

Aalto-yliopisto  
Perustieteiden korkeakoulu  
Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma

# Portfoliolähestymistapa CO<sub>2</sub>-kiilapelin analysoinnissa

kandidaatintyö  
09.05.2012

Tuomas Juhani Lahtinen

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla.  
Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.

AALTO-YLIOPISTO PERUSTIETEIDEN KORKEAKOULU PL 11000, 00076 Aalto <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>		KANDIDAATINTYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Tuomas Juhani Lahtinen			
Työn nimi: Portfoliolähestymistapa CO <sub>2</sub> -kiilapelin analysoinnissa			
Tutkinto-ohjelma: Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma			
Pääaine: Systemitieteet		Pääaineen koodi: F3010	
Vastuupettaja: Prof. Raimo P. Hämäläinen			
Ohjaaja: Prof. Raimo P. Hämäläinen			
<p>Tiivistelmä:</p> <p>Kiilapeli on Princetonin Yliopiston Hiilidioksidipäästöjen vähennys aloitteen (Carbon Mitigation Initiative) kehittämä hiilidioksidipäästöjen vähentämisstrategian valintaa havainnollistava peli. Pelissä on tarkoituksena valita yhdistelmä hiilidioksidipäästöjen kasvua vähentäviä toimenpiteitä, siten että vuosittaisen päästömäärän kasvu pysähtyy.</p> <p>Työssä Kiilapelin valintaongelmaa lähestytään portfoliopäätösanalyysin keinoin. Lähestymistavan on tarkoitus auttaa tilanteen monimutkaisuuden ja laajuuden hallitsemisessa. Erityisesti työssä hyödynnetään Robusti portfolion mallinnus (RPM) –menetelmää, jossa portfoliolle lasketaan pistemäärä siihen kuuluvien toimenpiteiden pistemäärien summana. Yksittäisiä toimenpiteitä pisteytetään painotetulla sumalla toimenpiteiden kriteerikohtaisista arvoista, jotka määritetään kullekin toimenpiteelle valittujen arviointikriteerien suhteen. Painokertoimet kuvaavat kriteerien merkittävyyksiä kokonaisuuden kannalta. Menetelmällä voidaan huomioida lisäksi lineaarisia rajoitusehtoja sekä joitain toimenpiteiden välisiä yhdysvaikutuksia.</p> <p>Etuna RPM:ssa on epätäydellisen informaation käyttö, eli toimenpiteiden arvoja eri tavoitteiden suhteen sekä kriteerikohtaisia painokertoimia ei tarvitse määrittää tarkasti. Seurauksena portfoliolle ei voi laskea yhtä pistemäärää. Voidaan kuitenkin määrittää portfolioiden välisiä dominanssisuhteita, joissa jokin portfoliosta on annetun informaation valossa aina toista huonompi ja siten dominoituu. Dominanssien avulla portfolioiden joukkoa saadaan rajattua.</p> <p>Kiilapelin esittäminen RPM:lle soveltuvassa muodossa vaatii subjektiivisia arvioita relevanteista arvointikriteereistä, niiden tärkeysjärjestyksestä sekä peliohjeessa esiteltyjen toimenpiteiden arviointeja kriteerien suhteen. Teen arviot demonstraatiomielessä, jolloin peliohjeen mahdollistamien 203490:n erilaisen portfolion joukosta löytyy 10 ei-dominoitua portfoliota.</p> <p>Kandidaatintyön johtopäätöksissä portfoliopäätösanalyysin nähdään olevan hyödyllinen apuneuvo Kiilapelin kaltaisissa monimutkaisissa ilmastopäätöksenteko tilanteissa. Kyseenalaiseksi asetetaan kuitenkin juuri RPM-menetelmän soveltuminen tähän ongelmaan, sillä mallin lineaaris-additiivinen muoto aiheuttaa joitain rajoitteita.</p>			
Päivämäärä: 09.05.2012		Kieli: Suomi	Sivumäärä: 25
Avainsanat: kiilapeli, hiilidioksidipäästöt, portfoliopäätösanalyysi, robusti portfolion mallinnus			

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Portfoliopäätösanalyysi</b>	<b>2</b>
2.1	Additiivinen arvofunktiio . . . . .	3
2.2	Robusti portfolion mallinnus . . . . .	4
2.2.1	Epätäydellinen informaatio ja dominanssi . . . . .	5
2.2.2	Ydinluku . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Kiilapeli</b>	<b>7</b>
3.1	Toimenpidevaihtoehdot . . . . .	9
3.2	Kiilayhdistelmän valinta . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Kiilapelin mallintaminen RPM:lla</b>	<b>12</b>
4.1	Portfolion arviointikriteerit . . . . .	12
4.1.1	Kriteerikohtaiset pisteet . . . . .	14
4.2	Rajoitusehdot ja synergiat . . . . .	14
4.3	Painokertoimien antaminen . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Tulokset</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Yhteenveto ja pohdinnat</b>	<b>21</b>

# 1 Johdanto

Princetonin yliopiston Hiilidioksidipäästöjen lievennysaloite (The Carbon Mitigation Initiative, CMI) on esitellyt käsitteen tasapainotuskiilat (stabilization wedges) ensimmäisen kerran vuonna 2004 artikkelina Science-lehdessä (Pacala, Socolow; 2004). Artikkelissa arvioitiin vuosittaisten hiilidioksidipäästöjen kaksinkertaistuvan silloisesta seitsemästä gigatonnista vuodessa 2050-lukuun mennessä, mikäli kehitykseen ei puututtaisi. Päästöjen kasvu todettiin ilmaston kannalta kestävämmäksi. Artikkelissa esiteltiin useita ennustettuja hiilidioksidipäästöjä lieventäviä toimenpiteitä. Kirjoittajat korostivat, että lukuisia toimenpiteitä on jo olemassa, ja ongelma olisi sopivan yhdistelmän valinta sekä toimeenpano. Artikkelin pohjalta kehitettiin myöhemmin koululaisryhmille ja ei-asiantuntijoille suunniteltu Kiilapeli, jossa pelaajan tulee valita yhdistelmä toimenpiteitä, jotka estävät projisoidun päästöjen kasvun syntymisen. Pelaajaa pyydetään lisäksi arvioimaan valintojensa vaikutuksia eri näkökulmista. Uusin versio Kiilapelistä on ladattavissa CMI:n sivuilta (<http://cmi.princeton.edu/wedges>), johon peliohjeet on laatinut Hotinski (2011).

Tässä työssä analysoin Kiilapeliä monitavoitteisen päätöksenteon (Multi Criteria Decision Making, MCDM), portfolio päätösanalyysin sekä erityisesti systeemianalyysilaboratoriossa kehitetyn robustin portfoliomallinnuksen (Robust Portfolio Modeling, RPM) (Liesiö ja muut, 2007) keinoin. Taustateoria auttaa päätösvaihtoehtojen sekä arviointikriteerien valinnassa, monitavoitteisuuden huomiomisessa, systemaattisten tarkastelun suorittamisessa sekä kriteereihin ja arviointeihin perustuvan robustin portfolioita ja toimenpiteitä arvioivan mittarin muodostamisessa. Laskennallisena apuvälineenä käytän SAL:in kehittämää RPM-Decisions -ohjelmistoa (<http://www.rpm.tkk.fi/rpm-software.html>).

Portfoliopäätösanalyysissä pyritään auttamaan päätöksentekijää moniosaisien päätösten tekemisessä (Salo ja muut, 2011). Päätöksentekijän preferenssit ovat päätöstilannetta mallinnettaessa merkittävässä osassa, tässä työssä toimin itse päätöksentekijänä ja päätösanalyytikkona. Tuloksia tulee ensisijaisesti tarkastella pohtien, voisiko tämänkaltaisesta lähestymistavasta olla hyötyä sen sijaan, että oikeasti ratkaistaisiin optimaalinen päästöjen vähennysstrategia.

Monitavoitteisen päätöksenteon soveltamista ympäristöön liittyvässä päätöksenteossa käsittelee muunmuassa Hobbs ja Meier (2000), Marttunen ja muut (2008) sekä Bell ja muut (2001). Hobbsin ja Meijerin sekä Marttusen ja muiden julkaisuissa nostetaan päätöksentekoprosessin jäsentäminen ja moniu-

loitteisuuden huomioiminen eräksi merkittävimmistä monitavoitteisen päätöksentekoaanalyysin eduiksi. Bellin ja muiden paperissa käsitellään MCDM-tekniikoiden soveltuvuutta ympäristövaikutusten arviointiin, mikä havaitaan haastavaksi. Esimerkkitapauksia monitavoitteisen päätöksenteon soveltamisesta käytännön ongelmiin löytyy kirjallisuudesta useita. Hobbs ja Meier (2000) esittelevät muunmuassa sovelluksen energiantuotannon suunnittelusta. Marttunen ja muut (1995,2008), Marttunen (2011) sekä Mustajoki ja muut (2004,2006) esittelevät useita esimerkkitapauksia monitavoitteisen päätöksenteon soveltamisesta vesistöjen hallintaan, säännöstelyyn ja arviointiin. Portfolionäkökulman hiilidioksidipäästöjen vähentämisstrategian valintaan liittyen esittelee muunmuassa Caldeira ja muut (2004) sekä Pacala ja Socolow (2004). Kahdessa edellä mainitussa julkaisussa esitellään kuitenkin lähinnä portfolion mahdollisia osatoimenpiteitä, eikä käsitellä portfolion valintaa. Sen sijaan Jackson ja muut (1999) esittelevät portfoliopäätösanalyysin sovelluksen jätehuoltoteknologian valinnassa ja Peerenboom ja muut (1989) soveltavat portfoliopäätösanalyysiä synteettisten polttoaineden kehitysprojektien valinnassa. Bryan (2010) hyödyntää portfoliopäätösanalyysiä tehokkaiden ja robustien investointien tekemiseksi luonnon pääomaan (natural capital). Lisäksi portfoliopäätösanalyysin soveltamista erilaisissa julkisen hallinnon resurssien kohdennusongelmissa havainnollistetaan useissa Aalto-yliopiston systeemanalyysin laboratorion RPM -ryhmän julkaisuissa ([www.rpm.tkk.fi/rpm-publications.html](http://www.rpm.tkk.fi/rpm-publications.html)).

## 2 Portfoliopäätösanalyysi

Portfoliopäätösanalyysiä voidaan soveltaa tilanteissa, joissa tulee valita useiden mahdollisten toimenpiteiden joukosta jokin toteutettava osajoukko. Yksittäisten toimenpiteiden joukko voi esimerkiksi olla mahdolliset sijoituspäätökset, ravintolan ruokalistalta tilattavat ruoka-annokset tai mahdolliset hiilidioksidipäästöjä vähentävät toimenpiteet. Tyypillisesti ollaan kiinnostuneita valittujen toimenpiteiden kokonaisvaikutuksesta asetetun päämäärän suhteen. Sijoittaja saattaa tavoitella korkeaa sijoitusportfolion tuoton odotusarvoa, toisaalta tuoton varianssin on hyvä olla pieni. Ravintolailallisella halutaan hyvin toisiinsa sopivia ruoka-annoksia, esimerkiksi valkoviiniä kalan kanssa. Hiilidioksidipäästöjen vähennysstrategiaa valittaessa halutaan mahdollisimman suuret päästövähennykset mahdollisimman halvalla, toisaalta tiettyihin toimenpiteisiin saattaa liittyä riskejä. Lisäksi portfolion toimeenpanoa voi haitata esimerkiksi poliittiset seikat.

Edellisistä esimerkeistä käy ilmi kaksi portfoliopäätösanalyysin kannalta keskeistä seikkaa. Tavoite on usein monikriteerinen, ja portfolioon kuuluvilla toimenpiteillä saattaa olla yhteisvaikutuksia. Yhteisvaikutusten arvioimisen kannalta on tärkeää arvioida valittuja toimenpiteitä kokonaisuutena.

Salo, Keisler ja Morton (2011) määrittelevät portfoliopäätösanalyysin seuraavanlaisesti: "Portfoliopäätösanalyysillä tarkoitamme teorian, metodien ja käytännön kokoelmaa, jolla pyritään auttamaan päätöksentekijöitä useiden valintojen tekemisessä diskreetistä joukosta vaihtoehtoja. Analyysissä tilannetta mallinnetaan matemaattisesti ottaen huomioon olennaiset rajoitukset, preferenssit ja epävarmuudet." (Suomentanut Tuomas Lahtinen)

## 2.1 Additiivinen arvofunktio

Kun päätöksentekotilanteessa on useita tavoitteita, on eräs lähestymistapa additiivisen arvofunktion käyttö. Jos päätösvaihtoehdot arvioidaan numeerisella asteikolla kunkin tavoitteen suhteen, kutsutaan arvioituja pistemääriä kriteerikohtaiseksi pistemääräksi (criterion specific score). Esimerkiksi kriteeri "hinta" kuvaa tavoitteen "mahdollisimman halpa" toteutumista. Additiivinen arvofunktio on tapa mallintaa toimenpidevaihtoehdoille niiden hyvyttä kuvaava luku. Luku muodostuu painotettuna summana valintavaihtoehdon kriteerikohtaisista arvoista. Additiivisen arvofunktion käytön teoreettiset edellytykset, jotka esitellään kahdessa seuraavassa kappaleessa, ovat esitelleet muunmuassa Keeney ja Raiffa (1976).

Teoreettisesta näkökulmasta voidaan tarkastella ehtoja, jotka päätöksentekijän preferenssien tulee toteuttaa, jotta additiivinen arvofunktio pystyisi asettamaan vaihtoehdot preferenssien mukaiseen järjestykseen. Ehtona on valintavaihtoehtojen kriteerikohtaisten pistemäärien keskinäinen preferenssiriippumattomuus (mutual preference independence). Tällöin mikä tahansa kriteerikohtaisten arvojen osajoukko on preferenssiriippumaton muiden kriteerien arvoista. Esimerkiksi ravintolassa vieraileva päätöksentekijä saattaa preferoida punaviiniä veden sijaan riippumatta ruoasta, jolloin preferenssiriippumattomuus toteutuu juoman osalta, jos vesi ja punaviini ovat ainoat juomavaihtoehdot. Toisaalta kun valintavaihtoehdona on lisäksi valkoviini, riippuu päätöksentekijän preferenssi valkoviinin ja punaviinin välillä ruoasta, täten preferenssiriippumattomuus ei toteudu. Preferenssiriippumattomuuden toteutuessa additiivisen arvofunktion tuottama luku asettaa valintavaihtoehdot järjestykseen, mutta ei ota kantaa siihen, kuinka paljon jokin vaihtoehto on toista parempi.

Jos lisäksi halutaan additiivisen arvofunktion tuottavan kardinaalisen järjestyksen valintavaihtoehtojen välille, täytyy differenssiriippumattomuuden toteutua vähintään yhden kriteerin suhteen. Kriteeri A on differenssiriippumaton muista kriteereistä, jos muutos kriteerissä A on aina yhtä arvokas, riippumatta kriteerikohtaisista pisteistä muiden kriteerien suhteen.

Muotoillaan additiivinen arvofunktiio formaalisti. Olkoon  $X = \{x^1, \dots, x^m\}$   $m:n$  mahdollisen toimenpiteen joukko. Kutakin toimenpidettä arvioidaan  $n:n$  kriteerin suhteen. Toimenpidevaihtoehdon  $x^j$  kriteerin  $i$  suhteen saamaa pistemäärää merkitään  $v_i^j \geq 0$ . Pistemäärät on tapana normeerataan siten, että  $v_i^j \in [0,1]$ . Arvofunktiio  $V(x^j) = \sum_{i=1}^n w_i v_i^j$ , jossa  $w_i \geq 0$  on kriteerin  $i$  painokerroin, kertoo toimenpidevaihtoehdon pistemäärän kokonaistavoitteen suhteen. Painokertoimet normeerataan  $\sum w_i = 1$ , jossa  $w_i$  on kriteerin  $i$  pistemäärän nousun  $0 \rightarrow 1$  vaikutus kokonaispistemäärään. Tämä ominaisuus on tärkeää pitää mielessä painokertoimia asettaessa. Kriteerin pistemäärä on 0 tai 1, kun päätösvaihtoehdolla on kriteerin suhteen tietyt ominaisuudet, jotka ovat mitattavia tai muuten määriteltyjä. Tällöin painokertoimille saadaan konkreettinen tulkinta, joka on painokertoimia asettaessa tärkeä. Sen sijaan että mielivaltaisesti arvioidaisiin kriteerien "vaikutukset luontoon" ja "rahallinen hinta" tärkeysjärjestyttä, perustuu kriteerien painokertoimien asettaminen todellisten muutosten arviointiin. Kahden kriteerin painokertoimien suhteen tulisi kuvata kriteerikohtaisten arvojen  $0 \rightarrow 1$  nousun suhteellista vaikutusta kokonaispistemäärään.

## 2.2 Robusti portfolion mallinnus

Additiivinen arvofunktiio soveltuu yksittäisten toimenpidevaihtoehtojen arviointiin. Edellisessä luvussa esitelty menetelmä ei usein kuitenkaan suoraan sovellu portfoliopäätösanalyysiin. Valintaportfolio sisältää monta yksittäistä valintaa, ja käytännössä erilaisia valintayhdistelmiä on niin monta, että olisi työlästä arvioida kriteerikohtaiset arvot kullekin yhdistelmälle erikseen. Robustissa portfolion mallinnuksessa (RPM) (Liesiö, 2007) portfolion kokonaispistemäärä lasketaan siihen kuuluvien toimenpidevaihtoehtojen pistemäärien summana.

Portfolio on yhdistelmä erillisiä toimenpiteitä, jolloin se voidaan tulkita toimenpidejoukon  $X$  osajoukkona. Mahdollisten portfolioiden joukko on siis  $X:n$  potenssijoukko  $P = 2^X$ , joka on kaikkien  $X:n$  osajoukkojen joukko. Merkitään kriteerikohtaisia painoja  $w = [w_1, \dots, w_n]^T$  ja eri toimenpidevaihtoehtojen kriteerikohtaisia arvoja  $m \times n$  matriisilla  $v$ , jossa rivillä  $j$  on  $v^j = [v_1^j, \dots, v_n^j]$ .

Portfolion kokonaispistemäärälle saadaan seuraava lauseke

$$V(p,w,v) = \sum_{x^j \in p} V(x^j) = \sum_{x^j \in p} \sum_{k=1}^n w_k v_k^j. \quad (1)$$

Kaavan 1 arvofunktiota voidaan kirjoittaa myös muodossa  $V(p,w,v) = \sum_{i=1}^n w_i \sum_{x^j \in p} v_i^j$ , jossa  $\sum_{x^j \in p} v_i^j$  voidaan tulkita portfolion pistemääränä kriteerin  $i$  suhteen. Tämä esitysmuoto on analoginen edellisen luvun additiiviselle arvofunktiolle. Kaavan 1 summauksessa kukin  $v_i^j$  on samanarvoinen riippumatta portfolion sisällöstä, mikä voi asettaa menetelmän käytölle rajoituksia joissain sovelluksissa. Jotta kaavan 1 arvofunktion avulla laskettu portfolion pistemäärä vastaisi päätöksentekijän preferenssejä, tulee tiettyjen oletusten tulee toteutua. Niihin ei tässä työssä tarkemmin perehdytä, mutta aiheita ovat tarkastelleet ainakin Golabi ja muut (1981), Golabi (1987) sekä Liesiö (2012).

Määritellään käsite käypien porfolioiden joukko (feasible portfolios), johon kuuluu tehtävän rajoitusehdot täyttävät portfoliot. Merkitään  $\bar{x} = (x^1, \dots, x^m)$ , jolloin käyvät portfoliot voidaan esittää joukkona

$$P_F = \{p \in P \mid x_i \in p \Rightarrow x_i = 1, x_i \notin p \Rightarrow x_i = 0, A\bar{x} \leq \bar{b}\}, \quad (2)$$

jossa matriisit  $A$  ja  $b$  sisältävät tehtävän lineaariset rajoitusehdot.

Lisäksi rajoitusehtoja voidaan käyttää synergioiden mallintamiseen. Toimenpiteiden välistä synergiaetua tai sub-additiivisuutta portfolion kokonaisarvon suhteen voidaan mallintaa rajoitusehtojen kautta, vaikka kaavan 1 mukaisessa arvofunktiossa synergioita ei voikaan huomioida. Toimenpiteiden välinen synergia voidaan huomioida apumuuttujalla, joka saadaan rajoitusehtojen avulla portfolioon, jos ja vain jos synergian aiheuttavat toimenpiteet ovat portfolioissa.

### 2.2.1 Epätäydellinen informaatio ja dominanssi

Yhtälön 1 arvofunktion optimointi  $P_F$ :ssa esiintyvien lineaaristen rajoitteiden suhteen on lineaarisen ohjelmoinnin tehtävä. Todellisuudessa eri toimenpidevaihtoehtojen kriteerikohtaisten pistemäärien  $v_i^j$  ja kriteeripainojen  $w_i$  tarkka määrittäminen on hankalaa ja todennäköisesti kallista. RPM:ssa kriteerikohtaisille pistemäärille ja kriteeripainoille määritellään käyvät joukot, joiden sisällä ne vaihtelevat. Käytössä on siis ainoastaan epätäydellistä informaatiota. Tällöin ei yleensä voida selvittää yksikäsitteisesti parasta portfolioita, ainoastaan sulkea pois osa portfolioista dominanssihierarkioiden avulla.



Merkitään kriteerikohtaisille pistemäärille ala- ja ylärajat  $v_i^j \leq v_i^j \leq \overline{v_i^j} \forall j = 1, \dots, m, i = 1, \dots, n$ . Käypien pistemäärien joukkoa merkitään  $S_v = \{v \in \mathbb{R}_+^{m \times n} | v_i^j \in [v_i^j, \overline{v_i^j}]\}$ . Painoille muodostetaan käypä joukko  $S_w \subseteq S_w^0 = \{w \in \mathbb{R}^n | w_i \geq 0, \sum_{i=1}^n w_i = 1\}$ . Menetelmän soveltaminen vaatii, että päätöksentekijän preferenssilausuntoja painojen  $w_i$  suhteen edustava joukko  $S_w$  on konveksi monikulmio. Päätöksentekijän preferenssit painojen suhteen voivat olla esimerkiksi muotoa  $0 \leq w_1 \leq w_2 \leq w_3 \leq 1$ , mikä yhdessä normeerausehdon kanssa määrää  $S_w$ :n konveksiksi tason  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$  osajoukoksi. Joukkojen  $S_w$  ja  $S_v$  karteesisista tuloa  $S = S_w \times S_v$  kutsutaan informaatiojoukoksi, sillä se sisältää painoihin ja kriteerikohtaisiin arvoihin liittyvän informaation. Epätäydellisen informaation vallitessa voidaan painokertoimien valinnassa soveltaa esimerkiksi Salon ja Punkan (2005) tai Mustajoen ja muiden (2005) esittelemiä preferenssien mallinnustekniikoita.

Epätäydellisen informaation vallitessa portfolioita ei tyypillisesti saa asetettua paremmuusjärjestykseen. Tavallisen  $\mathbb{R}$ :n ”  $>$  ” -relaation sijaan määritellään portfolioille osittaisjärjestyksen määräävä ”  $\succ_s$  ” -dominanssirelaatio. Jos portfolio  $p$  tuottaa portfolioita  $p'$  paremman pistemäärän kaikilla mahdollisilla sallittujen painojen ja kriteerikohtaisten pisteiden yhdistelmillä, sanotaan, että portfolio  $p$  dominoi portfolioita  $p'$ . Määritellään sama matemaattisesti.

**Määritelmä 1.** *Ol.  $p, p' \in P$ . Portfolio  $p$  dominoi  $p'$ :a informaatiojoukolla  $S$ , merkitään  $p \succ_S p'$ , joss  $V(p, w, v) \geq V(p', w, v) \forall (w, v) \in S$  ja  $\exists (w, v) \in S, V(p, w, v) > V(p', w, v)$ .*

Määritellään informaatiojoukon  $S$  suhteen ei-dominoitujen portfolioiden joukko  $P_N(S) = \{p \in P_F | p' \not\succeq_s p \forall p' \in P\}$ . Ei-dominoitujen portfolioiden joukkoon kuuluu ainoastaan portfolioita, jotka eivät ole dominoituja. Päätöksentekijän valintaongelman kannalta joukko  $P_N(S)$  on merkittävä. Mikäli päätöksentekijän todellisia preferenssejä edustava funktio sisältyy joukon  $S$  rajaamaan additiivisen arvofunktion vaihteluväliin, niin koskaan ei kannata valita käypää portfolioita  $p$ , joka ei ole joukossa  $P_N(S)$ , sillä on olemassa käypä portfolio  $p'$ , joka kuuluu joukkoon  $P_N(S)$  ja tuottaa portfolioita  $p$  paremman kokonaispistemäärän kaikilla mahdollisilla informaatiojoukon  $S$  sisältämillä  $(w, v)$  yhdistelmillä. Käytännössä useimmiten ei-dominoitujen portfolioiden lukumäärä on paljon pienempi kuin mahdollisten portfolioiden yhteismäärä, joten joukon  $P_N(S)$  selvittäminen on hyödyllistä päätöksenteon kannalta. Ei-dominoitujen portfolioiden joukon laskeminen käymällä läpi kaikki  $2^m$  portfolioita voisi laskennallisesti olla hyvinkin raskasta. RPM-Decisions-ohjelma kuitenkin käyttää laskennallisesti tehokasta dynaamista, lineaarista ohjelmointia hyödyntävää algoritmia ei-dominoitujen portfolioiden selvittä-

miseksi (Liesiö ja muut, 2007).

## 2.2.2 Ydinluku

Yksittäisten toimenpiteiden tasolla voidaan jokaiselle toimenpidevaihtoehdolle antaa luku, joka kertoo kuinka suureen osaan ei-dominoiduista portfolioista kyseinen toimenpidevaihtoehto kuuluu. Lukua kutsutaan ydinluvuksi (core index). Ydinluku toimenpiteelle  $x^j \in X$  informaatiojoukon suhteen määritellään matemaattisesti

$$CI(x^j, S) = \frac{|\{p \in P_N(S) | x^j \in p\}|}{|P_N(S)|}, \quad (3)$$

jossa  $|\{.\}|$  kertoo joukon  $\{.\}$  alkioden lukumäärän. Toimenpiteitä, joiden ydinluku on yksi, sanotaan *ydintoimenpiteiksi* (core project). Jos luku on välillä (0,1) toimenpidettä sanotaan *rajatoimenpiteeksi* (borderline project). Jos luku on nolla, niin toimenpidettä sanotaan *ulkotoimenpiteeksi* (exterior project). Informaatiojoukon S puitteissa ydintoimenpiteet tulisi valita toteutettavaksi ja ulkotoimenpiteitä ei. Ydintoimenpiteet ovat robusteja valintoja osaksi portfolioita, sillä informaatiojoukon S puitteissa ne ovat mukana kaikissa ei-dominoiduissa portfolioissa.

Liesiö ja muut (2007) osoittavat, että hankittaessa päätöksentekoon lisäinformaatiota saaden päivitetty informaatiojoukko  $S' \subset S$  ehdolla  $int(S) \cap S' \neq \emptyset$ , pysyvät ydintoimenpiteet ydintoimenpiteinä ja ulkotoimenpiteet ulkotoimenpiteinä myös tarkennetun informaation valossa. Myöskään ei-dominoitujen portfolioiden joukko ei voi kasvaa. Tulos on käytännöllinen, sillä tarkennettua tietoa tarvitsee hankkia vain rajatoimenpiteistä, koska muiden toimenpiteiden status ei voi muuttua.

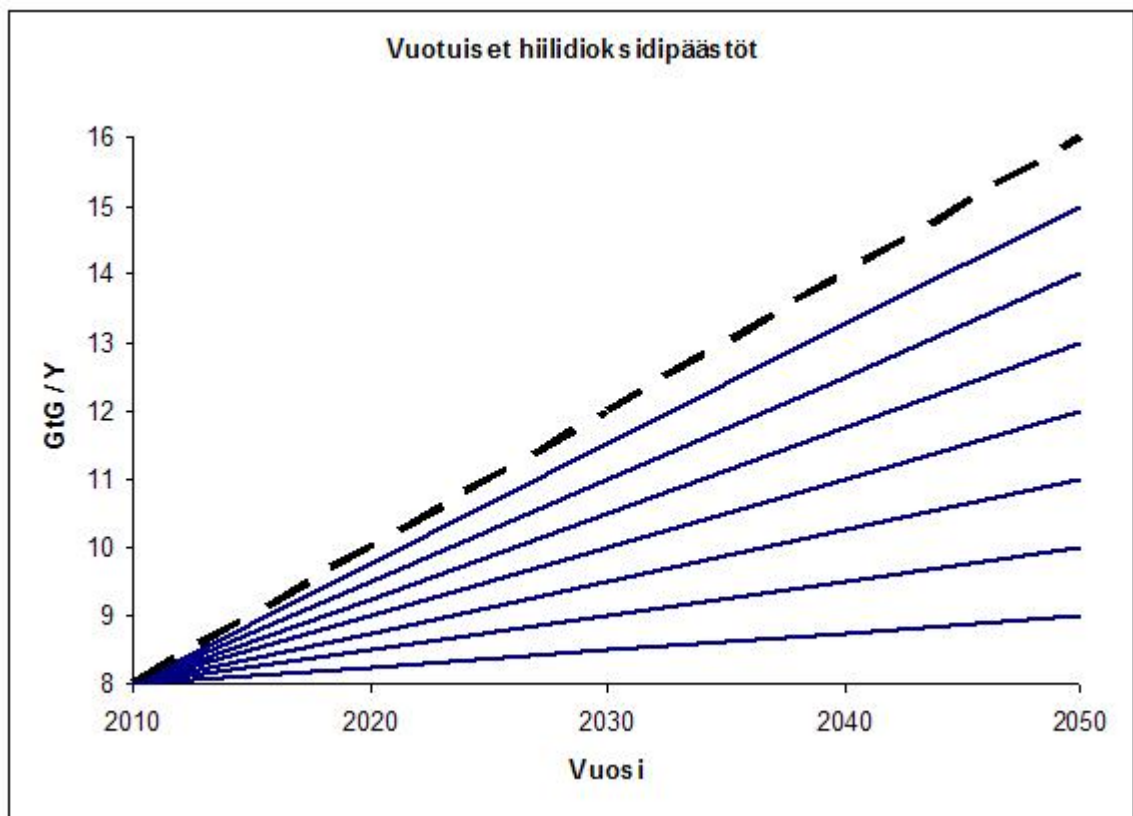
## 3 Kiilapeli

Kiilapeli perustuu Princetonin yliopiston Hiilidioksidipäästöjen lievennysaloitteen (The Carbon Mitigation Initiative, CMI) esittelemään käsitteeseen tasapainotuskiilat (Stabilization Wedges). Pelin on tarkoitus havainnollistaa hiilidioksidipäästöjen vähennysstrategian muodostamista yhdistelmänä erilaisista toimenpiteistä. Uusimman version pelistä on laatinut Hotinski (2011).

Peliohjeen mukaan vuosittaisten hiilidioksidipäästöjen on ennustettu kaksinkertaistuvan vuoteen 2050 mennessä. Pelissä tarkoituksena on valita sopi-

va yhdistelmä hiilidioksidipäästöjä vähentäviä toimenpiteitä siten, että vuosittaisten hiilidioksidipäästöjen kasvu pysähtyy. Kuva 1 havainnollistaa tilannetta ja noudattaa alkuperäisen peliohjeen havainnekuva. Tumma katkoviiva esittää 'business-as-usual' (BAU) kehitysuraa, joka on tähänastisen kehityksen projektio tulevaisuuteen ja ennuste päästövauhdin kehittymiselle. BAU-kehitysuran ja tavoitteen välinen osuus on kuvassa sinisillä viivoilla jaettu kahdeksaan kiilaan (vuonna 2004 riitti seitsemän kiilaa). Kuvajasssa asteikot ovat GtC/Y ja Y, eli kunkin kiilan pinta-ala kuvaa ehkäistystä päästömäärää vuosien 2010-2050 ajalta.

Pelissä esitellään 15 erilaista toimenpidevaihtoehtoa, joista kukin ehkäisee yhden kiilan suuruisen päästömäärän syntyvän vuosina 2010-2050. Kuvan 1 mustan katkoviivan ja vuosi-akselin välisen kolmion pinta-alan suuruisten päästöjen ehkäisemiseksi tulee portfolioon valita kahdeksan toimenpidettä.



*Kuva 1: Kiilat*

### 3.1 Toimenpidevaihtoehdot

Toimenpidevaihtoehtoja peliohjeessa esitellään 15, joista osa on valittavissa portfolioon useamman kerran. Peliohjeessa pyydetään pelaajaa arvioimaan, kuinka monta kertaa kutakin toimenpidettä on realistista toteuttaa. Valitsin osalle toimenpidevaihtoehdoista mahdollisuuden toteutua kahdesti ja osalle kerran. Mittakaavaltaan suurimmat tai luonteeltaan ainutkertaiset toimenpiteet, kuten metsien hakkuun pysäyttäminen, ovat ainoastaan kerran toteutettavissa. Muut toimenpiteet ovat toteutettavissa kahdesti.

Kunkin vaihtoehdon toteuttamisella on vaikutuksia ainakin jollain sektoreista sähköntuotanto (S), lämmitys ja polttoaineen käyttö (P), liikenne (L) ja hiilidioksidikaivot (H). Lisäksi toimenpidevaihtoehdoilla on ominaispiirteensä, joista kerrotaan pelioppaassa sekä lisätietoja varten viitataan IPCC:n 2007 raporttiin. Taulukkoon 1 on koottu eri toimenpiteet, vaikutussektorit, peliohjeessa ilmoitettu karkea suhteellinen hinta-arvio, peliohjeissa mainittuja erityishaasteita sekä lukumäärä, joka ilmoittaa, kuinka monta kertaa kyseinen toimenpide on valittavissa portfolioon. Taulukko jäljittelee alkuperäisen peliohjeen toimenpidetaulukkoa.

*Taulukko 1: Toimenpidevaihtoehdot*

Toimenpide	Sektori	Hinta	Haasteita	Lkm
Kuljetuksen tehostaminen	L	\$	Teknologia	1
Matkustuskilometrien puolittaminen	L	\$	Suunnittelu, tavat	1
Rakennusten energiatehokkuus	S,P	\$	Arjen muutokset	1
Energiatuotannon tehostaminen	S	\$	Kalliimmat laitokset	1
Carbon Capture and Storage (CCS) Sähkö	S	\$\$	Säilöamisen vaikeus	2
CCS Vety	L,P	\$\$\$	Uusi infrastruktuuri	1
CCS Synfuelit	L,P	\$\$	Mittakaava	2
Polttoaineen vaihto	S	\$	Kaasun saatavuus	2
Ydinvoimasähkö	S	\$\$	Julkinen mielipide	1
Tuulivoimasähkö	S	\$\$	NIMBY	2
Aurinkosähkö	S	\$\$\$	Materiaali	2
Vetypolttoainetta tuulivoimalla	L,P	\$\$\$	NIMBY, turvallisuus	1
Biopolttoaineet	L,P	\$\$	Maankäyttö	2
Metsiin varastointi	H	\$	Maankäyttö	1
Maaperään varastointi	H	\$	Riskialtis	1

Toimenpiteiden kuvaukset:

- Kuljetuksen tehostaminen  
Autojen kilometrikohtaisen polttoaineenkulutuksen puolittaminen. To-  
teutetaan esimerkiksi ottamalla käyttöön teknologioita kuten hybridi-  
autot, dieselmoottorit ja kevyemmät materiaalit.
- Matkustuskilometrien puolittaminen  
Autojen ajokilometrien puolitus. Saavutetaan esimerkiksi lisäämällä  
joukkoliikennettä, korvaamalla kasvatusten tapaamisia elektronisella  
kommunikoinnilla ja matkustamisen vähentämisellä
- Rakennusten energiatehokkuus  
Olemassa olevien ja tulevien rakennusten päästöjen vähentäminen nel-  
jänneksellä nykyisestä. Keinoina muunmuassa säästöt lämmityksessä  
ja viilennyksessä, elektronisten laitteiden kulutuksessa, tehokkaammat  
eristeet, lämpöpumput sekä asutokohtaisen energiantuotannon lisää-  
minen.
- Energiatuotannon tehostaminen  
Hiilivoimaloiden tehokkuuden kaksinkertaistaminen. Menetelminä esi-  
merkiksi paremmat turbiinit, korkean lämpötilan polttokennot sekä  
muut tehostustoimenpiteet.
- CCS Sähkö  
Hiilidioksin talteenotto ja varastointitoimenpiteiden soveltaminen 800  
suureen (1 Miljoonaa wattia) hiilivoimalaan tai 1600:n suureen kaasu-  
voimalaan 50 vuoden sisällä.
- CCS Vety  
Vedyn talteenotto hiilidioksidivoimaloissa ja hiilidioksidin varastointi,  
jonka jälkeen vety jaeltaisiin hyötykäyttöön polttoaineeksi.
- CCS Synfuelit  
180 hiili-synfuel voimalan hiilidioksidipäästöjen talteenotto ja varas-  
tointi.
- Polttoaineen vaihto  
1400:n hiilivoimalan vaihto vähemmän saastuttaviksi kaasuvoimaloiksi.
- Ydinvoimasähkö  
Ydinvoimakapasiteetin kolminkertaistaminen.
- Tuulivoimasähkö  
Miljoonan uuden tuulimyllyn rakentaminen. Vie pinta-alaa Saksan ko-  
koisen alueen verran, mutta toisaalta myllyt voi rakentaa rannikolla  
veteen.

- Aurinkosähkö  
Aurinkovoiman kapasiteetin satakertaistaminen.
- Vetytolttoainetta tuulivoimalla  
Tuulella tuotetun vedyn käyttö ajoneuvojen polttoaineena. Vaatii kahden miljoonan tuulimyllyn rakentamisen.
- Biopolttoaineet  
1/6 maailman tämänhetkisestä viljelysmaasta biopolttoaineiden tuotantoon, mikä vastaa suurin piirtein Intian kokoista aluetta. Teknologinen kehitys saattaa toisaalta parantaa tehokkuutta ja vähentää vaadittua pinta-alaa.
- Metsiin varastointi  
Metsien vähentymisen pysäyttäminen 50 vuodeksi.
- Maaperään varastointi  
Maaperään ja aluskasvillisuuteen hiilidioksidia varastoivien toimenpiteiden toimeenpano, kuten aluskasvillisuuden istutus viljelysmaihin. Vaatii varastoivien toimenpiteiden käyttöönoton kaikissa maailman maataloudellisessa maaperässä.

### 3.2 Kiilayhdistelmän valinta

Kiilapelissä kukin toimenpide vastaa yhden kiilan suuruista päästönlievenystä. Päästöjen vähennys tavoitteen toteutumiseksi toimenpiteitä tulee valita kahdeksan. Lisäksi peliohjeissa asetetaan rajoitus toimenpiteiden sektori-kohtaisille vaikutuksille. Korkeintaan viisi kiilaa saa vaikuttaa sektoriin lämmitys ja polttoaineenkäyttö (P), viisi sektoriin liikenne (L) ja kuusi sektoriin sähköntuotanto (S).

Peliohjeissa kehoitetaan arvioimaan valitun portfolion hintaa sekä muita mahdollisia ongelmia tai rajoitteita. Mahdollisiksi ongelmakohtiksi mainitaan portfolion toteuttamiseen liittyvät tekniset ja poliittiset vaikeudet. Lisäksi pyydetään arvioimaan erilaisten sidosryhmien suhtautumista portfolioon. Sidoryhmistä mainitaan ainakin kuluttajat, teollisuus, luonnonsuojeluryhmät ja kehitysmaiden hallitukset.

## 4 Kiilapelin mallintaminen RPM:lla

Tässä työssä tarkastelen Kiilapelin päästöjä vähennysongelmaa portfolioanalyysin keinoin. Mallinnan tilannetta käyttäen RPM-menetelmää, joka esiteltiin luvussa 2.2. RPM-menetelmän vahvuus on epätäydellisen informaation salliminen (luku 2.2.1). Epätäydellisestä informaatiosta johtuen ei ole mahdollista laskea yksikäsitteistä ratkaisua tehtävälle. Sen sijaan on mahdollista ratkaista ei-dominoitujen portfolioiden joukko (luku 2.2.1), joka voi auttaa portfolioon valitsemisessa.

Kuten luvussa 2.2. pohditaan, kaavan 1 mukainen portfolioon kokonaisarvon lauseke saattaa olla soveltumaton Kiilapelin toimenpideyhdistelmien vaikutusten mallintamiseen. Portfolioon arvofunktiota ei muun muassa pysty huomioimaan yksittäisten toimenpiteiden välisiä synergioita. Lisäksi kaavan 1 arvofunktion käyttö olettaa, että lisättäessä portfolioon toimenpide, ovat vaikutukset kokonaispisteisiin riippumattomat jo portfolioon olevista toimenpiteistä. Esimerkiksi jokin toimenpide lopettaa autoilun ja toinen tekee autojen bensasta saasteettoman. Molempien toimenpiteiden ollessa osana portfolioa lasketaan autoilun saasteiden loppumisen hyöty kahdesti, vaikka toinen toimenpide ei enää tuota lisäarvoa ensimmäisen jälkeen. Alkuperäisessä peliohjelmassa ei tätä ilmiötä mainita, eikä ainakaan eksplisiittisesti pyydetä ottamaan huomioon. Toisaalta huomioiden pelin kohdeyleisö, ei tilannetta kenties ole haluttu monimutkaistaa liikaa. Tässä työssä otan ilmiön huomioon käyttäen RPM:n rajoitusehtomatriiseja ja apumuuttujia. Menetelmän kuvaan tarkemmin luvussa 4.2.

Osaltaan RPM:ssa kaavan 1 mukaisen arvofunktion käytön haitallisia vaikutuksia lieventää epätäydellisen informaation salliminen. Jos päätöksentekijän preferenssien mukainen arvofunktiota sisältyy RPM-mallin arvofunktiolle informaatiojoukon puitteissa syntyvään vaihteluväliin, on oikean arvofunktion mukainen päätössuositus osana ei-dominoitujen portfolioiden joukkoa.

### 4.1 Portfolioon arviointikriteerit

Portfolioon kokonaispistemäärä on esitetty luvussa 2.2 lausekkeena (kaava 1), jossa portfolioon pistemäärä määräytyy summana yksittäisten projektien pisteistä.

Toimenpiteiden arvioimiseksi on valittu seuraavat kriteerit:

- Hinta

Hinnan valinta yhdeksi kriteeriksi ei ole itsestäänselvää, sillä olisi hyvinkin mahdollista asettaa hinta budjettirajoitteeksi rajoitusehtoihin. Kiilapelissä tarkkaa budjettia ei kuitenkaan ole, jolloin hinta on enneminkin kriteeri muiden joukossa.

- Teknologiset haasteet  
Kuvaa toimenpiteen toteuttamiseksi vaadittavia teknisiä uudistuksia, uutta teknologiaa tai lisäpanostusta tutkimukseen.
- Maankäyttöön liittyvät ongelmat  
Kuvaa toimenpidevaihtoehdon viemää pinta-alaa, vaikutuksia maaperään, sekä vaihtoehdon maaperän käyttöön liittyvää riskiä esimerkiksi hiilidioksidin tai ydinjätteen varastoisissa.
- Vaikutus arkielämään  
Kuvaa toimenpiteen välittömiä vaikutuksia ihmisten arkielämään. Negatiivisten vaikutusten voi odottaa kohtaavan vastustusta.
- Poliittiset tekijät  
Kriteerissä pyritään huomioimaan poliittiset tekijät, joita ei edellisissä kriteereissä ole huomioitu. Esimerkiksi kuhunkin projektiin liittyvien ristiriitaisten eturyhmien lukumäärä tai muut poliittiset hankaluudet.

Kriteerit on valittu peliohjeen perusteella kuvamaan portfolion valinnan kannalta relevantteja tekijöitä. Luvussa 3.2 on esitelty portfolion valinnalle peliohjeessa esitetyjä tavoitteita, joita edellä mainittujen kriteerien valinnassa on huomioitu. Kriteerien valinta on subjektiivista, joten valitut kriteerit perustuvat omaan arviooni Kiilapelin portfolion valinnan kannalta merkittävistä tekijöistä.

Kriteerien valitsemiseksi on useissa lähteissä, kuten Marttunen ja muut (2008), Hobbs (2000), Clemen (1996), esitetty melko yhteneviä ohjeita. Kaikissa lähteistä on muun muassa korostettu seuraavia asioita: hyvin valittujen kriteerien tulisi kattaa kokonaistavoitteen kannalta olennaiset seikat, kriteerien tulisi olla selkeät ja ymmärrettävät, kriteerit eivät saisi olla päällekkäisiä. Toisaalta kriteerien tulisi olla mahdollisimman yksinkertaiset.

Nyt valituissa kriteereissä on ongelmana kuvauksien epätasällisyys. Peliohjeen ja käytetyn aineiston perusteella kriteereitä ja niiden sisältöä on vaikea määrittellä tarkasti. Tarkempi määrittely ei toisaalta ole tarpeellista työssä, jonka tarkoitus on demonstroida portfolioanalyysin käyttöä. Muut hyvillä kriteereillä esitellyt ominaisuudet mielestäni täytyvät riittävän hyvin.



### 4.1.1 Kriteerikohtaiset pisteet

Tässä työssä on raakaa dataa käytettävissä niukasti, eivätkä edellisessä luvussa esitellyt kriteerien kuvaukset ole kovin täsmälliset, joten kriteerikohtaisten pisteiden tarkka määrittäminen on vaikeaa. Toimenpiteiden kriteerikohtaiset pistemäärät on arvioitu itse. Arvioinnit perustuvat suuntaa-antavasti työohjeeseen, muun muassa taulukon 1 tietoja on käytetty hyväksi. Todellisessa päätöksentekotilanteessa päätöksentekijä tuottaisi arvioinnit.

Kriteerikohtaisten pisteiden arviointi on sitä helpompaa, mitä tarkemmin kriteerikohtaiset pistemäärät ovat kytköksissä johonkin todelliseen mitattavaan suureeseen. Esimerkiksi hinta -kriteeri on suoraviivainen, kunkin toimenpiteen hinta on sen toteuttamisen rahallinen kustannus. Sen sijaan poliittiset tekijät -kriteerin suhteen arvojen määrittäminen on hankalampaa.

Toimenpiteiden pistemäärät kunkin kriteerin suhteen on määritetty siten, että kriteerin suhteen paras toimenpide on saanut kriteerikohtaisen pistemäärän 0 ja huonoiten pärjännyt pistemäärän 1. Tilanne on siis muotoiltu niin, että portfolion arvo kuvaa kyseisen toimenpideyhdistelmän toteuttamisen vaikeutta. Kriteerikohtaisiin pisteisiin liittyvää epävarmuutta havainnollistetaan antamalla pisteiden vaihdella taulukossa 2 esitettyjen arvojen ympärillä  $\pm 0.005$  yksikköä. Vakiovaihteluväli on kyseenalainen pieniä kriteerikohtaisia pistemääriä saaneiden toimenpiteiden kohdalla, sillä vaihteluväli aiheuttaa melko suuren suhteellisen vaihtelun. Sen sijaan suhteellista vaihteluväliä käytettäessä olisi suuria kriteerikohtaisia arvoja saaneiden toimenpiteiden kriteerikohtaisten arvojen absoluuttinen vaihtelu suurta. Kumpikaan ei ole suoraviivaisesti perusteltavissa, sillä asteikon suunnan, eli onko arvo 1 maksimi vai minimi, valinta on mielivaltaista. Taulukossa 2 luetellaan toimenpiteiden kriteerikohtaiset pistemäärät kahden desimaalin tarkkuudella.

## 4.2 Rajoitusehdot ja synergiat

Rajoitusehtoina kiilapelissä on valittavien toimenpiteiden määrä sekä sektoriohtaiset rajoitteet. Nämä on helppo mallintaa kaavan 2 rajoitusehtoyhtälön  $A\bar{x} \leq \bar{b}$  matriiseihin. Esimerkiksi valittavien toimenpiteiden määrärajoite asetetaan lisäämällä A:han rivivektorit  $\bar{1}' = [1, \dots, 1, 0, \dots, 0]$  ja  $-\bar{1}'$ , joissa oikeiden projektien kertoimina on ykkösiä ja apumuuttujien kertoimina nollia. Vastaaville riveille  $\bar{b}$  vektoriin asetetaan luvut 8 ja  $-8$ . Tällöin rajoitusehtoepäyhtälö toteutuu, jos ja vain jos valitussa portfolioissa on tasan 8 toimenpidettä.

Taulukko 2: Kriteerikohtaiset pistemäärät

Toimenpide	Hinta	Teknologiset haasteet	Maankäyttö	Vaikutus arkielämään	Poliittiset tekijät
Kuljetuksen tehostaminen	0.3	1	0.17	0.17	0
Matkustuskilometrien puolittaminen	0.05	1	0	1	0
Rakennusten energiatehokkuus	0.1	0.25	0.17	0.5	0.1
Energiatuotannon tehostaminen	0.3	0.75	0.17	0	0
CCS Sähkö	0.4	0.5	0.67	0	0
CCS Vety	0.8	0.75	0.83	0	0.2
CCS Synfuelit	0.4	0.5	0.67	0	0.2
Polttoaineen vaihto	0.3	0.13	0.25	0	0.2
Ydinvoimasähkö	0.4	0.38	0.42	0.17	1
Tuulivoimasähkö	0.6	0.25	0.67	0.33	0.4
Aurinkosähkö	1	0.25	1	0	0.6
Vetypolttoainetta tuulivoimalla	1	0.75	0.83	0.17	0.2
Biopolttoaineet	0.4	0.25	0.83	0	0.6
Metsiin varastointi	0.15	0	0.17	0	0.8
Maaperään varastointi	0.2	0.13	0.5	0	0.4

Kiilapelissä joidenkin toimenpiteiden vaikutukset syövät toistensa hyötyä, mitä kuvattiin luvun 4 toisessa kappaleessa. Ilmiöstä voi puhua erilaisilla nimillä, eikä suomenkielisessä portfoliokirjallisuudessa ole käytössä vakiintunut termiä ilmiölle. Eräitä nimityksiä ovat negatiivinen synergia tai subadditiivisuus, tässä työssä käytän kuitenkin suomennosta englanninkielisessä kirjallisuudessa usein käytettävästä termistä *cannibalization* eli *kannibalisaatio* (Liesiö ja muut, 2008). Esimerkiksi ajokilometrien puolittaminen saattaa yksinään saavuttaa kiilan verran projisoitujen päästöjen lievennystä, mutta ajokilometrien vähentyessä kuljetuksen tehostaminen ei vähennä hiilidioksidipäästöjä yhtä paljon kuin ilman kilometrien vähentymistä. Toisaalta kuljetuksen tehostaminen voitaisiin vastineeksi kohdistaa myös laivoihin, lentokoneisiin ja niin edelleen, mikä kompensoisi kannibalisaation syömän vaikutuksen. Tehostamisen kohdentaminen muihin liikennevälineisiin tuo toisaalta

lisäkustannuksia. Ilmiön mallintamiseksi toimenpidevaihtoehtoihin on lisätty aputoimenpiteitä, joilla on vaikutuksia ainoastaan portfolion hintaan. Rajoitusehdoilla voidaan pitää huoli, että aputoimenpiteet ovat portfoliossa, jos ja vain jos kannibalisaatiota tapahtuu. Menetelmä on kuvattu Liesiön ja muiden (2008) paperissa.

Taulukossa 3 on luettelo projektiyhdistelmistä, joille kannibalisaatiovaikutuksen kompensoiva lisähinta on mallinnettu. Taulukkoa luetaan niin, että kullakin pystyriivillä on rastit niillä strategioilla, jotka kannibalisivat toisiaan. Kannibalisaatioiden aiheuttamat lisähinnat on taulukoitu alimmalle riville.

*Taulukko 3: Kannibalisaatiot*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kuljetuksen tehostaminen	<b>x</b>	<b>x</b>	-	<b>x</b>	-	-	-	-	-
Matkustuskilometrien puolittaminen	<b>x</b>	-	<b>x</b>	-	<b>x</b>	-	-	-	-
Energiatuotannon tehostaminen	-	-	-	-	-	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
CCS Sähkö	-	-	-	-	-	<b>x</b>	-	-	-
Polttoaineen vaihto	-	-	-	-	-	-	-	<b>x</b>	-
Ydinvoimasähkö	-	-	-	-	-	-	<b>x</b>	-	-
Tuulivoimasähkö	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>x</b>
Vetypolttoainetta tuulivoimalla	-	<b>x</b>	<b>x</b>	-	-	-	-	-	-
Biopolttoaineet	-	-	-	<b>x</b>	<b>x</b>	-	-	-	-
Lisähinta	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Kannibalisaation mallintamiseen rajoitusehtoja voidaan käyttää esimerkiksi siten, että  $A$  matriisiin lisätään rivi, jossa toisiaan kannibalisoiden toimenpiteiden kertoimina on 1 ja vastaavan aputoimenpiteen kertoimena  $-1$ , muiden toimenpidevaihtoehtojen kertoimien ollessa nolliä. Tällöin voidaan  $\bar{b}$ -vektoriin asettaa luku 1, jolloin rajoitusehto vaatii, että molempien toimenpiteiden ollessa mukana on myös aputoimenpiteen oltava mukana. Jos aputoimenpide ei ole mukana, niin epäyhtälö on muotoa  $1 + 1 \leq 1$ , mikä tekee portfoliosta ei käyvän. Kun aputoimenpide on mukana, niin epäyhtälö on muotoa  $1 + 1 - 1 \leq 1$ . Muulloin aputoimenpide ei voi päätyä valituksi, sillä se voi ainoastaan huonontaa portfolion pistemäärää.

Rajoitusehtoja  $A\bar{x} \leq \bar{b}$  käytetään lisäksi, kun saman toimenpidevaihtoehdon voi valita useasti. Tällöin toimenpide on asetettu kahdesti toimenpidevaihtoehdojoukkoon RPM:ssä. Toimenpiteet on nimetty esimerkiksi "polttoaineen vaihto 1" ja "polttoaineen vaihto 2". Rajoitusehdolla saadaan aikaan, että toisen kerran esiintyvä toimenpide voidaan valita vain, jos toimenpide on jo kerran valittu. Tällöin on helppoa lisätä kahdesti valittavan toimenpiteen toiseen valintaan erilaiset kriteerikohtaiset arvot (esimerkiksi synergian tai vähenevän hyödyn takia). Rajoitusehtomatriisiin  $A$  asetetaan tällöin toimenpiteen ensimmäiselle valinnalle kerroin  $-1$  ja toiselle valinnalle kerroin  $1$ . Asettamalla vastaavalle riville  $\bar{b}$ -vektoriin luku  $0$  saadaan aikaiseksi, että toimenpiteen toista valintaa ei voi tehdä ennen ensimmäistä. Ensimmäisen valinnan kohdalla rajoitusehtoepäyhtälö on muotoa  $-1 \leq 0$ , jolloin epäyhtälö on voimassa. Toimenpiteen 2. valinta ei voi tapahtua ennen ensimmäistä, sillä epäyhtälö  $1 \leq 0$  ei toteudu, toisin kuin  $-1+1 \leq 0$ . Toimenpiteen toisen valinnan ydinluku (kaava 3) kertoo, kuinka suuressa osassa ei-dominioituja portfolioita on toimenpide valittu kahdesti. Toimenpiteen ensimmäisen valinnan ydinluku kertoo, kuinka monessa ei-dominoidussa portfolioissa on kyseinen toimenpide mukana kerran tai kahdesti. Vastaavasti osuus ei-dominoiduista portfolioista, joissa toimenpide on mukana vain kerran, saadaan vähentämällä ensimmäisen valinnan ydinluvusta toisen valinnan ydinluku. On mainitsemisen arvoista, että esittelemäni menettely on huomattavasti parempi kuin yksinkertaisesti saman toimenpiteen laittaminen toimenpidevaihtoehdoista kahdesti. Jos toimenpidevaihtoehdoistaan laittaa kaksi samanlaista toimenpidettä, saavat ne täsmälleen samat ydinluvut ja ovat ei-dominioitujen portfolioiden valinnassa toistensa peilikuvia.

### 4.3 Painokertoimien antaminen

Additiivisessa mallissa (1) kriteerikohtaisten painokertoimen tulisi kuvata kriteerien pistemäärien yksikönsuuruisten muutosten suhteellisia vaikutuksia kokonaispisteisiin. Painoja voidaan asettaa esimerkiksi tehden vertailuja kuten: "kumpi on merkittävämpi portfolion kokonaispistemäärän suhteen: hinnan nousu alimmalta tasolta ylimmälle, eli matkustuskilometrien puolittamisen hinnasta aurinkosähköhankkeen hintaan, vai arkielämä -kriteerin tason nousu tasolta 'ei vaikutusta' tasolle, joka vastaa matkustuskilometrien puolittamisen aiheuttamaa vaikutusta arkielämään." Tekniikoita painokertoimien valitsemiseksi on useita. Tarkkojen kriteerikohtaisten painojen määrittämiseen soveltuvia menetelmiä ovat muunmuassa SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique; Edwards, 1977) ja SWING (von Winterfeldt, Edwards, 1986). SMART:ssa päätöksentekijä antaa ensin vähiten

tärkeälle kriteerille luvun 10 ja sitten yksitellen kullekin kriteerille luvun, joka kuvaa kyseisen kriteerin merkitsevyyttä suhteessa jo arvioituihin kriteereihin. Lopulta painot normeerataan siten, että ne summautuvat yhdeksi. Mustajoen ja muiden 2005 paperissa esitellään menetelmien sovellus, jossa painokertoimien ei tarvitse olla tarkkoja. Myös Punkan ja Salon (2005) paperissa käsitellään painokertoimien elisitointia epätäydellisen informaation vallitessa.

Painokertoimien asettaminen on subjektiivista, joten niiden arviointiin ei tässä työssä kiinnitetä erityisesti huomiota. Todellisessa päätöksentekotilanteessa päätöksentekijä päättää painokertoimet mieltymystensä mukaisesti. Nyt painokertoimien käypä joukko  $S_w$  (luku 2.2.1), syntyy seuraavanlaisista preferenssilausunnoista:

$$w_{politiikka} \geq w_{maa} \geq w_{arki} \geq w_{teknologia}, w_{hinta}; 2w_{arki} \geq w_{politiikka}; w_i > 1/20$$

Preferenssilausunnot perustuvat omiin arvioihini tekijöiden merkitsevyyksistä. On korostettava, että tekijöiden merkitsevyys tulee painottaessa tulkita suhteessa kriteereille käytettyyn asteikkoon, kuten luvun 2.1 neljännessä kapaleessa korostetaan. Koin poliittiset tekijät merkittävimmäksi, sillä tehtävän päätösten mittakaavasta johtuen suurta poliittista vastustusta on odotettavissa. Maankäyttö-kriteeri on toiseksi merkittävin, sillä maapinta-ala on kasvavassa määrin niukka resurssi. Koin arkielämä kriteerin merkittävämmäksi kuin hinnan ja teknologian, sillä mittakaava vaikutus arkielämään -kriteerissä on valtava.

## 5 Tulokset

Edellisessä luvussa esitettyjen valintojen mukainen malli syötettiin RPM-*Decisions* ohjelmaan, jolla käyttäen *Exact Solve* -toimintoa laskettiin ei-dominoitujen portfolioiden joukko. Ei-dominoitujen portfolioiden joukkoon kuuluu kymmenen portfolioa, jotka luetellaan taulukossa 4. Taulukossa kukin sarake vastaa yhtä portfolioa siten, että merkit x ovat toimenpiteiden kohdalla, jotka kuuluvat kyseiseen portfolioon. Kultakin riviltä voi lukea, mihin portfolioista kukin projekti kuuluu sekä kunkin projektin ydinluvun.

Taulukosta 4 nähdään, että ydinprojekteja on energiatuotannon tehostaminen sekä polttoaineen vaihto 1 ja 2. Ydinprojektit ovat hyvin poliittiset esteet -kriteerin suhteen pärjänneitä muutenkin kaikinpuolin hyväpisteisiä projekteja. Mikäli mallinrakennuksessa ei ole suuria puutteita, niin mallinrakennusvaiheessa määritellyn informaatiojoukon puitteissa, voi ainakin ydinprojek-

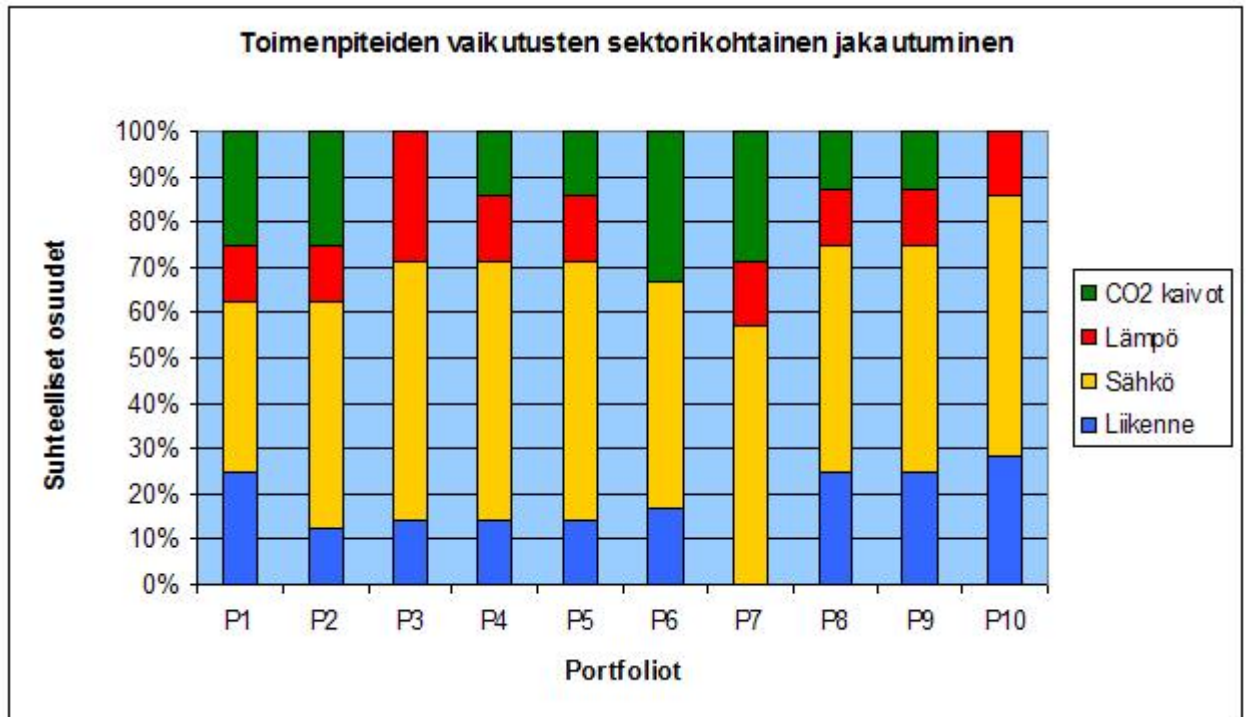
Taulukko 4: Ei-dominoidut portfoliot

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Ydinluku
Energiatuotannon tehostaminen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1
Polttoaineen vaihto 1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1
Polttoaineen vaihto 2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1
Kuljetuksen tehostaminen	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x	0.9
Rakennusten energiatehokkuus	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	0.9
CCS Sähkö	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0.9
Metsiin varastointi	x	x	-	x	-	x	x	x	-	-	0.6
Maaperään varastointi	x	x	-	-	x	x	x	-	x	-	0.6
CCS Sähkö 2	-	-	x	x	x	x	x	-	-	x	0.6
Matkustuskilometrien puolittaminen	x	-	-	-	-	-	-	x	x	x	0.4
CCS Synfuelit	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	0.1

teja suositella toteutettaviksi. Vastaavasti ulkoprojekteja ei suositella toteutettavaksi. Päätöstä tehdessä on järkevää vertailla ei-dominoitujen portfolioiden eroavaisuuksia muiden kuin ydinprojektien osalta, sillä ydinprojektit ovat kaikissa portfolioissa.

Tuloksia on kiinnostava tarkastella alkuperäisen Kiilapeli -työohjeen näkökulmasta (Hotinski, 2011). Työohjeessa korostettiin eri tavoitteiden huomioimista ja lopullisen portfolion tarkastelua niiden kannalta. RPM-menetelmää sovellettaessa eri näkökulmia huomioitiin mallinrakentamisvaiheessa, jossa määriteltiin kriteerit, toimenpiteiden kriteerikohtaiset pisteet sekä painokertoimet. Yksi näkökulma ei-dominoitujen portfolioiden tarkasteluun on kuitenkin niiden sektorikohtaisten vaikutusten tarkastelu. Vaikutussektoreita ovat sähköntuotanto (S), lämmitys ja polttoaineen käyttö (P), liikenne (L) ja hiilidioksidikaivot (H). Taulukosta 1 voi lukea toimenpiteiden vaikutussektorit. Kuva 2 havainnollistaa, miten kunkin ei-dominoidun portfolion toimenpiteiden vaikutukset lukumääräisesti jakautuvat eri sektoreille. Esimerkiksi portfoliolla 2 kuvassa 2 sektorin liikenne prosenttiosuus on 12.5%, sillä portfolion 2 toimenpiteistä 4 vaikuttaa sektoriin S, 1 sektoriin L ja 1 sektoriin P

ja 2 sektoriin H.



*Kuva 2:* Ei-dominioitujen portfolioiden sektoreittainen jakautuminen

Kuvasta 2 voidaan nähdä sähköntuotantoon vaikuttavien sektorien suuri lukumäärä kaikissa portfolioissa. Tämä on konsistenttia sähköntuotantosektoriin vaikuttavien tehostamis- sekä polttoaineenvaihto toimenpiteiden suurien ydinlukujen kanssa. Muiden sektoreiden osuudet näyttävät vaihtelevan jonkin verran. Erityisesti muutamassa portfolioissa ei hiilidioksidikaivot-sektorin toimenpiteitä ole, eikä portfolioissa 7 ole lainkaan liikenteeseen vaikuttavia toimenpiteitä. Maaperään varastointi ja metsiin varastointi puuttuvat osasta portfolioista varmaankin, koska niillä on huonot pisteet poliittiset tekijät-kriteerin, jonka painokerroin on suurin, suhteen.

Tehtävänannossa portfolioita pyydettiin arvioitavan myös eri eturyhmien näkökulmista. Mallinrakennusvaiheessa tätä huomioidaan muun muassa poliittiset tekijät kriteerin kautta. Eturyhmien huomioimisen voisi esimerkiksi sanoa syyksi ydinvoiman puuttumiselle ei-dominoiduista portfolioista, sillä ydinvoiman poliittinen epäsuosio on liian suurta. Suuri osa toteutettavista projekteista liittyy sähköntuotantoon, joten fossiilisten polttoaineiden tuottajat eivät välttämättä pitäisi valinnoista. Sähköntuotantoon liittyvien projektien

pistemäärät ovat hyviä lähes kaikilla kriteereillä, sillä kyseisille toimenpiteille on arvioitu muita vähemmän negatiivisia vaikutuksia. On mahdollista, että mallissa aliarvioidaan esimerkiksi sähköntuotantoon liittyvän lobbaamisen merkitys, jolloin sähköntuotantosektorille kohdistuvat toimenpiteet saavat liian hyviä pistemääriä poliittiset tekijät -kriteerin suhteen.

## 6 Yhteenveto ja pohdinnat

Työssä päämääränä on havainnollistaa portfolioanalyysin käyttöä päästöjen vähennystoimenpiteiden valintaan liittyvissä ongelmissa, analysoiden Kiilapeliä. Portfolioanalyysi toteutettiin käyttäen RPM-Decisions ohjelmistoa, joka perustuu RPM menetelmään (<http://www.rpm.tkk.fi/index.html>; Liesiö ja muut, 2007). Kiilapelissä (Hotinski, 2011) on kyse kahdeksan hiilidioksidipäästöjä vähentävän toimenpiteen valintaongelmasta. Valinnassa täytyy ottaa huomioon erilaisia rajoitteita sekä arvioida portfolioita useista näkökulmista. Käytetyt arviointikriteerit esitellään luvussa 4.1. Portfolioiden pistemäärien laskennassa kriteereille asetettiin painokertoimet, joiden asettamista käsitellään luvuissa 2.1 ja 4.3.

Työn tulosten ja mallinnusprosessin perusteella menetelmät mielestäni tukevat tilanteen hahmottamista sekä kuvitteellista päätöksentekoa. Ongelmallista on ettei tilanteessa ollut oikeaa päätöksentekijää. Ei ole kuitenkaan selvää soveltuuko RPM-menetelmä näin suuren mittakaavan tilanteisiin. Erityisesti RPM-menetelmässä käytetyn, kaavan 1 mukaisen, portfolion kokonaisarvon lauseke voi olla ongelmallinen. Toisaalta menetelmän sallima epätäydellisen informaation käyttö kompensoi kaavan 1 mahdollisesti aiheuttamia ongelmia. Lisää pohdintaa ilmiöön liittyen löytyy luvun 4 kappaleesta 3. Kiinnostavaa olisi tutkia, kuinka hyvin kaavan 1 mukainen arvofunktiio yhdistettynä epätäydelliseen informaatioon soveltuu tietynlaisiin tehtäviin, jotta menetelmän käyttöä voisi tulevissa sovellutuskohteissa paremmin oikeuttaa.

Tehtävän mallinnusvaihe on keskeinen osa menetelmien hyödyntämisprosessia (Clemen, 1996; Hobbs, Meier, 2000; Marttunen, 2008). Systemaattinen mallinnus vaatii päätöksentekijältä huolellisia arviointeja, tilanteen tarkastelua eri näkökulmista ja eriävien tavoitteiden välisien merkitsevyyksien pohittamista. RPM-Decisionsilla lasketut tulokset riippuvat mallinnusvaiheen valinnoista eli ovat tietystä näkökulmasta rakennetun subjektiivisen mallin saanelemat. Jos käytetty malli soveltuu tilanteeseen, ja vastaa päätöksentekijän preferenssejä tarpeeksi hyvin, ovat tulokset hyödyllisiä.



Tässä työssä tehtyjen valintojen mukaiset tulokset esitetään luvussa 5. 21:stä toimenpiteestä olisi mahdollista valita 203490 erilaista kahdeksan toimenpiteen yhdistelmää, joten tulokseksi saatu ei-dominoitujen portfolioiden (taulukko 4) määrä 10 on pieni. Ei-dominoitujen portfolioiden selvittämisen lisäksi ydin- ja ulkotoimenpiteiden löytäminen on hyödyllistä, sillä käytetyn informaation valossa ne ovat osana kaikkia ei-dominoituja portfolioita ja ovat siten robusti päätössuositus (Liesiö ja muut, 2008).

## Viitteet

- [1] MICHELLE L. BELL, BENJAMIN F. HOBBS, EMILY M. ELLIOTT, HUGH ELLIS, ZACHARY ROBINSON, 2001: An evaluation of multi-criteria methods in integrated assessment of climate policy. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* Volume 10, Issue 5, pages 229-256, September/October 2001.
- [2] B. A. BRYAN: Development and Application of a Model for Robust, Cost-Effective Investment in Natural Capital and Ecosystem Services, *Biological Conservation* 143/7, s. 1737-1750.
- [3] W. EDWARDS, 1977: How to use multiattribute utility measurement for social decision making. *Institute of Electrical and Electronic Engineers Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 7 (5) (March 1977), pp. 326-340
- [4] K. CALDEIRA, M. GRANGER MORGAN, D. BALDOCCHI, P. G. BREWER, C-T. A. CHEN, G-J. NABUURS, N. NAKICENOVIC, G.P. ROBERTSON, 2004: A Portfolio of Carbon Management Options. *The Global Carbon Cycle, Integrating Humans, Climate and the Natural World*. ISBN 1-55963-526-6.
- [5] GOLABI, K., KIRKWOOD, C.W., SICHERMAN, A., 1981: Selecting a portfolio of solar energy project using multiattribute preference theory, *Management Science* 27, 174-189.
- [6] GOLABI, K., 1987: Selecting a group of dissimilar projects for funding. *IEEE Transactions of Engineering Management* 34, 138-145.
- [7] CLEMEN, R.T. 1996: *Making Hard Decisions: An Introduction to Decision Analysis*, 2nd edition
- [8] HOBBS, B.F., MEIER, P, 2000: Energy decisions and the environment: a guide to the use of multicriteria methods. *International Series in Operations Research & Management Science*, Vol. 28. ISBN 0-79237875-X
- [9] HOTINSKI, 2011: *Stabilization Wedges: A Concept & Game*, Princeton University, CMI. (löytyy osoitteesta <http://cmi.princeton.edu/wedges/>, 09.05.2012)
- [10] IPCC, 2007: IPCC Working Group III Report "Mitigation of Climate Change". (löytyy osoitteesta <http://www.ipcc.ch>, 09.05.2012)

- [11] J. A. JACKSON, J. M. KLOEBER JR., B. E. RALSTON, R. F. DECKRO, 1999: Selecting a Portfolio of Technologies: An Application of Decision Analysis. *Decision Sciences* (1999). Vol 30, Issue 1, pp.217-38.
- [12] KARVETSKI, C.W.; LAMBERT, J.H.; KEISLER, J.M.; LINKOV, I.; 2011: Integration of Decision Analysis and Scenario Planning for Coastal Engineering and Climate Change, *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS - PART A: SYSTEMS AND HUANS*,VOL.41,NO.1.
- [13] KEENEY, RAIFFA, 1976: *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*. John Wiley & Sons, New York.
- [14] LIESIÖ, J., MILD, P., SALO, A., 2007: Preference Programming for Robust Portfolio Modeling and Project Selection, *European Journal of Operational Research* Vol. 181, pp. 1488-1505.
- [15] LIESIÖ, J., MILD, P., SALO, A., 2008: Robust Portfolio Modeling with Incomplete Cost Information and Project Interdependencies, *European Journal of Operational Research*, Vol. 190, pp. 679-695.
- [16] LIESIÖ, 2012: Measurable Multiattribute Value Functions for Portfolio Decision Analysis. Manuscript, Systems Analysis laboratory, Aalto University. Not published.
- [17] M. MARTTUNEN, R. P. HÄMÄLÄINEN, 1995: Decision analysis interviews in environmental impact assessment. *European Journal of Operational Research* 87(1995) 551-563.
- [18] M. MARTTUNEN, J. MUSTAJOKI, O-M. VERTA, R. P. HÄMÄLÄINEN, 2008: Monitavoitearviointi vuorovaikutteisessa ympäristösuunnittelussa, menetelmä ja sen soveltamisesimerkkejä vesistöjen käytössä ja hoidossa. *Suomen ympäristö*, 11/2008.
- [19] M. MARTTUNEN, 2011: Interactive multicriteria decision analysis in the collaborative management of watercourses. Aalto University publication series DOCTORAL DISSERTATIONS 75/2011. (<http://lib.tkk.fi/Diss/>, 09.05.2012)
- [20] J. MUSTAJOKI, R.P. HÄMÄLÄINEN AND M. MARTTUNEN, 2004: Participatory multicriteria decision support with Web-HIPRE: A case of lake regulation policy *Environmental Modelling Software*, Vol. 19, No. 6, 2004, 537-547.

- [21] J. MUSTAJOKI, R.P. HÄMÄLÄINEN, A. SALO, 2005: Decision Support by Interval SMART/SWING - Incorporating Imprecision in the SMART and SWING Methods *Decision Sciences*, Vol. 36, No.2, 2005, pp. 317-339.
- [22] J. MUSTAJOKI, R.P. HÄMÄLÄINEN, M. MARTTUNEN, 2006: Web-based Decision Support in Water Resources Management *Proc. of the IASTED Conference on Environmentally Sound Technology in Water Resources Management*, ACTA Press, Gaborone, Botswana, September 11-13, 2006, pp. 67-72.
- [23] S.PACALA, R.SOCOLOW, 2004: Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies. *Science* 13 August 2004: Vol. 305 no. 5686 pp. 968-972, DOI: 10.1126/science.1100103.
- [24] J. P. PEERENBOOM, W. A. BUEHRING, T. W. JOSEPH, 1989: Selecting a portfolio of environmental programs for a synthetic fuels facility. *Operations Research* Vol. 37, No. 5 (Sep. - Oct., 1989), pp. 689-699 Published by: INFORMS
- [25] ROBUST PORTFOLIO MODELING, RPM: Tutkimusryhmä ja ohjelmiston esittely: <http://www.rpm.tkk.fi/index.html>, (09.05.2012).
- [26] SALO, A., PUNKKA, A., 2005: Rank inclusion in criteria hierarchies. *European Journal of Operational Research* 163, 338-356.
- [27] SALO, KEISLER, MORTON, 2011: Portfolio Decision Analysis: Improved Methods for Resource Allocation. *International Series in Operations Research & Management Science*, Vol. 162, ISBN 978-1-4419-9942-9.
- [28] VON WINTERFELDT D., EDWARDS W., 1986: Decision analysis and behavioral research. Cambridge, UK: Cambridge University Press.