

Maa-57.270 Fotogrammetrian, kuvatulkinnan ja kaukokartoituksen seminaari

Tutkakuvien käyttö geologiassa

Kevät 2004

Hanne Junnilainen

Sisällysluettelo

1 Johdanto	3
2 Tutkakuvaus	3
2.1 Periaate	4
2.2 Kuvauksen geometria	5
2.3 Tutkasignaalin ja maanpinnan vuorovaikutus	5
2.3.1 Geometriset tekijät	6
2.3.2 Kohteen sähköiset ominaisuudet	7
2.3.3 Polarisatio	8
2.3.4 Aallonpituus	8
2.4 Eri instrumentit	8
3 Geologiasta	10
4 Tutkakuvien käyttö geologisessa tulkinnassa	10
4.1 Tutkakuvien käyttö geologian eri osa-alueilla – esimerkkejä	11
4.1.1 Kivilajien kartoitus (eng. lithological mapping)	11
4.1.2 Pitkittäisten rakenteiden kartoitus (eng. structural mapping, lineaments)	13
4.1.3 Maanpinnan alapuolisten kohteiden kartoittaminen	14
4.1.4 Maaperäkartoitus	15
4.2 Tulkintaan vaikuttavat tekijät	17
4.2.1 Aallonpituus	17
4.2.2 Polarisatio	17
4.2.3 Resoluutio	17
4.2.4 Tulokulma	18
4.2.5 Lentosuunta	18
5 Johtopäätökset	18
Lähdeluettelo	

1 Johdanto

Ensimmäinen geologiseen kartoitukseen käytetty ilmakeku otettiin jo vuonna 1913 Libyassa. Yleisestikin ensimmäiset ilmakekut oli tarkoitettu peruskartaksi geologiselle informaatiolle, erityisesti öljyn etsimiseen liittyvälle tiedolle. Varsinaiseen tulkintaan ilmakekuvia ryhdyttiin käyttämään 1920-luvulla, ja 1940-luvulta lähtien ilmakekujen käyttö geologisessa tulkinnassa on ollut laajalle levinnyttä. (Lillesand ja Kiefer 2000.)

Vuosien aikana optisen ja lähi-infrapuna-alueen kaukokartoitusaineistot ovat osoittautuneet tärkeäksi työkaluksi geologiassa, mutta 1990-luvun alun jälkeen on tehty paljon onnistuneita tutkimuksia myös mikroaaltoalueella toimivien tutkainstrumenttien käytöstä (Frei et al., 1995; Dall et al., 1995; Loizzo et al., 1995; Lowman 1994). Koska aktiiviset mikroaaltoalueella toimivat instrumentit hankkivat tietoa periaatteellisesti eri tavalla verrattuna passiivisiin instrumentteihin, tutkakuvat ovat tuoneet geologiseen tulkintaan tärkeää täydentävää tietoa, esim. maaperän kosteudesta, pinnan karkeudesta ja maanpinnan alla olevista kohteista (Schetselaar 1994; Frei et al., 1995).

Tässä seminaarissa käsitellen lyhyesti tutkakuvauksen pääperiaatteita, SAR-tutkakuvien käyttöä tietyissä geologisissa sovelluksissa sekä geologiseen tulkintaan vaikuttavia tekijöitä.

2 Tutkakuvaus

Passiiviset kaukokartoitusinstrumentit mittaavat auringosta heijastunutta tai kohteen emittoivaa säteilyä yleensä optisen-, infrapuna- ja lämpöalueen aallonpituuksilla. Aktiiviset tutkainstrumentit sen sijaan lähettävät mikroaaltoalueen sähkömagneettista säteilyä kohteeseen ja mittaavat takaisinsironnutta signaalia. (Jensen 2000.)

Tutkainstrumentit toimivat siis auringon valosta riippumatta, mutta mikroaaltojen suurimpana etuna pidetään pilvienläpäisykykyä - tutkakuvaus on säästä riippumaton kaukokartoitusmenetelmä. Tutkakuvauksen hyviin puoliin kuuluvat myös kyky läpäistä maanpintaa sekä mahdollisuus perspektiivikuvaukseen. (Jensen 2000.)

2.1 Periaate

Aktiivinen tutkainstrumentti lähettää mikroaaltotaajuudella signaalin ja mittaa kohteesta takaisinsironneen aallon voimakkuuden ja edestakaiseen matkaan kuluneen ajan. Signaali lähetetään ja vastaanotetaan tietyllä aallonpituudella (taulukko 1) ja tietyllä polarisaatiolla (horisontaali tai vertikaali). Eräät tutkainstrumentit käyttävät useampaa aallonpituutta, ja erityisiä kaikilla polarisaatioilla toimivia tutkainstrumentteja kutsutaan polarimetreiksi. (Jensen 2000.)

Maan pinnalle saapuessaan tutkan lähettämä signaali siroaa ja/tai absorpoituu, ja yleensä osa signaalista palaa takaisin antenniin. Tämä takaisinsironnut signaali vastaanotetaan valitulla polarisaatiolla, joka voi olla vastakkainen lähetetyn pulssin polarisaatioon nähden. Lopuksi vastaanotetut signaalit muutetaan digitaalisiksi ja prosessoidaan esitettäväksi kuvaksi. (Jensen 2000.)

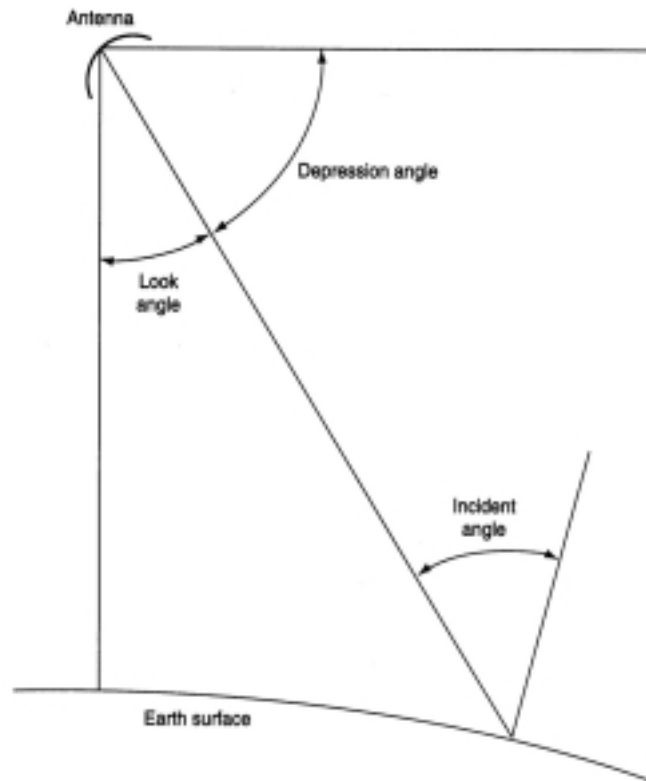
Taajuuskaistat (tyypillinen λ suluisissa)	Aallonpituus λ (cm)	Taajuus (GHz)
K_a (0,86 cm)	0,75-1,18	40,0-26,5
K	1,19-1,67	26,5-18,0
K_u	1,67-2,4	18,0-12,5
X (3,0 ja 3,2 cm)	2,4-3,8	12,5-8,0
C (7,5 ja 6,0 cm)	3,9-7,5	8,0-4,0
S (8,0 ja 9,6 ja 12,6 cm)	7,5-15,0	4,0-2,0
L (23,5 ja 24,0 ja 25,0 cm)	15,0-30,0	2,0-1,0
P (68,0 cm)	30,0-100	1,0-0,3

Taulukko 1. Aktiivisten tutkainstrumenttien käyttämät aallonpituudet ja taajuudet (Jensen 2000).

Aktiivisen tutkakuvauksen ohella on käytössä passiivisia mikroaaltalueen instrumentteja, jotka ottavat vastaan maan 9,7 μm taajuudella lähettämää säteilyä (Jensen 2000). Niiden käyttö geologiassa ei kuitenkaan ole laajalle levinnyttä.

2.2 Kuvauksen geometria

Kuvauksen geometrialla on huomattava merkitys takaisinsironnen signaalin voimakkuuteen. Tutkakuvauksessa geometriaa tyypillisesti kuvaavat kulmat on esitetty kuvassa 1. Kallistuskulma (*depression angle*) on horisontaalin lentotason ja antennin lähettämän signaalin välinen kulma, ja katselukulma (*look angle*) on kallistuskulman komplementtikulma. Tulokulma (*incident angle*) on tulevan signaalin ja maanpinnan normaalin välinen kulma ja riippuu siis kulloisestakin maanpinnan kaltevuudesta. Lentosuuntaa kohtisuorassa suunnassa vastaan olevaa suuntaa kutsutaan katselusuunnaksi (*look* tai *range direction*). (Lillesand ja Kiefer 2000.)



Kuva 1. Tutkakuvauksen geometria (Lillesand ja Kiefer 2000).

2.3 Tutkasignaalin ja maanpinnan vuorovaikutus

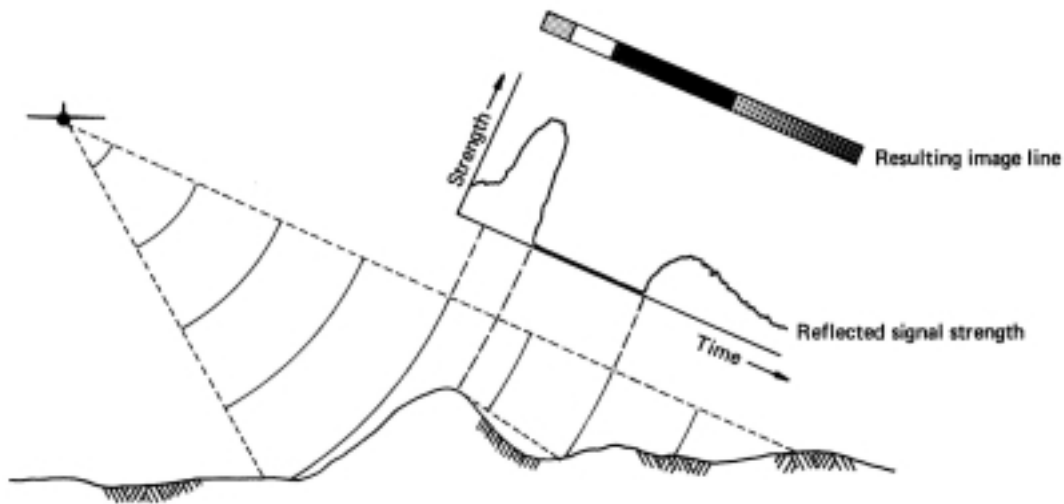
Maanpinnan kohdatessaan tutkasignaalin aallonpituus, kallistuskulma ja polarisaatio ovat vuorovaikutuksessa maanpinnan ominaisuuksien kanssa. Tämä vuorovaikutus määrittää takaisinsironneen signaalin intensiteetin ja polarisaation, joiden avulla taas voidaan määrittää kohteen ominaisuuksia. (Lillesand ja Kiefer 2000.)

Kohteen ominaisuuksien vaikutukset signaalin ovat monimutkaisia ja vaihtelevia, mutta erinäisiä teorioita on kehitetty signaalin ja maanpinnan vuorovaikutuksen selittämiseksi.

Käytännöllisin tieto on kuitenkin saatu empiiristen havaintojen kautta, ja onkin havaittu, että takaisinsironneen signaalin intensiteetti riippuu pääasiallisesti kohteiden geometrisista ja sähköistä ominaisuuksista. Myös signaalin aallonpituus ja polarisaatio vaikuttavat kohteen ja signaalin väliseen vuorovaikutukseen. (Lillesand ja Kiefer 2000.)

2.3.1 Geometriset tekijät

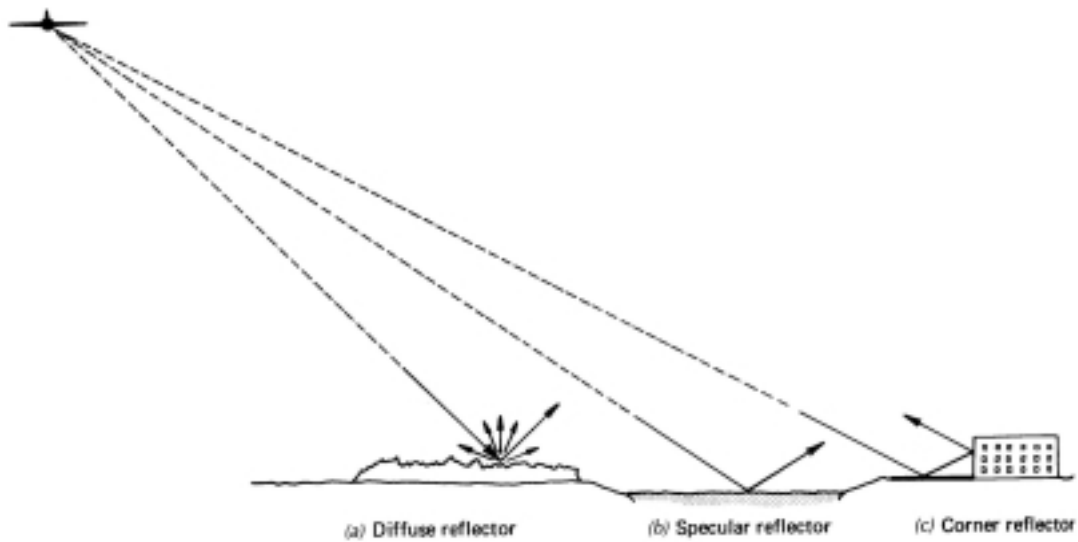
Tutkakuvauksen sivukulmaisesta luonteesta johtuen instrumentin geometria ja maaston topografia aiheuttavat tutkakuvulle ominaisia vääristymiä ja toisaalta etuja. Kuva 2 havainnollistaa sitä, kuinka antenniin päin olevat rinteet saavat yleensä vahvan eli kirkkaan ja antennista poispäin olevat rinteet heikon eli tumman takaisinsironnan. Kuvausgeometriasta johtuen voi esiintyä myös mäkien eturinteiden lyhenemistä (*foreshortening*), maaston varjoon jäämistä (*shadow*) ja huipun kaatumista vuoren juuren päälle (*layover*). (Lillesand ja Kiefer 2000.)



Kuva 2. Instrumentin ja maaston geometrian vaikutus sivukulmaisella tutkakuvalla (Lillesand ja Kiefer 2000).

Yleistäen voidaan sanoa, että paikallisen tulokulman ollessa 0-30°, rinteiden antama vahva heijastus vallitsee takaisinsironnassa. Tulokulman ollessa 30-70° maanpinnan karkeus vaikuttaa eniten takaisinsironneeseen signaaliin ja tulokulman ollessa yli 70° varjot dominoivat kuvaa. (Lillesand ja Kiefer 2000.)

Pintojen erilaisten karkeuksien vaikutusta takaisinsirontaan havainnollistetaan kuvassa 3. Karkean pinnan tapauksessa heijastus on diffuusinen ja takaisinsironta on vahvaa. Diffuusia heijastusta tapahtuu, kun pinnan karkeus on merkittävää tutkasignaalin aallonpituuteen nähden. Peiliheijastustusta tapahtuu sileällä pinnalla ja takaisinsirontaa ei esiinny, sillä signaali siroaa voimakkaasti instrumentista poispäin. Vahvoja kulmaheijastuksia ilmenee kaksoisheijastumisen vuoksi esim. kaupungeissa. (Lillesand ja Kiefer 2000.)



Kuva 3. Tutkasignaalin takaisinsironta erilaisista pinnoista (Lillesand ja Kiefer 2000).

2.3.2 Kohteen sähköiset ominaisuudet

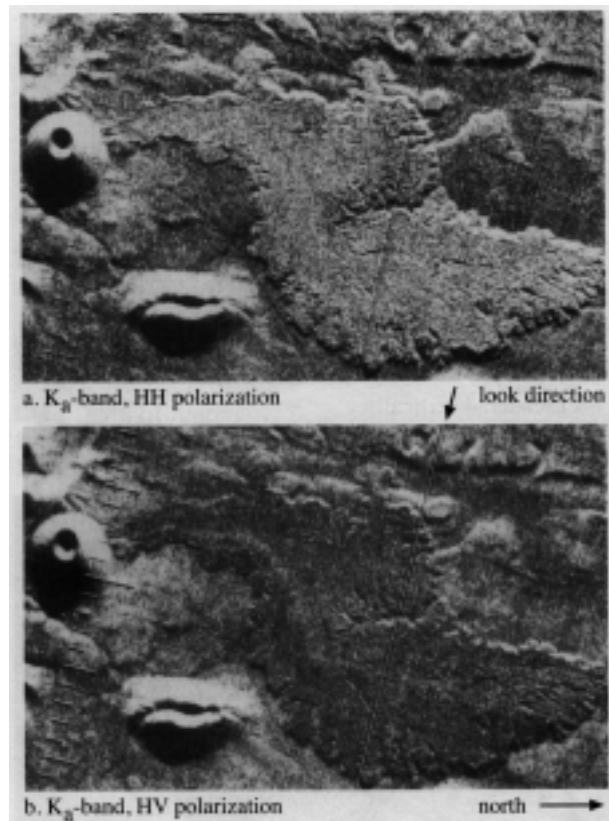
Kohteen sähköisiä ominaisuuksia kuvataan usein dielektrisellä vakiolla, joka kertoo kohteen heijastavuudesta ja sähkönjohtokyvystä. Dielektrisyysvakioon selvästi eniten vaikuttaa kohteen kosteuspitoisuus. Korkean kosteuspitoisuuden ja siksi korkean dielektrisyysvakion eli vahvan heijastavuuden omaavia kohteita ovat esim. kasvillisuus ja vesi. (Lillesand ja Kiefer 2000.)

Toisaalta kannattaa huomioida, että kohteen geometriset ja sähköiset ominaisuudet vaikuttavat läheisesti yhdessä (Lillesand ja Kiefer 2000). Esim. erilaisilla signaalin tulokulmilla saman dielektrisyysvakion omaava kohde voi takaisinsirottaa signaalia aivan eritavalla.

2.3.3 Polarisaatio

Tietyllä polarisaatiolla takaisinsironnut signaali voi antaa arvokasta tietoa kohteesta.

Kuvassa 4 demonstroidaan sitä, kuinka basalttinen laavavirta on helpommin nähtävissä HH-polarisoituneella kuin HV-polarisoituneella kuvalla. Tämä kertoo siitä, kuinka aallonpituuteen nähden isoja kiviblokkeja sisältävä laavavirta on vahvasti suuntautunut. Koska tutkasignaalin vuorovaikutus eri tekijöiden kanssa on monimutkaista, eri tavalla polarisoituneiden kuvien paremmuuden ennustaminen on kuitenkin ongelmallista. Vuorovaikutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. rinteeseen suunta, pinnan karkeus, kasvillisuus ja kosteuspitoisuus. (Lillesand ja Kiefer 2000; Jensen 2000.)



Kuva 4. Kaksi K_a -kanavalla ja samalla katselukulmalla otettua kuvaa tulivuoresta ja basalttisesta laavavirrasta. A-kuva on otettu HH-polarisaatiolla ja b-kuva HV-polarisaatiolla. Kuvat osoittavat kuinka aallonpituuteen nähden isoja kiviblokkeja sisältänyt laavavirta on vahvasti suuntautunut. (Jensen 2000.)

2.3.4 Aallonpituus

Tutkasignaalin aallonpituudella on selvä vaikutus kohteen karkeuden määrittämisessä, ja toisaalta aallonpituus vaikuttaa signaalin tunkeutumiskykyyn pilvien ja maanpinnan läpi. Geologiaan liittyvien sovelluksien osalta asiaa on pohdittu kappaleessa 4.2.

2.4 Eri instrumentit

Taulukossa 2 on esitetty tällä hetkellä avaruudesta kuvaavat tutkainstrumentit ja niiden parametrit. Näiden lisäksi geologiassa on käytetty paljon lentokonepohjaisia SAR-tutkia, kuten AIRSAR-polarimetria.

Muuttuja	ERS-1	ERS-2	JERS-1	Radarsat-1	Radarsat-2	PALSAR	ENVISAT
Kaista	C	C	L	C	C	L	C
Polarisaatio	VV	VV	HH	HH	HH,VV HV	HH or VV HV or VH	HH, VV HV
Tulokulmaasteina	20-26	20-26	32-38	10-60	10-60	20-55	14-45
Resoluutio metreinä	25	25	18	8-100	3-100	10-100	30
Avauskulma (Km)	100	100	76	50-500	10-527	70-250	50-400
Laukaisu	07/91	04/95	02/92	11/95	2002	8/2002	6/2001

Taulukko 2. Avaruudesta kuvaavat tutkainstrumentit (Tapley 2000).

3 Geologia

Maapallo ei ole kiinteä kivi; se jatkuvasti muuttuu, liikkuu ja järjestyy uudella tavalla. Kiviä ja tätä muutosta tutkivaa tiedettä kutsutaan geologiaksi. (Jensen 2000.) Jokainen kivilaji, maanpinnan murtuma, eroosion aiheuttama kuluminen tai muodostunut sedimenttikerrostuma kertovat tapahtumaprosesseista maapallon pitkässä historiassa. Maapallon pinnanmuodot ja sen erilaiset materiaalit kertovat alla olevasta peruskalliosta ja maaperästä sekä niistä prosesseista, jotka ovat vaikuttaneet tietynlaisen maanpinnan muodostumiseen. (Lillesand ja Kiefer 2000.)

Geologia voi kiinnostaa pieni atomi, kokonainen manner, tulivuoren toiminta tai vaikkapa jäätiköiden liike. Geologisen tutkimuksen alaan kuuluvat myös mm. geofysiikan, paleontologian, seismologian, geomorfologian (maanpinnan muotoja ja niiden muodostumista tutkiva tiede) ja hydrologian ilmiöt. (Chernicoff ja Whitney 2002.)

Suurin osa geologisesta tiedosta saadaan kenttätutkimuksien avulla. Sen lisäksi osa geologeista käyttää kaukokartoitusaineistoa täydentämään kentältä saatuja tuloksia. Kaukokartoitusta on käytetty esim. kivilajien tulkinnassa, geologisten rakenteiden (siirros, poimu, murtuma) tunnistamisessa, tulva-alueiden analysoinnissa sekä pinnanmuotojen tutkimuksessa. Kaukokartoitusaineistojen avulla on etsitty myös mineraaleja ja öljyä. Kaukokartoituksen käyttö geologiassa on mielenkiintoinen tutkimuskohde, sillä satelliittikuvien avulla geologiset kohteet nähdään uudessa perspektiivissä, mittakaavassa sekä spektraalisessa ulottuvuudessa ja samalla tarvittavan kenttätyön määrä voi vähentyä selvästi (Loizzo et al., 1995). (Jensen 2000.)

4 Tutkakuvien käyttö geologisessa tulkinnassa

Vuonna 1991 tapahtuneen ERS-1:n laukaisun jälkeen tutkakuvien geologista käyttöä koskevan tutkimuksen määrä on kasvanut nopeasti. Pääasiassa kivilajien ja geologisten rakenteiden tulkintaan keskittyneitä tutkimuksia on tehty esim. Kanadan vanhassa ja pääsääntöisesti kasvillisuuden peittämässä kallioperässä (Lowman 1994), Australian puoliaavikkomaisissa olosuhteissa (Tapley 2000), Italian kasvillisuuden peittämällä sedimenttikivialueilla (Loizzo et al., 1995), Grönlannissa vuoristoisella paljaan maan alueella (Dall et al., 1995) ja pilvisyyden häiritsemillä sademetsäalueilla (Deroin et al., 2000). Suomessa kaukokartoituksen käyttö geologiassa näyttäisi olevan keskittynyt enemmän ilma- ja monikanavakuvien käyttöön (Kuosmanen 1998).

Seuraavassa kappaleessa esittelen tutkimusesimerkein tutkakuvien käyttöä eräiden geologisten sovellusten näkökulmasta ja lopuksi pohdin geologiseen tulkintaan vaikuttavia tekijöitä. Koska geologia on laaja-alainen tiede, en voi käydä kaikkia tutkimusaloja läpi, mutta tässä seminaarityössä on esitelty yleisimpiä sovelluksia: 1) kivilajien kartoitus, 2) lineamenttien kartoitus, 3) maanpinnan alapuolisten kohteiden kartoitus ja 4) maaperäkartoitus. Tutkimuksia on tehty myös vulkaanisten prosessien osalta (Mouginis-Mark 1995), alluviaalisista kohteista (Farr ja Chadwick 1996) ja muinaisista jokien virtausverkostoista (McCauley 1996). Tutkakuvia on käytetty meteoriittikraaterin tutkimiseen Kanadassa (Lowman 1994) ja differentiaali-SAR-interferometriaa liikkeen seurantaan esim. siirroslinjoilla ja maanjäristysalueilla (Jensen 2000). Taloudellisesti yksi tärkeimmistä sovelluksista on mineraalien etsintä (Sabins 1999).

4.1 Tutkakuvien käyttö geologian eri osa-alueilla – esimerkkejä

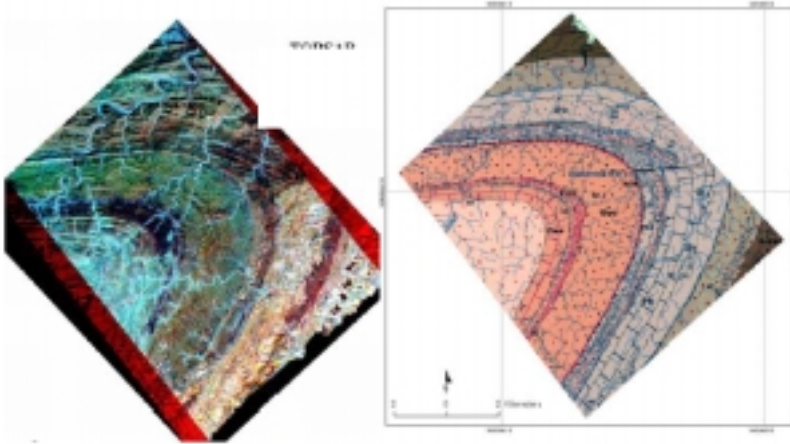
4.1.1 Kivilajien kartoitus (eng. lithological mapping)

Kivilajit jaotellaan syntytapansa mukaan kolmeen ryhmään (Jensen 2000):

- *Vulkaaniset* kivilajit, jotka kiteytyvät sulasta kiviaineksesta.
- *Kerrostuneet* kivilajit eli sedimenttikivet, jotka muodostuvat kivi- tai eloperäisesti aineksesta kerrostamalla esim. meren pohjaan.
- *Muuntuneet* eli metamorfiset kivilajit, jotka syntyvät muista kivilajeista kovan kuumuuden ja paineen alla.

Monilla mineraaleilla ja kivilajeilla on ainutlaatuiset heijastus- ja absorptio-ominaisuudet tietyillä lähi-infrapuna- ja lämpöalueen aallonpituuksilla (Jensen 2000, s. 479-483), mutta myös mikroaaltoalueen kuvia on käytetty paljon eri kivilajiyksiköiden kartoittamisessa. Kun infrapuna- ja lämpöalueella kuvaavat instrumentit luokittelevat kivilajit niiden kemiallisten ja lämpöominaisuuksien perusteella, tutkakuvien tapauksessa kartoitus perustuu enemmänkin kivilajin pinnan karkeuden ja toisaalta kivilajiyksiköt toisistaan erottavien lineaaristen kohteiden kartoittamiseen. Tästä periaatteellisesta eroista seuraa toisiaan täydentävää tietoa: eräiden kivilajien erotteleminen optisen alueen instrumenttien avulla on vaikeaa, sillä niiden kemialliset ominaisuudet ovat samanlaiset (esim. graniitit) (Frei 1995), mutta toisaalta esim. metamorfisten kivien erotteleminen tutkakuvien avulla pinnan karkeuteen perustuen on lähes mahdotonta (Tapley 2000). Toisaalta tutkakuvat tarjoavat tietoa kohteen kosteuspitoisuudesta ja siksi kivilajien, joiden kosteuspitoisuudet vaihtelevat selvästi, erotteleminen tutkakuvilta on mahdollista (Henderson ja Lewis 1998).

Tutkakuvia käytettäessä kohdealueen mahdollisella kasvillisuudella on luonnollisesti suuri merkitys kivilajien tunnistamisessa, sillä kivilajin pinnan karkeutta ja sähköisiä ominaisuuksia voidaan määrittää vain paljaan maan alueella. Tapley (2000) luokitteli kivilajit, juuri kasvittomalla alueella, hyvin tuloksin useampaa taajuutta käyttävän polarimetrin avulla (AIRSAR-instrumentti). Kuvassa 5 on esitetty Tapley:n Etelä-Australiassa kartoittama synkliini eli poimuallas, missä luokittelu on onnistunut loistavasti kivilajien välillä esiintyneiden karkeuserojen vuoksi. Karkeuserot ovat syntyneet, sillä kivilajit ovat rapautuneet eri tavoilla ja nopeuksilla. (Tapley 2000.)



Kuva 5. Kivilajien luokittelu onnistuu hyvin pinnan karkeuteen ja sähköisiin ominaisuuksiin perustuen, kun kohde ei ole kasvillisuuden peittämä ja kivilajien karkeuksissa on eroja. Vasemman puoleisessa kuvassa on useampaa taajuutta käyttävän AIRSAR-polarimetrin yhdistelmäkuva, jossa on esitetty Cvv-, Lhv- ja Phv-kanavat ko. polarisaatioilla. Oikean puoleinen kuva on maastotöiden perusteella valmistettu geologinen kartta vastaavasta kohteesta. Kohde sijaitsee Etelä-Australiassa. (Tapley 2000.)

Paljas maa ei kuitenkaan takaa hyvää luokittelutulosta. Sedimenttikivet soveltuvat hyvin kivilajien kartoittamiseen tutkakuvilta (kuten edellisessä tapauksessa), mutta metamorfisten kivilajien välillä pinnan karkeuksissa ei usein ole riittäviä eroja luokittelun onnistumiseksi (Tapley 2000). Dall et al. (1995) totesivat osittain saman ongelman käyttäessään SAR-polarimetria Grönlannissa. Siellä vulkaanisten ja metamorfisten kivilajien erottaminen pinnan karkeuksien perusteella oli mahdotonta, sillä jäätikkö oli hionut kivilajeja samalla tavalla. Toisaalta hionnan jälkeiset kivilajien karkeuserot olivat suurempia kuin käytetty C-kaistan aallonpituus, joten pidempi aallonpituus olisi saattanut auttaa luokittelussa (Dall et al., 1995).

Vaikka kivilajin karkeus saadaan selville vain paljaalla maalla, kivilajien luokittelu tutkakuvilta on onnistunut myös kasvillisuuden peittämällä alueilla. Sademetsäalueilla ja Kanadassa tehtyjen tutkimuksien perusteella tutkakuvilta paljastuva maaston topografia on auttanut kivilajien

luokittelussa merkittävästi, erityisesti magneettimittauksia yhdenaikaisesti tehtäessä (Singhroy et al., 1993). Toisaalta tutkakuvien hyvin erottamat lineaariset kohteet, jotka usein erottavat kivilajeja toisistaan, auttavat selvästi litologisessa luokittelussa (Schetselaar 1994). Myös kasvillisuuden kautta välittyvä epäsuorasti kivilajeihin liittyvää tietoa, sillä peruskallio ja siinä olevat rakenteet vaikuttavat päällä olevaan maaperätyyppiin sekä maan ja kasvillisuuden kosteuteen eli sähköisiin ominaisuuksiin (Loizzo 1995).

Yhteenvedon voidaan todeta, että kivilajien kartoittaminen tutkakuvilta onnistuu hyvin paljaalla maalla sedimenttikivien tapauksessa. Metamorfisia kivilajien tai kasvillisuuden peitossa olevan maaperän tapauksessa syntyy yleensä ongelmia, mutta luokittelua voidaan tehdä usein välillisesti joko topografian, kivilajeja erottelevien pitkittäisten kohteiden tai kasvillisuuden ja maaperän välityksellä. Toisaalta monikanavaiset- ja tutkakuvat tarjoavat toisiaan täydentävää synnergistä tietoa: tutkimustuloksien perusteella kuvien yhteiskäyttö antaa merkittävää lisäinformaatiota (Frei 1995; Loizzo et al., 1995; Schetselaar 1994).

4.1.2 Lineamenttien kartoitus (eng. structural mapping, lineaments)

Kuten yleisestikin kaukokartoitukseen alueella, myös tutkakuvien geologisissa sovelluksissa yleisin tutkimuskohde on lineamentit (Lowman 1994). Lineamenteilla tarkoitetaan paikallisia pitkittäisiä kohteita, jotka johtuvat paikallisten geomorfologisten ilmiöiden suuntautuneisuudesta. Tällaisia ilmiöitä voivat olla esim. joet ja vuoriketjut, ja yleisimmin etsittyjä ja löydettyjä kohteita ovat siirroselinjat ja murtumat. (Lillesand ja Kiefer 2000.) Lineamentit ovat merkityksellisiä esim. mineraalien ja öljyn etsinnässä sekä maanjäristysten ja pohjaveden kulkeutumisen tutkimisessa.

Lineamenttien tulkinta tutkakuvilta on onnistunut erinomaisesti: aiemmin kartoittamattomia lineaarisia kohteita on löydetty useissa tutkimuksissa (Graham ja Grant 1994; Lowman 1994; McGregor et al., 1994; Singhroy et al., 1993). Tämä suotuisa ilmiö on seurausta mikroaallon läpäisykyvystä (Schetselaar 1994).

Tärkein pitkittäisten kohteiden havainnointiin vaikuttava tekijä on kuitenkin tutkainstrumentin lentosuunta. Lineamentit erottuvat hyvin ollessaan suuntautuneet kohtisuorasti säteilysuuntaan vastaan eli lentosuunnan tulisi olla lineaaristen kohteiden suuntainen (Lillesand ja Kiefer 2000) (Loizzo et al. 1994).

Melko matalat kallistuskulmat ovat myös suositeltavia, erityisesti maan alla olevien topografisten lineamenttien kartoittamiseen (Lillesand ja Kiefer 2000). Tästä tutkakuvien perspektiivisyydestä on selvää etua niin kasvillisuuden peittämällä kuin paljaankin maan alueilla (Tapley 2000). Kasvillisuuden peittämällä alueilla identifiointi tosin perustuu usein lineamenttien painaumaluonteesta johtuvaan korkeaan vesipitoisuuteen eli kohteen korkeaan dielektrisyysvakioon (Lowman 1994).

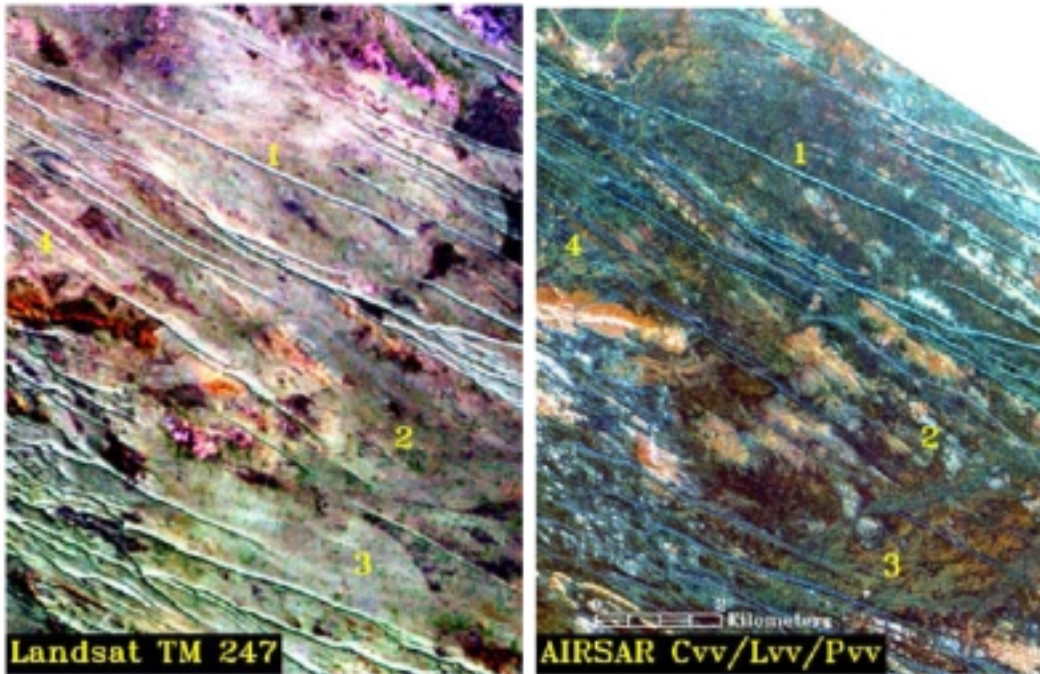
4.1.3 Maanpinnan alapuolisten kohteiden kartoittaminen

Tutkakuvauksen merkittävä etu on sen kyky tunkeutua suurimmilla aallonpituuksilla ($\lambda > 60\text{cm}$) maanpinnan alle. Maan kosteuspitoisuuden ollessa alle 1% ja sen tekstuurin ollessa sileää tai puolisileää, tutkakuvia voidaan käyttää maan pinnan alla olevien kohteiden geologiseen kartoittamiseen. (Tapley ja Craig 1995.)

Käytännössä nämä olosuhteet ovat harvinaiset; kuvaaminen on mahdollista erittäin kuivassa ilmastossa, missä maanpinta on syntynyt lentohiekasta muodostuneista hiekkakerroksista. Tällöin on suositeltavaa kuvata maanpintaa pienillä katselukulmilla ja maanpinnan alapuolisia kohteita suurilla katselukulmilla. Useamman katselukulman lisäksi on suositeltavaa hankkia eri aallonpituuksilla otettuja kuvia, koska näin voidaan vähentää maanpinnan ja sen alapuolisten kohteiden sekoittumista. (Henderson ja Lewis 1998.)

Tapley:n ja Craig:n (1995) Australiassa tekemä tutkimus vertailee maanpinnan ja sen alapuolisten geologisten muodostumien kartoittamista Landsat TM – ja AIRSAR-kuvan avulla (Kuva 5). Landsat-kuvasta on esitetty kaistat 2, 4 ja 7, ja AIRSAR-polarimetri –kuvasta näytetään V-polarisoitunut vaste kanavilla C, L ja P. Tutkimus osoittaa, että TM-kuva soveltuu hiekkadyynien ja menneiden metsäpalojen identifiointiin, mutta AIRSAR-kuva näkee maanpinnan läpi ja löytää merkittäviä geologisia muodostumia. Kuvilta tehdyt merkittävimmät havainnot ovat seuraavat:

- 1) Aiemmin kartoittamaton synkliini (kuvalla kohta 1).
- 2) Kuvalla kohdassa 2 näkyy maanpinnan alapuolella oleva, paikallinen sedimenttikivien ryhmittymisen yhdensuuntaiseksi.
- 3) Kuvilla kohdissa 3 ja 4 on havaittavissa historiallisia alluviaalideltoja.



Kuva 5. Landsat TM – kuvan ja AIRSAR-polarimetri –kuvan vertailua maanpinnan päällisten ja alapuolisten geologisten kohteiden kartoittamisessa. Landsat-kuvasta on esitetty kaistat 2, 4 ja 7, ja AIRSAR-polarimetri –kuvasta näytetään V-polarisoitunut vaste kanavilla C, L ja P (yhdistelmäkuva). (Tapley ja Craig 1995.)

4.1.4 Maaperäkartoitus

Maaperäkartoitukset ovat tärkeitä niin luonnonvarakartoituksen, maankäytön suunnittelun kuin ympäristönsuojelunkin kannalta katsottuna. Maaperäkartoitukset kuitenkin vaativat paljon kenttätöitä, ja tätä työmäärää on pyritty vähentämään kaukokartoituksen avulla (Lillesand ja Kiefer 2000.)

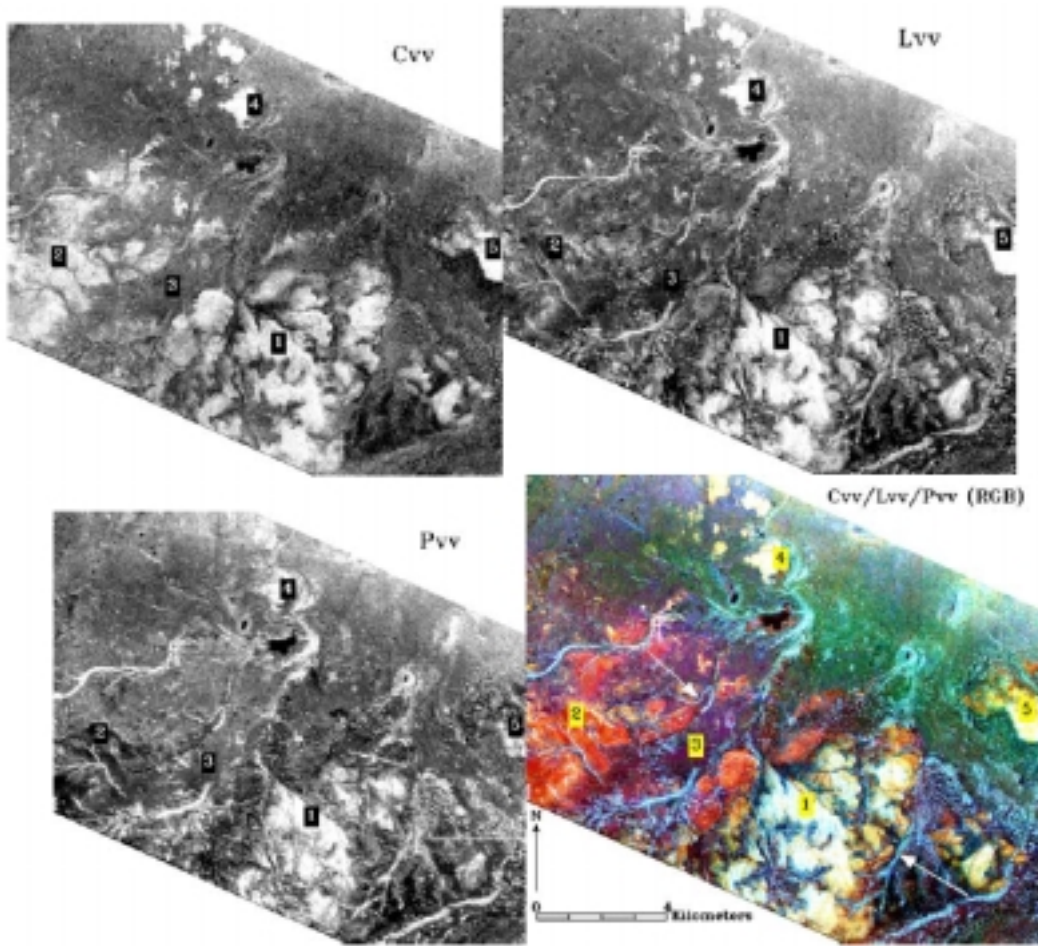
Tutkakuvien käytön hyötyjä maaperän ja pinnanmuotojen kartoittamisessa on kuvattu Tapley:n AIRSAR-polarimetrin avulla tehdyssä tutkimuksessa (1998). Australiassa puolikuivassa ilmastossa tehdyssä tutkimuksessa todetaan, että maaperä voidaan luokitella hyvin kolmea eri aallonpituutta käyttäen. Polarisaatioiden osalta paras herkkyys pinnan karkeuden määrittämiseen saatiin VV-polarisaatiolla, vaikkakin luokittelu riippui enemmän monen taajuuden kuin monen polarisaation käytöstä. Tämän lisäksi SAR-interferometriä käyttö tarjoaa merkittävää lisäinformaatiota maaperän kartoittamiseen. (Tapley 1998.)

Kuvilta tehtiin seuraavat havainnot (Tapley 1998):

- 1) Prekambrinen vulkaaninen rapautunut kivi aiheuttaa selvimmän takaisinsironnan (Kuva 6, kohdat 1,4 ja 5). Tämän kivilajin tapauksessa vahva takaisinsironta syntyi, koska kivilaji on

erosion myötä rapautunut ja muuttunut rakenteeltaan karkeammaksi. Takaisinsironnassa ei ole edes eroja eri aallonpituuksien välillä.

- 2) Paras erottuvuus maaperäluokkien välille saatiin käyttämällä L- ja P-kanavia, sillä C-kanava ei riitä erottelemaan ”liian” karkeita maaperiä toisistaan. Kuvalla näkyy kuinka C-kanava ei ole pystynyt erottelemaan kohtien 1 ja 2 maaperiä toisistaan.
- 3) C-kanava toisaalta erottelee eroosioanaaliset ja kerrostumalla muodostuneet esiintymät muita kanavia paremmin, sillä C-kanava tunnistaa kerrostumalla muodostuneet sileät maaperät hyvin.



Kuva 6. AIRSAR-polarimetrin VV-polarisaatiolla otetut C-, L- ja P-alueen kuvat sekä niiden yhdistelmäkuva. Kuvasarjassa ilmenee maanpinnan karkeuden ja tutkasignaalin aallonpituuden välinen yhteys. (Tapley 1998.)

4.2 Tulkintaan vaikuttavat tekijät

4.2.1 Aallonpituus

Erilaisissa geologisissa sovelluksissa suositeltavat tutkan aallonpituudet on esitetty taulukossa 3. Voidaan päätellä, että useimmat geologiset sovellukset vaativat useampaa taajuutta käyttävän instrumentin, vaikkakin lyhyet aallonpituudet riittävät esim. hiekkadyynien morfologiaa tutkittaessa ja toisaalta muinaisten jokien virtausta voidaan tutkia vain L- ja P-kanavien avulla (Schmullius ja Evans 1997).

4.2.2 Polarisaatio

Erilaisten sovelluksien käyttöön sopivat polarisaatiot on nähtävissä taulukossa 3. Voidaan todeta, että kivilajien kartoittamisessa polarisaatiolla on merkitystä: ristipolarisaatiota suositellaan lineaarisen polarisaation sijasta (Schmullius ja Evans 1997).

Geologinen sovellus	X			C			L			P		
	H	VV	Risti	HH	VV	Risti	HH	VV	Risti	HH	VV	Risti
Kivilajien kartoitus	½	½	1	½	½	1	½	½	1	P	P	P
Laattatektoniikka	1	H	1	1	H	1	1	H	1			
Geomorfologia/karkeus	1	1	1	1	1	1	1	1	1	P	P	P
Hiekkadyynien morfologia	1	1		1	1							
Aavikko	H	H	1	H	H	1	1		1	1	H	H
Pinnan alapuoliset kohteet	½	½	H	½	½	1	½	½	1	½	½	1
Muinaiset joet				H		H	1	H	1	1	H	1

Taulukko 3. Suositeltavat taajuus- ja polarisaatioyhdistelmät geologisten sovelluksien kannalta. Polarisaatiota koskevat merkinnät: ½=melko tärkeä, 1=tärkeä, H=hyödyllinen ja P=polarisaatiolla ei väliä. (Schmullius ja Evans 1997.)

4.2.3 Resoluutio

Yleiseen ja geomorfologiseen kartoittamiseen riittävä tutkainstrumentin spatiaalinen resoluutio on 20 metriä, mutta tarkempaan pienempien lineaaristen kohteiden kartoittamiseen vaaditaan 10 metrin erotuskykyä (Tapley 2000).

4.2.4 Tulokulma

Kivilajien tai maaperän kartoittamisessa suositeltavana tulokulmana pidetään 30-50°, sillä alle 30° kulmissa instrumentin kyky tunnistaa pinnan karkeutta heikkenee (Tapley 2000). Toisaalta matalat kallistuskulmat voivat korostaa lineaarisia kohteita ja helpottaa niiden havainnointia samalla periaatteella kuin matalalta paistava aurinko (Lillesand ja Kiefer 2000).

4.2.5 Katselusuunta

Geologisissa sovelluksissa paras katselusuunta on kohtisuorassa tai vähintään 45° kulmassa lineaarisia kohteita vastaan. Tutkasatelliiteista Radarsat, ERS ja JERS keräävät dataa sekä nousevilla että laskevilla radoilla, joten näissä tapauksessa on saatavilla kuvia, joiden katselusuunnat ovat joko itään tai länteen päin. (Tapley 2000.)

5 Johtopäätökset

Vaikka kaukokartoitukseen perustuvat menetelmät eivät ole tehneet lopullista läpimurtoa geologisten kenttätutkimusten menettelytavoissa, kaukokartoitus on korvaamaton tekniikka geologisessa kartoituksessa. Tässä kehityksessä tutkakuvat ovat tarjonneet merkityksellistä ja uutta informaatiota niin kaukokartoituksen kuin kenttätutkimuksienkin näkökulmasta katsottuna.

Tutkakuvat ovat antaneet uutta täydentävää tietoa maanpinnan ja sen alapuolella olevien kohteiden fysikaalisista piirteistä, kuten karkeudesta, kosteudesta ja geometrisista muodoista. Kun infrapuna- ja lämpöalueella kuvaavat instrumentit luokittelevat kohteet niiden kemiallisten ja lämpöominaisuuksien perusteella, tutkakuvien tapauksessa kartoitus perustuu enemmänkin pinnan karkeuden ja sähköisten ominaisuuksien mittaamiseen.

Kivilajien kartoittamisessa tutkakuvista on ollut merkittävää, monikanavaisista kuvista saatavaa tietoa täydentävää, hyötyä. Verrattuna lyhyemmän aallonpituuden instrumentteihin, tutkakuvat tarjoavat tarkempaa tietoa pinnan tekstuurista ja kivilajien kosteuspiitoisuuksista. Sedimenttikivilajeja on luokiteltu onnistuneesti montaa aallonpituutta käyttävällä tutkainstrumentilla. Metamorfisten kivilajien tapauksessa taas monikanavaiset kuvat toimivat paremmin, mutta esim. kasvillisuuden peitossa olevien kohteiden luokittelua on voitu tehdä tutkakuvien avulla yllättävän hyvin, välillisesti saadun tiedon perusteella.

Lineaaristen geologisten rakenteiden kartoittamisessa tutkakuvauksesta on ollut selvää etua, sillä tutkainstrumenttien avulla on löydetty aiemmin kartoittamattomia kohteita. Tutkakuvauksen

merkittävä etu on sen kyky tunkeutua suurimmilla aallonpituuksilla maanpinnan alle ja siksi tutkakuvia on käytetty myös maanpinnan alla olevien rakenteiden geologiseen kartoittamiseen. Myös maaperäkartoituksen saralla on saatu onnistuneita tuloksia.

Useimmissa geologisissa sovelluksissa monen aallonpituuden käytöstä on selvää etua. Eri polarisaatioiden antama hyöty ei ole ollut niin merkittävää, mutta esim. kivilajien kartoituksessa ristipolarisaatiosta on hyötyä.

Uusien tutkasatelliittien laukaisemisten jälkeen monella taajuudella ja polarisaatioilla toimivien instrumenttien ansiosta voidaan saada uutta tietoa geologiseen kartoittamiseen. Laajempien peittoalueiden sekä eri vuodenaikoina ja uudessa perspektiivissä otettujen kuvien avulla voidaan edelleen kartuttaa tietämystä. Lisäksi SAR-interferometriä ja differentiaali-SAR-interferometriä tarjoavat uusia sovelluskenttiä esim. maanjäristysten, siirroslinjojen ja tulivuoren purkausten seurannassa. Erityistä hyötyä monessa sovelluksessa näyttäisi olevan erilaisten aineistojen synenergiasta.

Lähdeluettelo

- Chernicoff S. ja Whitney D. 2002. *Geology*, 3rd Edition. Houghton Mifflin Company, USA.
- Dall, J., Madsen, S.N., Brooks, C.K. & Nielsen, T. 1995. "Geologic mapping in Greenland with polarimetric SAR", *Proceedings of the 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Part 3 (of 3), Jul 10-14 1995IEEE, Piscataway, NJ, USA, Firenze, Italy, pp. 2206.
- Deroin, J.P., Delor, C., Lahondere, D., Truffert, C., Cou, A., Michels, A. & Rudant, J.P. 2000, "Comparing spaceborne ERS-SAR and airborne geophysical data: Application to geology in the French Guiana rainforest landscapes", *ERS-Envisat Symposium 'Looking Down to Earth in the New Millennium'*, Oct 16-20 2000European Space Agency, Gothenburg, Sweden, pp. 103.
- Farr, T. ja Chadwick, O. 1996. "Geomorphic processes and remote sensing signatures of alluvial fans in the Kun Lun Mountains, China". *Journal Geophysical Research*, 101, 23091-23100.
- Frei, M., Wever, T., Lei, Q., Mehl, H., Henkel, J. & Bodechtel, J. 1995, "Synergy of optical and microwave remote sensing data for geoscientific applications in arid environments", *Proceedings of the 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Part 3 (of 3)*, Jul 10-14 1995IEEE, Piscataway, NJ, USA, Firenze, Italy, pp. 2203.
- Graham, D.F., Grant, D.R. 1994. "Airborne SAR for surficial geological mapping", *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 20, no. 3, pp. 319-323.
- Henderson F.M. ja Lewis A.J. 1998. *Principles & applications of imaging radar, Manual of remote sensing, Volume 2*, Third Edition. John Wiley & Sons: New York.
- Jensen J.R. 2000. *Remote Sensing of the Environment*. Prentice-Hall Inc.: Upper Saddle River, NJ, USA.
- Kuosmanen V. 1998. "Geology", *A look at the earth*. Markprint Oy: Lahti
- Lillesand T.M., ja Kiefer R.W. 2000. *Remote Sensing and Image Interpretation*, Fourth Edition. John Wiley & Sons: New York.

- Loizzo, R., Sylos Labini, G., Pappalepore, M., Pieri, P., Blonda, P., Pasquariello, G. & Antoninetti, M. 1994, "Multitemporal analysis of ERS-1 and Landsat TM data for geologic studies", *Proceedings of the 1994 Geoscience and Remote Sensing Symposium. Part 3 (of 4), Aug 8-12 1994*IEEE, Piscataway, NJ, USA, Pasadena, CA, USA, pp. 1478.
- Loizzo, R., Sylos, L.G., Pappalepore, M., Pieri, P., Pasquariello, G. & Antoninetti, M. 1995, "Multitemporal and multisensor signatures evaluation for lithologic classification", *Proceedings of the 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Part 3 (of 3), Jul 10-14 1995*IEEE, Piscataway, NJ, USA, Firenze, Italy, pp. 2209.
- Lowman, P.D.J. 1994, "Radar geology of the Canadian Shield: A 10-year review", *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 20, no. 3, pp. 198-209.
- McCauley, J., Schaber, G. ja Breed, C., 1996. "The use of multifrequency and polarimetric SIR-C/X-SAR data in geological studies of Bir Safsaf, Egypt. *Remote Sensing of Environment*, 59, 337-363.
- McGregor, R.G., Brown, A., Good, D.H. & Tomsons, D. 1994, "Potential application of synthetic aperture radar to geologic site characterization of Canadian Shield terrain", *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 20, no. 3, pp. 333-339.
- Mouginis-Mark, P., 1995. "Real-time observations of southern ocean wavw fields from the shuttle imaging radar". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 942-949.
- Sabins, F.F. 1999, "Remote sensing for mineral exploration", *Ore Geology Reviews*, vol. 14, no. 3-4, pp. 157-183.
- Schetselaar, E.M. 1994, "Comparative evaluation on the potential of C-band airborne SAR and panchromatic Spot images for geologic mapping in the Archean Hood River Belt, Bathurst Inlet, Northwest Territories", *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 20, no. 3, pp. 302-316.
- Schmullius, C.C. ja Evans, D.L. 1997, "Synthetic aperture radar (SAR) frequency and polarization requirements for applications in ecology, geology, hydrology, and oceanography: A tabular status quo after SIR-C/X-SAR", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no. 13, pp. 2713-2722.

- Singhroy, V., Slaney, R., Lowman, P., Harris, J. & Moon, W. 1993, "RADARSAT and radar geology in Canada", *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no. 4, pp. 338-351.
- Tapley, I.J. ja Craig, M.D., 1995. "An evaluation of AIRborne Synthetic Aperture Radar (AIRSAR) for mapping surface and sub-surface structures in the Telfer region, Paterson Province, Western Australia" (Volumes 1 and 2). CSIRO/AMIRA Project 392. *CSIRO Exploration and Mining Report 146R*, pp.110.
- Tapley, I.J., 1998. "Landform, regolith and geological mapping in Australia using polarimetric and interferometric radar datasets – Executive Summary Report". CRC LEME/AMIRA Project 392. CRC LEME Report 90R. CSIRO Exploration and Mining Report 529R, pp 38.
- Tapley, I.J., Okada, K. & Tsukada, M. 2000, "An overview of the benefits of radar polarimetry and interferometry for mapping regolith geology in Australia", *2000 IEEE Aerospace Conference, Mar 18-25 2000* Big Sky, MT, pp. 483.