

Tehokkuusanalyysi malminetsinnän kestävyuden mittaamiseksi

Tommi Kauppinen

Aalto University School of Electrical Engineering,
Department of Electrical engineering and automation,
PO Box 15500 00076 Aalto Finland
(e-mail: tommi.kauppinen@aalto.fi).

AVAINSANAT Tehokkuusanalyysi, kestävyys, malminetsintä, optimointi, tehokkuus.

TIIVISTELMÄ

Kestävyys ja kestävä kehitys on tärkeä tutkimuskohde monilla tieteenaloilla, mutta Suomessa erityisesti kaivosalan kestävyys on pinnalla taloudellisten, ekologisten ja sosiaalisten vahinkojen takia joita Talvivaara on tuottanut. Tässä tutkimuksessa esitellään mitta kestävyydelle malminetsinnässä ja käydään läpi mittaustekniikan laskenta. Kuvailtu menetelmä on nimeltään Data Evelopment Analysis (DEA, suom. tehokkuusanalyysi), jota on käytetty useissa eri yhteyksissä ekotehokkuuden mittaamiseen. Tutkimuksessa pyritään yhdistämään taloudelliset, ekologiset ja sosiaaliset muuttujat tehokkuusanalyysillä yhdeksi indeksiluvuksi, joka kuvaa mahdollisimman hyvin eri malminetsintäkohteiden kestävyyttä. Indeksiluku on välillä $[0, 1]$ ja sitä kutsutaan tässä kestävyysluvuksi. Tämä tutkimus käyttää generoitua dataa esitelläkseen kestävyyslukujen muodostamista. Tutkimus pystyy kuitenkin osoittamaan että generoitu data on hyvin lähellä ellei yhtenevää malminetsinnässä jo tähän asti kerätyn julkisen datan kanssa. Käsillä oleva tutkimus pystyy tuottamaan käyttökelpoisen kestävyysluvun käyttäen kuutta keskeistä muuttujaa, joilla on tärkeä vaikutus malminetsinnän kestävyuteen. Tässä on huomioitava, että jos tutkittavien malminetsintäpaikkojen lukumäärää nostetaan, on siitä kahdenlaista hyötyä: Ensimmäiseksi kestävyysluvut ovat monipuolisempia ja toiseksi tehokkuusanalyysiin voidaan sisällyttää useampia muuttujia. Tämä puolestaan mahdollistaa yksityiskohtaisemman datan sisällyttämisen analyysiin.

1 JOHDANTO

Suomalainen kaivosteollisuus on aina tasapainoillut erilaisten eturyhmien toiveiden välillä. Paikallinen väestö on näihin päiviin saakka ottanut kaivosteollisuuden positiivisesti vastaan. Talvivaara on muuttanut tilannetta huomattavasti, kun kaikki eturyhmät kärsivät turvallisuusasioissa tapahtuneiden laiminlyöntien takia.

Kaivostoiminta ei tuota voittoa ainostaan yhtiöille mutta myös paikalliselle väestölle työpaikkojen muodossa. Muut mahdolliset kaivostoiminnasta hyötyjät ovat valtio ja kunta, jonka alueella kaivostoimintaa harjoitetaan. Haittoja voi koitua poropaimenille; turismiteollisuudelle ja turisteille; ja luonnonsuojelijoille. Kovin kritiikki kaivosteollisuutta kohtaa on tullut jälkimmäisinä mainituilta. Jotta kaivosteollisuutta voidaan harjoittaa, pitää kaikki yhteiskunnalliset instanssit huomioida.

Ennenkuin kaivos voidaan perustaa, täytyy tehdä lukuisia erilaisia tutkimuksia. Tähän vaiheeseen viitataan tässä tutkimuksessa kun puhutaan malminetsintävaiheesta. Tutkimuksessa esitellään menetelmä, jonka avulla malminetsintävaiheen taloudellisia, ekologisia ja sosiaalisia tekijöitä voidaan huomioida paremmin. Malminetsintävaihe sisältää kaikki vaiheet näytteiden timanttiporauksesta kaivoksen perustamispäätökseen saakka.

Malminetsintävaihe tuottaa haitallisia taloudellisia, ekologisia ja sosiaalisia vaikutuksia. Timanttiporuas on kallis ja aikaavievä prosessi, vaikuttaen mm. pintakasvillisuuteen ja eläinkuntaan sekä suojeltuihin alueisiin. On kuitenkin mahdollista vähentää malminetsinnän negatiivisia vaikutuksia ja luoda kestäväällä tavalla tehokkaampi malminetsintävaihe.

1.1 Kestävyys

Kaivosten kestävyys on tieteellisen keskustelun aihepiiri, josta on tarjolla suuri määrä julkaisuja (Hassan et al. 2014). Näiden julkaisujen yhteinen määrittävä tekijä on pyrkimys kestävyuden määrittelemiseen ja kestävyuden kehittämiseen. Kaikkein yleisin tapa hahmottaa kestävyyttä on punnita sekä taloudellista, ekologista että sosiaalista ulottuvuutta, kuten tehdään myös tässä tutkimuksessa. Lisäksi tutkimus pyrkii mittaamaan kestävyyttä yksinkertaisella ja läpinäkyvällä tavalla. Malminetsintävaiheen kestävyuden mittaamisen uskotaan olevan myös mahdollisuus kehittää malminetsintävaiheen kestävyyttä.

Kaivosalalla on olemassa useita eri kestävyuden hahmottamisen välineitä (ks. esim. Fonseca et al. 2013). Näille hahmotuksille on yhteistä se, että niissä pyritään pikkutarkkaan erilaisten taloudellisten, ekologisten ja sosiaalisten tekijöiden huomioimiseen. Tällaisten hahmotusjärjestelmien käyttö on usein aikaavievää ja hankalaa. Onkin esitetty kritiikkiä siitä, ovatko tällaiset järjestelmät todella edistäneet kaivosten kestävyttä kaivostoiminnan eri vaiheissa (Giurco ja Cooper, 2012). Myös erilaisia arviointijärjestelmiä on arvosteltu samasta syystä (ks. esim. Fonseca et al. 2012).

Tutkimus esittelee uuden lähestymistavan kestävyteen malminetsintävaiheessa. Perusajatuksena on tutkia malminetsintävaihetta järjestelmänä, jossa on syötteitä ja ulostuloja. Tässä tehokkuusanalyysia (Data Envelopment Analysis, DEA) käytetään eri kestävyysdimensioiden arvioimiseen, eli taloudellisten, ekologisten ja sosiaalisten tekijöiden mittaamiseen. Tehokkuusanalyysi on siis tässä kestävyuden mallinnustyökalu.

Tämän tutkimuksen tavoite on esittää kestävyysluvut eri malminetsintäpaikoille. Tähän tarkoitukseen käytetään tehokkuusanalyysia (DEA). Tehokkuusanalyysissa on tärkeää oikeanlaisen mallin valitsemisen lisäksi valita oikein myös käytetyt muuttujat.

Tehokkuusanalyysiin käytetyn mallin valinta on riippuvainen siitä, millaista dataa on käytettävissä. Tässä tutkitaan vain perusmallien, kuten Charnes-Cooper-Rhodes (CCR) ja Banker-Charnes-Cooper (BCC) mallien käyttöä. Mallinnus tapahtuu tärkeimpien muuttujien avulla yhteen dimensioon. Saatuja tuloksia kutsutaan kestävyysluvuiksi.

1.2 Tehokkuusanalyysi

Tehokkuusanalyysiin (DEA) perustuvien tutkimusten määrä on kasvussa tieteellisissä joulaleissa. Tähän astisesta kehityksestä voidaan päätellä, että tehokkuusanalyysi on hyväksytty muiden, perinteisempien regressiomallien rinnalle. Myös erilaisten DEA-mallien lukumäärä on kasvanut, esim. Cooper et al. (2006) esittelevät 20-50 erilaista DEA-mallia, riippuen siitä miten malli määritellään.

Klassinen esimerkki tehokkuusanalyysista on erilaisten sairaaloiden vertailu, missä tehokkuusanalyysilla pyritään saamaan selville, mikä sairaala suoriutuu parhaiten potilaidensa hoidosta. Tehokkuusanalyysiä voidaan käyttää myös ekotehokkuuden mittaamiseen, kuten on tehty esimerkiksi elintarvikkeille (Kauppinen 2008). Vertailtavat instanssit voivat olla esimerkiksi tehtaita, jotka tuottavat lähestulkoon samaa tuotetta. Tehokkuusanalyysi ei ole rajoitettu tällaisiin vertailuihin, vaan sitä on käytetty mm. kiven rikkoutumisen mallintamiseen (Kauppinen et al. 2014) ja helpottamaan geologien työtä malminetsinnässä (Kauppinen 2015).

Periaatteessa tehokkuusanalyysin käyttö vaatii lähtö- ja tulosuureet. Tämä lähtökohta perustuu tehokkuuden määritelmään, kuten alla:

$$\text{efficiency} = \frac{\text{output}}{\text{input}} \quad (1)$$

DEA-mallit käyttävät lineaarista ohjelmointia yhdistääkseen erilaiset lähtösuureet ja verratakseen niitä yhdistettyihin tulosuureisiin. Tämä vertailu perustuu päätöksentekoyksiköihin (Decision-Making Units, DMUs), sillä tehokkuusanalyysi tuottaa vertailun lähtö- ja tulosuureiden välillä päätöksentekoyksiköiden joukossa. Tehokkain päätöksentekoyksikkö saa lukuarvon yksi (1) ja loppuja päätöksentekoyksiköitä verrataan tehokkaimpaan, jolloin kukin saa arvon väliltä nolla (0) ja yksi (1). Lopputuloksenaan tehokkuusanalyysi tuottaa taulukon, jossa jokaisella päätöksentekoyksiköllä on tehokkuusluku väliltä nolla ja yksi.

Tehokkuusanalyysi on erityisen käyttökelpoinen jos käytetty aineisto ei ole yhteismitallista. Tärkein ero, joka tehokkuusanalyysilla on muihin datafuusio menetelmiin (esim. pääkomponenttianalyysi, PCA) on, että tehokkuusanalyysi on lähtökohtaisesti ei-parametrinen. Tämä tarkoittaa, ettei tuotetuilla tehokkuusluvuilla ole tilastollisia ominaisuuksia. Tämä on yhtä aikaa vahvuus ja heikkous, sillä tehokkuusanalyysi pystyy sulauttamaan yhteen erityyppisiä aineistoja mutta kärsii samalla tilastollisen tulkinnan puutteesta. Ei-parametrisuutensa takia tehokkuusanalyysin vertaaminen muihin nojaa vahvasti matematiikkaan (ks. esim. Kuosmanen ja Johnson 2010).

Tässä tutkimuksessa keskustellaan tehokkuusluvuista suhteessa kestävyteen. Tutkimuksessa esitetään, että kestävyuden eri tekijät voidaan mitata toisistaan riippumatta ja (sopivilla painoarvoilla, ks. kohta 1.3) summata täyttääkseen

tehokkuusanalyysin aineistolle esittämät vaatimukset. Tällöin tehokkuusanalyysi tuottaa tehokkuusluvun jokaiselle päätöksentekoyksikölle, eli malminetsintäpaikalle. Tässä tehokkuuslukuja kutsutaan kestävyysluvuiksi, jolloin eri malminetsintäsjaintien kestävyyttä voidaan vertailla.

1.3 Mathematical introduction to DEA

Tehokkuusanalyysi (DEA) on lineaariseen ohjelmointiin perustuva datan suhteellisen tehokkuuden mittausta, kun useat tulot ja lähdöt tekevät vertailusta vaikeaa. Yleisimmät tehokkuuden mitat, esim.

$$\text{efficiency} = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{u_1 y_{10} + \dots + u_s y_{s0}}{v_1 x_{10} + \dots + v_m x_{m0}} \quad (2)$$

ovat usein riittämättömiä, koska kyseisessä aineistossa on olemassa useita tulo- ja lähtömuuttujia. Tässä x merkitsee tulomuuttujia ja y lähtömuuttujia.

Yhtälöstä (2) voidaan muotoilla lineaarinen opitointiongelma rajoittamalla painokertoimia u ja v , sekä tehokkuutta kokonaisuudessaan. Tällöin saamme (pätöksentekoyksikölle, DMU, $o=1, \dots, n$).

$$\begin{aligned} \max_{v,u} & \frac{u_1 y_{10} + \dots + u_s y_{s0}}{v_1 x_{10} + \dots + v_m x_{m0}} \\ \text{s. t.} & \\ & \frac{u_1 y_{1j} + \dots + u_s y_{sj}}{v_1 x_{1j} + \dots + v_m x_{mj}} < 1, j = 1, \dots, n \\ & u_1, \dots, u_s > 0 \\ & v_1, \dots, v_m > 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Yhtälöstä (3) voidaan muotoilla lineaarinen optimointiongelma (LP) määrittelemällä rajoite maksimoitavan lausekkeen nimittäjälle. Yhtälössä (4) saatua ongelmaa käsitellään kuin lineaarista optimointiongelmaa. Tämä muotoilu tunnetaan myös CCR DEA mallina päätöksentekoyksikölle $o = 1, \dots, n$.

$$\begin{aligned} \max_{v,u} & u_1 y_{10} + \dots + u_s y_{s0} \\ \text{s. t.} & \\ & v_1 x_{10} + \dots + v_m x_{m0} = 1 \\ & u_1 y_{1j} + \dots + u_s y_{sj} < v_1 x_{1j} + \dots + v_m x_{mj}, j = 1, \dots, n \\ & u_1, \dots, u_s > 0 \\ & v_1, \dots, v_m > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Tässä tutkimuksessa meillä on tapaus, jossa käsittelemme kolmea tulomuuttujaa ($m=3$), kolmea lähtömuuttujaa ($s=3$) ja yhdeksää päätöksentekoyksikköä ($n=9$), ks. myös Taulukko 1. Lineaarinen optimointiongelma yhtälössä (4) ratkaistaan n kertaa, kerran jokaiselle päätöksentekoyksikölle niin, että ensin se ratkaistaan malminetsintäpaikalle 1, sen jälkeen paikalle 2 jne. Optimaaliset painot u ja v voivat vaihdella yhdelle päätöksentekoyksikölle saadusta ratkaisusta toiseen. Niinpä 'painot' tehokkuusanalyysissä johdetaan datasta eikä määritellä etukäteen. Jokainen päätöksentekoyksikkö saa painot, jotka maksivoivat sen tehokkuusluvun, ottaen huomioon muut päätöksentekoyksiköt.

2 AINEISTO

Tässä tutkimuksessa käytetty aineisto on generoitu, tarkoittaen sitä ettei sitä ole saatu todellisista malminetsintäpaikoista. Kuitenkin kyselyjä eri tahoille on esitetty mahdollisuudesta tarkistaa aineiston suuruusluokkia, ja ne näyttävät täsmäävän todellisten malminetsintäpaikkojen kanssa (ks. esim. Hulkki et al. 2011, Karinen et al. 2011 ja Keinänen et al. 2012). Koska aineisto on generoitu, ei ole hyödyllistä keskustella lukuarvoista tämän laajemmin. Voidaan kuitenkin mainita että aineisto yrittää esittää muutamia eri tapoja, joilla malminetsintäpaikkoja aloitetaan ja niiden toimintaa jatketaan.

Tehokkuusanalyysi vaatii päätöksen siitä, mitkä muuttujat valitaan opitointiin mukaan, ja tämä keskustelu on tutkimuksen kannalta oleellista. Tässä (ks Taulukko 1) valitut muuttujat ovat seuraavat: investoinnit, diskontattu tuotto, muokattu maapinta-ala, ympäristönsuojeluohjelmat, maailmanperintökohde/alkuperäisväestön alue ja kokonaispalkat. Tähän analyysiin voitiin valita mukaan vain kuusi muuttujaa, koska mukana oli vain yhdeksän malminetsintäpaikkaa. Jos analysoitavien malminetsintäpaikkojen lukumäärää nostettaisiin, myös muuttujien lukumäärä voisi olla korkeampi (ks. lisätietoja Cooper et al. 2006).

Taloudelliset muuttujat (ks. Taulukko 1, rivit 2 ja 3) ovat investoinnit ja diskontattu tuotto. Näiden muuttujien sisältäminen laskentaan on itsestään selvää. Investoinnit ovat taloudellinen tulomuuttuja, koska yrityksen, joka haluaa aloittaa malminetsinnän annetulla alueella, täytyy tehdä alkuinvestointi etsinnän aloittamiseksi. Kuitenkin yritys voi myös tehdä voittoa löytämällä malmilla, ja siksi lähtösuureksi on valittu diskontattu tuotto. Tuotto on diskontattu jotta investointi ja tuotto olisivat keskenään vertailukelpoisia. On hyvä huomata, että tehokkuusanalyysi ei edellytä eri muuttujien vertailukelpoisuutta, vaan diskonttaus tehdään selkeyden vuoksi.

Ekologiset muuttujat (ks. Taulukko 1, rivit 4 ja 5) ovat muokattu maapinta-ala ja ympäristönsuojeluohjelmat. Muokattu maapinta-ala valittiin useasta eri vaihtoehdosta ekologiseksi tulomuuttujaksi, koska sitä voidaan pitää proksina useille eri ympäristövaikutuksille. Ekologisen tulomuuttujan valinta oli kuitenkin vaikeaa. Lopulta valinta tehtiin kolmen eri tulomuuttujan välillä: kasvihuonekaasupäästöjen, vesien likaantumisen ja muokatun maapinta-alan välillä. Näistä viimeksi mainittu on helpoin mitattava ja voi toimia proksina kahdelle muulle suurelle, joten muokattu maapinta-ala valittiin ekologiseksi tulomuuttujaksi. Myös ekoloisen lähtömuuttujan valinta oli vaikeaa, mutta eri syistä. Kysymys, joka tässä tuli esittää oli seuraava: miten malminetsintä voi edistää ekologisuutta? Tässä vaikutumahdollisuutena nähtiin ympäristönsuojeluohjelmat. Parempi tapa kuin mitata käytettyjä euroja olisi tutkia ympäristönsuojeluohjelmien vaikutusta luontoon, mutta tämä on tällä hetkellä vielä vaikeaa. Siksi valittiin mitattavaksi ekologiseksi lähtösuureksi ympäristönsuojeluohjelmien taloudellinen arvo.

Sosiaaliset muuttujat (ks. Taulukko 1, rivit 6 ja 7) valittiin seuraavasti. Häiriöt maailmanperintökohteille ja alkuperäisväestölle otettiin mukaan yksinkertaisena kyllä-ei muuttujana, joka ilmoittaa, onko häirintää ollut vai ei. Jos häirintää on ollut, on arvo 1. Jos häirintää ei ole ollut, on arvo 0. Tällöin on hyvä huomata, että häiriön tuottaminen muuttuu erittäin epätoivotuksi, koska muuttujan arvo muuttuu suhteellisesti erittäin paljon suuremmaksi häirinnän tapahtuessa. Sosiaalinen lähtömuuttuja on itseoikeutetusti palkat, joita malminetsintään osallistuva henkilöstö nauttii työnsä kautta. Palkoilla on osoitettavasti useita positiivisia sosiaalisia vaikutuksia.

Taulukko 1 Generoitu data jonka avulla arvioidaan tehokkuusanalyysin soveltumista indikaattoriksi kestäväälle malminetsintävaiheelle.

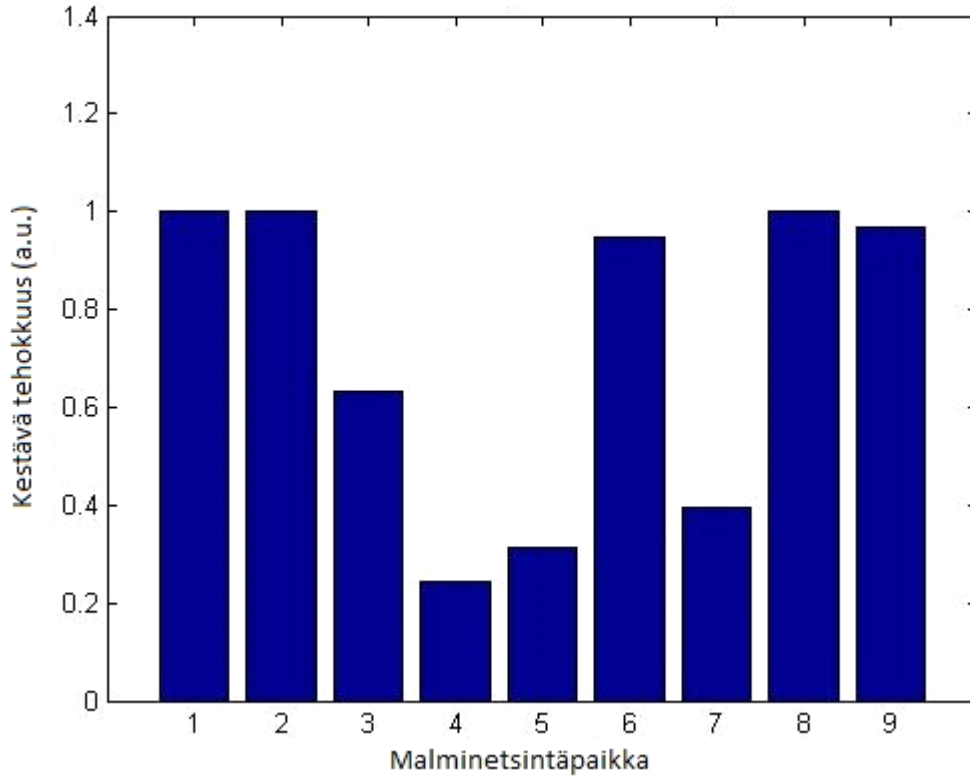
		Malminetsintäpaikka (nro.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Taloudellinen	Panos	Investoinnit (keur/a)	1000	800	1200	1500	800	950	150	300	400
	Tuotos	Diskontattu tuotto (keur)	10000	8000	8000	4000	2000	9000	5000	4000	5000
Ekologinen	Panos	Muokattu maapinta-ala (100m ² /a)	1	1	5	10	3	4	5	6	7
	Tuotos	Ympäristönsuojeluohjelmat (keur/a)	50	80	30	20	10	9	70	80	10
Sosiaalinen	Panos	WHS* tai alkuperäisväestön aluetta	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	tuotos	Kokonaispalkat (keur/a)	70	80	45	34	25	60	55	30	20

* WHS eli World heritage site, maailmanperintökohde.

3 RESULTS

Tulokset, kun käytetään Charnes-Cooper-Rhodes (CCR) lähtö-orientoitunutta mallia tehokkuusanalyysille (ks myös yhtälö 4), on esitetty Kuvassa 1. Kuvassa 1 on esitetty, miten toiset malminetsintäpaikat ovat kestävyysluvultaan parempia kuin

toiset. Useat malminetsintäpaikat saavat tehokkuusluvukseen yksi tai miltei yksi. Tämä johtuu siitä, että analyysiin mukaan otettujen malminetsintäpaikkojen lukumäärä (9) ei ollut korkea verrattuna muttujen lukumäärään (6), mistä taas johtuu se, että on useita eri dimensioita, joiden kautta eri malminetsintäpaikat ovat voineet saada korkean kestävyysluvun. Tämä tehokkuusanalyysin ominaisuus lieventyisi, jos analyysiin sisällytettäisiin useampia malminetsintäpaikkoja.



Kuva 1 Saadut tulokset, kun käytetään Taulukon 1 aineistoa tehokkuusanalyysissä.

Esimerkiksi malminetsintäpaikat 1, 2 ja 8 saavat kaikki tehokkuusluvun 1 (ks. Kuva 1), vaikka malminetsintäpaikalla 1 on sosiaalinen tulomuuttuja 1 (ks. Talukko 1). Korkea kestävyysluku selittyy kuitenkin muokatun maapinta-alan pienuudella (ekologinen tulomuuttuja), vaatimattomalla investoinnilla (taloudellinen tulomuuttuja) saadulla hyvällä diskontatulla tuotolla (taloudellinen lähtömuuttuja) sekä korkeilla palkoilla (sosiaalinen lähtömuuttuja). Tämä ilmiö selittää hieman tehokkuusanalyysin sisäistä käyttäytymistä: ne ulottuvuudet, joissa malminetsintäpaikka 1 on hyvä riittävät tasapainottamaan yhden heikomman muuttujan. Näiden ulottuvuuksien välinen vuorovaikutus tulisi ymmärtää ennenkuin tehokkuusanalyysia käytetään. Analyysiin tulisi aina sisällyttää riittävä määrä malminetsintäpaikkoja, jotta voitaisiin riittävällä varmuudella ottaa huomioon eri dimensiot, joissa päätöksentekoyksiköt saavat korkeita tai alhaisia arvoja.

Toisaalta, malminetsintäpaikka 4 on saanut erittäin matalan kestävyysluvun (ks. Kuva 1). Tämä johtuu siitä, että sen taloudelliset, ekologiset ja sosiaaliset tulosuureet ovat suuria, kun taas vastaavat lähtösuureet ovat pieniä. Esimerkiksi diskontattu tuotto on toiseksi matalin koko tutkittujen malminetsintäpaikkojen joukossa. Toisaalta investoinnit ovat suurimmat kaikista malminetsintäpaikoista. Vastaavasti myös ekologiset ja sosiaaliset arvot ovat suuria tuloissa ja pieniä lähdoissa, tehden malminetsintäpaikasta 4 kaikkein heikoimman kestävyysluvultaan.

4 YHTEENVETO

Tehokkuusanalyysi tuottaa yksinkertaiset ja käyttökelpoiset lopputulemat malminetsintävaiheen kestävyys kontekstissa. Saadut kestävyysluvut ovat intuitiivinen mitta malminetsintävaiheen kestävyysluku. Malminetsintäpaikkojen lukumäärää tehokkuusanalyysissä tulisi nostaa seuraavista syistä. Ensiksi, jotta saataisiin tuotettua variaatiota niiden

malminetsintäpaikkojen välille, jotka nyt saavat kestävyysluvukseen yksi tai miltei yksi. Toiseksi, jotta analyysiin voitaisiin sisällyttää useampia eri muuttujia. Tässä tutkimuksessa oli mukana vain kuusi muuttujaa.

KIITOKSET

Kirjoittaja haluaa kiittää Aalto-yliopistoa hyvän työilmapiirin takaamisesta. Kirjoittaja haluaa kiittää myös Alfred Korderlinin säätiötä, jonka taloudellinen tuki teki tämän tutkimuksen mahdolliseksi.

KIRJALLISUUSLUETTELO

Cooper, W.W., Seiford, L.M., and Tone, K. (2006). *Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses: With DEA Solver Software and References*. Springer, New York.

Fonseca, A., McAllister, M., L., and Fitzpatrick, P. (2012). Sustainability reporting among mining corporations: a constructive critique of the GRI approach. *Journal of Cleaner Production*, 1-14.

Fonseca, A., McAllister, M., L., and Fitzpatrick, P. (2013). Measuring what? A comparative anatomy of five mining sustainability frameworks. *Minerals Engineering*, 46-47, 180-186.

Giurco, D. and Cooper, C. (2012). Mining and sustainability: asking the right questions. *Minerals Engineering*, 29, 3-12.

Hassan, S.U., Haddawy, P., and Zhu, J. (2014). A bibliometric study of the world's research activity in sustainable development and its sub-areas using scientific literature. *Scientometrics*, 99, 549-579.

Hulkki, H., Keinänen, V., Karinen, T., Karvinen, A., Sarala, P., Sarapää, O., Salmirinne, H. and Sandgren, E. (2011). Pohjois-suomen kultahankkeen 2551009 loppuraportti. Geological Survey of Finland, Rovaniemi, 1-8.

Karinen, T., Keinänen, V., Sarala, P., Hulkki, H., Sandgren, E., and Nykänen, V. (2011). Tutkimustyöselostus Kittilän kunnassa valtausalueilla lauttaselkä 1-3 (8411/1, 8466/1 ja 8570/1) suoritetuista malmitutkimuksista vuosina 2006-2010. Geological Survey of Finland, Rovaniemi, 1-52.

Kauppinen, T. (2015). Data envelopment analysis as a tool for the exploration phase of mining (to be published). *Minerals Engineering*.

Kauppinen, T., Jackson, J., Manlapig, E., and Lay, J. (2014). Data fusion on rock breakage using data envelopment analysis. In A. Emrouznejad, R. Banker, R.S.M. Doraisamy, and B. Arabi (eds.), *Recent Developments in Data Envelopment Analysis and its Applications*, Proceedings of the 12th International Conference of DEA, April 2014, Kuala Lumpur, Malaysia.

Kauppinen, T. (2008). Elintarvikkeiden materiaalipanosten ja ravintoarvojen tehokkuusanalyysi. Helsinki University of Technology (Master's thesis).

Keinänen, V., I., L., Karinen, T., and Sarala, P. (2012). Tutkimustyöselostus Kittilän tiukuvaarassa suoritetuista kultatutkimuksista vuosina 2005-2010. Geological Survey of Finland, Rovaniemi, 1-19.

Kuosmanen, T. and Johnson, A.L. (2010). Data envelopment analysis as nonparametric least-squares regression. *Operations Research*, 58(1), 149-160.