

## Paikkatietojärjestelmät ja kaukokartoitusaineistot periglasiialisten ilmiöiden tutkimisessa

JAN HJORT<sup>1</sup>

*Maantieteen laitos, Helsingin yliopisto*

Erilaisissa spatiaalisissa tutkimuksissa (esim. Walker 1990; Lee ym. 2002) käytettävät paikkatietojärjestelmät (Geographic Information System, GIS) mahdollistavat laajojen aineistojen hallinnan, joka on yksi niiden monista eduista alueellisissa tutkimuksissa. Yhdistämällä kaukokartoitusaineistoja muiden mitattujen ja kerättyjen tietojen kanssa saadaan luotua laajoja paikkaan sidottuja aineistoja. Tutkimusongelmien ratkaisu ja uuden tiedon tuottaminen vaativat sopivat menetelmät aineistojen käsittelyyn. Paikkatietojärjestelmät ohjelmistoinen tarjoavat useita työkaluja erilaisten tutkimusaineistojen yhdistelyyn ja analysointiin (Walsh ym. 1998: 184).

Tässä kirjoituksessa esittelen paikkatietojärjestelmien ja kaukokartoitusaineistojen käyttöä periglasiialisten ilmiöiden karttoitus- ja mallinnustutkimuksissa. Periglasiialinen tutkimuskenttä on laaja ja vain tietyissä teemoissa voidaan hyödyntää mainittuja menetelmiä ja aineistoja. Katsauksen päähuomio on vuoristoalueiden ikiroutatutkimuksissa, joita on tehty viime vuosina muun muassa PACE (Permafrost and Climate in Europe) -projektissa (ks. esim. Harris 2001). Nämä alueet ovat alttiita ympäristömuutoksille, joita ilmastomalleilla ennustettu ilmaston lämpeneminen toisi tullessaan (esim. Beniston ym. 1997; Degue ym. 1998; Harris ym. 2001). Muutokset vuoristoalueilla voivat johtaa ympäristöhasardeihin, jotka vaikuttaisivat myös ihmisiin.

### Periglasiialiset alueet ja ilmiöt

Periglasiialiset alueet ovat ilmastollisesti kylmiä alueita, joilla esiintyvistä prosesseista tärkein on maan jäätyminen ja sulaminen eli routatoiminta. Ensimmäisenä termiä *periglasiiaali* käytti von Łoziński vuonna 1909 (Washburn 1979: 2). Hän kuvasi termillä ilmastoa ja sen aiheuttamia muodostumia pleistoseenisen jäänreunan edessä. Myöhem-

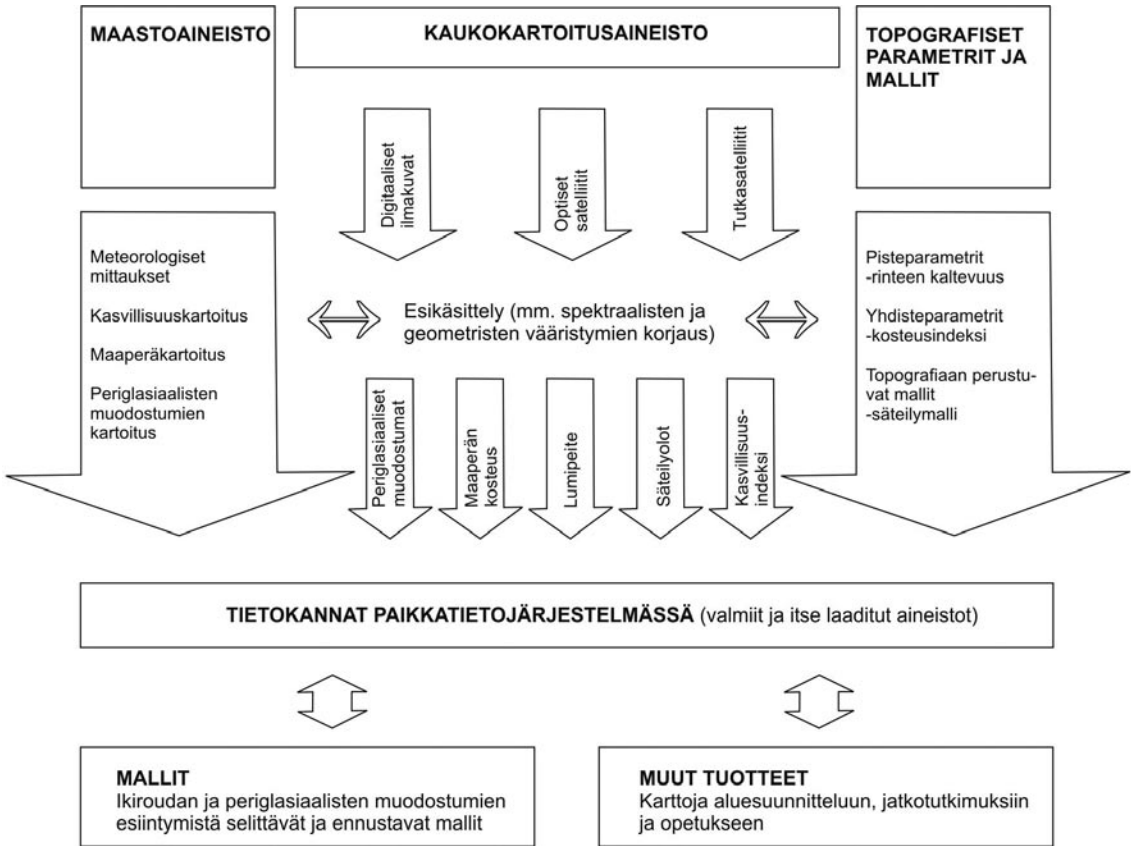
min periglasiialisia alueita on määritelty vaihtelevin kriteerein (Barsch 1993: 142–145). Yleisesti on hyväksytty määritelmä, jonka mukaan ne ovat jäätömiä kylmän ilmaston alueita, joissa periglasiialiset prosessit toimivat intensiivisesti (esim. Ballantyne & Harris 1994: 3). Tällaisten olosuhteiden arvioidaan vallitsevan jopa viidenneksellä maapallon maapinta-alasta (French & Karte 1988: 465), joten kyse on merkittävästä ympäristöalueesta.

Periglasiialisiin ilmiöihin vaikuttavia tekijöitä ovat ilmasto, topografia, kiviaines, maaperän kosteusolot, kasvillisuus, ihminen ja aika (Washburn 1979: 10–17). Maa voi jäätyä kausittaisesti, kuten yleensä Suomessa, tai olla pysyvästi jäässä eli ikiroudassa. Yleisen määritelmän mukaan ikiroudalla tarkoitetaan maa- tai kallioperän lämpötilaa, joka on vähintään kaksi vuotta alle 0 celsiusasteessa (Williams & Smith 1989: 12). Periglasiialisilla alueilla toimivat prosessit synnyttävät erilaisia muodostumia. Selkeimpiä prosessit ja muodostumat ovat ikirouta-alueilla. Kattavan kuvan erilaisista periglasiialisista ilmiöistä saa Washburnin (1979) geokryologian perusteoksesta. Katsauksia Suomen periglasiialisiin ilmiöihin ja tutkimuksiin ovat tehneet muun muassa Okko (1954), Aartolahti (1980), Kejonen (1997) ja Sepälä (1997a, 1997b).

### Miksi käyttää paikkatietojärjestelmiä ja kaukokartoitusaineistoja periglasiialisissa tutkimuksissa?

Paikkatietojärjestelmät ja kaukokartoitusaineistot liittyvät läheisesti toisiinsa ja niiden yhteiskäyttöä koituu synenergiatua (esim. Walsh ym. 1998: 183). Kaukokartoituksella hankitaan tietoa tutkimuksiin ja siten myös paikkatietoanalyysiin. Vastaavasti GIS- ja maastoaineistoja käytetään kaukokartoitusaineistojen prosessoinnissa ja varsinaisten tutkimuskäyttöön soveltuvien karttatasojen laadinnassa (kuva 1). Kaukokartoitusaineistot, etenkin digitaaliset, tarjoavat monia etuja mutta myös rajoitteita. Aineistojen spatiaalinen ja temporaalinen

<sup>1</sup> <jan.hjort@helsinki.fi>



Kuva 1. Maastotietojen, kaukokartoitusaineistojen ja topografisten parametrien yhdistäminen paikkatietojärjestelmässä ja paikkatietoaineistojen käyttö tutkimuksissa (Etzelmüllerin ym. (2001) kuvaa 1 mukailten).

erotuskyky ei aina riitä periglaciaalisten ilmiöiden tutkimiseen. Kaukokartoitustekniikoiden etuna onkin laajojen ja harvaan asuttujen alueiden kustannustehokas kartoitus. Myös digitaalisten aineistojen monipuolisuus ja muokattavuus kannustavat käyttämään niitä. GIS-menetelmät ja kaukokartoitusaineistot eivät vähennä perinteisten geomorfologisten tutkimusmenetelmien merkitystä, vaan uudet tekniikat laajentavat tutkimuskenttää helpottamalla tutkimusta eri mittakaavoissa ja tuomalla mukanaan uusia mallinnusmenetelmiä (esim. Keller 1992; Etzelmüller ym. 1998).

#### Kaukokartoituksella ja korkeusmalleilta tietoa ilmiöiden tutkimiseen

Kaukokartoitus on keskeinen menetelmä kerätessä alueellista tietoa periglaciaalisiin tutkimuksiin (kuva 1). Tässä kappaleessa tarkastelen optisten satelliittisensorien keräämän tiedon ja ilmakuvien käyttöä periglaciaalisten ilmiöiden tutkimisessa. Kaukokartoitettua tietoa saadaan myös

tutkimuksilla ja geofysikaalisilla luotauksilla, mutta tässä yhteydessä en paneudu näihin menetelmiin (ks. esim. Massonnet & Fiegl 1998; Vonder Mühl ym. 2001). Kaukokartoitusmenetelmillä kerätään suoraa tietoa prosesseista ja muodostumista sekä epäsuoraa informaatiota ilmiöihin vaikuttavista tekijöistä. Myös digitaaliset korkeusmallit ovat tärkeitä tutkimustiedon lähteitä (esim. Etzelmüller 2000). Niistä saadaan laskettua erilaisia topografisia parametreja, joita voidaan käyttää ilmiöiden ympäristötekijöiden tutkimisessa. Yhdistelemällä korkeusmalleja ja kaukokartoitusaineistoa voidaan laatia topografiaan perustuvia säteilymalleja, jotka ovat keskeisessä asemassa tutkittaessa vuoristoalueiden ikiroutaa (esim. Funk & Hoelzle 1992; Heggem ym. 2001). Etzelmüller ym. (2001a: 81–83) ovat laatineet kattavan yhteenvedon periglaciaalisiin tutkimuksiin soveltuvista topografisista parametreista.

Suoraa tietoa itse prosesseista ja muodostumista saadaan pääasiassa ilmakuvista, vaikka kartoitus- tutkimuksissa on käytetty satelliittikuviakin (esim.

Lewkowicz & Duguay 1999; Blake 2001). Satelliittiaineistojen käyttö edellyttää kuitenkin sitä, että tutkittavat muodostumat ovat riittävän suuria ja prosessit selkeitä. Ilmakuvista saadaan spatiaalisesti tarkempaa informaatiota. Niiden avulla voidaan kartoittaa esimerkiksi kuviomaita, kivijäätiköitä ja palsasoita (esim. Svensson 1982; Kääb ym. 1997). Ilmakuvat mahdollistavat myös melko yksityiskohtaisen tutkimuksen. Esimerkiksi Kling (1996: 13–14) tuo esille mahdollisuuden käyttää mikroskooppia lajittuneiden kuviomaiden kuvio-kokojen mittaamiseen suoraan ilmakuvista. Pelkän sijainti- ja morfologiatiedon lisäksi eri-ikäisiä ilmakuvia voidaan käyttää prosessitutkimuksissa. Esimerkiksi Kaufmann (1998) ja Kääb ja Vollmer (2000) ovat käyttäneet digitaalisia ortoilmakuvia kivijäätiköiden virtaustutkimuksissa.

Satelliittisensoreilla kerätään pääasiassa epäsuoraa tietoa ilmiöistä (Etzelmüller ym. 2001b: 188). Satelliittien maastoresoluutio ei yleensä riitä ilmiöiden suoraan kartoittamiseen, mutta niillä saadaan monipuolista tietoa prosesseihin vaikuttavista tekijöistä, kuten ilmastosta, maaperästä ja sen ominaisuuksista, hydrologiasta ja kasvillisuudesta (esim. Etzelmüller ym. 2001a: 83–85). Eri-tyisesti tutkittaessa ikiroutaa joudutaan turvautumaan epäsuoraan tietoon, koska ikiroudan esiintymistä ei voida mitata suoraan satelliittisensoreilla (Hoelzle ym. 2001: 61).

Ilmastotietojen kerääminen perinteisesti maastossa mittaamalla on hidasta ja tuloksena saadaan vain melko paikallista tietoa. Meteorologisia mitausasemia on harvassa juuri harvaan asutuilla periglasiialisilla alueilla (Seppälä & Hassinen 1997). Spatiaalisiin mallinnustutkimuksiin tarvittaisiin kuitenkin alueellisia ilmastomalleja (Etzelmüller ym. 1998: 251), joiden laadinnassa auttavat satelliittimittaukset, korkeusmallit ja GIS-ohjelmistot (esim. Lundén ym. 1997; Virtanen ym. 1998; Tveito & Førland 1999). Paikallisesti ilmastotiedoista tärkeimpiä ovat maanpinnan ja pintamaan lämpötilatiedot. Lumi on tärkeä maanpinnan lämpöoloihin vaikuttava tekijä, joten lumen esiintymisen ajallinen ja alueellinen levinneisyys on keskeinen selvityskohde (Etzelmüller ym. 2001a: 84). Lumialueiden suora tulkinta kaukokartoituskuvista on melko helppoa sekä visuaalisesti että kuva-analyyseillä, mutta lumen esiintymisalueiden ja paksuuden mallintaminen topografisesti vaihtelevilla alueilla on vaikeampaa. Lumialueiden mallinuksia ovat tehneet muun muassa Cline ym. (1998) sekä Ishikawa ja Sawagaki (2001). Clark ym. (1985) ovat tutkineet lumipeitteen paksuuden ja kasvillisuuden yhteyttä Pohjois-Suomessa Landsat-kuvista.

Maaperä ja sen ominaisuudet ovat merkittäviä prosesseihin vaikuttavia tekijöitä (Williams &

Smith 1989: 16). Etenkin maaperän kosteus ja sen alueellinen vaihtelu voivat olla jopa tärkein paikallinen tekijä (Matthews ym. 1998: 161). Maaperän kosteutta voidaan selvittää epäsuorasti sekä kaukokartoitusaineistoista että korkeusmalleista lasketavilla indekseillä. Yleisimmin on käytetty Bevenin ja Kirkbyn (1979) laatimaa kosteusindeksiä (*wetness index*).

Kasvillisuus vaikuttaa paikallislilmastoon ja maaperän kosteussuhteisiin, joten erilaisten kasvillisuusalueiden selvitys on tärkeää (esim. Washburn 1979: 17). Kasvillisuutta voidaan kartoittaa luokittelemalla kuvia erilaisiin kasvillisuusalueisiin tai laskemalla kasvillisuusindeksejä. Jälkimmäisten on katsottu korreloivan ikiroudan esiintymisen kanssa (ks. esim. Ødegård ym. 1999: 231–232; Gruber & Hoelzle 2001: 74).

### Paikkatietojärjestelmä aineistopankkina

Periglasiialiset ilmiöt ovat kompleksisia. Usein-kaan tietyn prosessin tai muodostuman alueellista esiintymistä ei voida selittää tai kuvata vain yhdellä tai muutamalla tekijällä (esim. French 1976: 4). Tämä johtaa helposti siihen, että tutkimusaineistoa kertyy paljon, etenkin tutkittaessa laajoja alueita. Paikkatietojärjestelmä toimii luontevasti tutkimustiedon tallennuksen, säilytyksen ja hallinnan keskuksena (kuva 1) (Etzelmüller ym. 2001a: 80; Harris ym. 2001: 151). Kaukokartoitettujen ja itse laadittujen tutkimustasojen lisäksi voidaan hyödyntää valmista tietoa, kuten digitaalisia maaperäkartoja ja hydrologisia tietoja. Myös painettuja topografisia karttoja voidaan käyttää tutkimusaineistojen laadinnassa. Jos kohdealueella ei ole saatavilla valmista korkeusmallia tai digitaalista korkeusaineistoa, voidaan korkeuskäyrät digitoida kartoilta ja sitten GIS-ohjelmistoilla laatia korkeusmalleja (esim. Lugon & Delaloye 2001: 225). Periglasiialisissa tutkimuksissa maastotyöt ovat tärkeitä. Maastotiedon yhteiskäyttö digitaalisten aineistojen kanssa vaatii kerätyn tiedon digitalisoimista, joka onnistuu paikkatieto-ohjelmistoilla. Yhdistelemällä maastotietoja, kaukokartoitusaineistoja ja topografisia malleja saadaan laadittua monipuolisempia ja tarkoituksenmukaisempia aineistotasoja erimittakaavaisiin tutkimuksiin (kuva 1).

### Periglasiialisten ilmiöiden kartoitus ja mallinnus

GIS- ja kaukokartoitusohjelmistoja on käytetty mallintamiseen tarvittavien tekijöiden keräämiseen (esim. Tanarro ym. 2001) ja kartoitus- ja mallinnustulosten kartografiseen esittämiseen (esim. Salvatore 2001; Lambiel & Reynard 2001). Useimmissa

tutkimuksissa on keskitytty ikiroudan esiintymisen mallintamiseen (Leverington & Duguay 1997; Li ym. 1998; Hoelzle ym. 2001) tai ikiroutaa indikoivien muodostumien kartoittamiseen (Blake 2001; Luoto & Seppälä 2002). Harvemmin GIS-menetelmillä on tutkittu muita periglasiialisia ilmiöitä. Muista teemoista mainittakoon Siegmundin ja Hallin (2000) Etelämantereen epäsymmetristen laaksojen mallinnustutkimus ja Etzelmüllerin ym. (2001a: 87–89) rinte-prosessitutkimukset Etelä-Norjasta. Seuraavassa paneudun tarkemmin Euroopan vuoristoalueiden ikiroutakartoituksiin ja -mallinnuksiin.

### **Ikiroudan kartoitus ja mallinnus Euroopan vuoristoalueilla**

Kiinnostus vuoristoalueiden periglasiialisia ilmiöitä kohtaan on kasvanut, koska ilmaston lämpenemisen ennustetaan sulattavan muutoksille herkkää ikiroutaa ja kiihdyttävän rinte-prosesseja (Haeberli ym. 1993; Harris ym. 2001: 146–147). Rinteillä esiintyvät hasardit voivat vahingoittaa alueiden infrastruktuuria ja olla vaaraksi ihmisille (Haeberli 1992). Vuoristoalueiden olosuhteet, kuten ilmasto ja topografia, poikkeavat selkeästi polaarialueiden vastaavista (esim. Harris 1988: 383–391). Tämän vuoksi myös näiden alueiden prosessit poikkeavat enemmän tai vähemmän toisistaan. Ilmiöiden olemaisuus vaikuttaa siihen, että vuoristoalueiden ikiroudan levinneisyys on selvittettävä vastaavissa ympäristöoloissa, eikä malleja voi laatia polaarialueiden tutkimusten perusteella. Viime vuosina on tehty useita ikiroudan kartoitus- ja mallinnustutkimuksia Euroopan unionin rahoittamassa PACE-projektissa, josta saa kattavan kuvan *Permafrost and Periglacial Processes* -lehden projektia käsittelevästä teemanumerosta (Harris 2001). Myös Kansainvälinen ikiroutaseura IPA (International Permafrost Association) perusti vuonna 1998 työryhmän vuoristoalueiden ikiroudan kartoittamiseen ja mallintamiseen (Hoelzle ym. 2001: 54).

Alueellisen ikiroutamallin laadinta edellyttää tietoa ikiroudan esiintymisestä tutkimusalueella. Ikiroutaa voidaan kartoittaa kairanreikähavainnoilla, mikroilmastomittauksilla, geofysikaalisilla tutkimuksilla ja geomorfologisilla kartoituksilla. Luotettavimmat tiedot saadaan mittaamalla lämpötiloja kallioperään kairatuista rei'istä (esim. Isaksen ym. 2001) tai kartoittamalla ikiroutamuodostumia (King ym. 1992). Vuoristoalueilla on melko vähän ikiroutaan viittaavia muodostumia (Harris 1988: 398–403). Yleisimpiä ovat aktiiviset kivi-jäätiköt, joita on kartoitettu eri puolilta Eurooppaa (esim. Lieb 1998). Myös geofysikaaliset luotaukset (esim. Vonder Mühl ym. 2000) ja lämpötila-

mittaukset talvisen lumipeitteen alta (esim. Hoelzle 1992) ovat antaneet melko luotettavia tietoja ikiroudan esiintymisestä.

Ensimmäinen empiirinen ikiroudan esiintymistä ennustava malli oli Haeberlin (1975, sit. Lambiel & Reynard 2001: 220) niin kutsuttu *nyrkki-sääntömalli*, joka perustui geofysikaalisiin ja geomorfologisiin tutkimuksiin sekä lämpötilamittauksiin. 1990-luvulla yleistyi GIS-ohjelmistojen käyttö mallien laadinnassa (Keller 1992; Hoelzle & Haeberli 1995; Imhof 1996; Etzelmüller ym. 1998; Frauenfelder ym. 1998). Uusimmat ikiroudan ennustemallit on laadittu PACE-projektissa (esim. Gruber & Hoelzle 2001; Hoelzle ym. 2001). Mallit voidaan jakaa alueellisesti kalibroituhiin empiiris-tilastollisiin malleihin ja fysikaalisia tekijöitä korostaviin prosessimalleihin (Hoelzle ym. 2001: 55; Tanarro ym. 2001: 253–254). Empiiris-tilastollisilla malleilla ikiroudan esiintymistä selitetään tai ennustetaan yksinkertaisten ja useimmiten epäsuorien topografisten ja ilmastollisten tekijöiden avulla (esim. Keller 1992; Imhof 1996). Nämä mallit ovat kohtuullisen helposti sovellettavissa eri alueille, kunhan ne kalibroidaan kunnolla. Tarvitavat tiedot on melko helppo kerätä. Mallien yksinkertaisuus on kuitenkin myös niiden huono puoli (Hoelzle ym. 2001: 55). Prosessimalleissa pyritään paremmin huomioimaan energiavuo ikiroudan ja ilmakehän välillä (Funk & Hoelzle 1992; Hoelzle & Haeberli 1995; Gruber & Hoelzle 2001). Niissä käytettävät tiedot, kuten auringonsäteily, maanpinnan albedo ja lämmön johtuminen, ovat vaikeammin mitattavissa ja laskettavissa. Prosessimallit ovat kuitenkin huomattavasti luotettavampia kuin empiiris-tilastolliset mallit. Prosessimalleilla ikiroutaa voidaan mallintaa dynaamisena prosessina, mikä tekee malleista todenmukaisempia (Mittaz ym. 2000; Hoelzle ym. 2001: 58–59).

Vuoristoilla alueilla ikiroudan kartoittaminen on työlästä ja aikaa vievää. Ikiroudan esiintymistä pyritäänkin siksi ennustamaan erilaisilla malleilla. Niitä voidaan käyttää muun muassa rinnehasardialueiden kartoittamiseen (Harris ym. 2001) sekä menneiden ja tulevien ikiroutaolosuhteiden simuloimiseen (Qingbai ym. 2000; Frauenfelder ym. 2001; Lambiel & Reynard 2001). Esimerkiksi vuoristojen nykyinen ikirouta (lämpötila ja paksaus) ei välttämättä kuvaa nykyisiä olosuhteita, vaan holoseenin pienen jääkauden kylmää jaksoa (Hoelzle ym. 2001: 55). Tulevaisuudessa ikiroudan mallinnustutkimusten tavoitteita ovat muun muassa meteorologisten mittauksen, maastohavaintojen, kaukokartoitustietojen ja ilmastomallien yhdistäminen GIS-ympäristössä, mallien soveltuvuuden arviointi eri alueille ja eri mittakaavoihin sekä mallien laadinta arvioidun ilmastomuutoksen

vaikutusten selvittämiseksi (Etzelmüller ym. 2001b: 192; Hoelzle ym. 2001: 64).

### Yhteenvedo

Paikkatietojärjestelmien ja kaukokartoitusaineistojen käytöstä periglasiassa tutkimuksissa koituu samoja hyötyjä ja haittoja kuin yleensäkin näiden menetelmien ja aineistojen käytöstä. Rajoitukset liittyvät yleensä aineistojen laatuun, tarkkuuteen ja hintaan. Paikkatietojärjestelmät sopivat tutkimustiedon tallennukseen, käsittelyyn ja tulosten visualisointiin. Eri lähteistä, kuten maastosta ja ilmakuvista, kerättyä tietoa voidaan kätevästi yhdistää paikkatietojärjestelmissä. Käytettäessä eri tavalla koottuja aineistoja on kuitenkin tärkeää huomioida aineiston alkuperäinen tallennusmittakaava. Esimerkiksi selkeästi erimittakaavaisia aineistoja ei pitäisi käyttää samanarvoisina mallinnusmuuttujina.

Kaukokartoitusmenetelmillä saadaan alueellisesti kattavaa tietoa periglasiailisten ilmiöiden ja niihin vaikuttavien ympäristötekijöiden tutkimiseen. Ilmakuvalta saadaan spatiaalisesti tarkempaa tietoa, mutta satelliittiaineistot ovat informaationväliltään monipuolisempia. Digitaalisilta korkeusmalleilta saadaan laskettua topografisia parametreja ja -malleja, jotka ovat myös olennaisia taustatietoja ja mallinnusmuuttujia.

GIS-ohjelmistojen käyttö periglasiassa tutkimuksissa on kasvanut huomattavasti viimeisen kymmenen vuoden aikana. Tähän ovat vaikuttaneet kansainväliset tutkimusprojektit, joissa GIS-menetelmillä on ollut keskeinen rooli. Tutkimuksissa pääpaino on ollut ikiroudan levinneisyyden kartoituksella ja mallinnuksella (esim. PACE-projekti). Paikkatietojärjestelmät ja kaukokartoitusmenetelmät ovat tulevaisuudessa tärkeitä tutkittaessa periglasiailisia ilmiöitä laajemminkin kuin vain vuoristoalueiden ikiroutaan keskittyen.

Periglasiailisen tutkimuksen tarvetta ja suunta-aivoja ovat vuosien kuluessa esitelleet muun muassa French (1987), Thorn (1992), Barsch (1993) ja Seppälä (1997b). Useissa heidän esittämässään tutkimusteemoissa voitaisiin hyödyntää paikkatietojärjestelmiä ja kaukokartoitusaineistoja uuden tiedon tuottamiseen. Esimerkiksi kartoittamalla ja mallintamalla nykyään aktiivisia, epäaktiivisia ja resanttisia (vanhoja ja jo osin kuluneita ja tuhoutuneita) muodostumia voidaan selvittää menneitä ja tulevia periglasiailisia olosuhteita.

### KIRJALLISUUS

Aartolahti, T. (1980). Periglasiailisen morfologian tutkimus Suomessa. *Terra* 92: 2, 74–87.

- Ballantyne, C. K. & C. Harris (1994). *The periglacial of Great Britain*. 330 s. Cambridge University Press, Cambridge.
- Barsch, D. (1993). Periglacial geomorphology in the 21st century. *Geomorphology* 7: 1–3, 141–163.
- Beniston, M., W. Haeberli, M. Hoelzle & A. Taylor (1997). On potential use of glacier and permafrost observations for verification of climate models. *Annales of Glaciology* 25, 400–406.
- Beven, K. J. & M. J. Kirkby (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal* 24: 1, 43–69.
- Blake, J. R. (2001). Rock glacier mapping; a method utilizing enhanced TM data and GIS modeling techniques. *Geocarto International* 16: 3, 5–15.
- Clark, M. J., A. M. Gurnell, E. J. Milton, M. Seppälä & M. Kyöstiä (1985). Remotely-sensed vegetation classification as a snow depth indicator for hydrological analysis in sub-arctic Finland. *Fennia* 163: 2, 195–216.
- Cline, D. W., R. C. Bales & J. Dozier (1998). Estimating the spatial distribution of snow in mountain basin using remote sensing and energy balance modeling. *Water Resources Research* 34: 5, 1275–1285.
- Deque, M., P. Marquet & R. G. Jones (1998). Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Climate Dynamics* 14: 3, 173–189.
- Etzelmüller, B. (2000). On quantification of surface changes using grid-based digital elevation models (DEM). *Transactions in GIS* 4: 2, 129–143.
- Etzelmüller, B., I. Berthling & J. L. Sollid (1998). The distribution of permafrost in Southern Norway; a GIS approach. *Teoksessa* Lewkowicz, A. G. & M. Allard (toim.): *Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost, Collection Nordicana* 57, 251–257. Centre d'Etudes Nordiques, Université Laval, Québec.
- Etzelmüller, B., R. S. Ødegård, I. Berthling & J. L. Sollid (2001a). Terrain parameters and remote sensing data in the analysis of permafrost distribution and periglacial processes: examples from southern Norway. *Permafrost and Periglacial Processes* 12: 1, 79–92.
- Etzelmüller, B., M. Hoelzle, E. Solbjørg, F. Heggem, K. Isaksen, C. Mittaz, D. Voder Mühl, R. S. Ødegård, W. Haeberli & J. L. Sollid (2001b). Mapping and modelling the occurrence and distribution of mountain permafrost. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 55: 4, 186–194.
- Frauenfelder, R., B. Allgöwer, W. Haeberli & M. Hoelzle (1998). Permafrost investigation with GIS – a case study in the Fletschhorn area, Wallis, Swiss Alps. *Teoksessa* Lewkowicz, A. G. & M. Allard (toim.): *Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost, Collection Nordicana* 57, 291–295. Centre d'Etudes Nordiques, Université Laval, Québec.
- Frauenfelder, R., W. Haeberli, M. Hoelzle & M. Maisch (2001). Using relict rockglaciers in GIS-based modelling to reconstruct Younger Dryas permafrost distribution patterns in the Err-Julier area, Swiss Alps. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 55: 4, 195–202.

- French, H. M. (1976). *The periglacial environment*. 309 s. Longman, London.
- French, H. M. (1987). Periglacial geomorphology in North America: current research and future trends. *Progress in Physical Geography* 11: 4, 533–551.
- French, H. M. & J. Karte (1988). A periglacial overview. *Teoksessa Clark, M. J. (toim.): Advances in periglacial geomorphology*, 463–473. John Wiley & Sons, Chichester.
- Funk, M. & M. Hoelzle (1992). A model of potential direct solar radiation for investigating occurrence of mountain permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes* 3: 2, 139–142.
- Gruber, S. & M. Hoelzle (2001). Statistical modelling of mountain permafrost distribution: Local calibration and incorporation of remotely sensed data. *Permafrost and Periglacial Processes* 12: 1, 69–77.
- Haerberli, W. (1992). Construction, environmental problems and natural hazards in periglacial mountain belts. *Permafrost and Periglacial Processes* 3: 2, 111–124.
- Haerberli, W., C. Guodong, A. P. Gorbunov & S. A. Harris (1993). Mountain permafrost and climatic change. *Permafrost and Periglacial Processes* 4: 2, 165–174.
- Harris, C. (2001; toim.). Permafrost and Climate in Europe (PACE). *Permafrost and Periglacial Processes* 12: 1, 1–156.
- Harris, C., M. C. R. Davis & B. Etzelmüller (2001). The assessment of potential geotechnical hazards associated with mountain permafrost in a warming global climate. *Permafrost and Periglacial Processes* 12: 1, 145–156.
- Harris, S. A. (1988). The alpine periglacial zone. *Teoksessa Clark, M. J. (toim.): Advances in periglacial geomorphology*, 396–413. John Wiley & Sons, Chichester.
- Heggem, E. S., B. Etzelmüller, & I. Berthling (2001). Topographic radiation balance models – sensitivity and application in periglacial geomorphology. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 55: 4, 203–211.
- Hoelzle, M. (1992). Permafrost occurrence from BTS measurements and climatic parameters in the eastern Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 3: 2, 143–147.
- Hoelzle, M. & W. Haerberli (1995). Simulating the effects of mean annual air-temperature changes on permafrost distribution and glacier size: an example from the Upper Engadin, Swiss Alps. *Annals of Glaciology* 21, 399–405.
- Hoelzle, M., C. Mittaz, B. Etzelmüller & W. Haerberli (2001). Surface energy fluxes and distribution models relating to permafrost in European Mountain areas: an overview of current developments. *Permafrost and Periglacial Processes* 12: 1, 53–68.
- Imhof, M. (1996). Modelling and verification of the permafrost distribution in the Bernese Alps, Western Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes* 7: 3, 267–280.
- Isaksen, K., P. Holmlund, J. L. Sollid & C. Harris (2001). Three deep alpine-permafrost boreholes in Svalbard and Scandinavia. *Permafrost and Periglacial Processes* 12: 1, 13–25.
- Ishikawa, M. & T. Sawagaki (2001). GIS-simulation of the distribution of snow cover and observed ground temperatures in the Daisetsu Mountains, Japan. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 55: 4, 212–218.
- Kaufmann, V. (1998). Deformation analysis of the Doesen rock glacier (Austria). *Teoksessa Lewkowicz, A. G. & M. Allard (toim.): Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost, Collection Nordicana* 57, 551–556. Centre d'Etudes Nordiques, Université Laval, Québec.
- Kejonen, A. (1997). Permafrost and patterned grounds in Finland – periglacial or something else. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 69: 1–2, 97–108.
- Keller, F. (1992). Automated mapping of mountain permafrost using the program PERMAKART within the geographical information system ARC/INFO. *Permafrost and Periglacial Processes* 3: 2, 133–138.
- King, L., A. P. Gorbunov & M. Evin (1992). Prospecting and mapping of mountain permafrost and associated phenomena. *Permafrost and Periglacial Processes* 3: 2, 73–81.
- Kling, J. (1996). Sorted circles and polygons in Northern Sweden, distribution and processes. *Earth Sciences Centre, Göteborg University, Publication A* 12. 28 s.
- Kääb, A., W. Haerberli & G. H. Gudmundsson (1997). Analysing the creep of mountain permafrost using high precision aerial photogrammetry; 25 years of monitoring Gruben rock glacier, Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 8: 4, 409–426.
- Kääb, A. & M. Vollmer (2000). Surface geometry, thickness changes and flow field on creeping mountain permafrost: automatic extraction by digital image analysis. *Permafrost and Periglacial Processes* 11: 4, 315–326.
- Lambiel, C. & E. Reynard (2001). Regional modelling of present, past and future potential distribution of discontinuous permafrost based on a rock glacier inventory in the Bagnes-Hérémence area (Western Swiss Alps). *Norsk Geografisk Tidsskrift* 55: 4, 219–223.
- Lee, S., U. Chwae, K. Min (2002). Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure: The Janghung area, Korea. *Geomorphology* 46: 3–4, 149–162.
- Leverington, D. W. & C. R. Duguay (1997). A neural network method to determine the presence or absence of permafrost near Mayo, Yukon Territory, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes* 8: 2, 207–217.
- Lewkowicz, A. G. & C. R. Duguay (1999). Detection of permafrost features using SPOT panchromatic imagery, Fosheim Peninsula, Ellesmere Island, N.W.T. *Canadian Journal of Remote Sensing* 25: 1, 34–44.
- Li, X., G. Cheng & X. Chen (1998). Response of permafrost to global change on the Qinghai-Xizing Plateau; a GIS-aided model. *Teoksessa Lewkowicz, A. G. & M. Allard (toim.): Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost, Collection Nordicana* 57, 657–661. Centre d'Etudes Nordiques, Université Laval, Québec.

- Lieb, G. K. (1998). High-mountain permafrost in the Austrian Alps (Europe). *Teoksessa Lewkowicz, A. G. & M. Allard (toim.): Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost, Collection Nordicana 57*, 663–668. Centre d'Etudes Nordiques, Université Laval, Québec.
- Lugon, R. & R. Delaloye (2001). Modelling alpine permafrost distribution, Val de Réchy, Valais Alps (Switzerland). *Norsk Geografisk Tidsskrift 55*: 4, 224–229.
- Lundén, B., K. Wester & S. Axelsson (1997). Analysis of satellite-driven temperatures in relation to land cover and topography. *Norsk Geografisk Tidsskrift 51*: 1, 47–59.
- Luoto, M. & M. Seppälä (2002). Modelling the distribution of palsas in Finnish Lapland with logistic regression and GIS. *Permafrost and Periglacial Processes 13*: 1, 17–28.
- Massonnet, D. & K. L. Feigl (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics 36*: 4, 441–500.
- Matthews, J. A., R. A. Shakesby, M. S. Berrisford & L. J. McEwen (1998). Periglacial patterned ground on the Styggedalsbreen glacier foreland, Jotunheimen, southern Norway: micro-topographic, paraglacial and geocological controls. *Permafrost and Periglacial Processes 9*: 2, 147–166.
- Mittaz, C., M. Hoelzle & W. Haeberli (2000). First results and interpretation of energy flux measurements over Alpine permafrost. *Annals of Glaciology 31*, 275–280.
- Ødegård, R. S., K. Isaksen, M. Mastervik, L. Billdal, M. Engler & J. L. Sollid (1999). Comparison of BTS and Landsat TM data from Jotunheimen, southern Norway. *Norsk Geografisk Tidsskrift 53*: 4, 226–233.
- Okko, V. (1954). Periglasiaalisesta morfologiasta Suomessa. *Terra 66*: 2, 54–57.
- Qingbai, W., L. Xin & L. Wenjun (2000). The prediction of permafrost change along the Qinghai-Tibet Highway China. *Permafrost and Periglacial Processes 11*: 4, 371–376.
- Salvatore, M. C. (2001). Geomorphological sketch map of the Fossil Bluff area (Alexander Island, Antarctica) mapped from aerial photographs. *Antarctic Science 13*: 1, 75–78.
- Seppälä, M. (1997a). Distribution of permafrost in Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland 69*: 1–2, 87–96.
- Seppälä, M. (1997b). Introduction to the periglacial environment in Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland 69*: 1–2, 73–86.
- Seppälä, M. & S. Hassinen (1997). Freeze-thaw indices in northernmost Fennoscandia according to meteorological observations, 1980–1991. *Teoksessa Knutsson, S. (toim.): Ground Freezing 97. Frost action in soils. Proceedings of the International Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils*, 153–160. Balkema, Rotterdam.
- Siegmund, M. & K. Hall (2000). A study of valley-side slope asymmetry based on the application of GIS analysis: Alexander Island, Antarctica. *Antarctic Science 12*: 4, 471–476.
- Svensson, H. (1982). Fjärranalys som hjälpmedel i periglacial forskningen. *Svensk Geografisk Årsbok 58*, 109–125.
- Tanarro, L. M., M. Hoelzle, A. Garcia, M. Ramos, S. Gruber, A. Gomez, M. Piquer & D. Palacios (2001). Permafrost distribution modelling in the mountains of the Mediterranean: Corral del Veleta, Sierra Nevada, Spain. *Norsk Geografisk Tidsskrift 55*: 4, 253–260.
- Thorn, C. E. (1992). Periglacial geomorphology: what, where, when? *Teoksessa Dixon J. C. & A. D. Abrahams (toim.): Periglacial geomorphology*, 1–30. John Wiley & Sons, Chichester.
- Tveito, O. E. & E. J. Førland (1999). Mapping temperatures in Norway applying terrain information, geostatistics and GIS. *Norsk Geografisk Tidsskrift 53*: 4, 202–212.
- Virtanen, T., S. Neuvonen & A. Nikula (1998). Modelling topoclimatic patterns of egg mortality of *Epirrita autumnata* (Lepidoptera: Geometridae) with a Geographical Information System: predictions for current climate and warmer scenarios. *Journal of Applied Ecology 35*: 2, 311–322.
- Vonder Mühl, D., C. Hauck & F. Lehmann (2000). Verification of geophysical models in Alpine permafrost by borehole information. *Annals of Glaciology 31*, 300–306.
- Vonder Mühl, D., C. Hauck, H. Gubler, R. McDonald & N. Russill (2001). New geophysical methods of investigating the nature and distribution of mountain permafrost with special reference to radiometric techniques. *Permafrost and Periglacial Processes 12*: 1, 27–38.
- Walker, P. A. (1990). Modeling wildlife distribution using a geographic information system: kangaroos in relation to climate. *Journal of Biogeography 17*: 3, 279–289.
- Walsh, S. J., D. R. Butler & G. P. Malanson (1998). An overview of scale, pattern, process relationships in geomorphology: a remote sensing and GIS perspective. *Geomorphology 21*: 3–4, 183–205.
- Washburn, A. L. (1979). *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. 406 s. Arnold, London.
- Williams, P. J. & M. W. Smith (1989). *The frozen earth. Fundamentals of geocryology*. 306. Cambridge University Press, Cambridge.