

Maaston kulkukelpoisuuden mallintaminen metsäsuunnittelijan näkökulmasta reitinoptimointia varten

HENNA ETULA & HARRI ANTIKAINEN

Suomen Metsäkeskus, Etelä- ja Keski-Pohjanmaan alueyksikkö & Maantieteen laitos, Oulun yliopisto



Etula, Henna & Harri Antikainen (2012). Maaston kulkukelpoisuuden mallintaminen metsäsuunnittelijan näkökulmasta reitinoptimointia varten (Modeling of terrain traversability for path optimization from the perspective of a forest planner). Terra 124: 1, 29–43.

Cross-country path finding is essentially different from path finding in transportation networks, due to the fact that cross-country terrain can be traversed anywhere and any direction that is free of obstacles. While several studies on pedestrian movement across Finnish terrain have been carried out, they are not accurate enough to be utilized in practical applications. In this study, GIS data sets representing various types of terrain were reviewed, and each terrain was classified according to traversability conditions. The desirability scores for each terrain category were determined by expert knowledge modeling. The group of interviewed experts consisted of forest planners having hands-on experience with terrain traversability. The obtained desirability scores were transformed into traversability costs, which in turn were used to construct a raster-based cost surface. The cost surface can be used to determine an optimal traversal path between any two locations, while also accounting for the topographic variation of the terrain. The results of the study can be utilized in forest planning path finding applications in the context of Finnish off-road terrain. The procedure for constructing the cost surface can also be applied in situations where the input data or the cost scores are different.

Keywords: path optimization, cost surface, terrain traversability, forest planning.

Henna Etula, Finnish Forestry Centre, Huhtalantie 2, FI-60220 Seinäjoki, Finland. E-mail: <henna.etula@metsakeskus.fi>

Harri Antikainen, Department of Geography, P. O. Box 3000, FI-90014, University of Oulu, Finland. E-mail: <harri.antikainen@oulu.fi>

Navigointisovellukset ovat osa ihmisten arkipäivää. Ne esittävät yleensä reitin, joka minimoi joko kuljettavan matkan tai käytettävän matka-ajan. Sovellusten lähtökohdana on useimmiten tieverkko. Kun tieverkon sijaan halutaan optimoida liikkumista maastossa, saatavilla olevien ohjelmistojen määrä vähenee merkittävästi.

Reitinoptimointi maastossa poikkeaa reitinoptimoinnista tieverkolla. Tieverkko on yksiulotteisista elementeistä koostuva verkko. Maasto hahmottuu puolestaan jatkuvana pintana, josta pitäisi pystyä päättämään, mistä kohdasta kulkemalla syntyy edullisin reitti. Olemassa olevissa sovelluksissa ongelma on ratkaistu luomalla kustannuspinta kulkemiseen vaikuttavista tekijöistä. Kustannuspinta on rasteri, jonka kukin solu edustaa solun läpi kulkemisen aiheuttamaa ”kustannusta”. Se voidaan koostaa maaston ominaisuuksista, kuten rinteiden kaltevuudesta, kulkuesteistä, maalajista, maaperän kantavuudesta, puustosta ja muusta

kasvillisuudesta, hydrologiasta sekä maan pintakerroksen ominaisuuksista (Orava 1999; Birkel 2003). Kustannuspintaan voi sisältyä myös dynaamisia tekijöitä. Näitä ovat esimerkiksi vuodenajoista tai säästä johtuvat tekijät, kuten maaston kosteus, lumi tai routa (Orava 1999; Suvinen 2006).

Muodostetun kustannuspinnan perusteella voidaan laskea optimaalinen (eli halvimman kustannuksen) reitti haluttujen pisteiden välille (Miller & Shaw 2001). Kustannuspinta-analyysiä on perinteisesti hyödynnetty erityisesti suunniteltaessa lineaaristen rakennelmien, kuten teiden (Yu ym. 2003), kanavien (Collischonn & Pilar 2000), sähkölinjojen (Bagli ym. 2011) ja kaasuputkien (Feldman ym. 1995) reittejä. Menetelmää on sovellettu myös kulkureittien määrittämiseen maastossa. Sen käyttökelpoisuutta on tutkittu muun muassa robotiikan, metsätalouden ja sotilaallisten sovellusten yhteydessä. Tutkimus on käsitelty lä-

hinnä autonomisten tai ohjattujen ajoneuvojen reititystä maastossa (Lacaze ym. 1998; Jönsson 2003; Suvinen ym. 2003; Suvinen 2006). Sen sijaan jalankulkijoiden liikkumista on tutkittu melko vähän. Periaatteiltaan jalankulkijan liikkumisen mallinnus ei kuitenkaan poikkea ajoneuvojen liikkumisen mallinnuksesta. Kaupunkioloissa navigoinnin pohjana voidaan käyttää tieverkkoa. Lisäksi esimerkiksi puistot ja rakennukset mallinetaan usein tiheänä tieverkostona (Elias 2007; Gaisbauer & Frank 2008). Maaston analysoinnissa voidaan puolestaan hyödyntää kustannuspintamenetelmää, kunhan kulkemisen kustannus päätellään jalankulkijan näkökulmasta (Xiang 1996; Balstrøm 2002; Rees 2004; Antikainen 2009; Store & Antikainen 2010; Tapanainen 2010).

Harri Antikainen (2009) ja Teemu Tapanainen (2010) ovat esittäneet tarkimmat menetelmät jalankulkijan reitinoimintoihin suomalaisessa maastossa. Näissä menetelmissä on kuitenkin vielä kehitettävää: Antikaisen menetelmässä ei oteta huomioon kaltevuutta, ja kumpikin menetelmä sivuuttaa vuodenaikojen vaikutuksen maaston kulkukelpoisuuteen. Tapanaisen tutkimuksesta puolestaan puuttuu vastusarvojen määrittely asiantuntijoiden avulla, joten hänen tuloksiaan ei voi käyttää tutkimatta oletettujen arvojen oikeellisuutta.

Tavoitteenamme on luoda menetelmä käyttökelpoisen kustannuspinnan muodostamiseen metsävaratiedon keruuseen liittyvissä käytännön sovelluksissa. Lähestymme aihetta seuraavien tutkimuskysymysten avulla: (1) Kuinka mielellään metsäsuunnittelijat liikkuvat erilaisissa maasto-kohteissa? (2) Kuinka maaston kaltevuus vaikuttaa kulkemisen miellyttävyyteen? (3) Kuinka maanpinnan, puuston ja kaltevuuden perusteella lasketut kustannusarvot voidaan yhdistää yhdeksi kustannuspinnaksi?

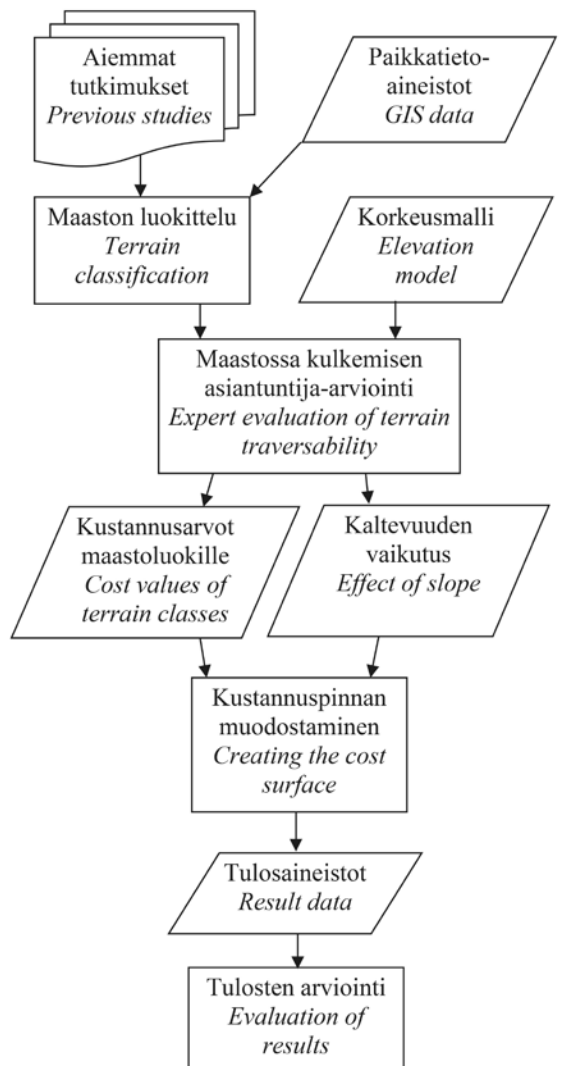
Olemme käyttäneet asiantuntijoina Metsäkeskuksen metsäsuunnittelijoita, jotka työssään liikkuvat maastossa noin sata päivää vuodessa. Keskitymme artikkelissamme tarkastelemaan reitinoimintia nimenomaan metsäsuunnittelijan työn näkökulmasta, koska metsäsuunnittelijoiden kokemus mahdollistaa maaston kulkuominaisuuksien määrittämisen varsin luotettavasti ja tehokkaasti. Uskomme myös, että metsäsuunnittelijoiden työtä olisi mahdollista tehostaa reitinoiminnin avulla.

Olemme kuvanneet tutkimukseenne vaiheet kuvassa 1. Ensimmäisessä vaiheessa luokittelimme maaston kulkukelpoisuudeltaan erilaisiin luokkiin aiempien tutkimusten sekä saatavilla olevien paikkatietoaineistojen perusteella. Tämän jälkeen selvitimme maastoluokkien miellyttävyyden metsäsuunnittelijan näkökulmasta. Kolmannessa vai-

heessa testasimme kustannuspinnan muodostamista maastoluokkien ja niiden miellyttävyydsarvojen avulla. Lopuksi pohdimme mallinnuksen hyödyntämistä käytännön sovelluksissa. Tutkimuksessamme tukeuduimme Antikaisen (2009) sekä Ron Storen ja Antikaisen (2010) käyttämiin menetelmiin ja lähestymistapoihin.

Aineisto ja menetelmät

Maaston kulkukelpoisuuteen vaikuttavat tekijät voidaan luokitella seuraavasti: maanpinta, puusto, kaltevuus, vuodenaajan aiheuttamat muutokset,



Kuva 1. Tutkimuksen vaiheet.
Figure 1. Study process.

Taulukko 1. Tutkimuksessa käytetyt paikkatietoaineistot ja niiden lähteet.
 Table 1. The GIS data used in this study, and the associated data sources.

Aineisto Data	Julkaisija Publisher	Hyödynnettävä tieto Information used
Metsävaratietokanta <i>Forestry Stand Database</i>	Metsäkeskus <i>Forestry Centre</i>	Puuston kehitysluokka ja tiheys <i>Development class and density of forest</i>
Maastotietokanta <i>Topographic Database</i>	Maanmittauslaitos <i>National Land Survey of Finland (NLS)</i>	Maaperän ominaisuudet, vesistöt, ihmisen rakentamat kohteet tai aiheuttamat muutokset <i>Soil, water, man-made construction, changes caused by man</i>
Digiroad <i>Digiroad</i>	Liikennevirasto <i>Finnish Road Administration</i>	Teiden liikennemäärät <i>Traffic information</i>
Korkeusmalli <i>Digital elevation model</i>	Metsäkeskus / Maanmittauslaitos <i>Forestry Centre / NLS</i>	Kaltevuus <i>Slope</i>



Metsikkökuviot (kehitysluokka)
Forestry stands (development class)

- aukea alue *open regeneration site*
- varttunut taimikko *advanced seedling stand*
- nuori kasvatusmetsä *young thinning stand*
- varttunut kasvatusmetsä *mature thinning stand*
- uudistuskypsä metsä *mature stand*

Luonnon maastoluokkia
Natural terrain classes

- vesi *water*
- suo *swamp*
- kallio *exposed bedrock*

Ihmisen rakentamia maastoluokkia
Man-made terrain classes

- tie *road*
- rakennus *building*
- oja *ditch*
- pihapiiri *homestead*
- pelto *farmland*

Kuva 2. Esimerkkejä paikkatietoaineistoista ja maastoluokista: Vasemmalla on metsikkökuvioaineistoa metsävaratietokannasta. Keskimmäiseen kuvaan on kerätty maastotietokannasta luonnossa esiintyviä maastoluokkia. Oikealla on maastoluokkia, jotka ovat ihmisen aikaansaamia. Tiet ovat Digiroadista, muut luokat ovat maastotietokannasta. Pihapiirit on luotu puskuroidmalla asuin- ja lomarakennukset 50 metrin puskurilla.

Figure 2. Examples of GIS data and terrain classes: forestry stand data from the Forestry Stand Database (left), natural terrain classes from the Topographic Database (center) and man-made terrain classes (right). Roads are from the Digiroad Database, other classes are from the Topographic Database. Class homestead is generated by creating a 50-meter buffer around residential and holiday buildings.

muut luonnonolot, ja ihmisen rakentamat kohteet tai aiheuttamat muutokset (Orava 1999; Suvinen ym. 2003; Antikainen 2009; Tapanainen 2010). Tiedon tarkkuus ja merkitys vaihtelevat paljon näitä kuvaavissa aineistoissa. Joidenkin kulkemiseen vaikuttavien tekijöiden mallintamiseen ei ole välttämättä mahdollisuuksia aineiston puuttuessa. Toisaalta tarkkakin aineisto on merkityksetön, jos sen kuvaama tekijä vaikuttaa kulkukelpoisuuteen vain

vähän. Tukeuduimme tutkimukseemme Metsäkeskuksen Metsävaratietokantaan, Maanmittauslaitoksen Maastotietokantaan, Liikenneviraston Digiroad-aineistoon sekä Metsäkeskuksen laserkeilausaineistosta tuotettuun korkeusmalliin (taulukko 1, kuva 2). Erotimme näistä aineistoista aiempiin tutkimuksiin perustuen kaikki mahdolliset luokat, joiden tulkitimme vaikuttavan maaston kulkukelpoisuuteen (taulukko 2).

Taulukko 2. AHP-vertailussa käytetyt maastoluokat sarjoittain.

Table 2. Terrain classes used in Analytical Hierarchy Process comparisons. Classes were divided in four different sets.

I Maanpinta <i>Ground</i>	II Linjat ja reunat <i>Lines and edges</i>	III Puusto <i>Forest</i>	IV Kaltevuus <i>Slope</i>
kivennäismaa <i>mineral soil</i>	polut <i>trails (footpaths)</i>	aukea alue (A0) tai pieni taimikko (T1) <i>open regeneration site (A0) or young seedling stand (T1)</i>	jyrkkä alamäki <i>steep downhill slope</i>
turvemaa / ei ojia tai kulku ojien suuntaisesti <i>swamp / walking parallel to ditches or no ditches</i>	rauhalliset tiet, metsäautotiet, vilkkaiden teiden reunat <i>small roads, forest truck roads, the berm of busy roads</i>	varttunut kasvatusmetsä (03) tai uudistuskypsä metsä (04) <i>advanced thinning stand or mature stand</i>	alamäki <i>downhill slope</i>
turvemaa / kulku poikkisarkaan <i>swamp / walking across ditches</i>	vilkkaan tien ylitys <i>busy road crossing</i>	varttunut taimikko (T2) tai nuori kasvatusmetsä (02) / harva tai normaali tiheys, lehti puussa <i>advanced seedling stand (T2) or young thinning stand (02), low or normal stem density / trees with leaves</i>	loiva alamäki <i>gentle downhill slope</i>
kivikko <i>rock field</i>	rautatien ylitys <i>railway crossing</i>	T2 tai 02 / tiheä, lehti puussa <i>T2 or 02 / high stem density, trees with leaves</i>	tasamaa <i>no slope</i>
kallio <i>exposed bedrock</i>	sähkölinja <i>power line</i>	T2 tai 02 / harva tai normaali tiheys, lehti ei puussa <i>T2 or 02 / low or normal stem density, trees without leaves</i>	loiva ylämäki <i>gentle uphill slope</i>
pelto / viljelykauden ulkopuolella <i>farmland / outside cultivation season</i>	pellon reuna <i>the edge of farmland</i>	T2 tai 02 / tiheä, lehti ei puussa <i>T2 or 02 / high stem density, trees without leaves</i>	ylämäki <i>uphill slope</i>
maa-ainesten ottoalue <i>peat or sand production area</i>	kivennäismaa (sama kuin sarjassa I, skaalausta varten) <i>mineral soil (same as in set I, for scaling)</i>		jyrkkä ylämäki <i>steep uphill slope</i>
Esteet: vesialue, virtavesi / leveys yli 2 m, vaikeakulkuinen suo, pelto / viljelykaudella, moottoritie, varastoalue, lentokenttäalue, louhos, kaatopaikka, urheilu- ja virkistysalue, aita, puutarha, pihapiiri, jyrkänne			
Obstacles: water, brook or ditch / more than 2 meters wide, marsh / difficult to traverse, motorway, storage area, airport, quarry, landfill, sports and recreation area, fence, garden, homestead, crag			

Maaperän ominaisuudet ovat tärkeitä etenkin ajoneuvoilla liikuttaessa, sillä maalaji vaikuttaa maaston kantavuuteen (Orava 1999; Birkel 2003; Suvinen 2006). Jalankulkijan näkökulmasta maalajilla ei ole juurikaan merkitystä, vaan jako turve- ja kivennäismaihin on pääosin riittävä. Turvemaa-kohteet haimme Maastotietokannasta (Maanmittauslaitos 2011), jossa suot on luokiteltu helppo- ja vaikeakulkuisiin. Jälkimmäiset luokittelimme esteiksi. Poimimme maastotietokannasta myös turvemaiden ojat, kivikot, kalliot, pelto, maa-ainesten ottoalueet, sähkölinjat ja vedet.

Puusto vaikuttaa maaston kulkukelpoisuuteen paljon. Haastattelemamme asiantuntijat pitivät tärkeimpinä tietoina puuston kehitysluokkaa ja tiheyttä. Käytimme tutkimuksessamme tarkinta mahdollista saatavilla olevaa aineistoa, Metsäkeskuk-

sen ylläpitämää yksityismetsien metsävaratietokantaa (Metsätalouden kehittämiskeskus... 2006). Koska Metsävaratietokanta kuuluu henkilötietolain piiriin, puustotiedon hankkimista on muussa kuin tutkimuskäytössä harkittava muualta. Käytökelpoinen rinnakkaisaineisto on esimerkiksi Maanmittauslaitoksen tuottama SLICES-maankäyttöaineisto, joka perustuu Metsäntutkimuslaitoksen suorittamaan valtakunnan metsien inventointiin (VMI) sekä satelliittikuviin (SLICES Maankäyttö 2011).

Tieto *maaston kaltevuudesta* voidaan johtaa maaston korkeusmallista. Korkeusmalleja saa Suomessa kattavasti Maanmittauslaitokselta. Koko Suomesta on saatavilla korkeusmallit 10 ja 25 metrin resoluutioilla. Lisäksi Maanmittauslaitos on tuottanut vuodesta 2008 saakka uutta korkeus-

mallia laserkeilauksen avulla (Korkeusmalli 2 m 2011). Myös muut organisaatiot ovat tehneet laserkeilauksia eri tarkoituksia varten, joten vastaavaa aineistoa löytyy monesta lähteestä. Itse käytimme Metsäkeskuksen metsäninventointia varten suoritettujen laserkeilausten tuottamaa korkeusmallia.

Rajasimme *vuodenajan vaikutuksen* lumettomaan kauteen, sillä metsäsuunnittelijat liikkuvat maastossa pääosin lumettomaan aikaan. Kesäaikaan metsäsuunnittelijan työhön vaikuttavat puiden lehtien puhkeaminen sekä maanviljely. Lehtien puhkeaminen vaikuttaa näkyvyyteen etenkin nuorissa metsissä. Viljelykaudella on puolestaan vältettävä pelloilla kulkemista. Vuodenajan vaikutuksen kuvaamiseen emme tarvinneet erillisiä aineistoja, sillä käytimme kustannuspinnan rakentamisessa vuodenaikaan liittyviä parametreja.

Muilla luonnonoloilla tarkoitamme esimerkiksi säätilaa tai työtä häiritsevien hyönteisten esiintymistä. Nämä olemme rajanneet kulkukelpoisuusanalyysin ulkopuolelle. Metsäsuunnittelijat välttävät mahdollisuuksien mukaan työskentelyä erityisen huonolla säällä. Monesta häiriötekijästä, kuten esimerkiksi hirvikärpästä, ei puolestaan ole saatavilla niiden sijaintia kuvaavaa aineistoa.

Ihmisen rakentamat kohteet ja ihmisen aiheuttamat muutokset voivat nopeuttaa kulkemista tai jopa estää sen. Eniten kulkemista helpottavat polut ja tiet. Tiet jaoimme kahteen luokkaan, rauhallisiin ja vilkkaisiin teihin. Tulkitsimme, että vilkkaiden teiden ylitykset pitäisi minimoida työturvallisuussyistä. Hidasteita ovat esimerkiksi ojat ja esteitä aidat tai louhokset. Suurin osa ihmisen rakentamista kohteista löytyy maastotietokannasta, mutta kaikkia ihmisen aiheuttamia muutoksia ei ole mahdollista mallintaa. Esimerkiksi hakkuutahdit hidastavat kulkemista metsässä, mutta niiden sijainnista ei ole täyttä varmuutta. Tieto teiden liikennemääristä on saatavissa Digiroad-aineistosta (Digiroad 2011).

Miellyttävyyssarvojen ja kustannusten laskeminen maastoluokille

Voidaksemme rakentaa mahdollisimman käyttökelpoisen kustannuspinnan, selvitimme metsäsuunnittelijoiden halukkuutta liikkua erilaisissa maastokohteissa. Maaston miellyttävyys on kuitenkin subjektiivinen suure, jota vastaavien lukuarvojen määrittäminen maastokohteille oli hankalaa. Päädymme käyttämään analyttistä hierarkiaprozessia (AHP), jota yleensä käytetään päätöstukimenetelmänä (Saaty 1980). AHP:n parivertailuteknikalla on myös mahdollista tuottaa numeerista tietoa kohteiden keskinäisistä suhteista (Malczewski

1999). Sen avulla saatoimme jalostaa asiantuntijoiden mielipiteet jatkolaskennoissa hyödynnettäväksi tiedoksi (Kangas ym. 1993; Atkinson ym. 2005; González ym. 2007). AHP:lla tuotetut arvot ovat suhdeasteikollisia. Tämä mahdollistaa niiden käytön reitinoptimoinnissa (Longley ym. 2005).

AHP-menetelmässä kaikkia luokkia verrataan toisiinsa pareittain. Kun luokkien määrää lisätään, vertailujen määrä kasvaa eksponentiaalisesti. Tämän vuoksi jaoimme maastoluokat sarjoihin (taulukko 2). AHP:ssa luokkia saa olla korkeintaan yhdeksän, jotta parivertailujen määrä pysyy kohtuullisena (Saaty 1980). Siksi kohteet piti jakaa kahteen sarjaan, vaikka sarjojen I ja II luokkia olisi ollut parasta vertailla yhdessä. Sijoitimme kiinnäisinaan kumpaankin sarjaan yhdistäväksi luokaksi, jonka avulla pystyimme skaalaamaan sarjojen arvot jatkolaskennassa toisiinsa (Saaty 2001).

Vertailua varten laadimme parivertailulomakkeet, jotka lähetimme sähköpostilla kokeneille metsäsuunnittelijoille Etelä-Pohjanmaalle, Etelä-Savoon ja Kainuuseen. Valitsimme tutkimuksemme asiantuntijoita eri puolilta Suomea, koska halusimme ottaa mahdolliset alueelliset erot huomioon. Kyselyyn vastasi Etelä-Pohjanmaalta kahdeksan, Etelä-Savosta kahdeksan ja Kainuusta viisi metsäsuunnittelijaa. Vastaajat palauttivat kyselylomakkeen postitse tai sähköpostilla. Osaan vastaajista otimme yhteyttä uudelleen, jolloin he saattoivat täydentää puutteellisia tai epäloogisia vastauksiaan.

Vastaajien piti valita kustakin vertailtavasta maastoluokasta mieluisampi. Lisäksi heidän piti arvioida, kuinka paljon miellyttävämpi heidän valitsemansa maastoluokka oli. Jotta AHP tuottaisi luotettavia tuloksia, pitää vertailujen olla riittävän yhdenmukaisia. Yhdenmukaisuutta arvioidaan yhdenmukaisuussuhteella (*consistency ratio*, CR), jonka on oltava alle 0,1. Osa vastauksista ei sauttanut korjausten jälkeenkään riittävää yhdenmukaisuussuhdetta, joten jouduimme hylkäämään ne. Hyväksytyjä vastauksia oli sarjassa I 20, sarjassa II 17, sarjassa III 16, ja sarjassa IV 15. Jokaisessa sarjassa vähintään viisi hyväksyttyä vastausta jokaisesta tutkimukseen osallistuneesta Metsäkeskuksen alueyksiköstä, joten hylkäykset eivät vaikuttaneet maantieteelliseen jakaumaan.

Kyselyiden myötä saimme jokaisen vastaajan näkemyksen maastoluokkien miellyttävyydestä numeerisena arvona. Kunkin luokan lopullisen miellyttävyyssarvon laskimme vastaajakohtaisten miellyttävyyssarvojen aritmeettisena keskiarvona. Lisäksi arvioimme vastausten hajontaa.

Tutkimme AHP-menetelmän avulla myös kaltevuuden (sarja IV) vaikutusta maastossa liikku-

misen miellyttävyyteen. Käytimme kuitenkin eri lähestymistapaa kuin sarjojen I–III kohdalla. Toisin kuin miellyttävyyttä kuvaavat luokkamuuttajat, kaltevuus on jatkuva muuttuja. Niinpä vastaajien olisi ollut vaikea määrittellä, kuinka paljon mieluummin he kulkevat rinnettä, jonka kaltevuus on 5 prosenttia kuin rinnettä, jonka kaltevuus on 12 prosenttia. Oletimme, että kaltevuuden osalta kulkunopeus korreloi kulkemisen miellyttävyyden kanssa, joten selvitimme ensin kirjallisuudesta, kuinka kulkunopeus muuttuu kaltevuuden muuttuessa.

Waldo Tobler (1993) on estimoinut funktion kaltevuuden vaikutuksesta kulkunopeuteen Edward Imhofin (1950) empiirisen aineiston perusteella. Wei-Ning Xiang (1996) on puolestaan kuvannut kaltevuuden vaikutuksia sanallisella asteikolla, Esa Orava (1999) kertoimilla. Thomas Balstrøm (2002) on luokitellut kaltevuuden kuuteen luokkaan ja mitannut viiden metrin etenemiseen käytetyn ajan eri kaltevuusluokissa. Toblerin funktio oli tutkimuksemme kannalta käyttökelpoinen, sillä kaltevuutta ei tarvitse luokitella sitä varten. Toblerin funktiossa kulkunopeus W lasketaan kaltevuudesta S seuraavasti:

$$(1) \quad W = 6 \exp(-3,5 * \text{abs}(S + 0,05)),$$

missä S on korkeuseron ja horisontaalisen matkan välinen suhde (kaltevuus prosentteina jaettuna sadalla). Funktio tuottaa suurimman kulkunopeuden kuusi kilometriä tunnissa, kun kuljetaan alamäkeen, jonka kaltevuus on viisi prosenttia. Tasamaalla funktio tuottaa kulkunopeuden viisi kilometriä tunnissa. Kulkunopeus pienenee kaltevuuden kasvaessa. Toblerin mukaan kulkunopeus maastossa saadaan kertomalla funktion tuottama nopeus tiellä kertoimella 0,6 (Tobler 1993).

Halusimme kuitenkin selvittää asiantuntijoiltamme, vastaako Toblerin funktio heidän mielipiteitään. Sarjassa IV vastaajia pyydettiin jakamaan mielessään maasto seitsemään kaltevuusluokkaan (taulukko 2). Luokista muodostettiin sarjojen I–III kaltainen AHP-kyselylomake. Kyselyn tuloksia vertasimme Toblerin funktioon.

Parivertailujen lisäksi esitimme asiantuntijoille yksittäisiä kysymyksiä kustannuspinnan muodostamisen helpottamiseksi. Pyysimme asiantuntijoita arvioimaan omaa kulkunopeuttaan tiellä ja helppokulkuisessa maastossa. Lisäksi pyysimme heitä arvioimaan kaltevuusprosentin, jonka ylittävät kaltevuudet he kokivat metsäsuunnittelijan työn kannalta esteiksi (maastoluokka jyrkänne). Kysyimme myös arviota sellaisesta puuston tiheydestä (runkoa hehtaarilla), jonka ylittyessä kulkemisen miellyttävyyttä heidän mielestään heikkenee.

Reitinoptimoinnissa kustannuspinnan avulla pyritään minimoimaan kulkemisen kustannus. Niinpä jouduimme kääntämään miellyttävyydsarvot kustannusarvoiksi. Kunkin luokan kustannus c_i laskettiin luokan miellyttävyydsarvosta d_i kaavalla

$$(2) \quad c_i = d_{max} / d_i,$$

missä d_{max} oli korkein miellyttävyydsarvo.

Kustannuspinnan muodostaminen

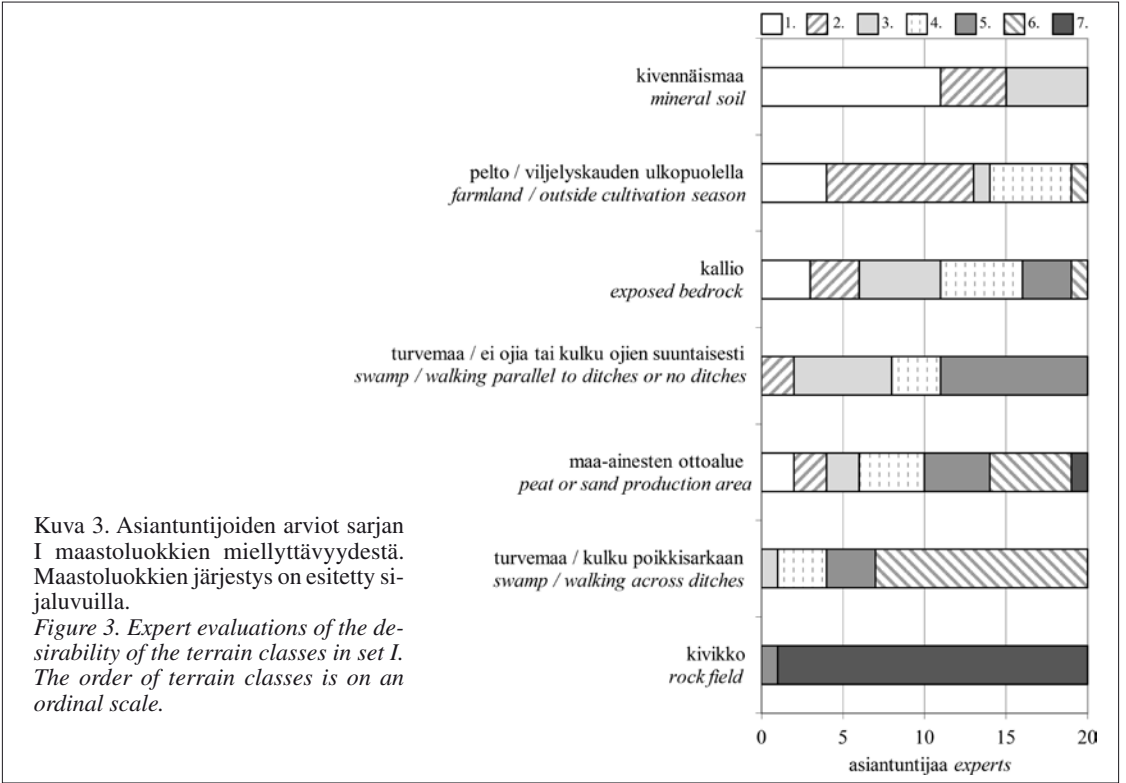
Kustannuspinnan muodostaminen on periaatteeltaan *map overlay*-tyyppinen toiminto, jossa maanpinnan, puuston ja kaltevuuden kustannukset yhdistetään yhdeksi karttatasoksi. Etsimme jokaiselle kohteelle kustannusarvon kahden tai kolmen karttatason yhdistelmänä. Osalle kustannuspinnan soluista riitti pelkkä maanpinnan kustannusarvo, osaan yhdistimme lisäksi maanpinnan ja puuston kustannuksen. Lisäksi jokaisella solulla oli tieto kaltevuuden kustannuksesta. Testasimme eri tapoja yhdistää karttatasojen kustannusarvot. Lopulta valitsimme menetelmän, jolla lopullinen kustannuspinta noudatti mahdollisimman hyvin asiantuntijoiden mielipiteitä.

Muodostimme kustannuspinnan poimimalla maastoluokkiin liittyvät kohteet paikatietoaineistoista, viemällä ne kartalle sopivassa järjestyksessä ja liittämällä oikean kustannuksen kuhunkin maastoluokan kohteeseen. Kustannuspinnan muodostimme *ArcGIS*-ohjelmistolla (ESRI 2002). Pyrimme löytämään kokeilevan työme tuloksena tavan tuottaa kustannuspinta niin, että maastoluokat asettuvat kartalla loogiseen järjestykseen. Lisäksi pinnan oli oltava teknisesti käyttökelpoinen reitinoptimointia varten.

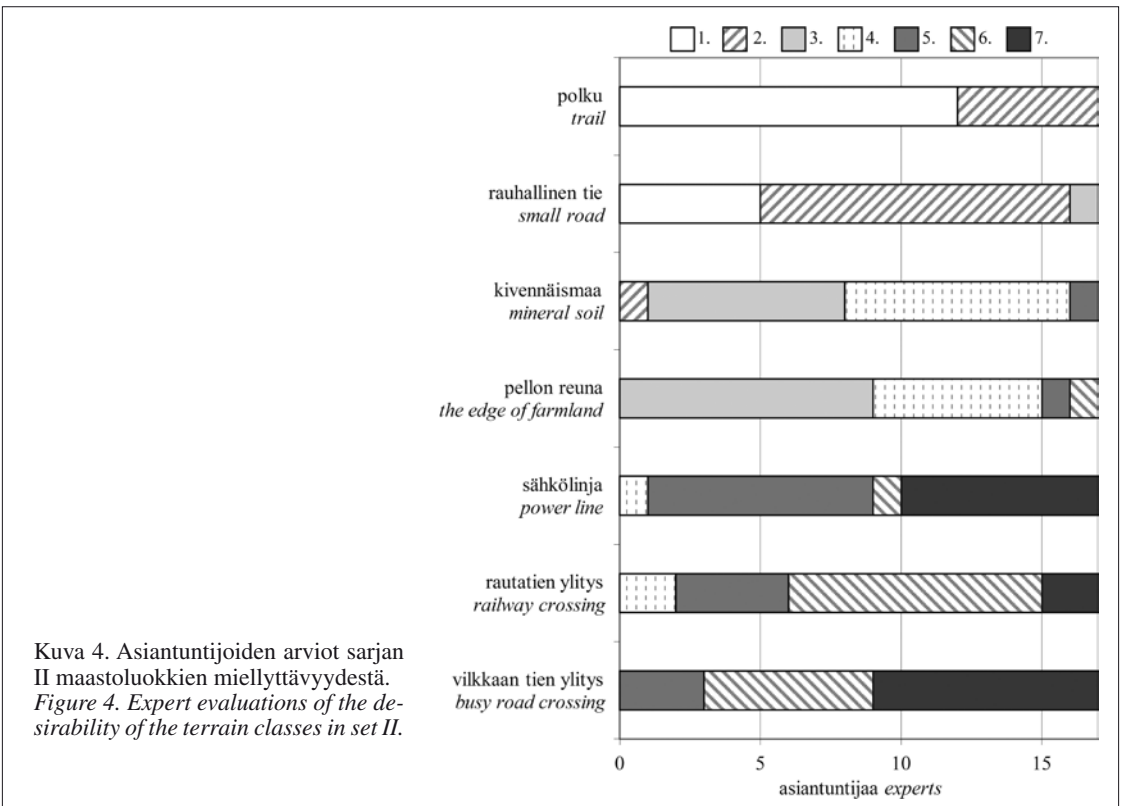
Tulokset

Maastoluokkien miellyttävyydsarvot

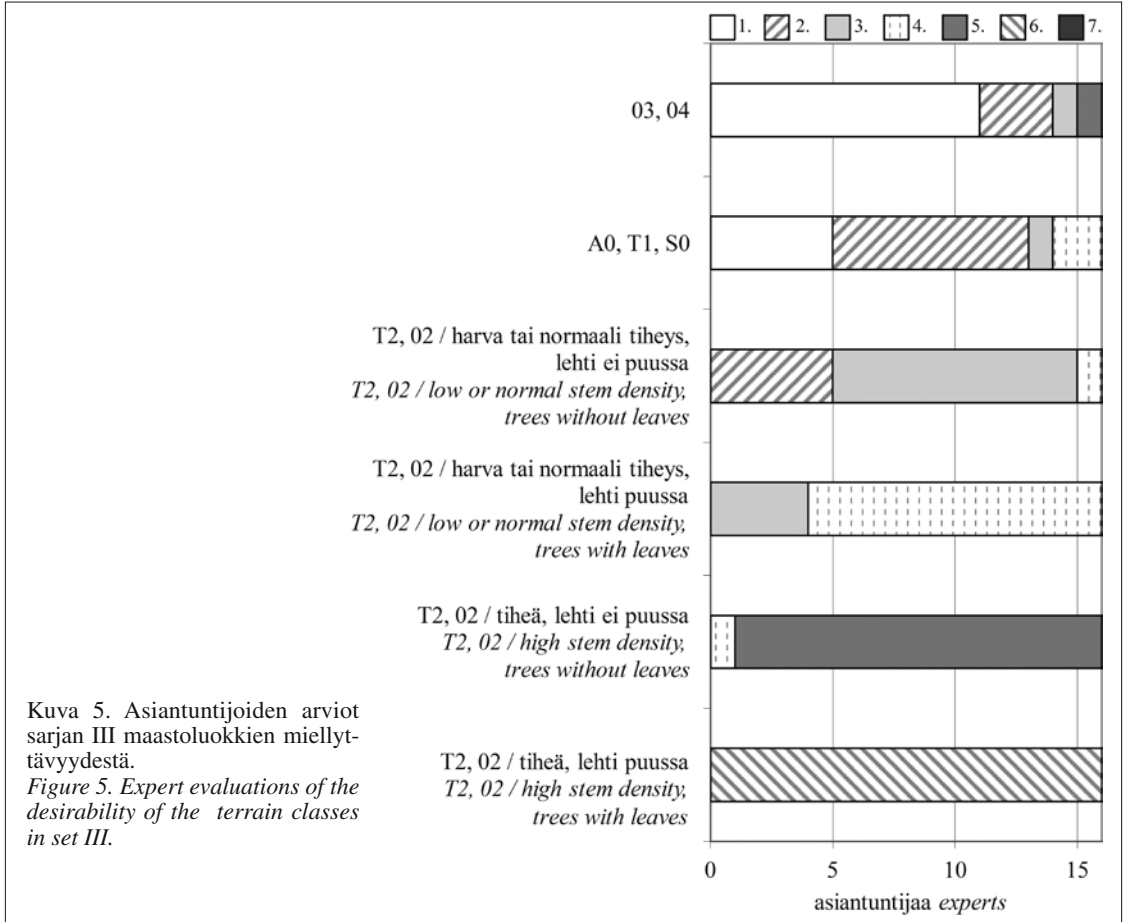
Saimme AHP-menetelmää käyttämällä selville maastoluokkien miellyttävyydsarvot, jotka laskimme erikseen kullekin vastaajalle. Vastaajien henkilökohtaiset mielitykset aiheuttivat vastauksiin hajontaa, mutta vastauksista löytyi myös selkeitä päälinjoja. Vastaajien mielipiteiden yhtenevyyttä selvitimme järjestämällä luokat vastaajittain miellyttävyydsarvon mukaan ja kokoamalla aineiston frekvenssitaulukkoon. Kuvaamme vastauksia sarjoittain kuvissa 3–5.



Kuva 3. Asiantuntijoiden arviot sarjan I maastoluokkien miellyttävyydestä. Maastoluokkien järjestys on esitetty sijaluvuilla.
 Figure 3. Expert evaluations of the desirability of the terrain classes in set I. The order of terrain classes is on an ordinal scale.



Kuva 4. Asiantuntijoiden arviot sarjan II maastoluokkien miellyttävyydestä.
 Figure 4. Expert evaluations of the desirability of the terrain classes in set II.



Kuva 5. Asiantuntijoiden arviot sarjan III maastoluokkien miellyttävyyydestä.
Figure 5. Expert evaluations of the desirability of the terrain classes in set III.

Sarjassa I kivennäismaa oli selkeästi miellyttävintä maastoluokkaa. Turvemailla vastaajat kertoivat kulkevasa mieluummin ojien suuntaisesti kuin poikkisarkaan. Kivikko arvioitiin epämiellyttävimmäksi kohteeksi. Peräti 90 prosenttia vastaajista asetti nämä neljä luokkaa tähän järjestykseen. Henkilökohtaiset mielitykset näkyivät selvästi luokissa pelto, kallio ja maa-ainesten ottoalue. Nämä luokat saattoivat olla monessa järjestyksessä.

Sarjassa II vastaukset vaihtelivat enemmän. Kaikkien vastaajien mielestä tiet ja polut olivat kuitenkin miellyttävimmät maastoluokkia, sähkölinjat sekä rautateiden ja vilkkaiden teiden ylitykset epämiellyttävimmiksi.

Sarjassa III löytyivät helposti sekä miellyttävimmät että epämiellyttävimmät luokat. Miellyttävimmiksi koettiin varttuneet kasvatusmetsät ja uudistuskypsät metsät sekä aukeat alueet ja taimikot. Varttuneet taimikot ja nuoret kasvatusmetsät olivat epämiellyttävämpiä. Haastattelemiemme

asiantuntijoiden mukaan nämä olivat erityisen epämiellyttäviä kesäaikaan, kun lehti on puussa, tai silloin jos metsiköt olivat tiheitä. Arviot kulkeamisen miellyttävyttä alentavasta puuston tiheydestä vaihtelivat välillä 3 000–10 000 runkoa hehtaarilla. Vastausten mediaaniarvo oli 4 000 runkoa hehtaarilla. Kustannuspinnan muodostamisessa käytimme tätä raja-arvona normaalin ja tiheän puuston välillä.

Vastauksista ei löytynyt juurikaan alueellista vaihtelua. Henkilökohtaiset mielitykset vaikuttivatkin vastausten välisiin eroihin enemmän kuin vastaajan sijainti. Ainoa selkeä poikkeus liittyi pelloilla liikkumiseen: Kainuussa ja Etelä-Savossa pellot koettiin miellyttävämmiksi kuin Etelä-Pohjanmaalla. Arvelemme, että tämä havainto liittyy peltojen suurempaan määrään ja kokoon maatalousvaltaisella Etelä-Pohjanmaalla.

Vastausten yhtenevyyden perusteella arvioimme, että aritmeettinen keskiarvo kuvaa luokan keskimääräistä miellyttävyttä. Geometrisen keskiar-

Taulukko 3. Maastoluokkien kulkukustannukset. Suluissa olevia kustannusarvoja ei käytetä sellaisenaan, vaan ne ovat puustoisten maastoluokkien lopullisten kustannusarvojen laskennan perusta. * Puusto ei vaikuta kulkemiseen.

Table 3. Travel costs of the terrain classes. Cost values in brackets are not used as such, however, they are used in calculating final costs of forested terrain classes. * Forest has no effect on walking.

Maastoluokkien kulkukustannukset <i>Travel costs of the terrain classes</i>	maanpinnan kustannus <i>cost of ground</i>	03, 04	A0, T1	T2, 02 / harva tai normaali tiheys, lehti ei puussa <i>T2 or 02 / low or normal stem density, trees without leaves</i>	T2, 02 / harva tai normaali tiheys, lehti puussa <i>T2 or 02 / low or normal stem density, trees with leaves</i>	T2, 02 / tiheä, lehti ei puussa <i>T2 or 02 / high stem density, trees without leaves</i>	T2, 02 / tiheä, lehti puussa <i>T2 or 02 / high stem density, trees with leaves</i>
puuston kustannus <i>cost of forest</i>		(1,000)	(1,034)	(1,473)	(2,131)	(3,980)	(10,859)
polku <i>trail</i>	1,000						
rauhallinen tie <i>small road</i>	1,084						
kivennäismaa <i>mineral soil</i>	(2,156)	2,156	2,190	2,629	3,287	5,136	12,015
pellon reuna <i>the edge of farmland</i>	2,383						
pelto / viljelykauden ulkopuolella <i>farmland / outside cultivation season</i>	2,839						
kallio <i>bedrock</i> *	3,293						
turvemaa / ei ojia tai kulku ojien suuntaisesti <i>swamp / walking parallel to ditches or no ditches</i>	(4,263)	4,263	4,297	4,736	5,393	7,242	14,121
maa-ainesten ottoalue <i>peat or sand production area</i>	4,709						
sähkölinja <i>power line</i>	5,632						
rautatien ylitys <i>railway crossing</i>	5,850						
vilkkaan tien ylitys <i>busy road crossing</i>	8,093						
turvemaa / kulku poikki-sarkaan <i>swamp / walking across ditches</i>	(9,252)	9,252	9,286	9,725	10,383	12,232	19,111
kivikko <i>rock field</i> *	26,328						

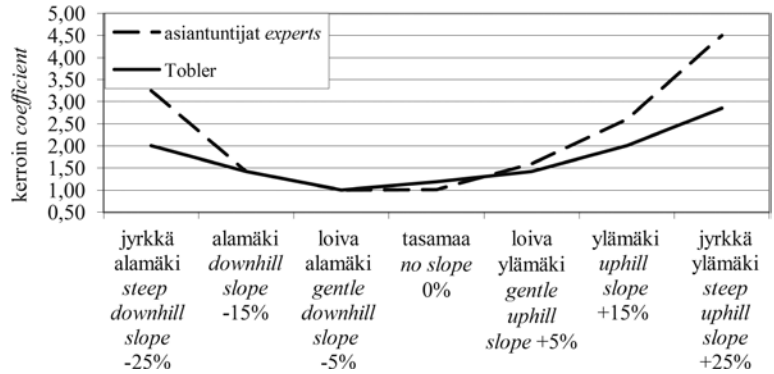
von käyttö toi vastaajien henkilökohtaisia mielipiteitä esiin jonkin verran enemmän. Päälinjat hahmottuivat vastauksista suhteellisen yhdenmukaisesti, joten pidimme niiden korostamista henkilökohtaisten erojen korostamista tärkeämpänä. Esitämme maastoluokkien miellyttävyyden keskiarvon taulukossa 3 niin, että sarjojen I ja II kustannusarvot ovat maanpinnan kustannusta kuvaavassa sarakkeessa ja sarjan III kustannusarvot puuston kustannusta kuvaavalla rivillä.

Kaltevyyden vaikutus maastossa kulkemisen miellyttävyyteen

Vastaajat arvioivat miellyttävimmäksi kaltevuudeksi loivan alamäen. Tätä seurasivat tasamaa, alamäki, loiva ylämäki, ylämäki, jyrkkä alamäki ja jyrkkä ylämäki (kuva 6). Vertailua varten muutamme sanallisesti kuvatut luokat prosentuaalisiksi kaltevuusluvuiksi ja Toblerin funktion tuottamat nopeudet yhteismitallisiksi kerroin-arvoiksi. Asiantuntijat arvioivat jyrkimmät kaltevuudet hankalakulki-

Kuva 6. Asiantuntijoiden arvio kaltevuuden vaikutuksesta maastossa liikkumisen miellyttävyyteen verrattuna Toblerin funktion tuottamiin arvoihin.

Figure 6. Expert evaluations of the effect of slope on terrain traversability versus the results of Tobler's hiking function.



semmiksi kuin Toblerin funktio. Vastajien mielipiteet noudattivat kuitenkin Toblerin funktion muotoa, eli kulku koettiin miellyttävimmäksi loivemilla kaltevuuksilla ja tasamaalla, ja hankalaksi jyrkissä maastonkohdissa.

Vastajien keskimääräinen kulkunopeus tasaisella tiellä oli kuusi kilometriä tunnissa ja maastossa 3,6 kilometriä tunnissa. Vastajat katsoivat siis liikkuvansa hieman Toblerin oletusta nopeammin, mutta suhde tiellä ja maastossa kulkemisen välillä oli sama.

Tulosten perusteella päätelimme, että Toblerin funktio kulkunopeudesta sopii kuvaamaan myös kulkemisen miellyttävyyttä. Tässä tutkimuksessa emme olleet kiinnostuneita funktion tuottamista kulkunopeuksista, vaan käytimme funktiota avuksi määrittääksemme kertoimet, joilla kaltevuus vaikuttaa kulkemiseen. Katsoimme kaltevuuden kustannuksen määräytyvän nopeuden käännteislukuna. Tämän jälkeen skaalasimme arvot niin, että helppokulkuisin luokka sai arvon 1. Tällöin kustannuksen c tuottava funktio sieveni muotoon

$$(3) \quad c = 1 / \exp(-3,5 * \text{abs}(S + 0,05)).$$

Vastajien mukaan rinteet, joiden kaltevuus on yli 30 prosenttia, oli luokiteltava metsäsuunnittelijan työn kannalta esteiksi. Tulos vastasi kirjallisuudessa esitettyjä arvioita, jotka vaihtelevat 25–30 prosentin välillä (Xiang 1996; Balstrøm 2002).

Kustannusarvojen yhdistäminen

Yhdistimme sarjoille lasketut kustannusarvot yhdeksi kustannuspinnaksi. Puuston vaikutusta ei tarvinnut ottaa huomioon puuttomissa kohteissa, joita olivat polut, tiet, pellot, maa-ainesten ottoalueet, sähkölinjat ja rautatiet. Tulkitsimme asiantuntija-haastattelujen perusteella myös kalliot ja kivikot luokiksi, joilla puusto on tyypillisesti niin harvaa,

ettei se vaikuta kulkemiseen. Näiden luokkien kustannus määräytyi maanpinnan ominaisuuksien perusteella. Puuston vaikutus piti ottaa huomioon metsäisillä kivennäis- ja turvemilla.

Maanpinnan ja puuston kustannusten yhdistämisessä testasimme sekä additiivista (Malczewski 1999; O'Sullivan & Unwin 2010) että multiplikatiivista (Orava 1999; Tapanainen 2010) yhdistämistä. Additiivinen yhdistäminen yliarvioi kustannukseltaan pienimpien maastoluokkien lopullista kustannusta asiantuntijoiden mielipiteisiin verrattuna. Multiplikatiivinen yhdistäminen taas kohotti vaikeakulkuisimpien maastoluokkien kustannuksen liian korkeaksi ja vääristi luokkien järjestystä. Asiantuntijoiden mielipiteitä noudatti parhaiten malli, jossa yhdistetty kustannus C_{ij} laskettiin maaperän kustannuksesta c_i ja puuston kustannuksesta c_j kaavalla

$$(4) \quad C_{ij} = c_i + (c_j - c_{j_{\min}}),$$

missä $c_{j_{\min}}$ on helppokulkuisimman puustoluokan kustannus. Puustoisten maastoluokkien lopulliset kustannukset on esitetty taulukossa 3.

Tiet voi luokitella rauhallisiin ja vilkkaisiin Digiroadin liikennemäärätietojen avulla (Digiroad 2011). Tässä tutkimuksessa emme selvittäneet, mikä olisi raja liikennemäärässä näiden luokkien välillä, sillä metsäsuunnittelijat liikkuvat pääosin rauhallisten teiden lähistöllä. Liikennemäärien raja on kuitenkin syytä selvittää, jos reitinoptimointi kohdistuu alueille, joilla liikutaan vilkkaiden teiden varsilla.

Seuraavat maastoluokat ja -kohteet totesimme asiantuntija-arvioiden ja omien päätelmiemme perusteella esteiksi: aita, kaatopaikka, lentokenttä-alue, louhos, moottoritie, pelto / viljelykaudella, pihapiiri, puutarha, urheilu- ja virkistysalue, vaikeakulkuinen suo, varastoalue, vesialue sekä vesiuoma, jonka leveys on yli kaksi metriä. Lisäksi

määrittelimme esteiksi rinteet, joilla kaltevuus ylittää 30 prosenttia.

Kustannuspinnan muodostaminen ja reittien laskeminen

Ryhdyimme muodostamaan kustannuspintaa käsittelemällä vektorimuotoista aineistoa ArcGIS:lla. Poimimme maastotietokannasta ja metsävaratietokannasta mukaan tarvittavat kohteet. Kohteet olivat joko aluekohteita tai viivoja. Viivamaiset kohteet puskuroidimme kuuden metrin puskurilla. Tämä tarkoitti viivamaisten kohteiden yliarviointia. Yliarviointi oli kuitenkin välttämätöntä, koska ilman sitä kohteet eivät olisi erottuneet yhtenäisinä viivoina lopullisella kustannusrasterilla. Jos viiva ei ole yhtenäinen, reitti saattaa ”oikaista” solujen välistä diagonaalisuunnassa, jolloin esimerkiksi esteeksi tarkoitettu viiva ei olekaan todellinen este reitinlaskennassa.

Suuraavaksi tallensimme kohteille niiden kustannuksen. Sen jälkeen päivitimme kustannusarvoja kartalle ArcGIS:n *update*-toiminnolla. Veimme kohteet kustannuspintaan niin, että merkittävät kohteet asettuivat päällimmäiseksi. Loogisen lopputuloksen tuottava järjestys oli: metsävaratietokannan metsikkökuviot, suot, sähkölinjat, pelot, muut maastotietokannasta haettavat alueet, ojat, muut maastotietokannasta haettavat viivat, esteet ja tiet.

Lopuksi muunsimme vektorimuotoisen pinnan rasterimuotoon. Käytimme kahdeksan metrin resoluutiota. Valittu resoluutio oli kompromissi kustannuspinnan tarkkuuden ja mielekkään rasterikoon välillä. Pieni solukoko tuottaa tarkemman kuvauksen kustannuspinnasta, mutta kasvattaa samalla reitinlaskentaan tarvittavaa aikaa. Suuri solukoko taas tuottaa epätarkan kustannuspinnan, joka kuvaa huonosti maaston kulkukelpoisuutta.

Mikäli samalta alueelta halutaan optimoida reittejä eri vuodenaikoina, kustannuspintoja on muodostettava useampia. Tässä tutkimuksessa kustannukseen vaikuttivat lehtien puhkeaminen puihin sekä maanviljely, joten vaihtoehtoja on kolme: (1) lehdettömän ajan kustannuspinta; (2) kustannuspinta ajalle, jolloin lehti on puussa ja viljelykausi on käynnissä; sekä (3) kustannuspinta ajalle, jolloin lehti on puussa, mutta viljelykausi ei ole käynnissä.

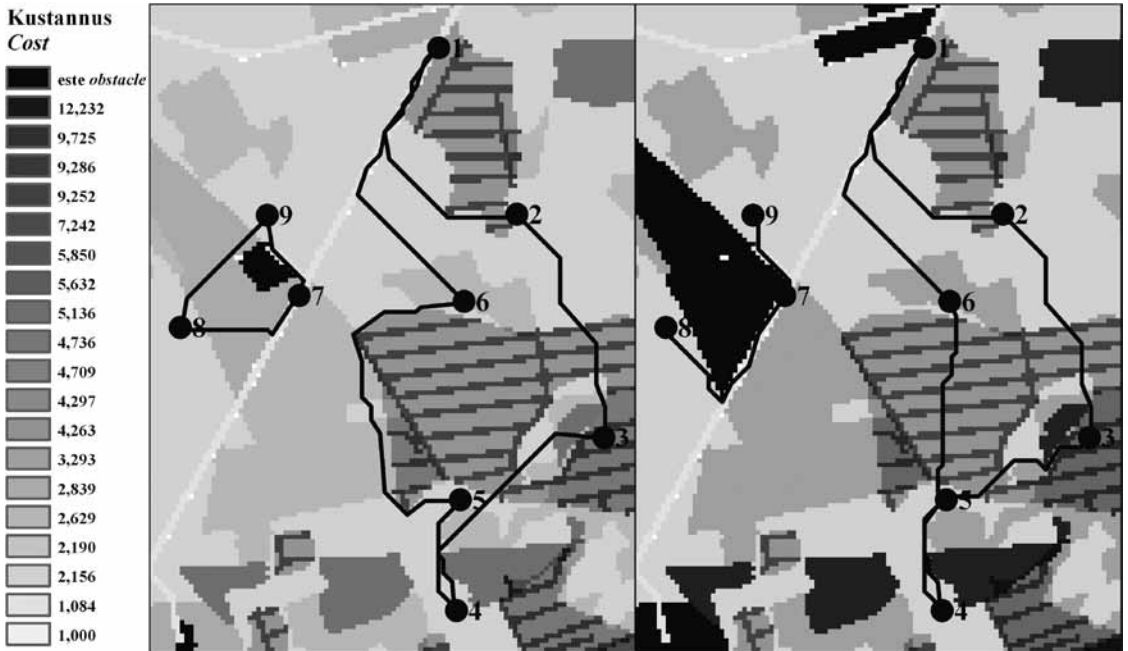
Optimaalinen reitti lasketaan kustannuspinta-analyysiin liittyvällä ”halvimman reitin menetelmällä”. Käytimme omassa tutkimuksessamme ArcGIS:n *path distance* -toimintoa. Menetelmässä kustannuspinnasta muodostetaan noodi-linkkirakenne, jossa kustannuspinnan kunkin solun keskipiste toimii noodina. Jokainen keskipiste linki-

tetään ympäröivien solujen keskipisteisiin, ja jokaisen linkin edustama kustannusetäisyys määritellään kustannuspinnan perusteella. Optimaalinen reitti lasketaan tämän rakenteen pohjalta Edsger Dijkstran (1959) algoritmia käyttäen. Käytännössä reitin toisesta päätepisteestä käsin lasketaan ensin kumulatiiviset kustannusetäisyydet kaikkiin kustannuspinnan soluihin (noodeihin). Optimaalinen reitti saadaan selville jäljittämällä halvimman kustannuksen polku reitin päätepisteestä siihen pisteeseen, josta kumulatiivisen kustannuksen laskenta aloitettiin.

Emme sisällyttäneet maaston kaltevuutta kustannuspintaan, koska kaltevuuden vaikutus kulkukustannukseen riippuu kulkusuunnasta. *Path distance* -toiminnossa maaston kaltevuudesta riippuva kulkukustannus lisätään kustannuspinnan mukaisesti määritettyyn kulkukustannukseen erillisen kaltevuusfunktion avulla. Toiminto tarjoaa useita valmiiksi määriteltyjä kaltevuusfunktioita, mutta yksikään näistä ei soveltunut tutkimuksemme tarpeisiin. Niinpä lisäsimme kaltevuuden vaikutuksen toimintoon itse määrittelemämme funktion mukaisesti.

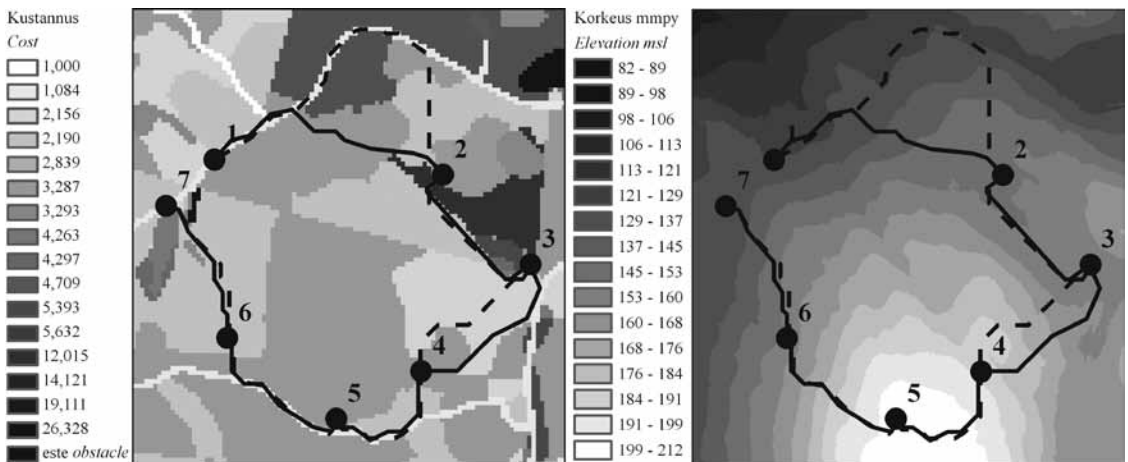
Kuvassa 7 on havainnollistettu vuodenajan vaihtumisen vaikutusta reitteihin. Vasemmanpuoleinen pinta kuvaa varhaista kevättä, jolloin lehti ei ole puussa. Oikealla on kesäajan kustannuspinta, jolloin lehti on puussa ja pelloilla kulkemista tulee välttää. Optimaalinen reitti saattaa muuttua nuorten metsien lähellä, kuten pisteeltä 5 pisteelle 6 siirryttäessä. Keväällä reitti kiertää ojitetun suoalueen. Lehtien puhjettua optimaalinen reitti muuttuu, sillä suoalueen länsipuolella on nuorta kasvatusmetsää (02), jonka kulkukustannus on kesällä suurempi. Tällöin on helpompaa kävellä ojitetulla turvemaalla, jonka puusto on varttunut kasvatusmetsää (03). Vastaava ilmiö on havaittavissa siirryttäessä pisteeltä 3 pisteelle 4. Keväällä pisteiden 7–9 välille muodostuu rengasreitti. Kesällä pisteet 8–9 on kuitenkin inventoitava kulkeamalla edestakaisin pellon ympäri tien kautta.

Kuvassa 8 on havainnollistettu korkeusvaihtelun vaikutus reitteihin. Vasemmalla on alueen kustannuspinta, oikealla korkeusmalli. Kun korkeusvaihtelu otetaan huomioon, reitti pyrkii välttämään korkeuskäyrien ylittämistä. Tämä näkyy selkeimmin pisteeltä 1 pisteelle 2 siirryttäessä. Kun laskennassa käytetään pelkkää kustannuspintaa, reitti kulkee mahdollisimman pitkään tietä pitkin. Kun korkeusmalli lisätään laskentaan, pidemmästä reitistä aiheutuva korkeusvaihtelu muuttaa reittiä lyhyemmäksi ja siirtää sen metsään. Pisteiden 3 ja 4 välillä korkeusmallia käyttäen laskettu reitti on korkeusmallitonta reittiä pidempi, mutta kulkee loivemmassa maastossa.



Kuva 7. Esimerkkireittejä: Vasemmalla reittejä keväällä ennen lehtien puhkeamista. Oikealla reittejä kesällä, kun puisa on lehdet ja pelloilla ei voi kulkea.

Figure 7. Example paths: paths in spring (left) before trees have leaves, and paths in summer (right) when trees have leaves and farmland is considered as an obstacle.



Kuva 8. Esimerkkireittejä: Vasemmalla on alueen kustannuspinta ja oikealla korkeusmalli. Katkoviivalla kuvattu reitti on laskettu pelkän kustannuspinnan perusteella ja yhtenäisellä viivalla kuvattu reitti sekä kustannuspinnan että korkeusmallin perusteella.

Figure 8. Example paths: the cost surface (left) and elevation model (right) of the corresponding area. Dashed lines indicate paths calculated based on the cost surface. Solid lines indicate paths calculated based on the cost surface and elevation model.

Tulosten tarkastelu

Tutkimuksemme tuotti vastaukset kaikkiin tutkimuskysymyksiimme. Pystyimme tarkentamaan maaston luokittelua aiempiin tutkimuksiin verrat-

tuna ja tuottamaan kustannusarvot eri maastoluokille. Yhteneväisyydet aiempien tutkimusten tuloksiin olivat selvät. Kun vertasimme AHP-menetelmällä tuotettuja miellyttävyysarvoja Antikaisen

(2009) tuloksiin, havaitsimme maastoluokkien järjestyksen pysyneen lähes samana.

Tuotimme kustannusarvot AHP-menetelmällä selvitetystä miellyttävyydsarvoista. Niinpä kyselylomakkeita laadittaessa piti pyrkiä siihen, että kysymykset soveltuivat mielekkäällä tavalla asiantuntijoiden todellisten näkemysten kuvaamiseen. Tulostemme perusteella asiantuntijoiden vastaukset kuvastivat heidän mielipiteitään hyvin. Vastauksista oli helppo nähdä johdonmukaisia yhtäläisyyksiä siinä, mitkä maastoluokat arvioitiin miellyttävimmiksi ja mitkä vaikeimmiksi. Aineistossa luonnollisesti näkyi myös henkilökohtaisen mieltymysten vaikutus.

Saimme käyttökelpoisia vastauksia eri sarjoihin 15–20 kappaletta. Vastaajien joukko oli pieni, mutta arvelemme sen edustavan suomalaisten metsäsuunnittelijoiden näkemyksiä varsin luotettavasti. Perustelemme arviotamme vastausten keskinäisellä yhteneväisyydellä ja samankaltaisuudella Antikaisen (2009) tulosten kanssa. Tulokset ovat arviomme mukaan yleistyskelpoisia Suomen eri osissa, sillä alueelliset erot vastauksissa jäivät pieniksi.

Tutkimuksessa saimme selville kaltevuuden vaikutuksen kulkemisen miellyttävyyteen. Havaitsimme, että miellyttävyyttä on mahdollista kuvata kulkunopeuden avulla.

Kustannuspinnan muodostamisessa käytimme samankaltaista menetelmää kuin Tapanainen (2010). Käsittelimme aineistoa kuitenkin vektorimuodossa ja muunsimme sen rasterimuotoon vasta kustannuspinnan käsittelyn loppuvaiheessa. Lopulliseen kustannuspintaan saattoi tulla virheitä kustannusarvot yhdistävästä laskentaketjusta. Virheen arvioiminen ilman maastotestausta on vaikeaa.

Kustannuspinnan perustella optimoitujen reitien laatu riippuu käytettyjen aineistojen sekä kustannusarvojen oikeellisuudesta. Paikkatietoaineistossa voi olla virheitä sekä sijainti- että ominaisuustiedossa, eivätkä aluemaisten kohteiden rajat ole välttämättä selkeitä (O'Sullivan & Rawlin 2010). Aineistoissamme tämä pätee sekä maastotietokantaan että metsävaratietokantaan. Luonnossa rajat ovat tyypillisesti epäselviä ja maastoluokat sulautuvat toisiinsa vaiheittain. Ihmisten tekemät kohteet, esimerkiksi tiet, taas ovat usein selvärajaisia. Reitinoptimoinnin näkökulmasta etenkin metsävaratietokannan ominaisuustiedon tarkkuus on tärkeää, sillä suuri osa kustannusarvosta muodostuu kohteen puustosta. Kirsi VIRRANTAUJA ja Eevaliina LAINE (2003) ovat havainneet, että korkeuskäyristä interpoloitu malli ja siitä tuotettu kaltevuustieto tasoittavat maastoa liikaa. Arvelemme, että laserkeilauksen perusteella tuotetusta korkeusmallista johdettu kaltevuusdata on laadultaan pa-

rempaa. Maanmittauslaitoksen tietojen perusteella uusi menetelmä on parantanut korkeustiedon tarkkuutta kahdesta metristä 0,3 metriin (Korkeusmalli 10 m 2011; Korkeusmalli 2 m 2011).

Johtopäätökset

Muodostimme tutkimuksessaamme kustannuspinnan, jota voidaan käyttää metsäsuunnittelijan työhön liittyvissä reittianalyysissä. Kustannusarvot ovat mahdollisesti sovellettavissa myös muuhun maastossa liikkumiseen. Arvoja on kuitenkin tarpeen muuttaa, mikäli käytettävissä oleva aineisto on erilainen tai oletetaan, että liikkujan arvostukset ja motiivit poikkeavat metsäsuunnittelijoiden vastaavista. Tutkimuksemme kustannusarvot eivät sovi esimerkiksi virkistyskäyttöön liittyviin soveluksiin, sillä virkistyskäyttäjien arvostamia esteettisiä vaikutelmia ei ole otettu huomioon. Esimerkiksi metsäsuunnittelijoille mieluisat alueet ja pienet taimikot ovat virkistyskäyttäjien mielestä varttuneita metsiä epämiellyttävämpiä (Karjalainen 2002). Absoluuttisia kustannusarvoja tärkeämpää onkin, että vastaavaa menetelmää voidaan hyödyntää muuttuvissa tilanteissa. Asianmukainen kustannuspinta muodostetaan luokittelemalla maastoanalyysin käyttötarpeen mukaisesti luokkiin, laskemalla niille miellyttävyydsarvot valittujen asiantuntijoiden mielipiteiden mukaan ja yhdistämällä ne kustannuspinnaksi. Maaston luokittelussa tulee huomioida käytettävissä oleva paikkatietoaineisto.

Arvioimme, että tutkimuksemme tuloksia voidaan hyödyntää metsävaratiedon keruuseen liittyvän maastotyön suunnittelussa. Kustannuspinnan käyttöä reitinoptimoinnissa tulisi kuitenkin vielä testata todellisissa työskentelytilanteissa. Käytännön sovelluksissa reitinoptimoinnin hyödyntäjälle pitäisi antaa mahdollisuus vaikuttaa kustannusarvoihin ennen optimointia, jolloin myös henkilökohtaiset näkemykset vaikuttaisivat tuloksiin. Tällöin esittämämme kustannusarvot toimisivat lähitöarvoina, joita metsäsuunnittelijat voisivat muokata haluamaansa suuntaan. Reitinoptimoinnin käyttö saattaisi tällöin tehostaa työskentelyä ja alentaa metsävaratiedon keruun kustannuksia.

KIRJALLISUUS

- Antikainen, H. (2009). Terrain path optimization using the connectivity graph approach applied to GIS data structures. *Nordia Geographical Publications* 38: 3. 98 s.
- Atkinson, D., P. Deadman, D. Dudycha, & S. Traynor (2005). Multi-criteria evaluation and least cost path analysis for an arctic all-weather road. *Applied Geography* 25: 4, 287–307.
- Bagli, S., D. Geneletti & F. Orsi (2011). Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts. *Environmental Impact Assessment Review* 31: 3, 234–239.
- Balström, T. (2002). On identifying the most time-saving walking route in a trackless mountainous terrain. *Geografisk Tidsskrift* 102: 1, 51–58.
- Birkel, P. (2003). Terrain trafficability in modelling and simulation. Technical Paper SEDRIS 2003-1. 28.11.2010. <www.sedris.org>
- Collischon, W. & J. Pilar (2000). A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals. *International Journal of Geographical Information Science* 14: 4, 397–406.
- Digiroad (2011). Liikennevirasto, Helsinki. 27.4.2011. <www.digiroad.fi>
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1: 1, 269–271.
- Elias, B. (2007). Pedestrian navigation – creating a tailored geodatabase for routing. Proceedings of the 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 22.3.2007, Hannover, 41–47. 28.11.2010. <www.ikg.uni-hannover.de>
- ESRI (2002). What is ArcGIS™? ESRI, Redlands, 22.8.2011. <www.esri.com>
- Feldman, S., R. Pelletier, E. Walser, J. Smoot & D. Ahl (1995). A prototype for pipeline routing using remotely sensed data and geographic information system analysis. *Remote Sensing of Environment* 53: 2, 123–131.
- Gaisbauer, C. & A. Frank (2008). Wayfinding model for pedestrian navigation. 28.11.2010. <plone.itc.nl>
- González, J. R., O. Kolehmainen & T. Pukkala (2007). Using expert knowledge to model forest stand vulnerability to fire. *Computers and Electronics in Agriculture* 55: 2, 107–114.
- Imhof, E. (1950). *Gelände und Karte*. 255 s. Rentsch, Zürich.
- Jönsson, M. (2003). An optimal pathfinder for vehicles in real-world terrain maps. Julkaisematon päättötyö. 41 s. The Royal Institute of Science, School of Engineering Physics, Stockholm.
- Kangas, J., J. Karsikko, L. Laasonen & T. Pukkala (1993). A method for estimating the suitability function of wildlife habitat for forest planning on the basis of expertise. *Silva Fennica* 27: 4, 259–268.
- Karjalainen, E. (2002). Ulkoilijoiden metsämaiseman arvostukset. *Teoksessa* Lyytikäinen, S. (toim.): Luonnon monimuotoisuus, maisema ja virkistysarvot ulkoilumetsien hoidossa. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 846, 23–30.
- Korkeusmalli 2 m (2011). Maanmittauslaitos, Helsinki. 27.8.2011 <www.maanmittauslaitos.fi>
- Korkeusmalli 10 m (2011). Maanmittauslaitos, Helsinki. 27.8.2011 <www.maanmittauslaitos.fi>
- Lacaze, A., Y. Moscovitz, N. DeClaric & K. Murphy (1998). Path planning for autonomous vehicles driving over rough terrain. Proceedings of the IEE ISIC/CIRA/ISAS joint conference, 14.–17.9.1998, Gaithersburg, 50–55. 28.11.2010. <www.isd.mel.nist.gov>
- Longley, P. A., M. F. Goodchild, D. J. Maguire & D. W. Rhind (2005). *Geographic information systems and science*. 2. p. 517 s. John Wiley & Sons, Chichester.
- Maastotietokanta (2011). Maanmittauslaitos, Helsinki. 27.4.2011 <www.maanmittauslaitos.fi>
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. 392 s. Wiley, New York.
- Miller, H. & S.-L. Shaw (2001). *Geographic information systems for transportation*. 458 s. Oxford University Press, New York.
- O’Sullivan, D. & D. J. Unwin (2010). *Geographical information analysis*. 2. p. 405 s. John Wiley & Sons, Hoboken.
- Orava, E. (1999). Maastoanalyysi sotilaskäyttöön. Julkaisematon diplomityö. 63 s. Maanmittaustieteiden laitos, Teknillinen korkeakoulu.
- Rees, W. (2004). Least-cost paths in mountainous terrain. *Computers & Geosciences* 30: 3, 203–209.
- Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process*. 287 s. McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T. (2001). Fundamentals of the analytic hierarchy process. *Teoksessa* Schmoltdt, D., J. Kangas, G. Mendoza & M. Pesonen (toim.): *The analytic hierarchy process in natural resource and environmental decision making*, 15–35. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- SLICES Maankäyttö (2011). Maanmittauslaitos, Helsinki. 27.4.2011 <www.maanmittauslaitos.fi>
- Store, R. & H. Antikainen (2010). Using GIS-based multicriteria evaluation and path optimization for effective forest field inventory. *Computers, Environment and Urban Systems* 34: 2, 153–161.
- Suvinen, A., M. Saarilahti & T. Tokola (2003). Terrain mobility model and determination of optimal off-road route. *Teoksessa* VIRRANTAU, K & H. TVEITE (toim.): *ScanGIS’2003*, 251–259. Institute of Cartography and Geoinformatics, Helsinki University of Technology.
- Suvinen, A. (2006). A GIS-based simulation model for terrain tractability. *Journal of Terramechanics* 43: 4, 427–449.
- Tapanainen, T. (2010). Luonnossaliikkujan kulkukelpoisuusanalyysin parantaminen tarjoilla maastotiedoilla. Julkaisematon pro gradu -tutkielma. 68 s. Maantieteen laitos, Helsingin yliopisto.
- Tobler, W. (1993). Three presentations on geographical analysis and modeling. National Center for Geographical Information and Analysis. Technical Report 93-1. 13.3.2010. <www.ncgia.ucsb.edu>
- VIRRANTAU, K & E. LAINE (2003). Paikkatietojen epävarmuus – esimerkkinä sotilaallisen maastoanalyysin lähtöaineistot. *Terra* 115: 3, 192–207.

- Xiang, W.-N. (1996). A GIS based method for trail alignment planning. *Landscape and Urban Planning* 35: 1, 11–23.
- Yu, C., J. Lee & M. Munro-Stasiuk (2003). Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning. *International Journal of Geographical Information Science* 17: 4, 361–376.