Linda-mallintaminen, *Advanced Sustainability Analysis* (ASA), *Sustainability Window*

1. Johdanto

Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa on tutkittu yhteiskunnalliseen kehitykseen sekä sen ympäristölliseen, sosiaaliseen ja taloudelliseen kestävyyteen liittyviä asioita koko keskuksen olemassaolon ajan. Tutkimuksen juuret juontavat aina 1970-luvun alkuun, jolloin Pentti Malaska¹ (1971) pohti globaalien ympäristöongelmien syitä ja ratkaisumahdollisuuksia kuten samoihin aikoihin samasta aiheesta vilkkaasti debatoineet Barry Commoner ja Paul Ehrlich seuraajineen (ks. Chertow 2000). Commonerin ja Ehrlichin debatin tuloksena syntyi IPAT-identiteetti (emt.), jonka mukaan ympäristövaikutuk-

¹ Pentti Malaska (1934–2012) toimi Turun kauppakorkeakoulussa tilastomatematiikan professorina vuosina 1966–1997. Hän oli myös Tulevaisuuden tutkimuskeskuksen perustaja. Ks. lähemmin Pouru et al. (2017) (toim.) *Pentti Malaska. Ennalta näkijä, edellä kulkija*. Tulevaisuuden tutkimuksen seura, Tulevaisuussarja 8, Turku.

sen (*I, impact*) keskeisimmät syyt ja ratkaisumahdollisuudet liittyvät väestönkasvuun (*P, population*), varallisuuteen (*A, affluence*) sekä teknologiaan (*T, technology*)¹.

IPAT-identiteetin pohjalta on kehitetty myös kansalliselle tasolle ja kohdennettuun empiiriseen analyysiin paremmin soveltuvia identiteettejä, joista tunnetuin lie-nee polttoprosessien hiilidioksidipäästöihin (CO₂) vaikuttavia tekijöitä erittelevä Kaya-identiteetti (Kaya 1990). Siinä selittävinä tekijöinä ovat primäärienergian (TPES) hiili-intensiteetti (CO₂/TPES), primääri- ja loppukäyttöenergian (FEC) suhde eli energajärjestelmän kokonaistehokkuus (TPES/FEC), bruttokansantuotteen (BKT) energaintensiteetti (FEC/GDP), bruttokansantuote henkeä kohti (GDP/POP) sekä väestömäärä (POP):

$$\text{CO}_2 \equiv \frac{\text{CO}_2}{\text{TPES}} \times \frac{\text{TPES}}{\text{FEC}} \times \frac{\text{FEC}}{\text{GDP}} \times \frac{\text{GDP}}{\text{POP}} \times \text{POP}$$

Kaya-identiteetissä oikean puolen tekijät on lavennettu selittämään vasemmalla puolella olevaa muuttujaa, joten se pitää aina paikkansa. Identiteettiä voidaan käyttää hyväksi sekä jo tapahtuneen muutoksen selittämisessä että tulevien kehitysvaihtoehtojen määrittämisessä. Niinpä Kaya-identiteetti on ollut Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa kehitetyissä kestäväen kehityksen arviointimenetelmissä yhtenä keskeisenä lähtökohtana.

Seuraavassa luvussa käsitellään menetelmällistä peruslähestymistapaa eli tarkasteltavaan ilmiöön vaikuttavia tekijöitä ja niiden vaikutuksia erottelevaa dekompositioanalyysiä, josta Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa on kehitetty erilaisia versioita. Ne puolestaan ovat vaikuttaneet oleellisesti eräiden muiden menetelmien kehittämiseen, joista tässä artikkelissa esitellään kestäväen kehityksen arviointimenetelmä *Advanced Sustainability Analysis* (ASA) (vakiintunutta suomenkielistä vastinetta ei ole) luvussa 3, Kestäväen kehityksen ikkuna luvussa 4 ja LINDA-mallintaminen luvussa 5. Luvussa 6 tuodaan esille näihin menetelmiin liittyviä jatkokehitystarpeita.

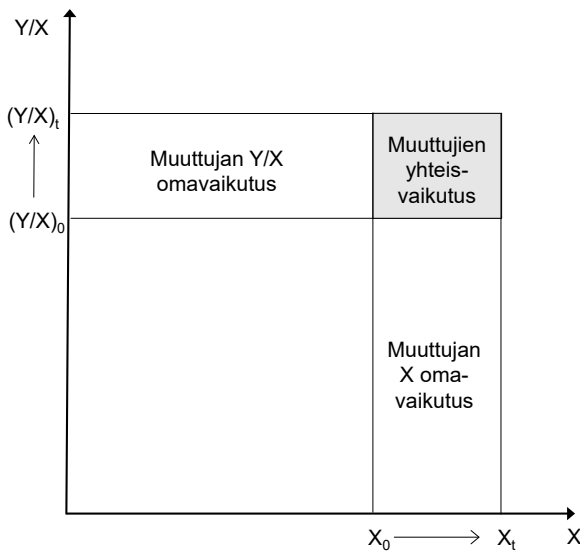
2. Dekompositioanalyysi

IPAT- ja Kaya-identiteetit ovat tarjonneet lähtökohdan ympäristövaikutusten syiden ja kestäväen kehitykseen vaikuttavien tekijöiden empiiriselle tarkastelulle. Eräs tähän tarkoitukseen käytetty menetelmällinen lähestymistapa on dekompositioanalyysi. Siinä ideana on laskea, miten etukäteen määritellyt tekijät ovat vaikuttaneet esimerkiksi energiankulutukseen, materiaalien kulutukseen, hiilidioksidipäästöihin tai johonkin muuhun selitettävään asiaan. Esimerkiksi kokonaisen energiankulutuksen muutos voi johtua muutoksesta energiaa kuluttavien toimintojen

Dekompositioanalyysin ideana on laskea, miten etukäteen määritellyt tekijät ovat vaikuttaneet esimerkiksi energiankulutukseen, materiaalien kulutukseen, hiilidioksidipäästöihin tai johonkin muuhun selitettävään asiaan.

¹ Myöhemmin IPAT-identiteettiin on lisätty kulutus (C), joka riippuu ihmisten tekemistä valinnoista (Waggoner ja Ausubel 2002; York et al. 2003). Tämä laajennus tunnetaan ImPACT-identiteettinä.

laajuudessa eli aktiviteettitekijästä, muutoksesta energian kulutuksen tehokkuudessa eli intensiteettitekijästä tai muutoksesta energiankulutuksen rakenteessa eli rakennetekijästä (Kasanen 1990). Energiankulutuksen rakenne voi liittyä sekä erilaisiin energiaa kuluttaviin toimintoihin (sektoreihin) että erilaisten energialähteiden käyttöön. Kunakin etukäteen valitun tekijän vaikutus (omavaikutus) voi olla joko kokonaisenergiankulutusta lisäävä tai vähentävä, jonka lisäksi tekijöillä on myös yhteisvaikutus. Kuva 1 havainnollistaa omavaikutuksia ja yhteisvaikutusta yksinkertaisessa kahden selittävän muuttujan tapauksessa, jossa kumpikin vaikuttava muuttuja lisää selitettävän muuttujan arvoa. Kuvan 1 yhteisvaikutuksen tarkastelu on ollut lähtökohtana Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa kehitetylle kestävästä kehitystä kuvaavien indikaattoreiden synergia/trade-off-analyysille (ks. Luukkanen et al. 2012a; Mainali et al. 2018). Siinä yhteisvaikutuksen suuri suhteellinen osuus viittaa voimakkaaseen synergiaan muuttujien välillä.



Kuva 1. Kahden selittävän muuttujan (X ja Y/X) omavaikutukset ja yhteisvaikutus muuttujaan Y , kun $Y = X(Y/X)$.

Dekompositioanalyysi voidaan jakaa indeksidekompositioanalyysiin (*index decomposition analysis, IDA*) ja rakenteelliseen dekompositioanalyysiin (*structural decomposition analysis, SDA*). Ensiksi mainitussa käytetään tilastollista aikasarja-aineistoa, kun taas jälkimmäisessä hyödynnetään panos-tuotostaulukoita. Erilaisten menetelmien tai dekompositiotekniikoiden erot ovat kuitenkin ensisijaisesti matemaattisia. Samakin menetelmä voi olla additiivinen (dekompositio syntyy selittävien vaikutusten summana) tai multiplikaatiivinen (dekompositio syntyy selittävien vaikutusten tulona). Tarkasteltavan aikavälin suhteen useimmat dekompositioanalyysit ovat kumulatiivisia eli tarkastelu tehdään suhteessa valittuun kiinteään perusvuoteen. Tarkastelu voidaan kohdistaa myös vuotuisiin muutoksiin, jolloin perusvuosi liukuu ja dekompositio on

inkrementaalinen. Nykyaikaiset menetelmät tuottavat aina täydellisen dekomposition eli selittämätöntä jäännöstermiä eli residuaalia – joka usein kuvaa selittävien muuttujien yhteisvaikutuksia – ei ole, vaan se allokoidaan matemaattisesti analyysiin mukaan otetuille selittäville muuttujille.

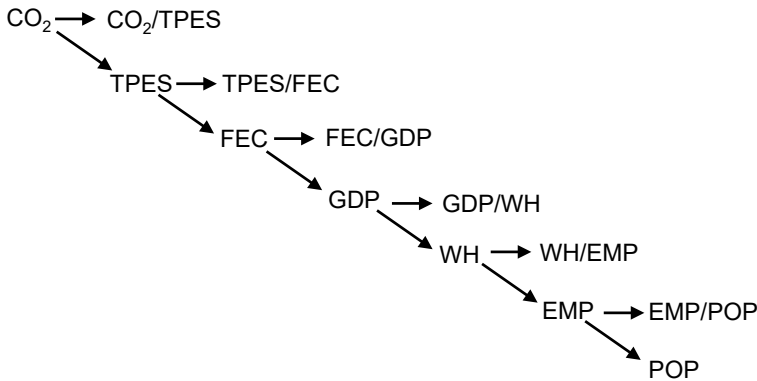
Nykyisin yleisimmin käytetty dekompositiomenetelmä on LMDI-dekompositio (*Logarithmic Mean Divisia Index*), jonka käyttöä on suositeltu ja ohjeistettu erityisesti *Energy Policy* -lehdessä (Ang 2004; 2005; 2015). LMDI-menetelmässä käytetään selittävien muuttujien muutosten logaritmisia keskiarvoja. Koska logaritmifunktio on määritelty vain positiivisille luvuille, aineistoon sisältyvät nolla- ja negatiiviset arvot vaativat erityistoimenpiteitä (ks. Ang & Liu 2007a; 2007b). Tämän vuoksi LMDI-menetelmän käyttämistä ei suositella, jos aineisto sisältää paljon negatiivisia muutoksia (de Boer & Rodrigues 2020).

Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa on kehitetty Laspeyres-indeksiin perustuva menetelmä, joka tuottaa täydellisen dekompositon jaotellessaan tarkastellun muutoksen aktiviteetti-, intensiteetti- ja rakennetekijälle ”*jointly created, equally distributed*”-periaatteen mukaisesti (Sun 1996; 1998b; Sun & Ang 2000; Ang et al. 2003). Se on arvorobusti, eli menetelmän soveltamisessa ei ole muuttujien arvoista riippuvia rajoitteita. Menetelmää on Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa käytetty monien maiden energiankulutuksen (Sun 1998a; 1998b; 2003; Sun & Meristö 1999), energiantensiteetin (Sun 1998b), hiilidioksidipäästöjen (Sun 1999; Sun & Ang 2000), hiilidioksidintensiteetin (Sun & Malaska 1998; Sun 2000), materiaalivirtojen (Hoffrén et al. 2000) sekä Suomen bruttokansantuotteen (Luukkanen et al. 2000) muutosten tarkastelemiseen. Menetelmästä kehitetty dynaaminen versio mahdollistaa vuosittaisen tarkastelun, jota on sovellettu energiankulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen muutoksen tarkasteluun monissa maissa (ks. Luukkanen & Kaivo-oja 2002a; 2002b; 2002c; Kaivo-oja & Luukkanen 2004; Kaivo-oja et al. 2014a; Vazquez et al. 2015). Kirjallisuudessa menetelmä tunnetaan Sun/Shapley-menetelmänä (Ang 2004; ks. myös Albrecht et al. 2002).

Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa kehitetty kahden selittävän muuttujan ketjutettu dekompositioanalyysi perustuu myös Sun/Shapley-menetelmään. Ketjutuksessa ensimmäisen kahden selittävän muuttujan dekompositioanalyysin tulos otetaan seuraavan dekomposition lähtökohdaksi. Kuvan 1 mukainen yhteisvaikutus voidaan jakaa tasan molemmille selittäville muuttujille, mutta se voidaan myös jakaa esimerkiksi kokonaan ketjutuksessa edelleen dekomponoitavalle muuttujalle tai selittävien muuttujien suhteellisten muutososuuksien perusteella. Jaottelutapa luonnollisesti vaikuttaa aineistosta riippuen hieman analyysin tuloksiin. Ketjutettu dekompositioanalyysi soveltuu parhaiten käytettäväksi silloin, kun analyysiin sisällytettävien muuttujien välillä on teoreettisesti mielekäs ja looginen kausaalisuhde.

Kuvassa 2 on esitetty ketjutukseen sopivan Kaya-identiteetin laajennettu versio, jossa hiilidioksidipäästöjä (CO₂) selitetään primäärienergialla (TPES) ja sen hiili-intensiteetillä (CO₂/TPES), primäärienergiaa loppukulutusenergialla (FEC) ja energiajärjestelmän kokonaishyötysuhteella (TPES/FEC), loppukulutusenergiää bruttokansantuotella BKT (GDP) ja sen energiantensiteetillä (FEC/GDP), bruttokansantuotetta tehdyn

työn määrällä (WH) ja työn tuottavuudella (GDP/WH), tehdyn työn määrää työvoiman määrällä (EMP) ja työajalla per työntekijä (WH/EMP), ja lopuksi työvoiman määrää selitetään työllisyysasteella (EMP/POP) ja väestön määrällä (POP).



Kuva 2. Kaya-identiteettiin perustuva hiilidioksidipäästöjen ketjutettu dekompositio.

Ketjutettua dekompositioanalyysiä on Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa käytetty monien eri maiden hiilidioksidipäästöjen dekomponointiin (Vehmas 2009; Vehmas et al. 2012; Luukkanen et al. 2015b). Siitä on kehitetty myös inkrementaaliseen laskentaan perustuva versio, jossa vuosittaisista muutoksista lasketut tulokset voidaan esittää mille tahansa osalle tarkasteltavaa aikaväliä summaamalla kunkin selittävän muuttujan vuotuiset vaikutukset kumulatiivisiksi arvoiksi. Ketjutettua inkrementaalista dekompositioanalyysiä on sovellettu EU-maiden energiankulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen tarkasteluun (ks. Vehmas et al. 2018; 2019a; 2019b).

Tilastoaineistoon perustuvan indeksidekompositioanalyysin tuloksia voidaan käyttää hyväksi laadittaessa skenaarioita esimerkiksi tulevaisuuden energiankulutuksesta, materiaalien kulutuksesta tai hiilidioksidipäästöistä. Tällöin voidaan tehdä oletuksia energiankulutukseen vaikuttaneiden selittävien muuttujien kehityksestä. Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa kehitettyjä menetelmiä on käytetty myös tähän tarkoitukseen. Perinteistä aktiviteetti-, intensiteetti- ja rakennetekijän sisältävän Sun/Shapley-dekompositioanalyysin tuloksia on käytetty energiankulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen trendien hahmottamiseen (Sun 2001; Luukkanen & Vehmas 2003; Luukkanen et al. 2005).

3. Advanced Sustainability Analysis (ASA)

Vuonna 1987 Ympäristön ja kehityksen maailmankomissio julkaisi Yhteinen tulevaisuutemme -raportin (WCSD 1987) ja esitteli kestävän kehityksen käsitteen ja sen ympäristöllisen, sosiaalisen ja taloudellisen ulottuvuuden. Tämä synnytti aihepiiriä koskevia tutkimushankkeita ja ajatuksia muun muassa teknologisen kehityksen ja rakennemuutoksen myötä lisääntyvästä tuotannon dematerialisaatiosta, kulutuksen immaterialisaatiosta, taloudellisen kasvun aiheuttamasta rebound-vaikutuksesta ja hyvinvointituottavuudesta (Malaska 1997; 1999; Malaska et al. 1999). IPAT-identiteetin soveltaminen kestävän kehityksen eri ulottuvuuksien analysointiin tuotti systemaattisen teoreettis-metodologisen viitekehyksen, jota kutsuttiin aluksi *Total Environmental Stress (TES)* -lähestymistavaksi (Kaivo-oja et al. 2001a), mutta jonka nimeksi vakiintui *Advanced Sustainability Analysis (ASA)* (Kaivo-oja et al. 2001b; 2002).

ASA-lähestymistavan lähtökohtana on kaksi kestävän kehityksen peruspostulaattia, joiden mukaan ympäristön kokonaiskuormitus ei saa kasvaa eikä sosiaalinen kokonaisyhyvinvointi pienentyä.

ASA-lähestymistavan lähtökohtana on kaksi kestävän kehityksen peruspostulaattia, joiden mukaan ympäristön kokonaiskuormitus ei saa kasvaa eikä sosiaalinen kokonaisyhyvinvointi pienentyä. ASA siis keskittyy pelkästään muutosten tarkasteluun, ei ympäristön kuormituksen tai hyvinvoinnin absoluuttiseen mittaamiseen. Muutosten tarkasteluun käytetään olemassa olevia indikaattoreita, joiden valinta luonnollisesti asettaa omat haasteensa vaikuttaessaan tuloksiin. Siksi analyysijä tehdään useimmiten usealla indikaattorilla, jotta ympäristön ja sosiaalisen hyvinvoinnin tilasta saataisiin monipuolisempi kuva.

Alkuperäisessä muodossaan ASA sisältää IPAT-identiteetistä johdetut ympäristön kokonaiskuormituksen master-yhtälöt tuotannolle, työllisyydelle, sosiaaliselle hyvinvoinnille ja talouden rakennemuutokselle (Kaivo-oja et al. 2001a; 2001b; 2002). Tuotannon master-yhtälössä materiaalien käytön (MF) muutosta selitetään muutoksella tuotannon materiaali-intensiteetissä (MF/GDP), henkeä kohti lasketulla bkt:lla (GDP/POP) ja väestömäärässä (POP):

$$MF = POP \times \left(\frac{GDP}{POP} \right) \times \left(\frac{MF}{GDP} \right)$$

Työllisyyden master-yhtälössä materiaalien käytön (MF) muutosta selitetään työn materiaali-intensiteetin (MF/EMP), työllisyyden (EMP/POP) ja väestömäärän (POP) muutoksilla:

$$MF = POP \times \left(\frac{EMP}{POP} \right) \times \left(\frac{MF}{EMP} \right)$$

Hyvinvoinnin master-yhtälöissä materiaalien käytön (MF) muutosta selitetään sosiaalisen hyvinvoinnin (WF) ja sen materiaali-intensiteetin (MF/WF) muutoksella, ja hyvinvoinnin muutosta selitetään bkt:n (GDP) ja sen hyvinvointituottavuuden (WF/GDP) muutoksella:

$$MF \equiv \frac{MF}{WF} \times WF$$

$$WF \equiv \frac{WF}{GDP} \times GDP$$

Rakennemuutoksen master-yhtälössä talous jaetaan kahteen sektoriin, joiden materiaali-intensiteetit eroavat huomattavasti toisistaan:

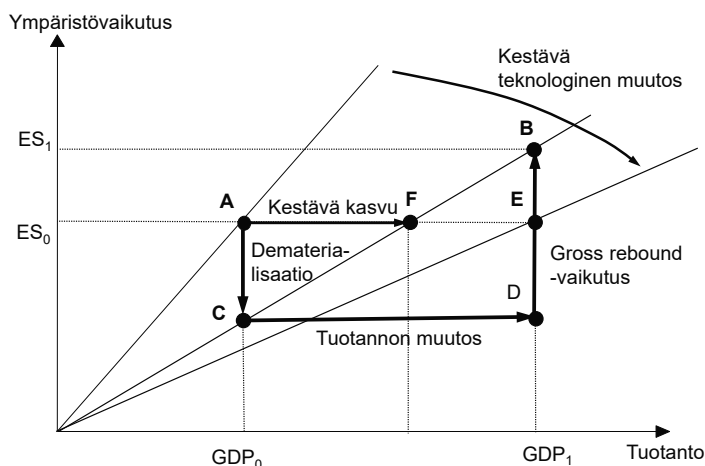
$$\frac{MF}{EMP} = \left(\frac{MF_0}{EMP_0} \right) \times w_0 + \left(\frac{MF_n}{EMP_n} \right) \times (1 - w_0)$$

Materiaali-intensiivisellä sektorilla materiaalien kokonaiskulutus on MF_0 ja työvoiman määrä EMP_0 , kevyemmällä sektorilla vastaavasti MF_n ja EMP_n . Sektorien osuutta taloudesta voidaan vastaavasti merkitä w_0 ja w_n , jolloin

$$w_n = 1 - w_0$$

Edellä esitellyissä yhtälöissä ympäristökuormituksen indikaattorina voi materiaalien kokonaiskulutuksen (MF) tilalla olla myös jokin muu muuttuja, esimerkiksi energiankulutus tai Kaya-identiteetin hiilidioksidipäästöt. Hyvinvointia kuvaava muuttuja voidaan niin ikään valita käytettävissä olevista hyvinvointi-indikaattoreista.

Edellä esitettyjä tuotannon, työllisyyden ja hyvinvoinnin master-yhtälöitä voidaan käyttää (ketjutetun) dekompositioanalyysin lähtökohtana. Kahden selittävän muuttujan dekompositioanalyysi onkin ASA:n metodologinen perusta. Se mahdollistaa uusien teoreettisten käsitteiden, kuten tuotannon dematerialisaation, kulutuksen immateriaalisaation, rebound-vaikutuksen, kestävä kasvun ja kestävä teknologisen muutoksen käsitteellistämisen, operationalisoinnin ja empiirisen tulkinnan (Kaivo-oja et al. 2001a; 2001b; 2002; Vehmas et al. 2003). Tätä havainnollistetaan kuvan 3 mukaisella tuotantoa käsittelevällä esimerkillä.



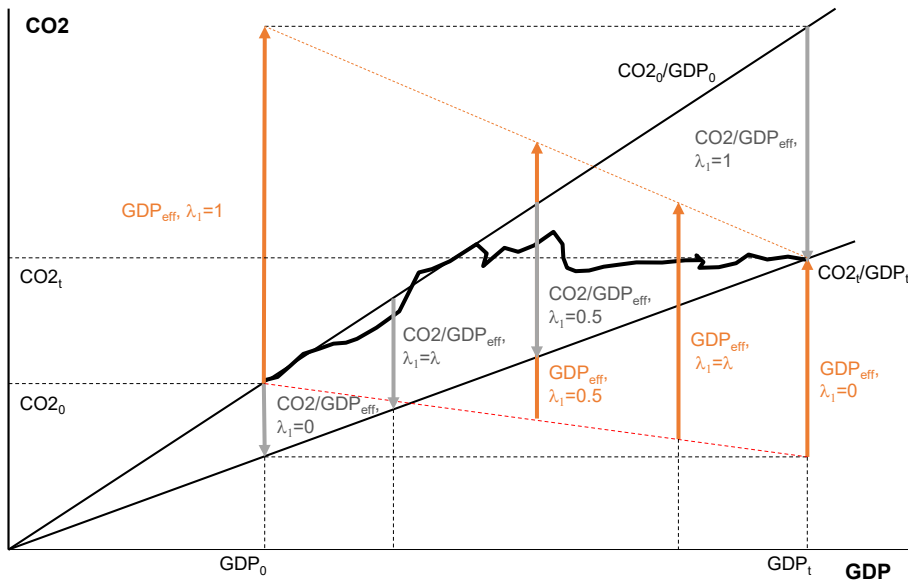
Kuva 3. Advanced Sustainability Analysis (ASA) -lähestymistavan keskeisten käsitteiden määrittely.

Kuvassa 3 tarkastellaan tilannetta, jossa ympäristövaikutus kasvaa arvosta ES_0 arvoon ES_1 samalla kun tuotanto kasvaa arvosta GDP_0 arvoon GDP_1 , jolloin siirrytään pisteestä A pisteeseen B. Näiden pisteiden ja origon välille piirretyt suorat kuvaavat tuotannon alkuperäistä (ES_0/GDP_0 , piste A) ja muuttunutta (ES_1/GDP_1 , piste B) ympäristöintensiteettiä. Näiden suorien avulla ympäristövaikutuksen muutos voidaan jakaa graafisesti kahteen osaan. Piste C kuvaa ympäristövaikutusta, jos alkuperäinen tuotanto olisi saatu aikaan muuttuneella ympäristöintensiteetillä. Pisteiden A ja C välille piirretty nuoli kuvaa näin ympäristöintensiteetin muutoksen aiheuttamaa ympäristövaikutuksen pienenemistä (omavaikutusta), jota ASA-lähestymistavassa kutsutaan tuotannon dematerialisaatioksi.

Kuvassa 3 tuotannon kasvua voidaan kuvata pisteiden C ja D välisellä nuolella. Pisteestä D pisteeseen B piirretty nuoli kuvaa ympäristövaikutuksen kasvua, jos ympäristöintensiteetti olisi jo alkutilanteessa ollut uuden tilanteen mukainen. Tämän vuoksi ympäristövaikutuksen kasvu siirryttäessä pisteestä D pisteeseen B on tietenkin suurempi kuin toteutunut ympäristövaikutuksen kasvu arvosta ES_0 arvoon ES_1 . Tätä laskennallista ympäristövaikutuksen kasvua kutsutaan ASA-lähestymistavassa gross rebound -vaikutukseksi (Vehmas et al. 2003). Se koostuu kahdesta osasta, toteutuneesta ympäristövaikutuksen kasvusta (pisteestä E pisteeseen B) sekä selittävien muuttujien eli ympäristöintensiteetin ja tuotannon muutosten yhteisvaikutuksesta (pisteestä D pisteeseen E).

Kuvan 3 avulla voidaan määritellä myös se, mikä osuus tuotannon kasvusta on ollut kestävää ja minkälainen teknologinen muutos eli dematerialisaation lisäys olisi tarvittu, jotta tuotannon kasvu olisi ollut kestävää. Kestävyyden ehto ASA:ssa on se, että ympäristövaikutus ei kasva. Kestävää kasvua osoittaa siten pisteiden A ja F välinen osuus, joka kuvan 3 tapauksessa on vain vähän yli puolet toteutuneesta kasvusta. Tuotannon muutos ei siis olisi lisännyt ympäristövaikutusta, mikäli ympäristöintensiteetti olisi pienentynyt pisteen E mukaiseksi. Tällöin dematerialisaatio olisi ollut suurempi, ja sitä kuvaava nuoli ulottuisi pisteen E ja origon välille piirrettyyn suoraan asti.

Edellä kuvassa 3 ympäristövaikutus siis dekomponoidaan kahden muuttujan eli tuotannon ympäristöintensiteetin (ES/GDP) ja tuotannon (GDP) vaikutuksiksi siten, että muuttujien yhteisvaikutus allokoidaan kokonaan tuotannon kasvuille. Allokointi voidaan tehdä myös muulla tavoin. Kuva 4 esittää erilaisia vaihtoehtoja hiilidioksidipäästöjen dekomponointia kuvaavassa esimerkissä. Dekompositionalyysin matemaattisissa yhtälöissä (ks. Vehmas 2009; Vehmas et al. 2003; 2018; 2019a; 2019b) yhteisvaikutuksen allokatio riippuu parametrilla λ ($0 \leq \lambda \leq 1$). Kuva 4 osoittaa, että dekomponoitujen vaikutusten itseisarvot kasvavat parametrin λ arvon kasvaessa, mutta niiden summa on aina CO₂-päästöjen muutoksen suuruinen. Parametrin arvo siis vaikuttaa tuloksiin. Kun $\lambda = 0$, yhteisvaikutus allokoidaan kokonaisuudessaan muuttujan GDP vaikutukselle (kuten kuvassa 3). Kun $\lambda = 1$, yhteisvaikutus allokoidaan kokonaan muuttujan CO₂/GDP vaikutukselle. Sun/Shapley-dekompositioanalyysissä $\lambda = 0,5$, eli yhteisvaikutus allokoidaan tasan kummallekin selittävälle muuttujalle.



Kuva 4. Advanced Sustainability Analysis. Hiilidioksidipäästöihin vaikuttavien tekijöiden yhteisvaikutuksen allokointivaihtoehtoja kahdelle selittävälle muuttujalle (CO₂/GDP ja GDP) neljällä erilaisella parametrin λ arvolla. Kullakin parametrin arvolla $\text{CO}_2/\text{GDP}_{\text{eff}} + \text{GDP}_{\text{eff}} = \text{CO}_2_t - \text{CO}_2_0$.

Vastaavalla tavalla kuin tuotannon dematerialisaatio, voidaan määritellä myös kulutuksen immaterialisaatio vaihtamalla tuotannon tilalle kulutusta kuvaava indikaattori. Ympäristövaikutuksen tilalle voidaan myös vaihtaa sosiaalista hyvinvointia kuvaava indikaattori, jolloin dematerialisaatio tai immaterialisaatio korvautuu tuotannon tai kulutuksen hyvinvointituottavuudella. Kestävän kehityksen eri dimensioita analysoidessa on tärkeä olla selvillä muutoksen toivotusta suunnasta. Erityisesti sosiaalista hyvinvointia kuvaavilla indikaattoreilla tämä voi vaihdella sen suhteen, kasvaako vai pieneneekö hyvinvointi indikaattorin arvon muuttuessa.

4. Kestävän kehityksen ikkuna (SuWi)

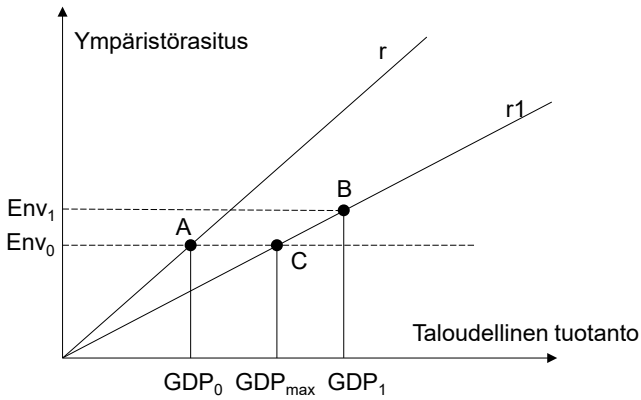
Kestävän kehityksen ikkuna (*Sustainability Window, SuWi*) pohjautuu edellä esiteltyyn ASA-viitekehitykseen (Luukanen et al. 2015a). Kestävän kehityksen ikkunan avulla määritellään ympäristön kantokyvyn asettama maksimimaalinen talouskehityksen taso ja sosiaalisen hyvinvoinnin ylläpitämiseksi tarvittava talouden minimitaso. Näiden välille asettuu kestävän talouskehityksen alue, *Sustainability Window*.

Kestävän kehityksen ikkunan määrittelyssä käytetään sekä ympäristöllisen että sosiaalisen kehityksen eri ulottuvuuksia määrittelemään kestävyysrajoja. Ympäristöllistä kestävyyttä ei voida määrittää yhden ympäristömuuttujan (esim. CO₂-päästöt tai biodiversiteetti) avulla, vaan on käytettävä erilaisia ympäristöön liittyviä indikaattoreita eri ulottuvuuksien määrittämiseen. Samoin sosiaalisen hyvinvoinnin eri ulottuvuuksia on arvioitava erilaisten indikaattorien avulla. Näitä voivat olla esim. terveyteen, koulutukseen, köyhyyteen, tasa-arvoon, oikeudenmukaisuuteen jne. liittyvät tekijät.

Ympäristöllistä kestävyyttä ei voida määrittää yhden ympäristömuuttujan (esim. CO₂-päästöt tai biodiversiteetti) avulla, vaan on käytettävä erilaisia ympäristöön liittyviä indikaattoreita eri ulottuvuuksien määrittämiseen. Samoin sosiaalisen hyvinvoinnin eri ulottuvuuksia on arvioitava erilaisten indikaattorien avulla.

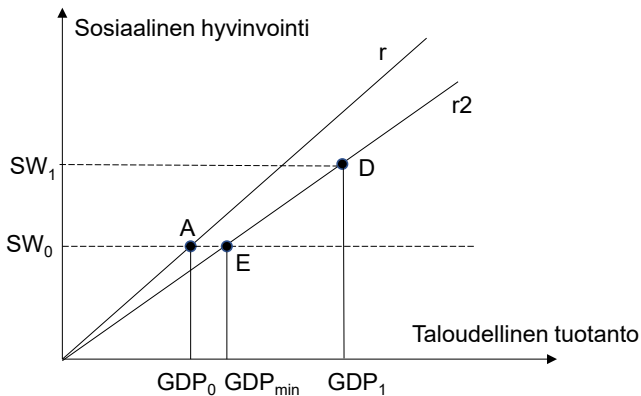
Ympäristöllisen kestävyysrajoja on usein vaikea määrittää absoluuttisesti. Ei voida sanoa, mikä on esim. kvantitatiivisesti määritelty biodiversiteetin kestävä taso. Joillekin muuttujille voidaan arvioida kestävyysrajojen kvantitatiivinen taso (esim. kasvihuonekaasujen päästöt eivät saa olla suurempia kuin nielu), mutta useimpien kohdalla absoluuttisen kestävyysrajojen määrittely ei ole mahdollista. Tällöin voidaan käyttää suhteellista määrittelyä esimerkiksi niin, että muutoksen suunta on kohti kestävämpää tilaa. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että päästöjen määrää on vähennettävä, jotta kehitys olisi kohti kestävämpää tilaa. Sosiaalisten muuttujien suhteen tilanne on samanlainen: ei voida määrittää absoluuttisen kestävyysrajojen tasoa, vaan on tyydyttävä käyttämään suhteellista muutosta ja selvitetävä, onko se kohti kestävämpää kehitystä vai ei.

SuWi-menetelmässä käytetään hyväksi ns. tuottavuusajattelua eli määritellään talouden tason aiheuttama tuottavuus ympäristöstressin ja sosiaalisen hyvinvoinnin suhteen. Kuva 5 esittää SuWi-menetelmään liittyvän ympäristöllisen kestävyysrajojen määrittämää maksimaalista talouden tuotantoa. Lähtökohtana on tila A, jossa talouden tuotannon taso on GDP₀ ja ympäristörasituksen taso Env₀. Tässä pisteessä talouden aiheuttama ympäristörasituksen tuottavuutta kuvataan suoralla r. Esimerkissä kehitys tapahtuu pisteeseen B, jossa talouden tila on GDP₁ ja ympäristörasituksen tila Env₁ ja tällöin talouden aiheuttama ympäristörasituksen tuottavuus on r₁. Jos kestävyyskriteerinä on, että ympäristörasitus ei saa kasvaa (suhteellinen kriteeri), on tuottavuuden r₁ määrittämä maksimaalinen talouden tuotanto pisteessä C GDP_{max}. Tällöin ympäristörasitus ei kasva, mikäli tuottavuus on r₁.



Kuva 5. Talouden maksimituotannon $GDP_{\max}$ määrittäminen tuotannon synnyttämän ympäristörasituksen avulla.

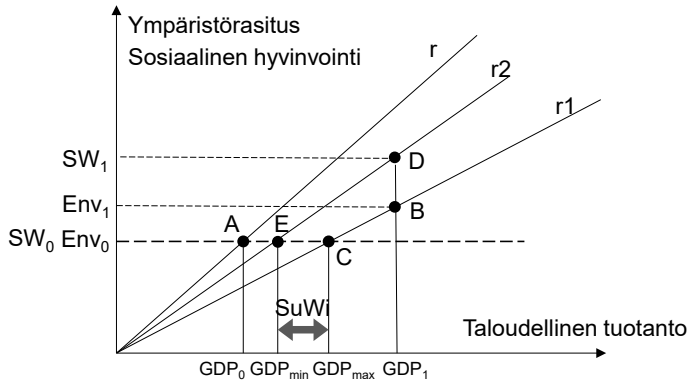
Vastaavasti sosiaalisen kestävyys määrittämä talouden minituotanto voidaan määrittää kuvan 6 avulla niin, että sosiaalinen hyvinvointi ei laske. Lähtötilanne on pisteessä A, jossa talouden tuotanto on GDP_0 ja sosiaalinen hyvinvointi SW_0 ja sosiaalisen hyvinvoinnin tuottavuus r . Pisteessä D hyvinvoinnin taso on SW_1 ja talouden tuotannon taso GDP_1 sekä hyvinvoinnin tuottavuus $r2$. Koska sosiaalisen kestävyys ehtona pidetään, että hyvinvointi ei saa pienentyä (relatiivinen kriteeri), määrittää tuottavuus-suora $r2$ minimitason $GDP_{\min}$ talouden tuotannolle pisteessä E.



Kuva 6. Talouden minimituotannon $GDP_{\min}$ määrittäminen tuotannon sosiaalisen hyvinvoinnin tuottavuuden avulla.

Kun SuWi-laskennassa käytettävät indikaattorit indeksoidaan niin, että kaikkien arvo on 1 vertailuvuonna (GDP_0 , Env_0 ja SW_0), voidaan kuviot yhdistää kestävä kehityksen ikkunan (SuWi) määrittämiseksi. Kuvassa 7 esitetään kestävä kehityksen ikkunan muodostuminen ympäristörasituksen ja sosiaalisen hyvinvoinnin indikaattorien

avulla. Kestävän kehityksen ikkunan, SuWi, minimitaso määrittyy siis sosiaalisen hyvinvoinnin kriteerin (GDP_{min}) ja maksimitaso ympäristöllisen kestävyys kriteerin (GDP_{max}) avulla.

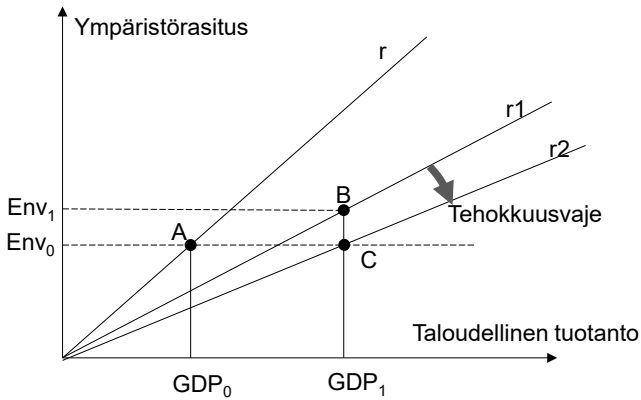


Kuva 7. Kestävän kehityksen ikkunan (SuWi) määrittäminen ympäristörasituksen ja sosiaalisen hyvinvoinnin avulla.

Kuvan 7 tapauksessa talouden muutos GDP_1 ei ole kestävän kehityksen ikkunan sisällä, joten voidaan päätellä, että tässä tapauksessa kehitys ei ole ollut kestävä. Kestävän kehityksen ikkunan avulla voidaan määrittää tehokkuusvaje (Luukkanen et al. 2019a). Kuvassa 8 on esitetty tehokkuusvajeen määrittäminen ympäristörasituksen suhteen. Alkutilana on piste A, jossa talouden tuotannon taso on GDP_0 ja ympäristörasituksen taso Env_0 sekä ympäristörasituksen tuottavuus r . Jälleen ajatellaan, että kehitys tapahtuu pisteeseen B, jossa talouden taso on GDP_1 ja ympäristörasituksen taso Env_1 ja tällöin talouden aiheuttama ympäristörasituksen tuottavuus on $r1$. Tällä talouden tasolla ympäristörasitus on kuitenkin suurempi kuin vertailuvuonna, joten kehitys ei ole kestävä sen suhteen. Jotta kehitys oli kestävä tasolla GDP_1 olisi ympäristörasituksen tuottavuutta pienennettävä tasolle $r2$, jolloin ympäristörasitus ei kasvaisi. Tehokkuusvaje $r1/r2$ on tässä tapauksessa

$$\frac{r1}{r2} = \frac{GDP_1/Env_1}{GDP_1/Env_0} = \frac{Env_0}{Env_1}$$

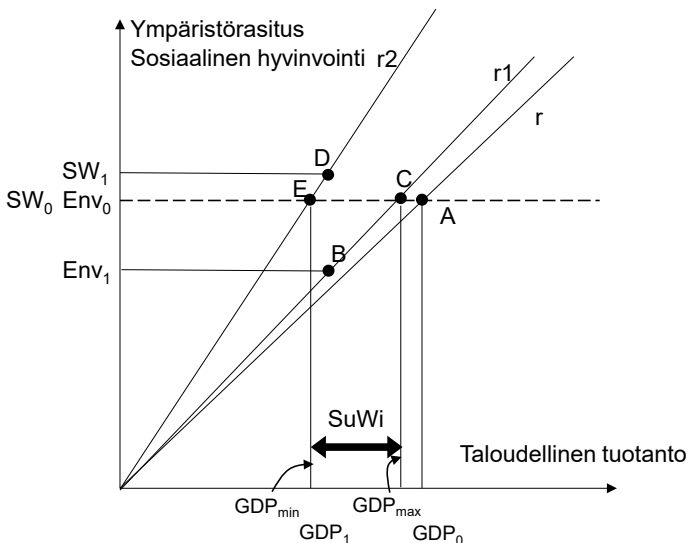
Vastaavasti voidaan määrittää tehokkuusvaje sosiaalisen kehityksen suhteen.



Kuva 8. Kestävän kehityksen ikkunaan liittyvä tuotannon tehokkuusvajeen määrittäminen.

Kestävän kehityksen ikkunan suhteen voidaan määritellä useita erilaisia kehityspolkuja ja tarkastella niiden kestävyyttä. Kuvassa 9 tarkastellaan tapausta, jossa talouden tuotanto pienenee (*de-growth*). Lähtötilanteena tässä on piste A (GDP_0 , Env_0 ja tuottavuus r) ja ympäristörasituksen lopputaso pisteessä B on Env_1 sekä talouden taso GDP_1 ja ympäristörasituksen tuottavuus r_1 . Tässä tilanteessa maksimi kestävä tuotannon taso määräytyy pisteen C avulla tasolle GDP_{max} .

Sosiaalinen hyvinvointi on tasolla SW_1 pisteessä D, jolloin siis talouden tuotanto on tasolla GDP_1 ja sosiaalisen hyvinvoinnin tuottavuus r_2 . Tällä hyvinvoinnin tuottavuuden tasolla minimi talouden tuotannon taso GDP_{min} on pisteessä E. Kestävän kehityksen ikkuna SuWi määräytyy arvojen GDP_{min} ja GDP_{max} avulla ja tässä tapauksessa huomataan, että talouden realitaso GDP_1 on kestävän kehityksen ikkunan sisällä. Näin ollen tapahtunut kehitys on ollut kestävää käytettyjen indikaattorien suhteen.



Kuva 9. Kestävän kehityksen ikkuna tilanteessa, jossa talouden tuotanto pienenee (*de-growth*).

Kestävän kehityksen ikkunan muuttujien talouden tuotanto (GDP), sosiaalinen hyvinvointi (SW) sekä ympäristörasitus (Env) sekä näihin liittyvien tuottavuuksien (GDP/Env ja GDP/SW) muutosten avulla voidaan määrittää 24 erilaista kehityspolkua riippuen siitä, mitkä muuttujista kasvavat ja mitkä pienenevät. Näistä 24 vaihtoehdosta vain neljä täyttää kestävyyskriteerit eli talouden tuotanto on positiivisen kestävä kehityksen ikkunan sisällä. Kestävän kehityksen ikkuna voi olla myös negatiivinen, jos GDP_{max} on pienempi kuin GDP_{min} .

Kestävän kehityksen ikkunaa voidaan käyttää tulevaisuudentutkimuksessa arvioitaessa erilaisia tulevaisuuden kehityspolkuja ja niiden kestävyttä. Sen avulla voidaan arvioida tehokkuusvajetta ja sen korjaamiseen tarvittavaa kehitystä (Luukkanen et al. 2019a). Kestävän kehityksen ikkunan muutoksia voidaan tarkastella ajan funktiona, jos käytettävissä on aikasarjatietoja sopivista indikaattoreista. Kestävän kehityksen indikaattorien ja niiden avulla lasketun ikkunan muutoksen trendien avulla (*dynamic sustainability*) voidaan konstruoida skenaarioita tulevaisuuden kehitykselle (Luukkanen et al. 2015a). Kestävän kehityksen ikkunaa on hiljattain käytetty myös ”donitsitalouden” (Raworth 2012; 2017) (engl. *doughnut economy*) operationalisointiin tarkastelemalla kestävä kehityksen ikkunaa ja toteutuneen taloudellisen kehityksen osumista siihen useilla ympäristö- ja hyvinvointi-indikaattoreiden yhdistelmillä (Luukkanen et al. 2021; Saunders et al. 2021).

Kestävän kehityksen ikkunaa voidaan käyttää tulevaisuudentutkimuksessa arvioitaessa erilaisia tulevaisuuden kehityspolkuja ja niiden kestävyttä.

Indikaattoreiden valinta kestävä kehityksen ikkunan laskentaa varten on keskeinen kysymys luotettavien ja käyttökelpoisten tulosten saamiseksi. YK:n Kestävän kehityksen tavoitteiden (*Sustainable Development Goals, SDGs*) arviointiin kerättävien indikaattorien käyttö on yksi vaihtoehto.

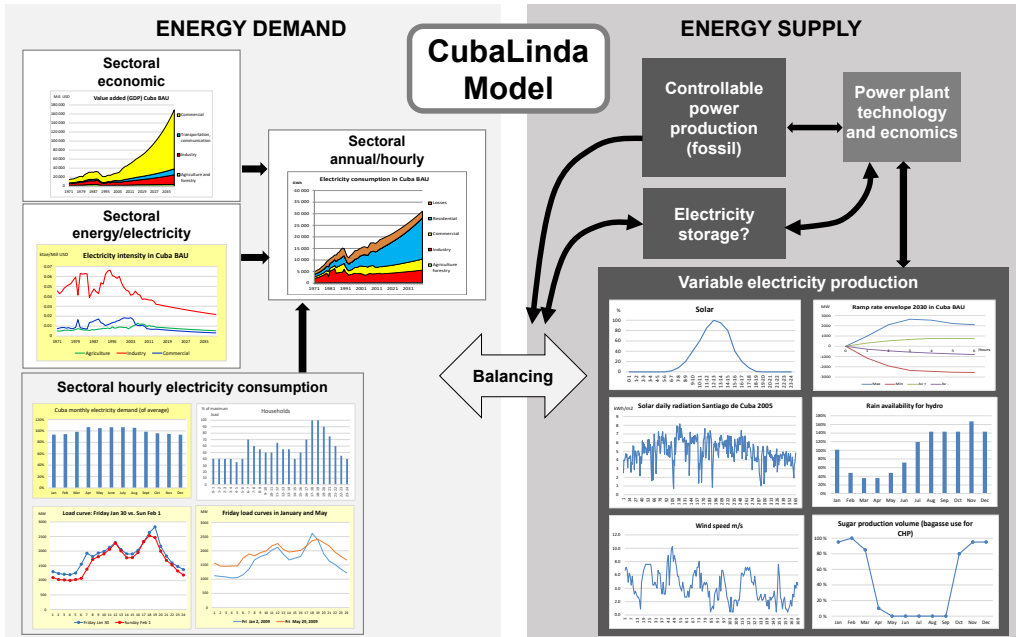
5. LINDA-mallintaminen

LINDA-mallinnus (*Long-range Integrated Development Analysis*) (Luukkanen et al. 2015b; 2015c) perustuu osaltaan CO₂-päästöjen ja energiankulutuksen dekomponointiin ja tulevaisuuden skenaarioiden laadintaan osatekijöiden kehityskulun perusteella. Peruskaavana on edellä mainittu Kaya-identiteetti:

$$CO_2 \equiv \frac{CO_2}{TPES} \times \frac{TPES}{FEC} \times \frac{FEC}{GDP} \times \frac{GDP}{EMP} \times \frac{EMP}{POP} \times POP$$

LINDA-mallissa Kaya-identiteetti jaetaan sektorikohtaisiin komponentteihin sekä energiamuotojen perusteella. Lisäksi energiajärjestelmä kuvataan mallissa melko tarkasti lähtien eri tyyppisistä voimalaitoksista ja niiden teknisistä ominaisuuksista. Samoin energian kulutus kuvataan sektorikohtaisesti. Malli voidaan laatia kuvaamaan energiajärjestelmää vuositasolla tai tuntitasolla, jolloin kulutuksen ja tuotannon vaihtelut eri vuorokauden aikoina, eri viikonpäivinä ja eri kuukausina saadaan mallinnettua.

LINDA-malli voidaan laatia kuvaamaan talouden eri sektoreita sekä niiden tuotantoa, energiankäyttöä, ympäristövaikutuksia, työllisyyttä ja niiden kehitystä (kuva 10). Useimmat Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa kehitetyistä sovelluksista ovat koskeneet energiasektoria, mutta LINDA-mallinnusta on sovellettu myös mm. veden käyttöön Kiinassa ja autonrenkaiden kulutukseen Venäjällä. Energiamalleja on tehty eri tutkimushankkeissa mm. Suomelle, Kiinalle, Thaimaalle, Kambodzhalle, Laosille, Kuuballe sekä Euroopan unionin jäsenmaille (Luukkanen et al. 2012b; 2015b; 2015c; 2019; Karjalainen et al. 2014; Vehmas et al. 2019c).



Kuva 10. Esimerkki LINDA-mallin komponenteista ja niiden liittymisestä toisiinsa.

LINDA-mallinnuksessa keskeisenä lähtökohtana skenaarioiden laadintaan on energiantensiteettien kehitys (FEC/GDP) talouden eri sektoreilla samoin kuin talouden kehitys. Malliin syötetty historiallinen data mahdollistaa trendien laskemisen talouden eri sektorien kehittymiselle samoin kuin niiden energiantensiteettien kehittymiselle eri energialähteiden suhteen (polttoaineintensiteetti eri polttoaineille sekä sähköintensiteetti).

LINDA-malliin voidaan sisällyttää lukuisia talouden sektoreita riippuen käytettävissä olevasta tilastoaineistosta. Joillekin maille energia- ja taloustilastoja löytyy ainoastaan perussektoreille (maatalous, teollisuus, liikenne, palvelut), mutta joillekin maille (esim. Kiina) on ollut mahdollista luoda malli, jossa teollisuus on jaettu pariinkymmenen alasektoriin. LINDA-malli sisältää myös sähköjärjestelmän taloudellisen mallinnuksen. Lähtötietoina siinä käytetään eri polttoaineiden ja voimalaitosinvestointien historiallisia arvoja ja näiden trendien perusteella käyttäjä arvioi tulevaisuuden hintoja. Malli laskee lähtötietojen perusteella sähköntuotannon hinnan tulevaisuudessa (ns. *Levelised Cost Of Electricity*, LCOE).

Energian tuotannon kehittyminen (TPES/FEC) kuvataan mallissa eri sektoreiden suoran polttoainekäytön intensiteettien sekä sähkön tuotannon eri teknologioiden avulla. Sähkön tuotannon kuvaus on mallissa keskeisellä sijalla, sillä sähkön osuus energiankäytöstä kasvaa jatkuvasti ja on digitalisaation ja energiatehokkuuden parantamisen edellytys.

Erityisesti uusiutuvan energian tuotannon mallintaminen on tärkeää, jotta sen osuutta voitaisiin hallitusti kasvattaa. Aurinkoenergian ja tuulivoiman mallintamiseksi käytetään mallissa tuntitason dataa tuulen nopeuksista ja auringon säteilyn intensiteettistä eri puolilla mallinnettavaa aluetta. Näiden avulla ja malliin syötettyjen aurinko- ja tuulivoimainvestointien avulla pyritään saamaan kuva näiden vaihtelevien (*intermittent*) energiamuotojen tuottamasta sähkömäärästä tunneittain.

Energian kulutus mallinnetaan LINDAssa eri sektorien mukaan polttoainekulutuksena sekä sähkönkulutuksena. Sähkön kulutus mallinnetaan tuntitasolla eri tyyppisten sähkönkäyttäjien mukaan (kotitaloudet, maatalous, teollisuuden eri alasektorit, palvelusektori, liikenne). Historiallinen data eri sähkönkulutussektoreiden tuntitason kuormituksesta toimii pohjana tulevaisuuden trendien arviointiin yhdessä sektorikohtaisten taloustrendien kanssa.

Tuntidatan käyttö energiamallinnuksessa on erittäin tärkeää, sillä sähkön tuotannon ja kulutuksen on oltava tasapainossa joka hetki. Sähköjärjestelmän tasapainon kannalta aurinko- ja tuulienergian lisääntyminen aiheuttaa merkittäviä haasteita järjestelmän kehittämiseksi, sillä näiden energiamuotojen tuotantoa ei yleensä säädetä, vaan se riippuu sääolosuhteista. Sähkön tuotantoa on kuitenkin pystyttävä säätämään joka hetki niin, että se on yhtä suurta kuin kulutus, joka sekin vaihtelee joka hetki. Mikäli aurinko- ja tuulienergian osuus sähköntuotannosta kasvaa suureksi, on järjestelmässä oltava säädettävää kapasiteettia, jonka tuotantoa voidaan lisätä tai vähentää nopeasti, jotta sähköverkon tasapaino voidaan säilyttää. Myös kulutusta voidaan säätää kulutusjouston avulla pyrittäessä pitämään kulutus ja tuotanto tasapainossa.

Energiavarastoja (esimerkiksi akustot ja pumppuvoimalat) voidaan käyttää sähköjärjestelmän tasapainon hallintaan. Tulevaisuudessa energiavarastojen merkitys kasvaa voimakkaasti aurinko- ja tuulienergian lisääntyessä. LINDA-mallissa energiavarastot ja niiden käyttö (lataaminen ja purkaminen) mallinnetaan tuntitasolla.

LINDA-mallin avulla voidaan laatia tuntitason skenaarioita energiajärjestelmälle ja sen aiheuttamille päästöille. Mallinnuksen lähtökohtana ovat historialliset trendit ja mallin käyttäjä voi niiden perusteella valita mallin input-suureille lähtöarvot tulevaisuuden eri ajankohdille. Input-suureita ovat mm. talouden kehittyminen eri sektoreilla ja energiantensiteettien kehittyminen eri sektoreilla. Lisäksi mallin käyttäjä laatii investointisuunnitelmat erityyppisille voimalaitoksille sekä arvioi kulutuksen ajallisen vaihtelun tuntitasolla tulevaisuudessa eri sektoreilla. Myös eri polttoaineiden käytön osuuksien arviointi toimii mallissa input-suureena.

Mallia voidaan käyttää myös tavoitteellisten backcasting-skenaarioiden laadintaan. Tällöin mallin tuloksia, esimerkiksi hiilidioksidipäästöjä, verrataan asetettuun tavoite-tasoon ja mallin parametreja muutetaan niin, että tavoitteeseen päästään. Muutoksia

voidaan tehdä esimerkiksi talouskasvuun eri sektoreilla, eri energiamuotojen osuuteen, voimalaitosinvestointeihin, teknologian kehittymiseen (energiaintensiteetit) ja kuluksen muutoksiin.

6. Yhteenveto ja menetelmien jatkokehittäminen

Tässä artikkelissa on esitelty Tulevaisuuden tutkimuskeskuksessa kehiteltyjä kestävä kehityksen kvantitatiivisia arviointimenetelmiä ja niiden käyttöä tulevaisuudentutkimuksessa. Kaikkien menetelmien luontevin käyttöalue on kestävä kehitykseen liittyvien haasteiden ja tarpeiden osoittaminen ja niihin liittyvien kvantitatiivisten skenaarioiden laatiminen. Skenaarioiden laatiminen on viety pisimmälle LINDA-mallintamisessa, muiden menetelmien osalta pää-

Menetelmien yhteisenä haasteena on tulevaisuudentutkimuksen näkökulmasta erityisesti backcasting-tyyppisen skenaariolaskennan kehittäminen.

huomio on ollut historiallisen trendin tunnistamisessa, jota voidaan sellaisenaan käyttää lähinnä business as usual -tyyppisen skenaarion laadintaan. Muut skenaariot edellyttävät oletuksia joko skenaroitavan muuttujan ajurien tulevasta kehi-

tyksestä tai tavoitteen asettamista sille. Edellisen tuloksena syntyy ”entä jos” -tyyppisiä forecasting-skenaarioita, jälkimmäinen taas tuottaa tavoitteellisia backcasting-skenaarioita. Backcasting-laskentaa on toteutettu Advanced Sustainability Analysis -lähestymistavan yhteydessä, mutta siinä on käytetty varsin yksinkertaista master-yhtälöä, joka ei tarjoa mahdollisuutta varioida useampia muuttujien kehitystä. Menetelmien yhteisenä haasteena onkin tulevaisuudentutkimuksen näkökulmasta erityisesti backcasting-tyyppisen skenaariolaskennan kehittäminen. LINDA-mallilla voidaan kokeilemalla varioida mallin ajureita ja tuottaa etukäteen asetetun tavoitteen toteuttavia skenaarioita, mutta siinäkin ei ole laskentaa, jossa mallintaminen aloitettaisiin asettamalla hiilidioksidipäästöille tai energiankulutukselle etukäteen jokin tavoitetaso.

Menetelmissä on myös joitakin laskennallisia kehittämiskohteita. Yksi niistä liittyy ASA-lähestymistavassa ja kahden muuttujan ketjutetun dekompositioanalyysin yhtälöissä esiintyvään λ -parametriin. Pentti Malaska esitti aikoinaan matemaattis-empiirisen haasteen löytää sellainen parametrin λ arvo, joka tuottaa täsmälleen saman tuloksen riippumatta siitä, lasketaanko tulokset kumulatiivisesti alkua- ja päätevuoden välisestä muutoksesta vai inkrementaalisesti vuosittaisten muutosten summana. Tavoitteena on siis löytää parametrin λ arvo, jota käyttämällä saadaan täsmälleen sama dekompositiotulos sekä kumulatiivisesta laskennasta että inkrementaalisen laskentojen summasta. Haastetta lisää dekompositioanalyysien ketjuttaminen, sillä jokainen ketjutus lisää vastaavasti asetettavien parametrien määrää. Parametrin arvo riippuu siis ketjutettavien muuttujien määrästä sekä myös tarkasteltavasta aikavälistä, joten tehtävä ei ole helppo.

Menetelmien käyttökelpoisuutta voitaisiin parantaa kehittämällä niihin kunnolliset käyttöliittymät ja saattamalla ne työkaluina myös muiden kuin menetelmien kehittäjien käytettäväksi. Käyttöliittymien ja tilastollisten aineistojen tietokantasovelluksen kehittäminen sekä eri menetelmiin kuten LINDA-malliin, kestävä kehityksen ikku-

na -menetelmään sekä dekompositioanalyysihin liittyvien laskentojen ohjelmointi toimivaksi kokonaisuudeksi on keskeinen kehittämiskohde tulevaisuudessa. Kaikki menetelmät hyödyntävät tilastollista aikasarja-aineistoa, joten aineistojen aktiivinen kerääminen ja päivittämisen helppous on tärkeää, jotta käytettävissä olisi aina tuorein saatavilla oleva data.

Lähdeluettelo

- Albrecht, Johan – François, Delphine & Schoors, Koen (2002) A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals. *Energy Policy*, Vol. 30, 727–736.
- Ang, Beng Wah (2004) Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? *Energy Policy*, Vol. 32, 1131–1139.
- Ang, Beng Wah (2005) The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. *Energy Policy*, Vol. 33, 867–871.
- Ang, Beng Wah (2015) LMDI decomposition approach: A guide for implementation. *Energy Policy*, Vol. 86, 233–238.
- Ang, Beng Wah – Liu, F.L. & Chew, Ek Peng (2003) Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis. *Energy Policy*, Vol. 31, 1561–1566.
- Ang, Beng Wah & Liu, Na (2007a) Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach. *Energy Policy*, Vol. 35, 238–246.
- Ang, Beng Wah & Liu, Na (2007b) Negative-value problems of the logarithmic mean Divisia index decomposition approach. *Energy Policy*, Vol. 35, 739–742.
- de Boer, Paul & Rodrigues, João F.D. (2020) Decomposition analysis: when to use which method? *Economic Systems Research*, 32(1), 1–28.
- Chertow, Marion (2000) The IPAT Equation and its Variants. Changing Views of Technology and Environmental Impact. *Journal of Industrial Ecology*, 4(4), 13–29.
- Hoffrén, Jukka – Luukkanen, Jyrki & Kaivo-oja, Jari (2000) Decomposition Analysis of Finnish Material Flows: 1960–1996. *Journal of Industrial Ecology*, 4(4), 105–125.
- Holm, Stig-Olof & Englund, Göran (2009) Increased ecoefficiency and gross rebound effect: Evidence from USA and six European countries 1960–2002. *Ecological Economics*, 68(3), 879–887.
- Kaivo-oja, Jari & Luukkanen, Jyrki (2014) The European Union balancing between CO₂ reduction commitments and growth policies: decomposition analyses. *Energy Policy*, Vol. 32, 1511–1530.
- Kaivo-oja, Jari – Luukkanen, Jyrki & Malaska, Pentti (2001a) Sustainability Evaluation Frameworks and Alternative Analytical Scenarios of National Economies. Population and Environment. A *Journal of Interdisciplinary Studies*, 23(2), 193–215.
- Kaivo-oja, Jari – Luukkanen, Jyrki & Malaska, Pentti (2001b) Advanced Sustainability Analysis. Teoksessa Tolba, Mostafa K. (toim.) *Our fragile world. Challenges and opportunities for sustainable development. Encyclopedia of Life Support Systems and Sustainable Development*. Vol 2. EOLSS Publishers Co. Ltd, Oxford.
- Kaivo-oja, Jari – Luukkanen, Jyrki & Malaska, Pentti (2002) Methodology for the Analysis of Critical Industrial Ecology Trends: An Advanced Sustainability Analysis of the Finnish Economy. *Futura*, 21(2), 45–61.
- Kaivo-oja, Jari – Luukkanen, Jyrki – Panula-Ontto, Juha – Vehmas, Jarmo – Chen, Yeng – Mikkonen, S. & Auffermann, Burkhard (2014a) Are Structural Changes and Modernisation Leading to Convergence in the CO₂ Economy? Decomposition Analysis of China, EU and USA. *Energy*, Vol. 72, 115–125.
- Kaivo-oja, Jari – Jusi, Sari – Luukkanen, Jyrki – Panula-Ontto, Juha & Kouphokham, Khamso (2014b) *Futures Horizon to Sustainability Challenges of the Lao PDR 2050. Adaptive Foresight Thinking and New Futures Perspectives to Energy and Natural Resource Planning in the Lao People's Democratic Republic*. FFRC eBook 11/2014, Finland Futures Research Centre.

- Karjalainen, Joni – Käkönen, Mira – Luukkanen, Jyrki & Vehmas, Jarmo (2014) *Energy Models and Scenarios in the Era of Climate Change. Briefing Report*. FFRC eBook 3/2014, Finland Futures Research Centre.
- Kasanen, Pirkko (1990) *Energian säästön määrittely*. Elinkeinoelämän tutkimuslaitos, ETLA Keskustelualoitteita 316. ETLA, Helsinki.
- Kaya, Yoichi (1990) *Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios*. Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group. Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris.
- Luukkanen, Jyrki & Kaivo-oja, Jari (2002a) A comparison of Nordic energy and CO₂ intensity dynamics in the years 1960–1997. *Energy*, 27(2), 135–150.
- Luukkanen, Jyrki & Kaivo-oja, Jari (2002b) ASEAN tigers and sustainability of energy use – decomposition analysis of energy and CO₂ efficiency dynamics. *Energy Policy*, Vol. 30, 281–292.
- Luukkanen, Jyrki & Kaivo-oja, Jari (2002c) Meaningful participation in global climate policy? Comparative analysis of the energy and CO₂ efficiency dynamics of key developing countries. *Global Environmental Change*, 12(2), 117–126.
- Luukkanen, Jyrki & Vehmas, Jarmo (2003) *Energy and CO₂ efficiency development in the European Union and Turkey*. Kutsuttu keynote-esitelmä konferenssissa EUROPA Bridges of Knowledge – Energy Policy of the EU and Implications for Turkey, 19.9.2003, Ankara. Conference Proceedings, 9–62.
- Luukkanen, Jyrki – Kaivo-oja, Jari & Vehmas, Jarmo (2000) Rakennemuutos Suomessa vuosina 1975–1996. Dekompositiomalliin perustuvia tuloksia sähkön, työpanoksen ja pääoman käytön muutoksista eri tuotantosektoreilla 1975–1996. *Kansantaloudellinen aikakauskirja*, 96(1), 19–38.
- Luukkanen, Jyrki – Vehmas, Jarmo & Kaivo-oja, Jari (2005) Energy use and CO₂ emissions from fuel combustion in the OECD and non-OECD countries: Trends based on decomposition analysis. *Futura*, 24(2–3), 129–145.
- Luukkanen, Jyrki – Vehmas, Jarmo – Panula-Ontto, Juha – Allievi, Francesca – Kaivo-oja, Jari – Pasanen, Tytti & Auffermann, Burkhard (2012a) Synergies or Trade-offs? A New Method to Quantify Synergy between Different Dimensions of Sustainability. *Environmental Policy and Governance*, Vol. 22, 337–349.
- Luukkanen, Jyrki – Kouphokham, Khamso – Panula-Ontto, Juha – Kaivo-oja, Jari – Korkeakoski, Mika – Vehmas, Jarmo – Tuominen, Visa – Jus, Sari – Pasanen, Tytti & Lakkala, Hanna (2012b) *Future Energy Demand in Laos. Scenario Alternatives for Development*. FFRC eBook 8/2012, Finland Futures Research Centre.
- Luukkanen, Jyrki – Kaivo-oja, Jari – Vehmas, Jarmo – Panula-Ontto, Juha & Häyhä, Laura (2015a) Dynamic Sustainability. Sustainability Window Analysis of Chinese Poverty-Environment Nexus Development. *Sustainability*, Vol. 7, 14488–14500.
- Luukkanen, Jyrki – Akgün, Orkide – Kaivo-oja, Jari – Korkeakoski, Mika – Pasanen, Tytti – Panula-Ontto, Juha – Tuominen, Visa & Vehmas, Jarmo (2015b) Long-run energy scenarios for Cambodia and Laos: Building integrated techno-economic and environmental modelling framework for scenario analyses. *Energy*, Vol. 91, 866–881.
- Luukkanen, Jyrki – Panula-Ontto, Juha – Vehmas, Jarmo – Liyon, Liu – Kaivo-oja, Jari – Auffermann, Burkhard & Häyhä, Laura (2015c) Structural change in Chinese economy: Impacts on energy use and CO₂ emissions in the period 2013–2030. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 94, 303–317.
- Luukkanen, Jyrki – Kaivo-oja, Jari – Vähäkari, Noora – O'Mahony, Tadhg – Korkeakoski, Mika – Panula-Ontto, Juha – Vehmas, Jarmo & Nguyen Quoc, Anh (2018) Resource efficiency and green economic sustainability transition evaluation of green growth productivity gap and governance challenges in Cambodia. *Sustainable Development*, Vol. 27, 312–320.
- Luukkanen, Jyrki – Kaivo-oja, Jari – Vähäkari, Noora – O'Mahony, Tadhg – Korkeakoski, Mika – Panula-Ontto, Juha – Phonhalath, Keophousone – Nanthavong, Khamheng – Reincke, K. – Vehmas, Jarmo & Hogarth, Nicholas (2019a) Green economic development in Lao PDR: A sustainability window analysis of Green Growth Productivity and the Efficiency Gap. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 211, 818–829.

- Luukkanen, Jyrki – Saunders, Anaely – Salazar, Irina – Santos, Ariel – Majanne, Yrjö – Vazquez, Luis & Korkeakoski, Mika (2019b) Cuban Electricity Sector Development. Challenges of Increased Intermittent Renewable Production. Teoksessa Vehmas, Jarmo & Saarimaa, Riikka (toim.) *Energizing Futures – Sustainable Development and Energy in Transition. Proceedings of the Futures Conference 2018*. FFRC eBooks 6/2019, Finland Futures Research Centre.
- Luukkanen, Jyrki – Vehmas, Jarmo & Kaivo-oja, Jari (2021) Quantification of Doughnut Economy with the Sustainability Window Method: Analysis of Development in Thailand. *Sustainability*, 13(2), 847.
- Mainali, Brijesh – Luukkanen, Jyrki – Silveira, Semida & Kaivo-oja, Jari (2018) Evaluating synergies and trade-offs among Sustainable Development Goals (SDGs): Explorative analyses of development paths in South Asia and Sub-Saharan Africa. *Sustainability*, 10(3), 815.
- Malaska, Pentti (1971) *Future Prospects of Technical Man*. Insinöörien kustannus, Helsinki.
- Malaska, Pentti (1997) *Sustainable development as post-modern culture*. FUTU-publication 1/97, Turun kauppakorkeakoulu, Tulevaisuuden tutkimuskeskus.
- Malaska, Pentti (1999) *Sustainable development analysis*. FUTU-publication 1/99. Turun kauppakorkeakoulu, Tulevaisuuden tutkimuskeskus.
- Malaska, Pentti – Kaivo-oja, Jari & Luukkanen, Jyrki (1999) *Sustainability and Economic Growth: A Theoretical Framework and Empirical Demonstrations*. Futu-publication 4/1999. Turun kauppakorkeakoulu, Tulevaisuuden tutkimuskeskus.
- Raworth, Kate (2012) A Safe and Just Space for Humanity: Can We Live within the Doughnut? Oxfam Discussion Papers. https://oi-files-d8-prod.s3.eu-west-2.amazonaws.com/s3fs-public/file_attachments/dp-a-safe-and-just-space-for-humanity-130212-en_0_4.pdf. [haettu 20.6.2021]
- Raworth, Kate (2017) *Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist*. Random House Business Books, London.
- Saunders, Anaely & Luukkanen, Jyrki (2021) Sustainable development in Cuba assessed with sustainability window and doughnut economy approaches. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*.
- Sun, Jiwu (1996) *Quantitative Analysis of Energy Consumption, Efficiency and Saving in the World, 1973–90*. Publications of the Turku School of Economics and Business Administration, Series A-4:1996.
- Sun, Jiwu (1998a) Accounting for energy use in China, 1980–94. *Energy*, 23(10), 835–849.
- Sun, Jiwu (1998b) Changes in Energy Consumption and Energy Intensity: A Complete Decomposition Model. *Energy Economics*, 20(1), 85–100.
- Sun, Jiwu (1999) Decomposition of Aggregate CO₂ Emissions in the OECD: 1960–1995. *The Energy Journal*, 20(3), 147–155.
- Sun, Jiwu (2000) An analysis of the difference in CO₂ emission intensity between Finland and Sweden. *Energy*, 25(11), 1139–1146.
- Sun, Jiwu (2001) Energy demand in the fifteen European Union countries by 2010: A forecasting model based on the decomposition approach. *Energy*, 26(6), 549–560.
- Sun, Jiwu (2003) Dematerialization in Finnish energy use, 1972–1996. *Energy Economics*, 25(1), 23–32.
- Sun, Jiwu & Ang, Beng Wah (2000) Some properties of an exact energy decomposition model. *Energy*, 25(12), 1177–1188.
- Sun, Jiwu & Malaska, Pentti (1998) CO₂ emission intensities in developed countries 1980–1994. *Energy*, 23(2), 105–112.
- Sun, Jiwu & Meristö, Tarja (1999) Measurement of Dematerialization/Materialization: A Case Analysis of Energy Saving and Decarbonization in OECD Countries, 1960–95. *Technological Forecasting and Social Change*, 60(3), 275–294.
- Vazquez, Luis – Luukkanen, Jyrki – Kaisti, Hanna – Kähkönen, Mira & Majanne, Yrjö (2015) Decomposition analysis of Cuban energy production and use: Analysis of energy transformation for sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, 638–645.
- Vehmas, Jarmo (2009) Decomposition analysis of CO₂ emissions from fuel combustion in

- selected countries. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 11(1/2/3), 47–67.
- Vehmas, Jarmo – Malaska, Pentti – Luukkanen, Jyrki – Kaivo-oja, Jari – Hietanen, Olli – Vin-nari, Markus & Ilvonen, Jenni (2003) *Europe in the Global Battle of Sustainability: Rebound Strikes Back? Advanced Sustainability Analysis*. Publications of the Turku School of Econom-ics and Business Administration, Discussion and Working Papers 7:2003.
- Vehmas, Jarmo – Luukkanen, Jyrki – Kaivo-oja, Jari – Panula-Ontto, Juha & Allievi, Francesca (2012) *Key Trends of Climate Change in the Asean Countries. The IPAT Decomposition Analy-sis 1980–2005*. FFRC eBook 5/2012, Finland Futures Research Centre.
- Vehmas, Jarmo – Kaivo-oja, Jari & Luukkanen, Jyrki (2018) Energy efficiency as a driver of total primary energy supply in the EU-28 countries – incremental decomposition analysis. *Heliyon*, 4(10), e00878.
- Vehmas, Jarmo – Luukkanen, Jyrki & Kaivo-oja, Jari (2019a) Energy Efficiency as a Driver of CO2 Emissions in the EU. Teoksessa Vehmas, Jarmo & Saarimaa, Riikka (toim.) *Energizing Futures – Sustainable Development and Energy in Transition. Proceedings of the Conference ‘Energizing Futures’, 13–14 June 2018, Tampere, Finland*, 31–42. FFRC eBooks 6/2019, Fin-land Futures Research Centre..
- Vehmas, Jarmo – Luukkanen, Jyrki – Kaivo-oja, Jari & Heino, Hanna (2019b) *Energy efficiency trends and their drivers in the EU-28 Member States*. Horizon2020 project 649342 EUFORIE, Deliverable D2.1.
- Vehmas, Jarmo – Panula-Ontto, Juha & Luukkanen, Jyrki (2019c) *LINDA models: baseline and energy efficiency scenarios for the EU-28 Member States*. European Futures for Energy Effi-ciency (649342 EUFORIE), Deliverable D2.3 & D2.4.
- Waggoner, Paul E. & Ausubel, Jesse (2002) *A framework for sustainability science: A renovated IPAT Identity*. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 99(12), 7860–7865.
- WCED (1987) *Our Common Future*. World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, Oxford.
- York, Richard – Rosa, Eugene A. & Dietz, Thomas (2003) STIRPAT, IPAT and ImpACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 46(3), 351–365.