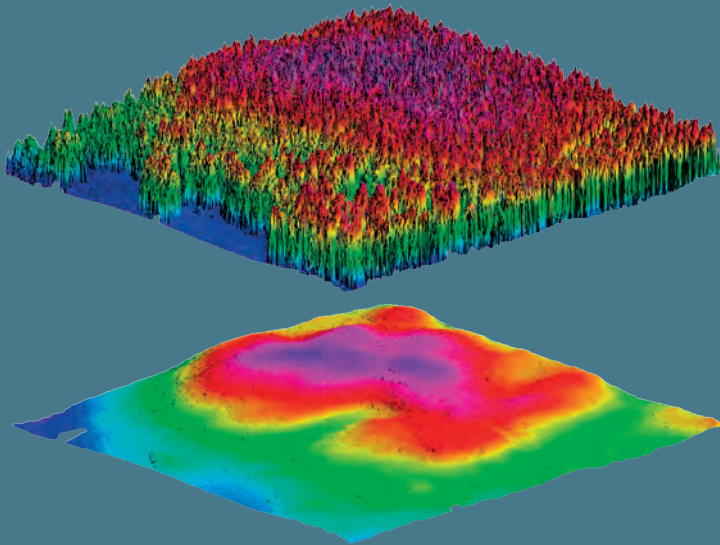




Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 7

# **GEOINFORMATIIKKA LUONNONVAROJEN HALLINNASSA**



**Markus Holopainen, Timo Tokola, Mikko Vastaranta, Juho Heikkilä,  
Hanna Huitu, Risto Laamanen & Petteri Alho**



# Geoinformatiikka luonnonvarojen hallinnassa

Markus Holopainen, Timo Tokola, Mikko Vastaranta, Juho Heikkilä,  
Hanna Huitu, Risto Laamanen & Petteri Alho

Holopainen, M., Tokola, T., Vastaranta, M., Heikkilä, J., Huitu, H., Laamanen, R. & Alho, P. 2015. Geoinformatiikka luonnonvarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 7: 1–152.

Julkaisija – Publisher: Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos – University of Helsinki  
Department of Forest Sciences

ISBN: 978-952-10-4525-7

ISSN: 1799-313X

Kannen kuva: Ville Kankare

Taitto: Kari Minkkinen

Paino: KopioNiini Oy 2015

© Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos ja tekijät

# Sisällysluettelo

Alkusanat .....	7
-----------------	---

## OSA 1 — PAIKKATIEDON HANKINTA, HALLINTA JA ANALYSOINTI

<b>1 Johdanto.....</b>	<b>9</b>
1.1 Geoinformatiikka .....	9
1.2 Paikkatietoteknologian ajankohtaiset trendit .....	9
1.3 Geoinformatiikka, luonnonvarojen hallinta ja vihreä talous.....	12
<b>2 Paikkatieto ja sen esittäminen .....</b>	<b>13</b>
2.1 Paikkatieto- ja metsätietojärjestelmä.....	13
2.2 Vektori- ja rasterimuotoinen aineisto .....	14
2.3 Rasterimuotoisen aineiston resoluutio .....	16
2.4 Sijainti- ja ominaisuustieto, karttatasot, topologia .....	17
2.5 Tietokanta .....	18
2.6 2D–3D–4D .....	20
<b>3 Karttaprojektiot ja koordinaattijärjestelmät.....</b>	<b>21</b>
3.1 Karttaprojektiot .....	21
3.2 Maantieteelliset koordinaatistot.....	25
3.3 Suomen tasokoordinaatistot.....	25
<b>4 Satelliittipaikannus .....</b>	<b>29</b>
4.1 Satelliittipaikannusjärjestelmät: GPS, GNSS .....	29
4.2 GPS-mittausten tarkentaminen .....	30
4.3 GLONASS ja GALILEO.....	30
<b>5 Paikkatiedon hankinta.....</b>	<b>33</b>
5.1 Olemassa olevat GIS-aineistot.....	33
5.2 Kaukokartoitus.....	34
5.2.1 Kaukokartoituksen perusteita .....	34
5.2.2 Numeeriset ilmakuvat .....	34
5.2.3 Optisen aallonpituusalueen satelliittikuvat .....	35
5.2.4 SAR-tutkakuvat .....	37
5.2.5 3D-kaukokartoitus - laserkeilaus.....	37
5.2.6 3D-kaukokartoitus - Ilma- ja satelliittikuvat .....	39
5.2.7 Kaukokartoituksen hyödyntäminen Suomen metsätaloudessa .....	41

<b>5.3 Maastomittaukset</b> .....	<b>46</b>
5.3.1 <i>Maastomittausten tarpeellisuus ja haasteet</i> .....	46
5.3.2 <i>Uudistuneet mittaustarpeet</i> .....	47
5.3.3 <i>Laser- ja kameratekniikkaan perustuvien menetelmien kehittäminen</i> .....	47
5.3.4 <i>Laserkeilaus metsän sisältä maastolaserkeilaimella</i> .....	48
5.3.5 <i>Metsien maastomittausten tulevaisuus</i> .....	48
<b>6 Paikkatiedon hallinta ja analysointi</b> .....	<b>51</b>
<b>6.1 Spatiaalisen analyysin perusteita</b> .....	<b>51</b>
6.1.1 <i>Vektorianalyysi</i> .....	51
6.1.2 <i>Rasterianalyysi</i> .....	51
6.1.3 <i>Spatiaalisen aineiston tilajärjestys</i> .....	53
6.1.4 <i>Topologian käyttö</i> .....	53
6.1.5 <i>Tiedon yleistäminen ja luokittelu</i> .....	54
6.1.6 <i>Pinta-alan, pituuden ja etäisyyden laskenta</i> .....	56
<b>6.2 Tietokantahaut</b> .....	<b>56</b>
6.2.1 <i>SQL-kyselykieli</i> .....	56
6.2.2 <i>Tietotyypit, funktiot ja hakupredikaatit</i> .....	59
<b>6.3 Leikkausanalyysit</b> .....	<b>60</b>
6.3.1 <i>Johdanto</i> .....	60
6.3.2 <i>Vektoriaineistojen leikkausanalyysi</i> .....	60
6.3.3 <i>Rasteriaineistojen leikkausanalyysi</i> .....	61
<b>6.4 Vaikutusalueanalyysit</b> .....	<b>63</b>
<b>7 Interpolointi</b> .....	<b>67</b>
7.1 <i>Johdanto</i> .....	67
7.2 <i>Deterministiset menetelmät</i> .....	68
7.3 <i>Geostatistiset menetelmät</i> .....	73
<b>8 Korkeusmalli</b> .....	<b>81</b>
8.1 <i>Korkeusmallin laadinta</i> .....	81
8.2 <i>Korkeusmallista laskettavat tunnuks</i> .....	83
<b>9 Näkyvyys ja maisema-analyysi</b> .....	<b>87</b>
9.1 <i>Johdanto</i> .....	87
9.2 <i>Maiseman huomioiminen metsäsuunnittelussa</i> .....	88
9.3 <i>Maisematason spatiaaliset tunnusluvut</i> .....	91
<b>10 Spatiaalinen mallinnus</b> .....	<b>93</b>
10.1 <i>Johdanto</i> .....	93
10.2 <i>Kartografisen mallinnuksen esimerkki</i> .....	94
10.3 <i>Kartografinen mallinnus ja elinympäristöjen sopivuuden arviointi</i> .....	99

<b>11 Kustannuspinta-analyysi .....</b>	<b>101</b>
11.1 Johdanto .....	101
11.2 Edullisimman reitin etsintä kustannuspinnalta.....	101
<b>12 Muutosanalyysit .....</b>	<b>105</b>
12.1 Aikasarjat.....	105
12.2 Liikekartta .....	106
12.3 Muutoskartta .....	106
12.4 Esimerkki muutosanalyysistä – tuuli- ja lumituhojen seuranta ja riskikartoitus.....	107
12.4.1 Tuuli- ja lumituhojen seuranta .....	107
12.4.2 Tuuli- ja lumituhojen riskianalyysit.....	109
<b>13 Web-GIS, OpenGIS ja yhteisöllinen tiedon keruu.....</b>	<b>111</b>
13.1 Web-GIS.....	111
13.2 OpenGIS ja yhteiskäytön standardit .....	112
13.3 Yhteisöllinen GIS-tiedon keruu .....	113

## **OSA 2 — LUONNONVAROJEN HALLINTAAN LIITTYVIÄ PAIKKATIEOSOVELLUKSIA SUOMESSA**

<b>14 Metsätaloutteen, maataloutteen ja vesistöihin liittyviä paikkatietosovelluksia .....</b>	<b>115</b>
<b>14.1 Paikkatiedot Metsähallituksen metsätalouden liiketoiminnassa .....</b>	<b>115</b>
14.1.1 Metsähallituksen metsätalous.....	115
14.1.2 Paikkatiedot liiketoiminnan perustietoa.....	115
14.1.3 Toimenpidesuunnittelu.....	116
14.1.4 Toimenpidesuunnittelu laserkeilausaineistolla.....	116
14.1.5 Luonnonvarasuunnittelu.....	118
14.1.6 Metsävaratiedon ylläpito.....	119
14.1.7 SutiGis- järjestelmästä .....	119
14.1.8 Lähiajan tavoitteita uuden paikkatietojärjestelmän kehittämiseksi.....	120
<b>14.2 Metsävaratietojen keruu ja ajantasaistus yksityismetsistä .....</b>	<b>121</b>
14.2.1 Yleistä .....	121
14.2.2 Kaukokartoituksen hyödyntäminen.....	121
14.2.3 Maastokoealat .....	122
14.2.4 Puustotulkinta ja kuviointi .....	124
14.2.5 Kohdennettu maastoinventointi ja metsävaratietojen laskenta.....	127
14.2.6 Laadunvarmistus .....	128
14.2.7 Metsävaratietojen julkaisu .....	130

<b>14.3 Paikkatietosovellukset maatalouden täsmäviljelyssä .....</b>	<b>130</b>
14.3.1 Viljely paikkatiedon sovelluskohteena .....	130
14.3.2 Paikkatiedon hankinta täsmäviljelyyn .....	131
14.3.3 Paikkatiedon hallinta ja analyysi .....	132
<b>14.4 Maa- ja metsätalouden vesistövaikutukset .....</b>	<b>133</b>
14.4.1 Maa- ja metsätalous hajakuormituksen aiheuttajana .....	133
14.4.2 Potentiaalisten hajakuormituslähteiden kartoittaminen .....	134
14.4.3 Korkeusmalliin perustuva kulkeutumisen ja kulkeutumisriskin mallintaminen .....	135
14.4.4 Koejärjestelyiden avulla hankittava mittaustieto kuormituksesta .....	135
14.4.5 Esimerkkejä paikkatiedon käytöstä huuhtoutuma- ja kuormitusmalleissa.....	136
14.4.6 Visualisointi .....	138
<b>14.5 Tulvat, tulvariskit ja jokidynamiikka.....</b>	<b>139</b>
14.5.1 Johdanto .....	139
14.5.2 Jokiympäristön topografia-aineiston kerääminen .....	139
14.5.3 EU:n tulvadirektiivi ja tulvakarttatuotanto Suomessa .....	140
<b>Lähteet .....</b>	<b>147</b>

## Alkusanat

Luonnonvarojen hallinnalla tarkoitetaan esimerkiksi metsiin, peltoihin ja vesistöihin liittyvän paikkatiedon hankintaa sekä tiedon hyödyntämistä erilaisissa inventointi-, kartoitus-, suunnittelu- ja päätöstukijärjestelmissä. Voidaan sanoa, että paikkatieto on monella tapaa luonnonvarojen hallinnan keskiössä. Mitä tarkempaa tietoa meillä on sitä järkevämpiä päätöksiä pystymme tekemään riippumatta siitä, tarkastellaanko tilannetta taloudellisesta, ekologisesta tai sosiaalisesta näkökulmasta.

Paikkatietojärjestelmien lähtökohtana ovat olleet karttatietojärjestelmät, joiden keskeinen toiminto on 2-ulotteisten (2D) karttojen tuotanto. Viimeisen reilun kymmenen vuoden aikana yksityiskohtainen kaukokartoitus, eli lentolaserkeilaus ja ilmapokuvaus, on mahdollistanut teknologiaharppauksen yksityiskohtaisen paikkatiedon tuottamisessa. Kohteesta voidaan tuottaa kustannustehokkaasti geometrisesti tarkkaa 3D (x,y,z) –tietoa. Tulevaisuudessa uusien menetelmien sovellusmahdollisuudet tulevat lisääntymään, kun kaiken aikaa tarkempia 3D-aineistoja on mahdollista saada samoilta alueilta useammalta ajankohdalta (t), jolloin on kyse 4D-geoinformatiikasta (x,y,z,t).

Metsät ovat Suomen keskeisen luonnonvara. Metsätalous onkin ollut paikkatiedon suurtuottaja ja –kuluttaja jo pitkään. Metsäorganisaatioissa on myös tehty arvokasta pioneerityötä kartta- ja paikkatietojärjestelmien käyttöönotossa ja hyödyntämisessä aina 1990-luvulta lähtien. Näin ollen kirjamme lähtökohta on metsävarojen hallintaan liittyvät paikkatietoaineistot ja paikkatietoanalyysit. Vastaavia aineistoja ja analyysimenetelmiä voidaan kuitenkin hyödyntää myös muiden luonnonvarojen, kuten peltojen ja vesistöjen hallinnassa.

Kirja jakautuu kahteen osaan: ensimmäisessä osassa käydään läpi yksityiskohtaisesti paikkatiedon hankinta-, hallinta- ja analysointimenetelmät. Toisessa osassa esitellään luonnonvarojen hallintaan liittyviä paikkatietosovelluksia Suomessa. Kirjan lähtökohtana on osittain käytetty alla lueteltuja oppikirjoja ja kurssimateriaaleja. Kiitämme kaikkia aiempiin versioihin osallistuneita.

Helsinki, Joensuu, Vantaa ja Turku, tammikuu 2015

*Markus Holopainen, Timo Tokola, Mikko Vastaranta, Juho Heikkilä, Hanna Huitu, Risto Laamanen & Petteri Alho*

### Aiemmin julkaistut kurssimateriaalit

Holopainen, M., Tokola, T., Vastaranta, M., Laamanen R. & Huitu, H. 2012. Geoinformatiikka 1. Opetusmateriaalia GIS101-kurssille. Helsingin yliopisto, metsätieteiden laitos.

Holopainen, M., Tokola, T., Vastaranta, M., Huitu, H., Heikkilä, J. & Alho, P. 2013. Geoinformatiikka 2. Opetusmateriaalia GIS102-kurssille. Helsingin yliopisto, metsätieteiden laitos.

Tokola, T., Soimasuo, J., Turkia, A., Talkkari, A., Store, R. & Uuttera, J. 2000. Metsät paikkatietojärjestelmissä. *Silva Carelica* 33.

Tokola, T. & Kalliovirta, J. 2003. Paikkatietoanalyysi. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 34.



## OSA 1

# Paikkatiedon hankinta, hallinta ja analysointi

## 1 Johdanto

### 1.1 Geoinformatiikka

*Geoinformatiikalla* tarkoitetaan paikkaan sidottua tietoa, jota hallitaan ja analysoidaan paikkatietojärjestelmien (geographic information systems (GIS)) avulla. Geoinformatiikan synonyyminä tai lyhenteenä on yleistynyt käsite *geomatiikka*. Paikkatieto on nykyisin lähes täysin digitaalisessa muodossa, joten erilaisten tieto- ja tietoliikennetekniikan menetelmien hyödyntäminen on tieteenalalla keskeisellä sijalla. Mikäli halutaan korostaa geoinformatiikan kartoitukseen liittyvää ulottuvuutta, puhutaan *kartografiasta*, nykyisin numeerisesta tai *tietokoneavusteisesta kartografiasta*. Geoinformatiikka on nykyisin osa lähes jokaisen ihmisen elämää. Miljoonat ihmiset hyödyntävät päivittäin erilaisia satelliittipaikannukseen liittyviä navigointisovelluksia tai käyttävät monenlaisia verkkopalveluita, joiden pohjana on paikkatietosovellus (esim. Google Maps).

GIS -lyhenteelle on annettu myös toinen, paljon laajempi merkitys kuin työkaluun tai ohjelmistoon viittaava paikkatietojärjestelmä. *Geographic information science (GIS)* (mm. Goodchild 1990) korostaa geoinformatiikkaa tieteenalana. Kyseinen yläkäsite sisältää paikkatiedon hankinta-, hallinta- ja analyysimenetelmien lisäksi myös sekä geocomputation ja spatial computation –käsitteet, jotka on suomennettu *spatiaalilaskennaksi*. Spatiaalilaskennan menetelmälajeita ovat mm. spatiaaliset asiantuntijajärjestelmät, neurolaskenta, sumea mallinnus, geneettiset algoritmit ja tiedon louhinta. Kyseisiä menetelmiä voidaan tilastotie-

teen ohella käyttää spatiaalisessa mallinnuksessa, jota hyödynnetään esimerkiksi ympäristöön liittyvien monimutkaisten vuorovaikutussuhteiden seurannassa sekä erilaisten ilmiöiden kehityksen ennustamisessa ja visualisoinnissa. Geographic information science –käsitteelle ei ole suoraa suomenkielistä vastinetta, mutta tästä eteenpäin kun puhumme geoinformatiikasta, tarkoitamme tätä yläkäsitettä, josta käytämme lyhenteenä *GIS*.

Geoinformatiikan keskeinen lähtökohta on paikkatiedon hankinta erilaisilla menetelmillä. Keskeiset paikkatiedon hankintamenetelmät ovat maastossa tehtävät mittaukset ja kaukokartoitus, jota tehdään yleensä lentokoneesta tai satelliiteista. Paikkatiedon hankinnassa hyödynnetään geodeettisia ja fotogrammetrisia menetelmiä. Geodesialla tarkoitetaan mittauksia, joilla kohteille määritetään sijainti jossakin koordinaattijärjestelmässä. Teoreettisessa geodesiassa määritetään maapallon kokoa ja muotoa. Fotogrammetrialla puolestaan tarkoitetaan kaukokartoitusaineistoista tapahtuvia kuvamittauksia. Geodesiaa, fotogrammetriaa ja kartografiaa käsitellään tarkemmin luvussa 3.

### 1.2 Paikkatietoteknologian ajankohtaiset trendit

Tässä kirjassa keskitytään paitsi paikkatiedon esittämisen, hallinnan ja analyysin perusteisiin myös alan ajankohtaisiin kehitysnäkymiin, eli trendeihin. Viime vuosina alan keskeisiä trendejä ovat olleet mm. eri tietolähteiden ja

tietokantojen yhdistäminen, korkean resoluution rasteriaineistojen lisääntyminen, 3D (4D) –tiedon hyödyntäminen, satelliittipaikannuksen lisääntyvä merkitys, paikkatietoaineistojen ja -ohjelmistojen vapaa saatavuus, verkkopohjaiset GIS-sovellukset (web-GIS) sekä tietostandardien (esim. paikkatietoinfrastruktuuri) kehittyminen.

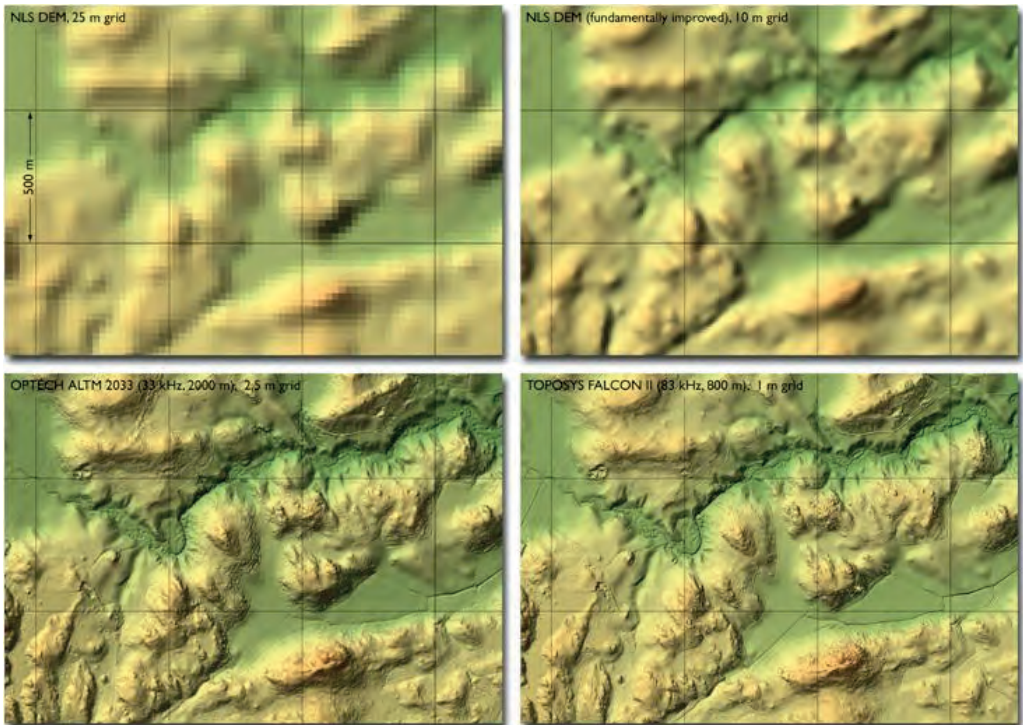
Eri tietolähteiden yhdistäminen: Kehittyneissä maissa paikkatietoa on tarjolla kaiken aikaa enemmän. Näin ollen esimerkiksi metsävaroja inventoitaessa kyse ei yleensä ole ensikertaisesta inventoinnista, vaan ollaan kiinnostuneita nimenomaan metsiin liittyvistä muutoksista (esimerkiksi puuston kasvu, hakkuut, metsätuhot). Muutostulkinnassa voidaan hyödyntää maastossa tapahtuvien mittausten lisäksi esimerkiksi erilaisten kaukokartoitusaineistojen tulkintaa sekä puuston kehitykseen liittyviä malleja. Yhdistämällä eri lähteistä ja eri menetelmillä kerättyä tietoa voidaan metsien inventointia tai kartoitusta tehostaa ja tarkentaa. Kyse on tällöin esimerkiksi monilähdeinventoinnista, jossa voidaan yhdistää maastomittauksia ja kaukokartoitustulkintaa ja saada näin kustannustehokkaasti inventointituloksia kaikilla mittakaavatasoilla.

Paikkatietoinfrastruktuuri on yhteiskunnan tietoinfrastruktuuri, joka liittyy toisiinsa paikkatietojärjestelmiä. Paikkatietoinfrastruktuuriin liittyy palveluita, joiden kautta paikkatietoa voi etsiä, katsella, käyttää ja ladata. INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) on EU:n vuonna 2007 asettama direktiivi, joka määrittelee EU:n paikkatietoinfrastruktuurin. Direktiivi otettiin Suomessa käyttöön vuonna 2009, jolloin tuli voimaan laki paikkatietoinfrastruktuurista. INSPIRE:n keskeinen idea on valtion hallintojen keräämien paikkatietoaineistojen vapaa (ilmainen) jakaminen kaikille tietoa tarvitseville. Tällä menettelyllä uskotaan olevan piristävä vaikutus paikkatietoon liittyvässä yritystoiminnassa sekä kehitettäessä uusia, paikkatietoratkaisuihin perustuvia arvoketjuja. Näin EU haluaa myös vastata mm. USA:n asettamaan haasteeseen, sillä Yhdysvalloissa vastaavaa menettelyä on toteutettu jo 1990-luvun loppupuolelta lähtien.

Kaukokartoitusmenetelmien kehittyminen: Viimeisen reilun kymmenen vuoden aikana rasteriaineistojen hyödyntäminen paikkatietojärjestelmissä ja paikkatietoanalyyseissä on kasvanut räjähdysmäisesti. Syynä tähän on toisaalta ollut tietojenkäsittelyn nopeutuminen, mutta myös aineistojen parantunut tarkkuus ja saatavuus. Etenkin kaukokartoitusaineistojen spatiaalinen resoluutio (kuinka pieniä kohteita kovalta voidaan erottaa) on parantunut merkittävästi. Nykyisin satelliittikuvista on saatavissa vastaavaa spatiaalista resoluutiota kuin aiemmin oli mahdollista vain lentokoneesta tapahtuvan kaukokartoituksen avulla. Spatiaalisen resoluution parantumisen lisäksi viime vuosien trendinä on ollut aktiivisen kaukokartoituksen (tutkakuvauus ja laserkeilaus) nopea kehittyminen. Näiden menetelmien avulla on päästy 2-ulotteisen (2D) tiedon tuottamisesta 3D-tietoon. Tämä puolestaan on tarkentanut esimerkiksi puustotunnusten estimointitarkkuutta metsävarojen inventoinnissa, mikä puolestaan mahdollistaa kalliiden maastossa tehtävien mittausten osittaisen korvaamisen kaukokartoituksella hankitulla tiedolla (kaukokartoitus, kts. luku 5.2)

Paikkatietojärjestelmien lähtökohtana ovat aikanaan olleet karttatietojärjestelmät, joiden keskeinen toiminto on 2-ulotteisten (2D) karttojen tuotanto. Viimeisen reilun kymmenen vuoden aikana lentolaserkeilaus on mahdollistanut teknologiaharppauksen yksityiskohtaisessa paikkatiedon hankinnassa. Laserkeilauksen avulla kohteesta voidaan tuottaa kustannustehokkaasti geometrisesti tarkkaa 3D (x,y,z) –tietoa. Tulevaisuudessa uusien menetelmien sovellusmahdollisuudet tulevat lisääntymään, kun kaiken aikaa tarkempia 3D-aineistoja on mahdollista saada samoilta alueilta useammalta ajankohdalta (t), jolloin on kyse 4D-geoinformatiikasta (x,y,z,t). Aikaulottuvuus käsittää kohteen historiatiedon sekä mallien ja simuloinnin avulla saatavat tulevaisuuden ennusteet.

Suomi on edelläkävijämaita laserkeilauksen hyödyntämisessä operatiivisessa maanmittauksessa ja metsätaloudessa. Maamme laserkeilataan kokonaisuudessaan kuluvan



Kuva 1.1. Esimerkki erilaisten korkeusmallien tarkkuudesta. Maanmittauslaitoksen vanhat, ilmakuvatulkiintaan perustuvat korkeusmallit (yllä) verrattuna lentolaserkeilauksen avulla tuotettuihin korkeusmalleihin (alla). Kuva Juha Oksanen, Maanmittauslaitos.

vuosikymmenen aikana: Maanmittauslaitos (MML) vetää laserkeilaukseen perustuvaa valtakunnallista korkeusmallihanketta (kuva 1.1) ja metsäsuunnittelussa ollaan parhaillaan siirtymässä laserkeilaukseen ja ilmakuvaukseen perustuvaan inventointimenetelmään. Voidaan sanoa, että laserkeilaukseen perustuva 3D-tiedon tuottaminen ja hyödyntäminen on tällä hetkellä merkittävin metsä- ja maankäyttötieteiden rajapinta niin tutkimuksessa kuin operatiivisessa toiminnassa. Laserkeilaukseen perustuvien metsäsuunnitteluinventointien yleistyessä suomalaisessa metsätaloudessa tullaan saavuttamaan miljoonien eurojen vuosittaisia kustannussäästöjä. Vastaavia säästöjä on tiedossa myös MML:n valtakunnallisen korkeusmallihankkeen kautta.

Satelliittipaikannuksen hyödyntäminen: Satelliittipaikannuksen, lähinnä GPS-järjestelmän (GPS, Global Positioning System) kehitty-

nen 1990-luvun loppupuolelta lähtien on avannut runsaasti uusia geoinformatiikan sovellusmahdollisuuksia sekä tehostanut ja tarkentanut perinteistä kartoitusta. Satelliittipaikannuksen avulla maastossa tapahtuvaa ominaisuustiedon keräämistä on voitu tehostaa huomattavasti, kun mittaukset saadaan reaaliaikaisesti jossakin maantieteellisessä koordinaatistossa. Toisaalta satelliittipaikannusta voidaan hyödyntää esimerkiksi puunkorjuun ja -kuljetuksen logistiikassa. Maanmittauksessa on puolestaan voitu siirtyä kalliista takymetrimittauksista paljon nopeampiin ja halvempiin satelliittipaikannukseen perustuviin mittauksiin. Satelliittipaikannuksen (GPS) yksi keskeinen etu on, että se toimii globaalisti. Varsinainen satelliittipaikannuksen läpimurto on tapahtunut viimeisen kymmenen vuoden aikana, jolloin paikannus on siirtynyt ammattikäytöstä jokamiehen sovelluksiin, kuten auto- ja kännykkänavigointiin. Tämän het-

ken yhtenä keskeisenä paikkatietoalan trendinä on kehittää menetelmiä ja sovelluksia, joilla paikannetusta tiedosta voidaan saada lisäarvoa erilaisiin sovelluksiin, esimerkiksi kaupan ja liikenteen aloilla.

Geoinformatiikka arkipäiväistyy ja yhteiskäyttö helpottuu: Geoinformatiikka on nykyisin osa lähes jokaisen ihmisen arkipäivää kartta-, reitinhaku ja navigointipalveluiden kautta (kts. web-GIS –sovellukset, luku 13). Parhailtaan maailman johtavat mobiilisovellusten kehittäjät, kuten Google, Apple, ja joukon jatkona myös Nokia, käyvät tiukkaa taistelua paikkatietopalveluihin liittyvästä liiketoiminnasta. Toisaalta Inspire-direktiivin ansiosta valtionhallintojen keräämät mittavat paikkatietoaineistot avautuvat parhailtaan ilmaiseen yhteiskäyttöön myös Suomessa. Esimerkkinä tästä ovat Maanmittauslaitoksen (MML) paikkatietoaineistot, joiden ilmaisjakelu alkoi 1.5.2012. Uudet toimintamallit luovat toisaalta haasteita, mutta myös uusia liiketoimintamahdollisuuksia kartta- ja paikkatietoalalla toimiville yrityksille. Tiedonsiirto-standardien (esim. XML) kehittymisen myötä eri aineistoja voidaan helposti ottaa käyttöön ja yhdistää eri toimijoiden aineistoja ja mittaustietoja. Hyvänä esimerkkinä ovat hakukoneiden mittaustiedot. Koordinaattitieto on yhä useammin rekisteröity automaattisesti niin valokuviiin kuin muihinkin mittaustietoihin. Tietojen selainpohjaisten sovellusten kehittyminen ja käyttö on helpottanut paikkatiedon arkipäiväistymistä ja se on tullut luontevaksi osaksi kaikkia tietojärjestelmiä.

### **1.3 Geoinformatiikka, luonnonvarojen hallinta ja vihreä talous**

Luonnonvarojen hallinnalla tarkoitetaan esimerkiksi metsiin, peltoihin ja vesistöihin liittyvän paikkatiedon hankintaa sekä tiedon

hyödyntämistä erilaisissa inventointi-, kartointus-, suunnittelu- ja päätöstukijärjestelmissä. Vihreällä taloudella tarkoitetaan luonnonvarojen kestäväää käyttöä ekologisesta, taloudellisesta ja sosiaalisesta näkökulmasta. Metsien tapauksessa vihreän talouden voidaan katsoa olevan lähellä vakiintunutta käsitettä metsien monikäyttö, joka on ollut jo pitkään esimerkiksi Metsähallituksen toiminnan peruseräiteitä. Metsät ovat tärkein uusiutuva luonnonvaramme, joten tarkkaan ja ajantasaiseen geoinformatiikkaan perustuva metsävarojen hallinta on näin ollen myös vihreän talouden keskiössä.

Tällä hetkellä yksi metsävarojen hallinnan tutkimuksen keskeisistä tavoitteista on etsiä uusia, 3D-/4D-geoinformatiikkaan perustuvia arvoketjuja metsä- ja maankäyttötieteiden rajapinnoilta: Mitä hyötyä entistä tarkemmasta inventointitiedosta erilaisissa metsätalouden sovelluksissa on? Voidaanko puuntuotannon jalostusketjua ja sen arvoa parantaa entistä tarkemman tiedon avulla esimerkiksi lisäämällä puuston runkolukusarjan ja laatutunnusten mittaustarkkuutta? Kuinka uusia menetelmiä voitaisiin hyödyntää kaiken aikaa lisääntyvien metsätuhojen seurannassa? Entä voidaanko uusilla menetelmillä tarkentaa laajojen alueiden biomass- ja hiilitase-ennusteita? Olisiko kaiken aikaa tarkentuvasta geospaatialisesta metsävaratiedosta hyötyä myös metsien hyvinvointivaikutusten tai metsätalouden vesistövaikutusten arvioinnissa? Voidaanko metsä- ja kaupunkiympäristöihin luoda tarkkoja 3D- ja 4D-malleja, joita olisi mahdollista hyödyntää maankäyttö-, metsä- ja kaupunkisuunnittelun kaikilla mittakaavatasoilla? kirjan luvuissa 1–13 käydään läpi paikkatietoon sekä paikkatiedon hankintaan, hallintaan ja analysointiin liittyviä perusteita ottaen huomioon viime aikojen kehitystrendit. Luvussa 14 esitellään esimerkkejä nykyaikaisten geoinformatiikan menetelmien hyödyntämisestä metsä- ja maataloudessa.

## 2 Paikkatieto ja sen esittäminen

### 2.1 Paikkatieto- ja metsätietojärjestelmä

Paikkatietojärjestelmä on tietokonepohjainen järjestelmä, jolla voidaan tallentaa, hakea, käsitellä, ylläpitää, analysoida ja tulostaa paikkatietoa. Numeerinen, paikkaan sidottu mittaus- ja kartoitustieto voi perustua useista tietolähteistä peräisin olevien tietojen suhteisiin ja yhdistelmiin. Tätä paikkatietoa kerätään, hallitaan ja analysoidaan paikkatietojärjestelmillä. Suomessa metsätalouden organisaatiot ovat aktiivisesti kehittäneet ja ottaneet käyttöön paikkatietojärjestelmiä 1980-luvulta lähtien. Kehitys lähti liikkeelle kaukokartoituksen hyödyntämisestä metsien inventoinnin tukena ja sai myöhemmin jatkoa metsätalouden suunnittelun apuvälineiksi kehitetyistä karttaohjelmistoista. Suomessa yleisimmin käytössä olevia paikkatiedon käsittelyohjelmistoja ovat esimerkiksi ArcGIS, MapInfo Professional, Smallworld GIS, Tforest ja Topos.

Metsiin liittyvä päätöksenteko muuttuu kaiken aikaa yhä vaikeammaksi monien, usein vastakkaisten, tavoitteiden vuoksi. Toisaalta kaikkialla vaaditaan taloudellisesti mahdollisimman tehokasta toimintaa ja toisaalta ympäristönäkökohdat tulisi huomioida entistä paremmin. Esimerkiksi metsien sertifiointi ja luonnon monimuotoisuuden vaaliminen ovat asettaneet uusia vaatimuksia metsäsuunnittelulle sekä suunnittelun tukena oleville tietojärjestelmille. Tutkimuksessa paikkatietojärjestelmät ovat avanneet uusia mahdollisuuksia ympäristön monimutkaisten vuorovaikutussuhteiden ymmärtämiseen ja niiden mallintamiseen.

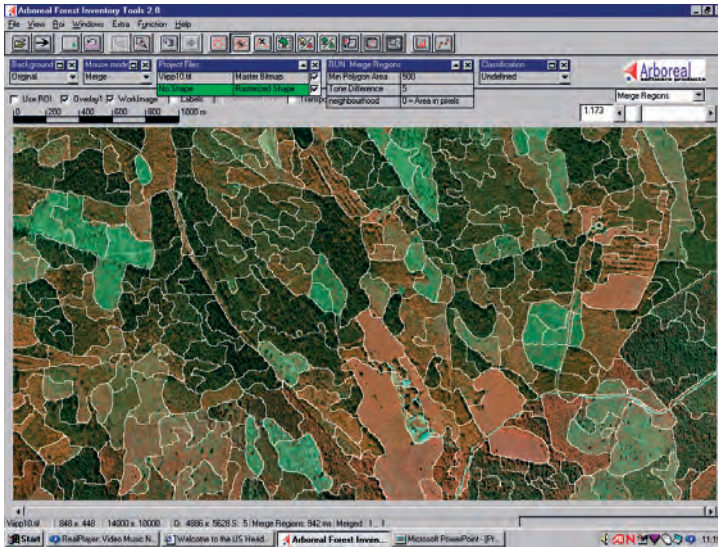
Numeerista paikkaan sidottua tietoa on Suomen metsistä runsaasti. Keskeisinä haasteina ovat kuitenkin paikkatietoaineistojen tuotantokustannukset ja laatu. Tärkeitä kysymyksiä metsätalouden paikkatietosovelluksissa ovat esim. kuinka monilähteistä, moniresoluutioista ja moniaikaista tietoa voidaan yhdistää tehokkaasti, kuinka aineistoja voitaisiin käyttää mahdollisimman laajasti ja mikä kunkin aineiston tarkkuus on.

*Metsätietojärjestelmä* on yläkäsite koko-

naisuudelle, joka sisältää inventointi-, sekä paikkatieto- ja päätöstukijärjestelmän. Inventointijärjestelmällä tuotetaan lähtötieto päätöstukijärjestelmän, eli esimerkiksi metsäsuunnittelulaskentaohjelmiston tarpeisiin. Paikkatietojärjestelmällä puolestaan hallinnoidaan, analysoidaan ja visualisoidaan usein hyvinkin laajoja metsätietojärjestelmän aineistoja; esim. Metsähallituksen kuviotietokannassa on n. 1,8 miljoonaa kuviota. Perinteisesti metsäorganisaatioiden erilaisille toiminnoille, eli esimerkiksi kiinteistöjen hallintaan ja jalostukseen, metsäsuunnitteluun ja suojelualueiden hallinnalle on ollut erilliset tietojärjestelmänsä. Uusimmissa järjestelmissä on kuitenkin ollut tavoitteena hyödyntää yhtä tietojärjestelmää organisaation kaikissa toiminnoissa, jolloin järjestelmä on käyttäjien näkökulmasta yksinkertaisempi.

Geoinformatiikan hyödyntäminen metsätaloudessa ja -tieteissä liittyy läheisesti metsäsuunnitteluun, metsien inventointiin, logistiikkaan sekä metsätietojärjestelmiin. Metsiä inventoidaan laajojen alueiden strategista suunnittelua varten sekä operatiivisen metsä- ja leimikko-suunnittelun tarpeisiin. Suomen valtakunnan metsien inventointi (VMI) on esimerkki strategiseen suunnitteluun tarkoitettusta inventoinnista. VMI:n avulla seurataan valtakunnan tasolla mm. metsämaan ja puuston määrän kehitystä, puuston kokonaiskasvun muutoksia, puustoon sitoutuneen biomassan määrää ja metsien hiilitasetta sekä suurien metsäalueiden (esimerkiksi metsäkeskus) hakkuumahdollisuuksia. Strategiseen suunnitteluun tarkoitettussa inventoinnissa tärkeitä on tiedon harhattomuus sekä se, että pienetkin ositteet eivät katoa tiedonkeruussa.

Operatiivisessa metsäsuunnittelussa hyödynnettävän kuvioittaisen arvioinnin tavoitteena on metsäalueen hakkuumahdollisuuksien, hakkuukertymän ja toimenpiteiden kartoitus. Kuvioittaisen arvioinnin perusteella laaditaan metsänomistajalle suunnitelma päätöksenteon tueksi. Metsää kuvaavan tiedon tulee olla kuvioitasolla mahdollisimman tarkkaa ja harhatonta, jotta metsänomistaja pystyy tekemään oikeita



Kuva 2.1. Metsäsuunnittelun kuviotietokanta: ilmakuvan päällä olevia kuviorajoja, jotka on tuotettu automaattisella segmentointityökalulla.

päätöksiä oikeaan aikaan. Puustotietojen lisäksi metsäsuunnittelussa tarvitaan kasvupaikkojen luokitusta metsikön puuntuotoskyvyn kuvaukseen, metsänkäsittelytoimenpiteiden valintaan sekä suojele- ja virkistysarvojen määrittämiseen. Metsiköiden puuntuotoskyky on puolestaan yksi ratkaisevista tunnuksista määrittäessä metsäkiinteistön metsätaloudellista tuottoarvoa.

Operatiivista leimikkosuunnittelua tehdään puunhankinnan ohjausta varten, jotta puunostaja saisi haluamiansa puutavaralajeja oikeaan aikaan. Tällöin tarvitaan yksityiskohtaista tietoa leimikon puutavaralajien määrästä sekä runkojen laadusta. Operatiivisessa leimikkosuunnittelussa tiedon harhattomuuden vaatimuksesta voidaan jossakin määrin tinkiä, mutta tieto metsäsuunnittelukuvion sisäisestä vaihtelusta mikrokuvio- tai jopa puutasolla olisi arvokasta. Metsäsuunnittelussa hyödynnettävän kuvioittaisen arvioinnin tarkkuus ei ole riittävä leimikkosuunnitteluun tarpeisiin, vaan se tehdään erillisenä maastointointina metsäsuunnitelman kuvioittaisen arvioinnin pohjalta.

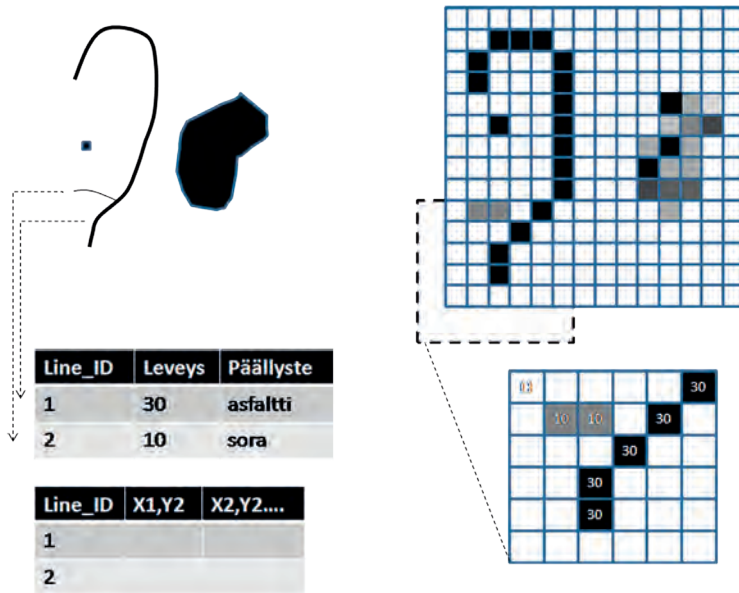
## 2.2 Vektori- ja rasterimuotoinen aineisto

Paikkatieto voidaan esittää joko rasteri- tai vektorimuodossa (Kuva 2.2). Rasterimuotoinen tieto tarkoittaa, että alue on jaettu pieniin

osa-alueisiin (pikseleihin, soluihin), joiden sijainti- ja ominaisuusarvot talletetaan muistiin. Vektorimuotoisessa esityksessä kohteet talletetaan geometrisina kokonaisuuksina (piste, viiva, alue) niiden koordinaattipisteiden avulla.

Vektorimuotoinen aineisto soveltuu parhaiten kartografisen tiedon esittämiseen. Vektorimuotoisessa esitystavassa esimerkiksi kivet tai koealat voidaan esittää pisteinä, tiet ja polut viivoina ja vaikkapa metsikkökuviot alueina (polygoneina). Vektorimuotoisen esitystavan etuna on myös, että se vaatii vähemmän tiedon varastointitilaa kuin rasterimuotoinen tieto. Toisaalta ongelmana on, että vektoriesityksen avulla ei voida kuvata alueen sisäistä vaihtelua, koska yksi alue voi saada vain yhden ominaisuustiedon arvon.

Rasteripohjaisen tiedon etuna on sen yksinkertaisuus. Kukin rasterimatriisin pikseli (solu) saa ominaisuustiedon arvon. Rasterimuotoisen esitystavan etuna on lisäksi mm. se, että alueiden sisäisestä hajonnasta saadaan tietoa. Lisäksi rasterimuotoisen tiedon leikkausanalyysit on helpompi toteuttaa kuin vektorimuotoisen tiedon, sillä useamman karttatason päällekkäiset analyysit voidaan laskea solu kerrallaan. Myös simulointimallien käyttö on rasterimuotoisella aineistolla helpompaa kuin vektorimuotoisella aineistolla. Toisaalta rasterimuotoinen esitys-



Kuva 2.2. Paikkatiedon geometria esitetään pääosin joko vektori- tai rasterimuodossa. Geometrian lisäksi paikkatiedossa on tallennettuna ja linkitettyinä ominaisuudet numeerisessa muodossa. Ominaisuustietoa voidaan myös visualisoida väreinä. Tietokannassa ja kartoissa ne on kuitenkin tallennettu numeroina.

Taulukko 2.1. Rasteri- ja vektoriaineistojen edut ja ongelmat

### Rasteriaineistot

#### Ongelmia

Korkearesoluutioiset aineistot kooltaan isoja

Rasteriaineisto tuotettu tiettyyn mittakaavaan; luotettavuus kärsii, jos tarkastellaan muissa mittakaavoissa

Kohteiden muoto vääristyy (etenkin karkeilla resoluutioilla)

#### Etuja

Yksinkertaisia / edullisia tuottaa; kaukokartoitusaineistot

Tietoa kuviodien (polygonien) sisäisestä hajonnasta

Mahdollisuus kuvata jatkuvia ilmiöitä / tuottaa jatkuvia pintoja

Erinomainen lähtökohta spatiaaliseen analyysiin ja mallinnukseen

### Vektoriaineistot

#### Ongelmia

Yksi arvo yhdelle polygonille

Ei pystytä kuvaamaan jatkuvia ilmiöitä

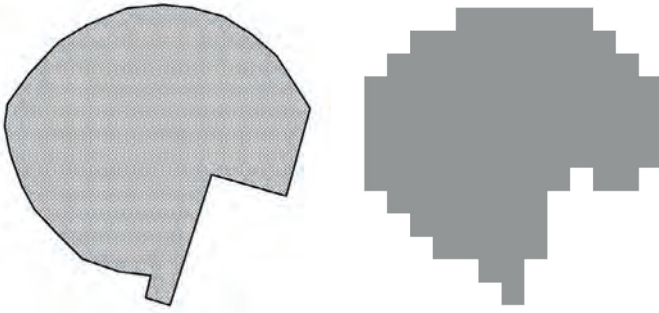
#### Etuja

Tiedostokoot pieniä; nopea käsitellä

Yksittäisten kohteiden sijainteja / ominaisuustietoa voidaan muokata / kohteille tallennettua ominaisuustietoa voidaan hakea paikkatietokannasta

Kohteiden luonnollista muotoa voidaan kuvata tarkemmin kuin rasteriaineistoilla

Vapaasti skaalautuva, eli aineiston luotettavuus ei kärsi suurentamisesta



Kuva 2.3. Viikin infokeskus vektorimuotoisena (vasen kuva) ja rasterimuotoisen esityksenä (oikea kuva).

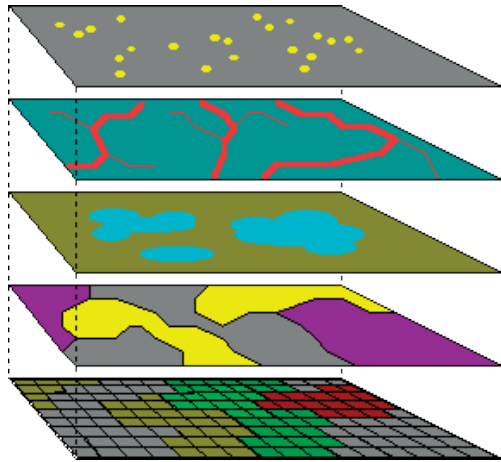
tapa on kuitenkin tehottomampi kuin vektorimuotoinen, koska alue (esim. metsikkökuvio) saa useita ominaisuustiedon arvoja. Tämä johtaa suurempaan tiedontallennuskapasiteetin tarpeeseen. Lisäksi rasterimuotoisen esityksen ongelmana on pistemäisten ja viivamaisten kohteiden epätarkempi kuvaus. Vektori- ja rasteriaineistojen edut ja ongelmat on koottu taulukkoon 2.1.

Lentokoneesta tai satelliiteista otetut kaukokartoituskuvat ovat yleisintä rasteriaineistoa. Kaukokartoituksen sekä tietojenkäsittelykapasiteetin nopea kehittyminen ovat johtaneet rasteriaineistojen kaiken aikaa lisääntyvään hyödyntämiseen paikkatietoanalyysissä.

Konversiot vektorista rasteriksi ja päinvastoin ovat usein tarpeen paikkatietoaineistoja analysoidessa ja visualisoitaessa. Yleisin tapa muodostaa vektoriaineistosta rasteriaineisto on ns. hilatiedoston muodostaminen. Hilatiedosto on säännöllinen  $n \times m$  -ulotteinen pistematriisi, jossa jokainen piste saa ominaisuustiedoiksi ne tiedot, jotka pisteen kohdalla olevalla rasteroitavan aineiston aluekohteellakin on. Mikäli alkuperäinen aineisto koostuu hajapisteistä, interpoloidaan tai mallinnetaan hilapisteen arvo jollain menetelmällä alkuperäisten pisteiden arvojen perusteella (ks. Luku 7 Interpolointi).

### 2.3 Rasterimuotoisen aineiston resoluutio

Rasterimuotoisen aineiston resoluutiolla tarkoitetaan yleensä aineiston spatiaalista resoluutiota. Fysikaalisessa mielessä spatiaalinen resoluutio voi tarkoittaa esimerkiksi kaukokartoi-



Kuva 2.4. Vektori- ja rasterimuotoisia karttatasoja.

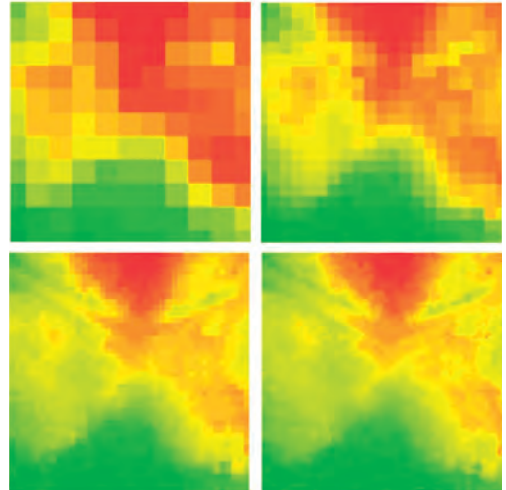
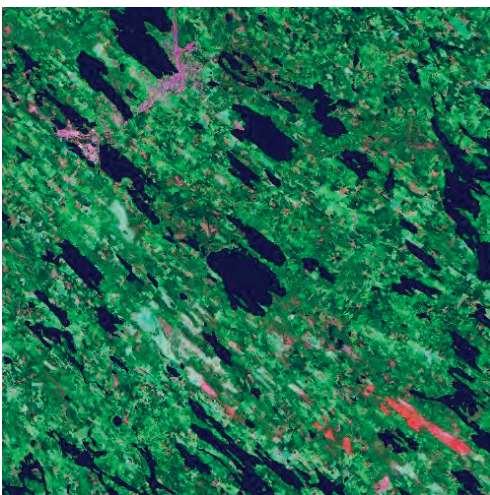
tuskuvalla pienintä kohdetta, joka maastossa on mahdollista kovalta havaita. Rasterimuotoisen paikkatietoaineiston spatiaalista resoluutiota on kuitenkin mahdollista laskennallisesti muuttaa, jolloin kyseessä on tekninen suure. Joka tapauksessa rasteriaineiston spatiaalinen resoluutio vaikuttaa ratkaisevasti, miten yksityiskohtaista tieto on ja miten tarkkaa / minkä mittakaavan analyysijä aineiston avulla voidaan tehdä. Kuvassa 2.5 on esitetty lentolaserkeilauksella tuotetun rasterimuotoisen maaston korkeusmallin tarkkuutta erilaisilla spatiaalisilla resoluutioilla. Kuvassa 2.6 vertaillaan puolestaan kahden satelliittikuvan spatiaalista resoluutiota. Kaukokartoituskuvioiden erotuskykyyn liittyvistä käsitteistä on keskusteltu tarkemmin myöhemmin kaukokartoitukseen liittyvässä luvussa.

## 2.4 Sijainti- ja ominaisuustieto, karttatasot, topologia

Paikkatieto sisältää sijainnin sekä sijaintiin linkitetyn ominaisuustiedon. Sijaintitietoa ovat esimerkiksi kohteen koordinaatit, kohteen geometriset ominaisuudet (piste, viiva, alue) sekä kohteen topologiset ominaisuudet. Paikkatietoaineiston topologialla tarkoitetaan kuvausta siitä, miten eri kohteet liittyvät toisiinsa. Topologialla kuvataan siis kohteiden sijaintisuhteita toisiinsa nähden. Topologian avulla voidaan selvittää mm. alueiden sulkeutuneisuus, leikkauspisteiden tarkkuus, onko jokin kohde sisä- tai ulkopuolella jotain toista kohdetta sekä rajapisteominaisuudet. Paikkatiedon sisältäessä kohteiden topologisen tiedon, on mahdollista selvittää kohteiden naapuruussuhteita, esimerkiksi mitkä solmut ovat yhteydessä johonkin toiseen solmuun / viivaan, mikä solmu sijaitsee jollakin alueella, mitkä viivat leikkaavat toisiaan tai mitkä alueet ovat toistensa naapureita (Tokola ym. 2000).

Ominaisuus- eli attribuuttitietoa on esimerkiksi tarkasteltavan kohteen maankäyttöluokka, maaperä-, kasvupaikka tai puustotunnus. Tärkein ominaisuus, joka erottaa paikkatietojärjestelmän kartanpiirto-ohjelmistoista, on sijainti- ja ominaisuustiedon yhtäaikainen käsittely.

Spatiaalinen tieto tallennetaan paikkatietojärjestelmään karttatasoina (kuva 2.8).

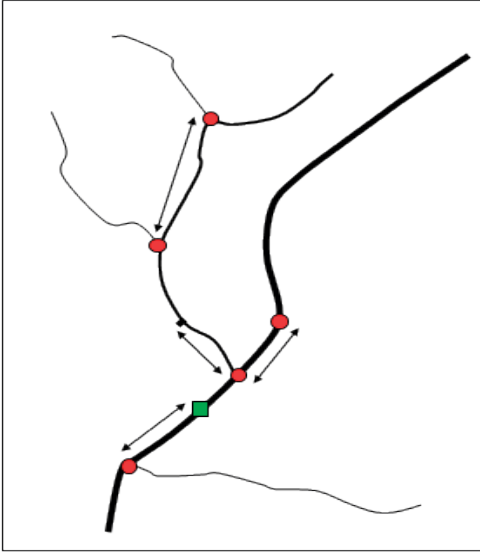


Kuva 2.5. Rasterimuotoisen tiedon resoluutio vaikuttaa kohteen kuvauksen tarkkuuteen. Kuvassa rasterimuotoinen laserkeilaukseen perustuva maastomalli 8-, 4-, 2- ja 1-metrin resoluutioilla.

Karttatasot ovat koordinaatti- ja ominaisuustietojen yhdistelmä, jotka on linkitetty toisiinsa tunnistetiedolla (id, avainkenttä). Paikkatietojärjestelmän yksi keskeinen ominaisuus on, että karttatasoista voidaan valita kulloisenkin analyysin tai esityksen vaatimuksia parhaiten palvelevat tasot. Karttatasoja yhdistelemällä saadaan aikaan uusia tasoja, joita voidaan hyödyntää jatkoanalyyseissä.

Kuva 2.6. Satelliittikuvien resoluutio: vasemmalla Landsat-TM –satelliittikuva, spatiaalinen resoluutio maastossa 30 m ja oikealla Ikonos-satelliittikuva, spatiaalinen resoluutio maastossa 1 m.

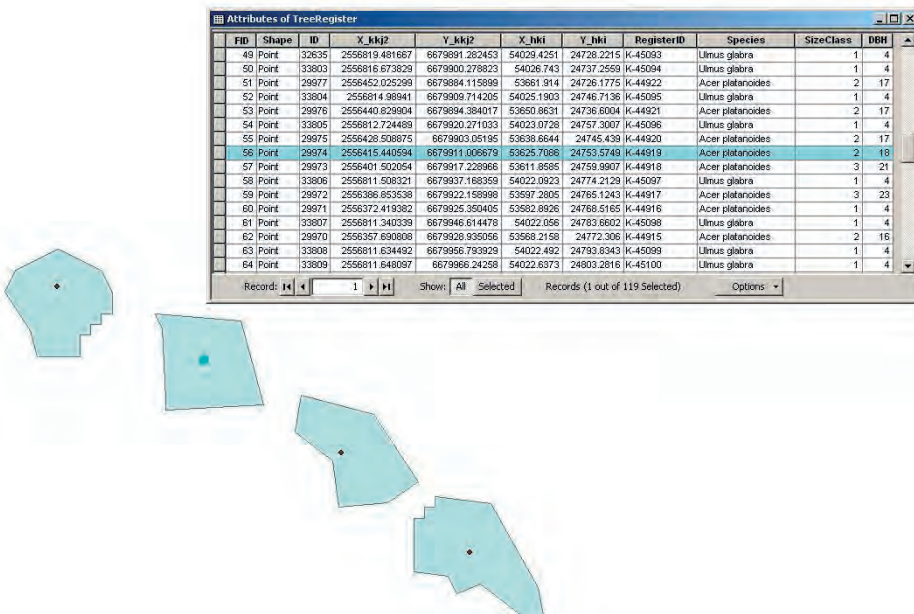




Kuva 2.7. Nauhamaisten kohteiden tapauksessa geometrisen tieto voidaan tallentaa myös dynaamisen segmentoinnin avulla. Sijainti on kuvattu etäisyytenä jostain tunnetusta pisteestä.

## 2.5 Tietokanta

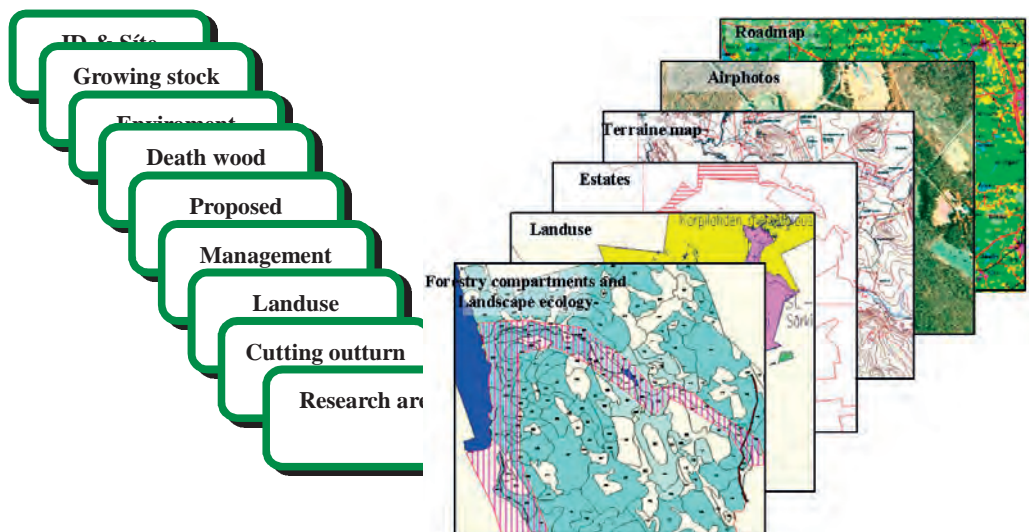
Paikkatietojärjestelmä koostuu tietokannasta, käyttöliittymästä ja analysointityökaluista. Tietokannalla tarkoitetaan tietovarastoa, joka on kokoelma tietoja, joilla on yhteys toisiinsa. Ominaisuustieto on kuvattu tietokannassa, joka linkitetään sijaintitietoon yhteisten tunnusten avulla. Sijaintitietoon liitetyt ominaisuustiedot on mahdollista tallentaa tietokantaan usealla erilaisella tietomallilla. Näitä tietomalleja ovat hierarkinen malli, verkkomalli, oliomalli ja relaatiomalli, joka on luonnonvarojen hallintaan tarkoitettujen paikkatietojärjestelmien yleisin tietomalli. Relaatiomallissa tieto esitetään tauluina. Malli on yksinkertainen ja tieto on tallennettu tehokkaassa muodossa. Toisaalta haut ovat relaatiomallissa hitaampia kuin muissa tietomalleissa. Tietokantojen koot voivat vaihdella suuresti, yhteen tiedostoon tallennetuista taulukoista hyvin suuriin tietokantoihin joissa on useita miljoonia tietueita.



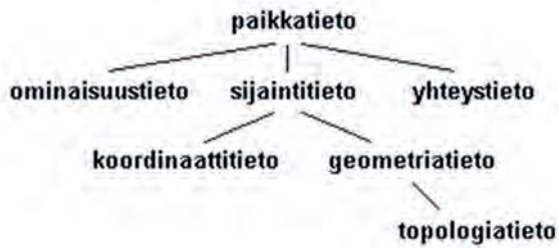
Kuva 2.8. Karttataso ja siihen liittyvät tiedot paikkatietojärjestelmässä. Kuvassa on Helsingin kaupungin puurekisteritietoja. Kuvassa puun sijainti on esitetty pistemuodossa, kun taas erillisessä karttatasossa on puun latvuksen koko alumuodossa. Jokaiseen puuhun liittyvät ominaisuustiedot on esitetty ominaisuustietotaulussa. Ominaisuustieto liitetään karttatason tunnistetiedon avulla (ID).



Kuva 2.9. Topologiaa Viikin kampuksella.



Kuva 2.10. Metsähallituksen paikkatietojärjestelmä. Karttatason & ominaisuustietokanta. (kuva: Metsähallitus / Hanna Soinne)

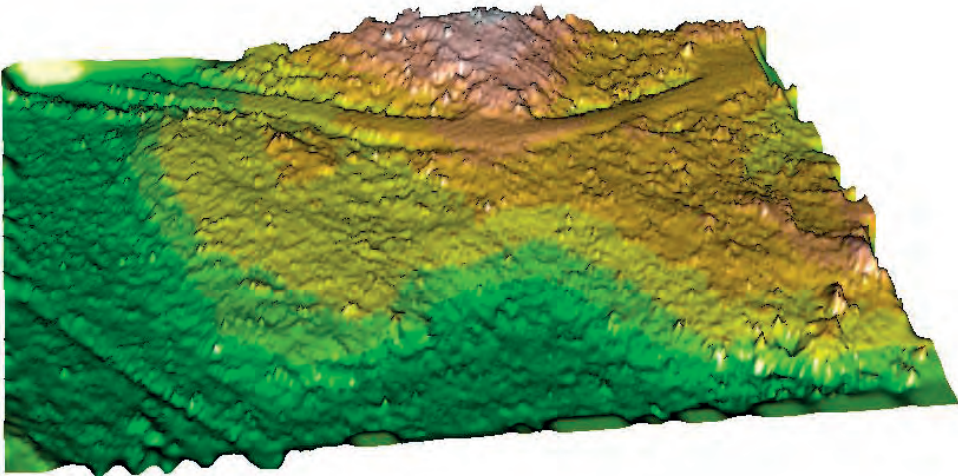


Kuva 2.11. GIS-tietokannan rakenne (Tokola ym. 2000)

### 2.6 2D–3D–4D

Paikkatieto voidaan kuvata 2-ulotteisesti tasossa (2D) tasokoordinaattien  $(x,y)$  avulla. Kun mukaan otetaan kohteen korkeus, päästään 3-ulotteiseen kohteiden kuvaukseen  $(x,y,z)$ . Paikkatietojärjestelmässä voidaan hallita myös

kohteiden ajassa tapahtuvaa muutosta, jolloin kohteita voidaan kuvata 4-ulotteisesti  $(x,y,z,t)$ . Nykyaikaisessa paikkatietojärjestelmässä ja paikkatietoanalyysissä ollaan siirtymässä nopeaan tahtiin 2D-kuvauksesta kohden 3D- ja 4D-kuvausta.



Kuva 2.12. Rasterimuotoinen tieto voidaan esittää 2D- ja 3D-muodossa. Kuvassa 2.5. esitettiin 2D maastomalleja. Yllä olevassa kuvassa on esitetty vastaavan alueen 3D-maastomalli.

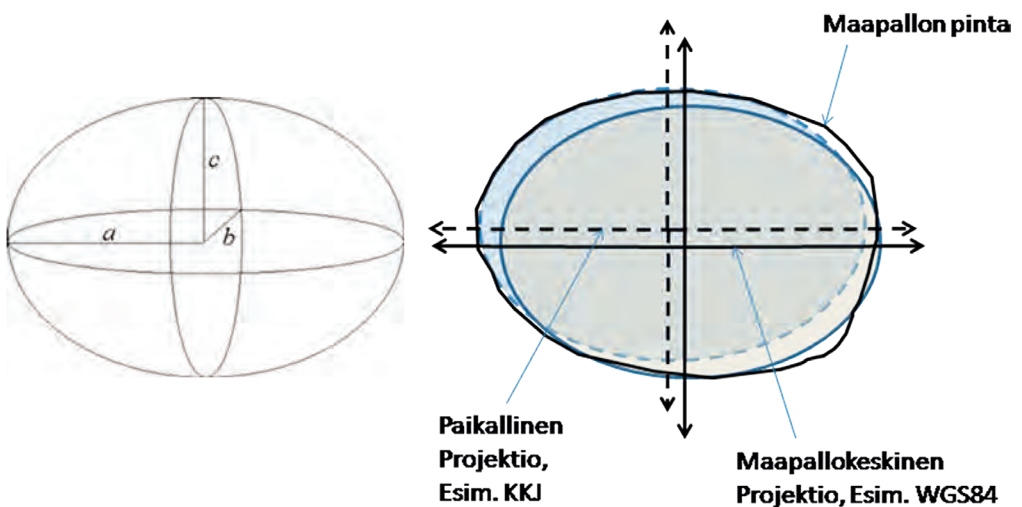
## 3 Karttaprojektiot ja koordinaattijärjestelmät

### 3.1 Karttaprojektiot

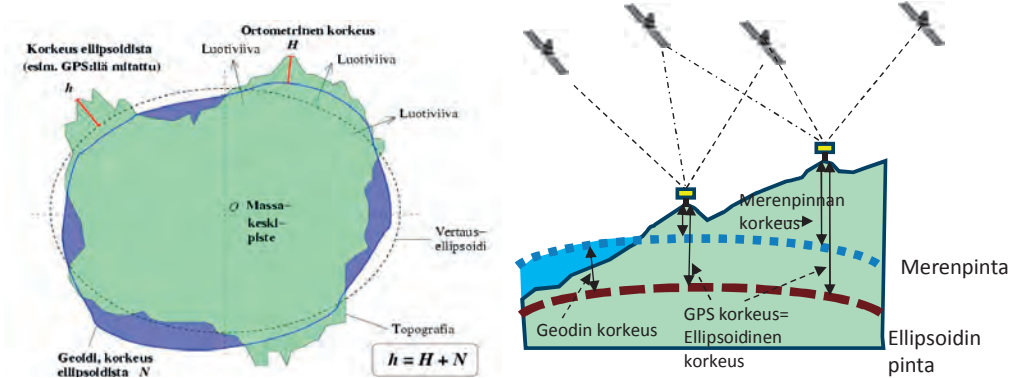
Karttaprojektioiden olemassaoloon on hyvin yksinkertainen syy. Maa on kolmiulotteinen, suunnilleen pallon muotoinen kohde, jota on tarve kuvata kaksiulotteisella kartalla. Ratkaisu ei ole kuitenkaan kovin yksinkertainen, jos halutaan pitää kiinni tarkkuudesta. Tarvitaan matemaattinen menetelmä, jonka tavoitteena on kuvata kolmiulotteista maanpintaa tasokuvana karttalehdellä. Projektio pyritään tekemään siten, että kuvattavat kohteet säilyisivät mahdollisimman oikeanmuotoisina ja -kokoisina. Tämä ei ole kuitenkaan täysin mahdollista. Kaikissa projektioissa on virhettä, joka on sitä suurempi mitä suurempi osa maanpinnasta halutaan samalle karttalehdelle. Maapallon kuvaamiseksi kaksiulotteisella kartalla täytyy tarkastella kahta asiaa: maapallon muotoa ja menetelmää, jolla jonkin maanpinnan kohteen paikka määritellään kartalla (ERMMapper 1998). Edellisestä käytetään termiä geodeettinen datum (engl. Geodetic Datum) ja jälkimmäisestä karttaprojektio (engl. Map Projection).

Geodeettisen datumin avulla määritetään maanpinnan koko ja muoto sekä käytettävän koordinaattijärjestelmän alkuperä ja orientaatio. Väärän datumin käyttö koordinaatiston perustana voi johtaa satojen metrien virheeseen sijainnin määrittämisessä. Eri valtiot ja organisaatiot käyttävät erilaisia datumeja paikkatieto-, paikannus- ja navigointijärjestelmissä sijainnin määrittämiseen käyttämiensä koordinaattijärjestelmien perustana.

Maapallon pinnan muotoa on pyritty kuvaamaan erilaisilla geometrisilla malleilla. Yksinkertaisimpia ovat mallit, jotka kuvaavat maapallon pinnan tasona ja joita voidaan käyttää paikallisesti niin lyhyillä etäisyyksillä, joilla maanpinnan kaarevuudella ei ole merkitystä. Ympyrään perustuvilla malleilla maanpinnan muotoa kuvataan tietyn säteisen ympyrän avulla. Näitä käytetään usein navigointiin lyhyillä etäisyyksillä sekä maailmanlaajuisesti välimatkojen arviointiin. Koska maa on navoiltaan hieman litistynyt, tarvitaan kehittyneempiä ellipsoidisia malleja, kun halutaan laskea tarkkoja välimatkoja ja sijainteja pitkillä etäisyyksillä,



Kuva 3.1. "Sferoid" määrittää laskennallisen maapallon ellipsoidin muodon (vasen kuva) ja "Datum" määrittää suhteen maapallon keskipisteeseen (oikea kuva).



Kuva 3.2. Topografinen maapallon pinta, karttaprojektion ellipsoidin pinta ja merenpinta (geodin pinta) ovat tarpeellisia käsitteitä GPS-mittauksissa. Vasemmassa kuvassa on esitetty maapallon poikkileikkaus ja oikeassa kuvassa tarkennettu kuvaus käsitteistä.

kuten satelliittipaikannuksessa (Dana 1998).

Maapallon pinnan kuvaus eri datumeissa vaihtelee siinä käytettävän referenssiellipsoidin (engl. Reference Ellipsoid) mukaan, joita on nykyisin käytössä useita kymmeniä. Ellipsoidi määritetään kahden parametrin eli päiväntasaajaa vasten kohtisuorassa olevan säteen (engl. equatorial radius) ja maapallon litistymistä kuvaavan kertoimen (engl. flattening) avulla. Lisäksi datumissa täytyy määrittää miten ellipsoidin määräämä muoto kytketään maan todelliseen pintaan (Kuva 3.2). Datumien avulla maapalloskeittinen ellipsoidi siirretään paikallisesti lähemmäksi maapallon pintaa.

Korkeuden määrittämiseksi pitää tuntea, mikä ero on topografisella maapallon pinnalla, karttaprojektion ellipsoidin pinnalla ja merenpinnalla (geodin pinta). Merenpinnan korkeus määritetään painovoimamittauksilla. Korkeuskäsitteet ovat erityisen tärkeitä tarkkojen GPS-/GNSS-mittausten teossa. Lähtökohtaisesti GPS-laitteet hyödyntävät WGS84-ellipsoidin pintaa paikantamisessa. Kun mitataan jonkun paikan korkeutta, niin pitää huomioida korkeus merenpintaan ja geodin korkeus. Tyypillisesti geodin korkeus on Suomessa noin 17 m.

Oikean projektion valitsemiseksi on siis ensin tiedettävä tarkasteltavalle maapallon osalle määritetty datum ja siinä käytetty referenssiellipsoidi. Paikkatietojärjestelmän peruskäyttäjän ei yleensä tarvitse niitä tietää, koska ne on

projektioita laadittaessa ja järjestelmään lisättäessä jo otettu huomioon. Yleisesti käytetty ja tunnettu datum on esimerkiksi World Geodetic System 1984 eli WGS84, jota käytetään mm. satelliittipaikannuksessa.

Projektio pyritään tekemään siten, että kuvattavat kohteet säilyvät mahdollisimman oikeamittaisina ja -muotoisina. Pallon pintaa ei kuitenkaan koskaan voida tarkasti oikaista tasolle, joten kaikissa projektioissa on jonkin verran virhettä, joka on sitä suurempi mitä suurempi osa maapallon pinnasta halutaan samalla kerralla kuvata karttalehdelle. Yleisesti karttaprojektioille voidaan kuitenkin asettaa oikeamuotoisuuteen, etäisyyteen, suuntaan ja oikea-alaisuuteen liittyviä vaatimuksia. Karttaprojektio on Danan (1997) ja ERMapperin (1998) mukaan:

—oikeamuotoinen (engl. conformal), jos kartan mittakaava säilyy samana mistä tahansa kartan pisteestä mihin tahansa suuntaan tarkasteltuna. Leveys- ja pituuspiirit leikkaavat toisensa oikeassa kulmassa ja kohteiden muoto säilyy karttakuvauksessa.

—oikeapituinen (engl. equidistant), jos kartalla etäisyydet projektiokeskuksesta mihin tahansa paikkaan kartalla kuvautuvat oikein.

—oikeakulmainen (engl. true direction), jos karttakohteiden kulmat kuvautuvat kartalla oikein missä tahansa suunnassa. Toisin sanoen kuvioiden muodot kartalla vastaavat maaston kuvioita.

—oikea-alainen (engl. equal-area), jos pinta-alan mittakaava säilyy samana koko karttalehden alueella.

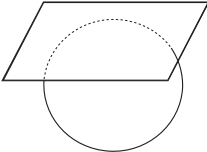
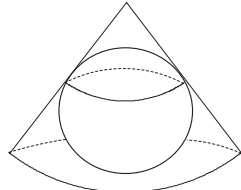
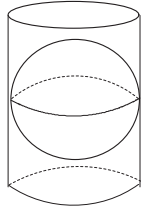
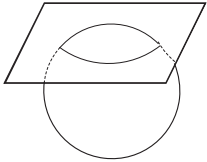
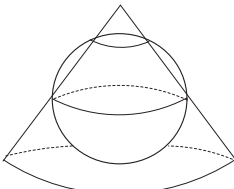
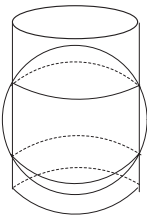
Kaikkia edellä mainittuja vaatimuksia ei kuitenkaan voida saavuttaa kerralla. Suuria alueita kuvaavat kartat ovat varsinkin reunoiltaan vääristyneitä. Maantieteellisissä projektioissa kuvataan suuria alueita pyrkimättä mittatarkkuuteen, kun taas geodeettisissa projektioissa kuvataan pieniä alueita suuremmalla tarkkuudella.

Projektit voidaan kuvaustavan perusteella jakaa kahteen pääryhmään: keskus- ja suuntaisprojektiioihin. Keskusprojektiossa kaikki kuvan muodostavat kuvasäteet kulkevat saman kuvakeskuksen kautta. Näin tapahtuu esimerkiksi valokuvattaessa, joten ilmakuva onkin tyypillinen keskusprojektiokuva. Keskusprojektiokuvassa kauempana olevat kohteet kuvautuvat lähellä olevia pienempinä. Näin ollen ilmakuvassa korkealla olevat kohteet kuvautuvat matalalla olevia kohteita suuremmassa mittakaavassa. Suuntaisprojektiossa sen sijaan kaikki kuvasäteet ovat yhdensuuntaisia.

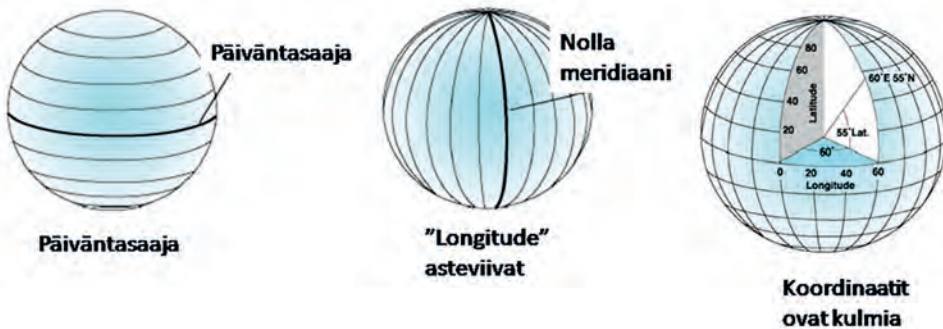
Tällöin kuvattavien kohteiden mittasuhteet pysyvät oikeina. Kartta on maaston kohtisuora suuntaisprojektiio. Geodeettiset karttaprojektit voidaan jakaa neljään perustyyppiin: taso-, kartio-, -lieriö ja sekalaiset projektit.

Tasoprojektioissa (engl. planar, azimuthal) pyöreä pinta projisoidaan maapalloa sivuavalle tai leikkaavalle tasolle (kuva 3.3). Tasoprojektit voivat olla oikeapituisia, kuten Azimuthal Equidistant, jota joskus käytetään kuvaamaan lentoreittien etäisyyksiä tai oikea-alaisia, kuten Lambert Azimuthal Equal Area, jota käytetään laajoja valtamerialueita kuvaavissa kartoissa (Dana 1997).

Kartioprojektioissa (engl. conic) pyöreä pinta projisoidaan maapalloa sivuavalle tai leikkaavalle kartiolle (kuva 3.3). Kartioprojektit voivat olla oikea-alaisia, kuten Albers Equal Area Conic, jota käytetään Yhdysvalloissa ja muissa pinta-alaltaan suurissa maissa, joissa itä-länsisuuntainen ulottuvuus on suurempi kuin pohjois-eteläsuuntainen. Kartioprojektio voi olla myös oikeapituinen (esim. Equidistant Conic) tai oikeamuotoinen (Lambert Conformal Conic) (Dana 1997).

	Tasoprojektio	Kartioprojektio	Lieriöprojektiio
Sivuava projektiio			
Leikkaava projektiio			

Kuva 3.3. Geodeettisten karttaprojektioiden perustyyppit.



Kuva 3.4. Maantieteellinen koordinaatisto perustuu "latitude" (leveys) ja "longitude" (pituus) -asteisiin, jotka määritetään kulmina maapallon keskipisteestä nollapisteen sijoituksessa Greenwich'in pituuspiiriin ja päiväntasaajan leveyspiiriin leikkauspisteeseen.

Lieriöprojektioissa (engl. cylindrical) maapallon pinta projisoidaan sitä sivuavalle tai leikkaavalle lieriölle (kuva 3.3). Sivuvassa projektiossa lieriö sivuaa maapalloa yhden leveyspiirin kohdalla ja leikkaavassa projektiossa kahden. Projektio voi perustua pystyasentoiseen lieriöön, joka sivuaa maapalloa jollakin leveyspiirillä tai vaaka-asentoiseen, joka sivuaa maapalloa jollakin pituuspiirillä (Dana 1997).

Sekalaisiin projektioihin (engl. miscellaneous) kuuluvat esim. kaikki projisoimattomat kartat ja muut, jotka eivät kuulu mihinkään edellä mainituista. Projisoimattomissa kartoissa pituus- ja leveyspiirit esitetään yksinkertaisena suorakulmaisena koordinaatistona. Näissä mittakaava, pinta-ala, etäisyys ja muoto ovat kaikki vääristyneitä virheen ollessa suurimmillaan napojen läheisyydessä (Dana 1997).

Käytetyin projektityyppi on lieriöprojektiio, jonka eri muunnelmiin useat kansalliset koordinaatistot perustuvat. Lieriöprojektiioita ovat mm. Mercatorin-projektio, UTM-projektio sekä Gauss-Krügerin projektio. Mercatorin-projektio on pystyasentoinen lieriöprojektiio, jossa lieriö sivuaa maapalloa päiväntasaajaa pitkin. Projektiossa pituus- ja leveysasteet kuvautuvat suorina. Projektio on kulmatarkka, mutta mittakaava suurenee napoja kohti mentäessä. Projektio on laadittu siten, että laivan kurssi voidaan piirtää kartalle astelevyllä ja viivaimella. Projektiota onkin käytetty paljon merikartoissa 1600-luvulta lähtien.

UTM -projektiio (Universal Transverse Mercator) on maapalloa sivuva poikittainen lieriöprojektiio, jonka koordinaateilla pystytään määrittämään paikan kaksiulotteinen sijainti lähes kaikkialla maapallolla. Projektiossa maapallo jaetaan 60 pituuspiirien suuntaiseen vyöhykkeeseen (engl. zone), jotka ovat 6 astetta leveitä ja joilla on kullakin oma keskimeridiaaninsa (Dana 1997). Projektio kattaa alueen 80 asteesta eteläistä leveyttä 84 asteeseen pohjoista leveyttä, mutta napojen läheisyydessä projektio on epätarkka. Itäkoordinaatilla mitataan paikan etäisyyttä keskimeridiaanilta, jolla itäkoordinaatti saa arvon 500 km. Pohjoiskoordinaatilla mitataan etäisyyttä päiväntasaajalta, mutta päiväntasaajan eteläpuolella käytetään 10000 km pohjoissiirtymää (engl. false northing). Maapallon kaarevuudesta johtuvan vääristymän vähentämiseksi käytetään korjauskerronta (engl. spheroid parameter), jonka arvo on yleensä n. 0.9996. Kertomalla koordinaattiarvot korjauskertoimella saadaan maan epäpyöreästä johtuva virhe korjatuksi. UTM-projektio on käytössä mm. Ruotsissa ja Yhdysvalloissa.

Gauss-Krügerin projektio on Mercatorin projektion poikittaisasentoinen muunnos, jossa lieriö sivuaa maapalloa yhtä meridiaania pitkin. Maapallon kuvaajana tässä projektiossa käytetään navoiltaan litistynyttä ellipsoidia. Sivumismeridiaani kuvautuu kartalla suorana, muut kaarevina. Projektio on kulmatarkka ja sivumismeridiaanin lähellä myös lähes oikea-

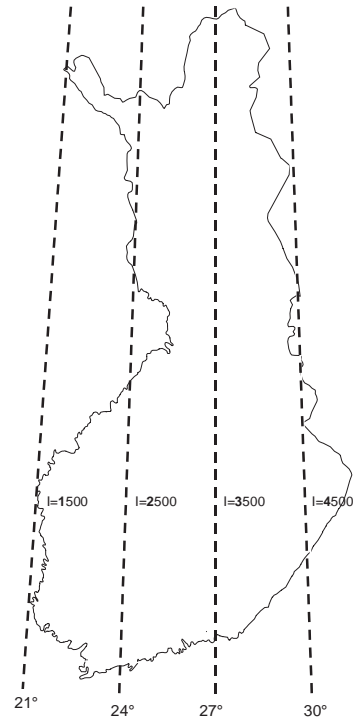
mittainen. Mittakaava kuitenkin suurenee keskimeridiaanista etäännyttäessä. Gauss-Krügerin -projektiio on ollut Suomen kartastojärjestelmän perusta, missä projektiosta käytetään kerrallaan keskimeridiaanin kummaltakin puolelta yhteensä 3 astetta leveää kaistaa. Koko Suomi kuvataan neljällä kaistalla, joiden sivuamiseridiaanit ovat 21, 24, 27 ja 30 astetta itäistä pituutta (kuva 3.5).

### 3.2 Maantieteelliset koordinaatit

Tietyn pisteen sijainti maapallolla voidaan ilmoittaa koordinaattien avulla. Koordinaatisto voi olla joko maantieteellinen koordinaatisto tai tasokoordinaatisto. Suurien alueiden kartoituksessa joudutaan ottamaan huomioon maan pallonmuotoisuus, jota kuvataan datumien avulla. Maantieteelliset (engl. geographical, spherical) koordinaatit ilmaistaan pallokoordinaatteina astemuodossa. Yleisimmin käytetty maantieteellinen koordinaatisto on leveyteen, pituuteen ja korkeuteen perustuva järjestelmä. Leveyskoordinaatin nollaympyrä on päiväntasaaja ja pituuskoordinaatiston nollaympyrä on Greenwichin meridiaani. Maantieteelliset koordinaatit ilmoittavat siis etäisyyden päiväntasaajasta ja nollameridiaanista kulmamitoissa. Pisteen korkeus määritetään sen kohtisuorana etäisyytenä referenssiellipsoidiin. Maantieteelliset koordinaatit voidaan mitata kiintotähti- tai satelliittihavainnoilla (esim. GPS-järjestelmä).

### 3.3 Suomen tasokoordinaatit

Tasokoordinaatistoissa pisteen kaksiulotteinen sijainti ilmoitetaan etäisyyksinä tunnetuista lähtöpisteistä. Etäisyydet mitataan toisiaan kohtisuorassa olevien akselien suunnassa. Suomessa käytettiin vuoteen 2012 asti valtakunnallisina tasokoordinaatistoina kartastokoordinaattijärjestelmän (kkj) mukaista peruskoordinaatistoa, ja yhtenäiskoordinaatistoa (Maanmittauslaitos 1996). Kartastokoordinaatisto perustuu Gauss-Krügerin -projektiioon. Jokaisessa projektiokaistassa on tällöin oma suorakulmainen koordinaatistonsa, jonka nollapisteenä kullakin



Kuva 3.5. Gauss-Krügerin projektiokaistojen keskimeridiaanit vanhassa KJ-peruskoordinaatistossa.

kaistalla on päiväntasaajan ja keskimeridiaanin leikkauspiste. Pohjois-eteläsuuntaiset X-koordinaatit ilmoittavat etäisyyden päiväntasaajasta ja itä-länsisuuntaiset Y-koordinaatit ilmoittavat etäisyyden kaistan keskimeridiaanista. Jotta ei tarvitsisi käyttää negatiivisia koordinaatteja, itäkoordinaatin arvona keskimeridiaanilla käytetään kullakin kaistalla lukua 500 km, jonka eteen lisätään kaistaa kuvaava luku 1,2,3 tai 4 (kuva 3.5). Yhtenäiskoordinaatistossa koko Suomi oli projisoitu yhdelle kaistalle, jonka keskimeridiaani on 27 astetta itäistä pituutta (Maanmittauslaitos 1996). Sen kohdalla itäkoordinaatin arvo on 3500 km. Peruskoordinaatiston kolmannen kaistan koordinaatit ovat samat perus- ja yhtenäiskoordinaatistoissa, mutta muiden kaistojen koordinaatit on muunnettava laskien koordinaatistosta toiseen. Eri projektiokaistojen arvoja ei siis voi yhdistää suoraan. Ellipsoidin kuvaaminen tasopinnalle aiheuttaa projektiovirheen, joka peruskoordi-

naatiston kaistojen reunoilla on alle 10 cm/km. Yhtenäiskoordinaatistossa projektiivirhe on suurimmillaan läntisessä Suomessa yli 2 m/km (Maanmittauslaitos 1996).

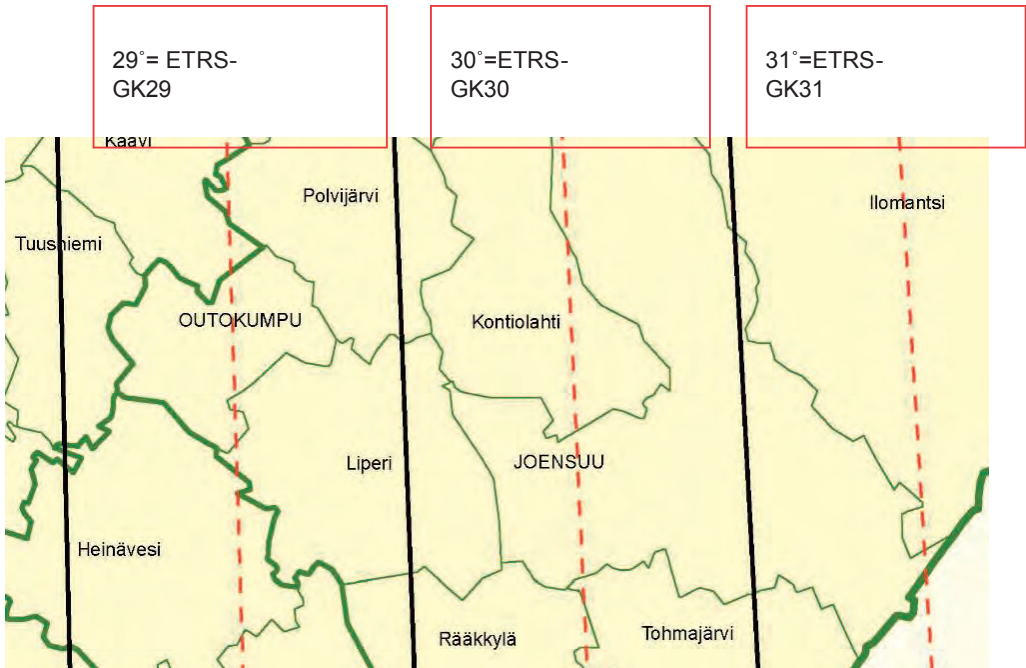
Vuodesta 2012 lähtien Suomessa on siirrytty käyttämään EUREF-FIN -koordinaatistojärjestelmän suorakulmaisia tasokoordinaatteja. EUREF-FIN -järjestelmän lähtökohtana on UTM-projektio, jossa koko maailma on jaettu kaistoihin välillä  $80^\circ$  eteläistä ja  $84^\circ$  pohjoista leveyttä. Yhden kaistan leveys on  $6^\circ$  ja ja yhden ruudun korkeus on  $8^\circ$ . Projektiotasot leikkaavat maapallon pintaa. Oikeamittaiset leikkausviivat sijaitsevat n. 180 km etäisyydellä keskimeridiaanista itään ja länteen. Keskimeridiaanilla itäkoordinaatin arvo on 500 km, joten se ei ole koskaan negatiivinen.

Suomessa UTM:n mukainen koordinaatisto on toteutettu siten, että käytetään vain yhtä kaistaa numero 35, jonka keskimeridiaani on  $27^\circ$ . Näin ollen tilanne on samankaltainen kuin KKJ:n yhtenäiskoordinaatistossa, mutta mittakaavakorjaukset eivät kasva niin suuriksi, koska projektiotaso leikkaa pallopintaa. EUREF-FIN -järjestelmän lähtökohtana on ollut European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) 3D-koordinaattijärjestelmä, joka on kiinnitetty Euraasian mannerlaattaan. Näin ollen EUREF-FIN -järjestelmän tarkka nimi on ETRS-TM35FIN.

Uusiin perus- ja maastokarttoihin on painettu EUREF-FIN-koordinaatistoruudukko. Vanha KKJ-järjestelmä poistui virallisesti käytöstä vuoden 2012 loppuun mennessä. Vanhoja paikkatietoaineistoja on kuitenkin edelleen runsaasti KKJ-järjestelmässä. EUREF-FIN-koordinaatistojärjestelmä on käytännössä sama kuin GPS-paikantimien käyttämä WGS-84-koordinaatistojärjestelmä. Uuden järjestelmän keskeisenä hyötynä onkin paikannustekniikan entistä tehokkaampi hyödyntäminen. Toinen tavoite on ollut yhtenäistää Euroopan koordinaatistojärjestelmiä.

Rasterikartat, ortokuvat ja kantakartat ovat nykyisin ETRS-TM35FIN-projektiossa, myös viralliset karttaotteet ja -tulosteet saadaan vain ETRS-TM35FIN:ssä. Uusi koordinaattijärjestelmä on tarkempi ja tasalaatuisempi kuin aiemmin käytössä ollut kartastokoordinaattijärjestelmä (KKJ). TM35FIN -projektiossa lieriö leikkaa maan pintaa eli keskimeridiaanin kohdalla lieriön pinta on maan (ellipsoidin) pinnan alapuolella. TM35FIN -karttaprojektion keskimeridiaani ( $27^\circ$  itäistä pituutta) kuvautuu suorana viivana ja muodostaa suorakulmaisen koordinaatiston pohjoisakselin. Päiväntasaaja muodostaa suorakulmaisen koordinaatiston itäakselin. Suorakulmaisen tasokoordinaatiston origo on keskimeridiaanin ja päiväntasaajan leikkauskohdassa. Kun kupera ellipsoidipinta kuvataan tasolle, syntyy projektiivirheitä eli suunta- ja mittakaavavirheitä. Keskimeridiaanilla mittakaava on alle 1.0 eli todelliset pituudet kuvautuvat projektiotasolla lyhyempinä. Noin 180 km:n päässä keskimeridiaanista mittakaava on tasan 1.0 ja sitä kauempana se on suurempi kuin 1.0

Kiinteistötoimituksissa voidaan käyttää myös paikallisesti tarkemman tuloksen tuottavaa ETRS-GKn-järjestelmää (Kuva 3.6), jossa kaistan leveys on yksi aste, ja keskimeridiaani  $19^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $21^\circ \dots 31^\circ$  valitaan siten, että käsiteltävä alue tulee kuvatuksi samassa projektiokaistassa. ETRS-GKn-koordinaatisto käyttää Gauss-Krügerin maapallon pintaa sivuavaa projektiota (kuten KKJ) ja GRS80-ellipsoidia (kuten ETRS-TM35FIN). Näin ollen sen parametrit poikkeavat kummastakin, eivätkä koordinaatit ole yhteneväisiä KKJ:n tai ETRS-TM35FIN -koordinaatiston kanssa, vaikka keskimeridiaani olisi sama. Koordinaatiston nimessä GK tulee sanasta Gauss-Krüger ja n on käytetyn keskimeridiaanin asteluku.



Kuva 3.6. Paikallinen ETRS-GKn-koordinaatisto käyttää Gauss-Krügerin maapallon pintaa sivuavaa projektiota ja poikkeaa valtakunnallisesta ETRS-TM35FIN –koordinaatistojärjestelmästä.



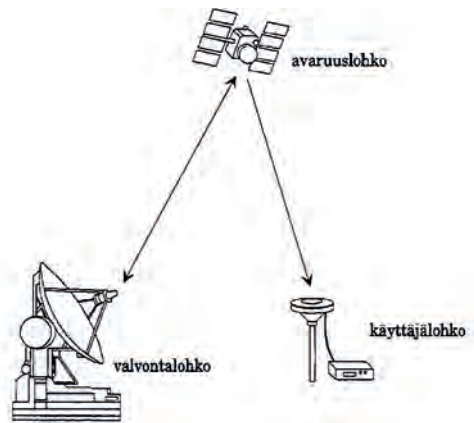
## 4 Satelliittipaikannus

### 4.1 Satelliittipaikannusjärjestelmät: GPS, GNSS

Nykyisin pisteiden koordinaatit on mahdollista mitata tarkasti ja nopeasti satelliittipaikannusjärjestelmän (GNSS, Global Navigation Satellite Systems) avulla. Toistaiseksi ainoa myös siviilikäytössä oleva maailmanlaajuinen järjestelmä on vuonna 1993 valmistunut GPS, jonka Yhdysvaltain puolustushallinto kehitti alun perin sotilaallisiin tarkoituksiin. Systemi perustuu n. 30 satelliittiin, jotka kiertävät maapalloa. Satelliittien sijainti kullakin hetkellä tunnetaan kiertoradan ja nopeuden perusteella. Laitte määrittää aluksi etäisyyden neljään satelliittiin. Etäisyyden määrittäminen perustuu sekä satelliitin että vastaanottimen yhtäaikaaisesti generoimaan, kooditetuun radiosignaaliin. Kun satelliitin signaali saapuu vastaanottimeen, voidaan signaalien vaiheerosta laskea signaalin kulkuun kulunut aika ja tästä edelleen etäisyys satelliittiin.

Järjestelmä voidaan toiminnallisesti jakaa kolmeen osioon: avaruus-, käyttäjä- ja valvontalohkoon (Kuva 4.1). Avaruuslohko koostuu satelliiteista, jotka kiertävät maata 12 tunnin kiertoajalla. Satelliittien kiertoradat on suunniteltu sellaisiksi, että mistä tahansa pisteestä maapallolla on yhteys viidestä kahdeksaan satelliittiin, mikä mahdollistaa tarkan paikannuksen. Valvontalohko koostuu viidestä satelliittien seuranta-asemasta, joissa tarkistetaan ja korjataan satelliittien kiertoradat ja kellojen ajat. Käyttäjälohko puolestaan tarkoittaa kaikkia satelliittipaikannuksen asiakkaita ja heidän GPS-vastaanottimiaan.

Kun sekä satelliittien sijainti että kohteen etäisyys niihin tunnetaan, voidaan kohteen sijainti laskea ns. kolmiomittauksen eli avaruustrilateraation avulla. Kukin etäisyysmittaus määrittää pallon, jonka pinnalla kohde sijaitsee. Kun mittauksia on useita, pallojen pintojen leikkauspiste on kohteena oleva piste. Periaatteessa kolme satelliittihavaintoa riittäisi, mutta koska satelliitin ja vastaanottimen kellot voivat olla eri ajassa, neljäs mittaus tarvitaan kellonvirheen eliminointiin.



Kuva 4.1. GPS-järjestelmän rakenne (Kontola 1996).

GPS-järjestelmä tuottaa kahta sijainnimmäärittämissä palvelua: PPS (Precise Positioning Service) ja SPS (Standard Positioning Service). Näistä PPS mahdollistaa erittäin tarkan paikannuksen tarkkaan rajatulle käyttäjäkunnalle. Omalla taajuudellaan toimiva SPS on siviilikäyttöön tarkoitettu rajoittamaton palvelu, jonka signaalia suurin osa GPS-vastaanottimista pystyy hyödyntämään. Yksittäisellä GPS-laitteella mitatun sijainnin kokonaisvirhe on nykyään yleensä 5–10 metriä. Parhaimmillaan voidaan päästä jopa muutaman metrin tarkkuuteen. Aikaisemmin SPS-palvelun signaalia häirittiin Yhdysvaltain puolustusministeriön toimesta, jolloin tarkkuus heikkeni noin 100 metriin.

GPS-Mittauksen kriittiset asetukset liittyvät satelliittigeometriaan, signaalin voimakkuuteen sekä satelliittien korkeuskulmaan horisontista. Näistä merkittävin on satelliittigeometria, eli satelliittien keskinäinen asema taivaalla, joka vaikuttaa voimakkaasti paikanmäärittäksen tarkkuuteen. Satelliittigeometria on parhaimmillaan, kun yksi satelliitti on zeniitissä ja kussakin taivaankannen kolmanneksessa (horisontin lähellä) on yksi satelliitti. Satelliittigeometrian lisäksi muita mittaustarkkuuteen vaikuttavia häiriötekijöitä ovat ilmakehän muuttuvat ominaisuudet sekä signaalin monitieheijastus. Ilmakehän ominaisuuksista

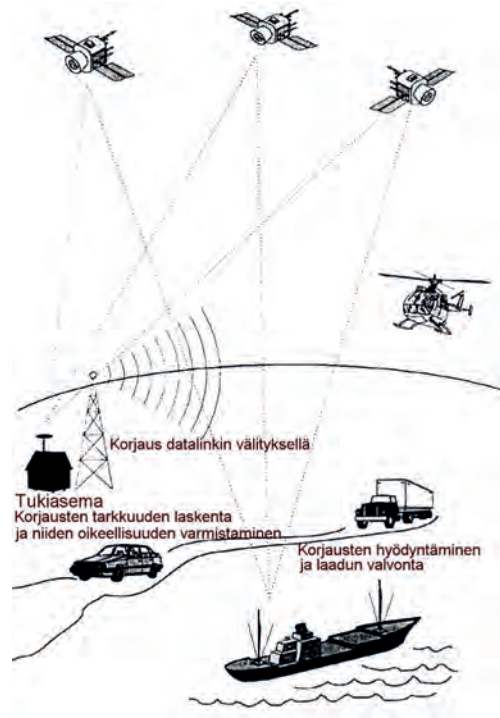
merkittävimmät ovat troposfäärin lämpötila, paine ja vesihöyry sekä ionosfäärin sähköisyys. Signaalin monitieheijastumat saattavat aiheuttaa sijaintiin huomattavaa virhettä, mikäli signaali ei saavu suoraan vastaanottimeen, vaan esimerkiksi heijastuu puista tai rakennuksista.

#### 4.2 GPS-mittausten tarkentaminen

GPS-signaalin häiriötekijöiden vuoksi yhden laitteen avulla tehtävät absoluuttiset GPS-mittaukset ovat useisiin käyttötarkoituksiin liian epätarkkoja. Mittausten tarkentamiseksi on kehitetty suhteellinen eli differentiaalinen GPS (DGPS). Mikäli käytössä on useampia GPS-laitteita, yhtä laitetta voidaan pitää kaiken aikaa paikallaan tunnetussa pisteessä, jolloin laitteen sijainnin määrittämisen virhe tunnetaan. Tietoa käytetään maastossa toimivien laitteiden sijaintitietojen korjaamiseen joko reaaliaikaisesti tai jälkikäteen laskennallisesti. Metsäsovelluksissa hyväksyttävissä olevaan 1–3 metrin sijaintitarkkuuteen päästään tukiasemalla, joka voi olla jopa satojen kilometrien päässä mittauspisteestä. Maanmittaussovelluksissa, joissa vaaditaan sentti- tai millimetritarkkuutta, käytetään yleensä kahta laitetta ja paikannuksessa hyödynnetään vektorigeometriaa. Tällöin ei määritetä kuitenkaan korjauksia signaaliin vaan kahden laitteen välistä koordinaattieroja. Laitteiden pitää olla lähellä toisiaan, sillä paikannustarkkuus on riippuvainen laitteiden välimatkasta. Myös mittausaika on tällöin yleensä pitkä.

Reaaliaikainen kinemaattinen (Real Time Kinematic, RTK) mittaus on käytetyin GPS-menetelmä sovelluksissa, joissa halutaan päästä senttimetrin tarkkuustasoon. Menetelmä perustuu kahden toisiaan lähellä olevan GPS-vastaanottimen hyödyntämiseen. Nykyisin paljon käytetyssä VRS-mittauksessa (Virtual Reference Station) toista vastaanotinta ei viedä maastoon, vaan tukiaseman virtuaalinen paikka lasketaan kiinteiden tukiasemien mittausten perusteella.

Reaaliaikainen differentiaalipaikannus (RDGPS; Kuva 4.2) on Suomessa mahdollista Yleisradion välittämän maksullisen korjaus-signaalin avulla. Korjaus vaatii RDS-signaalin



Kuva 4.2. Reaaliaikainen DGPS-järjestelmä (Donner 1995).

vastaanottolaitteen ja -antennin (RDS = Radio Data System). Korjaamattomat GPS-mittaukset on jälkikäteen mahdollista korjata esimerkiksi Geodeettiselta laitokselta saatavien kiinteiden asematietojen avulla. Lisäksi on olemassa valmiita sovelluksia oman tukiaseman perustamiseen ja liikkuvan aseman sijainnin korjaamiseen olosuhteissa, joissa valmista korjaustietoa tai -signaalia ei ole saatavilla.

#### 4.3 GLONASS ja GALILEO

Venäjä on kehittänyt satelliittipaikannukseen oman GLONASS-järjestelmänsä (Global Navigation Satellite System), joka sisältää 15 satelliittia. Lopullisessa laajuudessaan satelliittien lukumäärän pitäisi olla 24. Järjestelmän signaalia ei häiritä, ja sen etuna GPS-järjestelmään on satelliittien suurempi inkliinaatiokulma, mikä helpottaa satelliittien näkyvyyttä etenkin korkeilla leveyspiireillä.

Euroopan komissio (EC) ja Euroopan avaruusjärjestö (ESA) ovat kehittämässä eurooppalaista paikannusjärjestelmää (GALILEO). Ensimmäinen testisatelliitti oli valmis vuonna 2006 ja koko 30 satelliittia sisältävän järjestelmän pitäisi valmistua vuosina 2018–2019. Ensimmäiset varsinaiset GALILEO-satelliitit laukaistiin radalleen lokakuussa 2011. Kiinalaisilla on myös oma globaali paikannusjärjestelmähänke COMPASS. Tulevaisuuden satelliittipaikannuslaitteet pystyvät hyödyntämään useita järjestelmiä, minkä ansiosta käytettävissä olevien satelliittien lukumäärä tulee kasvamaan huomattavasti nykyisestä.

Satelliittipaikannuksella pystytään tuottamaan vektorimuotoista piste-, viiva- ja aluepohjaista tietoa. Monilla paikannuslaitteilla voidaan tämän lisäksi kerätä ominaisuustietoa, joten laitteet soveltuvat erinomaisesti paikkaan sidotun metsävaratiedon keräämiseen. Merkittäviä käyttökohteita ovat metsien inventointi ja metsäsuunnittelu, leimikon suunnittelu, tietoverkon päivitys, hakkuiden rajojen päivitys ja uudistusalojen suunnittelu sekä luonnon monimuotoisuuden kannalta tärkeiden pienialaisten kohteiden paikantaminen.

GPS-tekniikkaa käytetään maastomittausten lisäksi puutavaran kuljetuksen ohjauksessa. Rekoissa olevat GPS-laitteet ja numeeriset kartat helpottavat oikeiden puutavarapinojen löytämistä ja mahdollistavat tehokkaan raaka-puun ohjauksen tehtaille. Satelliittipaikannuksen hyödyntäminen on yleistynyt viime vuosina nopealla tahdilla myös hakkuukoneissa. Yhdistämällä hakkuun yhteydessä kerätty puustotieto satelliittipaikannuksen tuottamaan koordinaattitietoon saadaan paikkaan sidottua ja helposti päivitettävää tietoa hakkuukertymästä ja metsävarojen muutoksista (Laasasenaho 2002). Hakkuukoneen paikannuksen avulla voidaan edistää myös esimerkiksi uhanalaisten biotooppien säilyttämistä hakkuiden yhteydessä.

Metsällisissä sovelluksissa GPS:n käyttöä rajoittaa huono toimivuus tiheän latvuspeiton oloissa, lähinnä kuusikoissa. Huono satelliittigeometria heikentää mittausedellytyksiä metsässä enemmän kuin avoimessa maastossa. Suurimpia ongelmia metsällisessä mittausympäristössä aiheuttavat korkeat ja jyrkät mäenrinnet yhdessä varttuneen puuston kanssa.

GNSS-mittauksiin liittyvää teoriaa on esitetty tarkemmin mm. Poutasen (2000, 2014) julkaisuissa.



## 5 Paikkatiedon hankinta

### 5.1 Olemassa olevat GIS-aineistot

Paikkatiedon hankinta on keskeinen osa-alue esimerkiksi metsätalouden toimintoihin tarkoitettua paikkatietojärjestelmää. Yleensä paikkatiedon hankinta on paikkatietojärjestelmän, tai laajemmin metsätietojärjestelmän, suurin kustannus. Tämän vuoksi paikkatiedon hankinnan menetelmiä on tutkittu runsaasti ja tutkimus on

myös tuottanut merkittäviä kustannussäästöjä metsätalouden operatiivisiin toimintoihin.

Paikkatiedon hankinnassa on kaksi vaihtoehtoa: olemassa olevan paikkatietoaineiston hyödyntäminen tai uuden aineiston hankinta. Nykyisin olemassa olevaa paikkatietoaineistoa on runsaasti saatavilla, jolloin tiedon tarve liittyy enimmäkseen olemassa olevien tietokantojen päivitykseen ja ylläpitoon.

#### **Metsäsuunnittelun kuviotietokannat**

- Yksityismetsät, metsähallitus, firmat
- Metsäsuunnittelu vs. leimikkosuunnittelu

#### **Valtakunnan metsien inventointi (VMI)**

- Koealaotantaan perustuva koko valtakunnan kattava
- Pienalueet monilähdeinventoinnin kautta (maastomittausten ja satelliittikuvien avulla)

#### **Maanmittauslaitoksen paikkatietoaineistot**

- Maastotietokanta, Kiinteistörekisteri

#### **Kunnat**

- Kaavat (esim. yleis-, asemakaava)

#### **Ympäristöhallinnon paikkatietoaineistot**

- Suojelualueet ja suojeluohjelmat, pohjavesialueet, valuma-alueet, uhanalaiset esiintymät

#### **Museovirasto**

- Kiinteät muinaisjäännökset ja muut rauhoitetut kohteet

#### **Oikeushallinto**

- Kiinteistöjen omistajatiedot
- Väestötietorekisteri

#### **Kaukokartoitus**

#### **Maastomittaukset**

#### **Paikkatietoaineistoja verkossa:**

*Maanmittauslaitoksen palvelusivu* (MML-aineistot ovat olleet ilmaisia 31.5.2012 lähtien):  
<http://www.maanmittauslaitos.fi>

*Suomen Ympäristökeskuksen ilmaiset aineistot:*  
<https://www.wp2.ymparisto.fi/scripts/oiva.asp>

*Tieteen tietotekniikan keskus (CSC), PaTuli-paikkatietopalvelu tutkijoille ja opiskelijoille:*  
<https://www.csc.fi/fi/-/paituli?inheritRedirect=true>

## 5.2 Kaukokartoitus

### 5.2.1 Kaukokartoituksen perusteita

Suurin osa paikkatietojärjestelmissä hyödynnettävistä rasteriaineistoista on tuotettu kaukokartoituksen avulla. Kaukokartoitus on tietojen keräämistä sähkömagneettisen säteilyn avulla ilman fyysistä kosketusta tutkittaviin kohteisiin. Kaukokartoitusjärjestelmän toiminnot ovat tiedon hankinta, siirto, tallennus, esikäsittely, tulkinta ja tulosten esittäminen. Passiivisessa kaukokartoituksessa rajoitutaan käyttämään ilmaisimia, jotka keräävät kohteiden emittoimaa (lähettämää) tai heijastamaa säteilyä. Aktiivisissa kaukokartoitusjärjestelmissä on säteilylähde, joka valaisee kohteen (esimerkiksi tutka). Havaittu energia on tällöin mittalaitteen itsensä lähettämää, tutkittavasta kohteesta heijastunutta säteilyä. Yleensä kaukokartoituksen apuna käytetään maastossa mitattua tai muusta aputiedosta tulkittua referenssitietoa, jota tarvitaan tulkinnan avuksi, mittalaitteen kalibroimiseksi sekä tulkintatulosten oikeellisuuden varmistamiseksi.

Kaukokartoituksella on useita etuja verrattessa sitä perinteiseen maastossa suoritettavaan metsien tai muiden luonnonvarojen inventointiin. Kaukokartoituksen keinoin saadaan edullisesti tietoa laajoilta alueilta samanaikaisesti. Kuvia voidaan ottaa eri ajankohtina, jolloin pystytään seuraamaan alueella tapahtuvia muutoksia. Numeerisella kaukokartoitusaineistolla tehdyt analyysit ovat lisäksi objektiivisia eli arvioijasta riippumattomia. Kaukokartoituksen avulla voidaan havainnoida myös muita aallonpituusalueita kuin ihmissilmän näkemän valon aallonpituudet. Suurin hyöty kaukokartoituksesta saadaan laajoilla alueilla ja vaikeasti saavutettavissa kohteissa sekä erilaisissa seurantatehtävissä. Kaukokartoituksen käyttöä rajoittavia tekijöitä ovat esimerkiksi sääolosuhteet (pilvisuus) sekä aineiston geometrinen erotuskyky ja tarkkuus.

Kaukokartoitustietoa voidaan hyödyntää pää- tai lisätietolähteenä esimerkiksi peruskartoituksessa, maa- ja metsätaloudessa, veden, jään ja lumen kartoituksessa, numeerisessa

sään ennustamisessa ja geologiassa. Suomen olosuhteissa taloudellisesti merkittävimmät sovellukset liittyvät metsätalouteen ja peruskartoitukseen.

Numeerista kuvaa voidaan verrata nippuun numeroitua ruutupaperia, jossa ruudut vastaavat kuvaelementtejä eli pikseleitä ja paperiarkit eri aallonpituuskanavia. kukin kuvaelementti saa kohteen lähettämää säteilyä vastaavan harmaasävyarvon. Tyypillinen harmaasävyarvojen esitykseen käytettävä bittimäärä on 8, jolloin kuvaelementtien harmaasävyarvot voidaan esittää skaalassa 0–255 ( $2^8 = 256$ ).

Informaation määrään kuvalla vaikuttaa ratkaisevasti kuva-aineiston resoluutio eli erotuskyky. Kaukokartoitusjärjestelmän geometrinen eli spatiaalinen erotuskyky ilmoittaa pienimmän kovalta erotettavan kohteen koon. Digitaalisilla kuvilla spatiaalinen erotuskyky rinnastetaan usein pikselikokoon. On kuitenkin muistettava, että pikselikokoa voidaan kuvien esikäsittelyssä muuttaa alkuperäisestä, jolloin vastaavuus spatiaaliseen resoluutioon katoaa. Radiometrinen erotuskyky viittaa järjestelmän kykyyn havaita säteilyarvoeroja (kirkkaueroja). Esimerkiksi lämpökuvauksen tapauksessa tämä tarkoittaa lämpötilaerojen havaitsemista. Spektrin erotuskyky ilmaisee kaukokartoitusjärjestelmän kyvyn tunnistaa säteilyn eri aallonpituuksia ja temporaalinen erotuskyky kyvyn tunnistaa säteilyssä tapahtuneita ajallisia muutoksia, mikä käytännössä tarkoittaa kuvauksen toistettavuutta. Geometrinen eli spatiaalinen tarkkuus (sijaintitarkkuus) ilmoittaa, kuinka hyvin kuvan kohteet ovat niiden maastosijaintia vastaavilla paikoilla. Kuvien visuaalisen tarkastelun kannalta tärkeä asia on kontrasti, joka määräytyy lähinnä spatiaalisen ja radiometrisen erotuskyvyn perusteella. Kontrastilla tarkoitetaan eroa kohteen ja taustan mittausarvoista kuvalla.

### 5.2.2 Numeeriset ilmakuvat

Lentokoneesta tapahtuvassa ilmakuvauksessa voidaan käyttää näkyvän valon (0.5–0.7  $\mu\text{m}$ ) lisäksi lähi-infran (0.7–0.9  $\mu\text{m}$ ) aallonpituusalueita. Hyödynnettäessä lähi-infran aallonpituus-

alueelle herkkää filmiä tai ilmaisinta kohteet eivät kuvaudu samanvärisinä kuin ihmissilmälle, joten kuvaa nimitetään vääräväriseksi. Havu- ja lehtimetsän ominaissäteily on näkyvän valon alueella suunnilleen samanlaista, mutta lehtimetsä säteilee huomattavasti enemmän lähi-infraa kuin havumetsä. Näin ollen vääräväriskuvilla lehtipuusto näkyy punertavana värisävynä. Tämä onkin tärkein etu vääräväriskuvien käytössä kasvillisuuden kartoituksessa verrattuna muuhun kuvamateriaaliin. Vääräväri-ilmakuvia onkin käytetty metsäsuunnittelun apuvälineenä 1980-luvulta lähtien.

Tietotekniikan kehittymisen myötä analogisten ilmakuvien mittauksesta ja tulkinnasta siirryttiin 1990-luvun lopulla digitaalisiin eli numeerisiin sovelluksiin. Alkuvaiheessa numeerisia ilmavalokuvia tuotettiin skannaamalla analoginen kuva negatiivivedoksesta tarkoitukseseen soveltuvalla skannerilla. Nykyisin ilmakuvat otetaan suoraan digitaalisella mittakameralla, jonka sensorina on CCD-ilmaisimatriisi (Charge Couple Device), kuten useimmissa keilaamattomissa satelliittisensoreissa. Numeerinen ilmakuva on mahdollista oikaista haluttuun koordinaatistoon tunnettujen tukipisteiden, kamerasensorin kalibrointitietojen ja numeerisen korkeusmallin avulla. Oikaisun tuloksena syntyvän digitaalisen ortoilmakuvan etuna on, että se yhdistää ilmakuvan informaation kartan spatiaaliseen tarkkuuteen. Lisäksi kuvan mittakaavaa on mahdollista muuttaa mielivaltaisesti. Ilmakuvilta voidaan tehdä sekä visuaalista että numeerista tulkintaa joko metsikkö- tai puutasolla. Numeerisia ilmakuvia on jo pitkään käytetty pohjamateriaalina kartta- ja GIS-sovelluksissa sekä kuvaruudulla tapahtuvassa visuaalisessa tulkinnassa. Nykyisin numeerisia ilmakuvia hyödynnetään metsäsuunnittelussa yhdessä laserkeilausaineiston kanssa.

### *5.2.3 Optisen aallonpituusalueen satelliittikuvat*

Satelliittikuva koostuu elementeistä, joiden koko maanpinnalla on vakio. Kuvaelementtiä vastaavasta maastonkohdasta heijastuva säteily mitataan satelliitissa sijaitsevalla havaintolait-

teella, joka rekisteröi heijastuvaa valoa tai lämpösäteilyä spektrin eri osista eri kanaville. Tällä hetkellä avaruudessa on toiminnassa lukuisia määriä satelliitteja, joista metsän kaukokartoitustehtävissä yleisimmin käytetään Landsat-, SPOT-, NOAA-, MODIS-, IRS-, IKONOS-, QuickBird 2 ja GeoEye -satelliittikuvia. Näistä NOAA edustaa karkean spatiaalisen resoluution satelliittikuvia, Landsat, SPOT ja IRS keskiresoluution kuvia ja IKONOS, QuickBird 2 sekä GeoEye korkean resoluution kuvia.

Yleinen satelliittikuvausmenetelmä on keilaus, jossa maastoa ”pyyhkitään” eli keilaetaan lentosuuntaan nähden poikittaisin linjoin, jotka peittävät osaksi toisiaan. Linjan leveys on riippuvainen havaintokojeen hetkellisestä avauskulmasta. Keilaus voi olla yksikanavaista (esimerkiksi lämpökuvaukset) tai monikanavaista. Monikanavaisessa keilauksessa pyritään havainnoimaan useita aallonpituusalueita samanaikaisesti. Suuren kuvauskorkeuden vuoksi satelliiteissa tapahtuva keilaus tehdään kokonaisavauskulman pienenä vuoksi värähtelevän peilin avulla.

Metsän ja yleensäkin kasvillisuuden inventoinnissa yleisesti käytettyä satelliittikuva-aineistoa ovat Landsat-satelliittikuvat, joista uusimmat perustuvat monikanavaisen keilaukseen. Landsat oli käynnistyessään vuonna 1972 ensimmäinen nimenomaan luonnonvarojen kaukokartoitukseen tähdännyt satelliittiohjelma. Landsat-ohjelman tarkoituksena oli hankkia kaukohavaintoja kaikkialta maapallosta ja jakaa niitä kaikille kiinnostuneille lähes rajoituksetta. Eräänä erityistavoitteena oli maailman vehnäsadon arviointi. Ohjelma on onnistunut täyttämään tavoitteensa hyvin. Viimeisin Landsat-sarjan satelliitti (Landsat 8) lähetettiin avaruuteen vuonna 2013. Satelliitti kiertää maapalloa lähes napojen kautta kulkevaa auringon mukaan tahdistettua ympyrärataa noin 705 km korkeudella (Landsat 8) maan pinnasta. Täsmälleen samaa rataa satelliitti kulkee 16 vuorokauden välein. Satelliiteissa on useita havaintovälineitä, joilla tietoja voidaan tallentaa ja lähettää maahan.

Landsat-satelliiteissa (Landsat 4, Landsat 5, Landsat 7 ja Landsat 8) tärkein havaintovä-

line on ollut keilain eli temaattinen kartoitin (Thematic Mapper, TM). Kullekin aallonpituusalueelle eli kanavalle on oma ilmaisimensa. Keilauslinjoja, joiden leveys 185 km, on yhden sijasta 6 kpl, jolloin keilaus voidaan tehdä hitaammin (jokaisella kanavalla 6 ilmaisinta). Landsat 4,5 ja 7 -satelliiteissa oli seitsemän aallonpituusalueita, kanavat 1–3 tallensivat näkyvän valon aallonpituusalueita (0.4–0.7  $\mu\text{m}$ ), kanava 4 lähi-infraa (0.7–1.0  $\mu\text{m}$ ), kanavat 5 ja 7 keski-infraa (n. 1.5–2.2  $\mu\text{m}$ ). Kanavaa kuusi kutsutaan lämpökanavaksi, sillä se mittaa kohteen lähettämää lämpösäteilyä. Landsat TM -kuvan spatiaalinen erotuskyky on näkyvän valon ja lähi-infran alueella 30 x 30 m, lämpökanavan erotuskyky on 120 x 120 m. Vuonna 1999 laukaistun Landsat 7:n havaintolaitteena on edeltäjästään paranneltu temaattinen kartoitin ETM+ (Enhanced Thematic Mapper +). Uutta oli 15 metrin pankromaattinen kanava ja lämpökanavan parempi spatiaalinen erotuskyky (60 m). Vuonna 2013 laukaistussa Landsat 8:ssa on edeltäjiään enemmän kanavia; kaikkiaan 11 kappaletta: 5 näkyvän valon sekä 3 lähi- ja keski-infran aallonpituusalueilla. Näiden lisäksi on 2 lämpökanavaa ja yksi pankromaattinen kanava.

Landsatin lisäksi muita ympäristön inventoinnissa, kartoituksessa ja seurannassa käytettyjä korkean ja keskiresoluution satelliitteja ovat mm. SPOT, NOAA ja MODIS. NOAA on korkean spatiaalisen resoluution (1.1 km) sääsatelliitti, jonka sensori on AVHRR (Advanced very High Resolution Radiometer). Kanavia on viisi ja kuvia saadaan kultakin alueelta neljä kertaa päivässä.

Viimeisen 15 vuoden aikana satelliittikuvauksen merkittävimpana kehitysaskelena on ollut spatiaalisen resoluution huomattava parantuminen. Vuonna 1999 lähetettiin ensimmäinen kaupallinen alle metrin spatiaaliseen erotuskykyyn pystyvä satelliitti, IKONOS, jonka resoluutio on pankromaattisella kanavalla 0.8 m (pankromaattinen = koko aallonpituusalue yhdessä kanavassa) ja monikanavaisena (neljä kanavaa) 3.2 m. Satelliitti kattaa aallonpituusalueet 0.45  $\mu\text{m}$  – 0.9  $\mu\text{m}$  ja sen kuvanala on 11 km x 11 km. Vuonna 2001 laukaistiin radalleen

yhdysvaltalainen QuickBird 2 –satelliitti, jonka spatiaalinen erotuskyky on pankromaattisena 0,61 m. Tällä hetkellä tarkin satelliittikuva on GeoEye-1, jonka spatiaalinen resoluutio on pankromaattisena 0,41 m. Kapeiden aallonpituusalueiden, kuten punaisen, sinisen, vihreän ja lähi-infran kuvien resoluutio on tyypillisesti nelinkertainen verrattuna pankromaattiseen kuvaan; esimerkiksi Geo-Eye-1:llä se on 1,64 m.

Korkean resoluution satelliittikuvia voidaan hyödyntää erittäin laajojen alueiden, kuten Euroopan metsävarojen inventoinnissa. Esimerkiksi NOAA-kuvien avulla voidaan nopeasti ja edullisesti tuottaa tilastotietoja ja metsävarakartoja Euroopan tasolla (Häme ym. 2002). Keskiresoluution satelliittikuvien luotettavuus on puolestaan parhaimmillaan silloin, kun arvioidaan esimerkiksi laajojen alueiden metsäpeittoa, lehtipinta-alaindeksiä (Rautiainen 2005) tai maankäyttöluokkia. Metsäluokista avohakkuut erottuvat helposti, samoin taimikot erotetaan vanhemmista metsiköistä. Metsikön sulkeutumisen jälkeen säteilyarvot muuttuvat vain vähän (ns. saturoituminen, Päivinen ym. 1992), mikä on yleinen ongelma satelliittikuvien ja ilmakuviin 2D-tulkinnassa. Tämän ilmiön vuoksi esimerkiksi puuston runkotilavuuden ennustaminen kuviotasolla ei onnistu optisen aallonpituusalueen satelliittikuvilta kovin tarkasti.

Korkean resoluution satelliittikuvat ovat kilpailijoita numeerisille ilmakuville. Kuvia voidaan hyödyntää esimerkiksi kartoituksessa, joka tähän asti on Suomessa tehty täysin ilmakuviin avulla. Metsätaloudessa korkean resoluution satelliitteja voitaisiin periaatteessa käyttää esimerkiksi metsäsuunnittelun pohjamateriaalina, mutta toistaiseksi kuvien korkea hinta on jarruttanut tätä kehitystä. Tilanne on kuitenkin nopeasti muuttumassa: Yhdysvallat on äskettäin laskenut pienimmän sallitun kaupallisten satelliittien maastoresoluution 0,5 metristä 0,25 metriin. Myös Google on äskettäin hankkinut kaupallisen satelliittiyhtiön ja Google Skybox:n suunnitelmassa on laukaista vuoteen 2018 mennessä 24 satelliitin konstellaatio, joka kattaisi maapallon kokonaisuudessaan kolme kertaa päivässä. Mielenkiintoinen mahdollisuus satelliittikartoituksessa ovat myös piensatelliitit, jotka voidaan ohjelmoida kuvaa-

maan haluttuja alueita kustannustehokkaasti (Vastaranta ym. 2015).

Spatiaalisen resoluution parantumisen ohella viime vuosien satelliittikuvauksen trendejä ovat suuret satelliittiohjelmat sekä kiinnostus globaaleihin ympäristöongelmiin: nykyaikaisissa kaukokartoitussatelliiteissa on hyvin monta erilaisten ilmiöiden mittaukseen ja seurantaan tarkoitettua instrumenttia. Esimerkiksi Euroopan avaruusjärjestö on lähettänyt avaruuteen Envisat ympäristön kartoitussatelliitteja. Envisat havainnoi globaaleja ympäristöongelmia, joita ovat esimerkiksi otsonikato ja ilmastonmuutos.

#### 5.2.4 SAR-tutkakuvat

Tutkakuvien keskeisenä etuna optisen aallonpituusalueen kaukokartoituskuviin verrattuna on niiden saatavuus (temporaalinen resoluutio) kaikissa kuvausolosuhteissa. Tutkakuvaus, etenkin satelliitteihin sijoitetut SAR-tutkat (Synthetic Aperture Radar, Synteettisen apertuurin tutka, suuren laskennallisen läpimitan tutka), ovatkin mielenkiintoinen vaihtoehto kehitettäessä menetelmiä operatiiviseen metsävarojen inventointiin, mikäli niiden tarkkuus riittäisi koeala- ja kuviotason metsävaratiedon estimointiin.

Tutkakuvauksessa mitataan havaintolaitteen itsensä lähettämää säteilyä, eli kyseessä on aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä. Havainnointilaitteessa oleva lähetin lähettää toistuvia mikroaalloalueen säteilyimpulsseja tietyllä taajuudella. Laitteessa oleva vastaanotin puolestaan mittaa kohteesta takaisinsiroavaa säteilyä. Sekä säteilyn lähetys että vastaanotto tehdään yleensä samalla antennilla, jonka avulla lähetettävä säteily suunnataan kapeana keilana haluttuun suuntaan. Laitteistoon kuuluu tämän lisäksi tallennin, joka tallentaa takaisinsironneen signaalin. Tallennettu data käsitellään myöhemmin tietokoneella ja lopputuotteena on kohdetta esittävä kaksiulotteinen tutkakuva. Yksittäinen tutkakuva sisältää periaatteessa kolmenlaista informaatiota: 1) havaittu takaisinsironnan voimakkuus, 2) havaitun signaalin vaihe ja 3) etäisyys kohteeseen (lähetyksen ja

vastaanotetun signaalin aikaeroa tutkimalla voidaan laskea kohteen etäisyys laitteistosta). Tutkat käyttävät sähkömagneettisen säteilyn mikroaalloaluetta, joka vastaa aallonpituuksia noin senttimetristä metriin. Näin ollen sääolosuhteet ja ilmakehä eivät haittaa tutka-aaltojen etenemistä, joten tutkan etuna optisiin havaintolaitteisiin verrattuna on sen kyky kerätä aineistoa myös pimeällä ja pilvisellä säällä. Tutkan havaitsemaan takaisinsirontaan vaikuttaa ensinnäkin kohteen ominaisuudet mutta myös tutkan ominaisuudet. Esimerkiksi käyttämällä kuvauksessa eri mikroaallojen taajuuskaistaa, säteilyn polarisaatiota tai kuvausgeometriaa, saadaan kohteesta moniulotteista tietoa.

Nykyisin myös satelliittitutkat tuottavat metsistä varsin yksityiskohtaista tietoa, sillä viime vuosina on avaruuteen lähetetty useita satelliitteja, joiden spatiaalinen erotuskyky on 1–3 m. Esimerkiksi TerraSAR-X -satelliitti mahdollistaa 1 m resoluution ja täydellisen polarimetrian (polarisaatio = värähtelysuunta), stereokuvauksen sekä interferometrian (kahden tutkasignaalin vaihe-erojen määrittämisen). Hyvän resoluution ja monen kanavan avulla (monta taajuutta, polarisaatiota, mittauskulmaa, mittaushetkeä) tutkasatelliiteista saatetaan lähitulevaisuudessa saada myös metsätalouden kannalta arvokasta ja varsin tarkkaa tietoa. Eri-tyisen mielenkiintoisia sovelluksia tutkakuvien hyödyntämisen näkökulmasta ovat laajojen alueiden metsä- ja luonnonvarojen muutoksiin liittyvät seurantahankkeet.

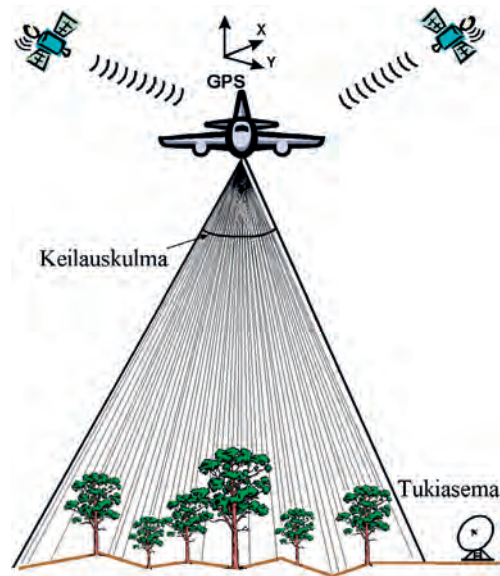
#### 5.2.5 3D-kaukokartoitus - laserkeilaus

Viime vuosien merkittävin teknologiaharppaus metsävarojen inventoinnissa on ollut lähi-infran aallonpituusalueella toimivien laserkeilaimien (ALS=airborne laser scanning) hyödyntäminen. Laserkeilaus tehdään yleensä lentokoneesta tai helikopterista (Kuva 5.1). Laser koostuu keilainosasta, laserpulsit tuottavasta lasertykistä ja ilmaisinosasta, joka tulkitsee vastaanotetun signaalin ja määrittää sen perusteella etäisyyden kohteeseen. Lentokoneessa olevan laserkeilaimen lasertykin lähettämä pulssi osuu kohteeseen ja palaa takaisin ilmaisimelle,

jolloin voidaan määrittää kohteen ja laserin välinen etäisyys pulssin kulkuajan perusteella. Kun lasertykin asento ja paikka ovat tarkasti tunnetut, mitattu etäisyys lasertykin ja kohteen (esimerkiksi puun) välillä voidaan muuttaa korkeudeksi. Laserkeilauksella voidaan tuottaa metsikön rakennetta kuvaava pistepilvi tai pintamalli (Digital surface model, DSM) sekä tarkka maanpinnan korkeutta kuvaava maastomalli (Digital terrain model, DTM). Puuston latvusmalli (Canopy height model, CHM) saadaan vähentämällä pintamallista (DSM) maaston korkeus (DTM). Pistepilvet sekä siitä tuotetut maastomalli ja latvusmalli voidaan nähdä laserkeilauksen perustuotteiksi.

Käytännössä maasto- ja latvusmalli ovat rasterimuotoisia karttatasoja, joiden resoluutio vaihtelee 0.5 m – 2 m. Puuston latvustoa kuvaava CHM-rasteri muodostetaan antamalla jokaiselle rasterisolulle arvo korkeimmasta ensimmäisestä paluukaiusta. Näin CHM kuvaa puuston pituutta. Vastaavasti DTM:n muodostamisessa hyödynnetään viimeisiä kaikuja, jotka tulevat maasta. Rasterisoluille, joista ei ole suoraa maanpinnan korkeuden tai puuston pituuden havaintoa, interpoloidaan arvo ympäröivien rasterisolujen tietojen avulla. Interpoloitujen solujen määrä riippuu käytetyistä laserkeilausparametreistä (lentokorkeus, keilauskulma, pulssitiheys) ja metsikön rakenteesta. Tavoitteena kuitenkin on, että mahdollisimman monesta rasterin solusta olisi suora mittaushavainto, eikä interpolointia tarvittaisi. Rasterin solukoko tulee siis sovittaa käytettyyn pulssitiheyteen (Vastaranta ym. 2015).

Metsien laserkeilauksessa yleisesti käytetyt lentokorkeudet vaihtelevat 400 m–4000 m maanpinnan yläpuolella, jolloin laserkeilan koko maanpinnalla on laitteesta riippuen 0.1 m – 2 m. Yleisimmin käytetty keilauksen avauskulma nadiirista lentosuuntaa vastaan on n. 15 astetta, jolloin lentolinjan leveys maastossa on 100 m - 1000 m. Lentolinjojen välille suunnitellaan yleensä 10–50% sivupeitto. Lopullinen pistepilvi muodostuu lähetettyjen pulssien paluukaiuille lasketuista x, y, ja z-koordinaateista.



Kuva 5.1. Laserkeilaimen mittausperiaate (Holopainen ym. 2000).

Käytetyt pulssitiheydet vaihtelevat 0.5–20 pulsia/m<sup>2</sup> ja yhdestä pulssista saadaan yleisimmin yhdestä neljään paluukaikua (pistettä), mutta uusimpia prosessointitekniikoita hyödyntämällä jopa huomattavasti enemmän.

Metsien laserkeilausinventointi voidaan jakaa aluepohjaiseen ja yksittäisten puiden mittaukseen perustuvaan menetelmään. Aluepohjainen menetelmä (area based statistical approach, ABA) noudattelee perinteisen tilastolliseen mallintamiseen perustuvan kaukokartoitustulkinnan periaatteita: Otosyksiköstä, esimerkiksi tietyn kokoisesta rasteriruudusta, lasketaan (irrotetaan) kaukokartoituspiirteitä, joiden avulla estimoidaan kiinnostuksen kohteena olevia puusto- ja metsikkötunnuksia. Yksittäisten puiden mittaukseen perustuvassa menetelmässä eli yksinpuinmenetelmässä (Individual Tree Detection, ITD, Single Tree Remote Sensing, STRS) puolestaan mitataan tai estimoidaan puiden pituutta, latvuksen kokoa ja pulajia, joiden avulla voidaan arvioida muita kiinnostuksen kohteena olevia puutunnuksia, kuten rinnankorkeusläpimittaa ja tilavuutta. Aluepohjaista tulkintaa voidaan tehdä harvapulssisella laserkeilausaineistolla (pulssitiheys

0.5–2 pulssia / m<sup>2</sup>). Yksinpuintulkinta vaatii hieman tiheämpipulssista (kalliimpaa) aineistoa (pulsstitiheys yli 2 pulssia / m<sup>2</sup>).

Metsäsuunnitteluun liittyvässä metsävaratietojen hankinnassa on siirrytty puustointiventoinnin osalta harvapulssiseen laserkeilaukseen, aluepohjaiseen piirteiden irrotukseen ja ei parametriseen –estimointiin perustuvaan inventointimenetelmään. Estimointimenetelmän lähtökohtana on, että kukin otosyksikkö liitetään ALS- ja ilmakuvapiirteiltään lähimpiin maastossa mitattuihin otosyksiköihin (koealoihin). Näin jokaiselle tulkittavalle otosyksikölle saadaan liitettyä maastomittaustieto. Keskeistä menetelmässä on, että jokaisesta tulkittavan metsäalueen ositteesta on oltava riittävä määrä koealoja. Näin ollen aluepohjainen ALS-menetelmä vaatii tuekseen laajan, tarkasti mitatun maastoaineiston. Ainakin toistaiseksi estimoinnin apuna käytetään numeerisia vääräväri-ilmakuvia, joiden avulla voidaan parantaa puulajiositteiden tulkintatarkkuutta.

### 5.2.6 3D-kaukokartoitus - Ilma- ja satelliittikuvat

Laserkeilauksen vahvuus on, että samalla tekniikalla saadaan havainnot sekä puuston latvuksesta että maanpinnasta. Suomi laserkeilataan kokonaisuudessaan kuluvan vuosikymmenen aikana. Tekniikan kehittyessä lentolaserkeilausta pystytään tekemään entistä korkeammalta, mikä pienentää aineiston hankintakuluja. Toisaalta, kun laserkeilauksella saadaan tuotettua tarkka maastomalli, niin latvusmalli voidaan tuottaa myös vaihtoehtoisilla menetelmillä.

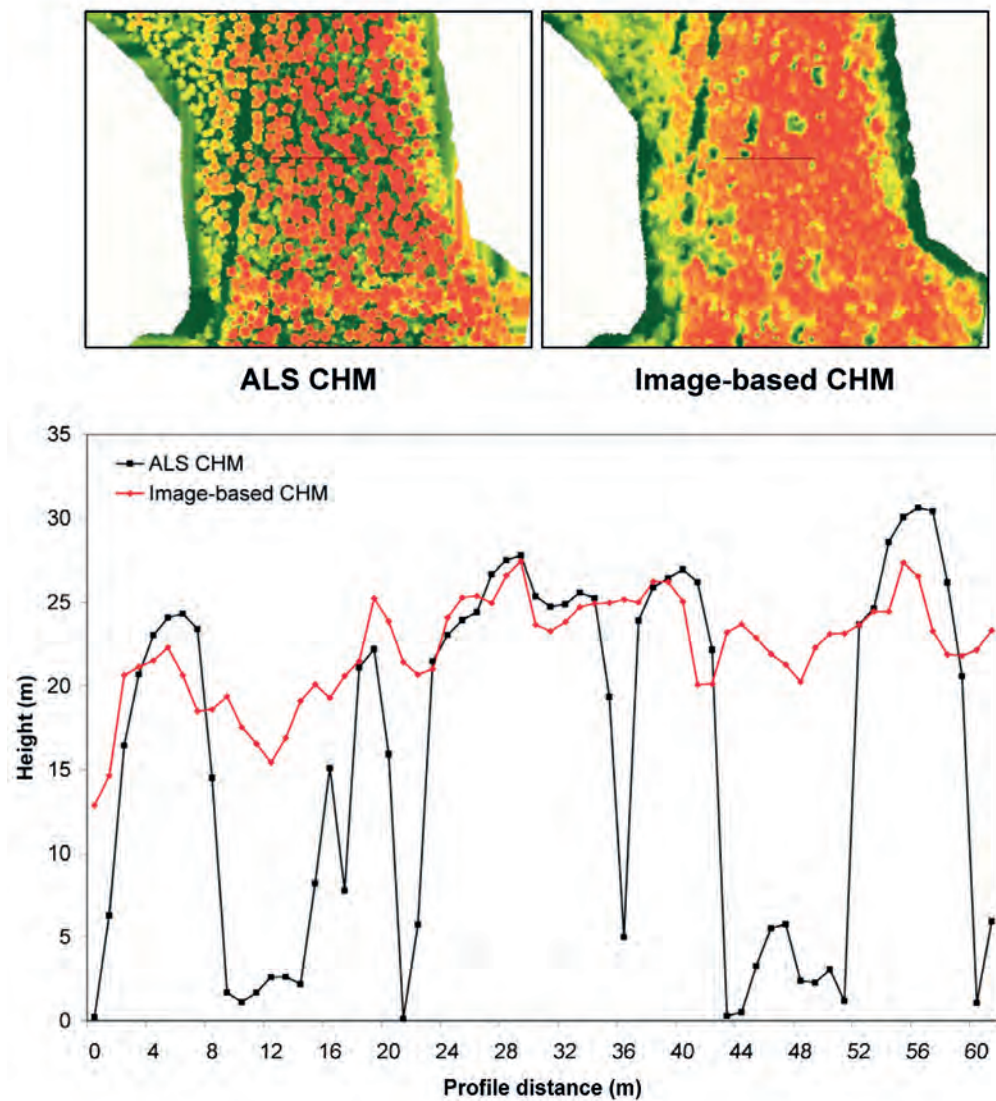
Ilmakuvien yhteensovitusmenetelmät ovat kehittyneet viime aikoina ja niitä on käytetty kolmiulotteisten pistepilvien muodostamiseen (vrt. Laserkeilaus). Ilmakuvien maastoresoluutio vaihtelee 5 cm- 1 m välillä, jolloin 3D-pistepilvien tiheys on 1–400 pistettä/m<sup>2</sup>. Ilmakuvaukseen perustuvan korkeusmittauksen vaatimuksena on, että kohde tulee havaita vähintään kahdella kuvalla. Metsäalueilla korkeustieto saadaan ennen kaikkea ylimmästä latvuskerroksesta. Keskeiset läpäisevyyteen vaikuttavat tekijät metsäalueilla ovat kasvillisuuden tiheys

sekä kuvien spatiaalinen resoluutio. Pääsääntöisesti ilmakuvaukseen perustuva menetelmä ei ole luotettava maanpinnan korkeuden havaitsemiseen metsäalueilla. Ilmakuvien avulla muodostettu pintamalli voidaan kuitenkin yhdistää laserkeilauksen avulla tuotettuun maanpintamalliin, kuten MML:n Suomesta tuottamaan valtakunnalliseen korkeusmalliin, jolloin ilmakuvapintamallien analysoinnissa voidaan käyttää 3D-analyysimenetelmiä (Vastaranta ym. 2015).

Laserkeilaukseen verrattuna ilmakuvauksen etu laajoilla alueilla on parempi kustannustehokkuus. Pienemmillä alueilla voidaan puolestaan saavuttaa hyvä kustannustehokkuus käyttämällä edullisia kuluttajakameroita joko pienlentokoneista tai lennokeista käsin. Ilmakuvien etu laserkeilaukseen verrattuna on myös sävytieto ja visuaalinen kuvainformaatio, mitkä parantavat aineistojen tulkittavuutta. Kuvassa 5.2 on vertailtu kahden ajankohdan laserkeilauspintamallin ja ilmakuvapintamallin tuottamaa tulosta.

Korkean resoluution optisen aallonpituusalueen satelliittikuvat sekä SAR-kuvaukseen perustuvat menetelmät ovat vaihtoehtoisia tapoja tuottaa pintamalleja. Pintamallien resoluutiot ovat kuitenkin tällöin karkeampia, yleisimmin n. 5–10 m, mutta menetelmien etuna on hyvä temporaalinen (ajallinen toistettavuus) resoluutio. Tällaisia aineistoja voisi olla mahdollista saada jopa viikoittain. SAR-kuvista pintamalli voidaan tuottaa mittaamalla takaisinsironneen säteilyn vaihe-eroja (interferometria) tai hyödyntämällä useammalta tutkakuvalta tehtävää stereomittausta (radargrammetria). Tutkakuvilta tehtävä stereomittaus on periaatteessa melko samanlaista kuin ilmakuvien stereomittaus (fotogrammetria). Kuvassa 5.3. on verrattu lentolaserkeilauksella, ilmakuvauksella sekä SAR-interferometrialla ja SAR-radargrammetrialla tuotettuja latvuston pintamalleja.

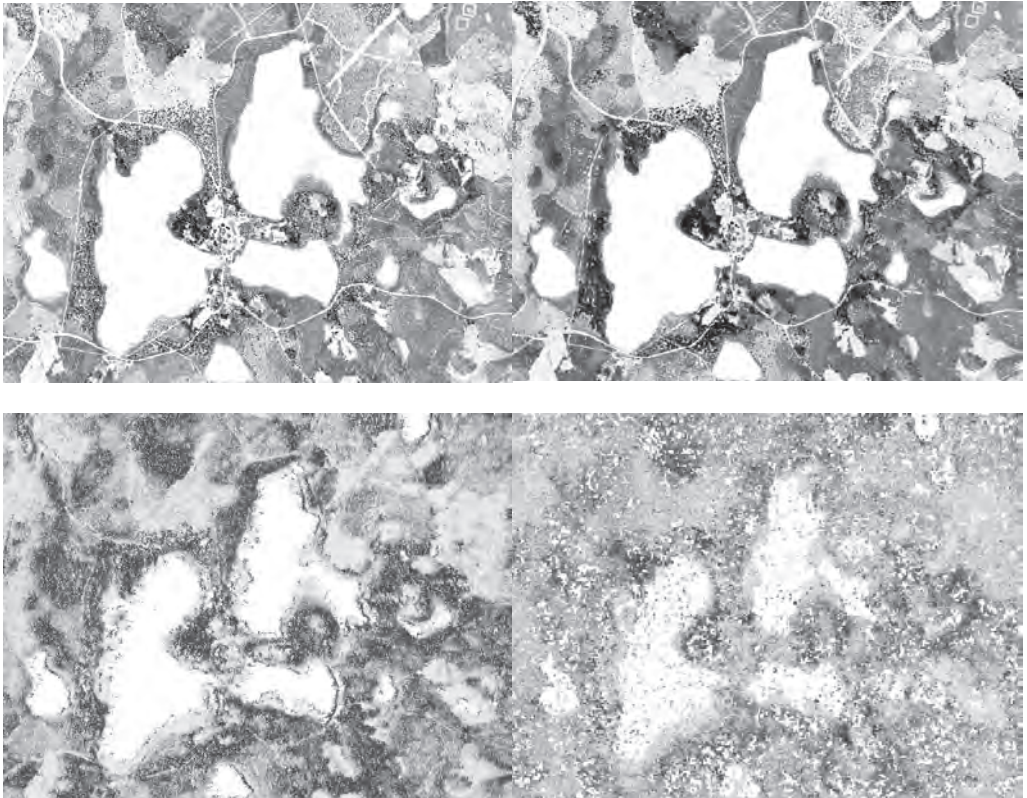
Myös optisen alueen satelliittikuvien resoluutio on parantunut merkittävästi ja useat laitteet tuottavat kuva-aineistoja alle 0.5 m maastoresoluutiolla. Monet satelliittikuvat voidaan tilata stereopeitolla, jolloin niiltä voidaan tuottaa korkeusmalleja ja pistepilviä



Kuva 5.2. Laserkeilaus- (ALS CHM) ja Ilmakuvapintamallin (Image-based CHM) vertailu. Laserkeilaus havaitsee latvusaukot yksityiskohtaisemmin. Toisaalta myös ilmakuvapintamallilla pystytään havaitsemaan hyvällä tarkkuudella puuston latvusto (Vastaranta ym. 2014).

kuvansovitusmenetelmillä vastaavasti kuten ilmakuvilta. Satelliittikuviin perustuvien korkeusmallien laatu saattaa olla hieman huonompi kuin ilmakuvakameroilla johtuen pidemmästä kuvausetäisyydestä ja tyypillisesti heikommasta geometriasta. Näkyvän valon alueella toimivien satelliittilaitteiden merkittävin haaste on kuvien saatavuus pilvettömään aikaan.

Ilmakuvauksessa kuvaus voidaan suorittaa joustavasti silloin, kun pilviä ei ole tai pilvien alapuolelta, mutta kaupallisten satelliittien ylitysaikojia ei ole mahdollista optimoida pilvettömään aikaan. Satelliittien hyöty on kuitenkin niiden globaali kattavuus. (Vastaranta ym. 2015).



Kuva 5.3. Puuston latvustomallin muodostaminen 3D-kaukokartoituksen avulla. Ylhäällä vasemmalla lentolaserkeilaukseen perustuva latvustomalli, ylhäällä oikealla ilmakuvien fotogrammetriseen tulkintaan perustuva malli, alhaalla vasemmalla SAR-interferometriaan perustuva malli ja alhaalla oikealla SAR-radargrammetriaan perustuva malli (Holopainen ym. 2015).

### 5.2.7 Kaukokartoituksen hyödyntäminen Suomen metsätaloudessa

Metsiin liittyvää tietoa voidaan kerätä kaukokartoituksen avulla monella tasolla. Kartoitus on mahdollista tehdä koskien yksittäisiä puita, tietyn suuruisia ja muotoisia koealoja, metsikkökuvioita, metsätiloja tai suurempia metsäalueita. Kaukokartoitusta on perinteisesti käytetty apuna sekä kuvioittaisessa arvioinnissa että laajojen metsäalueiden otantapohjaisessa inventoinnissa. Uusin teknologia mahdollistaa myös puukohtaiset mittaukset. Kaukokartoitustietoa voidaan käyttää pää- tai lisätietolähteenä metsäsuunnittelun ja metsien inventoinnin lisäksi puunhankinnan strategisessa ja operatiivisessa suunnittelussa, puun korjuussa ja

kuljetuksessa, metsäkiinteistöjen hallinnassa ja arvonmäärityksessä, metsänhoitotöiden suunnittelussa ja seurannassa sekä luonnon monimuotoisuuteen liittyvien tunnusten, kuten avainbiotooppien kartoituksessa.

Metsiä kuvaavan tiedon tarkkuusvaatimus vaihtelee käyttökohteen mukaan. Pidemmän aikavälin strategisessa suunnittelussa, esimerkiksi suuremman metsäalueen hakkuumahdollisuuksien ja hakkuukertymän rakenteen tarkastelussa, tärkeätä on tiedon harhattomuus sekä se, että pienetkin ositteet eivät katoa tiedonkeruussa. Operatiivisen toiminnan (puunhankinta tai metsänhoitotyöt) ohjausta varten tiedon harhattomuuden vaatimuksesta voidaan jossakin määrin tinkiä. Puunhankinnan ohjauksessa tarvitaan tietoa kuvion sisäisestä

Taulukko 5.1. Yhteenveto, Metsien inventointiin soveltuvia kaukokartoitusmateriaaleja

Materiaali	Spat. resol.	Spektrinen resoluutio	Temporaalinen resoluutio	€/ha
Ilmakuvat, lentokorkeus 4000-5000 m	0.25–1m	3 kanavaa, näkyvä valo + lähi-infra	Kuvaus tilattava, pilvisyys ongelma	0.05–0.5 €/ha
Ilmakuvat, lentokorkeus 1000-2000 m	0.05–0.25 m	3 kanavaa, näkyvä valo + lähi-infra	Kuvaus tilattava, pilvisyys ongelma	0.1–1 €/ha
Korkean resoluution satelliittikuvat	0.5–3m	1–3 kanavaa	Kuvaus tilattava, pilvisyys ongelma	0.1–0.5 €/ha
Keskiresoluution satelliittikuvat	10–50 m	3–11 kanavaa, näkyvä valo, lähi-infra, lämpökanava	Kuvaus automaattinen (15–20 päivän välein) pilvisyys ongelma	vanhat kuvat ilmaisia, muut alle 0.01 €/ha
Karkean resoluution satelliittikuvat	50–1000 m	3–7 kanavaa, näkyvä valo, lähi-infra, lämpökanava	kuvaus automaattinen monta kuvaa päivä – 20 päivää, pilvisyys	ilmaisia
Keskiresoluution tutkasatelliittikuvat	20–30 m	Mikroaaltojen aallonpituus-alue, yksi kanava	Kuvaus tilattava, pilvet ei ongelma, kuvia useita päivässä	0.01 €/ha
Korkean resoluution tutkasatelliittikuvat	1–3 m	Mikroaalto, useita polarisaatioita ja kanavia (esim X ja L)	Kuvaus tilattava, pilvet ei ongelma, (5–20 päivää)	0.5–1 €/ha
Spektrometriaineistot	1–5 m	Satoja kanavia, näkyvä valo, lähi-infra	Kuvaus tilattava, pilvisyys ongelma	1–10 €/ha
Laserkeilaus		Lähi-infra, Korkeus + intensiteetti, tulevaisuudessa useampikanavaista	Kuvaus tilattava	0,4–3 €/ha (pelkkä ALS-data)

vaihtelusta. Tiedon hankkiminen perinteisen maastoinventoinnin keinoin on hidasta ja kallista. Kaukokartoitustieto on luonnostaan paikkaan sidottua, joten sen avulla on mahdollista hallita käsittelykuvioiden sisäistä vaihtelua. Ongelmaksi jää riittävän tarkkuuden saavuttaminen.

Visuaalista ilmakuvatulkintaa on käytetty metsäsuunnittelun apuvälineenä aina 1940-luvulta lähtien. Automaattisten kuvatulkinna-menetelmien kehittäminen alkoi välittömästi ensimmäisen luonnonvarojen inventointiin tarkoitetun Landsat-satelliitin (1972) laukaisun jälkeen. Optisen alueen satelliittikuvapiirteiden onkin todettu korreloivan kohtuullisesti esimer-

kiksi maankäyttöä ja puustoa kuvaavien tunnus-ten kanssa. Kuvapiirteiden ja puustotunnusten välisiä riippuvuussuhteita on hyödynnetty laajojen alueiden metsien inventoinnissa jo pitkään.

Suomessa kehitettiin 1990-luvun alussa kaksi merkittävää menetelmäkokonaisuutta satelliittikuvien, numeeristen paikkatieto-aineistojen sekä maastomittausten yhdistämiseen metsävarojen inventoinnissa: 1) ei-parametriseen k:n lähimmän naapurin (k-*nn*) menetelmään perustuva monilähdeinventointi, jota hyödynnetään VMI:ssä yleistettäessä maastossa mitattujen koalojen tietoja pienalueille (Kilki & Päivinen 1987, Tokola 1988, Tomppo

1990, 2006), 2) monilähteiseen aputietoon ja kaksivaiheiseen otantaan osituksella perustuva satelliittikuvat metsien inventoinnissa (SMI) ohjelmistokokonaisuus (Poso ym. 1984, Wang ym. 1997, Tuominen ym. 2006). Keskeisenä ideana on, että menetelmien avulla voidaan tuottaa luotettavaa metsävaratietoa kustannustehokkaasti pienemmille alueille kuin pelkästään maastomittauksiin perustuvalla koealaotannalla.

VMI:n monilähdeinventoinnissa maastossa mitattuja tietoja yleistetään keskiresoluution (Landsat TM) satelliittikuvan pikseleille ei-parametrisella  $k:n$  lähimmän naapurin ( $k$ -nn) menetelmällä. Menetelmän lähtökohta on, että kukin satelliittikuvan pikseli tulkitaan vertaamalla sen piirrearvoja (esimerkiksi sävyarvo) maastossa mitattujen koealojen piirrearvoihin. Piirreavaruudessa  $k:n$  (esimerkiksi 5) lähimmän maastomittauskoealan tiedot yhdistetään tulkittavaan pikseliin. Maastomittauskoealojen keskinäistä merkitystä voidaan säädellä painokertoimien avulla. Menetelmän tuottamien tulosten kannalta keskeistä on painokertoimien lisäksi lähimpien naapureiden lukumäärän sekä kaukokartoituspiirteiden valinta (Haapanen 2014).  $K$ -nn -menetelmän etuna voidaan nähdä etenkin se, että kaikki maastossa mitatut puusto- ja kasvupaikkatunnukset (VMI:ssa yli 100) saadaan liitettyä yhdellä kertaa tulkittavaan pikseliin. Toisaalta tällöin on muistettava, että menetelmän taustalla on keskiresoluution satelliittikuvan tulkinta, eli tunnusten tulkintatarkkuus vaihtelee. Käytännössä VMI:n monilähdeinventoinnin tulos on luotettavaa yli 100 ha alueilla (Tokola & Heikkilä 1995). Sen sijaan kuvio- ja koealatasolla virheet ovat samaa luokkaa kuin keskiresoluution satelliittikuvatulkinnassa, eli esimerkiksi puuston keskitalavuuden suhteellinen keskivirhe on yli 50 % (Hyyppä & Hyyppä 1999).

Huolimatta satelliittikuvien tuomasta merkittävästä lisäarvosta suuralueiden inventoinnissa, operatiivisen metsäsuunnittelun niitä ei ole Suomessa juuri hyödynnetty. Suurimpana syynä tähän on se, ettei satelliittikuvien numeerisella kuvatulkinnalla lukuisista yrityksistä huolimatta ole päästy riittävään kuvio-

koealatasoon tarkkuuteen. Esimerkiksi keskiresoluution satelliittikuvien tulkinnalla päästään kuviotasolla keskitalavuuden osalta 45–55 % suhteelliseen keskivirheeseen, mikä ei ole riittävä tarkkuus operatiivista metsäsuunnittelua ajatellen (mm. Holopainen & Lukkarinen 1994, Hyyppä & Hyyppä 1999).

1990-luvun alkupuolelta lähtien on kehitetty menetelmiä numeeristen ilmakuvien hyödyntämiseen. Alkuvaiheessa keskityttiin koeala- ja kuviotason piirrepohjaiseen ilmakuvatulkintaan, myöhemmin puutasoon 2D- ja 3D-menetelmiin. Tavoitteena on ollut siirtyä operatiivisessa metsäsuunnittelussa visuaalisesta kuvatulkinnasta automaattiseen tai puoliautomaattiseen tulkintaan tai kuvamittaukseen joko kuvio- tai puutasolla. Piirrepohjaista metsävarojen ilmakuvatulkintaa ovat Suomessa kehittäneet mm. Holopainen (1998), Anttila (2002), Pekkarinen (2004), Tuominen (2007), Hyvönen (2007) sekä Packalén (2009). Ilmakuvien avulla on tulkittu koeala- tai kuviotasolla puustoon ja kasvupaikkaan liittyviä tunnuksia sekä niihin liittyviä muutoksia. Ilmakuvatulkinnan ongelmana ovat olleet keskusprojektiivisuudesta ja alhaisesta kuvauskorkeudesta aiheutuvat radiometriset erot kuvien sisällä ja välillä. Radiometristen ongelmien vähentäminen onkin ollut keskeinen tutkimusaihe piirrepohjaisten ilmakuvamenetelmien hyödyntämisessä (mm. Holopainen & Lukkarinen 1994, Tuominen & Pekkarinen 2004). Siirtyminen skannatuista negatiivisista digitaalisten mittakameroiden käyttöön 2000-luvun puolivälissä paransi ilmakuvien radiometriaa ja vähensi radiometrisiä ongelmia. Niistä ei ole kuitenkaan päästy kokonaan eroon.

Numeeristen ilmakuvien sävy- ja tekstuuripiirteisiin perustuneen koeala- ja kuviotason tulkinnan rinnalla 1990-luvun loppupuolella alettiin kehittää yksittäisten puiden mittaamiseen perustuvia menetelmiä. Alkuvaiheessa yksinpuinmittaus tapahtui 2D-tulkintana (mm. Dralle & Rudemo 1996, Lehikoinen 1999, Pitkänen 2001). Ideana oli hakea sävyarvomaksimien kautta yksittäisten puiden paikat ilmakuvilta, jonka jälkeen automaattisella segmentoinnilla määritettiin latvusten koko ja ilmakuvapiirteiden avulla puulaji. Latvuksen

kokoon ja puulajiin perustuvien allometristen mallien avulla voidaan mallintaa puun läpimittaa, jota kautta päästään kiinni koealan tai kuvion runkolukusarjaan (Kalliovirta ja Tokola 2005). Ilman puiden pituustietoa allometristen mallien mallivirhe on kuitenkin niin suuri, että 2D-tulkinnan tarkkuus ei ole riittävä operatiivista metsäsunnittelua ajatellen.

Yhteenvetona niin piirrephojaisista ilma-kuvamenetelmistä kuin 2D-menetelmistä voidaan sanoa, että kuvatulkinnan tarkkuuden on todettu olevan keskiresoluution satelliittikuvia parempaa, mutta kuitenkin selvästi perinteistä maastossa suoritettavaa kuviottaista arviointia huonompaa. Samaan tarkkuustasoon numeeristen ilmakuvien piirrephojaisen tulkinnan kanssa on nykyisin mahdollista päästä myös erittäin korkean resoluution tutkasatelliittikuvien avulla (Tokola ym. 2007, Holopainen ym. 2009, 2010a), joiden etuna on niiden temporaalinen resoluutio, eli saatavuus kaikissa kuvausolosuhteissa.

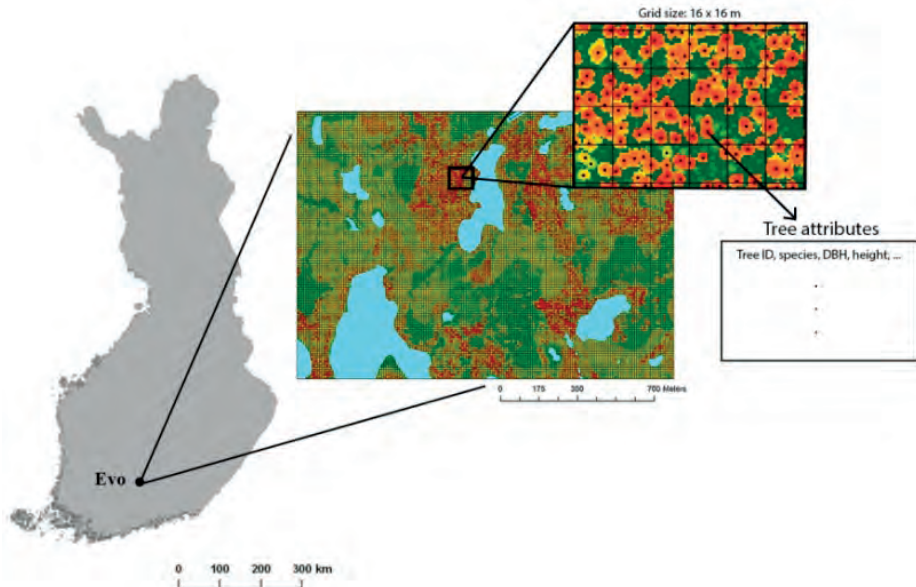
Hyypä & Hyypä (1999) vertasivat lähes kaikkia metsien inventointiin tuolloin käytössä olleita kaukokartoitusaineistoja samalla tutkimusalueella ja totesivat, että ainoastaan 3D-mittauksiin perustuvilla menetelmillä voidaan päästä operationaalisen metsäsunnittelun vaatimalle tarkkuustasolle. Viimeisen 15 vuoden aikana onkin koettu merkittävä teknologiahappaus, kun lentokoneesta tai helikopterista tehtävään laserkeilaukseen perustuva menetelmä on mullistanut niin rakennetun ympäristön kuin luonnonvarojen kartoituksen ja inventoinnin.

Niin kuviokohtaisen puustotunnusten arvioinnissa (mm. Næsset 1997, 2002, Packalén & Maltamo 2007, Packalén 2009, Peuhkurinen ym. 2007, Holopainen ym. 2010b) kuin yksittäisten puiden tunnusten mittaamisessa (mm. Hyypä & Inkinen 1999, Korpela 2004, Maltamo ym. 2004, 2009, Korpela ym. 2010, Vauhkonen 2010) digitaaliseen fotogrammetriaan ja laserkeilaukseen perustuvilla 3D-menetelmillä päästään puustotunnusten estimoinnissa vähintään samaan tarkkuustasoon kuin perinteisessä operatiiviseen metsäsunnitteluun liittyvässä kuviottaudessa arvioinnissa. Laserkeilausta on

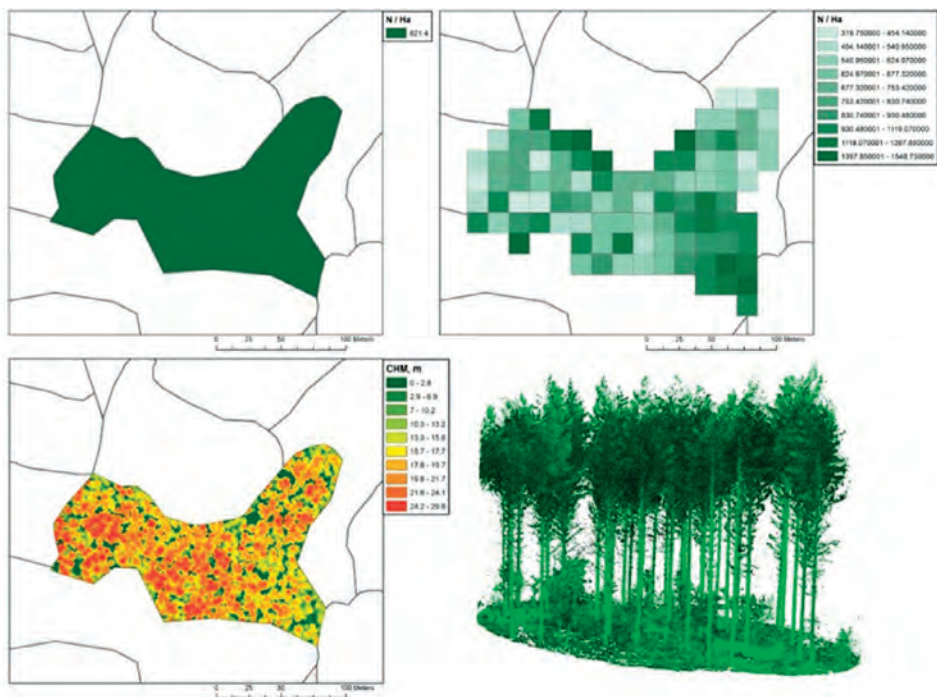
hyödynnetty myös lukuisissa ekologisissa sovelluksissa, kuten puiden pituuskasvun mittauksessa (Yu 2007), lahupuuston määrän (Pesonen ym. 2010) ja kasvupaikkojen estimoinnissa (Vehmas ym. 2009, Holopainen ym. 2010c), puuston harsuuntumisen ja lehtipinta-alan arvioinnissa (Solberg ym. 2006, 2009, Kantola ym. 2010) sekä puuston biomassaositteiden ennustamisessa (Kankare ym. 2013a, 2013b).

Laserkeilaukseen perustuvat 3D-mittaukset ovat parhaimmillaan maaston korkeusmallien laadinnassa, minkä vuoksi Maanmittauslaitos aloitti vuonna 2008 koko Suomen kattavan laserkeilausaineiston hankinnan. Käytännössä kaikki metsäalan organisaatiot Suomessa ovat viimeisen viiden vuoden aikana rakentaneet operatiivisia järjestelmiä hyödyntääkseen uusia 3D-menetelmiä. Viime vuosina etenkin tutkimuksessa on panostettu paitsi uusien laserkeilausmenetelmien (mm. aaltomuotolaser, Hovi & Korpela 2014) myös 3D-ilmakuva- ja SAR-menetelmien kehittämiseen (Karjalainen ym. 2012, Korpela ym. 2014, Vastaranta ym. 2014a,b, Honkavaara ym. 2014, Karila ym. 2015).

Tällä hetkellä kehitetään jo seuraavan sukupolven metsävaratiedon keruu- ja hallinjärjestelmää, joka tulee perustumaan vielä nykyistä enemmän kaukokartoitukseen. Tulevaisuuden metsävaratiedon perustuote tulee olemaan mahdollisimman ajantasainen puusto- ja metsikkötunnukset sisältävä kartta-/tietokanta, jonka resoluutio on 10–20m. Otosyksikkönä voidaan hyödyntää myös automaattiseen segmentointiin perustuvia mikrokuvioita. Rasteri-/segmenttikarttaa päivitetään useampiainkaisilla 3D-laserkeilaus-, -ilmakuva- tai -satelliittikuva-aineistoilla sekä kasvumalleilla. Aineiston luotettavuuden ja tarkkuuden ohella on panostettava sen ajantasaisuuteen, sillä jo muutaman vuoden vanha tieto voi olla monessa metsätalouden sovelluksessa (esim. metsätuhojen kartoitus) tai lisäarvopalvelussa liian vanhaa. Rasterikarttaa tarkennetaan tarpeellisilta osilta puutasolle käyttämällä monilähteistä ja –aikaisista kaukokartoitus- ja maastomittausaineistoista (Vastaranta ym. 2014, Holopainen ym. 2014).



Kuva 5.4. Tulevaisuuden metsävaratieto – ajantasainen rasteri- ja puutason tieto (Holopainen ym. 2014).



Kuva 5.5. Tulevaisuuden metsävaratieto on nykyistä yksityiskohtaisempaa ja ajantasaisempaa. Nykyisin metsävaratieto tuotetaan kuviokohtaisesti (vasen yläkulma), tulevaisuudessa (osin jo nykyisin) rasteri- ja puutasolla (Kankare ym. 2015).

### 5.3 Maastomittaukset

#### 5.3.1 Maastomittausten tarpeellisuus ja haasteet

Maastossa tehtävät mittaukset ovat edelleen tärkeä osa luonnonvarojen hallinnan paikkatietosovelluksia. Esimerkiksi puuston määrän ja laadun inventointi, sekä metsävarojen käytön suunnittelu tarvitsee tuekseen metsässä tehtäviä mittauksia. Suomessa metsiä mitataan pääasiassa valtakunnan metsien inventointia (VMI) ja metsäsuunnittelua varten. Metsäsuunnittelun maastotiedon keruu on toteutettu perinteisesti kuvioittaisena arviointina. Kuvion puustotiedot määritetään kuvion sisälle subjektiivisesti sijoitettujen relaskooppikoealojen keskiarvona. Suunnittelijan ammattitaidoilla on suuri merkitys kuvioittaisessa arvioinnissa, sillä suuri osa mittauksista tehdään silmävaraisesti. Suunnittelijan mukanaan tarvitsemat mittavälineet ovat yleisimmin relaskooppi, mittasakset ja hypsometri.

VMI perustuu koelaaotantaan, jossa mitataan yleensä kiinteästeisiä ympyräkoealoja. Mittausvälineistö on pääosin vastaava kuin kuvioittaisessa arvioinnissa. Puustomittausten lisäksi koelalta määritetään keskipisteen koordinaatit GPS:llä. VMI:n pysyviltä koeloilta mitataan puiden sijainnit suhteessa koalan keskipisteeseen. Metsien inventoinneissa kaukokartoituksen avulla voidaan tehostaa otantaa tai korvata maastomittauksia. Etenkin yksityiskohtaiseen kaukokartoitukseen ja fotogrammetriaan perustuvissa menetelmissä maastoaineiston laatu on ratkaisevan tärkeää inventoinnin onnistumiselle. Maastossa tehtävät mittaukset on pystyttävä yhdistämään kaukokartoitusaineistoon. Niinpä puiden sijaintien ja koalan keskipisteen tarkka määrittäminen on usein haastavin tehtävä. Ympyräkoealojen mittaaminen on hidasta ja työlästä verrattuna relaskooppikoealan mittaamiseen. Mittaamiseen kulunut aika riippuu mittaajasta, koalan koosta ja puuston rakenteesta.

Uuden tekniikan käyttöönotto metsien maastomittauksissa on edennyt varsin hitaasti. Puuston mittaukset on jo kymmeniä vuosia toteutettu pääosin relaskooppilla, mittasaksilla, hypsometrillä ja mittanauhalla. Mittavälineistö

rajoittaa myös puista mitattavia tunnuksia. Esimerkiksi rinnankorkeusläpimitta on perinteisesti keskeisin yksittäisestä puusta mitattava tunnus, mutta itse asiassa paljon kiinnostavampaa olisi pystyä mittaamaan runkomuoto. Perinteisin menetelmin yläläpimittojen mittaaminen on ollut epätarkkaa, eikä koko runkoprofiilin mittaaminen pystyistä ole ollut edes mahdollista. Kameraperusteisilla mittajärjestelmillä rungon yläläpimittoja on yritetty mitata jo 1950-luvulta lähtien. Koejärjestelyt ovat olleet monimutkaisia ja mittaukset eivät täten ole olleet käytännöllisiä. Tosin mittaustarkkuuden osalta on päästy varsin hyvin tuloksiin jo varhaisessa vaiheessa. Digitaalikameroiden yleistyminen teki kamerasta varteenotettavan laitteen metsän mittaamiseen.

Puun pituuden mittauksessa hypsometrin mittauseriaate on viety ultraääntä- tai laseria hyödyntäviin etäisyyden- ja kulmanmittauslaitteisiin, joiden avulla pituuden mittaus onnistuu helposti. Elektronisia mittasaksia, joihin voidaan tallettaa mitattu läpimitta, on myös kehitetty. Laitteiden ongelmana on, että mittaaja joutuu liikkumaan paikaltaan jokaista mitattavaa puuta varten. Niin läpimitan kuin pituuden mittauksen osalta tavoitteena pitäisi olla, että mittaaja pystyy mittaamaan kaikki koelalta tarvittavat tunnuksat liikkumatta koalan keskipisteestä.

Ympyräkoealojen mittaaminen perinteisin menetelmin on työlästä. Puustotietojen mittaamiseen kuuluu yleensä koalan paikannus ja raja- ja puiden sijaintien määrittäminen, läpimittojen luku, sekä koepuiden pituuksien mittaaminen. Koalan puustosta riippuu, mikä on mittauksen työläin vaihe. Uuden teknologian tuonti metsäolosuhteisiin on haasteellista. Mittalaitteen pitää olla kevyt ja helposti liikuteltava. Maastokelpoisen laitteen pitää kestää mm. vaihtelevia lämpötiloja, kosteutta ja pieniä kolhuja. Perinteisten mittavälineiden etuna on ollut ennen kaikkea niiden helppokäyttöisyys, kestävyys ja edullisuus.

Metsänmittauslaitteiden kehitystä ovat osaltaan hidastaneet rajalliset markkinat. Pitkien tuotekehitysprojektien rahoittaminen ei ole houkuttanut yrityksiä. Yksittäisten projektien rahoitus on usein loppunut jo ensimmäiseen

prototyypivaiheeseen, eikä laitteen kehityksessä ole päästy juuri ideaa pidemmälle. Metsänmittauslaitteiden kehitys ei myöskään onnistu ilman poikkiteieteellistä yhteistyötä. Metsänhoitajilla on harvoin tarvittavaa osamista tekniikan alalta, eikä insinööreillä taasen ole riittävää näkemystä käytännön maastotöiden vaatimuksista.

### 5.3.2 Uudistuneet mittaustarpeet

Metsäsunnittelussa ollaan siirtymässä puustoinventoinnin osalta harvapulssiseen laserkeilaukseen (Airborne Laser Scanning, ALS), aluepohjaiseen piirteiden irrotukseen ja ei-parametriseen –estimointiin perustuvaan inventointimenetelmään. Estimointimenetelmän lähtökohtana on, että kukin otosyksikkö liitetään ALS - ja ilmakuvapiirteiltään lähimpiin maastossa mitattuihin otosyksiköihin (koealoihin). Näin jokaiselle tulkittavalle otosyksikölle saadaan liitettyä maastomittaus tieto. Keskeistä menetelmässä on, että jokaisesta tulkittavan metsäalueen ositteesta on oltava riittävä määrä koealoja. Näin ollen aluepohjainen ALS-menetelmä vaatii tuekseen laajan, tarkasti mitattavan maastoaineiston. Tarkan maastoaineiston hankinta on aluepohjaisen ALS-inventoinnin merkittävä kustannuserä.

Myös yksittäisen puun tasolla tehtävä ALS-tulkinta vaatii tuekseen tarkkaa maastotietoa. Suurena etuna on kuitenkin se, että maastomittauksia tarvitaan huomattavasti vähemmän kuin aluepohjaisessa ALS-inventoinnissa, eli vain ALS-mittausten kalibrointiin. Laajahkon (tuhansia hehtaareja) inventointialueen ALS-mittausten kalibrointiin tarvittaisiin muutamia satoja puita. Aluepohjaiseen ALS-inventointiin verrattuna mittausten on oltava vieläkin tarkemmin paikkaan sidottuja, jotta maastossa mitatut puut saadaan liitettyä kaukokartoitusaineistosta tulkittuihin puihin. Menetelmän ongelmakohtia ovat puiden paikantaminen sekä maasto- ja ALS-puiden yhdistäminen.

Puun runkotilavuuden lisäksi puun laatu on ratkaiseva tunnus puutuoteteollisuuden lopputuotteiden arvon näkökulmasta. Tukkien laatuun vaikuttaa mm. rungon suoruus/lenkoisuus, puuaineen tiheys sekä oksien lukumäärä

ja niiden koko. Perinteisesti tukkien laatua on määritetty lähinnä visuaalisesti, sillä ei ole ollut objektiivista menetelmää arvioida tukin laatua maastossa. Laadun lisäksi puun kokonaisbiomassan määrittäminen voidaan nähdä jatkossa tärkeäksi. Runkoprofilin, oksikkouden, latvustunnusten ja biomassan kuvaamiseen tarvittaisiin uusia mittausten menetelmiä.

### 5.3.3 Laser- ja kameratekniikkaan perustuvien menetelmien kehittäminen

Kuvatulkintaan ja lasermittaukseen perustuvia maastomittausmenetelmiä on kehitetty 1990-luvun lopusta lähtien. Vuonna 1998 aloitettiin Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksella (nykyinen metsätieteiden laitos) laserrelaskoopin kehityshanke. Tavoitteena oli kehittää mittalaite, jolla koealan puusto voidaan mitata käymättä puiden luona. Mittalaite koostui säädettävästä relaskoopin hahlostasta, elektronisesta kompassista, kulma-anturista ja etäisyysmittarista, tiedonkeruuyksiköstä sekä GPS -vastaanottimesta. Laitteella voitiin mitata koealan runkolukusarja, puiden pituudet sekä sijainnit (suunta ja etäisyys) koealan keskipisteestä puita koskematta. Läpimitanmittaus perustui relaskoopin periaatteeseen, jossa relaskoopin hahlo säädettiin vastaamaan puun ääri viivoja, jolloin läpimita saatiin verrannon avulla, kun tiedetään etäisyys puuhun sekä relaskoopin hahlon leveys ja varren pituus. Parhaimmillaan laserrelaskoopilla on saavutettu rinnankorkeusläpimitan mittauksessa 8,2 mm:n keskihajonta (Laasasenaho ym. 2002), mutta ongelmana oli mittauksen subjektiivisuus ja herkkyys virheille. Puun sijainti ja pituus saatiin mitattua vastaavalla tarkkuudella kuin perinteisissä maastomittauksissa. Läpimitanmittausongelman poistamiseksi hankkeen seuraavassa vaiheessa kehitettiin laser- ja kuvatekniikkaan perustuva mittalaite, laserkamera. Laserkamerassa läpimitanmittaus perustui runkoon heijastettavaan laserviivaan ja pisteeseen, joiden avulla digitaalikuvasta voitiin mitata puun läpimita. Laserkameralla läpimitanmittaus oli objektiivista, nopeaa sekä vaivatonta. Melkas ym. (2009) osoittivat, että laserkamera on potentiaalinen menetelmä

kustannustehokkaaksi operatiivisen metsäsuunnittelun tiedonkeruulaitteeksi.

Viime vuosina on kehitetty älypuhelimella tehtäviä maastokoealojen mittaamenetelmiä, jotka perustuvat automaattiseen kuvatulkintaan sekä relaskoopin periaatteeseen. Menetelmällä voidaan mitata melko tarkasti puuston pohjapinta-ala, keskipituus ja tuottaa näiden avulla automaattisesti metsikön keskitilavuuden estimaatti. Jatkossa myös runkolukusarjan tuottaminen on mahdollista.

#### 5.3.4 Laserkeilaus metsän sisältä maastolaserkeilaimella

Puiden laserkeilausta voidaan tehdä myös metsässä. Maastolaserkeilauksessa (tai maalaserkeilauksessa, Terrestrial laser scanning, TLS) mitataan kohteiden kolmiulotteiset koordinaatit suunnattua laseretäisyysmittausta käyttäen. Maastolaserkeilaimella on mahdollista tuottaa tiheä kolmiulotteinen pistepilvi ympäröivästä puustosta. Mittaukseen kuluva aika riippuu haluttavasta pistetiheydestä ja mittausalasta. Vain keilaimelle suoraan näkyviä kohteita voidaan mitata, joten puuston tiheys, -peitteisyys ja mittausgeometria vaikuttavat voimakkaasti aineiston käyttökelpoisuuteen.

Maastolaserkeilauksella kohteesta saadaan suoraan runsaasti kolmiulotteisia havaintoja ilman työläitä välvaiheita ja kuvatulkintaa. Kohdetta voidaan keilata useammasta suunnasta ja keilaukset voidaan yhdistää yhdeksi pistepilveksi. Pistepilvistä voidaan muodostaa pintoja, tilavuuksia ja 3D-malleja. Laserkeilaimissa on usein lisäksi digitaalikamera. Digitaalikuvat voidaan yhdistää pistepilviaineistoon, jolloin pinnoista saadaan luonnollisemman näköisiä.

Maanpinnalta tehtävä metsikkökoalan laserkeilaus voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla: yhtenä keilauksena koealan keskipisteestä, tai useampana keilauksena eri puolilta koealaa. Yhdestä pisteestä tehdyn keilausten etuna on nopeus ja tallennetun pistemäärän suhteellinen pienenus. Haittapuolena ovat katvealueet, joita muodostuu puunrunkojen kaltaisten läpäisemättömien kohteiden taakse. Katvealueilla olevia kohteita ei ole mahdollista havaita, mistä

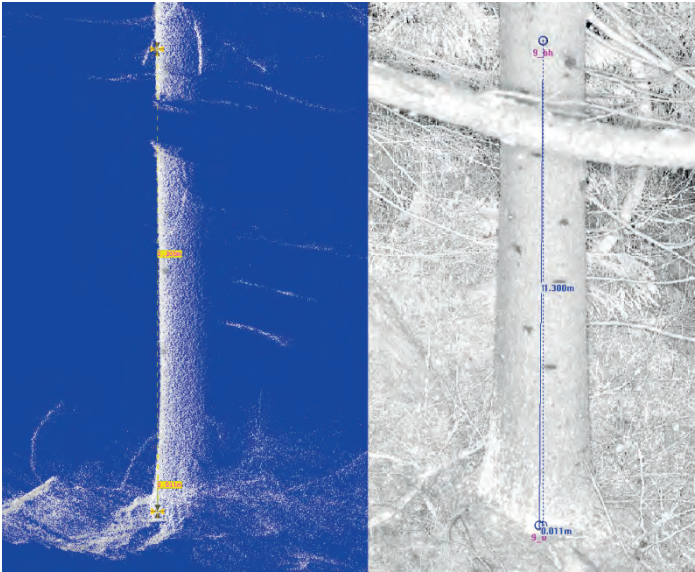


Kuva 5.6. Esimerkki maastolaserkeilaus (TLS) -aineistosta (Kankare ym. 2015).

seuraa epätäydellinen puukartta, koska etualalla oleva puu voi peittää jopa useita taempkana olevia puita. Toinen yhden keilausten ongelma on pistepilven tiheyden riippuvuus kohteen etäisyydestä keilaimesta; kaukana olevasta puusta saadaan siis vähemmän pisteitä kuin samankokoisesta lähellä olevasta, mikä vaikuttaa mittaus- ja mallinnustarkkuuteen ja käytettävissä oleviin menetelmiin. Yhdistettäessä useita koealasta tehtyjä keilausvälytyksiä katveiden ja epätasaisen pistetiheyden aiheuttamilta ongelmilta. Työmäärä tosin lisääntyy huomattavasti sekä maastossa että jälkikäsitelyssä, kun eri keilausvälytyksiä yhteensovitetaan toisiinsa. Yhteensovitukseen ei toistaiseksi ole hyvin toimivia automaattisia menetelmiä, vaan yleensä tarvitaan koealalle sijoitettuja referenssikohteita tai lisämittauksia keilausten paikannukseen ja yhdistämiseen. Metsikkökoalojen TLS-mittausten automatisointia tutkitaan parhaillaan.

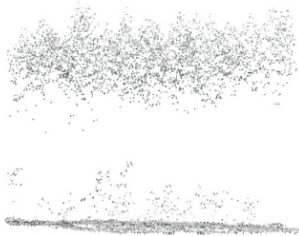
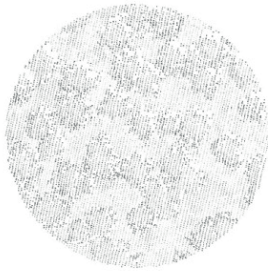
#### 5.3.5 Metsien maastomittausten tulevaisuus

Uuden, lentolaserkeilausmenetelmän perustuvan inventointijärjestelmän mukanaan tuoma tarve tarkoille koealamittauksille luo ensimmäistä kertaa todellisen käytännön kysynnän uusille maastomittausmenetelmille. Jo tällä hetkellä operatiivisessa käytössä on kameratekniikkaan sekä 2D-laserkeilausmenetelmien perustuvia menetelmiä. 3D-keilaimien halventuessa ja maasto-ominaisuuksien parantuessa myös niis-

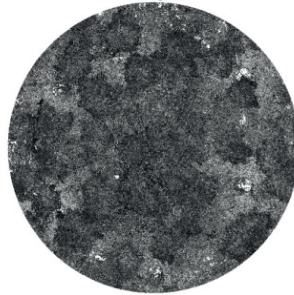


Kuva 5.7. TLS:llä mitattua kuusen runkoa, vasemmalla pistepilvi sivusta katsottuna (yläosassa näkyy rungon ja keilaimen välissä olevan oksan aiheuttama katvealue) ja oikealla pistekuva, jossa kunkin mitatun pisteen intensiteetti on kuvattu harmaasävynä. Kuvassa näkyy myös manuaalisesti tehtyjä mittauksia (puun tyvi ja rinnankorkeus).

**ALS**  
n. 10 200 pistettä



**TLS**  
n. 138 milj. pistettä



Kuva 5.8. ALS- eli lentolaserkeilauksen ja TLS- eli maastolaserkeilauksen aineistojen vertailu (Kankare ym. 2015).

tä voidaan saada tulevaisuudessa operatiivisia metsänmittausvälineitä. Todennäköisesti optiset mittalaitteet eivät kuitenkaan syrjäytä kokonaan perinteisiä menetelmiä, sillä tiheät, peitteiset puustot ovat haastavia kohteita mille tahansa

automaattiselle menetelmälle.

Maasto- ja lentolaserkeilaus eroavat toisistaan mittausgeometrian, kattavuuden ja pistetiheyden suhteen (kuvat 5.7. ja 5.8.). Lentolaserkeilaus mittaa esimerkiksi 1000 m levyisen kaistan



Kuva 5.9. Puuston MLS-mittausta.

lähes kohtisuoraan ylhäältä alas ja maastolaser pienen paikallisen alueen lähes vaakasuoraan. Lentolaserkeilauksessa pistetiheys on hyvin tasainen, koska kaikki kohteet ovat lähes samalla etäisyydellä; puiden korkeuserosta ja maanpinnan topografiasta johtuvat muutokset ovat pieniä suhteessa lentokorkeuteen. Lentolaserkeilaus mittaa ennen kaikkea puuston pituuteen, tiheyteen ja pituus- ja tiheysrakenteeseen liittyviä piirteitä. Maastolaserkeilauksessa pistetiheys vaihtelee voimakkaasti, ja mittaus kuvaa puuston horisontaalirakennetta: runkojen leveyttä, latvusten leveyttä ja aluskasvillisuutta. Inventoinnin näkökulmasta olisikin optimaalista yhdistää maastolaserkeilaus ja lentolaserkeilaus.

Maastolaserkeilaus voidaan toteuttaa operatiivisesti joko kolmijalkamittauksena (TLS) tai liikkuvalla alustalla (MLS, kuva 5.9). Liikkuva alusta voi olla esimerkiksi auto, moottorikelkka, mönkijä, reppu tai hakkuukone. Liikkuva alusta mahdollistaa tasaisemman pistejakauman, mutta teknologisenä ongelmana on tarkka paikannus metsässä. MLS voidaan toteuttaa joko välillä pysähtyen ja keilaten (stop-and-go) tai jatkuvasti liikkeestä. ”Stop-and-go” -malli tuottaa samanlaista aineistoa kuin perinteinen, kolmijalalle asetettu TLS. Etuna menetelmässä on se, että näin saadaan tarkennettua puiden kartoitusta ja mittausta (yhdestä keilauspisteestä näkymättömät puut). Lennokin (unmanned aerial vehicle, UAV tai unmanned aerial systems, UAS) käyttö laserkeilauksessa voidaan katsoa kuuluvan joko lentolaserkeilaukseen tai

liikkuvaan maastolaserkeilaukseen.

Näkyvyyden ollessa riittävä tärkeimmät puustotunnukset, kuten läpimitta, pystytään mittaamaan TLS:n avulla yhtä tarkasti kuin perinteisillä mittavälineillä. TLS- mittausta tuottaa lisäksi puiden koordinaatit (puukartan), joita on mahdollista käyttää esimerkiksi ALS- aineiston referenssinä. Erityisen mielenkiintoisia mahdollisuuksia TLS tarjoaa puiden runkokäyrän, latvustunnusten ja jopa yksittäisten oksien mittaamiseen. Näitä tunnuksia on vaikea, jopa lähes mahdoton mitata perinteisillä mittavälineillä kaatamatta puuta.

Metsä- ja leimikkosuunnittelun näkökulmasta keskeistä on runkolukusarjan (kuvion / leimikon läpimitta-/pituusjakauman) mittaus- tai ennustusmenetelmien kehittäminen, sillä puutaralajien (tukki-, kuitu-, energiapuu) tilavuudet määritetään runkolukusarjan perusteella. Tällä hetkellä käytössä oleva aluepohjainen lentolaserkeilaus- (ja ilmakuva) tulkinta ja teoreettisiin läpimittajakaumiin perustuva laskenta ei tuota riittävän tarkkaa runkolukusarjaa leimikkosuunnittelun (puunkorjuun) näkökulmasta. Tämä johtuu puulajiositteisten metsikkötunnusten ja runkolukusarjan tilastollisen ennustamisen epävarmuudesta. Ainakin järeiden puustojen osalta laserkeilaukseen perustuva yksinpuintulkinta yhdistettynä TLS-, MLS- ja hakkuukonemittauksiin voisi mahdollistaa runkolukusarjan arvokkaimman osan (järeimpien puiden) entistä tarkemman määrittämisen ja sitä kautta yksityiskohtaisen leimikkosuunnittelun.

## 6 Paikkatiedon hallinta ja analysointi

### 6.1 Spatiaalisen analyysin perusteita

#### 6.1.1 Vektorianalyysi

Paikkatietoanalyysi voidaan jakaa karkeasti 1) paikkatietoihin kohdistuvaksi, 2) ominaisuustietoihin kohdistuvaksi, 3) sijainti- ja ominaisuustietoihin kohdistuvaksi ja tulostuksen muotoiluun (Aronoff 1991). Ensimmäinen osa liittyy lähinnä tiedon esikäsittelyyn eli karttojen formaattimuunnoksiin, projektiomuunnoksiin, reunanvertailuihin, muokkaukseen, yhteensovitukseen ja suodatukseen. Toinen osa-alue kattaa kyselyt ja ominaisuustietojen ylläpidon. Kolmas osa-alue sisältää varsinaiset mallipohjaiset analyysit, kuten overlay-, naapuruus ja yhdistävyysoperaatiot. Valinta vektori- ja rasterianalyysin välillä riippuu analyysin tavoitteesta.

Vektorianalyysin overlay-analyysillä tarkoitetaan vektorikarttatasojen päällekkäin asettelua ja vastinkohteiden ominaisuuksien vertailua tai yhdistämistä. Viiva- ja aluekohteiden tapauksessa analyysi johtaa kohteiden leikkauspisteiden laskentaan ja uusien alueiden muodostamiseen. Uusille alueille voidaan tehdä attribuuttihakuja. Vektorianalyysin naapuruusanalyysillä tarkoitetaan puskurivyöhykkeiden määrittystä. Pisteiden, viivojen ja alueiden ympärille voidaan laskea vyöhykealue, jolla on tietty yhtenäinen ominaisuus. Uusia vyöhykealueita käytetään edelleen overlay-operaatioissa ja hauissa. Tyypillisiä vektorinaapuristoanalyysijä ovat myös ”point-in-polygon” ja ”line-in-polygon”-haut. Thiessen-polygonien laskenta, eli vaikutusalueiden laskenta pisteille on myös naapuruutta kuvaava laskenta. Lineaarista interpolointia tehdään vektoripisteiden välille muodostamalla TIN-pinta, jolla saadaan laskettua välialueiden arvojen estimaatit. Vektorianalyysin yhdistävyysanalyysillä tarkoitetaan kumulatiivisesti laskettavaa funktiota, jota lasketaan analysoitavan aineiston läpi kuljettaessa. Tällaisia tyypillisiä vektoripohjaisia analyysijä

ovat kahden pisteen välinen etäisyys, lyhin/nopein reitti viivaverkossa tai alueiden spatiaalisen jakautumisen laskenta maisemaindekseillä. Reitinoptimoinnissa verkostossa oletetaan toimintaympäristö aina tunnetuksi. Hydrologisen mallinnuksen osalta jokiin ja uomiin liittyvät mittausjärjestelmät ja simuloinnit analysoidaan tyypillisesti vektoriverkossa.

#### 6.1.2 Rasterianalyysi

Rasterianalyysin overlay-analyysillä tarkoitetaan rasteriaineistojen vastinpikeleiden vertailua aritmeettisin ja loogisin operaatioin. Perinteinen spatiaalinen mallinnus on yleensä tehty rasterioverly-operaationa. Dana Tomlin (Tomlin 1990) kehitti ns. kartta-algebran, joka on muodostunut standardiksi. Siinä perusoverlay-operaatioiden lisäksi on määritelty lähinaapurustoon ja alueiden overlayhin perustuvia perusfunktioita. Rasterianalyysin naapuruus-analyysillä tarkoitetaan etäisyyspintaan perustuvia laskentoja, pikselin lähinaapuruston ja aluerasterin hyväksikäyttöön liittyviä operaatioita. Interpolointi on myös tyypillisesti naapurustoa hyödyntävä menetelmä ja tuottaa tulosrasterin. Leviämismallinnus ja ”cellular automata” -mallit perustuvat naapurustoon liittyvien suhteiden mallintamiseen ja mahdollistavat monipuolisten simulointimallien teon. Rasterianalyysin yhdistävyysanalyysillä tarkoitetaan yleensä kustannuspintoihin liittyvää laskentaa ja näkyvyysanalyysiä. Kustannuspinta-analyysillä voidaan määrittää optimireittiä tilanteessa, jossa analyysiverkko ei ole tiedossa ja ongelmana on esimerkiksi uuden tien sijainnin määrittäminen. Rasteripohjaista hydrologista mallinnusta ovat veden valuntaan liittyvät analyysit, joissa eri tietolähteisiin perustuen arvioidaan yleensä pintavalunnan suuntaa ja määrää. Eroosioriskin arviointi liittyy myös läheisesti tähän analyysityyppiin.

Rasterimuotoisessa esityksessä jokaisella solulla on jokin arvo. Jos tieto on puutteellista tai sitä ei ole, solu saa arvoksi merkinnän ”NoData”, tieto puuttuu. Tiedon puuttuminen ja solun arvo 0

eivät merkitse samaa asiaa. Rasterin solun arvon puuttuminen vaikuttaa aineistolle tehtäviin operaatioihin. Aineistolle tehtävien operaatioiden yhteydessä tiedon puuttumista voidaan käsitellä kahdella eri tavalla: 1) Otetaan operaatioon mukaan kaikki arvot, vaikka mukana olisi myös soluja, joista arvo puuttuu. 2) Poistetaan aineistosta kaikki solut, joista arvo puuttuu ja tehdään operaatio loppuilla arvoilla. Menettelytapa valitaan tehtävän operaation mukaan: Kun esimerkiksi kaksi rasteria lasketaan yhteen, vaikuttaa tiedon puuttuminen ratkaisevasti lopputulokseen. Jos jommankumman rasteritason jostain solusta puuttuu arvo, ei myöskään lopputuloksena muodostuneessa rasterissa voi olla arvoa vastaavassa solussa. Toisaalta, jos etsitään minimiarvoa alueelta, joka sisältää puuttuvia arvoja, on tehtävä oletus: ”NoData”-solut eivät saa minimiarvoa. Tällöin operaatio tehdään vain soluilla, joilla on arvot. On tärkeää tietää, miten puuttuvaa tietoa käsitellään kussakin operaatioissa tai laskutoimituksissa. Tieto saattaa olla puuttunut aineistosta joko alusta asti tai se on hävinnyt jossakin operaatioissa. Hyödyllistä on myös tietää, onko saatu arvo todellinen maksimi tai minimi vai ainoastaan maksimi tai minimi saatavilla olevista arvoista.

Mitta-asteikolla on ratkaiseva merkitys solujen arvojen tulkinnessa ja esittämisessä. Kaikkea numerotietoa ei voi käsitellä samalla tavalla. On tärkeä osata eri mitta-asteikot sekä tuntea niiden rajoitukset. Mitta-asteikkoja on neljä: nominaali-, ordinaali- eli järjestys-, intervalli- eli välimatka- ja suhdeasteikko. Nominaaliasteikollisen muuttujan eri arvot tunnustetaan joko samoiksi tai erilaisiksi. Ordinaaliasteikon ollessa käytössä arvot voidaan laittaa järjestykseen. Intervalliasteikollisen muuttujan arvoilla voidaan tehdä yhteen ja vähennyslaskuja, mutta nollakohtaa ei ole kiinnitetty. Suhdeasteikolla nollakohtakin on olemassa, joten kaikki laskutoimitukset ovat mahdollisia.

Diskreetti, luokitteleva rasteriaineisto kuvaa tavallisesti joitakin kohteita. Nämä kohteet kuuluvat usein luokkaan (esim. metsätyyppi, maankäyttö) tai ryhmään (esim. poliittinen puolue). Luokitelluilla kohteilla on tunnetut ja määritettävät rajat. Jokaisella solulla on tavallisesti kokonaislukuarvo. Jokaiseen lu-

kuarvoon liittyy ominaisuustietotaulu, josta selviää kohteen muut tiedot. Diskreetti aineisto on tavallisimmin esitetty nominaali- tai ordinaaliasteikollisena. Jatkuva rasteriaineisto tai pinta kuvataan usein rasterina, jonka solujen arvot ovat kokonaislukuja. Jokaisen solun arvo saadaan kiinteän pisteen arvosta, kompassisuunnasta tai etäisyydestä johonkin kohteeseen. Jatkuva pinta voi esimerkiksi esittää korkeutta merenpinnasta, rinteen suuntaa, jyrkkyyttä tai saastepitoisuutta maaperässä. Jatkuva aineisto on tavallista esittää intervalli- tai suhdeasteikollisena. Usein, jos diskreettiä ja jatkuvaa aineistoa yhdistellään, saadaan merkityksetön tulos. Jos esim. lasketaan yhteen metsätyyppirasteri (diskreetti) ja rasteri, joka kertoo korkeuden merenpinnasta (jatkuva), saadaan tulokseksi rasteri, jonka solujen arvot eivät kerro juuri mitään.

Eri rasteritasojen tarkkuus on erilainen, eli niiden solukoko vaihtelee. Kun rastereille tehdään erilaisia analyysejä, on rasterikoko muutettava samaksi. Jos analyysissä on mukana useita rasteritasoja, joiden erotuskyvyt ovat erilaisia, on yhden tai useamman rasterin solukoko kasvatettava. Analyysissä käytettävä erotuskyky määräytyy karkeimman rasterin mukaan. Ennen varsinaista analyysiä rasteritasojen solukoko muutetaan automaattisesti uudelleenotannalla (resample) yhteneväksi lähimmän naapurin menetelmällä. Lähimmän naapurin menetelmää voidaan käyttää sekä diskreetin että jatkuvan aineiston tapauksessa. Bilineaarinen- ja cubic-menetelmät ovat käytökelpoisia vain jatkuvan aineiston tapauksessa. Uudelleenotanta on tarpeellinen, koska alkuperäisen ja muodostettavan rasterin solujen keskipisteet eivät useinkaan kohtaa. Oletuksena oleva karkeimman rasterin solukoko voidaan muuttaa analyysiä varten. On kuitenkin huomattava, että muodostuvan rasterin erotuskyky ei voi olla tarkempi kuin lähtöaineiston epätarkin rasteri. Jos esimerkiksi määritetty solukoko on 50 m, mutta karkein lähtöaineiston rasterin solukoko on 100 m, on muodostuvan rasterin näennäinen solukoko 50 m, vaikka todellinen tarkkuus on 100 m. Kannattaa myös huomioida, että solukoko määräytyy tutkittavan ilmiön perusteella. Esimerkiksi viiden km:n solukoko

on aivan liian suuri metsämyyrän liikkeiden tutkimiseen ja aivan liian pieni ilmaston lämpenemisen tutkimiseen maailmanlaajuisesti.

Ennen analyysin tekemistä käytettävät rasteritasot pitää rekisteröidä. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikki rasterit pakotetaan kohdakkain niin tarkasti kuin mahdollista. Kaikki rasteriaineistot saadaan siten saman koordinaatistoon. Analyysissä muodostuvan rasterin koordinaatistojärjestelmä on riippuvainen lähtöaineiston koordinaatistosta.

### 6.1.3 Spatiaalisen aineiston tilajärjestys

Tilajärjestys voidaan selvittää joko kenttähavaintojen tai kartoitetun aineiston pohjalta. Kenttähavaintoina voidaan käyttää esimerkiksi metsikkökoealoittaisia runkolukujen mittauksia tai etäisyysmittauksia. Tilajärjestyksen analysointia varten tehtävissä etäisyysmittauksissa mitataan joko puiden välisiä etäisyyksiä tai etäisyyksiä tietystä pisteestä puihin. Havaintojen perusteella voidaan tehdä tilastollinen satunnaisuuden testi: poikkeako havaintojen mukainen jakauma satunnaisuudesta. Yleisesti käytetty testi on Rippleyn  $K(t)$ , joka on mielivaltaisesta puusta korkeintaan etäisyydellä  $t$  olevien puiden odotusarvo. Satunnaisessa metsässä  $K(t)$  on  $[\pi t^2]$ , eli ryhmittäisessä metsikössä arvo on suurempi ja tilajärjestykseltään tasaisessa metsikössä pienempi.

Spatiaalisen aineiston kohteiden tilajärjestyksestä saadaan tietoa aineiston rakenteesta ja lisätiedon keruun tarpeesta. Lisäksi tilajärjestyksen avulla voidaan suunnitella lisätiedon keruun menetelmää ja interpoloinnin käytön mahdollisuuksia. Yleisesti käytettyjä piste-mäisten kohteiden spatiaalista tilajärjestystä kuvaavat indeksit Moranin  $I$  ja Gearyn  $C$ .

Moranin  $I$  lasketaan kaavalla:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\left( \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 \right) \left( \sum_{i \neq j}^n \sum w_{ij} \right)} \quad 6.1$$

ja Gearyn  $C$  kaavalla:

$$C = \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (z_i - z_j)^2}{2 \left( \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 \right) \left( \sum_{i \neq j}^n \sum w_{ij} \right)} \quad 6.2$$

joissa  $w_{ij}$  on spatiaalinen naapuruusmatrissi,  $z_i$  on muuttujan  $z$  arvo kohdassa  $i$ ,  $z_j$  on muuttujan  $z$  arvo kohdassa  $j$ ,  $\bar{z}$  on muuttujan  $z$  keskiarvo.

### 6.1.4 Topologian käyttö

Useimmissa paikkatietojärjestelmissä on valmiit rutiinit, joiden avulla voidaan laskea alueiden ja luokkien pinta-aloja sekä pisteiden välisiä etäisyyksiä. Lisäksi vektoripohjaisissa järjestelmissä voidaan laskea viivojen pituuksia. Rasteripohjaisissa järjestelmissä tämä täytyy toteuttaa peräkkäisten pisteparien avulla. Todellisten pituuksien ja pinta-alojen saaminen edellyttää karttatason oikaisua johonkin taso-koordinaatistoon.

Taulukko 6.1. Moranin ja Gearyn indeksien tulkinta.

Spatiaalinen tilajärjestys	Moran's I	Geary's C
Klusteroitunut, samanlaiset kohteet ja ominaisuudet lähellä	$I > 0$	$0 < C > 1$
Satunnainen, ei järjestystä samanlaisien ominaisuuksien suhteen	$I \sim 0$	$C \sim 1$
Systemaattinen tai hajaantunut, erilaisia ominaisuuksia	$I < 0$	$1 < C < 2$

Paikkatietotopologia kuvaa joko kohteen sisäistä topologiaa eli kohteen rakentumista geometrisista perusprimitiiveistä tai kohteiden välistä topologiaa eli kohteiden keskinäisiä sijainnillisia suhteita. Kohteiden välistä topologiatietoa ei tallenneta tietokantaan geometriatiedon yhteydessä. Kohteen sisäiseen geometriaan liittyvät topologiaehdot, kuten alueen sulkeutuminen alkupisteeseensä ja itseleikkaavuus, tarkistetaan geometriaa luodessa. Kohteiden väliset topologiset suhteet, kuten sisältyvyys, leikkaavuus ja jatkuvuus on laskettava sovelluksissa geometriatiedon perusteella. Näitä topologisia suhteita eli relaatioita käytetään hyväksi mm. kohteisiin kohdistuvissa sijaintipohjaisissa hauissa. (Kainulainen 2002)

### 6.1.5 Tiedon yleistäminen ja luokittelu

Ymmärtääkseen monimutkaisia asioita ihminen yrittää yleistää niitä. Yleistämistä (eng. generalisation) käytetään, kun tarkemmasta karttatietokannasta tuotetaan pienimittakaavainen visuaalinen esitys ja viimeistellään kartografista esitystä alkuperäiseen paikkatietokantaan perustuen. Erityisen ajankohtaiseksi yleistys on tullut pienten mobiili-GIS-laitteiden käyttöliittymien teossa ja käytettävyyden parantamisessa. Yleistämisen tarkoituksena on visualisoida kohteet, jotta olennainen informaatio voidaan esittää mahdollisimman oikein ja pelkistetysti. Melko hyvään automaattiseen vektoriyleistykseen voidaan päästä kahdentoista yleistysoperaattorin (kuva 6.1.) avulla (Shea & McMaster 1989, Kilpeläinen 1999):

1) Yksinkertaistus (eng. simplification): operaattori vähentää pisteiden lukumäärää ja yksinkertaistaa kohteiden esitystä. Suosituin menetelmä on Douglas-Peucker-algoritmi (Douglas & Peucker 1973).

2) Suodatus (eng. smoothing): operaattori muuttaa pisteiden sijaintia siten, että ne vastaavat esimerkiksi viivan yleistä trendiä. Menetelmä lisää kohteiden esteettistä vaikutelmaa. Viivan suodatusmenetelmissä käytetään usein liukuvien keskiarvojen menetelmää tai matemaattisten funktioiden muotoa (Splini-tasointu, Bezier-käyrät, Gauss-suodatus).

3) Yhdistäminen pisteistä alueiksi (eng. aggregation): yhdistämisen tarkoituksena on yleistää pistemäiset kohteen alueiksi, kuten asuinrakennukset asuinalueeksi. Yleinen tapa on ensin bufferoida pisteet ja sen jälkeen laskea buffereiden kupera summapinta (O'Rourke, 1993).

4) Liittäminen (eng. amalgamation): operaattori liittää pienet yksittäiset alueet suuremmaksi kokonaisuudeksi. Operaattori on paljon käytetty rasteripohjaisissa järjestelmissä (Jaakkola 1997). Vektoripohjaisen menetelmän ovat esittäneet Bader & Weibel (1997).

5) Yhdistäminen (eng. merging): Operaattoria käytetään yleistettäessä graafista kuvaustekniikka, esimerkiksi kaksiviivaista tietä yksiviivaiseksi.

6) Heikentäminen (eng. collapse): Operaattorilla selkeä aluekohde muutetaan piste- tai viiva- symboliksi. Kaupunkialueet, järvet ja lentokentät kuvataan pienimittakaavaisissa kartoissa lopulta pisteinä.

7) Valinta/suora puhdistus/modifioitu puhdistus (eng. selection/refinement/typication): valintaoperaattoreilla voidaan kohteiden ominaisuuksista riippuen valita vain merkittävimmät kohteet. Periaatteessa valinta voidaan jakaa suoraan puhdistukseen ja modifioitun puhdistukseen. Suorassa puhdistuksessa säilytetään kohteiden alkuperäinen sijainti. Modifioidussa puhdistuksessa pyritään säilyttämään kohteen yleinen hahmo ja rakenne, jolloin yksittäisten kohteiden sijaintia voidaan joutua muuttamaan.

8) Selventäminen (eng. exaggeration): operaattoria käytetään kartan luettavuuden lisäämiseksi ja se johtaa yleensä kohteen alkuperäisen sijainnin muuttamiseen. Viivojen mutkia voidaan jyrkentää ja korostaa visuaalisen vaikutuksen selventämiseksi.

9) Korostus (eng. enhancement): operaattorilla korostetaan tiettyjä symboleita, eikä niinkään karttakohteita, kuten edellisellä operaattorilla.

10) Siirto (eng. displacement): usein kartassa on tilan puutetta ja tällöin on tarpeen muuttaa karttakohteen todellista sijaintia: 1) siirtämällä kohde alkuperäisestä paikasta, tai 2) muuttamalla kohdetta tai 3) poistamalla huonosti sopivat kohteet.

11) Luokittelu (eng. classification): ominaisuusperusteisella luokittelulla saadaan yhdistettyä alkuperäisten muuttujien arvojen hajontaa pienemmäksi.

12) Symbolisointi (eng. symbolisation): kohdekohtaisen mittakaavan muuttaminen ja tiedon tyyppin muuttaminen voi yleistää materiaalia.

Kaikkien edellä mainittujen operaattoreiden käyttö riippuu kohteesta ja vaatii tapauskohtaista tarkastelua. Yleistämisen problematiikkaa, siihen tarvittavia menetelmiä ja tietomallia on tutkinut mm. Kilpeläinen (1997).

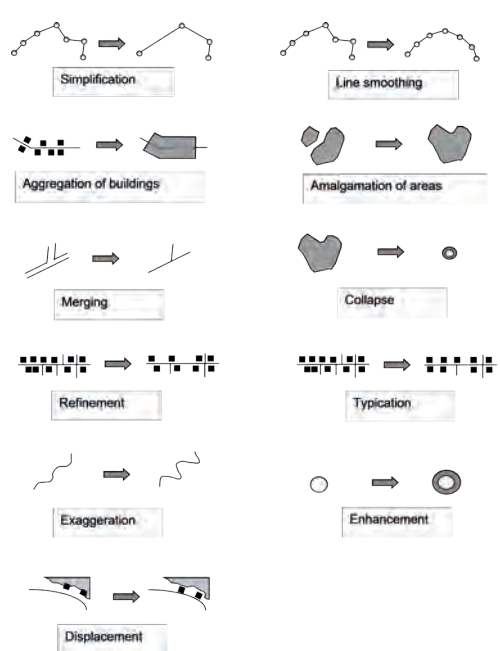
Luokittelu auttaa ymmärtämään monimutkaisen relaation, joten ominaisuustietoa luokittelemalla yksinkertaisemmaksi voidaan paikkatiedon esittämistä muuttaa havainnollisemmaksi (kuvat 6.2–6.4). Tiedon luokittelu on yksi tiedon yleistämisen tapa, jolla tarkemmasta paikkatiedosta voidaan tuottaa pienimittakaavainen visuaalinen esitys. Yleistämisen tarkoituksena on visualisoida kohteet, jotta tärkein informaatio voidaan esittää mahdollisimman selkeästi. Tämä perustuu siihen, että ihminen voi hahmottaa vain 7–10 luokkaa yhtä aikaa.

Rasteripohjaisen tiedon yleistäminen perustuu paljolti kuvankäsittelyanalyysiin. Menetelmiä ovat mm. erilaiset suodatukset, reunan korostukset, aluekohtainen segmentointi ja luokitus. Rasteriyleistystä voidaan suorittaa kartta-algebran avulla paikallisella, paikallisympäristöä koskevalla ja alueellisella tasolla (kts. leikkausanalyysi, luku 6.3).

Seuraavat säännöt on hyvä muistaa suunniteltaessa luokitusta:

- 1) Talleta tieto täydellisenä, jos sinulla on se.
- 2) Luokitele monimuuttuja-aineistoa.
- 3) Luokitele ainoastaan havainnollistamistarkoitukseen.

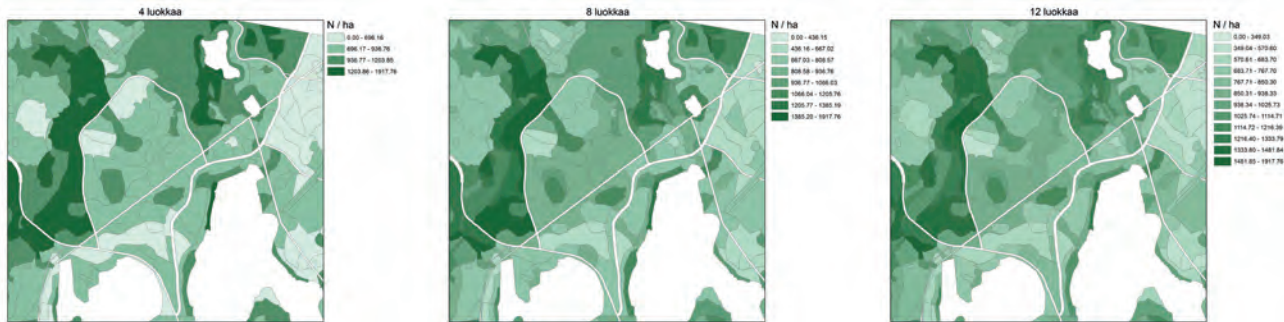
Uudelleenluokittelua voidaan käyttää, kun aineisto halutaan luokitella alkuperäisestä luokituksesta poikkeavalla tavalla mm. analyysijä ja tulosteita varten. Uudelleenluokittelussa alkuperäiselle aineistolle luodaan tavallisesti eräänlainen suodatin, jonka avulla alkuperäiset arvot muutetaan uusiksi. Tämä suodatin on tilantarpeeltaan yleensä huomattavasti pienempi



Kuva 6.1. Yleistämisen perusoperaattoreita (Kilpeläinen 1999).



Kuva 6.2. Metsätilan kuviotiedot on luokiteltu puuston tilavuuden mukaan. Kuva Ville Kankare.



Kuva 6.3. Luokkien lukumäärän vaikutus luokitustulokseen: 4, 8 ja 12 luokkaa. Kuva Ville Kankare.



Kuva 6.4. Viikin digitaalinen korkeusmalli on luokiteltu viiteen (vasen kuva) tai 20 luokkaan (oikea kuva).

kuin alkuperäinen aineisto. Toiminnon avulla alkuperäisen aineiston luokittelua voidaan tarpeen vaatiessa joustavasti muuttaa erilaiseksi.

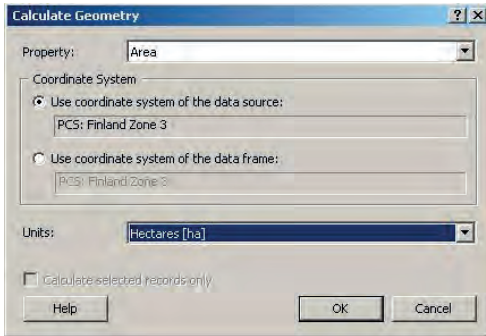
### 6.1.6 Pinta-alan, pituuden ja etäisyyden laskenta

Paikkatietojärjestelmissä on usein valmiit rutiinit, joilla voidaan laskea alueiden ja luokkien pinta-aloja sekä pisteiden välisiä etäisyyksiä. Lisäksi vektoripohjaisissa järjestelmissä voidaan laskea viivojen pituuksia. Rasteripohjaisissa järjestelmissä tämä täytyy toteuttaa peräkkäisten pisteparien avulla. Todellisten pituuksien ja pinta-alojen saaminen edellyttää karttatason oikaisua johonkin tasokoordinaatistoon.

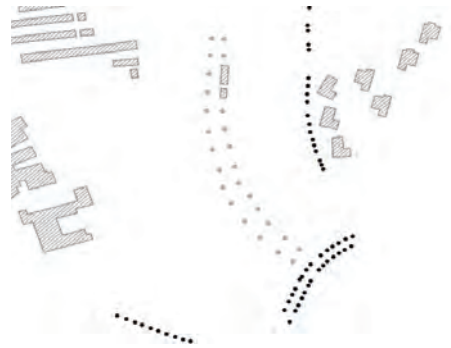
## 6.2 Tietokantahaut

### 6.2.1 SQL-kyselykieli

Vektorijärjestelmien ominaisuustiedot tallennetaan joko järjestelmän ulkoiseen tai sisäiseen tietokantaan ja yhteys sovellukseen toteutetaan tietokantakielen avulla. Relaatiotietokantojen tapauksessa, joita useimmiten käytetään luonnonvaratiedon hallintaan, tietokannan käsittelykieleksi on vakiintunut SQL (Structured Query Language). Tietokantakielen tulee tukea relaatioalgebran mukaisia operaatioita (kuvat 6.5–6.10), joita ovat mm. yhdiste (union), erotus (difference), karteesinen tulo (cartesian product) ja osamäärä (division). Tämän lisäksi tietokannan käsittelykielet tukevat lisäoperaa-



Kuva 6.5. ArcMapissa vektorimuotoisilla karttatasoille voi suoraan laskea attribuuttitauluun geometriatietoa. Kuvassa aluemuotoisille kohteille lasketaan pinta-ala.



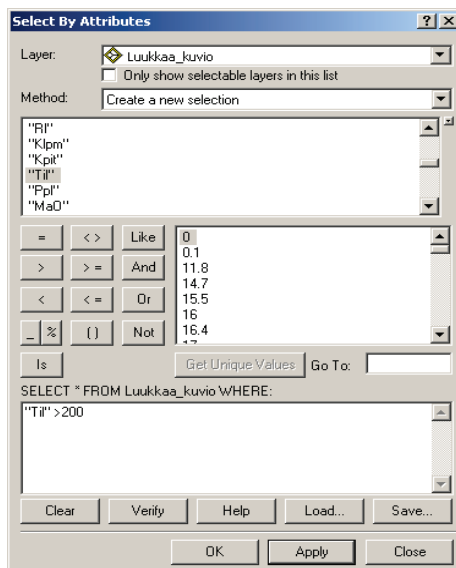
Kuva 6.6. Kaksi karttatasoa voidaan liittää yhteen (merge). Kuvassa olemassa olevaan puurekisteriin on liitetty uusi puurivistö (vasemmassa kuvassa harmaalla). Vastaavasti yhteen voidaan liittää myös viiva tai aluemuotoisia karttatasoja, kuin myös rastereita.

tioita, joita ovat valinta (selection), projektiio (projection) ja leikkaus (intersection).

Spatiaalinen SQL-kyselykieli on SQL-kielen ja sen käyttämien tietorakenteiden laajennus, joka hyödyntää erityisesti geometrisia tietotyyppjä sekä näihin kohdistettavia operaattoreita ja funktioita. Spatiaalista kyselykieltä ja abstrakteja tietotyyppjä ovat standardoineet sekä kansain-

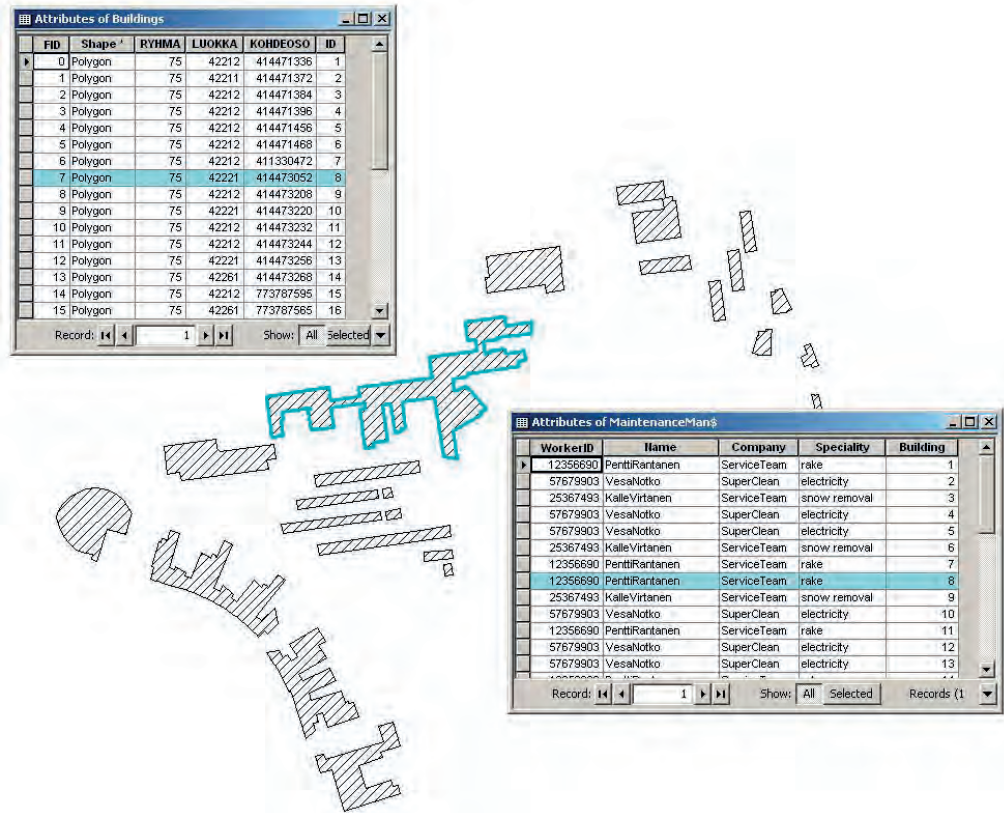
välinen standardointijärjestö (ISO/IEC) että GIS-ohjelmistotoimittajien yhteenliittymä (OGIS, Open GIS Consortium inc.). (Kainulainen 2002)

Yhdisteessä (union) tulostauluun haetaan kohdetaulujen kaikki kohteiden eri esiintymien attribuuttien arvot. Tällöin tarkasteltavien taulujen tulee olla yhdistettävissä, mikä tarkoittaa sitä, että ne ovat samaa astetta ja



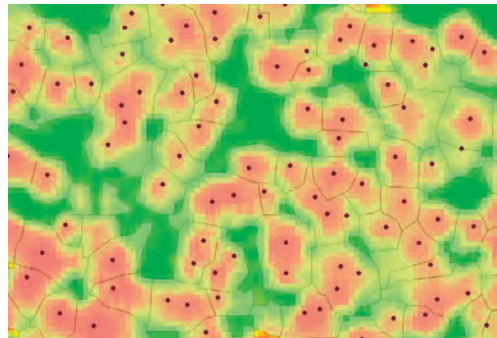
Kuva 6.7. ArcMapissa kohteita voi valita kirjoittamalla SQL-lauseita "Select By Attributes"-valikkoon. Kuvassa on haettu Luukin metsäpalstan alueelta kaikki metsikkökuviot, joilla on puustoa yli 200m<sup>3</sup>/ha.



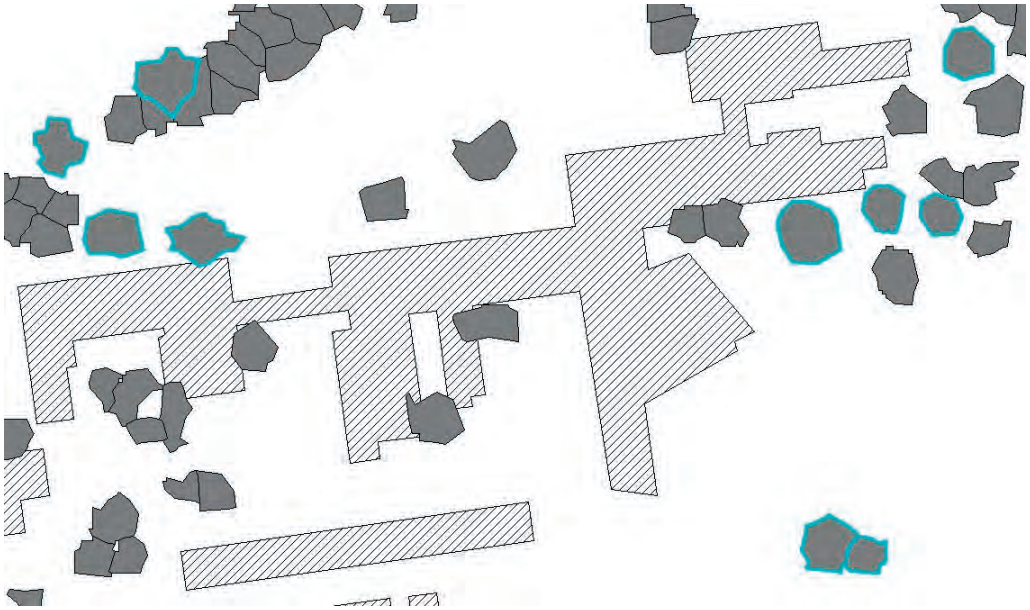


Kuva 6.8. Liitos ominaisuustiedon perusteella (attribute join). Kuvassa Viikin kampusalueen rakennuksien attribuuttitauluun liitetään tieto huoltomiehistä. Liitos perustuu rakennustason ID-sarkkeeseen ja huoltomiestaulun rakennus-sarkkeeseen.

niissä on samat attribuutit, jotka saavat arvonsa samasta arvojoukosta. Erotuksessa (difference) tulostauluun saadaan attribuuttien arvot, jotka esiintyvät vain toisessa tauluista. Karteesisessa tulossa (cartesian product) muodostetaan kahden taulun yhdistelmä joka sisältää kaikki mahdolliset attribuuttien arvojen yhdistelmät ja osamäärässä (division) tulostaulun kohteen esiintymän tulee sisältää kaikki attribuuttien arvot jotka ovat myös jakajataulussa. Lisäoperaatioissa valinnassa valitaan annetuilla kriteereillä tulostauluun kohdetaulun rivejä kun taas projektiossa sarakkeita. Taulujen leikkauksena saadaan tulostaulu, joka sisältää esiintymät, joissa attribuuttien arvot ovat samat molemmista kohdetauluissa.



Kuva 6.9. Maastossa mitatut puutiedot voidaan yhdistää ALS-aineistosta tulkituille latvussegmenteille spatiaalisella liitoksella (Spatial Join).



Kuva 6.10. Kuvassa on haettu Viikin kampuksen B-talon ympäristöstä kaikki puut, jotka ovat yli 20 m pitkiä (select by Attributes).

### 6.2.2 Tietotyypit, funktiot ja hakupredikaatit

Geometriatiedon kyselyä ja laskentaa varten käytetään normaaleja abstrakteja tietotyyppejä (ADT). Oliopohjaisesti määriteltyjä tietotyyppejä voidaan käsitellä ja ne voivat palauttaa laskennallisia tai kohteen rakenteeseen liittyviä tietoja luokittain periytyvien metodien avulla.

Funktioit ovat laskentasarjoja, jotka palauttavat määriteltyä tietotyyppiä olevan paluuarvon. Funktion syötteenä, eli parametrina, voi olla yksi tai useampi määrätty tietotyyppiä oleva parametri tai tyhjä parametri. Maantieteelliset funktiolaajennukset voivat palauttaa parametreina syötettyjen geometrioiden käsittelyn tuloksena lasketun skalaariarvon tai uutta laskennallista geometriaa. (Kainulainen 2002)

Hakupredikaatit ovat funktioita tai metodeja, jotka palauttavat loogisen arvon. Niitä käytetään yleensä valintalausekkeen ehto-osassa (where-lause) määrittelemään palautettavat rivit. Maantieteelliset hakupredikaatit palauttavat joko kohteensisäiseen topologiaan liittyviä loogisia arvoja vertailuparametrina annetun geometrialuokan metodien mukaisesti (esim.

rajageometrian sulkeutuvuus, itseleikkaavuus) tai kohteidenvälisen topologian vertailuarvoja. Hakupredikaatit ja maantieteelliset funktioit voidaan luokitella toiminnallisesti (Kainulainen 2002):

—*Vertailuoperaattoreihin* eli predikaatteihin, jotka palauttavat kohteiden välisen vertailun tuloksen totuusarvona.

—*Mittausfunktioihin*, jotka palauttavat skalaariarvon, joka on laskettu kohteen geometriasta tai johdettu kohteiden keskinäisestä sijainnista.

—*Geometrian laskentafunktioihin*, jotka palauttavat yhdestä kohteesta tai kohteiden keskinäisestä sijainnista johdettua uutta geometriaa.

—*Konstruointifunktioihin*, joilla luodaan koordinaattipohjaisesti uusia geometrisia kohteita. Konstruointifunktioihin kuuluvat myös olemassa olevan geometriatiedon päivitykseen käytetyt funktioit.

—*Rakennefunktioihin*, jotka palauttavat tietoa kohteen sisäisistä ominaisuuksista tai rakenteesta.

—*Erikoisfunktioihin*, jotka liittyvät mm. koordinaattijärjestelmämuunnoksiin.

## 6.3 Leikkausanalyysit

### 6.3.1 Johdanto

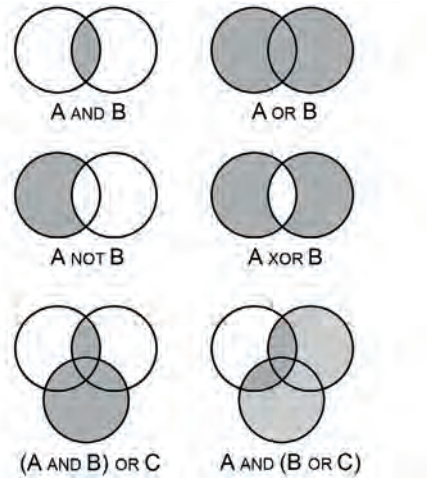
Leikkausoperaation avulla voidaan kahdesta tai useammasta karttatasosta muodostaa uusia tasoja tai vaihtoehtoisesti poimia vain ne alueet, joissa karttatasojen kuvaamien ominaisuuksien yhdistelmä on haluttu. Leikkausanalyysi toimii periaatteessa loogisten operaattoreiden (=, <, >, and, or, nor, not, xor) ja aritmeettisten operaattoreiden avulla.

### 6.3.2 Vektoriaineistojen leikkausanalyysi

Vektorikarttojen leikkausanalyysijä ovat polygonileikkaukset, sekä viiva polygonissa, piste polygonissa tai piste viivalla -leikkaukset.

Vektorikarttojen alueleikkaus tapahtuu seuraavasti (Bernhardsen 1992): a) lasketaan leikkauspisteet, b) muodostetaan solmut ja yhteydet, c) muodostetaan uusien polygonien topologia, d) poistetaan liian pienet polygonit, e) viedään uudet ominaisuudet ja lisäykset ominaisuustietokantaan.

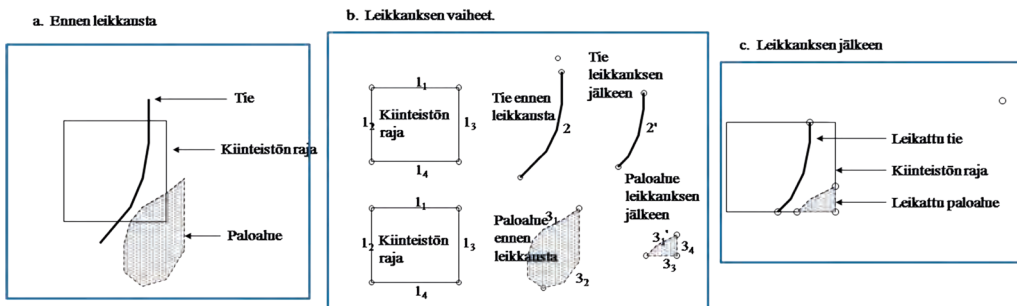
Vektorileikkauksen perusoperaatioita ovat yhdiste (eng. union), leikkaus (eng. cut, identity), kaksoisleikkaus (eng. intersect) ja päivitys (eng. erascover) (kuvat 6.12, 6.13, 6.14). Yhdiste/union on vain alue – alue operaatio. Se katkaisee alueet risteyskohdista ja luo uudet alueet uuteen tuloskarttaan. Leikkauksen kohdekartta voi olla piste, viiva tai aluetyyppi-



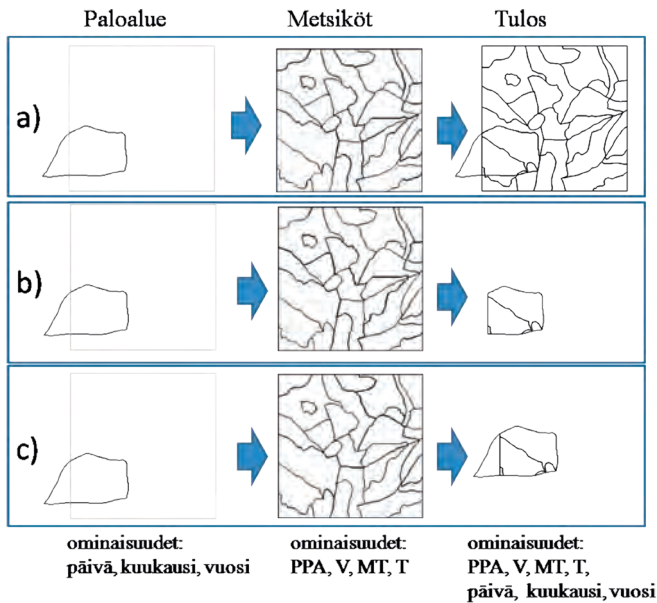
Kuva 6.11. Boolean-operaattorit, joiden avulla on helppo määrittellä leikkausanalyysijä. Kuva Ville Kankare.

nen, mutta itse leikkauskartta on aina alue. Se leikkaa pois leikkauskartan ulkopuolelle jäävät kohdekartan piirteet. Operaation karttojen järjestys siis vaikuttaa lopputulokseen.

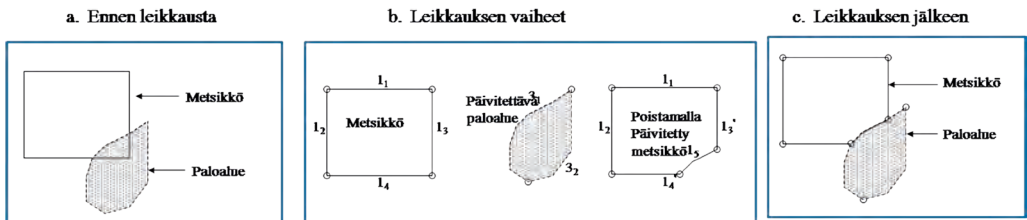
Kaksoisleikkaus on kuin leikkaus/identity (kuva 6.11), mutta leikkaa pois piirteet, jotka eivät osu liitettävien karttatasojen yhteisesti peittämälle alueelle. Tulokartta on samaa ominaisuustyyppiä kuin kohdekartta. Päivitys/Erasercover päivittää osa-alueen tiedot kartalle. Esimerkiksi hakkuualueen rajojen päivitys usean kuvion päälle onnistuu helpoiten erasercover-tyyppisellä operaatiolla (kuva 6.14).



Kuva 6.12. Leikkausanalyysin yksi leikkaustyyppi on "cut". Esimerkissä leikataan tie ja paloalue kiinteistön rajoilla.



Kuva 6.13. Leikkausanalyysit 1) "union", 2) "intersect" ja identity päivittävät aina ominaisuustauluun kummankin kartan tiedot ja käsittelevät tulosgeometriaa hieman eri tavoin. "Union" käyttää kummankin tason kaikkia viivoja, "intersect" rajaa myös aluetta toisen tason mukaan ja "identity" rajaa aluetta kummankin tason mukaan.

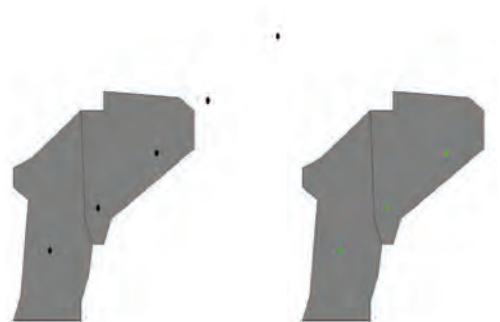


Kuva 6.14. Leikkausanalyysin yksi leikkaustyyppi on "erasecov". Esimerkissä leikataan metsikköä paloalueen rajoilla.

### 6.3.3 Rasteriaineistojen leikkausanalyysi

Rasteritietojen leikkausanalyysi käy rasterielementit yksitellen läpi. Tyypillisiä operaatioita ovat karttatasojen summa, erotus, tulo, jakolasku, eksponentti/logaritmiarvot ja trigonometriset funktiot. Varsinaisia pisteoperaatioita ovat loogisten lauseiden käyttö ja uudelleenluokitus. Operaatioita käytetään usein ehdollisten lauseiden kanssa.

Rasteriaineistossa leikkausanalyysin etuna on, että vektorikartoille tulevia virheellisiä pieniä polygoneja (eng. sliver polygons) ei



Kuva 6.15. Leikkausanalyysillä voidaan selvittää mitkä pisteet kuuluvat polygonin alueelle.

synny. Tomlin (1990) määritteli rasterialgebran ja siihen perustuvia funktioita n. 70 kappaletta.

Rasterit toimivat yhtälöiden muuttujina ja laskennassa käydään läpi jokaisen lähtömuuttujan solun arvot ja muodostetaan tulorasteri operaation mukaan:

```
tulos_rasteri = input_raster1 operaattori
input_rasteri2 . . .
tai
tulos_rasteri = function (input_rasterit
{,arguments})
```

Normaalit paikalliset hakuleikkaukset voidaan toteuttaa kertolaskulla tai loogisella operaattorilla. Esimerkiksi lauseke "(paloalue > 2013) \* (tilavuus > 200) \* (metsikkokuvio\_nro)" tuottaa seuraavat arvot:

(paloalue > 2013) ehtolausekkeen arvoina 1, aina kun solujen arvo >2013, muutoin nolla  
 (tilavuus > 200) ehtolausekkeen arvoina 1, aina kun solujen arvo >200, muutoin nolla  
 metsikkokuvio\_nro on aina numero

Kertomalla edelliset lausekkeet saadaan tulokseksi kuviot, joiden puuston määrä on yli 200 m<sup>3</sup>/ha, ja jotka ovat palaneet vuoden 2013 jälkeen

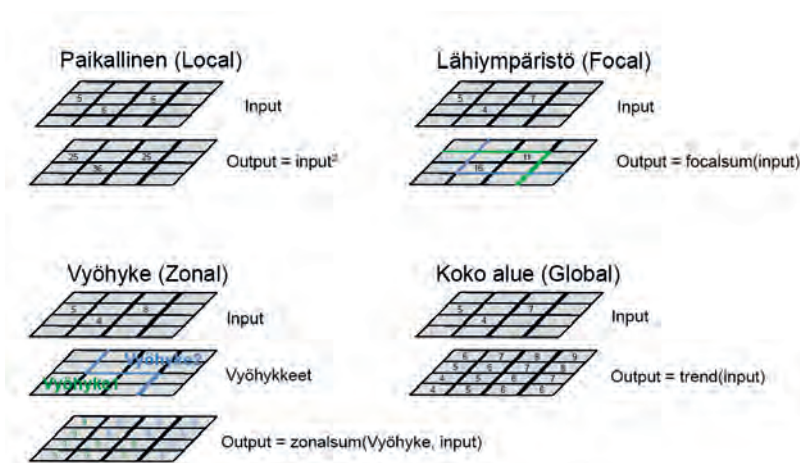
Esimerkiksi rintein jyrkkyys voidaan laskea funktiolla slope:  $slp\_grid = slope(dem, percentage)$ . Laskennassa voidaan myös käyttää normaaleja loogisuusvertailuja. Rasterianalyysin funktiot (Tomlin 1990, Kuva 6.16) voidaan jakaa: 1) paikallisiin funktioihin (eng. local), 2) lähiympäristön funktioihin (eng. focal),

3) vyöhykefunktioihin (eng. zonal), 4) koko alueen funktioihin (eng. global).

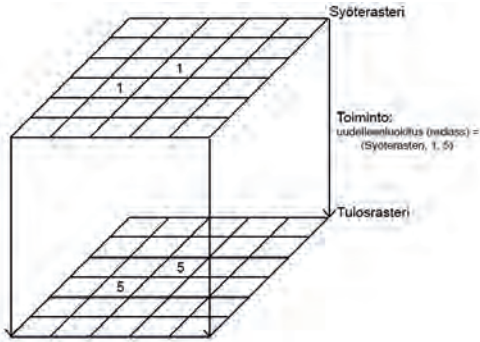
Rasterileikkausanalyysin paikalliset funktiot (eng. local), eli kuvaelementtikohtaiset funktiot, käyvät rasterin elementit yksitellen läpi. Yhden rasterin yksi elementti käsitellään täysin riippumattomasti ympäristön elementeistä. Tyypillisiä operaatioita ovat karttatasojen summa, erotus, tulo, jakolasku, eksponentti/logaritmiarvot ja trigonometriset funktiot. Varsinaisia pisteoperaatioita ovat boolean loogisten lausekkeiden käyttö ja uudelleenluokitus (kuva 6.17). Operaatioita käytetään usein ehdollisten lausekkeiden (if-then) kanssa.

Lähinaapuruston tietoja hyväksikäyttävälle funktioille annetaan syöteenä yleensä käytettävän ympäristön koko. Yksittäisten pisteiden arvoa voidaan laskea lähiympäristön avulla (esim. 3 x 3, 25 x 25 elementtiä), jolloin ympäristön muoto voidaan yleensä määrittää pyöreäksi tai neliöksi (kuva 6.18). Toisaalta yksittäisten pisteiden arvojen avulla voidaan generoida ympäristön arvoja, kuten vyöhykeanalyysin tapauksessa.

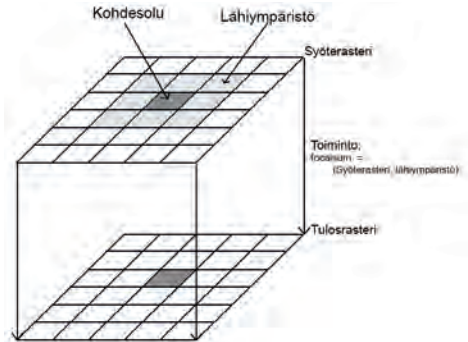
Vyöhykefunktioiden peruslähtökohtana on vyöhykekuviointi, jonka suhteen kaikki tehtävät operaatiot suoritetaan. Esimerkiksi kuvaelementtikohtaisten puustotilavuuksien summatunnukset voidaan laskea vyöhyke-/toimenpidekuviointain (kuvat 6.19, 6.20), joka on oma karttataso. Kuvassa 6.18. on esitetty laskentaesimerkit funktioille focalmean ja zonalsum.



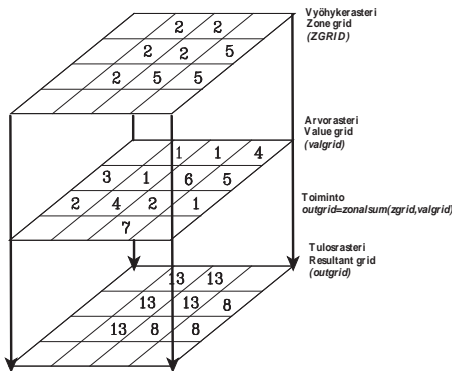
Kuva 6.16. Rasterianalyysin funktiot (Tomlin 1990, kuva Ville Kankare).



Kuva 6.17. Paikallisfunktion reclass (uudelleenluokittelu) käyttö. Kuva Ville Kankare.



Kuva 6.18. Paikallisympäristöfunktio: focussum (solun lähiympäristöstä laskettava summa). Kuva Ville Kankare.



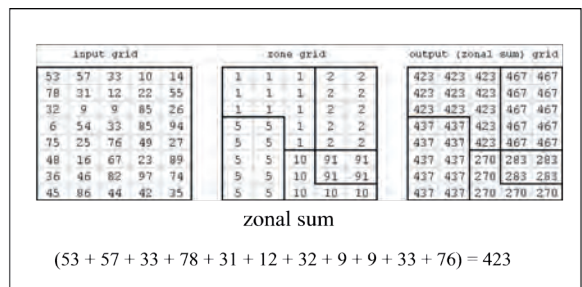
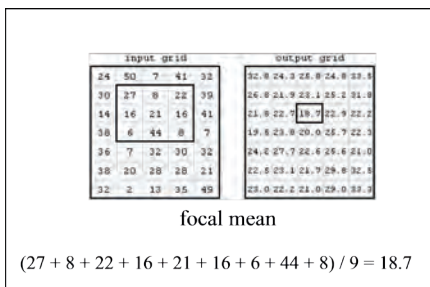
Kuva 6.19. Vyöhykefunktio: zonalsum.

### 6.4 Vaikutusalueanalyysit

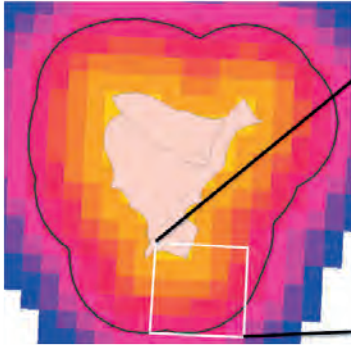
Vaikutusalueanalyysillä (buffering, proximity analysis) voidaan luoda tasoja, joissa on määritetty haluttujen kohteiden etäisyys, tai haake kohteet tietyltä etäisyydeltä. Vektorimuotoisissa vyöhykkeissä saadaan tuloksena uusi vyöhykepolygoni, jonka äärireuna noudattaa haluttua etäisyyttä kohteesta. Vyöhykkeitä voidaan generoida useita tai vaihtuvasti tietokannan kentän mukaan (kuvat 6.21–6.24).

Rasterimuotoisissa vyöhykkeissä rasterin arvoksi saadaan etäisyys kohteesta, joten se soveltuu monipuolisimmin jatkoanalyysiin.

Jos sovelluksen etäisyysmuuttuja on kuvattavissa intervalliasteikolla, ei tarvita jatkuvaa muutoksen kuvausta ja voidaan käyttää vektoripohjaisia vyöhykkeitä. Esimerkki tällaisesta tapauksesta voidaan ottaa suometsätieteestä (kuva 6.25). Lukkalan (1929), Seppälä (1969)

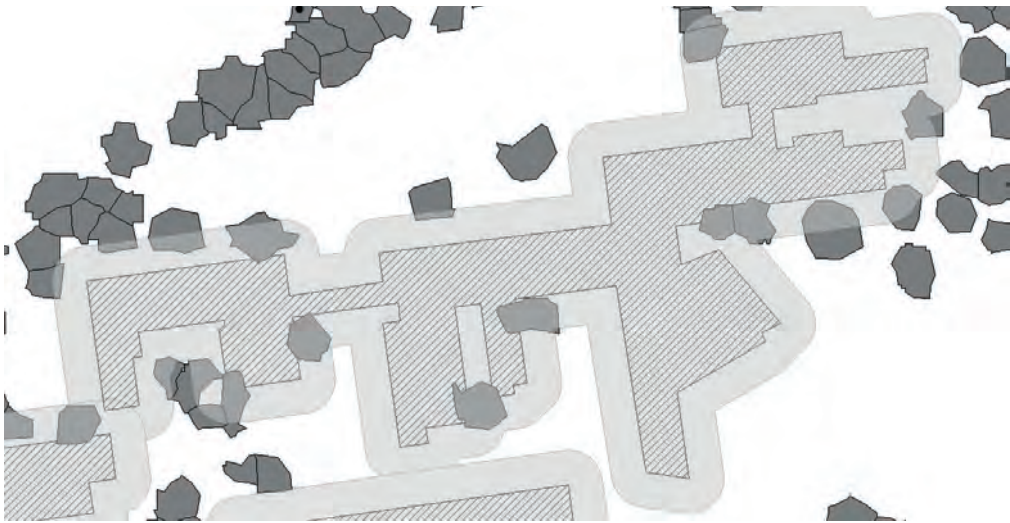


Kuva 6.20. Laskentaesimerkit focalmean- ja zonalsum- funktioista.

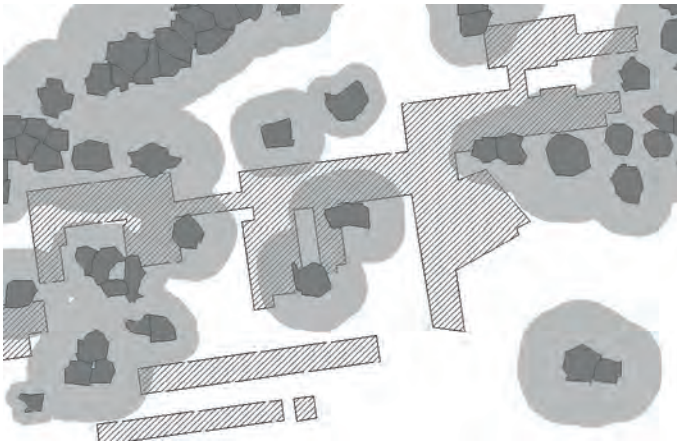


0	0	50	100	150
50	50	70	111	158
100	100	111	141	180
150	150	158	180	212
200	200	206	223	250

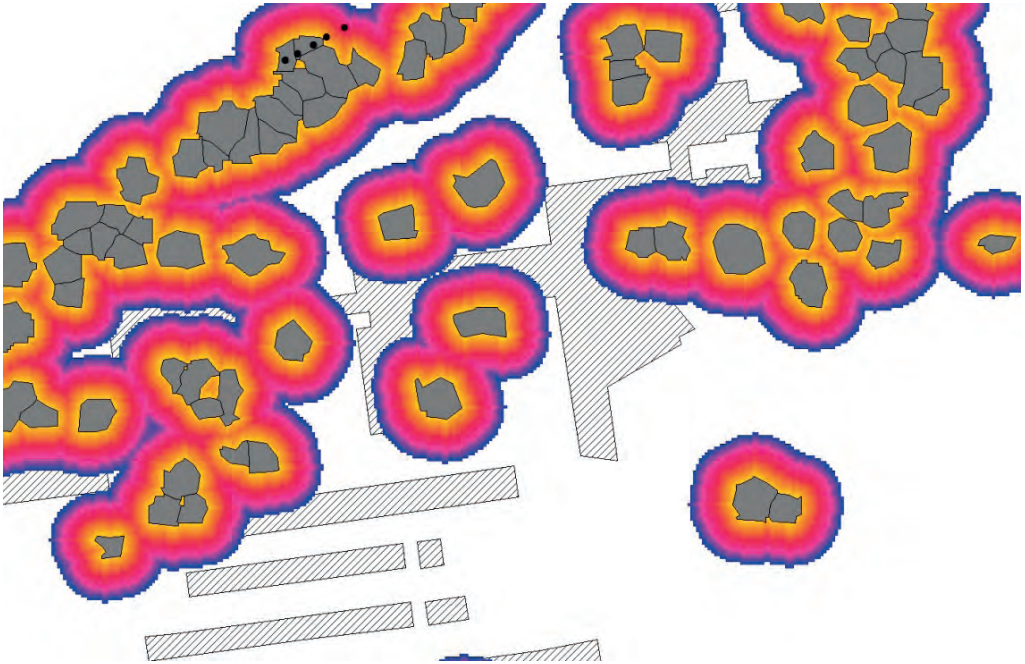
Kuva 6.21. Leimikon ympärille generoitu 200 m vektorivyöhyke ja 50 m etäisyysrasteripinta. Oikealla rasterin solujen todelliset arvot, jotka vasemmanpuolisessa kuvassa on visualisoitu väreillä.



Kuva 6.22. Paikkatieto-ohjelmalla voidaan luoda kohteille etäisyysvyöhykeitä. Kuvassa Viikin kampuksen B-talolle on luotu 10 metrin etäisyysvyöhyke, jotta voidaan selvittää, kuinka moni puu kasvaa rakennuksen vieressä. Etäisyysvyöhyke voi olla kiinteä, kuten 10 metriä, tai se voi vaihdella kohteen koon mukaan



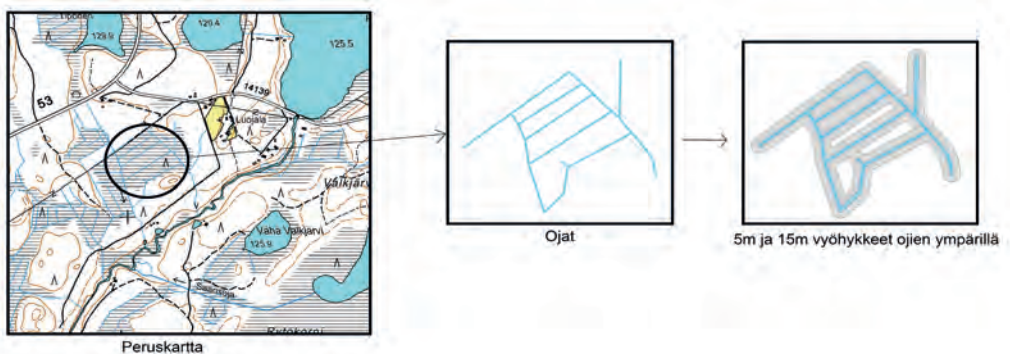
Kuva 6.23. Kuvassa Viikin kampuksen B-talon ympäristön latvuksille on luotu etäisyysvyöhyke, joka vastaa kyseisen puun pituutta. Tällöin voidaan helposti havaita puut, jotka voivat kaatua rakennuksen päälle.



Kuva 6.24. Paikkatieto-ohjelmalla voidaan luoda kohteille etäisyysvyöhykkeitä rasterimuodossa. Tällöin rasterin arvo tarkoittaa etäisyyttä kohteeseen. Kuvassa puiden latvuksille on luotu maksimissaan 15 metrin vyöhyke. Värien skaalaus on 1–15m..

ja Miinan (1994) tutkimusten perusteella tiedetään, että etäisyys ojasta vaikuttaa puun kasvuun. Kun puut ovat alle 5 m ojasta, kasvu on 9,6 mm, ja kun puut ovat 6–20 m ojasta, kasvu on 6,2 mm (Lukkala 1929). Jos metsätietojärjestelmässä halutaan huomioida etäisyys ojasta, ja sen vaikutus kasvuun, niin laskennan

vaiheet ovat seuraavat: 1) ojat irrotetaan omaksi karttatasoksi, 2) lasketaan vaikutusalueet ojen ympärille, esim. vektoreina, 3) leikataan vaikutusalueen vektoripolygonit kuviotiedolla, 4) muodostetaan kuvion puujoukot vaikutusalueille rajatuille osakuviolle erikseen, 5) summataan osakuviot kuviotiedoiksi.



Kuva 6.25. Peruskartta, ojat ja ojen ympärille lasketut vyöhykkeet puuston kasvun laskemiseksi. Kuva Ville Kankare.



## 7 Interpolointi

### 7.1 Johdanto

Spatiaalisessa interpoloinnissa paikkaan sidottua havaintopistetietoa käyttämällä muodostetaan interpoloimalla jatkuva pinta. Pistetieto on mitattua havaintotietoa jostakin ilmiöstä, esimerkiksi typpipitoisuus peltomaassa, säteily ydinvoimalan läheisyydessä tai maanpinnan korkeus. Spatiaalisen interpoloinnin ajatuksena on käyttää pinnan muodostamiseen mitattuja arvoja tunnetuissa pisteissä ja ennustaa arvot mitattujen pisteiden välisille alueille.

Paikkatietojärjestelmän käyttö perustuu sijainniltaan tunnetun tiedon käyttöön. Tieto ei kuitenkaan aina ole alueellisesti kattavaa, joten esimerkiksi tunnettujen pisteiden välisten alueiden kuvaamiseksi joudutaan käyttämään spatiaalisen interpoloinnin menetelmiä. Spatiaalinen interpolointi perustuu havaintoon, että lähellä toisiaan sijaitsevien pisteiden arvot ovat suuremmalla todennäköisyydellä lähellä toisiaan kuin kauempana olevien pisteiden arvot (Burrough 1987). Ilmiötä nimitetään spatiaalisiksi autokorrelaatioksi. Spatiaalisissa interpolointimenetelmissä pyritään mallintamaan ominaisuuden spatiaalinen autokorrelaatio tutkimusalueella ja käyttämään tätä mallia hyväksi ennustettaessa ominaisuusarvoja tuntemattomille pisteille.

Joissain tapauksissa ominaisuuden arvo voidaan mitata suoraan kaikista kiinnostuksen kohteena olevista pisteistä. Esimerkiksi digitoitaessa korkeuskäyriä stereokartoituskojeella mitataan ilmakuvista muodostetulta kolmiulotteiselta maastomallilta suoraan korkeusarvot kaikista korkeuskäyrän pisteistä. Käytännössä digitoija kuljettaa kohdistinta kolmiulotteisen mallin maanpintaa pitkin pyrkien pitämään korkeusarvon samana. Tässäkään tapauksessa ei kuitenkaan havainnoida kaikkien maaston pisteiden korkeutta, vaikka teoriassa se olisi mahdollista, vaan korkeuskäyrät digitoidaan tietyin korkeuserovälein. Korkeuskäyrien välisten pisteiden korkeusarvot voidaan myöhemmin laskea lähimmistä mitatuista korkeuskäyrän pisteistä.

Useimmiten on kuitenkin mahdotonta havainnoida ominaisuuden arvo suoraan kaikista kiinnostuksen kohteina olevista pisteistä. Tutkittavan ominaisuuden mittausta voi olla niin työlästä, aikaa vievää tai kallista, ettei ominaisuusarvoja kannata mitata kuin joistakin edustavista pisteistä. Tällainen tilanne on yleinen, kun halutaan havainnoida luontoon ja ympäristöön liittyviä ominaisuuksia, kuten maaperän, puuston tai muun kasvillisuuden ominaisuuksia. Osa ominaisuuksien määrittämisestä voi vaatia työlään ja kalliin maastomittauksen lisäksi vielä monimutkaisia laboratoriomittauksia.

Spatiaalisella interpoloinnilla voidaan edustavien havaintopisteiden avulla tuottaa ominaisuuskohtainen karttataso, jossa välipisteiden arvot on ennustettu interpoloimalla. Esimerkiksi maaperäkartoja varten kairataan tutkimusalueelta maaperänäytteitä ennalta määrättyistä pisteistä. Maaperänäytteet analysoidaan laboratoriossa, jonka jälkeen saadut tulokset yleistetään kaikille tutkimusalueen pisteille jollakin spatiaalisella interpolointimenetelmällä. Lopuksi vielä luokitellaan samanlaiset pisteet maaperäluokiksi. Yhdistämällä saman luokan pisteiden edustamat alueet saadaan maaperäkartan kuviot, jotka voidaan värittää havainnollisin värein.

Ongelmana on sopivan interpolointimenetelmän valinta. Menetelmän tulee soveltua kyseessä olevan ominaisuuden mallintamiseen ja sen tulee pystyä hyödyntämään tehokkaasti käytettyä havaintopisteverkkoa. Jotkut menetelmät soveltuvat paremmin laaja-alaisen trendinomaisen vaihtelun kuvaamiseen, toiset taas pienimuotoisemman paikallisen vaihtelun mallintamiseen. Myös havaintopisteiden määrä ja niiden sijoittuminen tutkittavalle alueelle vaikuttavat interpolointimenetelmän valintaan. Osa menetelmistä soveltuu hyvinkin pienen havaintomäärän mallintamiseen, toiset taas edellyttävät tietyn vähimmäismäärän havaintopisteitä toimiakseen luotettavasti. Eräät interpolointimenetelmät soveltuvat paremmin systemaattisesti mitattujen havaintojen tasoi-

tamiseen, kun toiset taas soveltuvat paremmin epäsäännöllisesti mitattujen havaintojen interpolointiin.

Useimmissa interpolointimenetelmissä oletetaan, että tarkasteltava tekijä muuttuu tasaisesti ja että sitä voidaan kuvata matemaattisesti määritellyn pinnan avulla. Interpolointimenetelmiltä voidaan vaatia ajallista ja alueellista jatkuvuutta, kohdepisteen tarkkaa maantieteellistä sijaintia sekä pientä keskivirhettä (Ojansuu ja Henttonen 1983). Interpolointimenetelmät voidaan jakaa globaaliin ja paikallisiin menetelmiin (Burrough 1987). Globaalisissa menetelmissä ominaisuuden vaihtelua kuvaavassa mallissa käytetään tarkasteltavan alueen kaikkien pisteiden havaintoja, paikallisissa menetelmissä käytetään vain naapuripisteiden havaintoja. Yleensä valitaan jokin maksimietäisyys, jota lähempänä olevat pisteet otetaan tasoitukseen mukaan. Tunnetuimpia interpolointimenetelmiä ovat trendipinta-analyysi ja Fourier-sarjat, jotka ovat globaalisia menetelmiä sekä splinit, liukuvien keskiarvojen menetelmä, kaksoislineaarinen interpolointi ja Kriging, jotka ovat paikallisia menetelmiä (Burrough 1987).

Interpolointi on mahdollista tehdä joko deterministisellä tai geostatistisella interpolointitekniikalla. Molemmilla tekniikoilla interpolointi voidaan tehdä vielä usealla erilaisella menetelmällä. Useimmat spatiaaliset interpolointimenetelmät käyttävät hyväkseen autokorrelaation ideaa, jossa oletetaan, että lähellä toisiaan olevien pisteiden arvot ovat suuremmalla todennäköisyydellä lähellä toisiaan kuin kauempana toisistaan olevien pisteiden arvot. Deterministiset menetelmät käyttävät interpolointiin matemaattisia funktioita. Geostatistiset menetelmät käyttävät sekä matemaattisia että tilastollisia menetelmiä. Geostatististen menetelmien etu on niiden ominaisuus tuottaa tietoa ennusteen luotettavuudesta.

## 7.2 Deterministiset menetelmät

GIS-sovelluksissa pinnan muodostaminen pistetiedosta on tärkeä perustoiminto. Kaikkein eniten käytetty pinta lienee maaston digitaalinen korkeusmalli. Spatiaalisen interpoloinnin

avulla on mahdollista muodostaa ennustepintaa mistä hyvänsä maaperän, maanpinnan tai ilmakehän ilmiöstä tai ominaisuudesta mitattua paikkaan sidottua pistetiedosta. Suuri haaste onkin tuottaa aina tarkin mahdollinen ennustepinta käytettävän aineiston pohjalta sekä saada tietoa ennustepinnan luotettavuudesta. (Johnston ym. 2001)

Esimerkki korkeusmallin tarkennuksesta (Johnston ym. 2001): Tehtäväsi on suunnitella kaupunkiin uusi näköalapaikka. Mahdollisia näköalapaikkoja on useita, joista sinun on valittava paras. Valitset parhaan paikan mallittamalla jokaisen näköalapisteen näkymän GIS-sovelluksella korkeusmallin avulla. Käytössäsi oleva korkeusmalli on muuten hyvä, mutta sen havaintopisteistö on liian harva luotettavaa näkyvyysanalyysiä varten. Korkeusmallia voidaan yrittää tarkentaa spatiaalisen interpoloinnin keinoin.

Autokorrelaation idean mukaan lähellä toisiaan olevien pisteiden arvot ovat samankaltaisempia kuin kaukana toisistaan olevien pisteiden arvot. Kun korkeusmalliin lisätään piste, miten pisteelle ennustetaan arvo eli tässä tapauksessa korkeus merenpinnasta? Kuinka monen lähimmän havaintopisteen arvoista uuden pisteen arvo tulee laskea? Entä painotetaanko kaikkien lähellä sijaitsevien havaintopisteiden arvoja samalla tavalla. Kun ennustettavasta pisteestä liikutaan kauemmas, kaukana olevien havaintopisteiden arvot vaikuttavat yhä vähemmän ennustettavan pisteen arvoon. Liian kaukaa huomioitujen havaintopisteiden arvot voivat olla uuden pisteen arvon ennustamiselle jopa haitallisia. Näin siksi, että maasto voi kaukana olla jo hyvin erilainen. Ratkaisu tähän ongelmaan on aina tilannekohtainen riippuen olemassa olevien pisteiden määrästä ja jakaumasta sekä maanpinnan muodoista. Ensimmäisessä ratkaisuvaihtoehdossa perusajatuksena on tasapainotella ennustettavan pisteen arvon luotettavuuden (suuri määrä pisteitä) sekä käytännöllisyyden (pieni määrä pisteitä) välillä.

Korkeusmallin alueella on suuripiirteistä maastoa, josta puuttuu kokonaan pienvaihtelu (supat ja kummut). Kun mitatut korkeuspisteet ovat jakautuneet suhteellisen tasaisesti alueelle, saadaan tuntemattoman pisteen arvolle ennuste

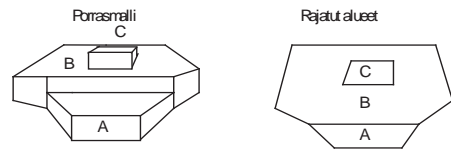
kohtuullisella tarkkuudella huomioiden lähimpien pisteiden arvot. Tällainen deterministinen interpolointimenetelmä on esimerkiksi IDW (eng. Inverse Distance Weighting) -interpolointi (kaava 7.4). Kuten interpolointimenetelmän nimestä voi päätellä, etäisyyden kasvaessa ennustettavasta pisteestä havaintopisteen arvon paino vähenee.

On myös muita tapoja ennustaa arvo pisteelle, josta ei ole mitattua tietoa. Toisaalla korkeusmallin alueella on loivasti viettävä rinne, jossa on runsaasti maaston pienvaihtelua. Mitatut korkeuspisteet sijaitsevat maaston supissa ja kummuilla. Tällöin edellä mainittu lähimpien havaintopisteiden käyttö (IDW-menetelmä) tuntemattoman pisteen arvon ennustamiseen saattaa tuottaa ali- tai yliarvioita. Kyky määrittää ja mallittaa paikallisia (eng. local) sekä koko alueen kattavia (eng. global) pinnanmuotoja mahdollistaa ennustepinnan tarkkuuden parantamisen.

Esimerkkitapauksessa havaintopisteistöön sovitaan ensimmäisen asteen polynomifunktio eli taso. Tällöin osa mitattujen pisteiden korkeusarvoista on tason ala- ja osayläpuolella. Funktio sovitaan pisteistöön siten, että virhe minimoituu. Tasoitus tapahtuu pienimmän neliösumman menetelmällä. Tämä on globaalien polynomi-interpoloinnin toimintaperiaate.

Yleisesti, jos tuntemattoman pisteen arvon ennustus perustuu koko alueen kattavaan, globaaliin trendiin, sovitaan alueen havaintopisteistöön valittua astetta oleva polynomifunktio. Polynomifunktion aste riippuu maaston muodoista. Esimerkiksi laakson kuvaamiseen taso on huono. Tällaisessa tapauksessa toisen asteen polynomifunktio, joka huomioi yhden taitekohdan, antaa tyydyttävän tuloksen. Jos taitekohtia on kaksi, saattaa kolmannen asteen polynomifunktio antaa parhaan tuloksen jne. Taitekohtia voi olla molempiin suuntiin, jolloin yhden taitoksen tapauksessa muodostuu kuoppa, vati.

Entä miten saada luotettavat korkeusarvot pisteille rinteessä, joka välillä muuttuu tasamaaksi, jonka jälkeen rinne taas jatkuu? Tason sovittaminen tällaiseen maastoon antaa huonon ennusteen korkeusarvoille. Paikallinen vaihtelu voidaan huomioida käyttämällä paikallista

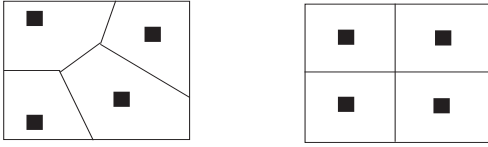


Kuva 7.1. Porrasmallitekniikalla on rajattu kohdealueelta kolme aluetta A–C. Porrasmallissa portaan korkeus kuvaa ominaisuuden arvoa, joka keskimäärin vallitsee alueella.

polynomi-interpolointia. Sen ideana on käyttää monia pienempiä toistensa päälle meneviä tasoja. Tasojen keskipisteiden arvoja käytetään ennustearvoina. Muodostunut ennustepinta on joustavampi ja ehkä myös tarkempi.

Interpolointi (eng. radial basis function) radial-perusfunktioiden avulla mahdollistaa sekä globaalien trendien että paikallisen vaihtelun huomioimisen. Tällainen menetelmä on käyttökelpoinen, kun sovitettu pinta ei oikeasti kuvaa maastonmuotoja. Ajatuksena on saada muodostettua pinta, joka kulkee kaikkien mitattujen pisteiden arvojen kautta. Pisteiden arvojen ennustaminen mitattujen pisteiden välillä voidaan tehdä usealla eri tavalla. Pinta voidaan esimerkiksi pakottaa kauniin kaarevaksi.

Porrasmalli on yksinkertainen epäjatkokuvan tasoituspinnan tuottava interpolointimenetelmä. Siinä pyritään määrittämään rajalinjat siihen kohtaan, jossa ominaisuuden arvo muuttuu. Rajalinjat voidaan määrittää esimerkiksi satelliittikuvien analysoinnissa käytettyjen segmentointimenetelmien avulla. Rajalinjat rajaavat alueita, joissa ominaisuuden arvo on likimain sama. Menetelmä tuottaa porraskuvan, jossa kunkin alueen arvo voidaan kuvata arvoa vastaavana portaana (kuva 7.1). Siirryttäessä alueelta toisella on nouseva tai laskeuduttava askelma. Menetelmä perustuu oletukseen, että ominaisuuden arvo muuttuu hyppäyksittäin rajalinjaa ylitettäessä eikä vaihtelee alueiden sisällä. Luonnonprosesseissa tämä oletus pitää kuitenkin harvoin paikkaansa. Menetelmä soveltuu luokka-asteikollisten muuttujien interpolointiin ja olosuhteisiin, joissa joudutaan käsivaraisesti tasoittamaan jonkin ominaisuuden vaihtelua (Burrough 1987).



Kuva 7.2. Voronoi-polygonit epäsäännölliselle ja säännölliselle pisteverkolle.

Lähimmän naapurin menetelmä on astetta kehittyneempi sovellus, jolla voidaan tuottaa epäjatkua tasoituspinta havaintopisteiden arvoista. Menetelmä perustuu alueenmuodostustekniikan käyttöön, joka tunnetaan Voronoi-polygoni -nimellä. Tekniikasta käytetään myös nimeä Thiessen-polygonit tai Dirichlet:n solut. Siinä ideana on, että paras ennuste tuntemattomalle pisteelle saadaan kopioimalla ominaisuuden arvo suoraan sitä lähimmältä havaintopisteeltä. Voronoi-polygonit rajaavat kunkin havaintopisteen ympärille alueen, jonka sisällä kaikki pisteet ovat lähimpänä kyseistä havaintopistettä. Voronoi-polygonit saadaan piirtämällä keskinormaalit havaintopistenaapureita yhdistäville janoille (kuva 7.2). Voronoi-polygonien määrittämiseen on olemassa valmiita laskentarutiineja. Käytännön esimerkki Voronoi-polygonien käytöstä on metsikön puiden kasvutilan rajaaminen.

Menetelmän huonoja puolia on ensinnäkin se, että ennusteen arvo riippuu vain yhdessä havaintopisteessä mitatusta arvosta. Toiseksi, Voronoi-polygonit ovat riippuvaisia havaintopisteverkosta, toisin sanoen siitä, kuinka havaintopisteet on sijoitettu kohdealueelle. Tietylle pisteelle ennustettava arvo voi muuttua paljonkin, jos havaintopisteet sijoitetaan tutkimusalueelle eri tavalla. Kolmanneksi, menetelmä ei kuvaa alueiden sisäistä vaihtelua. Kunkin polygonin rajojen sisäpuolella on sama arvo (Burrough 1987). Voronoi-polygonit on kuitenkin paras interpolointimenetelmä luokka-asteikollisten tunnusten interpoloimiseksi.

Voronoi-polygoni -tekniikkaa on kehitetty edelleen. Painotetussa solujen muodostuksessa normaalin sijainti havaintojen välisellä janalla riippuu havaintojen painoarvoista. Voronoi-polygoni -tekniikkaa sovelletaan usein yhdis-

tettyinä johonkin kehittyneempään menetelmään. Luonnollinen naapuruus -nimellä (eng. natural neighbourhood) tunnetussa menetelmässä Voronoi-polygoni -tekniikkaa sovelletaan liukuvien keskiarvojen menetelmässä tarvittavien painojen määrittämiseen (Ripley 1981). Voronoi-polygoni -tekniikkaa voidaan soveltaa myös splini-menetelmässä tarvittavien osa-alueiden määrittämisessä (Ripley 1981).

Trendipinta-menetelmä. Yksinkertaisin tapa kuvata asteittaisia muutoksia on mallittaa niitä polynomiregressiolla. Ajatuksena on sovittaa viiva tai pinta pienimpien neliösummien avulla niin, että pinta tai käyrä poikkeaa mahdollisimman vähän havaintoarvoista. Spatiaaliset koordinaatit  $X$  ja  $Y$  oletetaan selittäjiksi ja kiinnostuksen kohde  $Z$  on selitettävä muuttuja (Burrough 1987). Menetelmä soveltuu hyvin laaja-alaisen, hitaasti vaihtuvan vaihtelun mallintamiseen. Se ei ota huomioon pienialaista paikallista vaihtelua. Yksinkertaisin tapa yksiuulotteisessa aineistossa mallittaa ominaisuutta  $Z$  on käyttää lineaarista regressiota

$$Z = b_0 + b_1 X, \quad (7.1)$$

missä  $Z$  on mallitettava ominaisuus ja  $X$  muodostuu havaintopisteistä,  $b_0$  ja  $b_1$  ovat parametrejä. Kaksiulotteisessa aineistossa otetaan mukaan myös  $Y$ -koordinaatti. Epälineaarisen vaihtelun mallittamisessa voidaan käyttää korkeamman asteen polynomifunktiota (Burrough 1987). Trendipintamenetelmän heikkous on niin sanottu reunavaikutus, jolloin interpoloitavan alueen rajojen lähellä ekstrapoloidut arvot voivat olla epärealistisia (Henttonen 1991). Menetelmän heikkoutena on myös sen joustamattomuus pienillä asteluvuilla. Korkeamman asteen polynomifunktioiden termien merkitysten tulkinta on vaikeaa. Mikäli havaintopisteitä on vähän, voivat ääriarvot vääristää estimoitua pintaa voimakkaasti. Menetelmällä tuotettu ennustepinta ei kulje havaintopisteiden kautta eli menetelmä tuottaa pehmenneen ennusteen havaintoaineistosta. Regressiotekniikkaan perustuva trendipintamenetelmä on helppo ymmärtää ja ohjelmallisesti helppo toteuttaa. Trendipintamenetelmää käytetään usein mal-

lintamaan koko tutkimusalueen laaja-alainen vaihtelu ennen paikallisen interpolointimenetelmän käyttöä.

Liukuvien keskiarvojen menetelmä on yksinkertaisin jatkuvan ennustepinnan tuottava interpolointimenetelmä. Siinä kohdepisteelle lasketaan arvo ympäristön havaintojen painotettuna keskiarvona. Painot lasketaan havaintopisteiden ja kohdepisteiden välisen etäisyyden funktiona seuraavan kaavan mukaisesti (Ripley 1981).

$$\hat{Z}(x) = \sum_1^N \lambda_i Z(x_i) \quad \sum \lambda_i = 1, \lambda_i \propto \omega(d(x, x_i)), \quad (7.2)$$

missä

$\hat{Z}(x)$  = pisteelle  $x$  ennustettu arvo  
 $N$  = havaintopisteiden lukumäärä  
 $Z(x_i)$  = havaintopisteessä  $x_i$  havaittu arvo  
 $\lambda_i$  = havainnon  $x_i$  painokerroin  
 $\omega_i$  = painofunktio  
 $d(x, x_i)$  = etäisyys pisteestä  $x$  pisteeseen  $x_i$

Yleensä painofunktion arvo lähenee ääretöntä, kun havaintopisteen ja kohdepisteen välinen etäisyys lähestyy nollaa. Painofunktiona voidaan käyttää käännteisiä eksponentiaalifunktioita (Ripley 1981), esimerkiksi seuraavia:

$$\omega = \left\{ d^{-r}, e^{-d}, e^{-ad^2} \right\}, \text{missä} \quad (7.3)$$

$d$  = kohdepisteen ja havaintopisteen välinen etäisyys  
 $e$  = neperin luku  
 $r, a$  = vakioita

Menetelmää sovellettaessa käytetään myös lähimpien havaintojen lukumäärään perustuvaa painofunktion määrittystä, jolloin menetelmää voidaan kutsua  $n$ -lähimmän naapurin menetelmäksi. Käytännössä tiettyä maksimietäisyyttä kauempana olevat painot määritellään nolliksi. Jos maksimietäisyyttä lähempänä ei kuitenkaan ole yhtään havaintoa, siirretään kohdepisteelle lähimmän havaintopisteen arvo. Tällöin kaava voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon (Ojan-suu ja Henttonen 1983):

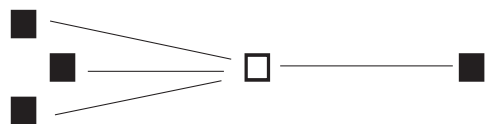
$$\omega = \begin{cases} 1 - \left( \frac{d}{d_{\max}} \right)^q, & d \leq d_{\max} \\ 0, & d > d_{\max} \end{cases} \quad (7.4)$$

missä

$\omega$  = paino ko. havaintopisteelle  
 $d$  = kohdepisteen ja havaintopisteen välinen etäisyys  
 $d_{\max}$  = maksimietäisyys, jonka päästä havaintopisteessä mitattu arvo vielä otetaan huomioon kohdepisteen arvoa ennustettaessa

Menetelmällä saadaan alueellisesti lähes jatkuva tasoituspinta. Epäjatkuvuuskohtia syntyy, kun maksimietäisyyttä lähempänä ei ole yhtään havaintopistettä. Menetelmän vahvuutena on sen yksinkertaisuus ja helppo laskennallinen toteutus. Lisäksi menetelmän avulla pystytään ottamaan huomioon myös pienimuotoinen paikallinen vaihtelu, kun valitaan painofunktion parametrit sopivasti. Liukuvien keskiarvojen menetelmän heikkoutena on herkkyyks havaintopisteiden ryhmittäisyydelle (Ripley 1981). Mikäli kohdepistettä lähellä on samalla etäisyydellä ryhmä havaintopisteitä ja toisaalta taas yksittäinen havainto, painottuvat ryhmän havaintopisteet liian paljon, kun ennustetaan arvoa kohdepisteelle, sillä ryhmän ”lisäpisteet” eivät tuo paljonkaan lisätietoa alueellisesta vaihtelusta (kuva 7.3).

Käännteisneliömenetelmä (eng. inverse square distance interpolation, IS) on liukuvien keskiarvojen-menetelmän erikoistapaus, jossa painofunktio  $w = d^{-2}$ .



Kuva 7.3. Ryhmittäisyyden vaikutus kohdepisteen arvoon liukuvien keskiarvojen menetelmässä.

Kaksoislinearisessa interpoloinnissa tietyn pisteen arvo lasketaan x- ja y-suunnissa erikseen. Interpolointi on kaksivaiheinen: 1) Lasketaan lähimpien havaintopisteiden avulla väliaikaiset arvot tarkasteltavan pisteen x-akselille ja y-akselille erikseen havaintopisteiden ja akselien leikkauskohtiin. 2) Väliaikaisten arvojen avulla lasketaan x-suunnan arvo ja y-suunnan arvo tarkasteltavaan pisteeseen. Molemmissa vaiheissa käytetään lineaarista interpolointia. Lineaarisen interpoloinnin yleinen yhtälö on

$$Z_0(x_0, y_0) = Z_1 + \frac{d_{0,1}(Z_2 - Z_1)}{d_{2,1}} \quad (7.5)$$

missä  $(x_0, y_0)$  on piste johon arvo  $Z_0$  lasketaan,  $Z_1$  tunnettu arvo pisteessä  $(x_1, y_1)$ ,  $Z_2$  tunnettu arvo pisteessä  $(x_2, y_2)$ ,  $d_{0,1}$  pisteiden  $(x_0, y_0)$  ja  $(x_1, y_1)$  välinen etäisyys ja  $d_{2,1}$  pisteiden  $(x_2, y_2)$  ja  $(x_1, y_1)$  välinen etäisyys.

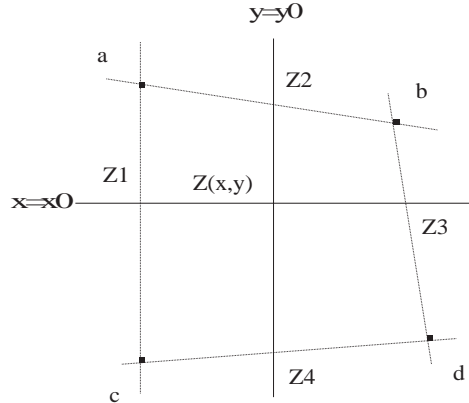
Lopullinen tarkasteltavan pisteen ominaisuuden  $Z$  arvo saadaan x- ja y-suunnissa interpoloitujen arvojen keskiarvona (Uniras ... 1992)

$$Z(x, y) = \frac{1}{2}(Z_x + Z_y) \quad (7.6)$$

missä  $Z(x, y)$  on lopullinen arvo,  $Z_x$  on x-suunnassa interpoloitu arvo ja  $Z_y$  vastaavasti y-suunnassa interpoloitu arvo.

Kaksoislineaarinen interpolointi on kehittyneempi menetelmä kuin liukuvien keskiarvojen menetelmä. Erityisen käyttökelpoinen se on tilanteessa, jossa havaintopisteitä ei ole kovin paljon ja interpoloitava ominaisuus ei ole isotrooppinen. Kaksoislinearisella interpoloinnilla voidaan huomioida x:n ja y:n suuntainen spatiaalinen vaihtelu erikseen. Toisaalta menetelmä on käyttökelpoinen jo pienille aineistoille, joille ei kannata soveltaa kehittyneempiä menetelmiä kuten kriging-menetelmää.

Fourier-sarjoja voidaan käyttää yksi- tai kaksiulotteisen vaihtelun kuvaamisessa mallittamalla havaittua vaihtelua sini- ja kosinikäyrien lineaarikombinaation avulla (Burrough 1987). Fourier-sarjoja ei ole juurikaan käy-



Kuva 7.4. Kaksoislineaarinen interpolointi. Alkuperäisten pisteiden a, b, c ja d avulla lasketaan lineaarisella interpoloinnilla väliaikaiset pisteet  $Z_1, Z_2, Z_3$  ja  $Z_4$ , joiden avulla lasketaan pisteen  $Z(x, y)$  arvot x- ja y-suunnissa erikseen. Lopullinen arvo saadaan x- ja y-suunnissa laskettujen arvojen keskiarvona.

tetty karttojen tasoituksessa (Burrough 1987). Ominaisuuden vaihtelu mallinnetaan etsimällä sini- ja kosinifunktioiden lineaarikombinaateille, spektrifunktiolle, sopivat aallonpituutta, vaihetta ja suuntaa kuvaavat parametrit (Robinson 1975). Menetelmää on käytetty eräissä geologisissa sovelluksissa ja kuvantulkinnan apuvälineenä. Menetelmää ei ole juuri sovellettu luonnonilmiöiden spatiaaliseen interpolointiin, sillä luonnossa havaittava vaihtelu, oli se sitten luonnon itsensä muovaamaa tai ihmisen tekemää, on liian monimutkaista tällä menetelmällä kuvattavaksi (Burrough 1987).

Splinit ovat paloittaisia funktioita, jotka sovitetaan tarkasti muutamaan havaintopisteeseen kerrallaan. Samanaikaisesti varmistetaan, että käyrän osien liiittymäkohdat ovat jatkuvia (Burrough 1987). Splinien avulla on mahdollista muokata käyrän osaa ilman, että koko käyrää tarvitsee laskea uudelleen. Splini-nimeä käytettiin ensimmäisen kerran menetelmälle, jossa paloittaisen kuutiopolynomifunktion (eng. piecewise cubic polynomial) avulla tasoitettiin havaintoaineisto jatkuvaksi käyräksi, jolla on jatkuva 1. ja 2. derivaatta (Burrough 1987). Menetelmässä aineisto jaetaan ”paloihin”, ja jokaisessa ”palassa” aineistoon sovitetaan kolmannen asteen polynomifunktio niin, että

se ei muodosta epäjatkuvuuskohtaa liittyessään seuraavan ”palan” polynomifunktioon. Myöhemmin splini-nimi laajennettiin koskemaan myös edellä kuvatusta menetelmästä johdettuja interpolointimenetelmiä. Paloittaisen polynomifunktion  $p(x)$  yleinen määritelmä on:

$$p(x) = p_i(x) \quad x_i < x < x_{i+1} \quad (7.7)$$

$$i = 0, 1, \dots, k - 1$$

Funktiot  $p_i(x)$  ovat polynomifunktioita. Splinejä voidaan käyttää sekä tarkkaan interpolointiin että karkeaan tasoittamiseen. Kolmiulotteisessa tapauksessa, kun halutaan ennustaa pinta havaintopisteiden avulla, voidaan käyttää niin sanottuja B-splinejä, jotka koostuvat kukin useasta pienemmästä splini-funktiosta. B-splinejä voidaan kuvata pieninä mäkkinä ja laaksoina, joita yhdistelemällä saadaan kuvattua haluttu pinta. (Burrough 1987).

Koska splinifunktiot käsittelevät aineistoa pala kerrallaan, on interpolointi nopeaa. Lisäksi tasoitettu pinta voidaan määrätä kulkemaan tarkalleen havaintopisteiden kautta tai pinta voidaan pehmentää keskimääräiseksi tasoitukseksi, joka ei mukaile kaikkia äärihavaintoja. Splini-menetelmällä pystytään ottamaan huomioon myös pieniä paikallisia piirteitä tarkemmin kuin esimerkiksi liukuvien keskiarvojen menetelmässä. Liukuvien keskiarvojen menetelmässä lasketaan keskiarvo ympäröivistä havainnoista, kun taas splini-menetelmässä pyritään mukailemaan havaintoarvoja polynomifunktion avulla. Liukuva keskiarvo on jäykempi menetelmä kuin splini-funktio.

Splini-menetelmässä tarvittavien parametrien määrittäminen on hankalaa. Käyttäjä joutuu määrittämään, kuinka tarkasti havaintoarvoja mukaillaan eli kääntäen, minkä verran ennustepinta saa poiketa havaintoarvoista. Toinen käyttäjän päätettäväksi jäävä seikka on palojen koon määrittäminen. Kuinka pieniin paloihin alue jaetaan (montako havaintoa) ja toisaalta, onko osavälien raja havaintopisteiden välissä vai kohdalla? Nämä parametrit vaikuttavat oleellisesti siihen, minkälaisen ennustepinnan menetelmä tuottaa. Menetelmä ei myöskään tuota suoraan arviota estimoidun pinnan luotettavuudesta.

### 7.3 Geostatistiset menetelmät

Deterministiset menetelmät perustuvat suoraan ennustettavan pisteen ympäristön mitattuihin arvoihin tai matemaattisiin funktioihin, jotka määrittelevät ennustepinnan muodon. Toinen tapa interpoloida pinta paikkaan sidotun havaintopistetiedon avulla on käyttää hyväksi tilastollisia malleja, jotka huomioivat autokorrelaation. Näiden geostatististen menetelmien avulla saadaan ennustepinnan lisäksi myös tietoa ennusteen luotettavuudesta.

Kriging-menetelmät on spatiaalinen interpolointimenetelmäperhe, jossa perusajatus on, että analysoimalla ominaisuuden spatiaalinen vaihtelu ja mallintamalla se, voidaan kullekin havaintopisteelle määrätä optimaalinen paino ennustepintaa laskettaessa. Kriging-menetelmä eroaa liukuvien keskiarvojen menetelmästä siinä, että ryhmittäisyyden vaikutus otetaan automaattisesti huomioon ja ryhmän havaintoarvot saavat pienemmän painon, kuin vastaava yksittäinen havaintoarvo. Kriging-menetelmässä havaintoarvojen painot määrätään alueellisen vaihtelun perusteella. Kriging perustuu oletukseen, että spatiaalinen vaihtelu voidaan esittää kahden komponentin avulla: 1) rakenteellinen komponentti, jota voidaan kuvata pysyvällä keskiarvolla tai trendinomaisella vaihtelulla; 2) satunnainen spatiaalisesti korreloitu komponentti, johon sisältyy myös mittausvirhe (Ripley 1981). Tavallisessa krigingissä (eng. ordinary kriging) rakenteellinen komponentti kuvataan koko tutkimusalueen keskiarvona, kun taas universaalissa krigingissä (eng. universal kriging) rakenteellinen komponentti kuvataan sijainnin funktiona, toisin sanoen se voi vaihdella alueen eri osissa.

Seuraavassa käydään läpi ordinary kriging-menetelmän vaiheet (Johnston ym. 2001): Semivariogrammin laskeminen: Kriging, kuten useimmat spatiaaliset interpolointitekniikat, olettavat spatiaalisen autokorrelaation olemassaoloa. Autokorrelaation olemassaoloa sekä sen ominaisuuksia tarkastellaan semivariogrammin avulla. Kahden toisiaan lähellä olevien pisteiden arvojen erotus on pienempi kuin toisistaan kaukana sijaitsevien pisteiden arvojen erotus. Semivariogrammin avulla tut-

kitaan, kuinka kaukana toisistaan olevat pisteet korreloivat keskenään eli ovat spatiaalisesti autokorreloituneita.

**Mallin sovittaminen:** Malli autokorrelaatiosta saadaan sovittamalla tasoituskäyrä semivariogrammin pisteparveen. Pisteparveen sopivin malli saadaan, kun sovitus tehdään pienimmän neliösumman menetelmällä. Tällöin minimoidaan pisteiden ja pisteparveen piirretyn tasoituskäyrän etäisyyksien neliöiden summa. Saatua malli määrittelee aineiston spatiaalisen autokorrelaation.

**Matriisien muodostaminen:** Ordinary kriging- interpolointimenetelmä sisältää matriiseja ja vektoreita, jotka ovat riippuvaisia spatiaalisesta autokorrelaatiosta sekä pisteiden tilajakaumasta. Matriisien ja vektorien avulla määritetään mitattujen pisteiden arvojen painotukset.

**Pisteen arvon ennustaminen:** Laskettujen painotusten mukaan voidaan laskea ennustearvo pisteelle, jonka arvo on tuntematon.

**Kriging-menetelmän estimointiosuus on kaksivaiheinen.** Ensimmäisessä vaiheessa pyritään analysoimaan aineiston spatiaalista rakennetta (Johnston ym. 2001, vaihe 1). Tässä käytetään apuna aineistosta laskettua variogrammia, joka on määritelty seuraavasti:

$$2\gamma(s_1 - s_2) \equiv \text{var}[Z(s_1) - Z(s_2)] \quad (7.8)$$

jossa  $Z^*$  on tilastollinen prosessi ja  $Z(s)$  on prosessin tuottama arvo pisteessä  $s$ . Olettamalla prosessi  $Z^*$  sisäisesti stationääriseksi voidaan variogrammin määritelmä kirjoittaa muotoon (McCauley 1993):

$$2\gamma(s_1 - s_2) \equiv E[Z(s_1) - Z(s_2)] \quad (7.9)$$

Määrittelemällä  $h$  (eng. lag) suuntavektoriksi, joka ilmaisee suuntakulman  $s_1$ :stä  $s_2$ :een ja niiden välisen etäisyyden, semivariogrammi on  $\gamma$ :n kuvaaja  $h$ :n funktiona. Tällöin semivariogrammi voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (7.10)$$

jossa  $h$  on havaintopisteiden välinen etäisyys ja  $Z(x)$  on tarkasteltavan tunnuksen arvo pisteessä  $x$ .

Tulostettaessa semivarianssit etäisyysluokkien funktiona saadaan semivariogrammin kuvaaja, joka vastaa autokovariogrammin peilikuvaa (Jongman ym. 1987). Autokovariogrammi voidaan kirjoittaa muotoon

$$\gamma(h) = c(o) - \gamma(h) \quad (7.11)$$

jossa  $c(0)$  on kovarianssi ko. pisteessä verrattaessa havaittuun arvon itseensä ja  $c(h)$  kovarianssi kohdepisteessä havaitun arvon ja etäisyydellä  $h$  havaitun arvon välillä.

Geostatistiikan yhteydessä autokorrelaation määrittystä kutsutaan myös spatiaaliseksi mallitukseksi tai rakenteelliseksi analyysiksi. Semivariogrammin spatiaalinen mallitus alkaa semivariogrammikäyrän määrittämisestä. Semivariogrammissa  $x$ -akseli kuvaa pisteiden välistä etäisyyttä ja  $y$ -akseli (semi)varianssia. Kaikkia havaintopisteistä muodostuneita pareja ei useinkaan voida piirtää suoraa semivariogrammikuvaan, koska kuvasta tulee pisteiden suuresta määrästä johtuen sekava. Kaikkien havaintopisteiden piirtämisen sijasta parit ryhmitellään etäisyyden mukaan luokkiin (eng. lag bin). Tietyn etäisyysluokan etäisyyksille ja semivariansseille lasketaan keskiarvo. Kun keskiarvot on laskettu kaikille luokille, saadaan keskiarvopisteiden kautta piirrettyä semivariogrammikäyrä eli malli semivarianssille.

Variogrammi voidaan estimoida aineistosta kaavalla (Matheron 1963):

$$2\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{|N(h)|} \sum_{N(h)} [Z(s_i) - Z(s_j)] \quad (7.12)$$

jossa

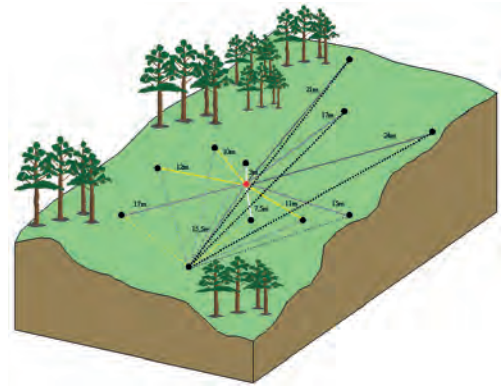
$N(h) \equiv \{Z(s_i) - Z(s_j) \mid s_i, s_j = h; i, j = 1, \dots, n\}$   
ja  $|N(h)|$  on etäisyysvyöhykkeellä olevien pisteparien lukumäärä.

Cressie ja Hawkins (1980) esittivät robustin, oletuksille vähemmän herkän, variogrammin estimaattorin:

$$2\bar{\gamma}(h) = \frac{\left[ \frac{1}{|N(h)|} \sum_{N(h)} |Z(s_i) - Z(s_j)|^2 \right]^{\frac{1}{4}}}{0.457 + \frac{0.494}{|N(h)|}} \quad (7.13)$$

Perusajatuksena semivariogrammikäyrän sovituksessa pisteistöön on laskea käyrän parametrit siten, että pisteiden poikkeama minimoituu jonkin kriteerin suhteen. Yksinkertaisimmillaan se voidaan tehdä pienimmän neliösumman menetelmällä. Valittavana on monia erilaisia semivariogrammimalleja. Käyrän muotoa voi myös pakottaa kulkemaan tietyllä tavalla, jos mallitettavasta ilmiöstä on etukäteistietoa.

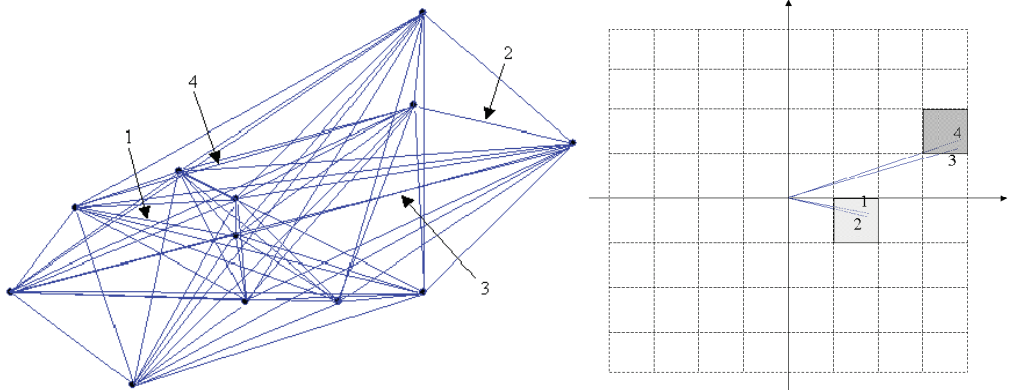
Semivariogrammin pisteparvesta tulee pisteiden paljouden takia helposti liian täyteen ehdettu. Tällöin tulkinta myös vaikeutuu. Havaintopisteiden määrää semivariogrammissa saadaan vähennettyä ryhmittelemällä pisteparit niiden välisen etäisyyden perusteella. Tätä ryhmittelyprosessia kutsutaan englannin kielessä sanalla binning, joka voidaan kääntää yksinkertaisesti luokituksiksi. Luokitus on kaksivaiheinen prosessi. Ensin muodostetaan havaintopisteparit ja toiseksi luokitellaan parit niiden välisen etäisyyksien ja suuntien



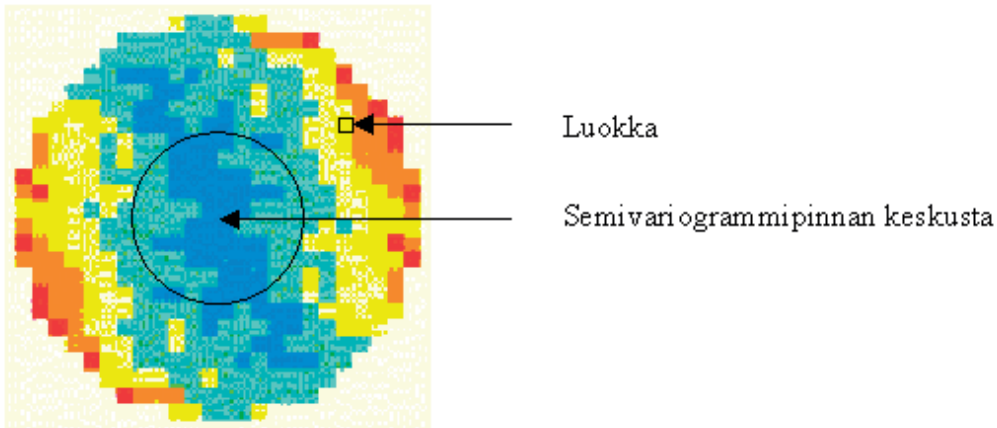
Kuva 7.5. Havaintopisteparien muodostaminen (Johnston ym. 2001).

perusteella. Kuvassa 7.5 on keskimmäisen pisteen kanssa muodostettu kaikki mahdolliset pisteparit (11 kpl). Eriväriset viivat kuvaavat eri etäisyysluokkia. Samalla värillä piirretyt viivat tarkoittavat siten pistepareja, jotka kuuluvat samaan luokkaan. Jos kuvaan piirrettäisiin kaikkien mahdollisten havaintopisteparien välille viivat, tulisi viivoja kaikkiaan  $\binom{11}{2}$  eli 66 kappaletta.

Kun havaintopisteparit on muodostettu, tehdään luokitus etäisyyteen ja suuntaan perustuen (kuva 7.6). Piirretään kaikki pisteparien väliset viivat samaan kuvaan siten, että kaikki viivat lähtevät origosta. Kaikki viivat piirretään y-akselin oikealle puolelle, sillä y-akselin vasen puoli on oikean puolen peilikuva origon



Kuva 7.6. Havaintopisteparien luokitus etäisyyden ja suunnan mukaan.



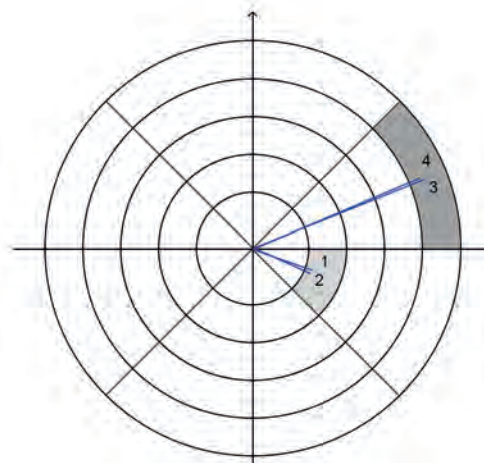
Kuva 7.7. Semi-variogramipinta.

suhteen. On yhdenkertainen kummasta päästä viivan ajatellaan alkavan (Johnston ym. 2001)

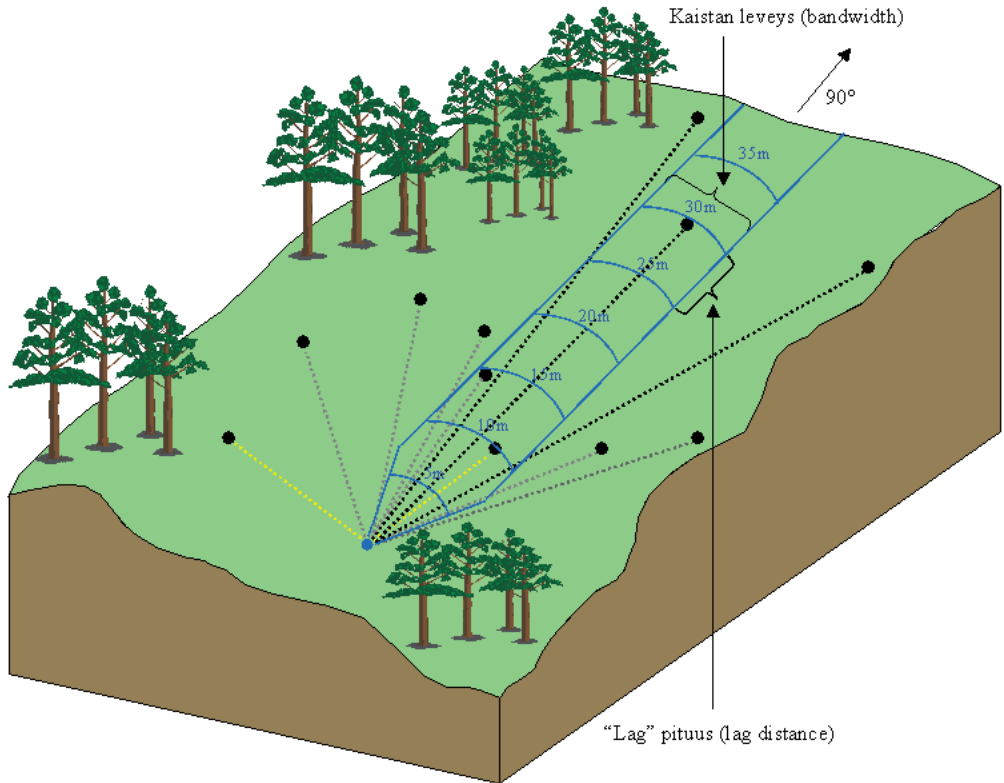
Kuvassa 7.6 jokainen solu muodostaa oman luokan. Kuvasta voi nähdä, että viivoilla 1 ja 2 on hyvin samanlainen suunta ja etäisyys. Viivat päättyvät samaan soluun, joten ne kuuluvat samaan luokkaan. Samoin viivat 3 ja 4 kuuluvat samaan luokkaan. Kun kaikki havaintopiste-parit on käyty läpi, lasketaan jokaisen luokan keskiarvo etäisyydelle ja semivarianssille. Luokkien koon ja lukumäärän voi määrittää tapauskohtaisesti. Jokaisen luokan semivarianssi on koodattu kuvassa 7.7 värein. Tällaista kuvaa kutsutaan semi-variogramipinnaksi (eng. semi-variogram surface) (Johnston ym. 2001).

Kuvan 7.7 keskipisteestä on sekä vaakaa että pystysuunnassa 12 luokkaa molempiin suuntiin. Luokkien kylmät värit (kuvan keskellä tummat värisävyt kaakkois-luode suunnassa) kertovat pienestä semivarianssista ja lämpimät värit (kuvan tummat värisävyt koillis- ja lounais-reunoilla) suuresta semivarianssista. Yleisesti ottaen semi-variogrammin arvot suurenevat, kun etäisyys origoon kasvaa. Tämä tarkoittaa, että kaukana toisistaan olevien pisteiden arvot eroavat suuresti toisistaan. Kuvasta näkyy myös selvästi semi-variogrammin symmetria. Toinen mahdollinen menetelmä pisteparien ryhmittämiseksi luokkiin on käyttää ympyrän sektoreita (kuva 7.8) (Johnston ym. 2001).

Joskus suunta saattaa vaikuttaa tunnettujen pisteiden arvoihin. Suunnan vaikutus voidaan määrittää tilastollisesti, mutta sitä ei välttämättä pystytä selittämään millään tunnetulla prosessilla. Tämä suuntaava vaikutus tunnetaan anisotropiana (eng. anisotropy). Toleranssikulma (eng. angle of tolerance) määrittelee sektorin, jonka sisäpuolella olevat havaintopisteet luetaan mukaan ennen kuin saavutetaan kaistan leveys (eng. bandwidth). Kaistan leveys määrittelee, kuinka leveältä alueelta havaintopiste-parit otetaan mukaan



Kuva 7.8. Luokitus sektoreittain. Kuva Ville Kankare.



Kuva 7.9. Anisotropian tarkastelu (Johnston ym. 2001).

semivariogrammin muodostamiseen. Havaintopiste tietyssä luokassa tarkoittaa pisteparin tiettyä suuntaa ja etäisyyttä. Havaintopiste-parien suuntautuneisuutta voi tarkastella joko rajoittamalla piirrettävien pisteparien määrää luokituksessa tai huomioimalla vain tietyt suuntaiset parit kaikista pistepareista. Kuvassa 7.9 on esitetty pisteestä (harmaa piste) piirrettävien pisteparien suuntautuneisuuden etsintä itään ( $90^\circ$ ). Kaistan leveys ja ”lag”-pituus ovat molemmat viisi metriä ja toleranssikulma on  $45^\circ$  (Johnston ym. 2001).

Pisteparien suuntautuneisuuden etsintä jatkuu siten, että käydään läpi tutkittavan alueen jokainen havaintopiste. Kun havaintopiste-parit on jaettu luokkiin etäisyyteen ja suuntaan perustuen, lasketaan luokille keskiarvot etäisyydelle ja semivarianssille. Tämän jälkeen voidaan keskiarvolukujen perusteella piirtää semivariogrammi. Vaihtoehtoisesti semivariogrammi-

pintaa esittävästä kuvasta, jossa kaikki pinnan havaintopiste-parit on luokitettu, valitaan tietyn suuntainen osajoukko. Luokka tulee mukaan semivariogrammikuvan piirtoon, jos luokan solun keskipiste semivariogrammin pinnassa on suuntaavan etsinnän hakualueella (Johnston ym. 2001).

Luokan pituudella on suuri vaikutus semivariogrammin määrittämisessä. Esimerkiksi, jos luokan pituus on liian iso, jää maaston pienen vaihtelu helposti huomaamatta. Toisaalta, jos luokan pituus on liian pieni, saattaa muodostua runsaasti tyhjiä luokkia. Pieni havaintojen määrä luokassa saattaa myös vääristää luokan arvoista laskettavia keskiarvoja. Jos havaintopisteet muodostavat systemaattisen verkon, on havaintopisteiden välinen etäisyys hyvä arvo myös luokan pituudeksi. Usein havaintopisteet sijoittuvat kuitenkin alueelle epäsystemaattisesti tai satunnaisesti. Tällöin luokan

pituuden valinta ei ole ollenkaan niin selkeätä. Satunnaisesti sijoittuneiden havaintopisteiden välisestä suurimmasta etäisyydestä (suurin aukko havaintopisteistössä) puolet tulee olla sama kuin luokan pituus kerrottuna luokkien määrällä. Tätä voidaan pitää luokan pituuden määrittämisen peukalosääntönä. Peukalosääntöllä pyritään siihen, että havaintopisteistön aukkojenkin keskelle saadaan kohtuullisella tarkkuudella interpoloitua arvo. Edelleen, jos semivariogrammissa havaintopisteparveen sovitettun mallin vaihtelu on pientä (käyrä lähes vaakasuora), tulee luokan pituutta pienentää. Tällöin luokan liian suuren pituuden vuoksi peittyneet aineiston pienvaihtelu saadaan kenties paremmin esille. Vastaavasti, jos mallin vaihtelu on hyvin suurta (käyrä nousee jyrkästi), tulee luokan pituutta suurentaa (Johnston ym. 2001).

Toisessa vaiheessa semivariogrammiin sovitetaan jokin malli (Johnston ym. 2001, vaihe 2). Yleisesti käytettyjä malleja ovat lineaarinen, spherical-, exponentiaalinen, Gaussian, rationaalinen neliö-, aalto- ja potenssimalli (Cressie 1991). Näistä lineaarinen, spherical-, Gaussian, exponentiaalinen ja aaltomalli esitetään tässä tarkemmin.

Lineaarinen malli (Cressie 1991):

$$y(h; \theta) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0 + c_l \|h\|, & h \neq 0 \end{cases} \quad (7.14)$$

$$\theta = [c_0, c_l], c_0 \geq 0, c_l \geq 0$$

Spherical-malli (Cressie 1991):

$$y(h; \theta) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0 + c_s \left\{ \frac{3}{2} \|h\| / a_s \right\}, & 0 \leq \|h\| \leq a_s \\ c_0 + c_s, & h \geq a_s \end{cases} \quad (7.15)$$

$$\theta = [c_0, c_s, a_s], c_0 \geq 0, a_s \geq 0, c_s \geq 0$$

Eksponentiaalimalli (Cressie 1991):

$$y(h; \theta) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0 + c_e \{1 - \exp(-\|h\| / a_e)\}, & h \neq 0 \end{cases} \quad (7.16)$$

$$\theta = [c_0, c_e, a_e], c_0 \geq 0, c_e \geq 0, a_e \geq 0$$

Gaussian-malli (Myers 1991):

$$y(h; \theta) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0 + c_g \{1 - \exp(-(\|h\| / a_g)^2)\}, & h \neq 0 \end{cases} \quad (7.17)$$

$$\theta = [c_0, c_g, a_g], c_0 \geq 0, c_g \geq 0, a_g \geq 0$$

Aaltomalli (Cressie 1991):

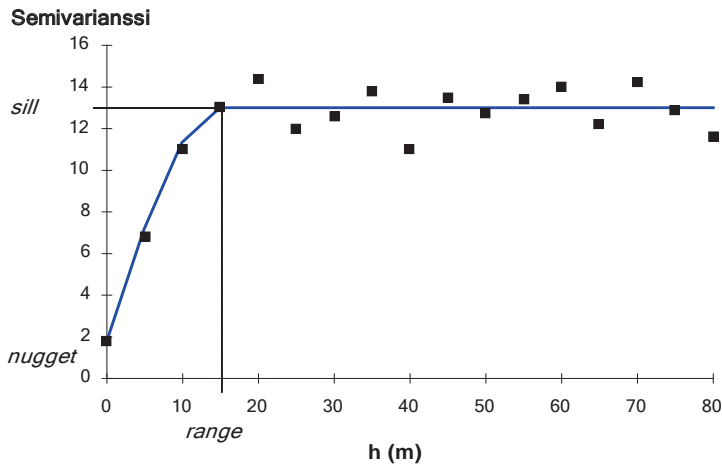
$$y(h; \theta) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0 + c_w \{1 - a_w \sin(\|h\| / a_w) / \|h\|\}, & h \neq 0 \end{cases} \quad (7.18)$$

$$\theta = [c_0, c_w, a_w], c_0 \geq 0, c_w \geq 0, a_w \geq 0$$

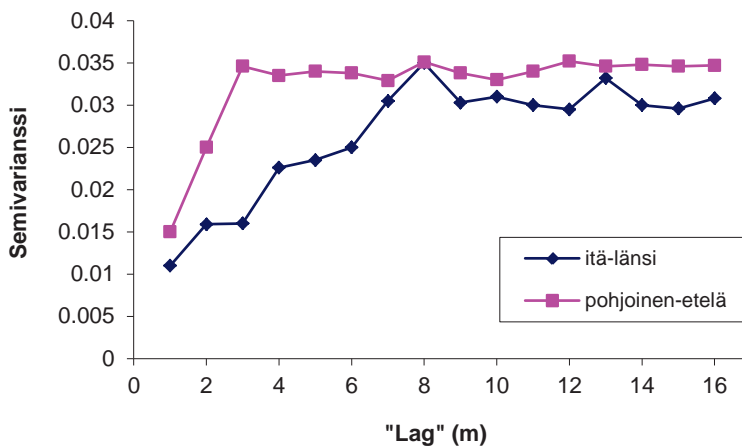
malleissa  $c_0$  (eng. nugget) kuvaa ennusteiden epäjatkuvuutta havaintopisteissä esimerkiksi mittausvirheiden takia, ja  $c_x$  semivarianssin suurinta arvoa (eng. sill), jota malli lähestyy  $h$ :n ylittäessä raja-arvon  $a_x$  (eng. range) (kuva 7.10). Etäisyyttä  $a_x$  kauempana olevien pisteiden arvot eivät korreloi keskenään.

Sovitettua mallia käytetään interpoloinnissa hyväksi määrittäessä etsintäsäde ja painot interpoloitavan pisteen naapuripisteille. Painot valitaan niin, että laskettu estimaatti on harhaton ja estimaatin varianssi on pienempi kuin minkään muun lineaarisesti muodostetun estimaatin varianssi (BLUE) (Burrough 1987). Varsinainen interpolointi tuottaa kullekin kohdepisteelle ominaisuuden arvon ennusteen lisäksi myös arvion ennustetun arvon virheestä. Tätä ennustevirhettä voidaan käyttää hyväksi arvioitaessa ennustetason käyttökelpoisuutta tai päätettäessä mahdollisesti tarvittavien lisähavaintopaikkojen sijainnista.

Kriging-menetelmällä pyritään valitsemaan havaintopisteiden painot optimaalisesti analysoimalla havaintopisteiden sijaintia sekä niiden ominaisuusarvoja. Kriging-menetelmässä



Kuva 7.10. Esimerkki semivariogrammista, johon on sovitettu spherical-tyyppinen malli (yhtenäinen viiva). Kuvaan on merkitty myös keskeisimpiä tarkastelukohtia semivariogrammista, niin kutsutut sill-, nugget- ja range-arvot. X-akseli kuvaa pisteparien välistä etäisyyttä h (eng. lag).



Kuva 7.11. Anisotropia ja semivariogrammin muoto.

otetaan huomioon automaattisesti havaintopisteryhmät, siten että ryhmän pisteitä painotetaan vähemmän kuin vastaavalla etäisyydellä olevaa yksittäistä havaintopistettä. Myös etsintasäde, joka on vaikea muutoin määrätä, saadaan aineiston geostaattisen analysoinnin perusteella. Käytännössä etsintasädettä kauempana olevien havaintopisteiden painoksi asetetaan niin pieni luku, ettei havaintopisteen arvolla ole merkitystä kohdepisteen arvoa ennustettaessa. Krigingin huonona puolena voidaan pitää sen vaatiman laskennan raskautta, mutta tietokoneiden tehon kasvaessa tämä ei ole enää kovin merkittävä seikka. Menetelmä edellyttää myös, että semi-

variogrammi pystytään mallintamaan jollakin soveltuvalla funktiolla.

Aineistossa voi olla kahdenlaista suuntautuneisuutta, jotka vaikuttavat ennusteeseen: globaali trendi ja anisotropia. Globaali trendi on kaikkiin mittauksiin deterministisesti vaikuttava tekijä. Globaalia trendiä voi siten kuvata matemaattisella yhtälöllä ja sen vaikutus voidaan haluttaessa poistaa analyysin ajaksi. Esimerkkinä globaalista trendistä on tehtaan savupäästöt, jotka leviävät vallitsevan tuulensuunnan vaikutuksesta tietyllä tavalla lähiympäristöön. Saastearvot muuttuvat itä-länsi-suunnassa paljon hitaammin kuin pohjois-etelä

-suunnassa. Tämä johtuu siitä, että itä-länsi-suunta on sama kuin vallitsevan tuulen suunta ja pohjois-etelä-suunta on kohtisuorassa tuulta vasten. Globaalin trendin poistamisen jälkeen semivariogrammikäyrän muotoon voi edelleen vaikuttaa aineiston suuntautuneisuus (eng. anisotropia). Anisotropia eroaa globaalista trendistä siinä, että globaali trendi on fysikaalinen prosessi ja sen voi mallittaa matemaattisesti. Anisotropiaksi kutsutaan satunnaisprosessia, jossa autokorrelaatio on johonkin suuntaa suurempaa kuin toiseen. Kuitenkin, vaikka anisotropian aiheuttajaa ei tiedetä, sen vaikutus on havaittavissa ja määritettävissä (Johnston ym. 2001).

Esimerkin tapauksessa sekä itä-länsi että pohjois-etelä-suunnaisille havaintopistepareille piirretyt semivarianssikäyrät kuvassa 7.11 osoittavat, että spatiaalinen riippuvuus on erilaista näissä suunnissa. Pohjois-etelä-suunnassa semivariogrammikäyrä nousee alussa paljon jyrkemmin ja tasoittuu aiemmin kuin itä-länsi-suunnassa. Jos semivariogrammin muoto ei riipu havaintopisteparien suuntautuneisuudesta on kyse isotropiasta (Johnston ym. 2001).

Usein ilmiön spatiaalinen riippuvuus määrytyy kahden tai useamman prosessin mukaan. Esimerkiksi kasvien biomassassa voi olla riippuvainen maaston korkeudesta merenpinnasta ja maaperän kosteudesta. Jos biomassan määrän riippuvuus korkeudesta ja maaperän kosteudesta on tunnettu, on mahdollista ennustaa biomassan määrä cokriging-menetelmällä. Mitatut havainnot biomassasta muodostavat

yhden aineiston osan, korkeushavainnot toisen ja maaperän kosteusmittaukset kolmannen. Jokaiselle osa-aineiston kohdalla laaditaan semivarianssille oma malli, koska jokaisella on oma spatiaalinen rakenteensa. Esimerkiksi spherical-malli voi sopia parhaiten korkeuden mallittamiseen, maaperän mallittamiseen käytetään exponential-mallia ja biomassaa taas kuvaa parhaiten näiden edellisten mallien yhdistelmä. Tällöin malli saadaan sovitettua aineistoon parhaalla mahdollisella tavalla (Johnston ym. 2001).

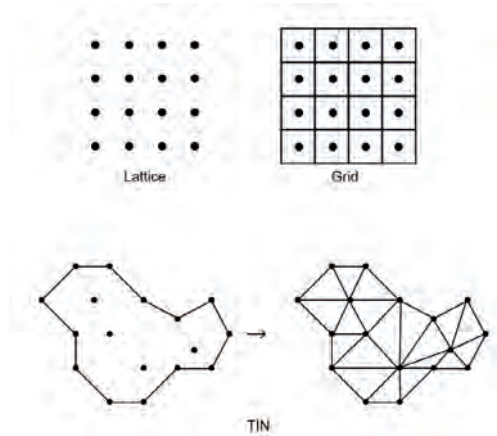
Interpolointimenetelmiä voidaan myös yhdistää, jolloin voidaan saavuttaa parempia tuloksia. Henttonen ja Ojansuu (1983) käyttivät trendipintamenetelmän ja liukuvien keskiarvojen menetelmän yhdistelmää ilmastollisten tunnusten interpolointiin. Edellä kuvatuista menetelmistä kriging on monimutkaisin, mutta sen avulla pystytään tuottamaan paras ennuste tasoituspinnasta. Splini, liukuvien keskiarvojen menetelmä, käänteisneliömenetelmä ja kaksoislineaarinen menetelmä soveltuvat nopeiden tasoituspintojen luomiseen esimerkiksi visualisointitarkoituksessa. Trendipintamenetelmä soveltuu parhaiten laaja-alaisten trendien testaamiseen ja mallintamiseen. Voronoin polygoni -menetelmä on paras tapa luokkaasteikollisen ominaisuuden interpolointiin. Interpolointimenetelmän valintaan vaikuttavat myös havaintopisteiden määrä ja sijoittuminen ja tavoitteena olevan ennustepinnan luotettavuus ja käytettävissä olevat resurssit sen tuottamiseksi.

## 8 Korkeusmalli

### 8.1 Korkeusmallin laadinta

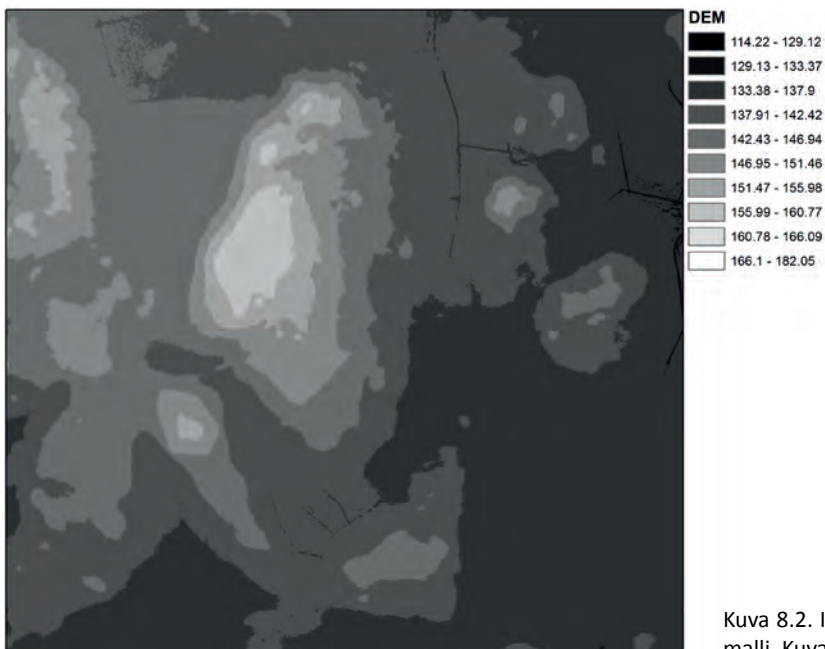
Korkeusmalli tai maastomalli (eng. digital elevation model, DEM, tai digital terrain model, DTM) on tunnetuista korkeuspisteistä interpoloitu tasopinta, jota kuvataan tietyllä tesselaatiolla. Tesselaatio on solujen peittävä pinta, jossa solut eivät mene päällekkäin. Korkeusmallin hallinnassa käytetään pääasiassa kahta erilaista tesseloititapaa: säännöllisiin nelikulmioihin perustuva rasterimuotoinen korkeusmalli (GRID) (eng. grid, lattice) tai epäsäännöllisen kokoiisiin vektorikolmioihin perustuva korkeusmalli (eng. Triangulated Irregular Network, TIN) (kuva 8.1.). Rinteen jyrkkyyden (eng. slope) ja suunnan (eng. aspect) laskenta on standarditoiminto GIS-ohjelmistoissa.

Korkeusmallipinta (kuvat 8.2, 8.3) voidaan interpoloida tunnettujen pisteiden avulla. Lähtöaineistona yleensä ovat joko pistemittaukset tai olemassa oleva korkeuskäyrästä (kuva 8.4). Kun mallia muodostetaan tavallisesta korkeuskäyrästä, kannattaa usein käyttää lisäksi

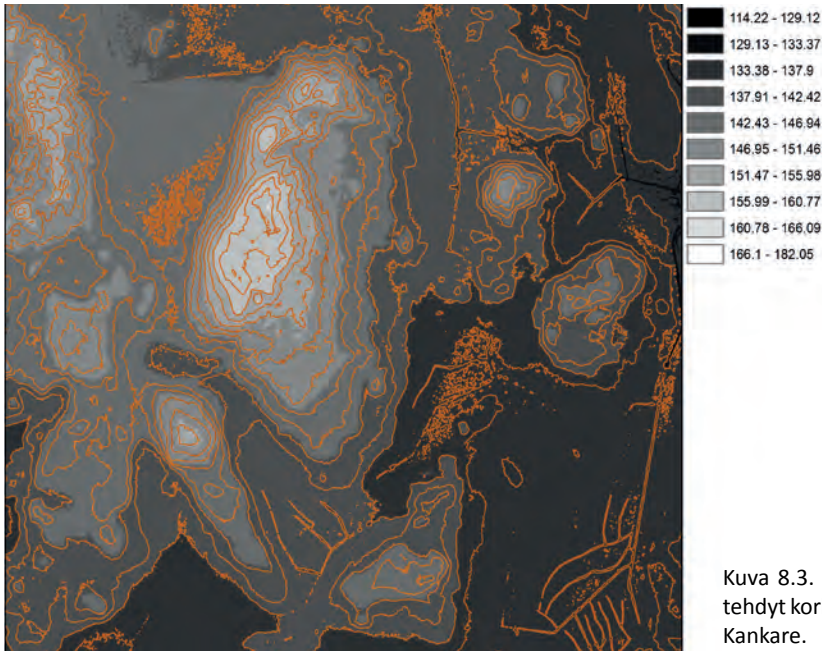


Kuva 8.1. Käytetyimmät korkeuspinnan kuvaustavat: lattice, grid ja tin. Kuva Ville Kankare.

myös tietoja ns. kriittisten kohteiden (huiput, laaksot, rajat, harjanteet, jyrkänteet) sijainnista. Niiden puuttuminen heikentää lopputulosta: harjanteiden päällys on usein tasainen ja maas-



Kuva 8.2. Interpoloitu korkeusmalli. Kuva Ville Kankare.

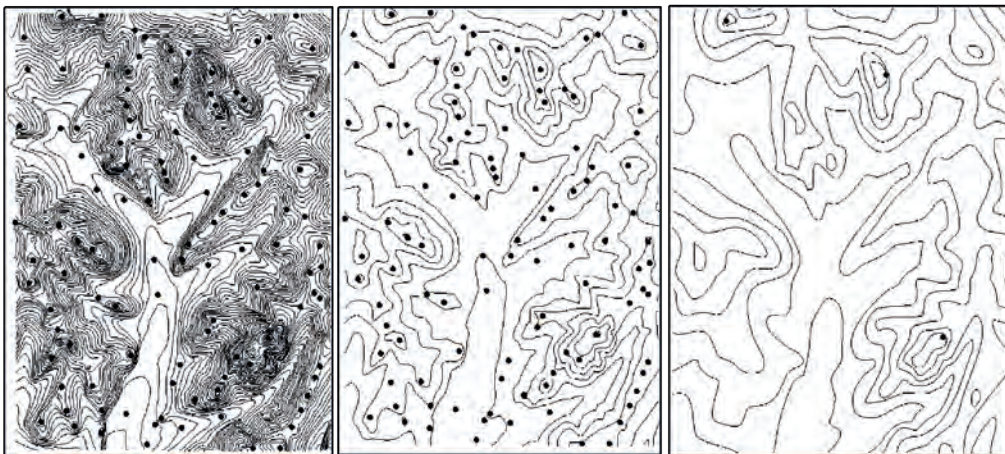


Kuva 8.3. Korkeusmallin avulla tehdyt korkeuskäyrät. Kuva Ville Kankare.

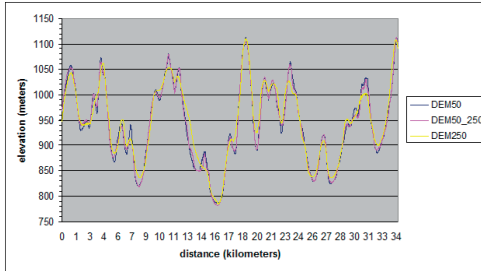
ton muodot keskiarvoistuvat. Interpoloidun korkeusmallin tarkkuuteen vaikuttaa luonnollisesti myös lähtöaineiston (korkeuspisteet, korkeuskäyrästä) tarkkuus ja tiheys.

Kartoituksen tarkkuus on huomioitava aina, kun määritellään tiedonkeruun vaatimuksia.

Eri mittakaavaisten karttojen digitalisoinneissa on suuria eroja työmäärissä (kuva 8.4). Jos korkeuskäyrät digitoidaan materiaalilta, joka on yleistetty taidokkaasti huomioiden maaston muodot, niin se interpoloinnin jälkeen ei eroa tarkemmasta tuloksesta paljoakaan. Varsinkin,



Kuva 8.4. Eri tiheyksillä ja eri aineistosta digitoituja käyräkarttoja. Vasemmanpuoleisen kartan käyrät on digitoitu 1:50 000 kartalta, keskimmäisessä kartassa vain johtokäyrät on digitoitu 1:50 000 kartalta ja oikeanpuoleinen kartta on digitoitu 1:250 000 kartalta.

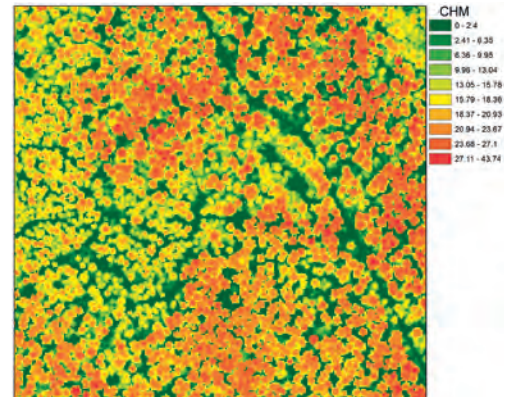
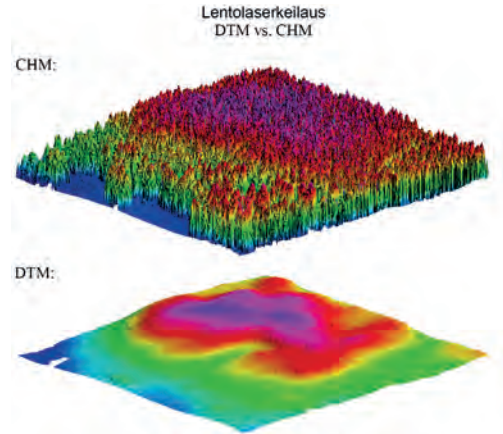


Kuva 8.5. Interpoloitujen mallien korkeusprofiilien erot esimerkkiaineistossa (1. DEM50 tehty 1:50 000 kartalta, 2. DEM50\_250 harvemmalta 1:50 000 käyrämateriaalilta ja 3. DEM250 1:250 000 kartan käyrämateriaalilta).

jos karkeampaan korkeuskäyrästä lisätään tarkemman materiaalin korkeuspisteistö äärikohteista, niin lopputulos vastaa lähes alkupeleistä tarkkaa materiaalia.

Korkeusmallien avulla voidaan tehdä erilaisia näkyvyys- ja kaltevuusanalyyskejä sekä mm. korkeusprofileja (kuva 8.5). Tienrakennuksessa siirrettävien massojen tilavuudet voidaan laskea korkeusmallin avulla, mutta tällöin mallin on oltava riittävän tarkka. Näkyvyysanalyyskejä voidaan käyttää selvittäessä eri toimenpiteiden vaikutusta maisemaan. Vesien valuma-analyysit käyttävät lähtötietona korkeusmallia. Korkeusmallin lisäksi analyysissä voidaan käyttää sademäärä-, maaperän vedenläpäisevyys- ja ojakarttatasoja. Korkeusmallia tarvitaan myös tuotettaessa kolmiulotteisia tulosteita.

Kuten kaukokartoitusluvussa 5.2. esitettiin, nykyisin korkeusmallit, joita kutsutaan myös maastomalleiksi, tuotetaan yhä useammin lentolaserkeilauksella, jonka avulla tuotetusta pistepilvistä voidaan tuottaa useita erilaisia pintamalleja (kuva 8.6). Useimmin käytettyjä pintamalleja ovat maan pinnan maastomalli (engl. Digital Terrain Model, DTM), korkeimpien kohteiden avulla määritetty pintamalli (engl. Digital Surface Model, DSM) ja puuston korkeutta kuvaava puuston pituusmalli (Canopy Height Model, CHM), jota kutsutaan myös normalisoiduiksi pintamalliksi (engl. Digital Surface Model, nDSM  $CHM = nDSM = DSM - DTM$ ). Näitä perustuotteita hyödynnetään

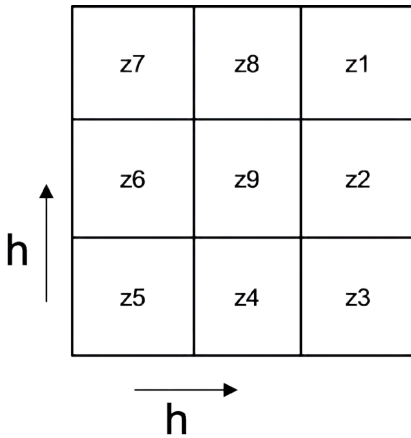


Kuva 8.6. Yllä laserkeilauksella tuotettuja pintamalleja (DSM, DTM ja CHM). Alla esimerkki laserkeilausaineiston avulla tehdystä metsäalueen pintamallista. Puut ja puuryhmät ovat näkyvillä. Pintamallille tyypillisesti kuva on koodattu väreillä, joista punainen viittaa korkeimpiin ja vihreä matalimpiin korkeuksiin. Kuva: Ville Kankare.

useissa sovelluksissa, kuten hydrologiassa, rakennustekniikassa, rakennetun ympäristön mitauksessa ja seurannassa sekä metsätaloudessa.

## 8.2 Korkeusmallista laskettavat tunnuksot

Korkeus- tai maastomallista voidaan laskea erilaisia tunnuksia, jotka kuvaavan maaston muotoja. Yleensä laskenta perustuu 3x3 rasteriikkunasta (kuva 8.7) laskettaviin tunnuksiin.



Kuva 8.7. Rasteri-ikkunaa käytetään topografisten tunnusten laskennassa ( $h$  = rasterin sivun pituus).

Korkeustiedosta laskettavia topografisia tunnusia ovat esimerkiksi (kuva 8.7):

—Korkeuden muutos,

$$p = ((z2-z6)/2h)^2 + ((z8-z4)/2h)^2$$

—Rinteen jyrkkyys (eng. slope),  $s = \sqrt{p}$

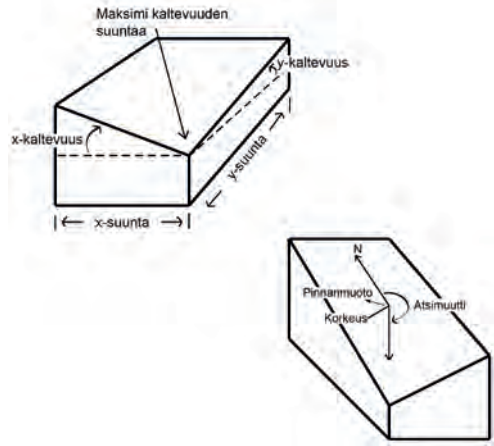
—Rinteen suunta (eng. aspect) ja ensisijainen valunta suunta (eng. primary flow direction)

—Kaarevuus, (eng. Curvature),  $K_c$  on rinteen suunnan muutosaste korkeuskäyrää pitkin,  $K_p$  on rinteen jyrkkyiden muutos valumasuuntaan ja  $K_t$  on tangentialinen kaarevuus ( $K_p \times \sin(\text{slope})$ ).

—Korkeuskäyrän yläpuolinen alue, josta voi valua ko. korkeuskäyrän poikki ( $A$ , eng. upslope contributing area) ja valuma-alue ( $A/l$ , eng. specific catchment area)

—Kuopat (eng. depression, sink) sekä tasaiset alueet (eng. flat areas), kuopat voivat olla todellisia tai korkeusmallin virheitä. Mallinnuksessa vesi ei pääse kuopasta pois joten kuopat on ”täytettävä” eli nostettava naapuruston tasolle. Kuoppien esiintymistodennäköisyys kasvaa tasaisilla alueilla ja ruutukoon kasvaessa

—Ensisijainen valumasuunta, deterministinen kahdeksan solmun algoritmi (eng. single-flow-direction D8 method) laskee kahdeksan naapurisolun avulla:



Kuva 8.8. Rinteiden jyrkkyys ja suunta ovat maastomaalista laskettavia perustunnusia. Kuva Ville Kankare.

$$S_{D8} = \max_{i=1,8} \frac{z9 - z_i}{h\sqrt{2}} \quad (8.1)$$

—Satunnaistettu ensisijainen valumasuunta, satunnaistettu kahdeksan solmun algoritmi (eng. randomized single-flow-direction method, Rho8), jossa valuman suuntaa on satunnaistettu siten, ettei valuman suunta tulisi liian suoraviivaiseksi realistisemmän valunnan simuloimiseksi.

—Valuman leveys (eng. flow width)

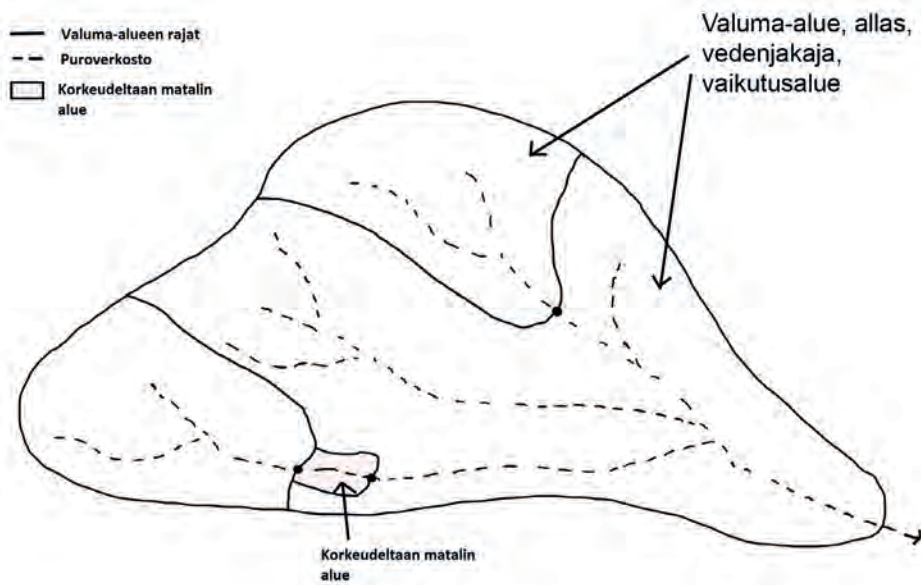
—Rinteen tai valuman pituus (eng. maximum flow path length)

Pintavesien mallinnuksen tuottamat tiedot voivat olla mm. valuma-alueet, vedenjakajat, uomien sijainti ja virtaavan veden määrän arviot ruuduittain (kuva 8.9). Veden virtauksen mallien avulla voidaan päätellä, mihin naapuriruutuun vesi siitä virtaa, ja kääntäen päätellä, mistä ruuduista ja kuinka monesta ruudusta vesi virtaa kohderuutuun. Kyseisten tietojen perusteella voidaan rajata valuma-alueet ja estimoida jokiverkon uomat. Algoritmityyppinä on periaatteessa kahdenlaisia 1) Single direction (SDA), joka sallii virtauksen vain yhteen naapuriruutuun ja 2) Multiple direction (MDA), joka sallii virtauksen useampaan naapuriruutuun.

Uomaehdokkaiden tunnistaminen tapahtuu automaattisesti. Jos ruutu saa vettä useasta muusta ruudusta, niin se voi olla osa uomaa. Ongelmana on sopiva kynnyisarvo kohderuutuun virtaavien ruutujen määrälle. Kynnyisarvo voi olla vakio koko valuma-alueelle tai muuttuva riippuen esim. rinteiden jyrkkyydestä ja

sademäärästä. Uomien muodostuminen riippuu myös maaperästä ja kasvillisuudesta. Hyvin usein malleilla voidaan paikantaa nekin uomat, jotka ovat kuivia. Siksi menetelmä antaa lähinnä teoreettiset uomien paikat.

Topografisia tunnuksia voidaan hyödyntää myös kehittyneemmissä virtausmalleissa.



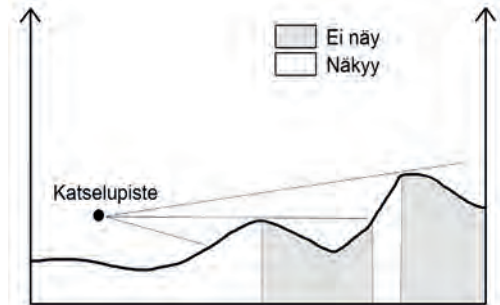
Kuva 8.9. Valuma-alueelta laskettavia tunnuksia. Kuva Ville Kankare.



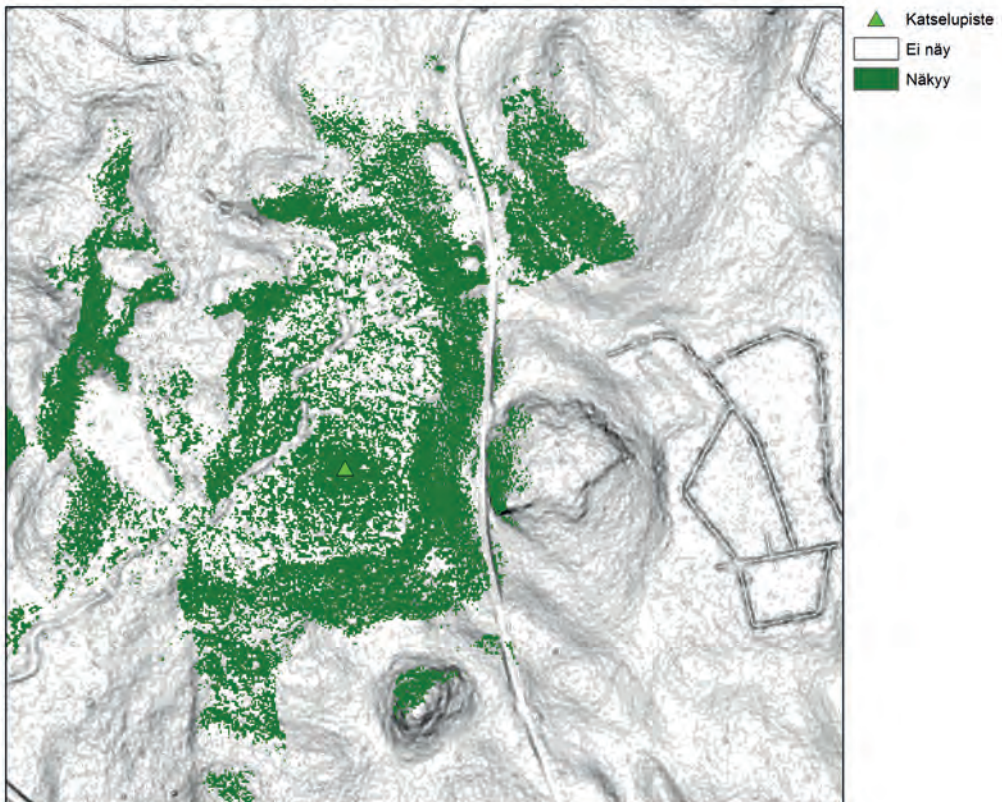
## 9 Näkyvyys ja maisema-analyysi

### 9.1 Johdanto

Maanpinnan ja kasvillisuuden korkeusmal-  
leja voidaan hyödyntää myös näkyvyys- ja  
maisema-analyseissa. Näkyvyysanalyysi (eng.  
intervisibility, viewshed) määrittelee yhdestä  
tai useammasta pistekohteesta näkyvät alueet.  
Sitä voidaan käyttää mm. maisema-alueiden  
suunnittelussa sekä metsänhoidollisten toimen-  
piteiden vaikutusten selvittämiseen. Analyysi  
sopii sekä rakennettujen, että rakentamattomien  
alueiden näkyvyystarkasteluihin. Valaistus-



Kuva 9.1. Näkyvyysanalyysi. Kuva Ville Kankare.



Kuva 9.2. Näkyvyysanalyysin avulla tuotetut alueet, jotka näkyvät katselupisteestä. Pohjamateriaalina on käytetty laserkeilauksella tuotettua maastomallia. Kuva Ville Kankare.

analyysillä (eng. illumination) voidaan tarkastella korkeusvaihteluista, maaston esteistä sekä auringon asemasta muodostuvia varjostusalueita kolmiulotteisella pinnalla. Analyysissä auringon sijaintia (suunta- ja korkeuskulmaa) voi muuttaa. Perspektiivinäkymä (eng. perspective view) on analyysi, jossa luodaan kolmiulotteisesta pinnasta näkymä jostakin tietystä pisteestä katsottuna. Näkymä kuvataan tyypillisesti verkon (eng. mesh) tai paralleelien viivojen (eng. parallel lines) avulla. Pintaan voi olla liitettyä myös muuta tietoa, kuten tiet. Perspektiivianalyysi muodostaa perustan ylilentoanimaatioille (eng. flyby animation).

## 9.2 Maiseman huomioiminen metsäsuunnittelussa

Muut kuin puuntuotannolliset näkökohdat ovat saaneet yhä suuremman painon metsätalouden päätöksenteossa. Biodiversiteetin ohella huomiota on kiinnitetty erityisesti metsien virkistyskäytön edellytysten säilyttämiseen ja kehittämiseen, missä maiseman kauneus on keskeisellä sijalla. Useissa tutkimuksissa on todettu, että pyrittäessä maisemallisesti onnistuneisiin ratkaisuihin, tulee metsänkäsittelyssä kiinnittää erityistä huomiota metsikkökuvioiden kokoon ja rajaukseen. Paikkatietojärjestelmät tarjoavat monia työkaluja, joita voidaan hyödyntää mm. maiseman huomioinnossa metsäsuunnittelussa.

Paikkatietomenetelmien avulla voidaan tarkenetaa perinteistä puuston ja kasvupaikan perusteella tehtyä metsikkökuviointia sekä etsiä kuviot, jotka sijaitsevat maisemallisesti merkittävillä paikoilla. Menetelmän kehittämisen kuvaavassa tutkimuksessa (Store 1996) testattiin lisäksi kuviointimenetelmän tuottamaa hyötyä selvittämällä, voidaanko maisemahoidollisella metsikkökuvioiden rajauksella ja metsikkökuvioiden sijoittelulla saavuttaa maisemallisesti parempi tulos nettotuloja pienentämättä.

Store (1996) käyttivät menetelmän kehittämisen ja testaamisen kohteena tapaustutkimusalueetta, joka sijaitsi Kolin Käränkävärillä kansallispuiston välittömässä läheisyydessä. Alue rajoittui Pieliseen ja alueen vaaroihin,

ollen osa esimerkiksi Ukkokolilta avautuvaa kansallismaisemaa. Myös voimakkaan julkisen keskustelun takia alue vaati huolellista, maisemanäkökohdat huomioonottavaa suunnittelua.

Menetelmässä polut, tiet, rannat ja peruskuvion kuviorajat talletettiin paikkatietojärjestelmään omiksi karttatasoikseen. Metsikkökuvioihin liittyvää ominaisuustietoa varten luotiin paikkatietojärjestelmään ominaisuustietokanta, jonne talletettiin keskeisimmät maaperä- ja puustotiedot. Vaikutusalueiden muodostamisessa käytettiin apuna erillistä näkemämallia ja näkvyysanalyysissä numeerista korkeusmallia.

Kuviointimenetelmässä keskeisten maisemantarkastelureittien (tiet, polut ja hiihtoladut) ja rantojen sekä pistemäisten kohteiden (lähteet, nuotiopaikat) ympärille muodostettiin paikkatietojärjestelmällä vaikutusvyöhykkeet. Vaikutusvyöhykkeistä tehtiin leveydeltään vaihtelevia, jolloin niiden leveys määritettiin vyöhykkeellä sijaitsevan metsikkökuvion puuston perusteella. Vaikutusvyöhykkeiden muodostamista varten kullekin metsikkökuvioille laskettiin paikkatietojärjestelmässä näkemäarvo, joka kertoi, kuinka pitkälle kyseessä olevan kuvion sisälle voi nähdä. Näkemä laskettiin seuraavalla mallilla:

$$\text{Näkemä} = 0,207V_{\text{mä}} - 0,445V_{\text{ku}} + 4,179Hx - 0,007RL_{\text{taim}} + 23,477 \quad (9.1)$$

missä

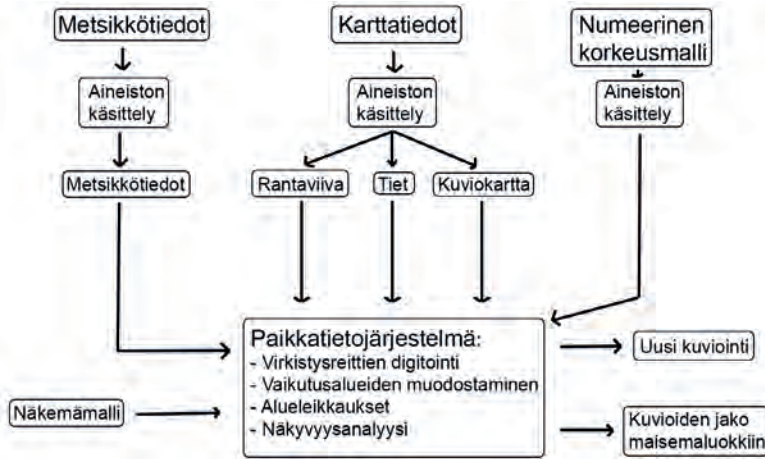
$V_{\text{mä}}$  = männyn tilavuus ( $\text{m}^3/\text{ha}$ )

$V_{\text{ku}}$  = kuusen tilavuus ( $\text{m}^3/\text{ha}$ )

$Hx$  = puuston keskipituus (m)

$RL_{\text{taim}}$  = taimikon runkoluku (kpl/ha)

Metsikkökuvioille laskettuja näkemäarvoja ei kuitenkaan käytetty suoraan vaikutusvyöhykkeen leveytenä, vaan metsikkökuvioiden luokittelussa näkemäluokkiin. Näkemäluokkia tehtiin kuusi kappaletta ja niiden leveys vaihteli 30 ja 80 metrin välillä. Alarajana pidettiin 30 metriä, koska uusista maisemakuvioista piti tulla myös kelvollisia käsittely-yksiköitä. Yli 80 metrin levyisiä vyöhykkeitä ei haluttu perustaa, koska tällöin olisi ollut vaarana, että muodostetuista maisemakuvioista tulee liian suuria suhteessa tilan pinta-alaan.



Kuva 9.3. Kuviointi-  
menetelmä. Kuva Ville  
Kankare.

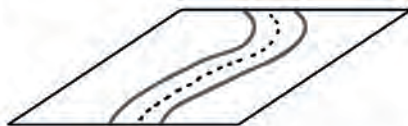
Vaikutusvyöhykkeiden muodostus aloitettiin leikkaamalla maisemareitit ja -rajat kuviokartalla. Tällöin esimerkiksi polut saatiin katkaistua aina, kun kuvionraja leikkasi polun. Näin vaikutusvyöhykkeen leveys voitiin määrittää erikseen jokaiselle polunosalle, koska polun ominaisuustauluun sisältyi nyt tieto myös näkemäluokasta. Rantojen vaikutusvyöhykkeet muodostettiin vastaavalla tavalla. Koska tie toimii yleensä metsikkökuvion rajana, jouduttiin vaikutusvyöhykkeet muodostamaan erikseen

tien molemmille puolille ja yhdistämällä tien vaikutusvyöhykkeet, saatiin lopullinen vaikutusvyöhyke (kuva 9.4).

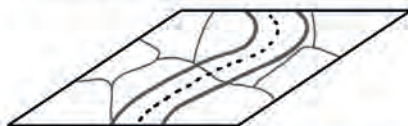
Kun kaikki vaikutusvyöhykkeet oli muodostettu, leikattiin peruskuviointi vaikutusvyöhykkeillä. Näin saatiin uusi kuviointi, jossa vaikutusvyöhykkeiden sisälle kokonaan jääneet peruskuvioinnin kuvat määritettiin sellaisinaan maisemakuvioiksi. Osittain vaikutusvyöhykkeen sisälle jääneet kuvat jakautuivat alueleikkauksen yhteydessä vaikutusvyöhykkeen rajaa



Peruskuviointi ja tilan läpi kulkeva tie



Tien ympärille muodostettu vaikutusvyöhyke



Tien vaikutusvyöhykkeellä leikattu peruskuviointi ja vaikutusvyöhykkeen perusteella määritetyt maisemakuviot



Lopullinen kuviointi josta liian pienet kuviot on poistettu

Kuva 9.4. Uuden kuvioinnin muodostamisen periaate. Kuva Ville Kankare.

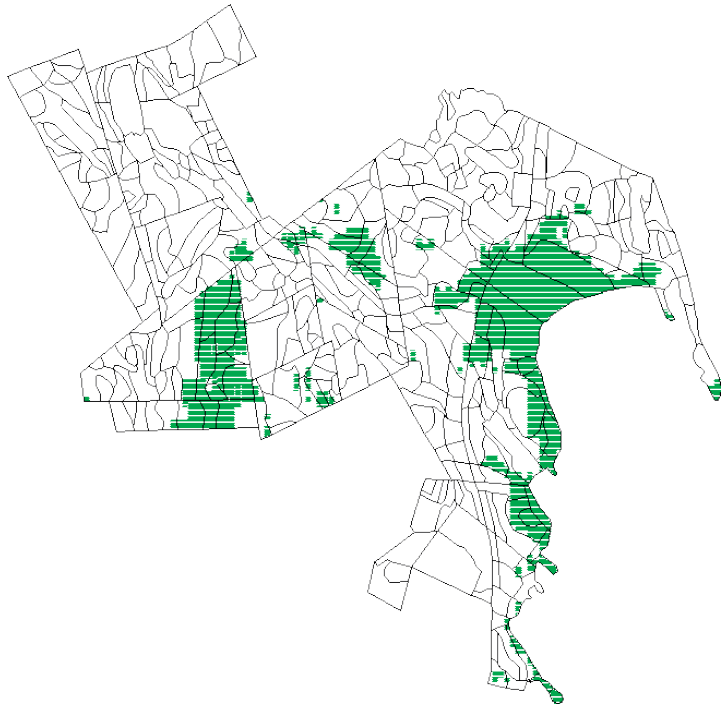
pitkin kahteen osaan, jolloin sisäpuolinen kuvio määritettiin maisemakuvioksi (kuva 9.4). Tästä uudesta kuvioinnista käytetään myöhemmin nimeä maisemakuviointi. Alueleikkauksen tuloksena syntyneet maisemakuviot olivat joko ranta-, virkistysreitti- tai tienvarsimaisemakuvioita tai näiden yhdistelmiä.

Osa uuden kuvioinnin metsikkökuvioista määritettiin maisemakuvioksi, koska ne näkyivät tärkeisiin maisemantarkastelupisteisiin tai -reiteille. Näiden kuvioiden etsiminen tapahtui paikkatietojärjestelmän näkyvyysanalyysien avulla. Näkyvyysanalyysissä käytettiin apuna kahta numeerista korkeusmallia, jossa toisessa korkeussuuntaisena muuttujana oli maaston korkeus ja toisessa kuvioittainen puuston pituus. Puuston- ja maastonkorkeusmalli laskettiin yhteen paikkatietojärjestelmän pistematriisien käsittelyyn tarkoitettujen matemaattisten funktioiden avulla. Tällöin saatiin uusi yhdistetty korkeusmalli, jossa pisteen korkeus oli maaston korkeus lisättynä sen kuvion puuston pituudella, jonka alueella piste sijaitsi. Näkyvyysanalyysiä varten tehtiin vielä yksi karttataso, johon

merkittiin kaksi maisemantarkastelupistettä. Toinen piste sijoitettiin Ukko-Kolin huipulle ja toinen Koli-Liekka -laivareitille.

Näkyvyysanalyysissä tutkittiin yhdistetyn korkeusmallin avulla mitkä koalueen alueet näkyivät maisemantarkastelupisteisiin. Näkyvyysanalyysi tuotti alueita sisältävän karttatason, jossa kukin alue sai arvon nolla, yksi tai kaksi (kuva 9.5). Arvon kaksi saanut alue näkyi molempiin tarkastelupisteisiin ja arvon yksi saanut vain toiseen pisteeseen. Arvon nolla saanut alue ei näkynyt kumpaankaan tarkastelupisteeseen. Kuviokartta leikattiin näkyvyysanalyysin tuloksena syntyneellä karttatasolla ja ne kuviot, joiden pinta-alasta yli 50 % sijaitsi alueella, joka näkyi jompaankumpaan tai molempiin tarkastelupisteisiin, määritettiin maisemakuvioksi.

Vaikutusvyöhykkeiden muodostamisen ja maisemallisesti merkittävien kohteiden etsimisen tuloksena kuvioille saatiin myös maisemaluokat. Myös peruskuvio, jotka eivät olleet maisemakuvioita, muodostivat oman luokkansa. Näiden luokkien lisäksi tuli yhdis-



Kuva 9.5. Koalueen kuvio-kartta ja toiseen tai molempiin maisemantarkastelupisteisiin näkyvät alueet (Store 1996).

telmäluokat eli kahden vaikutusvyöhykkeen alueella sijaitsevien kuvioiden ryhmät.

Tapaustutkimuksessa menetelmän käytöstä saatavaa hyötyä arvioitiin vertaamalla tavallisella kuvioinnilla ja tarkennetulla kuvioinnilla tehtyjen metsäsuunnitelmien tuottamaa maisemaa grafiikkakuvien ja numeeristen tunnusten avulla. Tulosten mukaan tarkentamalla numeerisessa metsäsuunnittelussa käytettävää metsikkökuviointia sekä hyödyntämällä paikkatietoanalyysijä sijainniltaan tärkeiden metsikkökuvioiden etsimisessä, saadaan maisemallisesti parempi lopputulos nettotuloja pienentämättä. Menetelmän tuottaman hyödyn määrään vaikuttivat tilalle asetettu tulotavoite ja tilan maisemalliset ominaisuudet.

### 9.3 Maisematason spatiaaliset tunnusluvut

Spatiaaliset maisematason tunnusluvut antavat numeerista tietoa alueiden spatiaalisesta jakautumisesta ja frakmentoitumisesta. Tunnuslukujen avulla voidaan kuvata maiseman rakennetta ja ennustaa esimerkiksi biologisia prosesseja. Kaikkiaan spatiaalisia tunnuslukuja on useita kymmeniä, mutta Riiters ym. (1995) mukaan seuraavat tunnusluvut sisältävät tärkeimmän tarvittavan informaation:

Temaattisten luokkien ja spatiaalisesti erilaisten laikkujen lukumäärää kuvaavat tunnusluvut (Number of Patches, Number of Classes), laikkujen kokoa ja koon hajontaa kuvaavat tunnusluvut (esim. Mean Patch Size), laikkujen ryhmittymistä ja sijoittumista kartalle kuvaavat tunnusluvut (Contagion, Patch Cohesion), laikkujen keskimääräistä muotoa kuvaavat tunnusluvut (Mean Shape Index, Perimeter/Area Fractal Dimension).

Kuusi tärkeintä tunnusta ovat (Riiters ym. 1995):

- “Number of Classes”
- “Dominance”
- “Contagion”

—“Fractal Dimension from Perimeter/Area”

—“Average Patch Perimeter/Area Ratio”

—“Average Patch Perimeter/Area Ratio Orthogonally Adjusted”

”Perimeter/Area” -tunnuslukuja käytetään yleensä spatiaalisten objektien fraktaalisten mittasuhteiden määrittämiseen. ”Perimeter/Area” -tunnusluvuilla kuvataan spatiaalisten objektien reunaviivan ja pinta-alan suhdetta eli ne kuvaavat muotojen kompleksisuutta. ”Fractal Dimension” lasketaan seuraavasti:

$$P = kA^{D/2} \quad (9.2)$$

P = Perimeter; A = Area; D = Fractal Dimension; k = constant of proportionality

$D = 2 * (\ln(P) - \ln(k)) / \ln(A)$ ; arvot välillä 1... 2

”Fractal Dimension” -arvo kuvaa spatiaalisen objektin muodon kompleksisuutta. Arvolla 1 objektin muoto on mahdollisimman yksinkertainen (esimerkiksi suorakulmio). D:n arvon lähetessä kahta objektin muoto muuttuu monimutkaisemmaksi.

”Average Patch Perimeter/Area Ratio” kuvaa tietyllä alueella olevien kuvioiden raja- viiva/pinta-ala suhteen keskiarvoa. Se lasketaan kaavalla  $X = \Sigma P / \Sigma A$ , missä P = Perimeter; A = Area. Keskiarvon kasvaessa alueen kuvioiden kompleksisuus kasvaa.

”Average Patch Perimeter/Area Ratio orthogonally adjusted” lasketaan samalla tavalla kuin Average Patch Perimeter/Area Ratio -tunnusluvulle.

Käytettävän kartan mittakaavan vaikutus tunnuslukuihin on suuri. Erityisesti kartan alueen rajaus voi aiheuttaa häiriötä tunnusluvuissa. Laikkujen lukumäärä ja ryhmittymisen vaikutavat tunnuslukuihin. Spatiaalisten muotojen kompleksisuutta kuvaavista tunnusluvuista ”Perimeter/Area Fractal Dimension” on kaikkein vakain ja luotettavin.



## 10 Spatiaalinen mallinnus

### 10.1 Johdanto

Termiä mallinnus käytetään myös paikkatietojärjestelmien yhteydessä monessa merkityksessä. Malli voi liittyä tiedon tallentamiseen ja esittämiseen, kuten esimerkiksi korkeusmallin tapauksessa. Tällöin kyseessä on tiedon mallinnus, jolla tarkoitetaan tiedon määrittelyä ja organisointia reaali maailmaa kuvaaviksi numeerisiksi tietojoukoiksi. Usein mallilla paikkatietojärjestelmien yhteydessä kuitenkin tarkoitetaan joukkoa tietokoneelle koodattuja algoritmeja, joiden avulla voidaan kuvata tiettyjä maanpinnalla tapahtuvia prosesseja tai luonnonilmiöitä (Burrough 1998).

Mallit voidaan jaotella monella tapaa. Steyaert (1993) jakaa ympäristömallinnukseen liittyvät mallit, joita käytetään paikkatietojärjestelmien yhteydessä kolmeen pääluokkaan: mittakaavamallit, käsitemallit ja matemaattiset mallit. Mittakaavamalleilla tarkoitetaan malleja, joissa tarkastelumittakaavaa muutetaan, jotta saataisiin parempi kuva (nähtäisiin myös yksityiskohdat tai hahmotettaisiin kokonaisuus) tarkasteltavasta kohteesta. Käsitemalleja käytetään usein prosessimallinnuksessa kuvaamaan systeemin toimintaa, prosesseja ja vuorovaikutusta systeemien osien välillä. Matemaattiset mallit voidaan edelleen jaotella deterministisiin ja tilastollisiin malleihin. Tilastolliset mallit perustuvat empiirisiin havaintoihin ja sisältävät yhden tai useamman satunnaismuuttujan, kun taas deterministissä malleissa satunnaismuuttujia ei ole.

Paikkatietojärjestelmien yhteydessä käytettyjen matemaattisten mallien luonnollinen sovellusalue on ympäristön mallinnus. Ympäristöön liittyvien monimutkaisten prosessien mallintaminen vaatii tietokonepohjaisia, matemaattisia malleja, joissa voidaan käyttää paikannettua tietoa.

Matemaattisten mallien avulla pyritään ymmärtämään luonnonvaroihin liittyviä prosesseja ja ennustamaan niiden kulkua tulevaisuudessa. Paikkatietojärjestelmien ja ympäristömallien

sovellusalueet liittyvät ympäristöriskien arviointiin (esimerkiksi maanvyöryt ja -järistykset, ekologiset riskit), luonnonvarojen käsittelyyn (esimerkiksi vesi- ja metsävarojen arviointi) sekä maailmanlaajuisten muutosten mallintamiseen (esimerkiksi ilmastomuutokset).

Mallien ja paikkatietojärjestelmien kytkentä voidaan toteuttaa löyhästi (eng. loose coupling) tai tiukasti (eng. tight coupling). Useimmissa tapauksissa linkki paikkatietojärjestelmän ja ympäristömallin kanssa on löyhä, jolloin niitä vain käytetään yhdessä ilman, että ne olisivat varsinaisesti integroitu yhteen. Tällöin paikkatietojärjestelmää käytetään lähinnä tietojen esikäsittelyyn, jotta saataisiin tuotettua mallin tarvitsemat syöttötiedot ja toisaalta tiedon jälkikäsittelyyn, jotta voitaisiin havainnollisesti esittää paikkaan sidotut tulokset esimerkiksi teemakarttojen muodossa.

Tavallisimmassa tapauksessa, jossa kytkentä systeemien välillä on löyhä, paikkatietojärjestelmä ja mallit vain vaihtavat tiedostoja keskenään. Malli lukee osan syöttötiedoistaan paikkatietojärjestelmästä tulostetuista tiedostoista ja tuottaa osan tulostuksestaan sellaisessa muodossa, että sitä voidaan prosessoida ja tulostaa paikkatietojärjestelmässä. Astetta tiukempi integraatio tarjoaa yhteisen käyttöliittymän sekä läpinäkyvän tiedostojen tai informaation jaon ja siirron eri komponenttien välillä. Tiukimmassa kytkennässä integraatio toteutetaan siten, että malli liitetään yhdeksi paikkatietojärjestelmän analyttisistä funktioista, jolloin mallit kalibroidaan ja ajetaan suoraan paikkatietojärjestelmästä käyttäen paikkatietojärjestelmän komentokieltä. Toinen vaihtoehto tiukimman kytkennän toteuttamiseksi on, että paikkatietojärjestelmän työkalut integroidaan malliin, jolloin ne tulevat yhdeksi lisämahdollisuudeksi muuttujien tuottamiseen tai mallin tulosten esittämiseen.

Paikkatietojärjestelmään tiukasti tai löyhästi kytkettyjen mallien lisäksi paikkatietojärjestelmiin sisältyy mallinnustyökaluja, joiden katsotaan kehittyneen erilaisista karttojen analyysitoiminnoista. Berry (1995) jakaa nämä

paikkatietojärjestelmiin sisältyvät mallit tai mallinnustyökalut kartografisiin malleihin ja spatiaalisiin malleihin. Erottavana tekijänä hän näkee sen, että spatiaalisessa mallinnuksessa tutkitaan paikkaan sidottujen kohteiden välisiä suhteita, kun taas kartografisen mallinnuksen määriteltiin alunperin olevan mallinnusta karttojen avulla, jossa tavoitteena on linkittää geografisiin kohteisiin liittyviä toimintoja yhteen. Nykyisin kartografisen mallinnuksen ja spatiaalisen mallinnuksen raja on hämärtynyt, koska kartografiseen mallinnukseen on sisällytetty yhä enemmän matemaattista mallinnusta vaativia operaatioita.

Kartografisen mallinnuksen juuret ulottuvat 1960-luvun lopulle, jolloin McHarg (1969) esitteli menetelmänsä, jonka avulla voitiin paikallistaa esimerkiksi herkimät tai muilla tavoin tärkeimmät tai sopivimmat luontokohteet. Menetelmän ydin oli kuvata päätökseen vaikuttavat kriteerit karttojen avulla siten, että mitä tummempi sävy sitä huonompi alue oli kyseisen kriteerin kannalta. Tavoitteen kannalta paras alue (vaalein) löydettiin asettamalla päällekkäin läpinäkyvälle kalvolle piirretyt kartat.

Nykyisessä muodossaan kartografinen mallinnus sisältää komentoja karttatasojen muokkaamiseen, mittaamiseen, analysoimiseen sekä yhdistämiseen. Kartografinen mallinnus perustuu Tomlinin (1990) kehittämään kartta-algebraan, jossa linkitetään geometrisiin yksilöihin (piste, viiva ja alue) ja niiden naapurustoon kohdistuvia matemaattisia perustoimintoja jonoksi siten, että edellisen toiminnon tulos on seuraavan syöte. Näitä jonoja kutsutaan kartografiseksi malleiksi ja prosessia kartografiseksi mallinnukseksi. Kartta-algebrassa jokainen muuttuja talletetaan omaan karttatasoonsa, jolloin mikä tahansa matemaattinen operaatio, joka suoritettaisiin jollekin rasterisolulle, voidaan kohdistaa koko karttatason kaikille soluille. Kartta-algebrassa käytetään paitsi tavallisia matemaattisia operaattoreita myös spatiaalisia paikkaan sidotun tiedon käsittelyyn kehitettyjä toimintoja, kuten esimerkiksi erilaisia läheisyysanalyysijä.

Spatiaalisilla malleilla tarkoitetaan malleja, joilla pyritään ilmaisemaan kartoitettujen kohteiden välisiä suhteita matemaattisen

menetelmin (Berry 1995). Spatiaalisessa mallinnuksessa hyödynnetään mm. spatiaalista tilastotiedettä ja kehittyneitä analyyttisiä menetelmiä. Spatiaalisen mallinnuksen avulla voidaan mm. etsiä riippuvuussuhteita paikannettujen muuttujien välille ja tuottaa empiirisiä malleja ilmiön spatiaalisen jakauman ja sen muutosten pohjalta. Ennustavan spatiaalisen mallinnuksen avulla on mahdollista tuottaa paikannettua tietoa esimerkiksi käyttämällä spatiaalista interpolointia. Lisäksi spatiaalisten mallien parametreja muuttamalla voidaan tehdä eräänlaista spatiaalista herkkyysanalyysiä.

Spatiaalisessa mallinnuksessa hyödynnettävä spatiaalinen tilastotiede eroaa perinteisestä tilastotieteestä siinä, että se keskittyy kuvaamaan tiedon spatiaalista hajontaa alueella pikemminkin kuin tuottamaan perinteisiä tilastollisia tunnuslukuja alueelta olettaen, että ilmiö on tasaisesti jakautunut. Berry (1993) määrittelee spatiaalisen tilastotieteen tieteenalaksi, jonka tavoitteena on kuvata paikkaan sidotun tiedon geografista jakaumaa ja ominaisuuksiltaan samankaltaisten alueiden muodostamia kuviota ja niiden ominaisuuksia.

Paikkatietojärjestelmien käytön hyöty ympäristömallinnuksen apuvälineenä on kiistaton. Sen avulla voidaan entistä paremmin hallita eri mittakaavoissa tallennettuja ja eri tietolähteistä peräisin olevia tietoja, tuottaa mallinnuksessa tarvittavaa paikkaan sidottua tietoa sekä esittää mallien tulokset paikkaan sidotulle tiedolle luonnollisessa muodossa – karttoina. Tulevaisuus näyttää, jääkö paikkatietojärjestelmän lopullinen rooli ympäristömallinnuksessa lähinnä spatiaalisen tiedon esi- ja jälkikäsitelijäksi vai toteutuuko mallien ja paikkatietojärjestelmän sulautuminen integroiduksi järjestelmäksi.

## 10.2 Kartografisen mallinnuksen esimerkki

Kartografinen mallinnus voidaan määritellä joukoksi karttamuotoisia malleja, joissa yhdistetään perättäisiä paikkatieto-operaatioita tiettyjen sääntöjen avulla spatiaaliseksi malliksi (Bonham-Carter 1996). Kartografinen malli voi koostua useista kymmenistä karttatasoista, jotka kuvaavat mallissa käytettyjen muuttuji-

en, kuten tietyn teeman tai ilmiön, spatiaalista vaihtelua tutkittavalla alueella. Kartografinen mallinnus soveltuu hyvin tilanteisiin, joissa tarvitaan monenlaisen tiedon ja monien tietolähteiden integroitua analysointia.

Nykyisessä muodossaan kartografinen mallinnus perustuu Tomlinin (1990) kehittämään kartta-algebraan, jossa linkitetään geometrisiin yksilöihin ja niiden naapurustoon kohdistuvia matemaattisia laskentaketjuja siten, että edellisen toiminnon tulos on seuraavan syöte. Kartta-algebrassa jokainen muuttuja talletetaan omaan karttatasoonsa, jolloin mikä tahansa matemaattinen operaatio, joka suoritettaisiin jollekin rasterisolulle, voidaan kohdistaa koko karttatason kaikille soluille. Kartta-algebrassa käytetään paitsi tavallisia matemaattisia operaattoreita myös spatiaalisia paikkaan sidotun tiedon käsittelyyn kehitettyjä toimintoja.

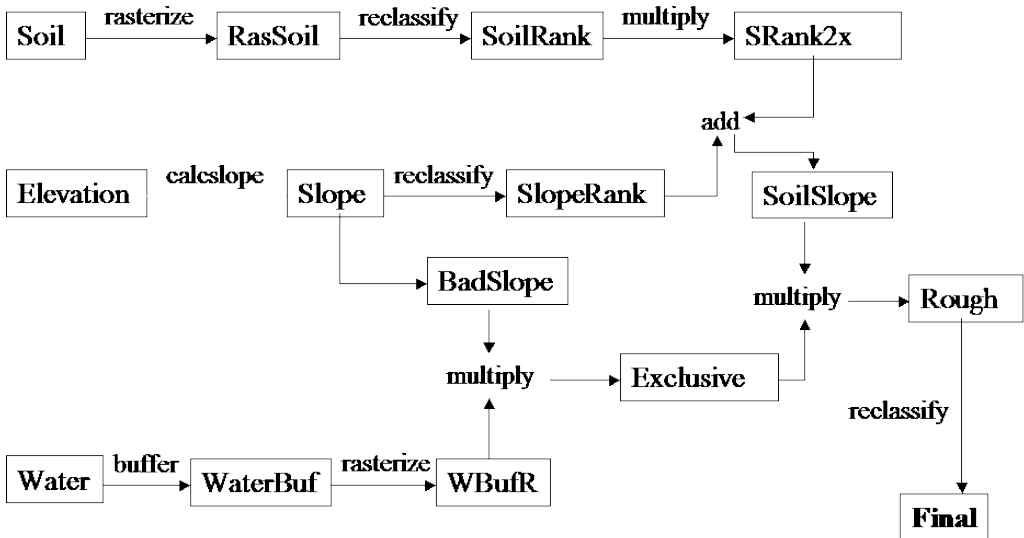
Perinteinen kartografisen mallinnuksen esimerkki on sopivan paikan etsintä eri kriteerein: Analyysin vaiheet ovat: 1) Määritä analyysin päämäärä, 2) Määritä paikan hyvyyteen vaikuttavat tekijät, 3) Määritä tarpeelliset karttatasot ja GIS-operaatiot, 4) Suunnittele formaalilla kuvaustekniikalla (esim. vuokaavio) analyysin kulku, 5) Suorita analyysi, 6) Tarkenna

analyysiä iteratiivisesti, 7) Tarkista ja evaluoi mallin luotettavuus, rajoitukset ja sopivuus. Seuraavassa esimerkissä analyysin päämääränä on arvottaa maa-alueet maatalouden käytön sopivuuden suhteen. Kriteereinä ovat: a) kohtuullinen tai hyvä maaperä, b) rinteiden jyrkkyys  $< 11\%$ , c) vesistöistä  $> 10\text{ m}$ . maaperäkriteeri on kaksi kertaa tärkeämpi kuin rinteiden jyrkkyys.

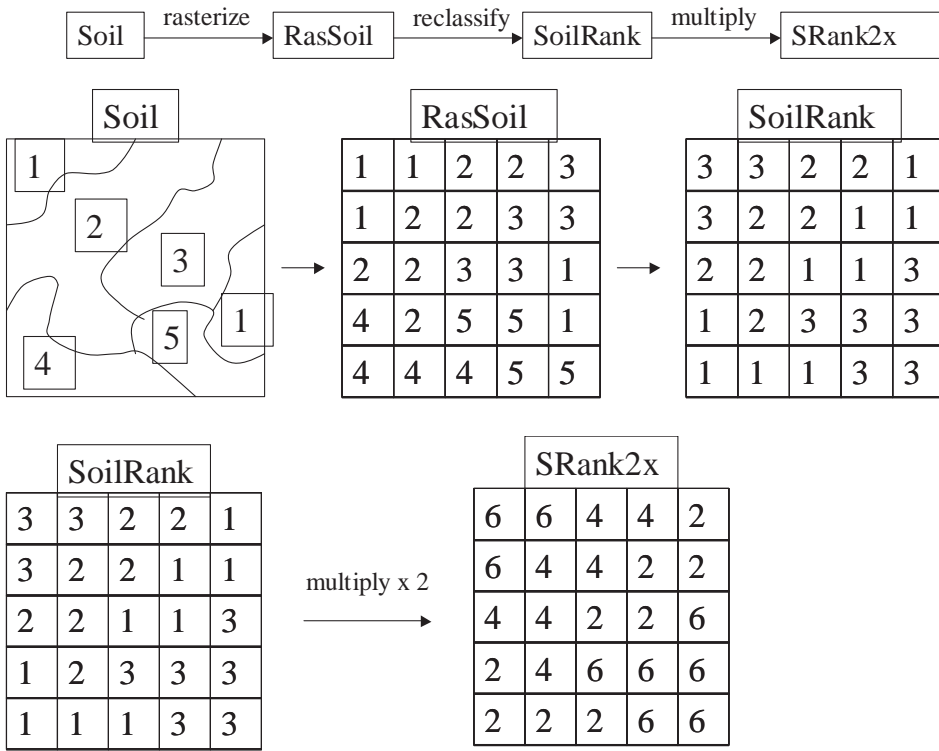
Lähtötietoina ovat vektorimuotoiset maaperäkartat (Soil) ja vesistöt (Water) sekä rasterimuotoinen korkeustieto (Elevation).

Analyysissä (kuva 10.1) lasketaan lähtöaineistosta tarvittavat tiedot, rasteroidaan koko aineisto ja tehdään lopulliset arvotukset uudelleenluokituksella rasterianalyysillä. Maaperän alkuperäinen luokitus ei kuvaa maaperän hyvyyttä maatalouden kannalta, joten aineisto joudutaan luokittamaan uudelleen. Edelleen hyvyydenluokitusta halutaan painottaa kaksinkertaisesti (kuva 10.2).

Rinteiden jyrkkyys voidaan laskea korkeusmallista peräkkäisten pikseleiden arvojen avulla. Laskenta on ohjelmistoissa yleensä määriteltä valmiiksi funktion muotoon. Rinteiden jyrkkyys tässä tapauksessa arvioitiin maatalouden tarpeita silmälläpitäen uusiin luokkiin (kuva 10.3).



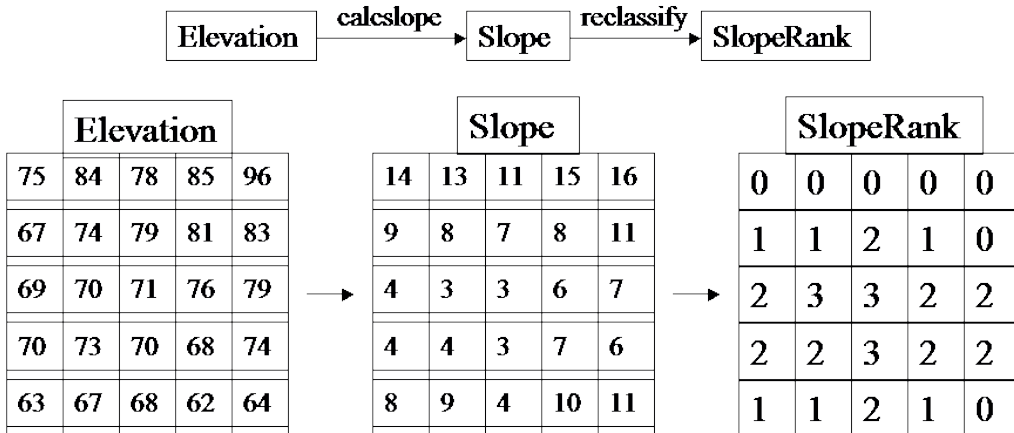
Kuva 10.1. Kartografisen mallinnuksen esimerkki vektorimuotoisen maaperäkartan (Soil) ja vesistöjen (Water) sekä rasterimuotoinen korkeustiedon (Elevation) avulla.



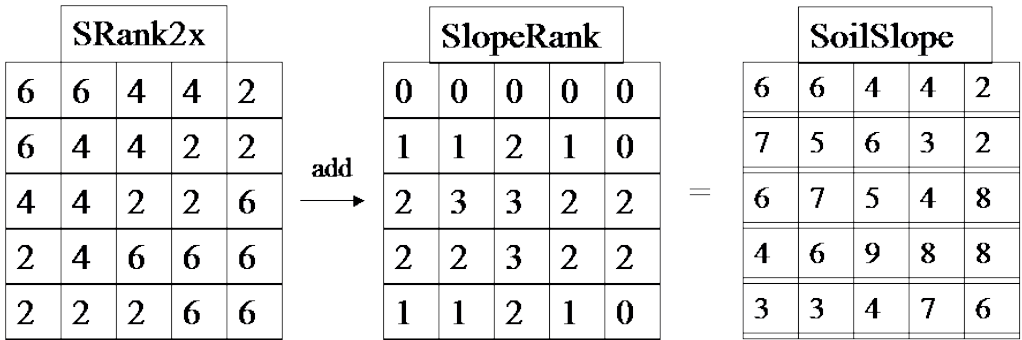
Kuva 10.2. Maaperäkartan rasterointi, uudelleenluokitus hyvyysluokituksen suhteen ja kertominen kahdella.

Rinteen jyrkkyys ja maaperän ominaisuudet ovat suhteessa toisiinsa, joten tässä mallissa on päädytty lisäämään maaperäarvioihin rinteen jyrkkyystietoa (kuva 10.4). Todella pahat rinteet taas muodostavat työteknisesti mahdottomia kohteita,

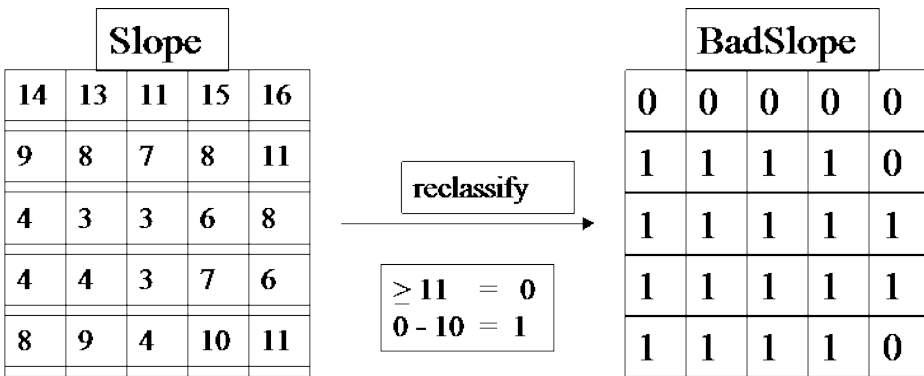
joten ne voidaan eliminoida täysin (kuva 10.5). Vesistöjen reunat tarvitsevat suojavyöhykkeen, etteivät ravinteet valu suoraan vesistöön, joten niiden ympärille generoidaan vyöhykkeet, joilla alueet eliminoidaan analyysistä (kuva 10.6).



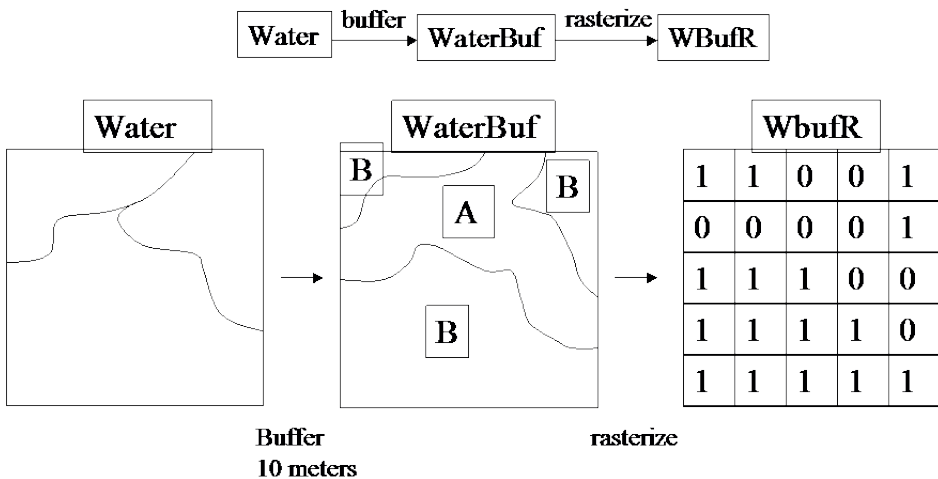
Kuva 10.3. Rinteen jyrkkyyslaskenta korkeusarvoista ja rinteen hyvyyden arvotus.



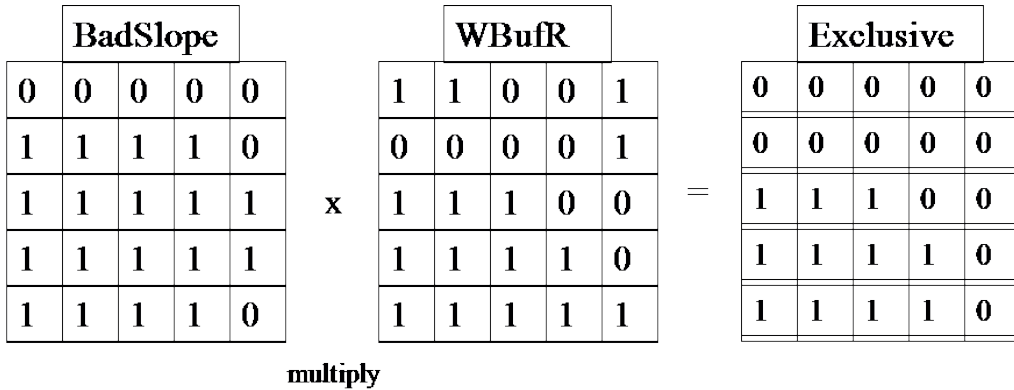
Kuva 10.4. Maaperän käyttökelpoisuuden mallinnusta rinteiden jyrkkyyden avulla, mahdottomiin (0), kohtuullisiin (2) ja hyviin (3).



Kuva 10.5. Pahojen rinteiden jyrkkyyksien arvotus, koodataan nolla mahdottomiin kohteisiin.



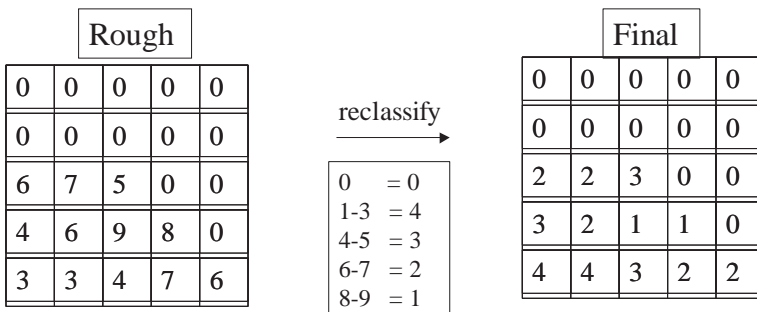
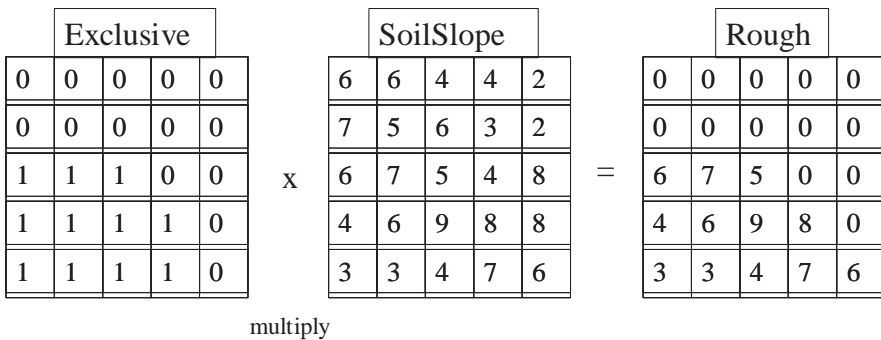
Kuva 10.6. Vesistöjen ympärille generoidaan vyöhykkeet ja rasteroidaan tulos. Kelvolliset alueet koodataan arvolla 1.



Kuva 10.7. Kerrotaan pahat jyrkänteet ja vesien etäisyyttä kuvaava karttataso. Tuloksena hyväksyttävät ja kummatkin ehdot täyttävä taso.

Kertolaskua käytetään loogisena operaattorina varsin usein, kun kyseessä on ns. joko-tai-tilanne. Pahojen rinteiden ja vesistöyöhykkeiden tapauksessa tarvittiin tieto kohteista jotka täyttävät kummatkin kriteerit (kuva 10.7). Tällöin on yksikertaisinta kertoa

rasterikarttatasot, joissa hyväksyttävät alueet on koodattu numerolla 1 ja kelvottomat kohdetteet arvolla 0. Lopullisessa vaiheessa voidaan kyseinen tulos vielä kertoa maaperän laatua kuvaavalla rasterilla (kuva 10.8) ja uudelleen luokitella sopivaksi tulosten esittelyä varten.



Kuva 10.8. Kerrotaan vesistö ja maaperäkriteerien painotetut karttatasot ja luokitetaan ensimmäinen laskevatulos uudelleen lopulliseksi tulokseksi.

### 10.3 Kartografinen mallinnus ja elinympäristöjen sopivuuden arviointi

Erityisesti ekologinen tutkimus on hyötynyt suuresti paikkatietojärjestelmien ja niihin liittyvien spatiaalisen informaation analyysimenetelmien kehittymisestä. Uutta tietoa esimerkiksi maiseman rakenteen ja eliöiden välisestä vuorovaikutuksesta saadaan jatkuvasti. Jotta tämä tieto voitaisiin tehokkaasti hyödyntää myös metsäsuunnittelussa, tarvitaan uusia menetelmiä, joilla tämä tietous kytketään käytännön suunnittelutyöhön. Tässä luvussa esitellään menetelmä, jossa hyödynnetään kartografista mallinnusta ja moderneja päätösanalyysitekniikoita elinympäristön sopivuusindeksin tuottamisessa metsäsuunnittelun tarpeisiin.

Kartografista mallinnusta käytetään usein etsittäessä johonkin tiettyyn käyttötarkoitukseen soveltuvia maa-alueita (esim. Shaw ja Atkinson 1988, Reisinger ja Kennedy 1990, Wadge ym. 1993). Alueiden paikallistaminen tapahtuu yhdistämällä loogisten alueleikkausten avulla numeerisessa muodossa olevia karttatasoja, joissa kukin karttataso esittää yhden kriteerin. Useimmiten näiden sovellusten lopputuloksena on kartta, joka yksilöi ne alueet, jotka täyttävät yhtäaikaaisesti annetut ehdot, mutta joka ei anna informaatiota hyväksytyjen alueiden keskinäisestä paremmuudesta. Menetelmän heikkoutena on, että se ei tarjoa mahdollisuutta tarkastella, mitkä valintaehdot täyttävistä alueista ovat parhaimpia kyseiseen käyttötarkoitukseen tai mitkä alueet ovat parhaita käypien alueiden ulkopuolella.

Yhdistämällä kartografiseen mallinnukseen moderneja päätösanalyysitekniikoita pystytään tällaisen 0/1 -kartan (binäärikartan) sijasta tuottamaan kartta, jossa kartta-alkioiden arvot kuvaavat sitä, miten hyvin se täyttää asetetut tavoitteet (indeksi-kartta). Monikriteeriseen arviointiin kehitetyt menetelmät (MCE) ovat yksi mahdollisuus indeksikarttojen tuottamiseen. Näiden avulla on mahdollista arvioida useita päätösvaihtoehtoja monien valintakriteerin ja kilpailevien tavoitteiden suhteen.

Monikriteeriseen arviointiin kehitetyt menetelmät voidaan jakaa kompensoiviin ja ei-kompensoiviin menetelmiin. Kompensoi-

vissa menetelmissä huono arvo jonkin kriteerin kohdalla on kompensoitavissa hyvällä arvolla jossakin toisessa kriteerissä. Ei-kompensoivissa menetelmissä tämä ei ole mahdollista. Kompensoivat menetelmät voidaan edelleen jakaa additiivisiin ja ideaalipiste-menetelmiin. Additiivisissa menetelmissä kokonaispistemäärä jokaiselle vaihtoehdolle lasketaan kertomalla kriteerin pistemäärä painokertoimellaan ja laskemalla painotetut pistemäärät yhteen. Painotettu lineaarinen summa on tunnetuin esimerkki tämän ryhmän monikriteerisistä arviointimenetelmistä. Monikriteeriseen arviointiin kehitettyjen menetelmien käytöllä kartografisessa mallinnuksessa saadaan ratkaistua karttatasojen ja toisaalta yksittäisten luokkien painotuksen toteuttamiseen sekä eriasteikoilla ja mittayksiköillä kuvattujen tunnusten yhdistämiseen liittyviä ongelmia.

Käytettäessä kartografista mallinnusta ja monikriteeristä arviointia elinympäristöjen sopivuuden arviointiin selvitetään ensimmäiseksi tarkasteltavan lajin menestymiseen vaikuttavat tekijät esimerkiksi aikaisempien tutkimusten tai asiantuntijatietämyksen pohjalta. Näiden tekijöiden perusteella valitaan arvioinnissa käytettävät elinympäristön sopivuutta kuvaavat kriteerit. Arvioinnissa tarvittava informaatio voi olla peräisin esimerkiksi maastoinventoinneista tai satelliittikuvilta tai se voidaan tuottaa analysoimalla olemassa olevia tietoja paikkatietojärjestelmässä esimerkiksi spatiaalisten analyysien avulla. Paikkatietojärjestelmä soveltuukin hyvin eri tietolähteistä peräisin olevien ja eri mittakaavoissa tallennettujen tietojen yhdistämiseen. Jokainen elinympäristön soveltuvuutta kuvaava kriteeri talletetaan paikkatietojärjestelmässä omaksi karttatasokseen.

Seuraavassa vaiheessa soveltuvuuskriteerien joukosta valitaan ehdottomat kriteerit, joiden epäsojivat arvot eivät ole kompensoitavissa joidenkin toisten kriteerien hyvillä arvoilla. Näiden avulla rajataan lajille soveltumattomat alueet jatkotarkastelujen ulkopuolelle käyttämällä paikkatietojärjestelmän loogisia alueleikkauksia. Jäljelle jäänyt ns. käypä alue rankataan joustavien elinympä-

ristövaatimusten pohjalta. Joustavat kriteerit kuvaavat kukin yhtä lajin menestymiselle tärkeää elinympäristön ominaisuutta esimerkiksi puuston määrää, puulajisuhteita tai vaikkapa maaperän kosteutta.

Joustavat kriteerit tuotetaan samoilla menetelmillä kuin ehdottomat kriteerit ja talletetaan omina karttatasoinaan. Seuraavassa vaiheessa joustavia kriteerimuuttujia vastaavat karttatasot standardisoidaan esimerkiksi nollan ja yhden välille. Standardisoidut pistemäärät kerrotaan kriteerien painokertoimilla, jotka kuvastavat lajin elinympäristökriteerien keskinäisiä tärkeyksiä. Lopullinen sopivuusindeksi saadaan yhdistämällä painotetut kriteerikohtaiset pistemäärät esimerkiksi aritmeettisella alueleikkauksella.

Kartografinen mallinnus täydennettynä monikriteerisen arvioinnin menetelmillä sopii hyvin tilanteisiin, joissa elinympäristömalleja ei ole käytettävissä ja joissa suuri määrä kohteita rajatulta alueelta tulisi arvottaa tiettyjen elinympäristökriteerien pohjalta.

Indeksi-karttojen käyttö tuo päätöksentekoon lisää joustavuutta, mikä on tärkeää, koska edes yksityiskohtaiseen luonnontieteelliseen malliin on hyvin vaikea sisällyttää kaikkia päätökseen vaikuttavia tekijöitä. Indeksi-kartan avulla päätöksentekijä näkee miten hyviä tai tärkeitä kohteen eri alueet ovat tietyn tavoitteen suhteen. Päätöksentekoprosessissa kyseinen tavoite voidaan sisällyttää optimointimalliin tai ottaa huomioon valittaessa parasta vaihtoehtoa useamman tyydyttävän vaihtoehdon joukosta.

# 11 Kustannuspinta-analyysi

## 11.1 Johdanto

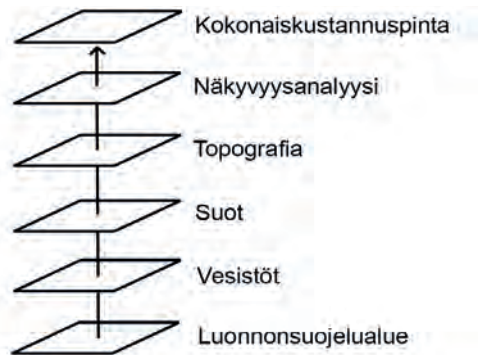
Kustannuspinta on yksi spatiaalisen mallinnuksen menetelmistä. Kustannuspinnalla tarkoitetaan tarkasteltavalle alueelle muodostettua rasteripintaa, jossa yhdistellään olemassa olevia paikkatietoaineistoja tavoitteena muodostaa esimerkiksi optimaalinen reitti kahden pisteen välillä. Kustannuspinnan avulla voidaan tehdä vastaavia analyysejä kuin korkeusmallilla, toisaalta korkeusmalli voi olla kustannuspinnan yksi lähtötieto. Jos suunnitellaan uuden kohteen rakentamista ja sen sijaintia, tarvitaan kohdealueelta kattavaa tietoa eivätkä pelkät vaihtoehtoiset reitit välttämättä ole riittäviä. Sellaisena voi toimia esimerkiksi tarvittavaa ominaisuutta kuvaava rasteripinta. Olemassa oleva väyläverkko ei siis sisällä tietoa välialueista ja on siten periaatteessa puutteellista lähtöaineistoa optimaalisten kohteiden etsintään.

Kustannuspinta-analyysissä lasketaan kartta-elementeittäin väylän rakentamiskustannuksiin vaikuttavia tekijöitä etukäteen määräytyin painotuksin (kuva 11.1).

Tavallisin kustannuspintamalli on säännöllisiin nelikulmioihin perustuva rasterimuotoinen korkeusmallia (GRID) vastaava esitys. Analyysissä voidaan erottaa kaksi toisistaan hieman eroavaa etäisyysanalyysi tyyppiä (kuva 11.2):

EUCDISTANCE, COSTDISTANCE, suoraa kustannuspinnan mukainen kertymä

PATHDISTANCE, = pintaetäisyys\*  
 $vf*((fa*hfa + fb*hfb)/2)$ , missä huomioidaan



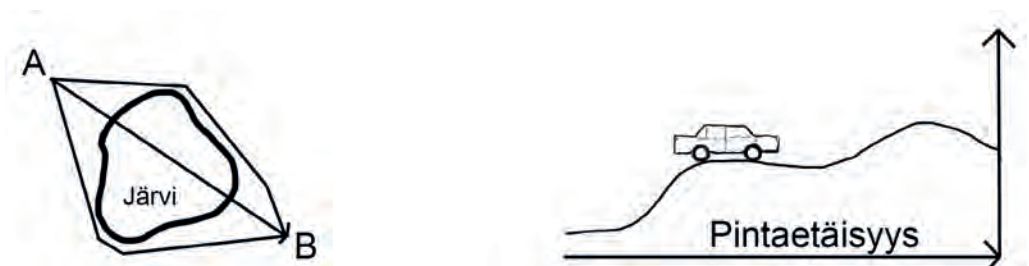
Kuva 11.1. Kustannuspinnan muodostuminen eri tekijöistä. Kuva Ville Kankare.

pintaa pitkin tapahtuvana toimintana vf alamäki, ylämäki fa rosoisuus, fb myötätuuli.

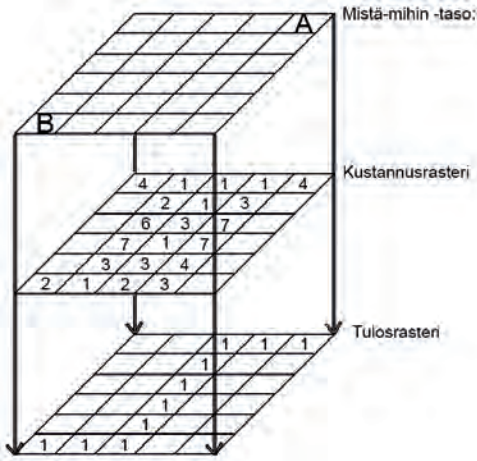
Varsinainen kustannuspinta-analyysin (eng. costpath) syöttötietoina ovat "mistä-mihin" tiedot ja "kustannuspinta". Tulokseksi saadaan kohteiden välinen lyhin kustannuskertymäpinta (kuvat 11.2, 11.3). Analyysissä ovat useat lähtö- ja määrääsemapaikat mahdollisia.

## 11.2 Edullisimman reitin etsintä kustannuspinnalta

Kustannuspinta-analyysiä voidaan käyttää erilaisten edullisimpien reittien löytämiseksi. Analyysiä voidaan käyttää monien hyvin-kin erilaisten ongelmien käsittelyyn. Vesien



Kuva 11.2. Etäisyydet kustannuspinta-analyysissä. Kuva Ville Kankare.



Kuva 11.3. Esimerkki kustannuspinta-analyysistä. Kuva Ville Kankare.

valuma-analyyseissä pintana toimii todelliset korkeusarvot, joiden avulla voidaan mallittaa veden valunta tietystä paikasta. Erilaisissa reitinetsintäongelmissa pinta muodostetaan esimerkiksi etenemisestä johtuvista kustannuksista.

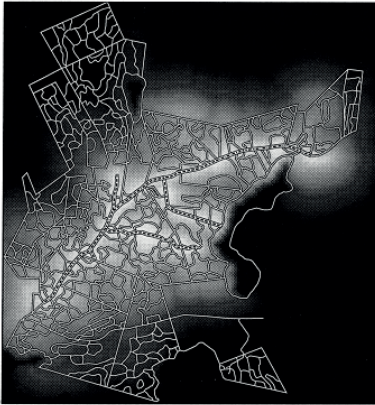
Metsäautotien rakentaminen voisi olla yksi esimerkki kustannuspinta-analyysin käyttökohteista. Tässä esimerkissä on oletettu, että metsäautotien rakennuskustannukset syntyvät seuraavasti: 1. kiinteät kustannukset, 2. turvemaiden lisäkustannus, ja 3. kaltevuudesta aiheutuvat kustannukset (kuva 11.4).

Tuloja saadaan puolestaan tien läheisyydessä (etäisyys alle 200 metriä) olevista hakkuumahdollisuuksista. Tämä ”hakkuumahdollisuuksien” arviointi on esimerkissä laskettu liukuvan ikkunan suodatuksella (naapurisuusanalyysi), jossa rasterin kukin piste on saanut arvokseen 400x400m kokoisen ikkunan keskiarvon. Näin tien rakentamisesta saadaan ”tuloja” jo silloin, kun tie kulkee riittävän läheltä puustoista kuviota. Näiden tietojen avulla voidaan laskea kullekin rasteripisteelle tienrakennuskustannus, joka voidaan seuraavaksi muodostaa kustannuspinnaksi (kuva 11.5).

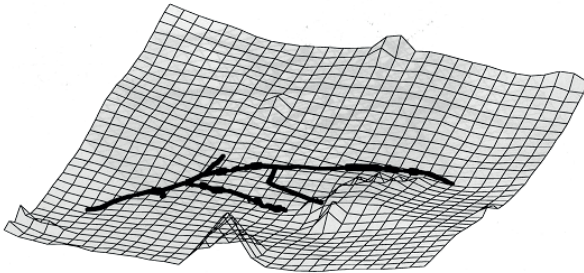
Kustannuspinnan muodostuksessa olemassa oleva tiestö muodostaa nollatason, josta poikkeaminen aiheuttaa kustannuksia. Reitin etsinnässä annetaan tämän jälkeen halutut lähtöpisteet, jonka jälkeen edullisin reitti löydetään valuma-analyysillä, jolloin reitiksi muodostuu kulloinkin jyrkin suunta alaspäin kustannuspinnalla (kuva 11.6).



Kuva 11.4. Maaston kaltevuus ja turvemaiden sijainti tarkastelualueella. Kuva Ville Kankare.



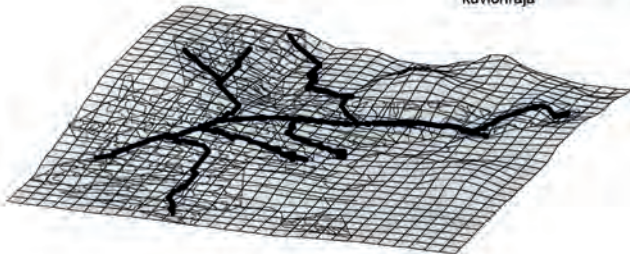
olemassa oleva tie ———



Kuva 11.5 Kustannuspinta kaksi- ja kolmiulotteisena.



tie ———  
kuvionraja



Kuva 11.6. Teiden sijoitusehdotukset kaksi- ja kolmiulotteisena.

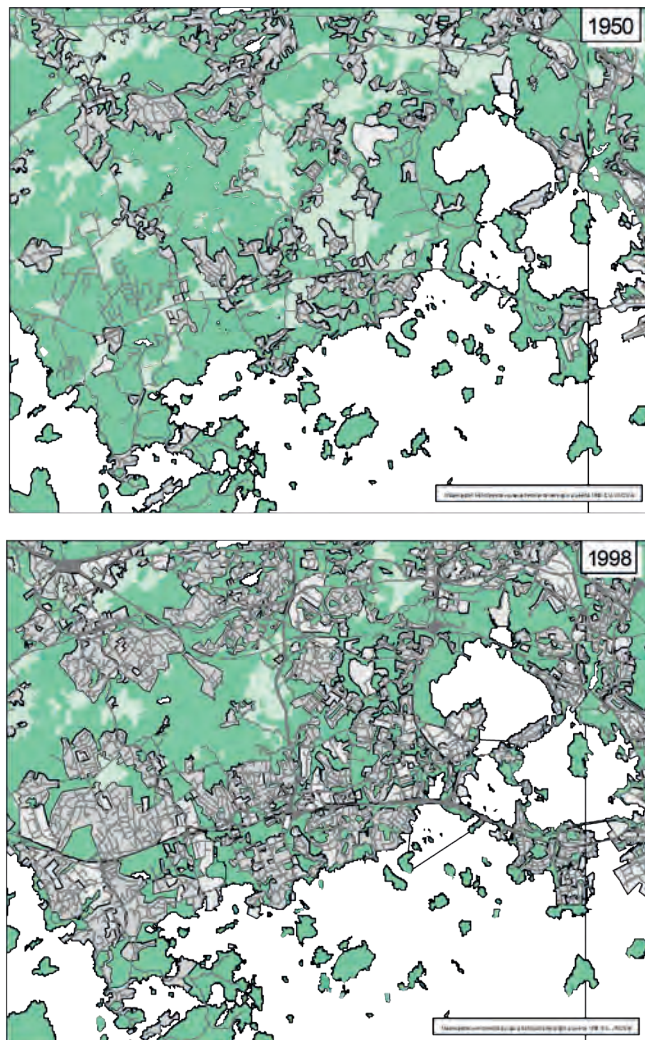


## 12 Muutosanalyysit

### 12.1 Aikasarjat

Muutoksia voidaan analysoida aikasarjoista, yksittäisestä liikekartasta tai erotuskartoista. Aikasarja on hyvä esittämään muutokset rajoissa, arvot diskreeteissä alueissa tai pinnoissa. Jokaisesta ajankohdasta tehdään oma karttansa. Jos muutokset ovat suuria, niin muutoksen suunta ja luonne tulevat hyvin esiin erillisiltä aikasarjan kuvilta (kuva 12.1). Luokittelu ja

luokkajako pitää olla sama aikasarjan eri kuvilla. Aikasarjatyyppisessä analyysissä luokitus on monesti ongelmallista, koska aineisto voi olla kerätty eri kriteerein ja erilaisista tietolähteistä. Kartan tekijän onkin varmistettava, että kyseessä ovat todelliset muutokset eikä tiedon keruusta tai tiedon korjauksesta johtuvat erot. Maksimissaan kannattaa samassa kuvassa näyttää viisi aikasarjan erillistä kuvaa. Yleistäminen parantaa tulosten tulkittavuutta.



Kuva 12.1. Esimerkki aikasarjasta: Espoon maankäyttö 1950 ja 1998.

## 12.2 Liikekartta

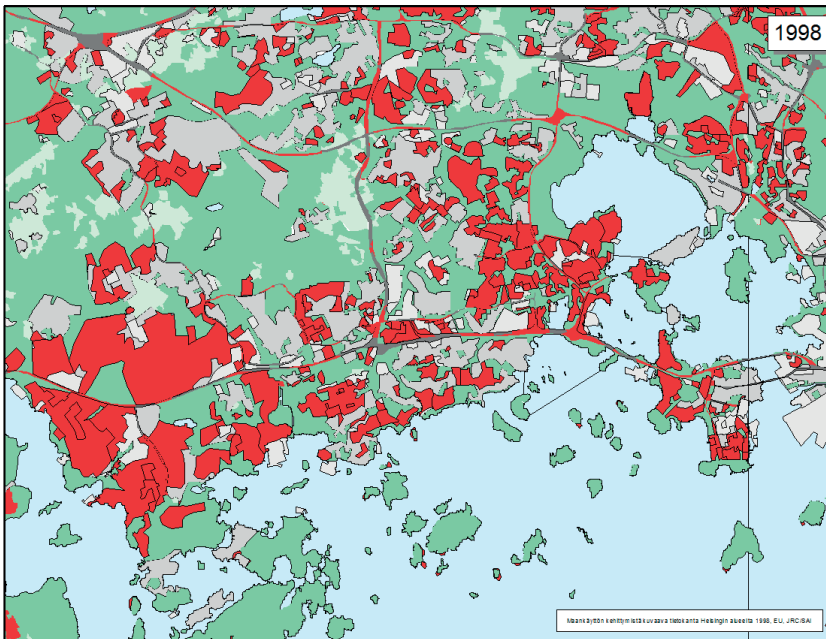
Liikekartta kuvaa kohteen sijainnin eri päivinä tai aikoina. Sitä käytetään esimerkiksi metsäpalojen etenemisen tai metsäsuunnitelman hakuiden ajankohdan kuvaukseen. Yksittäisten pisteiden tapauksessa voidaan havainnollistaa esimerkiksi auton etenemisen nopeus kahden pisteen välisellä viivalla tai tuulen nopeus nopeutta kuvaavalla pallon koolla. Viivan liikettä esitetään esimerkiksi rantalinjan siirtymisenä myrskyn jälkeen. Viivan värin voimakkuudella tai viivatyyppillä voidaan kuvata muutoksen voimakkuus. Alueen liikettä voidaan esittää polygoneilla tai rasteripinnoilla. Metsäpalo leviämisen esittäminen on tällainen tehtävä.

## 12.3 Muutoskartta

Pienten muutosten havaitseminen on hankalaa erillisiltä kuvilta. Muutoskuvalta erottuvat pienetkin muutokset (kuva 12.2), mutta kokonaisuuden hahmottaminen voi olla hankalaa. Muutosta voidaan laskea yksittäisille kartta-kohteille, alueen summamuuttujille, jatkuville

luokkapinnoille tai jatkuville numeerisille pinnoille.

Yksittäisten karttakohteiden muutosarvot voidaan tallettaa ominaisuustietokantaan. Ominaisuustietokannassa kunkin kohteen arvot ovat eri kentissä ja muutos voidaan laskea eri ajankohtien erotuksena. Esimerkiksi liikenteen voimakkuuden muutosta voidaan seurata, jos liikenteen seurantatiedot on sidottu suoraan tienpätkään. Alueiden summa-arvojen muutoksia voidaan havainnollistaa teemakartoilla, piirakkakartoilla tai pylväsdigrammeilla tehostetuilla kartoilla. Positiivisten ja negatiivisten arvon havainnollistamiseksi käytetään syvää kontrastia, esimerkiksi punaisen ja violetin eri sävyjä. Jatkuvien luokkamuuttujapintojen esittäminen tapahtuu ajankohdittain ja luokittain. Jos luokkamuuttujan arvoilla on järjestysasteikollista merkitystä, niin voidaan laatia myös muutoksen voimakkuutta kuvaavia karttoja. Jatkuville numeerisille pinnoille voidaan karttaalgebrallisesti laskea suoraan muutospinta, joka voidaan havainnollistaa voimakkaasti kontrastia omaavilla väreillä positiivisen ja negatiivisen muutoksen havaitsemiseksi.



Kuva 12.2. Espoon metsän pinta-alan pieneneminen 1950–1998. Rakennetut tummat alueet olivat vuonna 1950 metsää.

## 12.4 Esimerkki muutosanalyyseistä – tuuli- ja lumituhojen seuranta ja riskikartoitus

### 12.4.1 Tuuli- ja lumituhojen seuranta

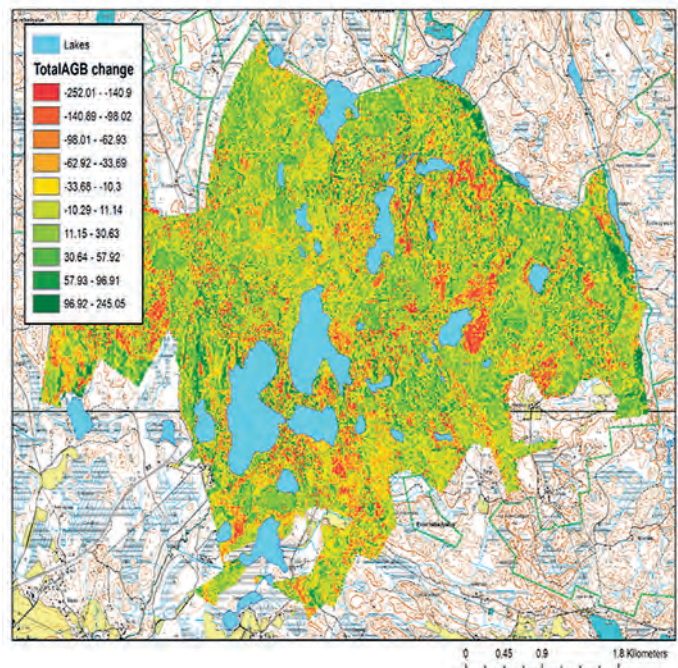
Metsätuhoihin liittyvät riskit, kuten kuivuus-, lumi-, tuuli- ja hyönteistuhot ovat lisääntyneet. Tuhot vaikuttavat metsätalouden kannattavuuteen. Esimerkiksi tuulituhot voivat aiheuttaa merkittäviä taloudellisia tappioita lyhyessä ajassa. Tällaisissa tapauksissa tarvitaan menetelmiä laajojen alueiden nopeaan ja tarkkaan kartoitukseen. Tuulituhoilta alttiiden metsiköiden kartoitus tuottaa tietoa, jota voitaisiin hyödyntää myös metsänhoidossa. Lainsäädäntö velvoittaa metsänomistajaa korjaamaan tuhoutuneen puuston, jotta esimerkiksi tuulituhojen seurauksena hyönteistuhot eivät pääsisi leviämään. Tietoa tuhoutuneen puustoon määrästä ja laadusta tarvitsevat siis metsänomistajat lisäksi myös viranomaiset.

Yksityiskohtainen kolmiulotteinen (3D) kaukokartoitus tarjoaa menetelmiä metsissä tapahtuvien muutosten, kuten tuuli- ja lumituhojen inventointiin, kartoitukseen ja seurantaan.

Metsissä tapahtuneita biomassamuutoksia, kuten tuulituhoja, voidaan kartoittaa hyvällä tarkkuudella joko useamman ajankohdan ALS-pintamalleilla tai ALS- ja ilmakuvapintamallien yhdistelmällä (Kankare ym. 2014, Saarinen ym. 2014). Tulevaisuudessa voidaan muutostulkinnassa todennäköisesti hyödyntää myös korkean resoluution satelliittikuvia, esimerkiksi SAR-radargrammetriaan tai -interferometriaan perustuvia 3D-pintamalleja.

Tuuli- ja lumituhot muuttavat metsikön 3D-rakennetta. Myrskytuuli tai lumi kaataa useimmiten kokonaisia puita tai katkoo niiden latvoja. Tuotettujen pintamallien (DSM, CHM) erotuskyky (resoluutio) vaihtelee XY-tasossa noin paristakymmenestä senttimetrillä muutamaan metriin ja Z-tasossa noin puolesta metrillä metriin pintamallin tuottamismenetelmästä riippuen. Näin ollen tuulituhoja pystytään erottamaan useampiaikaisten 3D-pintamallien avulla. Pintamallien erotusmenetelmien käytännön hyödyntämistä rajoittaa useampiaikaisten yksityiskohtaisten pintamallien saatavuus eli temporaalinen resoluutio. Toinen haaste on erottaa puuston kasvu ja metsänhoidolliset

Kuva 12.3. Puuston biomassamuutoksen kartoitus kahden ajankohdan laserkeilauspintamallien avulla. Kuva Ville Kankare.

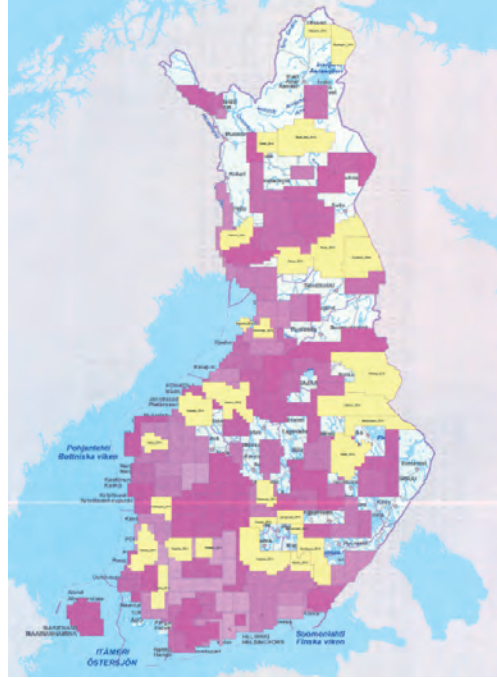


toimenpiteet tuhojen aiheuttamista muutoksista.

Kahden ajankohdan laserkeilauspintamalli voidaan tuottaa kustannustehokkaasti hyödyntämällä MML:n ilmaista laserkeilausaineistoa ja keilaamalla tuhoutunut alue mahdollisimman nopeasti tuhon jälkeen. Kuvassa 12.3 on esitetty puustobiomassan muutostulkintakuva, joka on tehty tällä menetelmällä Evon testialueella.

Mielenkiintoinen vaihtoehto metsätuhoihin liittyvässä muutostulkinnassa on ALS-pintamallin ja ilmakuvapintamallin yhdistäminen. Kyseinen vaihtoehto voisi olla kustannustehokkaampaa kuin kahden ALS-pintamallin hyödyntäminen, varsinkin jos lähtökohtana voidaan käyttää valtakunnallista MML:n laserkeilausaineistoa (Kuva 12.4). Menetelmällä voidaankin nähdä suurta potentiaalia kehitettäessä sovelluksia operatiiviseen laajojen alueiden biomassamuutosten ja metsätuhojen seurantaan.

Lumituhot muistuttavat monelta osin tuulituhoja: lumi kaataa yksittäisiä puita, puuryhmiä tai katkoo puiden latvoja. Verrattuna tuulituhoihin, lumi tuhoaa kuitenkin enemmän vain yksittäisiä puita, eivätkä tuhot ole aina niin laaja-alaisia. Lumen katkoessa puiden latvuk-  
sia, on tärkeää pystyä erottamaan siis myös tuhot, joissa koko puu ei ole kaatunut. Lumituhojen kartoituksessa käytettävien kaukokartoitusaineistojen tulee olla erotuskyvyltään sellaisia, joista pystyy erottamaan yksittäisiä puita tai vain muutamien neliömetrien kokoisia tuhoalueita.

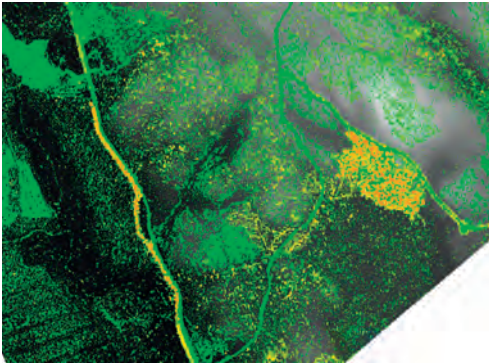


Kuva 12.4. MML:n laserkeilausaineiston kattavuus (2008–2014). Kuva MML.

Lumituhojen tulkintaan on kehitetty ALS-pintamallien erotukseen perustuva muutostulkintamenetelmä ( $\Delta$ CHM-menetelmä, Vastaranta ym. 2012). Menetelmällä voidaan tehdä puutason tai ainakin puuryhmätason muutostulkintaa ja se on potentiaalinen menetelmä puuston 3D-rakenteessa tapahtuvien muutosten seurantaan ja näin ollen lumituhojen nopeaan ja tarkkaan



Kuva 12.5. Lumituho (vasen kuva) ja tuulituho (oikea kuva). Kuvat Antti Uotila / Ilkka korpela ja Ville Kankare.

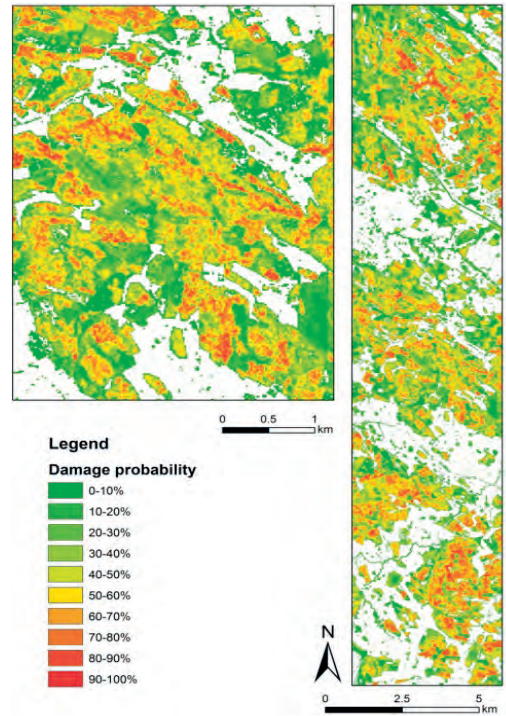


Kuva 12.6.  $\Delta$ CHM-menetelmällä tuotettu lumituhokartta Hyytiälän testialueelta (Vastaranta ym. 2012).

paikallistamiseen. Haasteena on, että useampi-aikaista tiheäpulsista ALS-aineistoa on oltava saatavilla ja lisäksi lumituhon erottaminen puuston harvennuksesta saattaa olla vaikeaa.

#### 12.4.2 Tuuli- ja lumituhojen riskianalyysit

Metsikkö- ja ympäristötunnuksia, jotka vaikuttavat tuuli- tai lumituhoriskiin tunnetaan hyvin kirjallisuuden perusteella. Niitä ovat muun muassa puuston pituus, ikä, puulaji, runkomooto, latvuston koko, juurten elinvoimaisuus, maan kosteus, ojitus, lannoitus, metsänhoito ja topografia. 3D-kaulukartoitusmenetelmillä voidaan kartoittaa useita näistä tunnuksista. Lisäksi metsikön latvustoa kuvaava latvusmalli (CHM) sisältää jo suoraan yksityiskohtaista mittaustietoa latvuston korkeudesta ja tiheydestä, kun puolestaan maanpinnan korkeutta kuvaavasta maastomallista (DTM) voidaan laskea suoraan topografiaa kuvaavia tunnuksia. 3D-kaulukartoituksen avulla saatua tietoa voidaan siis hyödyntää lähtökohtana tuhojen syiden analysoinnissa, jota voidaan tehdä spatiaalisen tilastotieteen ja paikkatietojärjestelmien avulla. Mallinusaineistona pintamallit tarjoavat yksityiskohtaisempaa ja tasalaatuisempaa tietoa esimerkiksi metsäsuunnitelman kuvioittaisen arvioinnin tietoihin verrattuna. Lisäksi pintamallit ovat avoimesti saatavilla yli metsänomistusrajojen. Pintamallien lisäksi voidaan hyödyntää myös avoimia paikkatietoaineistoja esimerkiksi VMI-monilähdeinventointitietoa.



Kuva 12.7. Tuulituhoihin liittyvä riskikartta, Huittisten tutkimusalue (Saarinen ym. 2015).

Saarinen ym. (2015) kehittivät Huittisen tutkimusalueella tuulituhojen alueellisia riskimalleja. Tutkimusalueelle sijoitettiin systemaattinen koelaverkko ja koaloilta määritettiin ilmakuvien avulla visuaalisesti oliko koeala kärsinyt tuulituhousta. Tämän jälkeen luotiin logistista regressiota hyödyntäen riskimallit koalojen tuholuokituksen, laserkeilausmuuttujien sekä puulajitiedon välille. Laserkeilauksen avulla määritetyt tunnuksot, kuten puuston pituus ja tuhoalueen korkeus merenpinnasta sekä pääpuulaji selittivät tilastollisesti merkitsevästi tuulituhon todennäköisyyttä. Muita kirjallisuuden perusteella tuulituhoriskille altistavia tekijöitä, kuten maaston topografiaan liittyvät tunnuksot, kohteen etäisyys aukkoon sekä puiden elinvoimaisuuteen liittyviä tekijöitä (esimerkiksi latvoksen koko) voidaan selvittää laserkeilauksen sekä ilmakuvapintamallin avulla. Riskimallien avulla voidaan tuottaa tuulituhojen riskikarttoja (Kuva 12.7), joita voidaan hyödyntää esimerkiksi metsäsuunnittelun apuvälineenä.



## 13 Web-GIS, OpenGIS ja yhteisöllinen tiedon keruu

### 13.1 Web-GIS

Vaikka käyttäjän näkökulmasta Internetin GIS-palvelut saattavat vaikuttaa jo hyvin samankaltaisilta kuin paikallisen tietokoneen paikkatieto-ohjelmiston, on näiden kahden välillä perustavanlaatuisia eroja. Internet-palveluissa toiminnallisuus on jaettu käyttäjän omalla koneella olevan asiakasohjelman ja fyysisesti jossain muualla sijaitsevan palvelimen välillä. Tällaista työnjakoa kutsutaan asiakas-palvelin-arkkitehtuuriksi. Palvelinpäässä sijaitsee yleensä tietokanta, johon palveluun kuuluva aineisto (kartat, attribootit) on tallennettu, sekä palvelinohjelmisto, joka käsittelee saapuvat palvelupyynnöt ja jakaa aineiston asiakkaille.

Palvelinohjelmisto voidaan jakaa internet-palvelimeen ja tämän päällä toimivaan GIS-palvelimeen. Internet-palvelin hoitaa yhteydenpidon asiakasohjelmiin ja GIS-palvelin huolehtii palvelun paikkatieto-ominaisuuksista. Käyttäjällä on asiakasohjelmisto, jolla hän ottaa yhteyden palvelimeen. Asiakasohjelma on useimmiten verkkoselain, kuten Internet Explorer tai Firefox. On olemassa myös palveluita, joita varten on asennettava omalle koneelle erityinen asiakasohjelmisto. Esimerkiksi Google Earthia varten on olemassa oma asiakasohjelma, vaikkakin palvelu toimii myös selaimessa. Asiakasohjelman ja palvelimen työnjako riippuu täysin sovelluksesta. Asiakasohjelmistot jaotellaan tyypillisesti sen perusteella, kuinka suuri osa palvelun laskennasta suoritetaan asiakaspäässä. Kevyet asiakkaat antavat palvelinohjelmiston suorittamaan suurimman osan laskennasta ja raskaat asiakkaat sisältävät itse paljon toiminnallisuuksia. Esimerkiksi kevyt asiakasohjelma antaa palvelimen laskea reitin kahden paikan välillä. Raskas asiakasohjelma taas lataa palvelimelta tarvittavat tiedot ja laskee reitin itse. Käytetty asiakasohjelmisto ei kuitenkaan vaikuta käytetyn palvelun toiminnallisuuteen vaan ainoastaan siihen, missä laskenta suoritetaan. Jos sovellus vaatii paljon laskentatehoa, useiden toimijoiden päivityksiä

ja suuria aineistoja, kannattaa palvelu keskittää palvelinpäässä. Jos tietoliikenneyhteyksien luettavuudessa on epävarmuutta, kuten metsäoloissa, voi olla tarpeen keskittää enemmän toiminnallisuutta työaseman päähän.

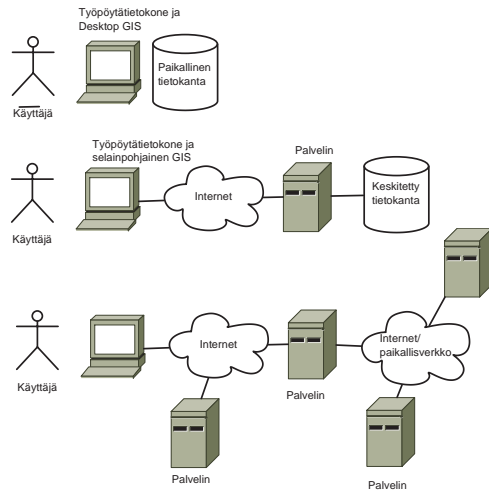
Riippumatta palvelusta tai asiakasohjelmiston tyypistä asiakkaan ja palvelimen erottelu tarkoittaa sitä, että palvelu voi sijaita fyysisesti missä tahansa. Useimmiten palvelimen fyysinen sijainti ei näy käyttäjälle. Verkkoyhteyden epävarmuus alkaa helposti näkyä palvelun vastinaikojen alkaessa kasvaa tai palvelun muuttuessa kokonaan käyttökelvottomaksi. Monimutkaisimmat asiakasohjelmistot lähestyvät toiminnallisuudeltaan työpöydällä käytettäviä paikkatieto-ohjelmistoja. Palveluita on niin kuluttajille kuin asiantuntijoillekin. Monet kuluttajille suunnatut metsien paikkatietopalvelut liittyvät metsäsuunnittelmatietojen näyttämiseen, ja hakkuiden suunnitteluun. Selain-käyttöliittymän kautta yksinkertaistetun GIS-liittymän kautta hoidetaan tietojen selaus, kannan päivitys, ja yksinkertaiset karttaoperaatiot. Järjestelmä mahdollistaa hajautetun tietokannan ylläpidon ja käytön ilman suurempaa asiantuntemusta.

Sovelluksia on tehty mm. yhteismetsien ja yhtiöiden sopimustilojen tietojen jakeluun. Tyypillinen toiminnallisuus sisältää verkkosuunnitelman, joka soveltuu mm. kuvio- ja yhteenvetotietojen selailuun, muistiinpanojen tekoon ja on edullinen ottaa käyttöön. Joissakin versioissa metsänomistaja, tai hänen valtuuttama metsäammattilainen voi tallentaa esimerkiksi hakkuiden tai hoitotöiden jälkeisen tilanteen metsikkökuviolle ja pitää näin suunnitelman tietoja ajan tasalla. Metsäammattihenkilö voi puolestaan tehdä verkon kautta metsänomistajalle esityksiä vaikkapa taimikonhoitotöistä tai ensiharvennuskohteista tai ajankohtaan sopivasta leimikosta. Järjestelmät mahdollistavat vuorovaikutteisen metsäsuunnitteluprosessin ja kommunikoinnin: metsänomistajan ja metsäammattilaisen fyysinen etäisyys ei ole kommunikoinnin esteenä tehtäessä toimenpide-

ehdotuksia ja –työtilauksia metsänomistajalle. Organisaatio voi laajentaa operatiivista paikkatietojärjestelmäänsä internetiin (maastotietojen tallennus ja kuviorajojen tms. kohteiden digitointi) sekä kommunikoida alan muiden toimijoiden kanssa (mm. metsänhoitoyhdistys, metsäteollisuus).

Monien karttapalveluiden päälle on mahdollista rakentaa muita paikkatietopalveluita. Tyyppillisesti karttapalveluilla on julkinen sovellusohjelmointirajapinta eli API, joka mahdollistaa omien sovelluksien tuottamisen. API on joukko sääntöjä ja ohjelmakutsuja, jotka määrittävät, mitä ominaisuuksia ohjelmisto tarjoaa muiden ohjelmistojen käytettäviksi. Näiden julkisten ohjelmakutsujen kautta on mahdollista kutsua palvelun eri ominaisuuksia ja siten rakentaa oma palvelu olemassa olevan aineiston päälle.

Internet-GIS:n suurin hyöty asiantuntija-käyttäjälle lienee kuitenkin mahdollisuus omien palveluiden tuottamiseen ja muiden asiantuntijoiden palveluiden hyödyntämiseen. Tällöin kaikkea analyysia ei tarvitse tehdä itse, vaan voi käyttää hyödyksi muiden jo tekemää työtä. Tätä kutsutaan hajautetuksi GIS-arkkitehtuuriksi. Hajautetussa GIS:ssä käyttäjä näkee yhden GIS-palvelun, jota hän voi käyttää joko jonkin asiakasohjelmiston – kuten esimerkiksi verkkoselaimen – avulla tai osana työpöytäohjelmistoa. Asiakkaalle siis näkyy yksi kokonaisuus. Todellisuudessa palvelu on kuitenkin toteutettu siten, että sen osat sijaitsevat fyysisesti useassa eri paikassa. Esimerkiksi koostettaessa työmaakarttaa metsäkartta voidaan hakea oman yrityksen palvelimelta, peruskartat maanmittauslaitokselta, suojelualueet ympäristökeskukselta ja tiekartat Digiroad-palvelimelta. Kun palvelua käytetään, ohjelmisto ottaa yhteyttä useaan eri palvelimeen, joista jokainen toteuttaa yhden palvelun osan. Hajautusta voi myös olla useammalla tasolla niin, että jokin asiakasohjelmiston käyttämä palvelin toimii puolestaan asiakkaana muille palvelimille, jotka toteuttavat osan kyseisen palvelimen toiminnallisuudesta. Käyttäjän kannalta ero työpöytä- ja internet-sovellusten välillä on kaiken aikaa kapenemassa, koska verkossa olevat palvelut monipuolistuvat jatkuvasti. Kuvassa 13.1 on esitetty erilaisia GIS-arkkitehtuureja.



Kuva 13.1. Työpöytä-GIS, Internet-GIS ja hajautettu GIS -arkkitehtuurien ero. Työpöytäohjelmiston tapauksessa kaikki laskenta ja aineisto on samalla koneella, internet-palvelussa taas aineistoa käsitellään internetin välityksellä. Paikkatietopalvelun toteutus voi olla myös jaettu usean eri palvelimen kesken, joihin käyttäjän asiakasohjelmisto ottaa yhteyden.

### 13.2 OpenGIS ja yhteiskäytön standardit

Rajapintojen kautta toteutettava tiedonvälitys mahdollistaa reaaliaikaisen tiedon lukemisen muihin sovelluksiin suoraan lähdejärjestelmästä. Kansainvälisellä tasolla standardoinnista vastaa Open Geospatial Consortium (OGC), jonka muodostaa yli kolmesataa paikkatietoalalla toimivaa yritystä ja julkishallinnon yksikköä. Kaupalliselta puolelta OGC:iin kuuluvat lähes kaikki isot ja merkittävät teknologiatoimijat. OGC laatii maailmanlaajuisia standardeja ja suosituksia paikkatietoalan toimijoille. Jotkin OGC:n rajapinnat, kuten WMS (Web Map Service), ovat saaneet myös ISO-standardin aseman. OGC on rekisteröinyt tuotemerkikseen OpenGIS® -nimikkeen. OpenGIS® -merkintää käyttävät tuotteet toteuttavat tai käyttävät hyväksi OGC:n määrittelemiä standardeja.

Georeferoidun tiedon siirtoprotokollia ovat mm. ”Web Map Service” rasteridatalle ja ”Web Feature Service” vektoridatalle. Siirtoprotokolla määrittää, miten geodataa voidaan pyytää palvelimelta ja missä muodossa aineistoa siir-

retään asiakasohjelmistolle. Esimerkiksi Web Feature Service käyttää Geography Markup Languagea, joka on georeferoidun vektoridatan kuvaamiseen tarkoitettu XML-kieli

Geography Markup Language (GML) on XML-pohjainen formaatti paikkatietojen ilmaisemiseen kohteille, jotka voivat olla luonnollisia tai keinotekoisia. Luonnollisia kohteita ovat esimerkiksi maaston muodot sekä vesistöt, keinotekoisia taas ihmisen tekemät, kuten tiet ja sillat. GML-määrittely on tehnyt OGC, joka on kansainvälinen yhteistyöelin. Siihen kuuluu yrityksiä, julkishallinnon organisaatioita ja yliopistoja. GML:ää käytetään sekä paikkatiedon mallinnukseen että avoimena formaattina eri järjestelmien välisissä paikkatietoon liittyvissä transaktioissa. GML-dokumentti kuvaa paikkatietoa, joka voi sisältää pisteitä, viivoja, ja polygoneja. Yhteisöt voivat suunnitella myös omia GML-pohjaisia formaatteja, joita käytetään paikkatiedon mallinnukseen ja siirtoon jollain tietyllä sovellusalueella. Esimerkiksi kaavoitusta varten on tehty GML-sovelluksia, joiden avulla kuvataan kaavoitukseen liittyviä kohteita.

Web Feature Service (WFS) on rajapintastandardi, jonka OGC on kehittänyt. Se on teknologia vektoripohjaisen paikkatiedon siirtoon Internetissä. WFS tarjoaa mahdollisuuden kysellä paikkatietoa kohteiden ja niiden ominaisuuksien tasolla. WFS-rajapintapalvelu mahdollistaa asiakkaiden pyytävän vain haluamansa tiedon sen sijasta, että paikkatietoa siirrettäisiin kokonaisina tiedostoina. GML toimii oletusformaattina siirrettäessä tietoa WFS-palvelimen ja asiakkaan välillä. WFS mahdollistaa tiedon kyselyn ja haun sekä paikkatietoon että muuhun metatietoon liittyvillä hakuehdoilla. WFS-palvelimeen kohdistuvissa kyselyissä käytetään HTTP-protokollaa. Web Feature Service 2.0 -standardin transaktionaaliset toiminnot (WFS-T) mahdollistavat kohteiden luonnin, muokkaamisen, korvaamisen, ja poiston WFS-rajapinnan kautta. GML-kieltä käytetään tiedon kuvaamiseen siirrossa WFS-palvelimen ja WFS-asiakkaan välillä. HTTP-protokolla mahdollistaa WFS-pyyntöjen välityksen yritysten verkoissa ja Internetissä.

Monet tahot markkinoivat ja jakelevat nykyään aineistoa internetin kautta OGC:n määrittelemien standardien avulla. Esimerkiksi Maanmittauslaitoksen (MML) kartoja on mahdollista käyttää verkon kautta (31.5.2012 lähtien ilmaiseksi). Verkon kautta käytettävien selainpalveluiden lisäksi MML:llä on rajapintapalvelu, jonka avulla asiakasohjelmistot voivat ottaa suoraan yhteyden heidän tietokantoihinsa. Rajapintapalveluissa käyttäjä ei osta itse tietokantaa, vaan oikeuden käyttää sitä. Tietokanta on ja pysyy myyjän omilla koneilla, ja käyttäjä pääsee siihen käsiksi verkon välityksellä. Tällöin tiedon siirto tarjoajan palvelimen ja käyttäjän asiakasohjelmistojen välillä järjestetään OGC:n tiedonsiirtoprotokollan avulla.

### 13.3 Yhteisöllinen GIS-tiedon keruu

Yhteisöllinen tiedon keruu on yksi hajautetun GIS-järjestelmän kehityksen tuoma toimintakonsepti. Konseptia on sovellettu sovelluksissa, joissa tiedon keruun ja ylläpidon kustannuksen ovat suuret. Tällöin yleisön osallistuvalla toiminnalla voidaan korvata ammattimaista tiedonkeruuta.

Esimerkiksi luonnontieteellinen museo kerää luontotietohavaintoja Hatikka-järjestelmän avulla. Järjestelmään on määritetty tiedon minimiformaatti ja alan harrastajat voivat osallistua kansallisen biodiversiteettitietokannan ylläpitoon.

OpenStreetMap on tiekartan yhteisöpalvelu. Pienten teiden päivitys on osoittautunut hyvin työlääksi. Yhteisöpalvelussa palveluntarjoaja ei ole yksin vastuussa palvelun aineiston tuottamisesta ja ylläpitämisestä, vaan palvelun käyttäjillä on oikeus lisätä ja muokata aineistoa. Täten OpenStreetMap ei ole minkään yksittäisen tahon tuottama aineisto, vaan tekijöitä ja tiedon kerääjiä on lukuisia. Näin voidaan taata OSM:n saatavuus ja varmistua, ettei kukaan yksittäinen datan tuottaja aseta omia vaatimuksiaan datan käyttöön.



## OSA 2

# Luonnonvarojen hallintaan liittyviä paikkatietosovelluksia Suomessa

## 14 Metsätalouteen, maatalouteen ja vesistöihin liittyviä paikkatietosovelluksia

### 14.1 Paikkatiedot Metsähallituksen metsätalouden liiketoiminnassa

RISTO LAAMANEN

#### 14.1.1 Metsähallituksen metsätalous

Metsähallitus on valtion liikelaitos, joka hoitaa valtion maa- ja vesiomaisuutta. Sillä on hallinnassaan noin 9,1 miljoonaa hehtaaria maata ja noin 3,4 miljoonaa hehtaaria vesialueita. Metsätalouden käytössä on noin 5 miljoonaa hehtaaria maata, josta noin 3,5 miljoonaa hehtaaria on metsämaata. Noin 4,2 miljoonaa hehtaaria on luonnonsuojelualueita, erämaa-alueita ja muita erityisalueita, joiden hoidosta vastaa luontopalvelut -tulosalue.

Metsähallituksen metsätalouden hallinnassa olevat metsät ovat monikäyttömetsiä. Niiden käytössä ja hoidossa turvataan metsien ekosysteempipalvelut, kuten puuntuotanto, virkistyskäyttö, porotalouden ja saamelaiskulttuurin edellytykset sekä metsien monimuotoisuus. Kaikille yhtenäisille Metsähallituksen maille on laadittu alue-ekologiset suunnitelmat, joissa on määritelty hakkuiden ulkopuolelle rajattavat arvokkaat luontokohteet ja uhanalaisten lajien esiintymät sekä rajoitetussa metsätalouskäytössä olevat alueet kuten virkistys- ja riistakohteet. Metsätalouden metsämaasta on tämän vuoksi kokonaan talouskäytön ulkopuolella noin

238 000 hehtaaria ja rajoitetun käytön piirissä noin 382 000 hehtaaria.

Metsätalouden metsien kasvu on noin 11 miljoonaa m<sup>3</sup> vuodessa. Metsätalous korjaa ja myy vuosittain puuta noin 6 miljoonaa m<sup>3</sup> ja toimittaa sen asiakkaiden tuotantolaitoksille. Lisäksi Metsähallitus toimitti v. 2013 energiapuuta noin 600 GWh. Metsätalouden liiketoiminnan liikevaihto v. 2013 oli 333 miljoonaa euroa, mikä on noin 88 % koko Metsähallituksen liiketoiminnan liikevaihdosta. Metsähallituksen liiketoiminnan tulos v. 2013 oli 118 miljoonaa euroa. Metsähallituksen tulos tuloutetaan käytännössä kokonaan omistajalle eli valtiolle.

Metsätalouden palveluksessa on noin 800 henkilöä. Lisäksi metsätalouden käyttämät urakoitsijat työllistävät yli tuhat henkilöä vuosittain.

#### 14.1.2 Paikkatiedot liiketoiminnan perustietoa

Tieto puustosta, kasvupaikasta, maaperästä, topografiasta ja tiestöstä luovat välttämättömän perustan metsätalouden liiketoiminnan harjoittamiselle. Jokainen hakattava kuutio on ensin suunniteltava, ts. on laadittava toimenpidesuunnitelma. Suunnitelmien tekemistä varten on tiedettävä, missä hakkuukypsää puustoa on, millaista se on, milloin se on hakattavissa ja miten se saadaan tien varteen. Metsähallituksella on käytössään oma paik-

katietojärjestelmä (SutiGis), jonne keskeiset puustoa, maapohjaa sekä luontokohteita kuvaavat tiedot on kerätty. Järjestelmään on tallennettu koko Metsähallituksen kuviotietoineisto sekä luontokohdetiedot. Myös laserkeilauksella tuotetut hila- ja mikrokuviotiedot on tallennettu SutiGissiin. Järjestelmässä ovat myös luontopalveluiden hallinnassa olevien alueiden kuviotiedot. Järjestelmän tietosisältöä onkin vuosien saatossa huomattavasti laajennettu nimenomaan luontopalveluiden tarpeita varten. Järjestelmään voidaan avata useita eri karttatasoja: mm. kiinteistörajat, peruskartta, ilmakuvat, NATURA-alueiden rajaukset sekä mitä tahansa muuta karttatietoa, joka on järjestelmän käyttämässä koordinaatistossa ja formaatissa. Metsähallituksella on myös muita GIS-sovelluksia erityistehtäviin: esim. rakennusten ja reittien tietoja ylläpidetään omalla sovelluksella, tietietoja omalla sovelluksella ja kiinteistö- ja maankäyttötietoja omalla sovelluksella. Eri sovelluksilla ylläpidettäviä tietoja voidaan katsella toisilla sovelluksilla.

#### *14.1.3 Toimenpidesuunnittelu*

Metsätalouden toiminnan kannalta kuviotietojärjestelmä eli SutiGis on kaikkein tärkein järjestelmä – sen avulla tehdään operatiivista eli hakkuiden ja metsänhoitotöiden suunnittelua. Toimenpidesuunnittelun pohjaksi suunnittelija tekee toimistotyönä hahmotelmia siitä, missä hakkuumahdollisuuksia on. Tämän työn hän tekee joko tarkastelemalla SutiGissin teemakarttoja (esim. kehitysluokat tai MELA-toimenpide-esitykset), ilmakuvia tai vaikkapa paikallistuntemuksensa perusteella. Kun suunnittelun kohdealue on valittu, suunnittelija avaa SutiGis-järjestelmässä tarpeelliset tasot (mm. maankäyttötiedot, luontokohdetiedot ja muut käytön rajoituksia osoittavat tiedot) nähdäkseen mitkä kuviot ovat normaalin metsätalouskäytön parissa tai onko hakkuissa noudatettava erityisohjeita. Aineistojen pohjalta hän suunnittelee maastokäynnin reitin ja lataa kohdealueen kuviotiedot maastossa käytettävään PDA-laitteeseen, jossa käytetään MaastoGis-sovellusta. Maastossa suunnittelija tarkastaa kuviotietojen

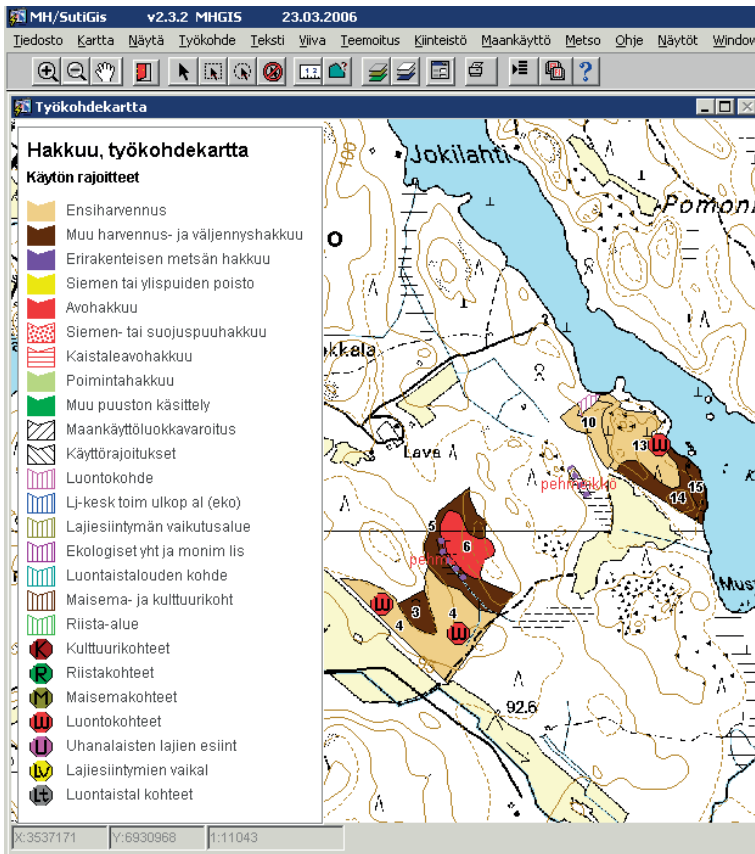
ajantasaisuuden ja tarvittaessa arvioi puuston uudestaan. Hakattaville kuvioille suunnittelija merkitsee hakkuutavan, poistuman määrän ja rakenteen ja suunnittelee ajouraverkoston ja varastopaikat. Suunnittelija tarkistaa myös mahdolliset suunnittelukohteen luontokohteet ja voi tarvittaessa tähän pyytää apua luontopalvelujen asiantuntijoilta. Valtion kiinteistöjen ja suojelualueiden rajat sekä luontokohteiden rajaukset merkitään nauhoituksella maastoon. Suunnittelija kirjaa kuviotietojen muutokset sekä muita merkintöjä maastolaitteella, josta hän maastotyön päätyttyä palauttaa kohdealueen päivitettyt tiedot SutiGis-järjestelmään.

Maastotyön jälkeen suunnittelija tekee hakkuun työkohteen valmiiksi toimistolla SutiGis-järjestelmällä. Keskeisin työvaihe on hakkuun lohkotus. Lohkotuksessa tehdään maastossa hakattaviksi suunnitelluista kuvioista hakkuukokonaisuuksia, joissa hakkuutapa (kasvatushakkuu tai uudistushakkuu) sekä korjuuajankohta (kesä tai talvi) ovat samat. Lohkoon kuuluvien kuviotietojen ja hakkuulle asetettujen tavoitepuustotietojen perusteella lasketaan lohkon kertymä. Kun lohkot ja työkohteet on suunniteltu valmiiksi (kuva 14.1), lohkotiedot tallennetaan tietokantaan, josta niiden tietoja käytetään ensiksi myynnin ja kuljetusten suunnitteluun ja optimointiin ja sen jälkeen korjuuohjelman tekoon. Lopulta lohkon tiedot siirretään sähköisesti korjuu-urakoitsijan hakkuukoneelle korjuun toteutusta varten.

Hakkuiden suunnittelun yhteydessä suunnitellaan myös metsänhoitotyöt. Kunnostusojituksen ja tienrakennuksen yksityiskohtaista suunnittelua varten on oma paikkatietojärjestelmä. Osalle metsänhoitokoneista suunnitelmätiedot välitetään sähköisesti. Miestyönä tehtävien töiden suunnitelmätiedot välitetään toteuttajalle matkapuhelimella.

#### *14.1.4 Toimenpidesuunnittelu laserkeilausaineistolla*

Metsähallitus on toteuttanut laserinventointeja laajassa mittakaavassa vuodesta 2011 lähtien. Keilattua pinta-alaa on noin 4,1 miljoonaa hehtaaria. SutiGis-järjestelmään on tehty yk-

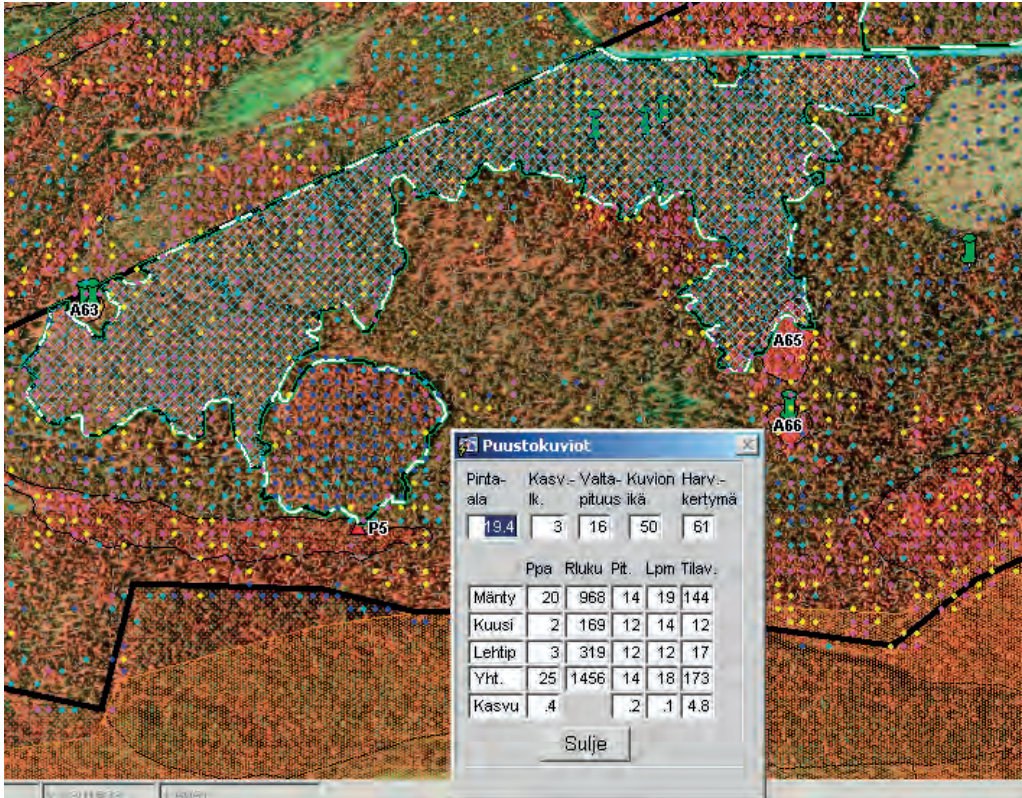


Kuva 14.1. Valmiiksi suunnitellun hakkuu-työkohteen kartta SutiGississä.

sinkertaisia toiminnallisuksia laseraineistojen käyttöä varten. SutiGissiin voidaan viedä sekä hila- että puustokuviotietoja, ja siinä voidaan tarkastella erilaisia laserpistepilvestä tuotettuja rasteriaineistoja (latvusmalli, maastomalli). Aineiston maastokäyttöä varten on kehitetty pelkistetty PC-pohjainen maastosovellus Hakkis, jolla voidaan tarkastella maastossa kaikkia suunnittelun kannalta oleellisia suunnittelualan paikkatietoja. Mainittu SutiGIS –laajennus ja Hakkis-maastosovellus ovat väliaikaisia ratkaisuja, sillä Metsähallitus on parhaillaan uusimassa koko paikkatietojärjestelmien kokonaisuutta.

Kun suunnittelijalla on alueeltaan käytössä laserpuustotietoja, hän voi hyödyntää niitä ensin tarkastelemalla laserpuustotietojen pohjalta tehtyjä hakkuumahdollisuusteemoja (Kuva 14.2.) tai latvusmallia löytääkseen sopivan suunnittelukohteen. Sen jälkeen suunnittelija

rajaa alustavia toimenpidekuvioita toimistolla SutiGissillä käyttämällä joko laserhilatietoja tai puustokuviotietoja. Rajaamista varten avataan myös kaikki tarvittavat käytön rajoituksia osoittavat tasot. Ennakkosuunnittelussa hän suunnittelee myös maastotarkastuksen reitin ja voi tehdä sitä varten merkintöjä SutiGissiin. Maastoreitin suunnittelussa on usein hyötyä myös maaston vinovalovarjostuskuvasta esim. ajourien suunnittelua varten tai kunnostusojituksen suunnittelua varten. Kun ennakkosuunnittelu SutiGissillä on valmis, aineisto siirretään maasto-PC:hen Hakkis-sovelluksen käyttöön. Maastossa suunnittelija tarkastaa ennalta tarkistettavaksi suunnittelemansa toimenpidekuviot ja muuttaa hakkuun rajauksia tarvittaessa. Suunnittelija ei mittaa puustotietoja, mutta saattaa virheitä havaitessaan korjata toimenpidekuvioille laskettuja tunnuksia, esim. pulajij-



Kuva 14.2. Laserhilalla esitetty hakkuumahdollisuusteema SutiGississä. Väreillä erotetaan varmat (kriteerit täyttävät) ja epävarmat (lähellä kriteerejä olevat) hakkuumahdollisuudet. Valitun puustokuvion puustotiedot näytetään pienemmässä ikkunassa. Ikkunassa näkyvä puustokuvio täyttää harvennuskriteerit ja sille on laskettu harvennuskertymä.

suhteita ja keskiläpimittaa. Luontokohteiden ja muiden erityiskohteiden rajaukset tarkistetaan.

Maastotyön jälkeen Hakkiksella tehdyt korjaukset toimenpidesuunnitelmaan palautetaan SutiGissiin ja suunnitelma viimeistellään valmiiksi työkohteeksi käyttäen SutiGissin perustoiminnallisuuksia.

#### 14.1.5 Luonnonvarasuunnittelu

Metsähallituksen toiminnan pitkän tähtäimen suunnittelu eli luonnonvarasuunnittelu pohjautuu myös SutiGis-järjestelmän paikkatietoihin. Suunnittelualueina on 7 eri maantieteellistä aluetta. Kussakin alueessa on siis satoja tuhansia hehtaareja metsämaata. Luonnonvarasuunnittelu on kokonaisvaltaista suunnittelua,

jossa tarkastellaan valtion maiden ja vesien kokonaisuutta eli mukana tarkastelussa ovat myös suojelualueet ja muut luontopalveluiden hallinnassa olevat alueet sekä myös muut liiketoiminnan sektorit metsätalouden lisäksi. Suunnittelussa noudatetaan osallistavan suunnittelun periaatteita. Sidosryhmät kutsutaan mukaan suunnittelutyöhön ja myös kansalaisille annetaan mahdollisuus mielipiteiden ilmaisuun.

SutiGissin tietojen pohjalta laaditaan suunnittelualueetta koskevat luonnonvarojen tilaa laajasti kuvaavat tilastot. Näistä osaa käytetään suunnitelman toteutuksen seurantavaiheessa, kun arvioidaan suunnitelman tavoitteiden toteutumista. Metsätalouden kannalta merkittävin osatehtävä luonnonvarasuunnittelussa on hakkuutoiminnan mitoitus suunnittelukaudelle

(10 vuotta). Tämä tehdään MELA-hakkuulaskelmalla käyttäen SutiGis-järjestelmästä irrotettuja kuviotietoja. Suunnittelussa laaditaan useita vaihtoehtoisia laskelmia, joiden pohjalta suunnitelman pohjaksi valitaan tavoitteet täyttävä mitoitusohjelma. Suunnittelussa eräänä tuloksena syntyy siis hakkuusuunnite.

#### 14.1.6 Metsävaratiedon ylläpito

Perinteisiä kuviotietoja päivitetään toimenpidesuunnittelun yhteydessä. Hakattavaksi suunniteltujen kuvioiden tiedot päivitetään tarvittaessa toimenpidesuunnittelua varten. Suunnittelun yhteydessä päivitetään myös hakattaviin kuvioihin rajautuvien lepokuvioiden tietoja. On myös mahdollista, että samalla päivitetään hakkuun työkohdetta huomattavasti laajemman alueen kuviotiedot. Metsähallituksella on tavoitteena, että kuviotiedot päivitetään viimeistään 10–15 vuoden kuluttua edellisestä päivityksestä. Kun hakkuu tai metsänhoito-toimenpide kuviolla on toteutettu, toimenpidetiedot historioidaan ja hakkuun jälkeiset puustotiedot (ns. tavoitepuustotiedot) siirretään uusiksi kuviotiedoiksi. Mikäli hakkuun toteutus poikkeaa suunnittelusta, päivitetään kuviotiedot vastaamaan todellista tilannetta. Puustotiedot tulee ohjeiden mukaan päivittää välittömästi toimenpiteen jälkeen, kuitenkin viimeistään ennen seuraavaa helmikuuta.

Suunnittelija ei korjaa laserinventoituja puustotietoja alkuperäisille inventointiyksiköille (hila tai puustokuviot), vaikka niissä todettaisiin olevan virhettä. Muutokset tehdään suoraan toimenpidekuviolle, joille myös määritellään hakkuun jälkeiset tavoitepuustotiedot. Kun hakkuu on toteutettu, päivitetään myös alkuperäiset laserpuustotiedot vastaamaan hakkuun jälkeistä tilaa.

Metsikkökuvioiden puustotietoja kasvatetaan kerran vuodessa ns. MELA-malleilla. Kasvatus tapahtuu talvella, kun kuviotietokanta on ajan tasalla toimenpidepäivitysten osalta. Myös laserpuustotietoja ylläpidetään kasvunlaskennalla. Kasvatus tapahtuu väliaikaisessa ympäristössä SIMO-järjestelmän simulaattorilla.

#### 14.1.7 SutiGis-järjestelmästä

SutiGis on otettu käyttöön vuonna 2001 eli se on jo järjestelmänä melko vanha. Se on kuitenkin edelleen vakaa ja hyvin päätehtävänsä eli metsätalouden toimenpidesuunnittelua palveleva järjestelmä, johon myös sen käyttäjät ovat tyytyväisiä. Järjestelmällä on noin 900 käyttäjää, joista yhtäaikaista käyttäjiä voi olla toista sataa. Järjestelmää käyttävät siis sekä metsätalouden että luontopalvelujen henkilöt sekä osa Metsäntutkimuslaitoksen tutkimushenkilöstöstä. SutiGis on ensimmäinen järjestelmä, jossa on ollut koko Metsähallituksen

The screenshot shows the SutiGis software interface. At the top, it displays 'Kuvio' and 'Tietueita: 1, joiden yhteispinta-ala 6.3 ha'. Below this is a 'PERUSTIEDOT' section with fields for 'Yks. Tp Os Kuv.tun. Haltija Arvioija Arv.aika Arv. tapa Päiv.aika Pinta-ala Paaryhmä'. The 'Metsäntalouden tiedot' section includes 'Mkl Kohdenro Joht.tapa Käyttöraj Kas. lk Leveys Lamp. Korok. mpy' and 'Mkl tark' with sub-fields for 'Kunta Kyliä Talo Tila Joht.tapa'. The 'PUUSTO' section has a table with columns: 'O J P I S PPA RI Pit. Lpm ika Ai II Va Lpeit Tukki Kuutu Vht. Kasvu'. The 'TOIMENPIDE-EHDOTUS' section has columns: 'Tp Vuosi Tot-ala'. A 'YHTEENSÄ:' row is present at the bottom of the table. On the right, there is a vertical list of checkboxes for actions: 'Summahaku', 'Nimeä joukko', 'Luonto', 'Metsänhoito', 'Kertymä', 'Kgeala', 'Biotooppi', 'Pensaasto ja tuhot', 'Vesikohde', 'Kajasto', and 'Tutkimuksen tark.'.

Kuva 14.3. SutiGis-peruskuvioikkuna, josta voi siirtyä muihin kuvion ominaisuustietoihin.

metsävaroja koskeva tieto yhtenäisellä tavalla kuvattuna. Nykyiseen järjestelmään voidaan tallentaa perinteisten metsikkötietojen lisäksi mm. alue-ekologiakohteiden tietoja, tutkimuskohdetietoja, biotooppitietoja, tuhotietoja, vesikohde- ja jopa kalastotietoja (Kuva 14.3). Tietokannassa on noin 1,8 miljoonan metsikkökuvion tiedot. Viimeisimpänä lisäyksenä ovat tulleet laserkeilausaineistot.

SutiGissin karttaosio on toteutettu MapInfo-tuoteperheeseen kuuluvalla MapX-ohjelmalla. Ominaisuustietolomakkeet on toteutettu Oracle Forms -sovelluskehittimellä. SutiGissiiä käytetään Metsähallituksen keskitetyssä Citrix-palvelinympäristössä. Palvelimia on useita, jotta sovellus toimisi riittävän nopeasti yhtäaikaistilalle käyttäjille. Kaikki tiedot on koottu yhteen Oracle Spatial -tietokantaan, joka sijaitsee erillisellä tietokantapalvelimella. Ilmakuvat ja taustakartat on koottu karttapalvelimelle, josta sovellus noutaa kulloinkin tarkastelussa olevan alueen kartan tai ilmakuvan. Käyttäjä voi avata taustakuvaksi muillakin palvelimilla tai omalla koneella sijaitsevia aineistoja. Palvelinympäristön ylläpito on ulkoistettu, eivätkä palvelimet sijaitse Metsähallituksen toimitiloissa.

#### *14.1.8 Lähiajan tavoitteita uuden paikkatieto-järjestelmän kehittämiselle*

Metsähallitus on käynnistänyt paikkatietojärjestelmien kokonaisuuden uusimisen. Hanke koskee sekä Metsähallituksen yhteisiä että metsätalouden ja luontopalvelujen järjestelmiä. Metsätalouden osalta järjestelmäuudistus lähti liikkeelle vuonna 2009 suunnitteluprosessien kuvaamisella ja analysoinnilla. Prosessien kuvaamisesta edettiin itse tietojärjestelmän käyttötapausten ja tietomallin määrittelyyn ja lopulta järjestelmän toteuttamisvaiheeseen, joka on parhaillaan käynnissä. Järjestelmä on tarkoitus ottaa käyttöön vuoden 2015 alkupuolella. Metsätalouden uudessa järjestelmässä ylläpidetään vain tietoja, jotka ovat metsien käytön suunnittelun ja hoidon kannalta tarpeellisia. Tietomalli muuttuu olennaisesti siten, että perinteinen metsikkökuvio käsitteenä häviää. Laserpohjaiset puustokuviot ja laserhila

hallitaan omilla geometrisilla tasoilla. Kasvu-paikkakuviointi on omalla tasollaan ja luontotiedot omalla tasollaan. Toimenpidekuviot ovat suunniteltuja hakkuu- tai metsänhoitotoimenpiteitä kuvaavia kohteita, joille johdetaan toimenpiteen toteutuksen kannalta tärkeät tiedot muilta tietotasoilta. Järjestelmä tukee entistä paremmin kokonaisten toimenpideketjujen suunnittelua siten, että yhdellä maastokäynnillä voidaan suunnitella esim. kaikki uudistamisen eri työvaiheet. Luontopalvelut toteuttaa oman paikkatietojärjestelmänsä omien käyttötarpeidensa pohjalta, mikä johtaa siihen, että metsätalouden ja luontopalvelujen sovellukset ja tietorakenteet eriytyvät, vaikka itse ohjelmistoalusta säilyykin samana.

Uuden paikkatietojärjestelmän eri sovellukset pohjautuvat ESRin ArcDesktop -tuotteeseen. Paikkatietojärjestelmäkokonaisuuden rakentamisessa sovelletaan ns. palveluarkkitehtuuria, mikä tarkoittaa sitä, että kaikkien järjestelmien tarvitsemat yhteiset toiminnallisuudet tuotetaan järjestelmäympäristössä palveluna eri sovelluksille. Tietokantana säilyy edelleen Oracle.

Metsätaloudessa uuden paikkatietojärjestelmän toteuttaminen tuo edelleen muutoksia suunnittelijan työhön. Järjestelmän tavoitteena on erityisesti tukea laseraineistojen monipuolista hyödyntämistä. Uuteen järjestelmään rakennetaan sijoitussuunnittelun eli ns. taktisen tason suunnitteluosio, jonka avulla suunnittelija voi hahmotella 3–5 vuoden aikajänteellä hakkuiden, metsänhoitotöiden ja tienkunnostus- tai tienrakennustöiden sijoittelua omalla suunnittelualueellaan. Toimenpidesuunnittelussa uusi järjestelmä ja uudet aineistot mahdollistavat aiempaa pidemmälle viedyn toimenpiteiden suunnittelun jo toimistolla ennen maastoon menoa. Maastossa työ kohdennetaan ennakkosuunnittelussa epävarmoiksi jääneisiin kohtiin. Suunnittelija käyttää maastossa paikkatietosovelluksesta tehtyä maastoversiota. Käytännössä suunnittelijalla kuitenkin on pitkälti sama sovellus käytössä niin maastossa kuin toimistolla sekä lisäksi samat aineistot kuin toimistossa. Suunnittelijalla on käytössään maastokelpoinen PC, jota hän käyttää sekä toimistolla että maastossa.

## 14.2 Metsävaratietojen keruu ja ajantasaistus yksityismetsistä

JUHO HEIKKILÄ

### 14.2.1 Yleistä

Suomen metsäkeskuksen (SMK) yhtenä keskeisenä tehtävänä on metsävaratietojen keruu ja ajantasaistus Suomen yksityismetsistä. Metsien inventointi perustuu kaukokartoitukseen (laserkeilaus ja ilmakeilaus), koealamittauksiin ja kohdennettuun maastoinventointiin. Ensimmäisenä vuonna hankitaan kaukokartoitusaineisto, mitataan maastokoealat sekä tehdään puustotulkinnan laadunvarmistukseen liittyviä maastomittauksia. Talvikaudella hankitaan puustotulkinta ja tehdään kuviointi, mihin kuuluu automaattikuvioinnin (mikrokuviointi) hankinta ja toimenpidekuviointin viimeistely. Toisena vuonna tehdään kohdennettu maastoinventointi, kuviotason laadunvarmistus sekä lopullisten kuviotietojen koostaminen ja laskennat.

Kaukokartoitukseen perustuva yksityismetsien inventointi aloitettiin valtakunnallisesti vuonna 2010. Tavoitteena on 1,5 milj. ha vuotuinen inventointiala, jolloin saman alueen kierto on maksimissaan 10 vuotta. Inventointialueista on laadittu pidemmän ajan suunnitelma, jota tarkennetaan tarvittaessa vuosittain. Metsävaratiedon ylläpitoon kuuluu inventoinnin lisäksi metsissä tehtävien toimenpiteiden jatkuva ajantasaistus ja puuston laskennallinen kasvatus. Metsävaratiedon saatavuutta voi tarkastella Metsäkartta.fi-palvelusta.

Inventointialueiden suunnittelun lähtökohtana ovat tavoitepinta-alat, valtionrahoitus sekä käytettävissä olevat resurssit. Lisäksi alueiden valintaan vaikuttaa olemassa olevan metsävaratiedon ikä sekä yhteistyö muiden toimijoiden kanssa. Näistä esimerkkeinä ovat Maanmittauslaitoksen (MML) kanssa tehtävä kaukokartoitusyhteistyö sekä Metsähallituksen, metsäyhtiöiden ja metsänhoitoyhdistysten aineisto- ja inventointitarpeet.

Kaukokartoitukseen perustuvassa tiedonkeruussa on kustannustehokkainta valita laajoja

aluekokonaisuuksia. Alueiden rajaamisessa käytetään karttalehtijakoa, mikä mahdollistaa joustavan kaukokartoitusaineistojen hankintayhteistyön. Kunkin inventointialueen tulee olla metsiltään riittävän samantyyppisiä, jotta puustotulkintaan riittää yksi koeala-aineisto. Tämä pyritään varmistamaan tarkastelemalla olemassa olevasta aineistosta alueen metsien rakennetta. Inventoitavan alueen kokosuositus on noin 100 000 - 200 000 ha (nettoala), josta kaukokartoitettava alue (bruttoala) on yleensä noin kaksinkertainen. Mikäli määritetään laajempia inventointialueita, tulee tarkastella myös tarvetta kattavamman tai useamman erillisen koeala-aineiston mittaamiselle.

### 14.2.2 Kaukokartoituksen hyödyntäminen

Kaukokartoitus, puustotulkinta ja mikrokuviointi ovat Metsäkeskukselle hankintalain mukaisesti kilpailutettavia palveluja. Julkiseen hankintaan liittyy hankintailmoitus (Hilma), tarjouspyyntö, tarjousten käsittely, hankintapäätökset ja -sopimukset sekä hankinnan jälki-ilmoitus. Metsäkeskus tekee laserkeilausten ja ilmakeilausten osalta hankintayhteistyötä MML:n kanssa. Metsien inventointiin soveltuu sekä kevät- että kesäkeilaus, mutta ilmakeilaus tehdään kesäaikaan lehtien ollessa puussa.

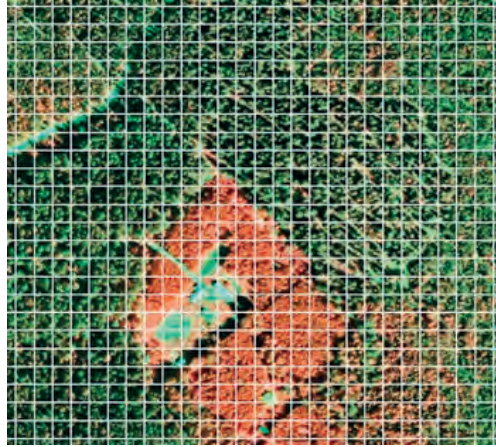
Vuosittaisten inventointien kaukokartoitusaineistojen ja koealamittausten osalta suositellaan, että kaikki aineistot ovat samalta vuodelta. Eri vuosien kaukokartoitus- ja koeala-aineistot aiheuttavat riskin puustotulkintaan, koska tulisi pystyä varmistamaan, että tilanne koealalla on sama kuin laser- ja ilmakeila-aineistossa (ei esim. harvennusta välissä). Eri ajankohdan aineistot aiheuttavat virheitä myös metsävaratietoon johtuen metsissä tehdyistä toimenpiteistä ja tapahtuneista muutoksista.

Jotta laajat alueet ehditään ilmakeilata kesällä riittävällä maastonerotuskyvyllä (30–50 cm) ja auringon korkeuskulmalla (vähintään 25 astetta), käytetään kuvauksessa 30 % sivupeittoa. Pituuspeittona käytetään 80 %, jolloin se kompensoi osittain pienempää sivupeittoa ja kuva-aineistoa saadaan enemmän nadiirista. Kameroiden teknisestä kehityksestä huolimatta

kuvauskorkeus pyritään pitämään maltillisena (6–7 km), jotta varmistetaan kuvien laatu. Mitä korkeammalta kuvataan, sitä enemmän on välissä ilman epäpuhtauksia. Puustotulkinnassa voidaan hyödyntää myös 1–2 vuotta vanhoja ilmakuvia, mutta tällöin tulkinta on puulajisuhteiden (erityisesti lehtipuu) osalta ilmakuvauksen ajankohdalta. Tärkeintä ilmakuvauksen osalta on inventointialueen sama kasvukauden vaihe, sopivat sääolosuhteet sekä yhtenevät kuvausparametrit koko alueella.

Laserkeilaus tulee tehdä myös koko inventointialueelta samaan kasvukauden aikaan. Mikäli hyödynnetään keväällä ennen lehden tuloa keilattua aineistoa, sitä ei voi käyttää yhdessä kesällä keilatun aineiston kanssa, koska laserpiirteet ovat merkittävästi erilaiset. Keilauksen osalta voidaan käyttää myös eri vuoden aineistoa kuin maastossa mitatut koealat (maksimi 2 kasvukautta). Koealan puita voidaan tarvittaessa kasvattaa malleilla taakse- tai eteenpäin niin, että ne ovat samalta ajankohdalta laseraineiston kanssa. Jotta saadaan kattavasti mahdollisimman tasalaatuinen puustotulkinta, on ensisijaisen tärkeää, että lentojen aikana keilausparametreja ei muuteta (esim. lentokorkeus 2–2,5 km, pistetiheys 0,5–1,0 p/m<sup>2</sup>, keilauksen avauskulma maksimi 40 astetta ja sivupeitto 20 %). Suositeltavaa on, että koko alue keilataan samalla keilainyksilöllä. Mikäli joudutaan käyttämään kahta eri keilainyksilöä, tarvitaan aineistojen kalibrointiin yksi päällekkäinen lentolinja. Lisäksi eri merkkisiä keilaimia ei suositella samalle inventointialueelle.

Kaukokartoituksen osalta toimittajat tekevät ilmakuvien orto-oikaisun, mosaikoinnin ja pilkkomisen karttalehtiin sekä prosessoivat laseraineiston. Lisäksi kaukokartoitustoimittaja tai puustotulkitsija prosessoi laseraineistosta maaston laserkorkeusmallin (DTM, digital terrain model) ja puuston laserpituusmallin (CHM, canopy height model). Toimittajilla tulee olla oman laatujärjestelmänsä mukainen tarkistusprosessi, josta toimitetaan laaturaportti. Metsäkeskuksessa ortokuville tehdään visuaaliseen tarkasteluun perustuva vastaanototarkastus. Laseraineistojen osalta MML tekee pisteaineiston (pistepilvi) laatukontrollin.



Kuva 14.4. Ilmakuva, jonka päällä on puustotulkintahila. Kuva Arbonaut Oy.

#### 14.2.3 Maastokoealat

Metsäkeskus sijoittelee ja mittaa puustotulkinnassa käytettävät maastokoealat. Soveltuvien osin täydentävinä koealoina voidaan käyttää myös Luonnonvarakeskuksen (LUKE) Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) koealoja. Koealojen ennakkosijoittelussa käytetään olemassa olevaa kuvioaineistoa. Ennen sijoittelua kuvioaineisto päivitetään mahdollisimman hyvin, ettei sijoiteta koealoja turhaan kohteille, jotka on esimerkiksi päätehakattu. Koealasijoittelun optimointiohjelman iteratiivinen laskentaprosessi perustuu ositettuun ryväsoittaan. Koealapisteet sijoitetaan alueelle niin, että otos vastaa mahdollisimman hyvin koko alueen metsien vaihtelua keskeisten tunnusien osalta (alaryhmä, pääpuulaji, pääpuulajin osuus, pohjapinta-ala ja läpimitta). Koealojen ei tarvitse edustaa alueen metsiä pinta-alan suhteessa, mutta niitä tulee mitata kaikenlaisista metsiköistä puustotulkinnan mallinnuksen tarpeisiin. Ryvästyksellä koealamittausta saadaan tehokkaammaksi (noin 1 työpäivän rypäitä, 6–9 koealaa).

Inventointialueelle sijoitetaan noin 500–600 koealaa kasvatus- ja uudistuskypsiin metsiin sekä noin 100–200 taimikoihin. Mukana tulee olla pieni määrä myös pienempiä taimikoita ja joitain aukkojakin, jotta koeala-aineisto on

kattava. Vaikka pienistä taimikoista ei saada luotettavaa puustotulkintaa, voi pienialaisia aukkoja olla myös varttuneemman puuston kuvioilla, jolloin niillekin löytyy vastaavia maastokoealoja. Mikäli inventointialue on normaalia laajempi tai puustoltaan erityisen vaihteleva, suositellaan mitattavaksi 100–200 kasvatus- ja uudistuskypsän metsän koealaa enemmän kattavuuden varmistamiseksi.

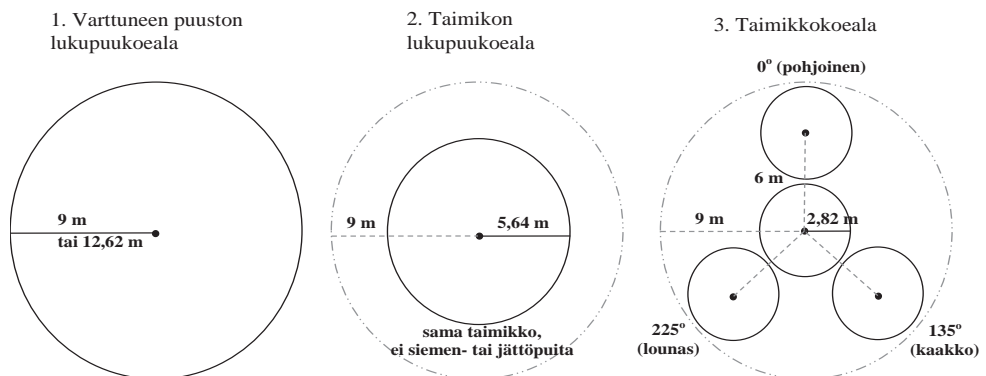
Koealamittausten kuluessa tarkastellaan vastaako mitattu aineisto ennakkosijoittelun mukaista otosta. Lisäksi mittausten loppuvaiheessa puustotulkitsija tekee koealojen kattavuustarkastelun, jossa kontrolloidaan jätkö jonkin tyyppisiä metsiköitä mittaamatta ja sijoitetaan tarvittaessa lisäkoealoja. Tulkitsijan tekemä kattavuustarkastelu perustuu kaukokartoitusaineistoon (lähinnä laserdata). Tarkastelu tulee tehdä viimeistään loppusyksystä, jotta lisäkoealoja voidaan mitata vielä ennen lumen tuloa.

Sijoitetut koealapisteet siirretään metsävaratietojärjestelmästä (Aarni) maastotietokoneelle, jossa on oma koealamittaus- ja paikannussovellus. Kunkin koealan keskipiste paikannetaan vähintään 1 metrin tarkkuudella (tavoite 0,5 m). Tähän tarvitaan tarkkuuslaitteita ja erillistä sijaintikorjauspalvelua. GNSS-laitteen avulla määritetään koealan keskipiste, johon laite jätetään vastaanottamaan tarkempaa paikannusdataa puustomittausten ajaksi. Maastotyön jälkeen koealat siirretään takaisin Aarniin,

jossa tehdään lopullisten koealakoordinaattien laskenta ja sijaintikorjaus. Jos koealapaikannuksen tarkkuusvaatimukset eivät täyty, koeala hylätään tai paikannetaan uudelleen.

Kiinteäsäteisen koealan säde on 9 m ja se vastaa pinta-alaltaan puustotulkintayksikköä (16 m hilaruutu). Harvoissa metsissä käytetään isompaa 12,62 m sädettä, jotta saadaan parempi kuvaus puustosta. Riukuvaiheen varttuneissa taimikoissa mitataan vastaavasti pienempi 5,64 m säteinen koeala, jonka tulee kuitenkin edustaa 9 metrin koealaa, eli ympärillä pitää olla samanlaista taimikkoa. Koealalta arvioidaan perustiedot (kasvupaikka ym.), toimenpidetarpeet, mitataan lukupuiden läpimitat vähintään 5 cm puista (varttuneen taimikon lukupuukoelalla minimiläpimitta 3 cm). Kuolleet pystypuut erotetaan elävistä puuluokka-tunnuksella. Lisäksi mitataan puulajiositteittain ppa-mediaanipuun pituus ja ikä (koepuu) sekä koealan yleisimmistä ositteista kustakin 2 pituuden lisäkoepuuta. Varsinainen taimikkokoeala koostuu 9 m säteelle sijoitettavista neljästä 2,82 m alikoealasta, joista lasketaan runkoluku. Lisäksi taimikkokoealalta valitaan ositteittaiset mediaanipuut ja mitataan keskitunnukset (läpimitta, pituus ja ikä).

Puulajit (mänty, kuusi, koivu ja muut lehtipuut) muodostavat omat ositteet ja koealamittaussovellus laskee ja ehdottaa mitattavat koepuut. Koealamittaus voidaan tehdä joko parityönä tai yksinmittauksena. Koealamittaus



Kuva 14.5. Maastomittauksissa käytettävät koealatyyppit. Kuva SMK.

on tarkkuusvaatimuksiltaan täysin erilaista työtä kuin perinteinen kuvioittainen arviointi. Koska koealojen perusteella estimoidaan puustotunnukset koko inventointialueelle, pienetkin virheet koealapaikannuksessa tai puuston mittauksessa voivat kertaantua aluetason puustotulkinnassa. Koealamittauksen laatua seurataan mittaustyön kuluessa tehtävillä tarkistusmittauksilla. Siinä eri mittaaja paikantaa ja mittaa muutamia koealoja toiseen kertaan ja tuloksia verrataan keskenään.

Koealalaskenta (mm. tilavuudet) tehdään LUKEn toteuttamassa laskentapalvelussa. Sen kautta voidaan hyödyntää VMI:n laskentarutiineja (mm. pituusmallien kalibrointi). Tulokset lasketaan kokonaispuustolle, männylle, kuuselle ja lehtipuustolle (kaikki lehtipuut). Laskentapalvelu mahdollistaa myös koealapuustojen kasvattamisen haluttuun ajankohtaan. Lisäksi laskennassa erotetaan mahdolliset kuolleet puut omaksi ositteeksi.

#### 14.2.4 Puustotulkinta ja kuviointi

Puustotulkinnan lähtöaineistoksi tulkitsijalle toimitetaan seuraavat tiedot:

—laserkeilauksen pistepilvi sekä DTM ja CHM (1–2 m rasterit),

—ilmakuvat (alkuperäisillä sävyillä olevat oikaisemattomat 4-kanavakuvat orientointitietoineen),

—ortokuvat (orto-oikaistut, sävysäädetyt ja karttalehtiin pilkotut 3-kanavakuvat),

—maastokoeala-aineisto (puu- ja koealatasen tiedot),

—tulkinta-alueen rajat, kiinteistörajat (yksityismaat ja yhteistyökumppanit) ja muut tulkintaan tai mikrokuviointiin liitettävät vektoraineistot (mm. tiet/linjat, vesistöt ja pellot),

—tarvittaessa olemassa oleva kuvioaineisto soveltavilla muuttujilla, joita voidaan mahdollisesti hyödyntää puustotulkinnan aputietona (esim. kasvupaikkatiedot tai vanhat puulajiosuudet).

Puustotulkinnassa kokonaispuustolle ja puulajiositteille (mänty, kuusi, lehtipuu) estimoidaan keskiläpimitta, keskipituus, pohjapinta-ala, runkoluku, tilavuus ja ikä. Lisäksi tai-

mikoista ja nuorista kasvatusmetsistä voidaan tulkita taimikonhoidon tai harvennustarpeen kiireellisyys ns. suoratulokintana, joka täydentää puustotunnusten perusteella simuloitua toimenpidetarvetta. Tulkinnan mallinnusvaiheessa maastossa tarkkaan paikannetuille ja mitatuille koealoille haetaan niiden sijaintia vastaavat laser- ja ilmakuviointitiedot. Koealamittauksen, laserin korkeusjakauma- ja intensiteettitietojen sekä ilmakuuvan sävyarvo- ja tekstuurimuuttujien perusteella laaditaan laskentamallit eri puustotunnuksille. Laser on aineistoista huomattavasti merkittävämpi, mutta ilmakuvia käytetään apuna mm. puulajitunnistuksessa. Laskentamallit ovat aina aineistokohtaisia ja ne laaditaan erikseen jokaiselle inventointialueelle.

Inventointiyksikkönä on 16 x 16 metrin hilaruutu (vektori). Puustotulkintahilaruutu tuotetaan kattavasti koko alueelle ja tulkinnasta ulos jäävät alueet ovat hilassa nollaa. Varsinainen puustotulkinta tehdään kehitysluokille varttuneet taimikot (T2), nuori- ja varttunut kasvatusmetsä (02 ja 03) sekä uudistuskypsä metsä (04). Aukot (A0) ja pienet taimikot (T1) ovat mukana mikrokuviointissa, mutta niille estimoidut puustotunnukset eivät ole käyttökelpoisia. Ennen varsinaista puustotulkintaa tulkitsija tekee laseraineistoon perustuvan erottelun, mikä on avointa, taimikkoa tai varttuneempaa metsää. Erottelun ohjeellisina raja-arvoina on käytetty seuraavia puuston pituuksia: T1 ja T2 2 metriä sekä T2 ja 02 7 metriä. Muun muassa kehitysluokkaerottelussa käytetyt laserkorkeus ja -tiheys toimitetaan myös omina hilaruututason muuttujina. Lasertiheys (vegetaatiotunnus) kuvaa puustosta saatavien laserhavaintojen osuutta kaikista havainnoista.

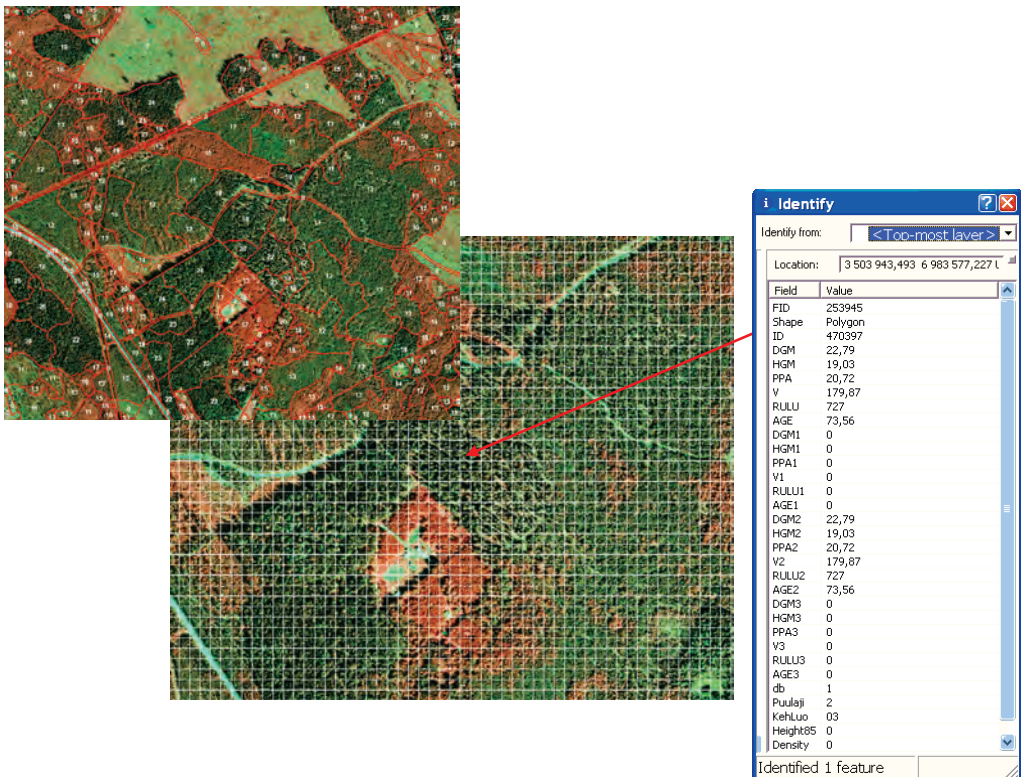
Inventointialueiden puustotulkinnassa käytetään aluepohjaisia ei-parametrisia menetelmiä kuten k-MSN (k-Most Similar Neighbor) tai harva-Bayesilainen (sparse Bayesian). Harvapulssiseen laseraineistoon soveltuvilla aluepohjaisilla menetelmillä ei tulkita yksittäisiä puita, vaan estimoidaan puustotunnukset tietyille laskentayksiköille. Tällöin mallinnuksessa valittujen laser- ja ilmakuviointitietojen perusteella

haetaan inventointialueen kullekin hilaruudulle sitä parhaiten vastaavat maastokoealat (esim. k-MSN 2–5 koealaa) ja lasketaan niiden puustotietojen perusteella jokaiselle hilaruudulle omat puustotiedot. Tulkinnassa koealoja voidaan vielä painottaa sen mukaan, kuinka hyvin kunkin koealan laser- ja ilmakuvapiirteet vastaavat inventoitavaa hilaruutua.

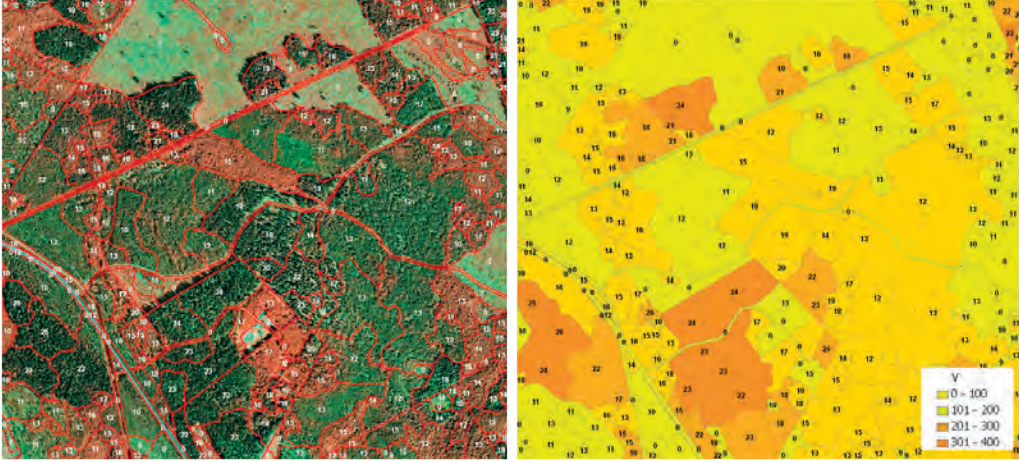
Kuvioinnissa hyödynnetään tulkitsijalta hankittavaa kaukokartoitusaineiston segmentointiin perustuvaa mikrokuviointia. Segmentointi perustuu pääosin laseraineistoon, mutta lisäksi käytetään myös ilmakuvaa, jotta saadaan eroteltua paremmin esim. lehtipuuvaltaisia kuvioita. Tavoitteena on puustoltaan yhtenäiset mikrokuviot niin, että tavoiteltava keskikoko on alueesta riippuen 0,25–0,5 ha. Tulkitsijalle toi-

mitetaan mikrokuviointiin leikattavat kiinteistörajat sekä muut kuviointiin upotettavat rajat (vähintään tiet, linjat, vesistöt, pellot ja mahdolliset luontokuviot). Mikrokuviorajat tulee sovittaa mahdollisimman hyvin tilarajoihin ja muihin pakotettaviin raja-aineistoihin. Lisäksi tulkitsija tarkastelee esim. CHM:n perusteella, sisältääkö peltomaski metsitettyjä peltoja, jotka tulee liittää puustotulkintaan.

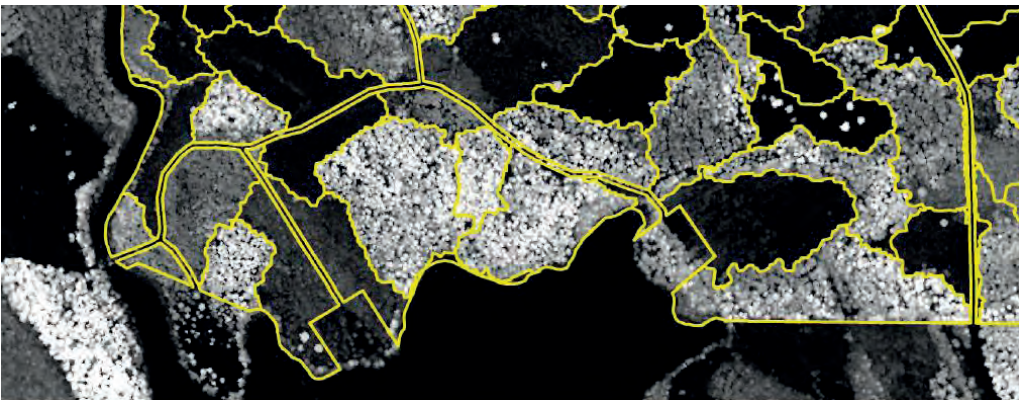
Metsävaratiedon käytettävyyden kannalta mikrokuviointi on liian pieni- ja pienipiirteistä, joten lopulliset toimenpidekuviot yhdistellään mikrokuvioista. Mikrokuvioiden yhdistelyä on automatisoitu ja siinä hyödynnetään erilaisia tausta-aineistoja, kuten CHM:ää ja olemassa olevaa vanhempaa kuviointia. Kuviorajauksia viimeistellään myös manuaalisesti.



Kuva 14.6. Puustotulkinta. Puustotulkinnan inventointiyksikkönä on 16 m hilaruutu. Kuviotason tiedot yleistetään kuvioille osuvien hilaruutujen summa- ja keskitunnuksina. Kuva SMK/Arbonaut Oy.



Kuva 14.7. Automaattikuvioinnin (segmentoinnin) tavoitteena on tuottaa mahdollisimman lopullista kuviorajauksa. Kuviointiin upotetaan kiinteistörajat, vedet, pellot, tiet ja linjat. Lopulliset metsikkökuviot yhdistellään pienemmistä mikrokuvioista ja rajauksia viimeistellään tarvittaessa myös manuaalisesti. Kuva SMK/Arbonaut Oy.



Kuva 14.8. Automaattisessa kuvioinnissa (segmentoinnissa) käytetään sekä ilmakuvia (yllä) että puuston laserkeilauksella tuotettua pituusmallia (alla). Kuva SMK/Arbonaut Oy.

#### 14.2.5 Kohdennettu maastoinventointi ja metsävaratietojen laskenta

Kohdennettu maastoinventointi aloitetaan puustotulkinnan ja kuvioinnin valmistuttua mahdollisimman aikaisin keväällä, jotta metsävaratiedot saadaan kattavasti valmiiksi toisena inventointivuonna. Kuvioittaisena arviointina tehtävään inventointiin valitaan kuviot, joilta ei saada riittävän luotettavaa tietoa kaukokartoituksella tai muun olemassa olevan tiedon perusteella. Perusvalintaan kuuluvat kehitysluokkien osalta aukeat (A0), taimikot (T1, T2), siemen- ja suojuustuotot (S0 ja O5), ylispuustoiset taimikot (Y1) sekä tarvittaessa eri-ikäisrakenteiset metsiköt (ER). Puustotulkinnasta ei saada suoraan S0-, O5- ja Y1-kuvioita, vaan niitä selvitetään erikseen. Eri-ikäisrakenteisia kohteita tulee järjestelmään esim. metsänkätöilmoitusten kautta. Maastossa voi olla tarvetta tarkistaa myös nuoren metsän kunnostuskohteita sekä puustoltaan hyvin epätasaisia, harvoja tai muutoin poikkeavia kohteita.

Kohdennetun maastoinventoinnin määrää pyritään minimoimaan ja metsävaratiedot tuotetaan sisätoiminä, jos voidaan riittävän luotettavasti päätellä metsänhoidon jälkeinen puusto ja erityisesti toimenpiteet. Tässä voidaan hyödyntää Metsäkeskukselle tulevia metsänkätöilmoituksia ja Kemera-hakemuksia, mahdollista tuoreempaa metsäsuunnittelua, metsänomistajilta tai toimijoilta saatavaa toimenpidetietoa, puuston laserpituusmallia ja ilmakuvia, varttuneiden taimikoiden puustotulkintaa sekä metsäneuvojien paikallistuntemusta ja kokemusta. Kohdennetun maastoinventoinnin osuus pyritään saamaan 10–15 % tasolle koko inventointialasta. Lähtökohtana kuitenkin on, että metsävaratiedon laatuksiteerit täyttyvät, jolloin maastotyön osuus voi vaihdella alueesta riippuen. Ennen maastoon siirtymistä valitut kuviot ja myös niitä ympäröivät kuviot siirretään Aarni-järjestelmästä maastotietokoneelle, jossa on oma kohdennetun maastoinventoinnin sovellus. Ympäröivät kuviot valitaan myös, jotta voidaan tarvittaessa korjata kuviorajausta.

Metsävaratietojen laskennassa kuviotason keski- ja summatunnukset lasketaan kuvion

sisällä olevien hilaruutujen puustotietojen perusteella (hilayleistys). Puulajiositteiden lisäksi kuviolle lasketaan hilayleistyksessä myös puujakso-ositteita, jos kuviolla olevien eri hilaruutujen puustot ovat merkittävästi erimittaisia (esim. kaksijaksoinen kuvio). Jos kuviolle osuu riittävästi täysiä tai lähes täysiä hilaruutuja, puustotunnukset lasketaan niiden perusteella (suurin osa kuvioista, luotettavuus hyvä). Jos hilaruutuja ei ole tarpeeksi (määritetty minimirajat), ehtoa lievennetään ja otetaan mukaan myös osittain kuviolle osuvat hilaruudut, jolloin hilayleistyksen luotettavuus on kohtalainen tai heikko (mahdollinen maastotarkistus). Kuviotason puustotunnukset lasketaan painotettuina keskiarvoina, jossa painona käytetään kuvion sisällä olevaa hilaruudun pinta-alaosuutta sekä hilaruudun tiedon luotettavuutta kuvaavaa painokerrointa. Jälkimmäinen ottaa huomioon sen, että osin naapurikuvion puolella oleva hilaruutu antaa laadultaan huonompaa tietoa kuin kokonaan sisällä oleva ruutu.

Kuvioille haetaan myös maapohjatiedot (maaperä, kasvupaikka yms.), jotka perustuvat olemassa olevaan metsäsuunnittelutietoon, metsänkätöilmoituksiin tai Kemera-hakemuksista poimittuihin tietoihin. Mikäli alueelta ei ole saatavissa muuta maapohjatietoa, käytetään monilähde-VMI:n tietoja. Maapohjatiedon hallintaan ja käsittelyyn käytetään myös hilaruusteista tietorakennetta, joka muodostetaan olemassa olevasta tiedosta. Hilaperusteisena maapohjatiedot voidaan yleistää mille tahansa uusille kuviorajauksille, jolloin säilytetään paremmin alkuperäisen tiedon harvinaisemmat ja pienialaisemmat tiedot. Olemassa olevasta aineistosta metsävaratietoon yhdistetään myös metsälain erityisen tärkeiden elinympäristöjen kuviot eli ns. Mete-kohteet. Edelleen jos alueella on tuoretta metsäsuunnittelutietoa, se voidaan säilyttää joko kokonaan tai osin (esim. taimikot), jolloin sitä ei korvata laserinventoinnilla.

Laskentasovelluksella täydennetään mahdolliset puuttuvat puustotunnukset ja kuviokohtaiset inventointipuustot kasvatetaan nykyhetken perustuen läpimittajakaumiin ja kasvumalleihin. Puuston kasvatus tehdään kuviotasolla ja siinä otetaan huomioon myös

tehdyt toimenpiteet simuloimalla ne puustotietoihin. Simuloinnissa voidaan käyttää tietoa pelkästä hakkuutavasta (mukaan lukien harvennusmallit) tai jäävästä puustosta. Koska inventointi on 2-vuotinen, tulee päivittää myös prosessin aikana mahdollisesti tehdyt toimenpiteet. Lopputuloksena saadaan kuviokohtaiset puulajeittaiset laskentapuustot sekä kuvion puuston summa- ja keskitunnukset.

Laskentasovelluksella simuloidaan metsänhoitosuosituksen mukaiset tulevat toimenpideehdotukset perustuen nykyhetken kasvatettuun laskentapuustoon ja mahdolliseen toimenpidehistoriaan. Lisäksi otetaan huomioon kohdennetun maastoinventoinnin yhteydessä maastossa esitetyt toimenpideehdotukset. Laskennassa käytetään Simo-laskentasovellusta, jota ohjataan Aarnista (ArcGIS-ympäristöön räätälöity järjestelmä).

Metsävaratiedon keruun ja ajantasaistuksen prosessien useissa vaiheissa (mm. Aarnijärjestelmä, maastotyösovellukset) on erilaisia virhe- ja loogisuustarkistuksia. Esimerkiksi puustotulkintahila ja kuviotason metsävaratieto tarkistetaan paikkatietosovelluksessa ennen tietokantaan tallentamista (mm. mahdolliset puuttuvat pakolliset tiedot, puustotunnusten järvevät vaihteluvälit sekä kuviotunnusten ja toimenpiteiden loogisuus).

#### 14.2.6 Laadunvarmistus

Automaattikuvioinnin laatutarkastelussa otetaan huomioon mikrokuvioiden minimikoko, kuviorajausten pehmennys sekä täsmäytys tilaraja- ja maskiaineistoihin. Kuviorajoja tulee syntyä pääpuulajin vaihtuessa lehtipuusta havupuuksi tai kun puuston pituus/tiheys muuttuu niin paljon, että kuvion käsittelytarve muuttuu. Lisäksi tarkastellaan kuinka suuri osa kuviorajauksista on käyttökelpottomia ilmakehuun tai puuston laserpituusmalliin verrattuna ja joudutaan korjaamaan käsin. Yli 80 % kuviorajoista tulee olla mikrokuvioiden mukaisella paikallaan.

Varsinaisen puustotulkinnan laatuvertailua tehdään kasvatus- ja uudistuskypsillemetsille kahdessa eri vaiheessa. Lisäksi laadunvarmistusta tehdään myös toimenpidekuviotasolla.

#### 1. *Tulkitsijan tekemä koealatason tarkastelu.*

Keskeisten puustotunnusten keskivirhettä (RMSE, root mean square error) ja harhaa (bias) arvioidaan ristiinvaldoinnilla (leave-one-out), jossa verrataan koealalta mitattuja puustotunnuksia menetelmällä ennustettuihin vastaaviin muuttujiin. Otos on rajallinen, mutta se on tarkkaan mitattua tietoa. Sinänsä tämä voi antaa hieman positiivisen kuvan, koska mallinnusaineisto on samalla myös vertailuaineisto, mutta tarkastelu kuvaa kuitenkin hyvin puustotulkintamallien hyvyttä.

Kokonaispuuston, vallitsevan puulajin ja sivupuulajien muuttujakohtaiset keskivirheen ja harhan tavoitetasot on määritelty yhteistyössä tulkitsijoiden ja tutkijoiden kanssa niin, että ne ovat riittävät loppukäyttäjän ja realistiset tulkitsijan kannalta. Lähtökohta on se, että koealatulosten tulee olla mahdollisimman harhattomia. Keskivirheiden osalta tarkastellaan ensisijaisesti kokonaispuuston ja pääpuulajin tarkkuutta. Pääpuulajin tarkastelussa jokaiselle koealalle määritetään mitatun tilavuuden perusteella pääpuulaji, jonka puustotunnuksia vertaillaan. Näin saadaan tarkkuustaso pääpuulajille, joka voi olla eri koealoilla eri puulaji. Puulajikohtaisten keskivirheiden tarkastelussa jätetään kunkin puulajin osalta mitättömän pienen osuuden koealat pois vertailusta (mitattu puulajiosuus alle 10 % koealan kokonaistilavuudesta). Näillä tarkasteluilla pyritään saamaan koealakohtaisista tarkkuuksista esiin käytännön metsätalouden kannalta keskeiset luvut. Suhteellisten keskivirheiden (RMSE %) koealakohtaiset tavoitetasot ovat seuraavat:

Muuttuja	h	d1.3	ppa	v
Kokonaispuusto	10	15	20	20
Pääpuulaji	10	20	30	30
Alueen yleisin havupuulaji	15	25	35	35
Toinen havupuulaji	15	25	40	40
Lehtipuu	20	30	45	45

2. *Mikrokuviotason laadunvarmistus* toimii puustotulkinnan hyväksymistarkastuksena. Koealatason tarkastelu ei välttämättä anna suoraan oikeantasoista tietoa aineiston käyttökelpoisuudesta, koska tulkintamenetelmä on

kehitetty ja aineistoa käytetään nimenomaan kuviotasolla. Tarkistusmittaukset tehdään jo ensimmäisenä kesänä pienehköille puustoltaan yhtenäisille kuvioille. Tämän etuna on se, että laatuvertailu voidaan tehdä heti puustotulkinnan mallinnuksen yhteydessä.

Maastotarkastettavien joukkoon valitaan 30–50 erityyppistä noin 0,5–2 ha kuviota alaryhmän, pääpuulajin ja kehitysluokan mukaan. Tarkistuskuvioiden valinnassa tulee huomioida, ettei valita niin erikoisia kuvioita, ettei vastaavan tyyppiselle puustolle ole todennäköisesti edustavia puustotulkinnan koealoja. Kuvioille sijoitetaan systemaattisesti ennakkopisteet pinta-alan mukaan (4–6 kpl/kuvio) ja niistä mitataan kiinteäasteiset puustotulkintakoealoja vastaavat tarkistuskoealat (ikää ei kairata). Jos ei ole käytettävissä tarkkuuslaitetta, niin koealan paikannukseen riittää muukin GPS. Tässä ei ole tärkeintä todellinen tarkka sijainti vaan se, että jokainen koealapiste on ennakkoon sijoitettu ja mitataan ilman subjektiivista valintaa. Tarkistuskoealojen ja -kuvioiden tulokset lasketaan LUKEn laskentapalvelussa, minkä jälkeen kuviotason summa- ja keskitunnuksia verrataan vastaaviin puustotulkinnan kuviotason estimaatteihin.

Mikrokuviotason laatua arvioidaan ensisijaisesti ns. osumatarkkuuden perusteella. Jotta osumatarkkuus olisi tilastollisesti pätevä, niin hyväksytään myös kuviot, jotka jäävät määritetyn osumatarkkuuden ulkopuolelle, mutta ovat tilastollisen 95 % luottamusvälin sisäpuolella. Kuviotason osumatarkkuuden tavoitetasot ovat:

#### **Kokonaispuusto**

- h: +/- 2 m 80 % tapauksista
- d1.3: +/- 3 cm 80 % tapauksista
- ppa: +/- 3 m<sup>2</sup> 80 % tapauksista
- v: +/- 20 % 80 % tapauksista

#### **Puulajit (mänty, kuusi, lehtipuu)**

—Puulajikohtainen tarkkuus on heikompi, mutta pääpuulajille voidaan käyttää samoja tavoitetasoja kuin kokonaispuustolle. Sivupuulajien puustolle ei voida määrittää selkeitä tavoitetasoja ja lisäksi estimoinnin onnistuminen on hyvin tapauskohtainen.

—Vähimmäistavoitteena on oikea pääpuulaji, jos kuviolla on selkeästi yksi vallitseva

puulaji, joka on myös maastossa havaittavissa. Puulajisuhteissa (osuus kokonaistilavuudesta) yksittäisen puulajin yli 50 % poikkeama katsotaan virheeksi.

#### **Muuta**

—Puuston ikä ei ole mukana mikrokuviotason laatuvalvonnassa.

—Runkolukua tarkastellaan vain taimikossa. Tavoitteena on, että runkoluku on oikein 50 % tarkkuudella, mutta oleellista on hoitotarpeen kiireellisyyden oikea määrittäminen.

—Varttuneiden taimikoiden hoitotarpeen tai nuorten kasvatusmetsien harvennusten kiireellisyyden suoratulkinnan osalta ei voida myöskään esittää tarkempia laatuvalvontatavoitteita.

—Osumatarkkuuden lisäksi tarkistuskuvioille lasketaan keskivirheet samoille muuttujille kuin koealatasolla. Kuviotason keskivirheiden laskennassa otetaan huomioon myös otantavirheen poisto. Virheet eivät saa ainakaan kasvaa koealatasoon nähden, vaan yleensä ne pienentyvät jopa kolmanneksen.

#### **3. Toimenpidekuviotason laadunvarmistuksessa**

arvioidaan erityisesti toimenpideehdotusten paikkansapitävyyttä. Maastotyö perustuu normaaliin kuviointiin ja se toimii osin hyväksymistarkastuksena, kun päätetään metsävaratiedon julkaisukelpoisuudesta. Maastotarkastuksia tehdään yksi tarkastuspäivä noin 15 000 - 20 000 ha kohden tai isoilla alueilla maksimissaan 10 tarkastuspäivää. Tarkastukset kohdennetaan niin, että varmistetaan myös kohdennettua maastoinventointia tehneiden henkilöiden työn laatu.

Tarkastukseen valitaan kaukokartoitettuja ja maastossa inventoituja kuvioita siinä suhteessa kuin koko aineistossakin on. Kuvioita valitaan kaikista kehitysluokista. Maastossa tarkastetaan kuviointia, kasvupaikkaa, puustoa sekä hakkuu- ja hoitotyöehdotuksia. Myös mahdolliset Mete-kohteet tarkistetaan. Lähtökohtana on, että metsävaratiedon keruussa noudatetaan metsälainsäädäntöä, Hyvän metsänhoidon suosituksia ja metsäsertifioinnin vaatimuksia. Tavoitearvona on, että korjattavien kohteiden osuus kaikista tarkasteltavista muuttujista yhteensä on alle 5 %. Puustoarviointien tavoitetaso on +/- 20 % 8:ssa tapauksessa 10:stä.

Laadunvarmistus kytkeytyy metsävaratiedon julkaisuun siten, että puustotulkintatiedot voidaan julkaista perustuen hyväksytyyn koeala- ja mikrokuviotason laatukontrolliin. Lisäksi kohdennetun maastoinventoinnin tiedot voidaan julkaista toimenpidekuviotason laadunvarmistuksen jälkeen. Vaikka koko alueen puustotulkinta hyväksytään jo mikrokuviotason laatukontrollin perusteella, niin toimenpidekuviotason laadunvarmistuksen tuloksista informoidaan tarvittaessa myös puustotulkitsijaa, joka on vastuussa toimittamastaan aineistosta vähintään sopimuksen voimassaolon ajan, jos jotain merkittäviä virheitä löytyy aluetason tulkinnasta.

#### 14.2.7 Metsävaratietojen julkaisu

Metsävaratiedon käyttöönotto Metsään.fi-palvelussa tehdään vaiheittain, jolloin laatukriteerit täyttävä kaukokartoitustieto julkaistaan ensin ja muulla olemassa olevalla tiedolla tai kohdennetussa maastoinventoinnissa tarkennetut kuviot myöhemmin niiden valmistuttua. Kaukokartoitustiedon julkaisuvaiheessa esitetään kuitenkin jo koko kuvioaineisto mukaanlukien maastotarkistettaviksi merkityt kuviot ilman toimenpide-ehtoja. Tavoitteena on, että puustotulkinnan julkaisu voidaan tehdä mahdollisimman isoissa osissa tai kerralla koko inventointialueelta. Toisessa vaiheessa julkaistaan laatukriteerit täyttävät tiedot, jotka on täydennetty toimistolla tai kohdennetussa maastoinventoinnissa. Inventointialueen kiinteistöt voidaan julkaista sitä mukaa, kun ne valmistuvat ja tavoitteena on, että kaikki on julkaistu viimeistään toisen inventointivuoden loppuun mennessä.

Metsävaratiedon valmistumisen jälkeen kaikille inventointialueen yksityisille metsänomistajille lähetetään myös Metsään.fi-tiedote, jossa on esitetty mm. kuvioden hakkuu- ja hoitotyöehdotukset sekä havaitut luontokohteet. Varsinainen Metsään.fi-palvelu tarjoaa metsänomistajalle ja metsäalan toimijoille ajantasaisen metsävaratiedon. Yksittäiseen tilaan yhdistettävissä oleva tieto luovutetaan kuitenkin vain metsänomistajan luvalla. Metsään.fi-palveluun

rekisteröityneiden toimijoiden on mahdollista hakea metsävaratietoja omiin järjestelmiinsä myös teknisen rajapinnan kautta, jolloin erillistä käyttöliittymää ei ole, vaan toimijan palvelin on yhteydessä Metsäkeskuksen palvelimeen salattujen yhteyksien kautta. Tiedonsiirrossa käytetään metsätietostandardin mukaisia XML-tiedostoja. Tietojen siirtäminen edellyttää, että metsänomistaja on antanut toimijalle suostumuksen tietojen siirtoon.

### 14.3 Paikkatietosovellukset maatalouden täsmäviljelyssä

HANNA HUITU

#### 14.3.1 Viljely paikkatiedon sovelluskohteena

Tärkeänä osana toimintaansa Luonnonvarakeskus tuottaa maa- ja elintarviketaloutta tukevaa tieteellistä tutkimusta. Tutkimuksen avulla voidaan parantaa viljelyn kilpailukykyä, tehostaa resurssien käyttöä sekä vähentää haitallisia ympäristövaikutuksia. Tuloksekas viljely vaatii aina aika-paikkatiedon käsittelyä ja hallintaa. Täsmäviljelyssä tätä ongelmakenttää otetaan haltuun erilaisten paikannus-, tiedonsiirto- ja tiedonhallintateknologioiden avulla. Ytimessä on tietämyksenhallinta, jossa paikkatiedon hallinnalla ja käsittelyllä on suuri rooli. Tutkimuksessa kehitettyjä elementtejä tuotteistetaan, ja usein tutkimuksen tulokset päätyvät operationaaliseen käyttöön kaupallisina sovelluksina.

Usein käytetyn määritelmän mukaan täsmäviljely on viljelyä, jossa (oikeiden) päätösten määrä pinta-ala- ja aikayksikköä kohden kasvaa, tuottaen samalla nettohyötyä viljelyyn. Viljelyä ohjaavat ennalta asetetut taloudelliset, ympäristö ym. tavoitteet, joita pyritään täyttämään. Pellolla tehtävät toimenpiteet tähtäävät yleensä laadullisesti ja määrällisesti hyvän sadon tuottamiseen ja pellon kasvukunnon säilyttämiseen tai parantamiseen. Täsmäviljely ei ota kantaa tavoitteisiin, vaan pikemminkin tarjoaa keinoja niiden toteuttamiseen. Tietojen keruu viljelyprosessista, kasvuston kehityksestä sekä viljelyolosuhteista on paikkaan sidottua.

Paikkatietoa mitataan ja yhdistellään eri lähteistä, analysoidaan, sekä käytetään viljelyn suunnittelussa sekä työn ja koneiden ohjaamisessa.

Täsmäviljelyssä pyritään 1) kartoittamaan vaihtelu peltolohkoilla, ja kerryttämään peltolohkoa koskevaa paikkakohtaista tietämystä 2) suunnittelemaan toimenpiteet tätä tietoa ja tavoitteita vastaavaksi 3) toteuttamaan toimenpiteet suunnitelman mukaisesti sekä hienosäätämään toteutusta online-mittausten avulla sekä 4) dokumentoimaan tehty työ ja keräämään samalla aiempia kohtia palvelevaa palautetietoa.

Yksi perustelu viljelyn spatiaaliseen tarkentamiseen nousee peltolohkojen sisäisestä vaihtelusta. Peltolohkon maaperän ominaisuudet, topologia ja mikroilmastojen muodostuminen vaikuttavat esimerkiksi pellon vesitalouteen ja kasvien ravinteiden ottoon. Näiden melko pysyvien tekijöiden aiheuttama spatiaalinen sadon vaihtelu korostuu tai häivytyy muuttuvien tekijöiden kuten säätötilan ansiosta. Lohkon ominaisuuksien spatiaalisesta vaihtelusta pyritään kerryttämään karttatietoa, joka yhdistettynä kasvuston ja kasvuolosuhteiden monitorointiin luo pohjaa spatiaalisesti tarkennetulle viljelylle. Tarkennettu viljelyn toimenpiteiden säätö perustuu yleensä peltolohkosta etukäteen kerättyyn paikkatietoon ja sen perusteella laadittuun suunnitelmakarttaan. Toimia voidaan myös tarkentaa ja suunnitelmia hioa ajon aikaisiin online-mittauksiin perustuen. Toimenpiteiden intensiteetti perustuu siten lohkon pysyviin ominaisuuksiin, työhöhetken tilanteeseen tai näiden yhdistelmään.

### 14.3.2 Paikkatiedon hankinta täsmäviljelyyn

#### *Kaukokartoitus tietolähteenä*

Täsmäviljelyn suunnitteluun tarvittavaa paikkatietoa voidaan kerätä kaukokartoitusmenetelmin kuten ilmakuvauksella, laserkeilauksella, satelliittikuvien tai tutkakuvauksella. Kasvukauden aikana tapahtuva ilmakehäkuvaus on yksi varteenotettava tapa hahmottaa pellolla esiintyvää paikkakohtaista vaihtelua. Kuvien käyttötarpeesta riippuen kuvaus tehdään sadon eri kehitysvaiheissa. Lennokkia tai pienkonetta

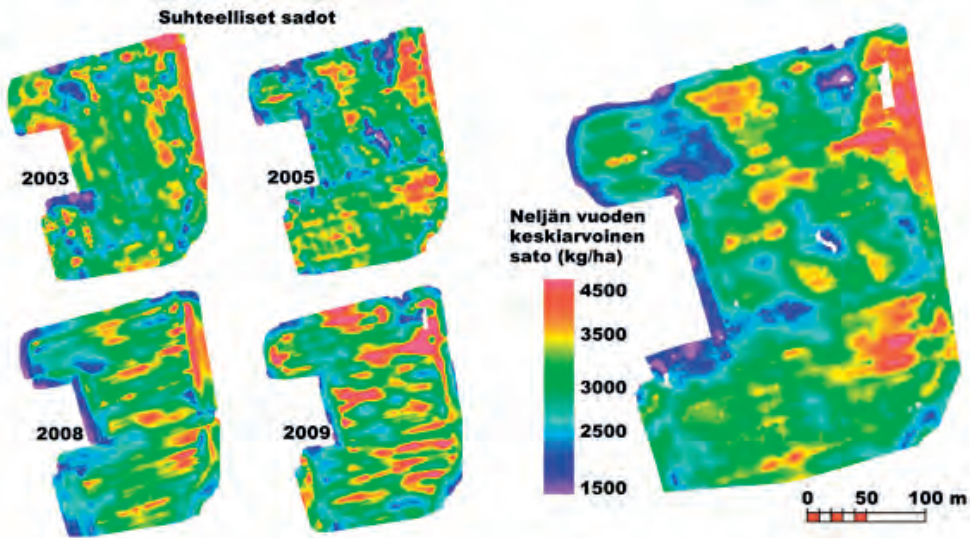
käytettäessä pilvinen jakso ei estä kuvaamista, ja kuvia voidaan hankkia silloin kun on tarve. Viime aikoina miehittämättömiin lennokkeihin tai koptereihin perustuvien järjestelmien (UAS, Unmanned Aerial Systems) avulla saatavan kuvamateriaalin käyttökelpoisuuden tutkimus on ollut vilkasta. Toisaalta myös satelliittikuvien erotuskyky ja saatavuus on parantunut, ja niiden odotetaan lunastavan paikkaansa peltosovelluksissa.

Muokatun maan maalaji, kosteus ja multavuusvaihteluja saadaan näkyviin tavallisista väri-ilmakuvista. Kylvön jälkeen, ennen tähkälle tuloa otetusta vääräväriskuvasta saadaan puolestaan hyvä käsitys viljakasvien paikkakohtaisesta vihermassasta ja siten satopotentiaalista. Hyperspektrikamerat tallentavat useita eri aallonpituusalueita, jotka ovat sellaisenaan tai aallonpituusalueiden suhteina käyttökelpoisia hyvin eri tarkoituksiin. Muokatun maan maalajivaihteluita voidaan kartoittaa näkyvän valon aallonpituusalueilla (n. 400–780 nm) ja maan pinnan kosteuseroja infrapuna-alueen ilmakuvista. Kasvien stressitiloja voidaan puolestaan kartoittaa esimerkiksi punaisen aallonpituusalueen (n. 690–740 nm) avulla. Lisäksi esimerkiksi maan sähkönjohtokyvyn mittaus onnistuu kaukokartoituksena.

#### *Maastossa tehtävät mittaukset*

Osa paikkatiedon hankinnasta perustuu näytteenottoon ja näytteenotto paikan määrittämiseen. Näytteen analysointi voidaan tehdä laboratoriossa. Esimerkkinä tästä on maan viljavuustietojen kartoitus maanäyteanalyysien avulla, jossa maanäytteiden ottopaikat paikannetaan mukana kulkevalla GPS-laitteella. Mitatut suuret voidaan tarvittaessa interpoloida peltolohkojen alueelle.

Paikantamisen tekniikoiden (GNSS Global Navigation Satellite Systems; lähinnä GPS eli Global Positioning System) kehitys viime vuosikymmeninä on edesauttanut liikkuvien työkoneneiden työaikaista tiedonkeruuta. Traktori tai työkonetta voidaan instrumentoida mittaamaan pellon tai kasvuston ominaisuuksia. Traktoriin kuuluu tällöin GPS-vastaanotin, jonka avulla



Kuva 14.9. Sadot neljältä vuodelta sekä satojen keskiarvo. Viljelykasveina on ollut ohra ja vehnä. Kuva: Jere Kaivosoja, MTT

mittaukset saadaan samalla paikannettua.

Tärkein esimerkki työnaikaisesta tiedonkeruusta on leikkuupuimurin viljavirran mittauksiin ja puimurin paikannukseen perustuva paikkakohtaisen satotiedon keruu. Sato on viljelyprosessin lopputulos, joten satokarttaa (kuva 14.9.) arvioimalla voidaan arvioida koko viljelyn onnistumista. Lisäksi satokartta kertoo pellosto poistuneista ravinteista, ja on siten tärkeä tieto pellon ravinnetasekarttojen laskennassa.

Työkoneen tuottamaa mittausdataa joudutaan tyyppillisesti käsittelemään monipuolisesti ennen kuin haluttu kartta on valmis. Esimerkiksi satokartan tiedonkeruussa juuri leikattu vilja ehtii puimurissa vasta muutaman sekunnin kuluttua mittausantureille, ja nämä sekunnit pitää huomioida yhdistettäessä mittausarvo sijaintiinsa. Päisteiden ja mittausvirheiden aiheuttamat liian suuret tai pienet arvot pitää myös suodattaa datasta pois, ennen kuin ohjelma voi interpoloida koko pellon kattavan rasterikartan koko satomäärästä.

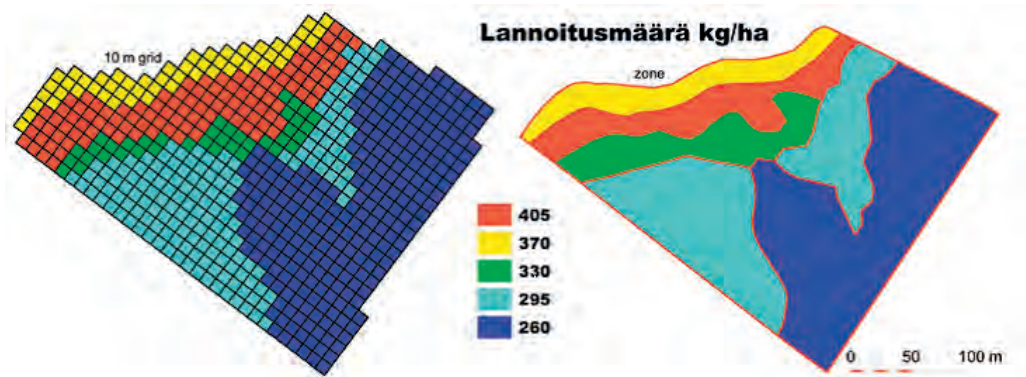
Yleensä työkoneilla kerättyä dataa ei ole tarve käsitellä välittömästi työn yhteydessä. Pellolla tehtävät mittaukset voidaan kuitenkin

toteuttaa myös niin, että niitä käytetään reaaliaikaisesti työn paikkakohtaiseen online-säätöön. Esimerkiksi rikkakasvien määrä ja tautitilanne ruiskutushetkellä vaikuttavat siihen, missä ja minkä verran agrokemikaaleja tulee levittää. Rikkakasvien ja tautien torjuntaan on kehitetty erilaisia paikallisesti säätyviä ratkaisuja. Online-sovelluksia löytyy myös kasvuston lisälannoitukselle, jossa automatiikka säätää paikkakohtaista lannoitemäärää (kg/ha) reaaliaikaisen kasvuston vihermassamittaukseen perustuen.

### 14.3.3 Paikkatiedon hallinta ja analyysi

Täsmäviljelyssä karttamuotoinen, koneluettava työsuunnitelma (kuva 14.10) luodaan analysoimalla lohkolta kerättyä paikkatietoa sekä olosuhteista ja kasvustosta johtuvia toimenpidetarpeita. Lannoituksen suunnittelun pohjana voidaan käyttää kertynyttä historiatietoa paikkakohtaisesta pellon viljavuudesta ja sadoista. Käytännössä toimenpiteen toteutusta ja intensiteettiä koskevan suunnitelmakartta sisältyy tehtävätiedostoon (task file), jota traktori-työkoneyhdistelmä lukee työn aikana.

Työkone dokumentoi tehdyn työsuorituksen



Kuva 14.10. Lannoitussuunnitelma ruudukkona sekä vyöhykkeinä. Kuvat: Jere Kaivosoja, MTT

karttana. Toteumat toimenpiteistä palautuvat sitten maatilán tiedonhallintajärjestelmään, jossa niitä voidaan käyttää hyväksi tulevan kauden suunnittelussa, dokumentointina, ja lohko kohtaisen tiedon kerryttämisessä.

Tiedonsiirto eri tiedonkeruuohjelmistojen sekä suunnitteluohjelmistojen välillä voi olla ongelmallista, sillä ohjelmistoilla on omat formaattinsa. Shapefile- ja XML-pohjainen tiedonsiirto ovat tällä hetkellä toimivimpia tapoja paikkatiedon välittämiseen.

Täsmäviljelyssä tuotantopanokset kohdennetaan paikkatietotekniikkaa apuna käyttäen, ja optimointi tehdään paikkatietoa ja paikkatietoanalyysejä hyödyntäen. Tietomäärien lisääntyessä tiedonhallinnan merkitys korostuu. Täsmäviljelyn suunnittelujärjestelmät ovat muuttumassa pelkistä karttaohjelmista kohti monipuolisia paikkatietopohjaisia järjestelmiä. Kehittyvä tiedonhallinta maataloilla (FMIS eli Farm Management Information System) hallitsee toimenpiteiden suunnittelun, toteutuksen ja arvioinnin.

Täsmäviljelyn tiedonhallinta linkittyy muiden palveluntarjoajien palveluihin ja paikkatiedon infrastruktuuriin web-palvelurajapintojen välityksellä. Viljelijän tilannetietoisuutta tukevat palvelut voivat toimia myös täsmäviljelyssä tiedonlähteinä ja herätteinä. Esimerkiksi kasvintuhojia koskevia, paikkaan sidottuja ja ajantasaisia tietoja, ennusteita ja hälytyksiä alkaa olla käytettävissä. Täsmäviljelyssä olennaisia aineistoja ovat lisäksi WMS-palveluna-

kin saatavat ortoilmakuvat, taustakartat sekä peltolohkojen raja-aineisto.

Tärkeitä ajureita tulevaisuuden kehitykselle ovat tarve ruuantuotannon parempaan jäljitettävyyteen ja ohjautuvuuteen, sekä ympäristövaikutuksiin liittyvien tukiehtojen tai sitoomusten noudattamisen varmistaminen. Mittauksiin nojaava toimintatapa tuo ruuantuotantoon läpinäkyvyyttä. Erilaiset hiili- vesiymp. jalanjälkien kaltaiset laskentamenetelmät kasvattavat suosiotaan, ja laskentoihin ja niiden taustatiedoksi tarvitaan paikannettua tietoa lannoitteista, agrokemikaalien määrästä, polttoaineen kulutuksesta sekä sadon määrästä ja laadusta. Hyvä tietämyksen hallinta tukee koko ruuantuotantoketjun toimintaa.

#### 14.4 Maa- ja metsätalouden vesistövaikutukset

HANNA HUITU

##### 14.4.1 Maa- ja metsätalous hajakuormituksen aiheuttajana

Maa- ja metsätalous vastaavat merkittävästä osasta vesistöön tulevasta ravinnekuormituksesta. Vesistöön päätyy myös erilaisia kemikaaleja, kuten kasvinsuojeluaineita ja niiden hajoamistuotteita. Kuormitus huonontaa vastaanottavan vesistön tilaa, aiheuttaen rehevöitymistä, liettymistä tai haitallisten tai muuten

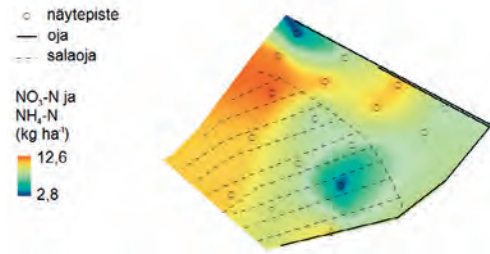
ei-toivottujen aineiden korkeita pitoisuuksia. Päätöksenteko tarvitsee arvioita kuormituksen nykytilasta, vesiensuojelutoimenpiteiden toimivuudesta sekä skenaarioita kuormituksen muutoksesta eri toimintavaihtoehdoilla. Näiden tuottamisessa tarvitaan paikkatietoon pohjautuvia menetelmiä ja analyysijä.

Kuormituksen ja huuhtouman mallinnusta tehdään eri mittakaavatasoilla lähtien peltomaan rakennetta kuvaavista muutaman desimetrin 3D-malleista aina vesistöalueita koskevaan mallinnukseen asti. Mallit parantavat tietämystä kuormituksen muodostumisesta, määrästä ja kuormitusta koskevista lainalaisuuksista. Kartoituksilla, analyysillä ja muilla paikkatietomenetelmiin pohjautuvilla työkaluilla voidaan myös suoraan avustaa kuormituksen vähentämiseen tähtäävää päätöksentekoa. Riskien ja riskialueiden tunnistaminen on tärkeitä, sillä hajakuormitusta tuottavat pinta-alat ovat suuria ja monet vesiensuojelutoimenpiteet kalliita.

#### 14.4.2 Potentiaalisten hajakuormituslähteiden kartoittaminen

Maaperän ominaisuudet vaikuttavat niin kiintoaineksen kuin liukoisten aineiden kuormitukseen. Maaperätietojen lähteenä käytetään usein vektorimuotoista maannostietokantaa tai Geologian tutkimuskeskuksen paikkatietoaineistoja, jotka molemmat ovat koko maan kattavia aineistoja. Maannostietokannasta saadaan karkealla tasolla myös maaperän kemiallisia ominaisuuksia kuten pH, kun taas Geologian tutkimuskeskuksen maaperäkartoista saadaan maan rakenteeseen (raekokojakauma + eloperäisen aineksen osuus) perustuva maaperäluokitus. Viljelysmailta kerättyjen viljavuusnäytteiden analyysitiedot ovat tarkkaa, paikannettua tietoa pellon ravinnetilasta, ja näytetiedoista voidaan tarvittaessa interpoloida yksittäisten peltolohkojen tilaa (kuva 14.11).

Kasvinviljelyssä karjanlanta on yksi kasvien ravinnelähteistä. Osa lannan ravinteista ei kuitenkaan päädy satoa kasvattamaan, vaan huuhtoutuu pellolta veden mukana ja aiheuttaa haitallista kuormitusta.



Kuva 14.11. Pintamaan tyypitilanne peltolohkolla. Paikkakohtaiset arvot on saatu interpoloimalla 10–25 cm maakerroksesta otettujen maanäytteiden tulokset. Kuva: Riikka Nousiainen, MTT.

Karjanlannan lisäksi viljelyskasveille käytetään yleisesti mineraalilannoitteita. Lannoitemäärät määräytyvät viljelykasvin tarpeen ja maan ravinnetilan mukaan, ja ravinnevirtoja seurataan ravinnetaselaskelmien avulla. Pellolle lisättyjen ja sieltä poistettujen ravinteiden erotuksen avulla saadaan selville, miten hyvin lannoitteiden ravinteet on saatu hyödynnettyä, ja minkä verran niitä jää maaperään alttiiksi huuhtoutumiselle. Laskentayksikkönä on usein peltolohko tai tila, mutta täsmäviljelylaitteiston avulla taseen voi laskea jopa muutaman metrin resoluutiolla.

Maaperän ominaisuuksien ja maassa saatavilla olevien ravinnemäärien lisäksi kuormitus riippuu kaikista maata muokkaavista tai valuntaan vaikuttavista toimenpiteistä. Maaperän happamuus ja muutokset pohjaveden pinnankorkeudessa vaikuttavat monin eri tavoin maaperän biologisiin ja kemiallisiin prosesseihin, jotka osaltaan säätelevät alueelta lähtevän kuormituksen määrää ja laatua. Metsäalueilla hakkuilla, metsän uudistamisella maanmuokkauksineen ja ojituksella on merkittäviä vaikutuksia valumaveden määrään ja laatuun. Ojitetulla alueella virtaava vesi voi irrottaa uomasta maa-ainesta, joka ojassa veden mukana kulkeutuessaan aiheuttaa liettymistä ja jonka hajoaminen kuluttaa happivarantoja.

Kun puuntuotannon aiheuttamaa kuormitusta arvioidaan valuma-alueetasolla, laskenta perustuu tyypillisesti toimenpiteiden ominaiskuormituslukuihin. Nämä kertoimet sisältävät toimenpidetietoa vastaavan kuormitusmäärän toimenpidettä seuraaville vuosille.

Suomessa maaperään liittyvä erityistapaus on happamat sulfaattimaat, joissa pohjaveden aleneminen altistaa sulfidipitoisia sedimenttejä hapelle, mikä taas aiheuttaa eliöille haitallisten metallien liukenemista veteen. Happamien sulfaattimaiden todennäköisestä sijainnista on julkaistu tiettyjä paikkatietoaineistoja, mutta kattavaa tietoa ei ole saatavilla. Happamien sulfaattimaiden kartoituksessa voidaan hyödyntää erilaisia kaukokartoituksen ja numeerisen mallinnuksen menetelmiä, yhtenä esimerkkinä neuroverkkomenetelmät. Paikkatietoa hyödyntävien mallien avulla tutkitaan myös mahdollisuuksia vesitaseen säätelyyn riskipaikoilla.

#### *14.4.3 Korkeusmalliin perustuva kulkeutumisen ja kulkeutumisriskin mallintaminen*

Valuma-alueet ovat alueita, jolta vesistö saa sateen mukana tulleen vetensä. Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämä valtakunnallinen valuma-aluejako on keskeinen paikkatietoaineisto ympäristön tilan tutkimuksessa. Uusi alusta asti digitaalisilla tuotantomenetelmillä tuotettu valuma-aluejako otetaan käyttöön vuonna 2015. Uuden aineiston rinnalla on tuotettu D8-virtaussuunta-algoritmia hyödyntävä virtaussuuntagridi, joka kattaa Suomen vesistöalueet. Virtaussuuntagridiä voidaan hyödyntää määrittäessä vapaasti valitun pisteen (esimerkiksi veden laadun mittauspaikka jokiuomassa) läpuolista valuma-alueita.

Virtaussuuntien määrittäminen todellisuutta vastaaviksi edellyttää aina korjauksia ja tarkastuksia korkeusmallin välittämään tietoon. Lisäksi pitää huomata, ettei korkeusmallin kuvaama maaston pinnan muoto aina sanele veden kulkua alueella. Esimerkiksi peltolohkon mittakaavassa pusikoituneet avo-ojat, ojaluisikat ja rummut eivät aina kuvaudu veden kulkua vastaavasti. Myös maan pinnan alla vesi kulkee usein omia reittejään. Peltoalueilla salaojat voivat ohjata vettä pinnanmuodoista poiketen, salaojia koskevan paikkatiedon ollessa huomattavan epätarkkaa. Ojittamattomassakin maaperässä veden kulku on hankalasti selvitetävissä ja mallinnettavissa, ja kulkureitit saattavat jopa muuttua maaperän kosteustilanteen

muuttuessa. Lisäksi tieto pinta- ja pohjaveden yhteyksistä yleensä puuttuu, vaikka tällä saattaa olla olennaista merkitystä. Käytännössä, edellä mainituista puutteista huolimatta, korkeusmalliin perustuva päättely antaa kuitenkin usein parhaan arvion valuma-alueen rajoista.

Valuma-alueen sisällä sateiden määrä ja ajoittuminen sekä haihdunnan voimakkuus vaikuttavat valuntaan, ja huuhtoutuneet ainemäärät suurenevat usein sademäärän kasvaessa. Varsinkin silloin kun sade pääsee osumaan kasvipeitteettömään maahan pellolla tai muokatulla metsäalueella, maahiukkasten kontaktipintaa altistuu veden liuottavalle vaikutukselle. Rankkasateessa vaikutus tehostuu sadepisaroiden irrottaessa maahiukkasia. Samoin ojauomissa eroosio voimistuu virtausnopeuden myötä. Pelloilla sade tai sen puuttuminen vaikuttaa huuhtoutumaan toistakin kautta: kasveille epäsuotuisat olot vähentävät kasvipeitteisyyttä ja juuriston määrää, jolloin kasvien ravinteidenotto ei vastaa satopotentiaalin mukaista lannoitusta. Kasvien hyödyntämättä jääneet ravinteet jäävät maahan alttiiksi huuhtoutumiselle.

Riski kuormituksen liikkeellelähtoon on suurin rinnepeltoilla. Laserkeilausaineistosta tuotettu 2 metrin korkeusmalliaineisto mahdollistaa jo kaltevien (esim. yli 15 %) peltoalueiden tunnistamisen. Tätä tietoa voisi käyttää kriteerinä myös viljelytoimenpiteiden kuten lannoituksen tai lannan pintaleivityksen rajoittamisessa, kun tarkka korkeusmalli valmistuu valtakunnallisesti kattavana.

Kaltevuuden lisäksi toinen vesistön kuormitusriskiin yhteydessä oleva spatiaalinen suure on luonnollisesti kuormittavan alueen etäisyys vesistöstä. Etäisyysbufferin avulla tehtävä analyysi on teknisesti yksinkertainen, mutta tuloksen oikeus riippuu toki vesistöä ja sen uomia kuvaavan paikkatiedon laadusta ja kattavuudesta.

#### *14.4.4 Koejärjestelyiden avulla hankittava mittaustieto kuormituksesta*

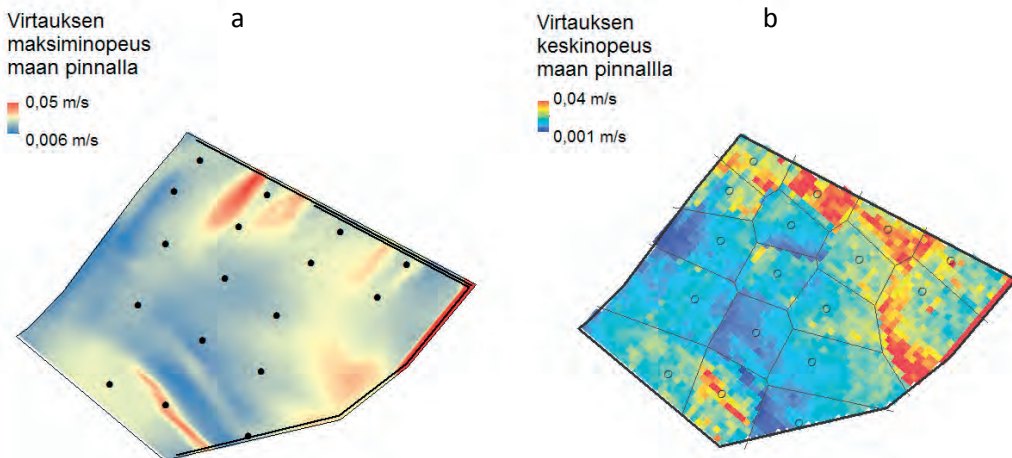
Mallit tarvitsevat kentällä tehtyjä veden laadun ja määrän mittauksia sekä lähtö- ja kalibrointitietoina että varmistamaan tulosten oikeel-

lisuus. Kenttämittauksen tulokset kertovat mittauspisteen yläpuolisesta valuma-alueesta ja sen kuormituslähteistä. Jokiuomassa kulkeva kokonaiskuorma saadaan nykyisin melko hyvin mitattua, mutta kuorman osittaminen yläpuolisen valuma-alueen kuormituslähteisiin on edelleen huomattavan epätarkkaa. Tästä syystä mittauksia tehdään sijainneissa, joissa eri kuormituslähteistä tuleva vesi ei ole vielä sekoittunut.

Maa- ja metsätalouden huuhtoumasta mittaustietoa tuottavat koejärjestelyt vaativat paljon resursseja. Metsäalueet ovat spatiaalisesti hyvin vaihtelevia verrattuna peltoympäristöön: kiertoajat ovat pitkiä, toimenpiteitä edeltävä maaperä on häiriintymätöntä, ja toimenpiteiden vaikutus kestää useita vuosia. Metsäalueilla koejärjestely pyritään usein rakentamaan keskenään vertailukelpoisten rinnakkaiskoealojen varaan. Ennen käsittelyä joudutaan varmistamaan, että alueiden hydrologia toimii samalla tavalla. Maataloudessa mittaustietoa voidaan kerätä erilaisilla lohkokokeilla, joissa veden kulkua hallitaan pinta- ja salaojien avulla. Usein koejärjestely pyritään järjestämään sellaiseksi, että maaperä, pellon pinnan kaltevuudet tai maanpinnan muokkaukset tai muut käsittelyt vaihtelevat koelohkojen välillä.

#### 14.4.5 Esimerkkejä paikkatiedon käytöstä huuhtoutuma- ja kuormitusmalleissa

Kuormitus- ja huuhtoumamallit yhdistelevät tietoa hajakuormituksen lähteiden sijainneista ja ravinteiden kulkeutumisesta veden mukana, ja hyödyntävät kentällä tehtyjä mittauksia kuormituksesta. Malleja voidaan käyttää esimerkiksi ennakoimaan valuma-alueen tai ilmaston muutoksen vaikutusta kuormitukseen, tai etsimään tehokkaimpia tapoja vesiensuojelun toteuttamiseen. Mallien avulla on myös mahdollista arvioida kuormituksen spatiaalista jakaantumista valuma-alueen sisällä, minkä mittaaminen on erittäin työlästä tai mahdotonta. FLUSH (kuva 14.12) on numeerinen malli, jolla voidaan kuvata veden virtausta ja eroosiota salaojitetulla savipellolla. Malli kuvaa maaperässä liikkuvaa vettä kolmiulotteisesti ja pintavirtailua kaksiulotteisesti, ja sillä voidaan kasvukauden lisäksi simuloida maan jäätymistä ja lumen kerääntymistä pellolla. Eroosion lisäksi mallilla voidaan arvioida ravinteiden kulkeutumista maaperässä. Malli ottaa paikkatietona huomioon mallinnusalueen rajat, maalajialueet, ojat ja salaojat, korkeusmallin sekä viljelyalueen. Laskentaintensiivinen malli soveltuu veden virtauksen ja eroosion mallinnukseen peltolohkon mittakaavassa.



Kuva 14.12. FLUSH-mallilla laskettu pintavirtailun a) maksiminopeus (m s<sup>-1</sup>) ja keskinopeus (m s<sup>-1</sup>) Vihdis-sä Hovin koepellolla 2.9.–24.11.2010. b) kuvassa näkyvät mallinnuksessa käytetyt maaperäalueet, joiden ominaisuudet on määritelty kuvassa näkyvien näytepisteiden mittauksista. Kuva: Riikka Nousiainen, MTT

Universal Soil Loss Equation USLE sekä sen uudistettu versio RUSLE (kuva 14.13) kuvaavat maatalousmaan eroosiota rasterilaskentaan hyvin soveltuvan mallin avulla. RUSLEssa otetaan huomioon rinteiden jyrkkyys ja pituus, maaperä, sadanta, maanpeite (kasvilaji) ja muokkaustapa. Myös eroosion estotoimenpiteet, kuten suojakaistat, voidaan ottaa huomioon. Mallin käytöstä on kokemuksia eri mittakaavoissa lohkoktasolta koko Itämeren valuma-alueen kattavaan malliin.

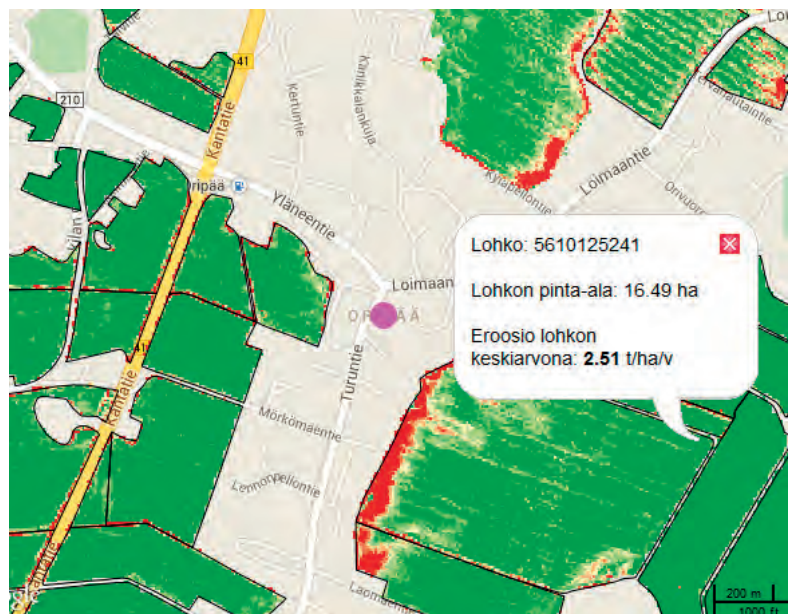
SWAT on Yhdysvalloissa kehitetty valuma-aluepohjainen malli, jolla simuloidaan vuorokauden aika-askeleella ravinteiden ja kiintoaineksen huuhtoutumista. Mallin lähtötietoina käytetään karttapohjaista aineistoa: korkeusmallia, maaperä-, ja maankäyttöaineistoja. Näiden pohjalta muodostetaan alueen uoma- ja osavaluma-alueverkosto. SWAT on työkalu suurehkojen valuma-alueiden valunnan, eroosion ja ravinnehuuhtoutumien arviointiin sekä valuma-alueella tehtävien toimenpiteiden vaikutusten vertailuun. SWAT-mallin voi asentaa esimerkiksi ESRI:n ArcGis-ohjelmaan.

Metsäalueilla tapahtuva ravinteiden huuhtoutumista varten on kehitetty omia malleja. FEMMAon pienille valuma-alueille soveltuva

malli, jolla voidaan simuloida erilaisten hakkuutapojen vaikutuksia hakkuualueen vesi- ja typpikiertoon. KALLE on puolestaan suurille valuma-alueille soveltuva yleistämistyökalu. KALLE on metsätalousmaalta tulevaan luonnon taustakuorman ja eri metsätaloustoimenpiteiden aiheuttaman kuormituksen lisäksi perustuva typpi- fosfori- ja kiintoainekuormituksen laskentamenetelmä. Menetelmä käyttää lähtötietoinaan toimenpiteiden pinta-aloja ja ominaiskuormituslukuja, ja tuottaa kuormitusarvioita vesistöalueruuhille, vesienhoitoalueille ja koko Suomen alueelle. Koska ominaiskuormitusluvut perustuvat vesistön latvavaluma-alueilla tehtyihin mittauksiin, menetelmä ei tuota kuormitusarvioita suurten vesistöalueiden purkupisteille.

Paikkatietoaineistot ja paikkatietopohjaiset mallit voivat ohjata metsätalouden vesiensuojelun maastotyötä käytännössä, ja auttaa suuntaamaan huomiota vesiensuojelun kannalta olennaisiin seikkoihin. Esimerkiksi RL-Gis-paikkatietosovellus tukee metsäalueen kunnostusojituksen yhteydessä tehtävää virtaamanhallintaa, ja auttaa eroosioherkkien uomaosuuksien tunnistamisessa.

Kuva 14.13. WMS-palveluna verkon yli tarjottava RUSLE-eroosioriskikartta laskettuna 2 metrin ruutukokoon. Teemakartan punainen väri kertoo kohonneesta eroosioriskistä. Kuva: Harri Lilja, MTT.

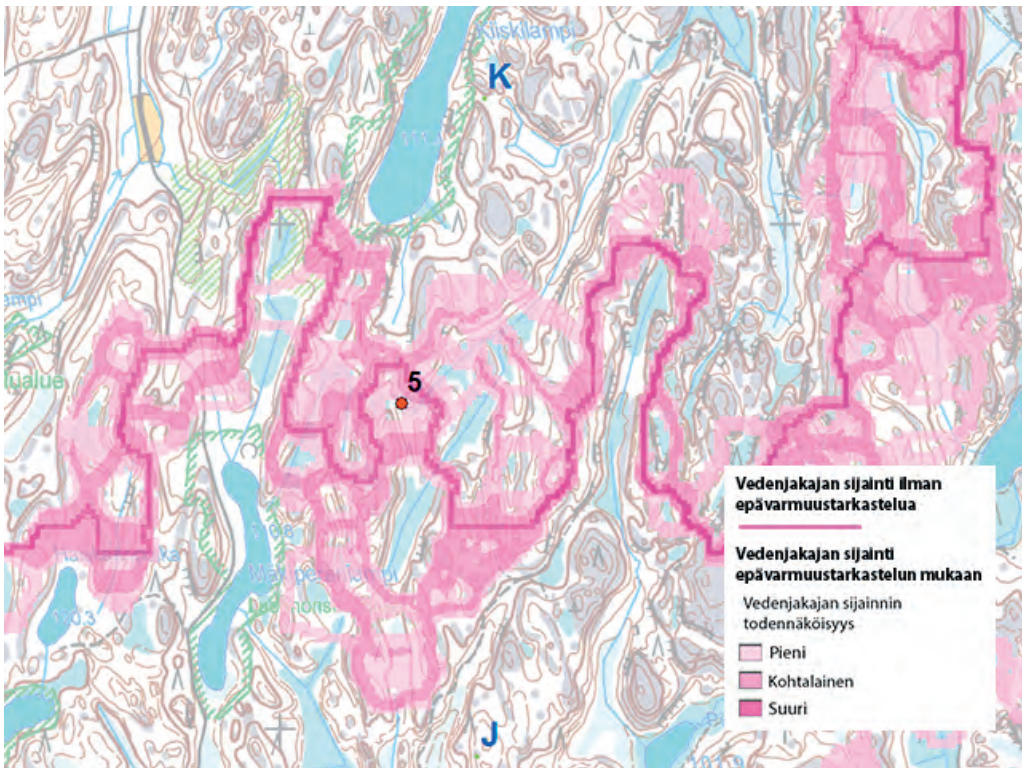


#### 14.4.6 Visualisointi

Kun paikkatietoa käytetään vesistökuormituksen tutkimuksessa ja vähentämisessä, mallitulosten visualisointi nousee tärkeään rooliin. Mallin tulosten kommunikointi päätöksentekijöille ja sidosryhmille onnistuu parhaiten karttojen tukemana. Sidosryhmät ovat usein alueensa asiantuntijoita, joilla on paljon oma-kohtaista tietoa ja kokemusta ympäristöstään. Tämän paikallistiedon integrointi mallin kehitykseen ja virheiden tehokas paikantaminen on myös mahdollista, kun altistetaan mallitulokset keskustelulle ja myös kritiikille. Tätä kautta voidaan löytää keinoja sekä parantaa mallin todenmukaisuutta että kykyä välittää tuloksia yhteisölle. Esimerkiksi peltolohkotason

RUSLE-eroosiomallia on kehitetty yhteistyössä viljelijöiden ja maanomistajien kanssa, ja tulokset olivat rohkaisevia.

Mallitulosten lisäksi visualisoinnin keinoin tulisi pystyä välittämään tietoa tulosten epävarmuudesta. Epävarmuustiedon välittäminen on erityisen tärkeää silloin, kun tuloksia käytetään päätöksenteon pohjana. Tarkkarajaiset vektoriaineistoihin perustuvat kartat voivat antaa harhaanjohtavan kuvan ilmiöön ja sen mallinnukseen liittyvästä epävarmuudesta, esimerkiksi silloin kun niillä kuvataan kuormituksen riskialueita. Epävarmuuden visualisointiin ei ole vielä vakiintuneita menetelmiä, mutta aiheeseen liittyvää tutkimusta tehdään Suomessakin. Esimerkkinä tästä on valuma-alueiden rajauksen epävarmuus (kuva 14.14).



Kuva 14.14. Valuma-alueen raja ja epävarmuustarkastelun mukainen lisätieto rajan sijainnin todennäköisyyksistä. Kuva: Ulla Pyysalo ja Juha Oksanen, Geodeettinen laitos.

## 14.5 Tulvat, tulvariskit ja jokidynamiikka

PETTERI ALHO

### 14.5.1 Johdanto

Tulvavahingot ovat kasvaneet vuosikymmenten kuluessa väestön ja toimintojen keskittyessä vesistöjen lähelle. Tulvien aiheuttamat vuotuiset rahalliset vahingot ovat olleet Euroopassa 100 miljardia euroa vuosina 1986–2006. Rahalliset vahingot yhdessä ihmishenkien menetyksien kanssa sekä kasvava yksimielisyys tulvien lisääntymisestä ja esiintymisajankohdan muutoksista ilmastonmuutoksen myötä on myös osaltaan lisännyt tulviin kohdistuvaa tutkimusta. Euroopassa tapahtuneiden tuhoisien tulvien takia on laadittu Euroopan unionin Tulvadirektiivi vuonna 2007.

Suomi voidaan jakaa kolmeen alueeseen vesistötulvien syntyvän mukaan: 1) Rannikkoalue, jossa varsin vähäjärvinen jokiuomasto laskee Itämereen. Tällä alueella tulvien syntyyn riittää lyhytkestoinen, muutaman päivän tai viikon sadejakso. Näin usein tapahtuu mm. Satakunnan ja Pohjanmaan tulvissa. 2) Järvi-Suomessa tulvatilanne vaatii tyypillisesti pidemmän sadejakson, jolloin järvien varastointikapasiteetti täyttyy ja tulvia alkaa syntyä valuma-alueelle. Myös edellisen vuoden pinta- ja pohjavesitilanteella on suuri vaikutus tämän alueen tulvien syntyyn. 3) Pohjois-Suomessa keskeisin tulvien synnyttäjä on keväinen lumen sulaminen. Lumien sulamisvedet aiheuttavat kevättulvia, joiden laajuus on riippuvainen lumipeitteen paksuudesta ja eritoten lumen vesiarvosta sekä kevään lämpötilan noususta. Pahimmat tulvat koetaan runsaslumisen talven jälkeen keväällä, jolloin on pitkään kylmää ja lämpeneminen tapahtuu nopeasti kylmän jakson jälkeen. Tässä tapauksessa vesisade nopeuttaa entisestään lumen sulamista ja voimistaa osaltaan tulvahuippua. Viimeisin merkittävä tällainen tulvavahinko koettiin Kittilässä keväällä 2005, jolloin vajaat 100 rakennusta kärsi tulvista, vanhainkoti jouduttiin evakuoimaan ja liikenne oli poikki tulvaveden noustua ajoteille. Tulvavahingot olivat tällöin miljoonaluokkaa,

kuten Pohjanmaan ja Satakunnan tulvissa syksyllä 2012.

Euroopan unionin Tulvadirektiivi antaa viitekehyksen tulvatilanteiden ennakkointiin sekä tulvaennustuksiin ja -riskien ennustuksiin. Tulvadirektiivi velvoittaa jäsenvaltion arvioimaan potentiaaliset tulva-alueensa. Suomessa tällaisia alueita on seitsemänkymmentä. Näille alueille on tehty yleispiirteinen tulvavaara- eli tulvan laajuuskartoitus. Tulvavaarakartoituksessa kartoitetaan eri toistuvuusajoilla (esim. tilastollisesti kerran 20 vuodessa tapahtuva tulva) tapahtuvien tulvien laajuudet ja syvyydet. Tulvavaarakartat laaditaan Suomessa vähintään toistuvuusajoille kerran 20, 50, 100, 250 ja 1000 vuodessa.

Tulvavaarakarttojen lisäksi on tehty tulvariskien kartoitus. Tulvariskikartoissa esitetään tulvavaarakarttojen toistuvuuksien mukaisesti esiintyviin tulviin mahdollisesti liittyvät vahingolliset seuraukset mukaan lukien seurauksista mahdollisesti kärsivien asukkaiden määrä, alueella harjoitettavan taloudellisen toiminnan tyyppi ja laitokset, jotka voivat aiheuttaa äkillistä veden tai maaperän pilaantumista tulvatilanteessa ja toisaalta seurauksista mahdollisesti kärsivät suojelualueet.

Näiden kartoitusten ja asiantuntija-arvioiden perusteella Maa- ja metsätalousministeriö on nimennyt 21 aluetta, joilla vesistöjen tai meren tulvimisesta aiheutuvia riskit ovat merkittävänä. Näistä alueista 17 sijaitsee sisämaassa vesistöjen varrella ja neljä rannikolla. Merkittäville tulvariskialueille tehdään tulvariskien hallinnan suunnitelmia. Tulvariskien hallintasuunnitelmissa on esitettävä tulvariskien hallintatavoitteet ja toimenpiteet niiden saavuttamiseksi. Suunnitelmissa käsitellään kaikkia tulvariskien hallinnan näkökohtia. Niissä keskitytään tulvien ehkäisyyn, suojeluun sekä valmiustoimiin ja otetaan huomioon myös vesistöalueen erityispiirteet.

### 14.5.2 Jokiympäristön topografia-aineiston kerääminen

Jokiympäristön topografia-aineisto on perinteisesti kerätty korkeusaineistoa aikaa vievillä

maastokartoituksilla (esim. takymetrikartoitus) tai topografikarttojen korkeuskäyristä. Näillä saadaan aikaan harvahko lähtötieto mallinnuksen pohjaksi. Viime aikoina on kuitenkin tehty kansainvälistä ja kansallista tutkimusta tarkkojen korkeusaineistojen vaikutuksista hydrauliseen mallinnukseen ja tulvakartoitukseen. Paljolti onkin siirrytty paikkatietokantojen ja kaukokartoitusaineistojen hyödyntämiseen korkeusmallien valmistamiseksi hydraulisiin mallinnuksiin, mutta näiden aineistojen tarkkuus ja laatu eivät aina sovellu tarkkaan virtavesitutkimukseen.

Uusimpia menetelmiä jokiympäristön muutostulkinnassa ja hydraulisen mallinnuksen lähtöaineistojen hankkimiseksi ovat erilaiset laserkeilaussovellukset jokipenkereiden ja tulvatasankojen kartoituksessa sekä erilaisten digitaalikuvien hyödyntäminen virtavesien syvyysmallinnuksessa. Ilmalaserkeilausmenetelmät soveltuvat hyvin kolmiulotteisen maasto- ja kohdemallin luomiseen alueille, joita ei voida kattaa nopeasti perinteisellä fotogrammetrisellä kartoituksella. Tällaisia ovat rannikko- ja muut vesialueet sekä alueet, joilla ei ole usein riittävästi tukipisteitä, näkyvyys on esteellinen tai alueiden ekosysteemi voi olla herkkä maastomittausten aiheuttamalle kuormitukselle. Laserkeilauksen etuina perinteisiin fotogrammetrisiin tai kaukokartoitusmittauksiin verrattuna on nopeus ja menetelmän vähäisempi riippuvuus sääolosuhteista, edulliset kustannukset ja peitteisellä alueella jopa dekadia parempi mittaus-tarkkuus. Ilmalaserkeilauksella saavutettava kovan maanpinnan korkeusmallin tarkkuus on yleensä 5–10 cm riippuen lentokorkeudesta ja pistetiheydestä. Peitteisessä maastossa korkeusmallin tarkkuus vaihtelee 10 ja 30 cm välillä maanpinnan peitteisyyden, kaltevuuden ja pistetiheyden funktiona.

Staattisessa maalaserkeilauksessa laserkeilain sijoitetaan staattisesti kartoituspisteelle (esim. kolmijalan varaan), josta käsin lähialueen tarkka kolmiulotteinen kartoitus suoritetaan. Maalaserkeilauksella saadaan erittäin tarkkaa maanpinta- ja kasvillisuustietoa niin jokisärkistä, törmistä kuin tulvatasangoil-

ta. Maalaserkeilauksella kohteesta saadaan suoraan runsaasti kolmiulotteisia havaintoja ilman työläitä välivaiheita ja kuvatulkin-taa. Laserkeilauksella valmistettujen maastomallien avulla pystytään kolmiulotteisesti kartoittamaan jokiuoman vedenpinnan yläpuolinen topografia ja kaikkuluotauksen tai fotogrammetrisen syvyysmallinnuksen avulla saadaan syvyystieto vedenpinnan alapuolisesta osasta. Lisäksi on hyödynnetty mobiilia maanpinnalta tapahtuvaa laserkeilausta (MLS) sekä UAV-valokuvia (eng. unmanned aerial vehicle). Mobiilin laserkeilauksen käyttökelpoisuutta on tutkittu koetöin jokitörmien ja -särkkien kartoittamisessa sekä muutostulkinnassa. Toisaalta on kehitetty UAV- ja tavanomaisiin ilmavalokuviiin pohjautuvia mallinnustekniikoita muun muassa jokiuoman syvyysmallin tekemiseen. Näillä menetelmillä pystytään kattamaan huomattavasti laajempia alueita senttimetritarkkuudella jokiympäristöstä kuin perinteisillä GPS- tai takymetrimittauksilla. Särkistä ja uomien pohjista saadaan mitattua korkeus- ja syvyystietoa tiheimmin kuin tavallisesti käytetyillä menetelmillä ja edelleen havaitsemaan sekä tulkitsemaan varsin pienipiirteisiä muutoksia särkkien pinnalla tai uoman pohjalla.

#### *14.5.3 EU:n tulvadirektiivi ja tulvakarttatuotanto Suomessa*

Tulvan laajuutta kuvaavan kartan eli tulvavaarakartan tulee esittää maantieteellinen alue, jolla tulvimisen todennäköisyys on a) vähäinen tai tulva on mahdollinen äärimmäisissä olosuhteissa, b) tulvimisen todennäköisyys on keskisuuri (1/100a) sekä c) tarpeen mukaan alueet, joilla tulvimisen todennäköisyys on korkea. Tulvavaarakarttojen tulee sisältää informaatiota tulvan laajuudesta, vedensyvyydestä tai veden korkeudesta sekä tarvittaessa tietoja virtausnopeudesta tai asiaankuuluvasta virtaamasta. Tulvavaarakartat sisältävät tietoa tulvan peittävydestä eli tietoa niistä alueista, jotka mahdollisesti peittyvät tulvaveden alle, sekä tulvan vaaran asteen tietyllä todennäköisyydellä. Tulvan peittävyys saadaan esitettyä kartoilla, kun tiedetään maanpinnan

korkeusarvot (digitaalinen korkeusmalli) sekä vedenpinnan korkeus (kuvat 14.15, 14.16). Vaaran astetta kuvataan vesisyvyydellä, virtausnopeudella tai näiden yhdistelmällä.

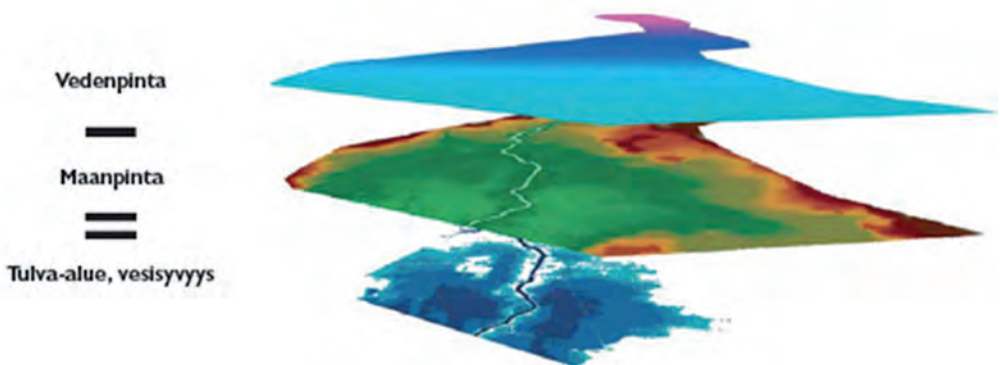
Tulvariskikarttojen tulee sisältää tulvavaarakarttojen tulvimisen todennäköisyyksillä mahdolliset vahingolliset seuraukset, kuten kärsivien asukkaiden viitteellinen määrä, alueella harjoitettava taloudellisen toiminnan tyyppi, ympäristön pilaantumista tulvatilanteessa aiheuttavat laitokset sekä muita jäsenvaltioiden oleellisena pitämiä tietoja. Tulvariskikartat sisältävät tietoa vaarassa olevasta omaisuudesta, tulva-alttiudesta sekä mahdollisista vaurioista ja menetyksistä.

Direktiivi edellyttää myös hallintasuunnitelmien laatimista määritetyille tulvariskialueille. Suunnitelmien tarkoituksena on vähentää tulvista aiheutuvia vaurioita. Tavoitteena on vähentää ihmisen terveydelle, ympäristölle, kulttuuriperinnölle ja taloudelliselle toiminnalle tulvien aiheuttamia seurauksia. Suunnitelmissa on otettava huomioon kustannukset ja hyödyt, tulvan laajuus sekä tulvan reitit ja mahdolliset pidättämisalueet, kuten luonnolliset tulvasanteet. Lisäksi tulee huomioida direktiivin sisältämät ympäristötavoitteet, maaperän ja vesivarojen käyttö sekä hoito, alueiden käytön suunnittelu, maankäyttö, luonnonsuojelu, vesiliikenne ja satamainfrastruktuuri. Hallintasuun-

nitelmien on katettava kaikki riskienhallinnan näkökulmat, kuten tulvien ehkäisy, suojele ja valmiustoimet sisältäen tulvaennusteita ja tulvavaroitusjärjestelmiä.

Direktiivi pohjautuu kokonaisvaltaiseen neliosaiseen riskin hallintastrategiaan, joka koostuu ennaltaehkäisystä, valmistelusta, vasteesta ja palautumisesta. Ennaltaehkäisyllä tarkoitetaan tässä yhteydessä muun muassa tehokasta aluesuunnittelua, tulvasuojien rakentamista ja ylläpitoa. Näiden toimien avulla pyritään välttämään tulvan aiheuttamia omaisuusvahinkoja. Jos ennaltaehkäisyn toimet pettävät turvaututaan valmistelun, vasteen ja palautumisen tarjoamiin keinoihin, kuten evakointiin, kriisikommunikaatioon, varhaisen varoituksen järjestelmiin, uudelleen rakentamiseen ja vakuutusyhtiöiden korvauksiin.

Tulvadirektiivi edellyttää jäsenmaiden suorittavan alueellaan alustavan tulvariskien arvioinnin kunkin vesipiirin alueella. Arvioinnin tulee sisältää merkittävän tulvariskin omaavien vesistöjen rajat, alueen topografian ja maankäytön esittävät kartat, kuvauksen aiemmista alueella esiintyvistä tulvista, niiden laajuudesta, reiteistä ja arvion vahingollisista vaikutuksista sekä kuvauksen aiemmin esiintyneistä merkittävistä tulvista, jos niiden toistumisella voisi olla vahingollisia seurauksia. Lisäksi arvion tulee sisältää jäsenvaltion erityistarpeista riippuen



Kuva 14.15. Tulvavaarakartoituksen periaate. Jollakin mittaus- tai mallinnusmenetelmällä määritetty vedenpinnan korkeus ja siitä interpoloitua vedenpintaa verrataan päällekkäisanalyysillä maanpintaan (10 m tai 2 m ruutukoon digitaalinen korkeusmalli). Erotuskuvasta saadaan tulvan laajuus ja syvyys (Sane ym. 2006).

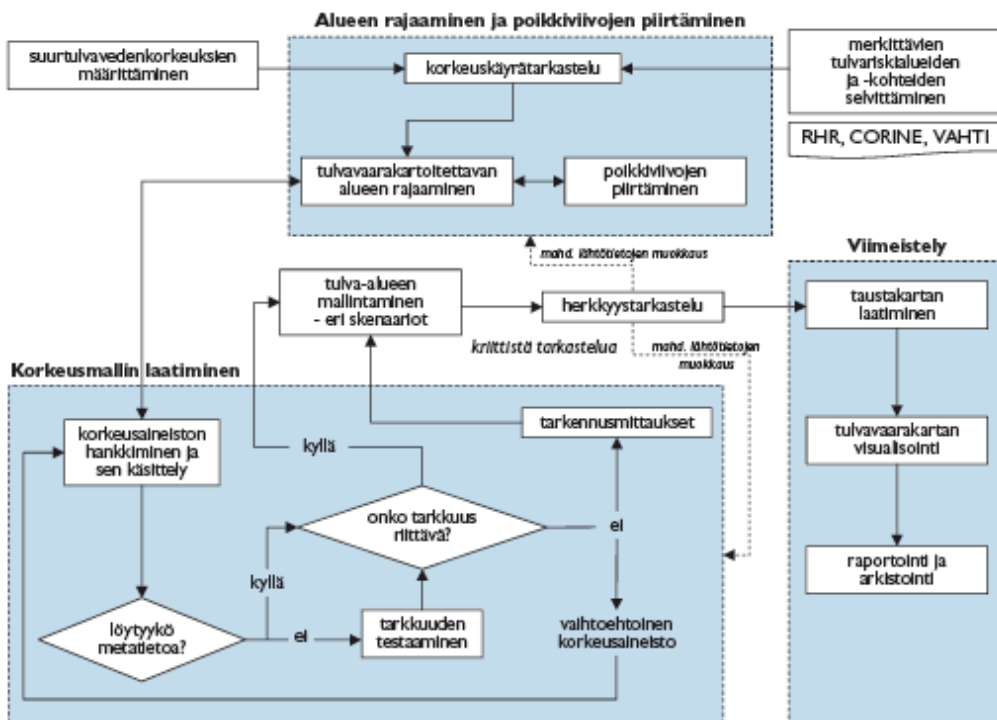
tulevien tulvien mahdolliset seuraukset ihmisen terveydelle, ympäristölle, kulttuuriperinnölle ja taloudelliselle toiminnalle.

Tulvakartoissa käytettyjä muuttujia ovat tulvan toistuvuus, laajuus, syvyys, nousunopeus, virtaamat, eteneminen, alttius ja selviämiskyky. Toistuvuudella tarkoitetaan ajanjakson pituutta, joka kuluu ennen kuin tietynsuuruinen tulva esiintyy alueella uudelleen. Tulvan laajuudella tarkoitetaan niitä maantieteellisiä alueita, jotka tulvavesi peittää tulvatilanteessa. Laajuutta kuvaavat kartat voidaan esittää erilaisilla tulvan toistuvuuden todennäköisyyksillä. Esimerkiksi kerran 100 vuodessa toistuva tulva merkitään 1/100a. Tulvan syvyyttä esittävät kartat sisältävät tietoja veden syvyydestä tietyssä sijainnissa annetulla toistuvuus todennäköisyydellä. Tulvan syvyydestä tietoja saadaan virtausmalleista (1D ja 2D), tilastollisista analyyseistä tai havainnoimalla. Tulvan etenemisellä viitataan tulvan alueelliseen leviämiseen tietyssä ajassa. Unkarin tulvakartoissa on kuvattu tulvan etene-

mistä 24 tunnin jaksoissa. Virtaamien nopeutta kuvataan tulvakartoilla silloin, kun jäsenmaat kokevat sen tarpeelliseksi.

Tulvariskikarttojen objektit, kuten tulva-alttius/haavoittuvuus kuvaavat alueiden ja kohteiden alttiutta vahingolle. Alttiudella tarkoitetaan tulvan potentiaalisia vahinkoja rakennuksille, teollisuudelle, infrastruktuurille ja maataloudelle. Alttiuden kartoittamisessa hyödynnetään erilaisia haavoittuvuudesta kertovia paikkatietoaineistoja. Selviämiskyvyllä puolestaan tarkoitetaan alueen valmiuksia palautua tulvan aiheuttamista vahingoista.

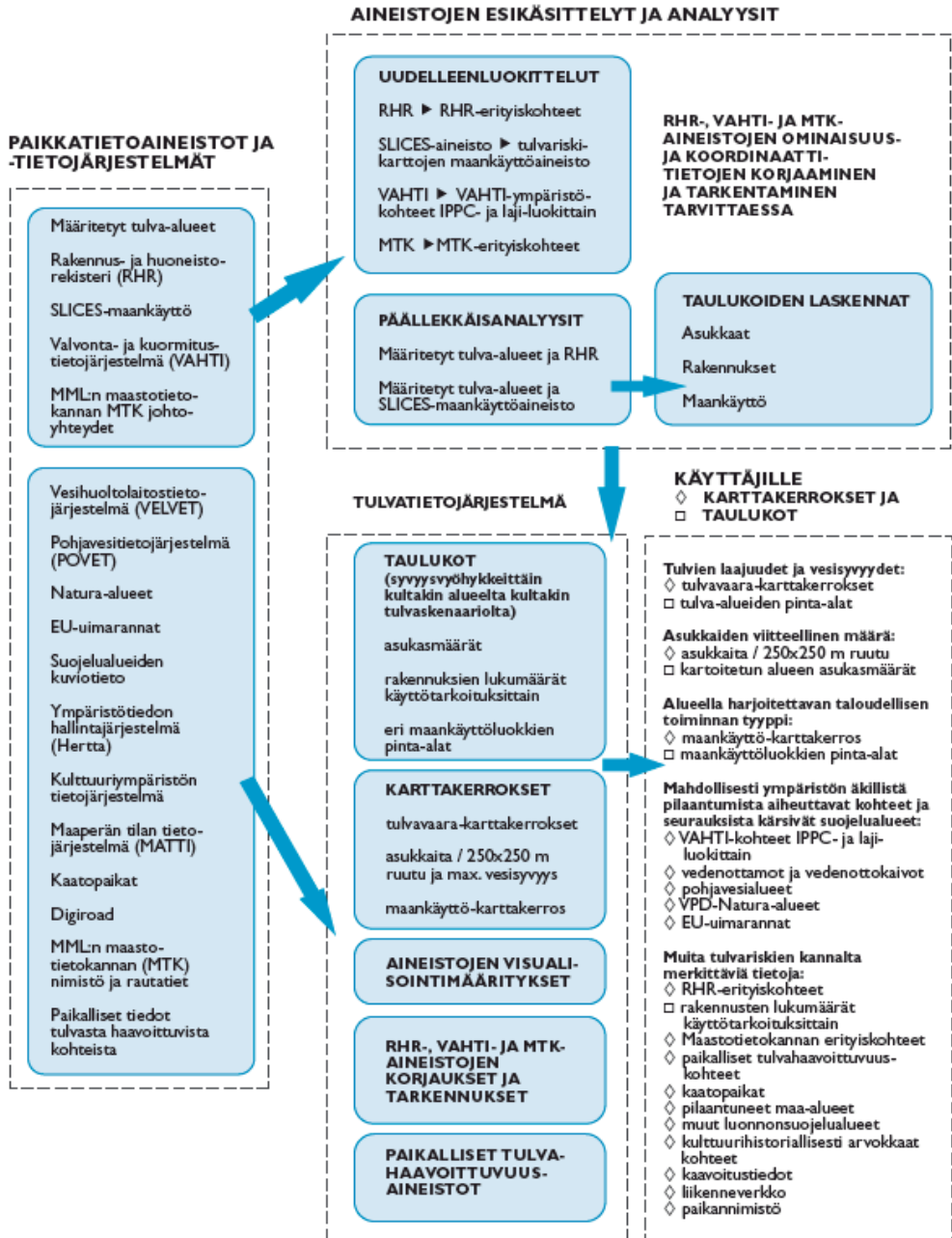
Yleisin Euroopassa laadittu tulvakarttatyyppe on tulvavaarakartta. Toistuvuusjaksot, joilla tulvalaajuuksia on kuvattu eurooppalaisissa tulvavaarakartoissa, vaihtelevat 1/20a ja 1/10 000a välillä. Tulvan laajuuden lisäksi toinen yleinen tulvakartoilla esiintyvä tulvaparametri on syvyys. Euroopan tulvakarttarjonta on kuitenkin vaihtelevaa, ja valtiot ovat eri vaiheessa tulvakarttatuotantoprosessia. Lähes kaikilla



Kuva 14.16. Tulvavaarakartoituksen työvaiheet (Alho ym. 2008).

EU:n jäsenmailla on tulvakarttoja tuotettuna jossain määrin. Myös tulvakartoituksen alueellinen kattavuus vaihtelee jäsenmaittain. Noin puolella jäsenmaista tulvakartoitus kattaa lähes

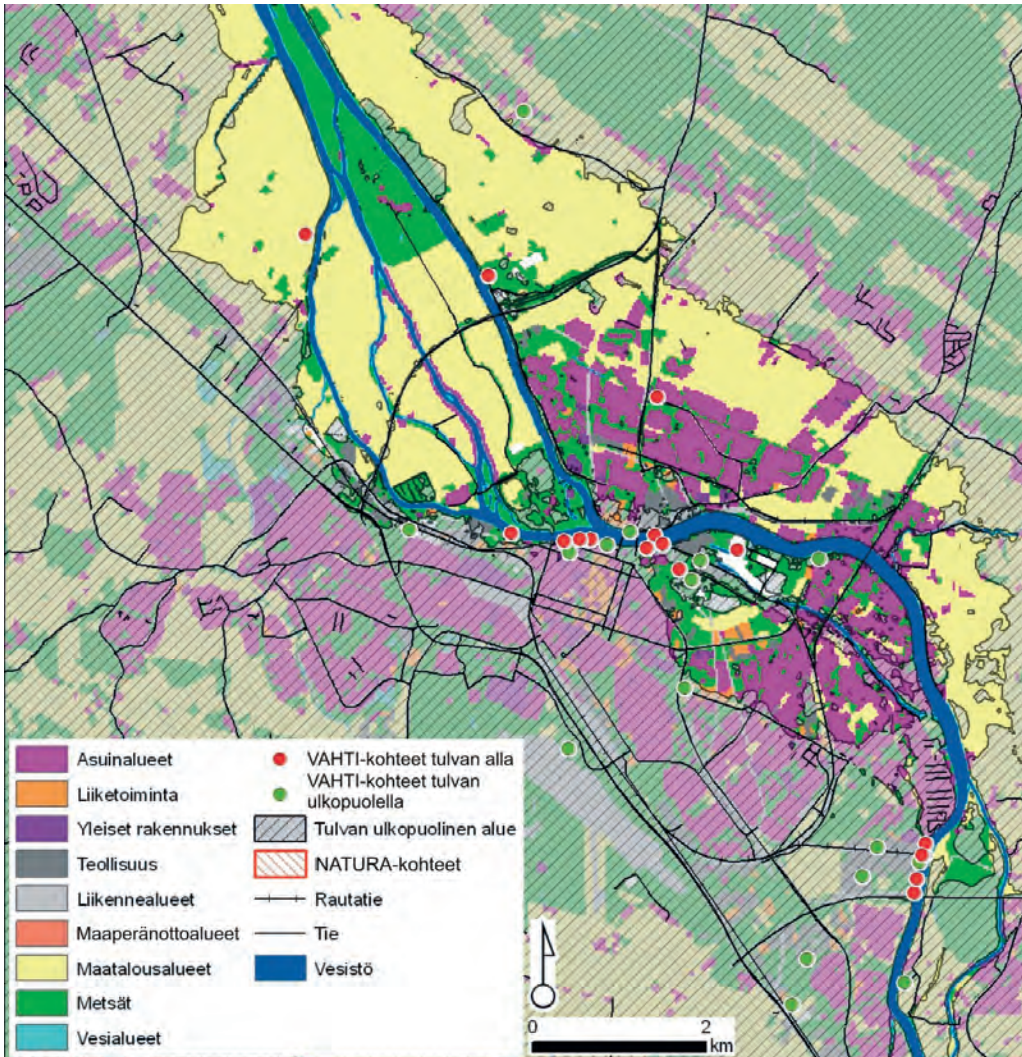
koko alueen. Monissa maissa tulvakartoituksen vastaa alueelliset hallitukset, joka lisää muun muassa karttojen ulkoasun heterogeenisuutta. Kartat vaihtelevat maittain myös sisällöllisesti



Kuva 14.17. Tulvariskikartoituksessa käytettävät paikkatietoaineistot, niiden esikäsittelyt, analyysit sekä Suomen ympäristökeskuksen hallinnoima tulvatietojärjestelmä (Alho ym. 2008).

muun muassa tulvaparametrien hyödyntämisen suhteen. Suomessa eniten laadittu tulvakarttatyyppi on vesistötulville laadittu tulvavaarakartta (kuva 14.15), jossa on kuvattu tulvan laajuus ja syvyys. Tämän lisäksi Suomessa on laadittu myös meritulvavaarakarttoja sekä karttoja jääpatojen aiheuttamista tulvavaaroista. Muut parametrit, kuten tulvan nousunopeus, virtaamat ja tulvan eteneminen ovat harvemmin käytettyjä parametreja.

Tulvariskikarttoja (kuvat 14.17, 14.18) Euroopassa on laadittu vähemmän kuin tulvavaarakarttoja tai ainakin niiden julkinen saatavuus on niukempaa. Vuonna 2011 kuudella Euroopan maalla oli valmiina varsinaisia tulvariskikarttoja, joissa yhdistyi tulvavaarakartta tulva-alttiuden ja selviämiskyvyn kanssa. Tulvadirektiivin mukaisesti tämä asia on parantunut viime vuosina.



Kuva 14.18. Esimerkki tulvariskikartasta. Tulvan laajuuden lisäksi kartassa on esitetty maankäyttö, tiestö ja NATURA-kohteet. Tulva-alueen välittömässä läheisyydessä sijaitsevat VAHTI-kohteet on analysoitu tulvan alla ja tulvan ulkopuolella oleviin kohteisiin (Käyhkö ym. 2007).

Jotkut maat ovat esittäneet tulvakartoilla tulva-alttiuden tai selviämiskyvyn yhdistämättä näitä tulvavaarakarttoihin, kuten Britannia, Romania, Slovakia. Italian, Espanjan ja Sveitsin tulvariskikartat kuvaavat tulvariskivyohtykykeitä, joissa on yhdistetty tulvan todennäköisyys maankäytön tulvahekkyyden ja – haavoittuvuuden kanssa. Tulvariskikartoista osa esittää riskit kvalitatiivisina ja osa kvantitatiivisina. Pääasiällisin kvantifioitu alttiutta kuvaava indikaattori on suorat taloudelliset vauriot, jota kuvataan veden syvyyden ja tulvasta aiheutuvien eri maankäyttötyyppien tai objekteihin kohdistuvan vaurioiden suhteella. Vain Saksasta ja Flanderista on laadittuna kvantitatiivisia riskikarttoja. Sachsenissa vauriot €/alue on arvioitu äärimmäisen tulvan toistuvuudelle ja Flanderissa €/alue/vuosi useille eri toistuvuusjaksoille.

Suomen ympäristökeskus on tuottanut tulvariskikarttoja yhdistämällä laaditut tulvavaarakartat erilaisten paikkatietoaineistojen kanssa, joiden avulla kuvataan haavoittuvuutta eli alttiutta vahingolle (Kuva 14.18). Suomessa tulvariskikarttojen pohjalla käytetyt paikkatietoaineistot ovat moninaiset ja peräisin useilta eri tuottajilta.

Slices-maankäyttöpaikkatietoaineisto tarjoaa useita maankäytön luokkia muun muassa rakennetun ympäristön alueelta tulvariskikarttojen aineistoksi. Aineisto kuvaa taloudellisen toiminnan tyyppiä. Rakennus- ja huoneistorekisteristä (RHR) saadaan laskettua asukkaiden viitteellinen määrä. Se sisältää tietoja rakennusluvan vaatineiden asunnoiden sijainneista, käyttötarkoituksesta, pinta-alasta, varustustasosta, asukasmäärästä, asukkaiden iästä ja sukupuolesta. Asukasmäärän lisäksi rekisteristä saadaan tietoa kohteista, jotka ovat erityisen haavoittuvia tulvatilanteissa, kuten terveydenhuoltorakennukset, päiväkodit ja paloasemat. VAHTI- eli valvonta- kuormitustietojärjestelmästä saadaan tietoa kohteista, jotka tulvatilanteessa saattavat aiheuttaa ympäristön pilaantumista. VELVET eli Vesihuoltolaitosten tietojärjestelmä tarjoaa aineistoa ihmisten hyödyntämistä vesimuodostumista. Natura-alueet kuvaavat tulvadirektiivin määrittämiä tulvariskikartoilla esitettäviä elinympäristöjä, joilla veden tilan ylläpito tai parantaminen on tärkeää elinympäristön suojelun kannalta.



## Lähteet

- Alho, P., Sane, M., Lotsari, E., Lehtiö, L., Huokuna, M. & Käyhkö, J. 2008. Tulvariskien kartoittaminen, Ympäristöhallinnon ohjeita 2, 99 s. 952-11-3212-4, SYKE, Helsinki.
- Anttila, P. 2002. Updating stand level inventory data applying growth models and visual interpretation of aerial photographs. *Silva Fennica* 36(2): 549–560.
- Aronoff, S. 1991. Geographic information system: A management perspective.
- Bader, M. & Weibel, R. 1997. Detecting and resolving size and proximity conflicts in the Generalisation of polygonal maps. *Proceedings of the 18th International Cartographic Conference, Stockholm*. s. 1525–1532.
- Bernhardsen, T. 1992. Geographic Information Systems. VIAK IT and Norwegian Mapping Authority. 318 s.
- Berry, J. 1993. Cartographic modeling: the analytical capabilities of GIS. *Julkaisussa: Goodchild, M., Parks, B. ja Steyaert, L. (toim.). Environmental modeling with GIS. Oxford university press. New York.* s. 58–74.
- Berry, J. 1995. Spatial reasoning for effective GIS. *Colorado*. 208 s.
- Bonham-Carter, G. 1996. Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS. *Computer methods in the geosciences volume 13. Pergamon. Ottawa.* 398 s.
- Burrough, P. A. 1987. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. *Monographs on Soil and Resources Survey No 12. Oxford Science Publications.* 194 s.
- Cressie, N. & Hawkins, D. M. 1980. Robust estimation of the variogram: I. *Mathematical Geology* 12(2): 115–125.
- Cressie, N. 1991. *Statistics for Spatial Data. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. John Wiley & Sons, New York, NY.*
- Dana, P.H. 1997. Map projection overview. The Geographer's Craft Project, Department of Geography. The University of Texas at Austin.
- Dana, P.H. 1998. Geodetic Datum overview. The Geographer's Craft Project, Department of Geography. The University of Texas at Austin.
- Donner, J. 1995. DGPS kartoituksessa ja DGPS/RDS-järjestelmä. *Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, maanmittaus- ja rakennustekniikan osasto, maanmittaustekniikan laitos.*
- Douglas, D. & Peucker, T. 1973. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *The Canadian Cartographer* 10: 112–122.
- Dralle, K. & Rudemo, M. 1996. Stem number estimation by kernel smoothing of aerial photos. *Canadian Journal of Forest Research* 26: 1228–1236.
- Haapanen, R. 2014. Feature extraction and selection in remote sensing-aided forest inventory. *Dissertationes Forestales* 181. 44 p. <http://dx.doi.org/10.14214/df.181>
- Henttonen, H. 1991. Kriging in interpolating july mean temperatures and precipitation sums. *Reports from the department of statistics university of Jyväskylä No. 12:42.*
- Holopainen, M. 1998. Forest habitat mapping by means of digitized aerial photographs and multispectral airborne measurements. *Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja* 18. Väitöskirja.
- Holopainen, M. & Lukkarinen, E. 1994. Digitaalisten ilmakuvien käyttö metsävarojen inventoinnissa. *University of Helsinki, Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja* 4.
- Holopainen, M., Lukkarinen, E. & Hyyppä, J. 2000. Metsän kartoitus lentokoneesta. *Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja* 26.
- Holopainen, M., Tuominen, S., Karjalainen, M., Hyyppä, J., Hyyppä, H., Vastaranta, M., Hujala, T. & Tokola, T. 2009. Korkearesoluutioisten E-SAR -tutkakuvien tarkkuus

- puustotunnusten koealaston estimoinnissa. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009: 309–323.
- Holopainen, M., Haapanen, R., Karjalainen, M., Vastaranta, M., Hyypä, J., Yu, X., Tuominen, S. & Hyypä, H. 2010a. Comparing accuracy of airborne laser scanning and TerraSAR-X radar images in the estimation of plot-level forest variables. *Remote Sensing* 2: 432–445. <http://dx.doi.org/10.3390/rs2020432>
- Holopainen, M., Vastaranta, M., Rasinmäki, J., Kalliovirta, J., Mäkinen, A., Haapanen, R., Melkas, T., Yu, X. & Hyypä, J. 2010b. Uncertainty in timber assortment estimates predicted from forest inventory data. *European Journal of Forest Research* 129: 1131–1142. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-010-0401-4>
- Holopainen, M., Vastaranta, M., Yu, X., Haapanen, R., Hyypä, J., Kaartinen, H., Viitala, R. & Hyypä, H. 2010c. Site type estimation using airborne laser scanning and stand register data. *The Photogrammetric Journal of Finland* 22(1): 16–32.
- Holopainen, M., Vastaranta, M. & Hyypä, J. 2014. Outlook for the next generation's precision forestry in Finland. *Forests* 5(7): 1682–1694. <http://dx.doi.org/10.3390/f5071682>
- Holopainen, M., Vastaranta, M., Karjalainen, M., Karila, K., Kaasalainen, S., Honkavaara, E. & Hyypä, J. 2015. Forest inventory attribute estimation using airborne laser scanning, aerial stereo imagery, radargrammetry and interferometry – Finnish experiences from the 3D techniques. Teoksessa: *Proceedings of PIA15 & HRIGI15 conference*, 25–27 March, Munich, Germany.
- Hovi, A. & Korpela, I. 2014. Real and simulated waveform-recording Lidar data in juvenile boreal forest vegetation. *Remote Sensing of Environment* 140: 665–678.
- Hyvönen, P. 2007. The updating of forest resource data for management planning for privately owned forests in Finland. *Disertationes Forestales* 38. 40 s.
- Hyypä, J. & Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16: 27–42.
- Hyypä, J. & Hyypä, J., 1999. Comparing the accuracy of laser scanner with other optical remote sensing data sources for stand attribute retrieval. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16: 5–15.
- Jaakkola, O. 1997. Quality and automatic generalization of land cover data. *Publications of the Finnish Geodetic Institute* 122. Kirkkonummi. 39 s.
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K. & Lucas, N. 2001. Using ArcGIS Geostatistical analyst. ESRI. s. 49–79.
- Jongman, R. H., ter Braak, C. J. F. & van Tongeren, O. F. R. 1987. Data analysis in community and landscape ecology. s. 217–245.
- Kalliovirta, J. & Tokola, T. 2005. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database. *Silva Fennica* 39(2): 227–248.
- Kankare, V., Rätty, M., Yu, X., Holopainen, M., Vastaranta, M., Kantola, T., Hyypä, J., Hyypä, H., Alho, P. & Viitala, R. 2013a. Single tree biomass modelling using airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 85: 66–73.
- Kankare, V., Vastaranta, M., Holopainen, M., Rätty, M., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., Alho, P. & Viitala, R. 2013b. Retrieval of forest above-ground biomass and volume with airborne scanning LiDAR. *Remote Sensing* 5: 2257–2274. <http://dx.doi.org/10.3390/rs5052257>
- Kankare, V., Niemi, M., Vastaranta, M., Holopainen, M. & Hyypä, J. 2015. Puustobiomassan kartoituksen ja seurannan kehittäminen. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2015.
- Kantola, T., Vastaranta, M., Yu, X., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., Talvitie, M., Kaasalainen, S., Solberg, S. & Hyypä, J. 2010. Classification of defoliated trees using tree-level airborne laser scanning data combined with aerial images. *Remote Sensing* 2: 2665–2679. <http://dx.doi.org/10.3390/rs2122665>

- Kainulainen, S. J. 2002. GIS-palvelinteknologian hyödyntäminen luonnonvarojen tilastollisessa tarkastelussa. Lisensiaattityö. Teknillinen korkeakoulu. 66 s.
- Kilkki, P. & Päivinen, R. 1987. Reference sample plots to combine field measurements and satellite data in forest inventory. Department of Forest Mensuration and Management, University of Helsinki, Research notes 19: 210–215.
- Kilpeläinen, T. 1997. Multiple representation and generalization of geo-databases for topographic maps. Publications of the Finnish Geodetic Institute 124. Kirkkonummi. 229 s.
- Kilpeläinen, T. 1999. The nature of generalisation. Teoksessa: Map generalization in the Nordic countries. Publications of the Finnish Geodetic Institute 99:6. Kirkkonummi. 58 s.
- Kontola, T. 1996. Satelliittipaikannusjärjestelmä ja sen hyödyntäminen metsätalouden suunnittelussa. Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto. Metsävarojen käytön laitos.
- Korpela, I. 2004. Individual tree measurements by means of digital aerial photogrammetry. PhD thesis. Silva Fennica, Monographs 3. 93 s.
- Korpela, I., Ørka, H.O., Maltamo, M., Tokola, T. & Hyypä, J. 2010. Tree species classification using airborne lidar — effects by stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization, and sensor type. *Silva Fennica* 44(2): 319–339.
- Korpela, I., Mehtätalo, L., Markelin, L., Sepänen, A. & Kangas, A. 2014. Tree species identification in aerial image data using directional reflectance signatures. *Silva Fennica* 48(3). <http://www.silvafennica.fi/pdf/article1087.pdf>
- Käyhkö, J., Alho, P. & Harilainen, L. 2007. Kansallisen tulvakartoituksen perusteet. *Vesitalous* 5/2007: 17–20.
- Laasasenaho, J. 2002. GIS data capture by using harvester mounted GPS. *Wood Wisdom loppuraportti*. s. 397–400.
- Laasasenaho, J., Koivuniemi, J., Melkas, T. & Rätty, M. 2002. Puuston mittausta etäisyyden ja kulmanmittauslaitteella. *Metsätieteen aikakauskirja* 2002 (3): 493–497.
- Lehikoinen, M. 1999. Puustotunnusten arviointi optimoidusta videokuvasta hahmontunnistusmenetelmällä. *Metsäsuunnittelun ja -ekonomian pro gradu-työ*, Joensuun yliopisto.
- Lukkala, O. J. 1929. Tutkimuksia soiden metsätaloudellisesta ojituskelpoisuudesta erityisesti kuivatuksen tehokkuutta silmälläpitäen. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 15(1). 301 s.
- Maanmittauslaitos. 1996. Paikkatietotekniikan perusteet. Paikkatietojen yhteiskäyttö – Maanmittauslaitos / Kehittämiskeskus / Paikkatietotiimi.
- Maltamo, M., Eerikäinen, K., Pitkänen, J., Hyypä, J. & Vehmas, M. 2004. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment* 90: 319–330.
- Maltamo, M., Peuhkurinen, J., Malinen, J., Vauhkonen, J., Packalén, P. & Tokola, T. 2009. Predicting tree attributes and quality characteristics of Scots pine using airborne laser scanning data. *Silva Fennica* 43(3): 507–521.
- Matheron, G. 1963. Principles of Geostatistics. *Econ. Geol.* 58: 1246–1266.
- McCauley, J. D. 1993. Semivariogram Modeling. A GRASS tutorial on s.semivar. 22 s.
- McHarg, I. 1969. Design with nature. John Wiley & Sons. 197 s.
- Melkas T., Vastaranta M., Holopainen, M., Kivilähde, J. & Merimaa M. 2009. Puun läpimitan mittauksen tarkkuus ja tehokkuus laser- ja digitaalikuvatekniikkaan perustuen. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009: 325–340.
- Miina, J. 1994. Spatial growth model for Scots pine on drained peatland. *Silva Fennica* 28(1): 15–27.
- Myers, D. E. 1991. Interpolation and estimation with spatially located data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 11: 209–228.

- Næsset, E. 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 51: 246–253.
- Næsset, E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80: 88–99.
- Ojansuu, R. & Henttonen, H. 1983. Kuu-kauden keskilämpötilan, lämpösumman ja sademäärän paikallisten arvojen johtaminen ilmatieteen laitoksen mittatiedoista. *Silva Fennica* 17(2): 143–160.
- O'Rourke, J. 1993. *Computational Geometry in C*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Packalén, P. 2009. Using airborne laser scanning data and digital aerial photographs to estimate growing stock by tree species. *Dissertationes Forestales* 77. 41 s.
- Packalén, P. & Maltamo, M. 2007. The k-MSN method in the prediction of species specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote Sensing of Environment* 109: 328–341.
- Pekkarinen, A. 2004. Image segmentation in multi-source forest inventory. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja – The Finnish Forest Research Institute, Research Papers* 926. 35 s.
- Pesonen, A., Maltamo, M. & Kangas, A. 2010. The comparison of airborne laser scanning-based probability layers as auxiliary information for assessing coarse woody debris. *International Journal of Remote Sensing* 31(5): 1245–1259.
- Peuhkurinen, J., Maltamo, M., Malinen, J., Pitkänen, J. & Packalén, P. 2007. Preharvest measurement of marked stands using airborne laser scanning. *Forest Science* 53(6): 653–661.
- Pitkänen, J. 2001. Individual tree detection in digital aerial images by combining locally adaptive binarization and local maxima methods. *Canadian Journal of Forest Research* 31 (5): 832–844.
- Poso, S., Häme, T. & Paananen, R. 1984. A method of estimating the stand characteristics of a forest compartment using satellite imagery. *Silva Fennica* 18: 261–292.
- Poutanen, M. 2000. GPS-paikanmääritys. *Tähtitieteellinen yhdistys URSA*. 218 s.
- Poutanen, M. 2014. GNSS-paikanmääritys. *Luentomoniste*. Maanmittauslaitos.
- Rautiainen, M. 2005. The spectral signature of coniferous forests: the role of stand structure and leaf area index. *Väitöskirja*. Helsingin yliopisto, metsäekologian laitos.
- Reisinger, T. & Kennedy, D. 1990. A spatial decision support system for opportunity area analysis on the Jefferson national forest. *GIS/LIS '90 proceedings*. s.733–740.
- Riitters, K. H., O'Neill, R. V., Hunsaker, C. T., Wickham, J. D., Yankee, D. H., Timmins, S. P., Jones, K. B. & Jackson, B. L. 1995. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology* 10: 23–39.
- Ripley, B. D. 1981. *Spatial Statistic*. Wiley series in probability and mathematical statistics. New York. s. 28–77.
- Robinson, J. E. 1975. *Frequency Analysis, Sampling and Errors in Spatial data*. Teoksessa: Davis, J. C. ja McCullagh, M. J. (toim.). *Display and Analysis of Spatial Data*. Library of Congress Cataloging in Publication Data: NATO Advanced Study Institute on Display and Analysis Spatial Data, Nottingham, England. s. 78–95.
- Solberg, S., Næsset, E., Hanssen, K.H. & Christiansen, E. 2006. Mapping defoliation during a severe insect attack on Scots pine using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 102: 364–376.
- Solberg, S., Brunner, A., Hanssen, K., H., Lange, H., Næsset, E., Rautiainen, M. & Stenberg, P. 2009. Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 113(11): 2317–2327.
- Saarinen, N., Vastaranta, M., Honkavaara, E., Litkey, P., Wulder, M.A., White, J.C., Holopainen, M. & Hyypä, J. 2015. Mapping the risk of forest wind damage using airborne laser scanning. Submitted Manuscript.

- Sane, M., Alho, P., Huokuna, M., Selin, M. & Käyhkö, J. 2006. Opas yleispiirteisen tulvavaarakartoituksen laatimiseen. Ympäristöopas 127, 73 s. ISBN 978-ISBN-952-11-2162-SYKE, Helsinki.
- Seppälä, K. 1969. Kuusen ja männyn kasvun kehitys ojitetuilla turvemaidella. *Acta Forestalia Fennica* 93. 88 s.
- Shaw, D. & Atkinson, S. 1988. GIS applications for golden-cheeked warbler habitat description. GIS/LIS '88 proceedings. s. 401–406.
- Shea, K.S. & McMaster, R.B. 1989. Cartographic Generalisation in a Digital Environment: When and How to Generalise, AUTO-CARTO 9, Proceedings of 9th International Symposium on Computer – Assisted Cartography, Baltimore. s. 56–67.
- Star, J. & Estes, J. 1990. Geographic Information Systems – An Introduction. Prentice Hall. 303 s.
- Steyaert, L. 1993. A perspective on the state of environmental simulation modeling. Julkaisussa: Goodchild, M., Parks, B. ja Steyaert, L. (toim.). Environmental modeling with GIS. Oxford university press. New York. s. 16–30.
- Store, R. 1996. Maiseman huomioonottavan metsikkökuvioinnin tuottaminen paikkatietojärjestelmällä. *Folia Forestalia* 3: 245–262.
- Tokola, T. 1988. Satelliittikuvien käyttö koelaotantaan perustuvassa suuralueiden inventoinnissa. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Pro gradu -tutkielma. 72 s.
- Tokola, T. & Heikkilä, J. 1995. Satelliittikuvainventoinnin puuston tilavuusestimaattien luotettavuus tilatasolla. Research meeting of Forest Research Institute, North Karelia, Finland. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 568: 23–35.
- Tokola, T., Soimasuo, J., Turkia, A., Talkkari, A., Store, R. & Uuttera, J. 2000. Metsät paikkatietojärjestelmissä. *Silva Carelica* 33. 111 s.
- Tokola, T., Letoan, T., Poncet, F., V., Tuominen, S. & Holopainen, M. 2007. Forest Reconnaissance Surveys: Comparison of estimates based on simulated TerraSar, and optical data. *The Photogrammetric Journal of Finland* 20: 64–79.
- Tomlin, D. 1990. Geographic information systems and cartographic modeling. Prentice Hall. 249 s.
- Tomppo, E. 1990. Satellite image based national forest inventory of Finland. *Photogrammetric Journal of Finland* 12(1): 115–120.
- Tomppo, E. 2006. The Finnish Multi-Source National Forest Inventory – small area estimation and map production. Teoksessa: Kangas, A. & Maltamo, M. (toim.) 2006. Forest Inventory – Methodology and Applications. Springer Science & Business Media, Dordrecht, s. 195–224.
- Tuominen, S. 2007. Estimation of local forest attributes, utilizing two-phase sampling and auxiliary data. *Dissertationes Forestales* 41. 46 s.
- Tuominen, S., Holopainen, M. & Poso, S. 2006. Multiphase sampling. Teoksessa: Kangas, A. & Maltamo, M. (toim.), Forest Inventory – Methodology and Applications. Springer Science & Business Media, Dordrecht, s. 235–252.
- UNIRAS AGL/INTERPOLATIONS Manual. 1992. Second Edition. Uniras A/S, Söborg. 199 s.
- Vastaranta, M., Korpela, I., Uotila, A., Hovi, A. & Holopainen, M. 2012. Mapping of snow-damaged trees in bi-temporal airborne LiDAR data. *European Journal of Forest Research* 131: 1217–1228. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-011-0593-2>
- Vastaranta, M., Wulder, M. A., White, J., Pekkarinen, A., Tuominen, S., Ginzler, C., Kankare, V., Holopainen, M., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2013. Airborne laser scanning and digital stereo imagery measures of forest structure: Comparative results and implications to forest mapping and inventory update. *Canadian Journal of Remote Sensing* 39(5): 382–395.
- Vastaranta, M., Holopainen, M., Karjalainen, M., Kankare, V., Hyypä, J. & Kaasalainen, S. 2014a. TerraSAR-X stereo SAR and airborne scanning LiDAR height metrics

- in imputation of forest above-ground biomass and stem volume. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52(2): 1197–1204.
- Vastaranta, M., Niemi, M., Karjalainen, M., Peuhkurinen, J., Kankare, V., Hyypä, J. & Holopainen, M. 2014b. Prediction of forest stand attributes using terraSAR-X stereo imagery. *Remote Sensing* 6: 3227–3246. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6043227>
- Vastaranta, M., Saarinen, N., Kankare, V., Holopainen, M., Kaartinen, H., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2014c. Multisource single-tree inventory in the prediction of tree quality variables and logging recoveries. *Remote Sensing* 6: 3475–3491. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6043475>
- Vastaranta, M., Honkavaara, E., Saarinen, N., Holopainen, M. & Hyypä, J. 2015. Tuulija lumituhojen kartoitus ja mallinnus useampiaikaisten kaukokartoituspintamallien avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2015.
- Vauhkonen, J. 2010. Estimating single-tree attributes by airborne laser scanning: methods based on computational geometry of the 3-D point data. *Dissertationes Forestales* 104. 44s.
- Vehmas, M., Eerikäinen, K., Peuhkurinen, J., Packalén, P. & Maltamo, M. 2009. Identification of boreal forest stands with high herbaceous plant diversity using airborne laser scanning. *Forest Ecology and Management* 257(1): 46–53.
- Wadge, G., Wislocki, A. & Pearson, E. 1993. Spatial analysis in GIS for natural hazard assessment. *Julkaisussa: Goodchild, M., Parks, B. ja Steyaert, L. (toim.). Environmental modeling with GIS. Oxford university press. New York. s. 332–338.*
- Wang, G., Poso, S. & Waite, M. L. 1997. *SMI User's Guide for Forest Inventory and Monitoring. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, Publications 16. 336 s. ISBN 951-45-7841-4.*
- Yu, X. 2007. *Methods and techniques for forest change detection and growth estimation using airborne laser scanning data. Doctoral thesis. Publications of the Finnish Geodetic Institute 137. 55 s.*





## Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 7

*Publicationer vid Helsingfors universitets institution för skogsvetenskaper 7*

*University of Helsinki Department of Forest Sciences Publications 7*

Geoinformatikka, eli paikkatieto on osa ihmisten arkipäivää. Kartta- ja paikkatietopalveluihin liittyvä liiketoiminta kasvaa räjähdysmäisesti samalla, kun valtionhallintojen keräämät mittavat paikkatietoaineistot avautuvat ilmaiseen yhteiskäyttöön niin Suomessa kuin muualla maailmalla. Paikkaan sidottu tieto on myös luonnonvarojen hallinnan lähtökohta: metsiin, peltoihin ja vesistöihin liittyvät päätökset tarvitsevat tuekseen mahdollisimman tarkkaa ja ajantasaista paikkatietoa: mitä tarkempaa tietoa meillä on sitä järkevämpiä päätöksiä pystymme tekemään. Metsät ovat Suomen keskeinen luonnonvara. Näin ollen kirjamme lähtökohta on metsävarojen hallintaan liittyvät paikkatietoaineistot ja -analyysit. Vastaavia aineistoja ja analyysimenetelmiä voidaan kuitenkin hyödyntää myös muiden luonnonvarojen, kuten peltojen ja vesistöjen hallinnassa.

Oppikirjassa käydään läpi yksityiskohtaisesti paikkatiedon hankinta-, hallinta- ja analysointimenetelmät. Lisäksi esitellään luonnonvarojen hallintaan liittyviä paikkatietosovelluksia Suomessa. Kirja on tarkoitettu yliopistojen, ammattikorkeakoulujen ja luonnonvarojen hallintaan liittyvien käytännön organisaatioiden koulutusmateriaaliksi.

Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisusarjassa julkaistaan oppikirjoja sekä muuta metsätieteiden alaan liittyvää tietokirjallisuutta.

Text books and monographs on subjects related to forest sciences are published in the series 'University of Helsinki Department of Forest Sciences Publications'.

ISBN: 978-952-10-4525-7

ISSN: 1799-313X