Verfahren der Fernerkundung und ihr Einsatz in der Gebirgsforschung

Kati Heinrich

1. Einführung

Im Bereich der Fernerkundung hat sich seit den 1970er Jahren – mit dem systematischen Einsatz von Fernerkundungssatelliten und dem damit verbundenen weltweiten Zugang zu diesen Daten – eine sehr dynamische Entwicklung vollzogen. Auch die unterschiedlichen Themenfelder der Geographie haben vom Fortschritt dieser Technik profitiert, denn sie erlaubt das Beobachten der Erdoberfläche als Gesamtheit sowie das Erfassen von Einzelerscheinungen.

Die Fernerkundung (engl. remote sensing) befasst sich mit der Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche sowie die Erdatmosphäre oder auch die Oberfläche anderer Himmelskörper durch Messung und Interpretation reflektierter oder emittierter elektromagnetischer Strahlung (Vgl. DIN 18716/3, Albertz 2001). Im Gegensatz zu konventionellen Erfassungsmethoden ermöglicht Fernerkundung die berührungsfreie Erkundung durch flugzeug- und satellitengetragene Sensoren. Sie erfassen neben dem sichtbaren Licht auch Wellenbereiche, die jenseits der Wahrnehmung des menschlichen Auges liegen. Dazu gehören nahes und mittleres Infrarot, thermale Strahlung und Mikrowellen.

Die wissenschaftlich-methodische Herausforderung liegt nun darin, das Potenzial dieser Fernerkundungsdaten optimal auszunutzen, indem diese systematisch weiterverarbeitet und themenspezifisch ausgewertet werden. Dazu werden entsprechende Methoden und leistungsfähige, weitgehend automatisierte Verfahren ständig weiterentwickelt. Die Vorgehensweise bei der Aufbereitung und Interpretation der Daten ist dabei abhängig von der Fragestellung, dem Untersuchungsgebiet, dem Stand der Forschung in diesem Gebiet und dem Detailgrad der Untersuchung. Natürlich spielen in der Praxis auch das Vorhandensein von Fernerkundungsdaten und Auswertegeräten, der Zeitrahmen, die finanziellen Mittel sowie die persönlichen Erfahrung des Interpreten eine maßgebliche Rolle (Löffler, Honecker & Stabel 2005).

Die Forschungsstelle für Gebirgsforschung: Mensch und Umwelt hat sich zum Ziel gesetzt, Forschung in Gebirgsräumen der Erde interdisziplinär durchzuführen. Fernerkundung spielt hierbei als Methode zur Raumanalyse und Hypothesengewinnung

eine große Rolle. In diesem Rahmen gilt es, methodische Fortschritte in der Fernerkundung zu erzielen. Im Folgenden werden einleitend zur Verfügung stehende Fernerkundungssysteme und ihre Funktionsweise vorgestellt und anschließend wird speziell auf ihre aktuelle Anwendung in Gebirgsräumen eingegangen. Dabei geht es vor allem um die Vorstellung nutzbarer Fernerkundungsdaten und deren Anwendbarkeits- und Entwicklungspotenzial.

2. Fernerkundungsplattformen und Aufnahmesysteme

Die wichtigsten und gebräuchlichsten Formen der Fernerkundungsplattformen stellen Flugzeuge und Satelliten dar, wobei jede in ihrem Anwendungsbereich Vor- und Nachteile aufweist. An Bord befinden sich passive und/oder aktive Aufnahmesysteme (vgl. Abb. 12). Passive Fernerkundungsverfahren messen die von der Erdoberfläche oder der Atmosphäre reflektierte oder emittierte elektromagnetische Strahlung. Meist handelt es sich um multispektrale Sensoren. Ein weiteres wichtiges passives Aufnahmesystem der Fernerkundung ist die Kamera, die Luftbilder sowohl mit Filmen und Filter unterschiedlicher Sensibilität als auch digital aufnehmen kann und dabei durch ihr hohes Auflösungsvermögen detaillierte räumliche Interpretation zulässt. Aktive Systeme wie Radar oder Laser senden Impulse aus und messen die Laufzeit der von der Erdoberfläche rückgestreuten Signale. Radar ist auf Grund seiner größeren Wellenlänge in der Lage, Wolken und Dunst zu durchdringen und auch nachts Daten zu liefern.

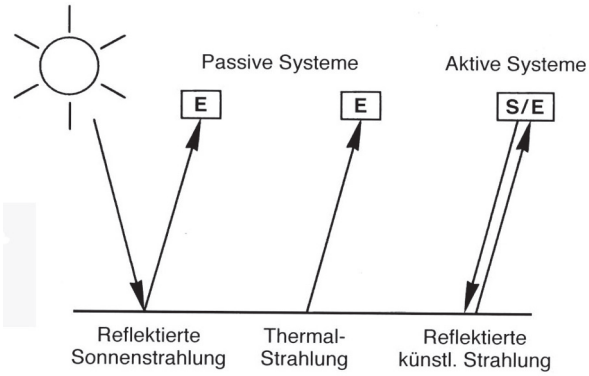

Abb. 12: Schematisch vereinfachte Darstellung des Strahlungsflusses bei der Datenaufnahme mit passiven und aktiven Sensoren; E = Empfänger (Sensor), S = Sender (Quelle: Albertz 2001: 10).

Derzeit bewegt sich eine Vielzahl von Satelliten mit zum Teil qualitativ stark verbesserten Sensoren um die Erde, typischerweise in ca. 450 bis 36.000 Kilometern Höhe. Die Vorteile der Satellitenfernerkundung liegen im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren in:

- der hohen Aktualität der Daten, die oftmals schon innerhalb von Stunden zur Verfügung stehen,
- der flächendeckenden Erfassung der gesamten Erde,
- den hohen Wiederholraten, die Vergleiche und Zeitreihenanalysen erlauben,
- der Anwendbarkeit in entlegenen und schwer zugänglichen Gebieten (z.B. Polar-

gebiete, Regenwälder, Ozeane, Hochgebirgsregionen, Katastrophengebieten) sowie
- der Reduzierung des Zeit- und Kostenaufwandes.

Nachteilig wirken sich dagegen folgende Kriterien der Satellitenfernerkundung aus:
- Passive Aufnahmeverfahren sind abhängig von Tageszeit und Wetter und können nicht in den Boden eindringen,
- aktuelle Phänomene (wie Vulkanausbrüche) können derzeit häufig nur durch Zufall aufgenommen werden und
- die fehlende oder unzureichende Abstimmung von Satellitenserien erschwert die Auswertung von Zeitreihen.

Je nach verwendetem Aufnahmesystem sind Satellitenbilddaten von unterschiedlicher sowohl räumlicher als auch spektraler Auflösung gekennzeichnet. Jeder Sensor ist durch ein spezifisches „Wahrnehmungsvermögen" charakterisiert, d.h. er ist für bestimmte Wellenlängenbereiche sensibel (vgl. Abb. 13).

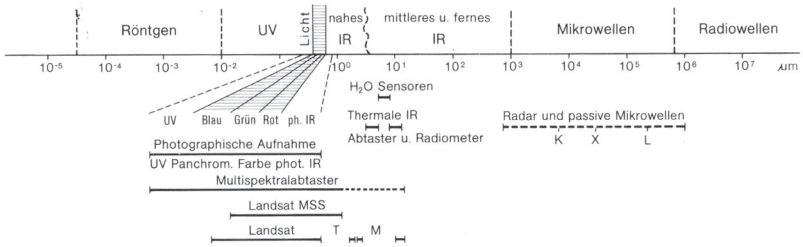

Abb. 13: Elektromagnetisches Spektrum und Einsatzbereiche von Fernerkundungssystemen (Quelle: verändert nach Löffler, Honecker & Stabel 2005: 22).

Während der Aufnahme speichert er die entsprechenden Reflexionswerte für jede Wellenlänge in den zugehörigen Kanälen. Bei der Interaktion der elektromagnetischen Strahlung mit der Erdoberfläche werden in Abhängigkeit von der Landbedeckung bestimmte Strahlungsanteile reflektiert und andere absorbiert. Diese so genannte spektrale Signatur gibt den „spektralen Fingerabdruck" eines Objektes wieder. So reflektieren grüne (gesunde) Pflanzen im sichtbaren Bereich grünes Licht und infrarote Strahlung, das rote Licht wird durch das Chlorophyll der Pflanzen für die Photosynthese absorbiert. Sauberes Wasser hingegen wirft besonders Strahlung im sichtbaren kurzwelligen Bereich (blau, grün) zurück und absorbiert sichtbare langwellige Strahlen (rot) und nahes Infrarot. Deshalb erscheint Wasser zumeist auch blau bzw. blaugrün. Derartige Kenntnisse über die Variation der Reflexion in Abhängigkeit von der Wellenlänge werden für eine Klassifizierung multispektraler Daten verwendet. Sie vermögen somit Aufschluss über verschiedene Landbedeckungen und Landnutzungen zu geben. Die räumliche Auflösung der verschiedenen Verfahren entspricht jeweils der kleinsten identifizierbaren Fläche auf einem Bild,

bei Rasterdaten oft ausgedrückt als Größe der Rasterzelle (Pixel). In einem Satellitenbild entspricht diese Fläche dem Ausschnitt der Erdoberfläche, der von einem einzigen Pixel abgedeckt wird. Kommerzielle Satellitenbilddaten können heute eine feine Auflösung von bis zu 60 cm (QuickBird) erreichen. Für 2007 ist der Start des Satelliten OrbView-5 geplant, der mit einer Auflösung von bis zu 0,41 Metern Daten aufnehmen kann. Die Pixelgröße eines grob aufgelösten Bildes dagegen beträgt etwa 5 km (METEOSAT). Zwischen diesen Extremwerten liegen die Daten von Satelliten wie IKONOS, SPOT, IRS, LANDSAT, TERRA, ENVISAT oder NOAA.

3. Anwendungsbereiche

Da jeder Satellit für bestimmte Aufgaben konzipiert worden ist, ist die Auswahl des Sensors von der jeweiligen Anwendung abhängig. So vielfältig die Lebensräume der Erde sind, so mannigfaltig sind auch die Anwendungsgebiete der Fernerkundung. Am bekanntesten ist sicherlich der Einsatz von Satellitenbildern in der Wettervorhersage mit wissenschaftlichem Schwerpunkt in der Klimaforschung. Die dabei benutzten grob auflösenden Daten finden auf Grund ihrer globalen Abdeckung und ihrer großen Wiederholungsrate in der Hydrologie, Ozeanographie, Glaziologie und Atmosphärenphysik Verwendung. Die höher auflösenden Satellitendaten hingegen dienen unter anderem der topographischen und thematischen Kartierung, Archäologie, Geologie, Petrographie, Geomorphologie, Forst- und Landwirtschaft, Stadtgeographie sowie Naturgefahrenbeobachtung. Kurz gesagt, die Fernerkundung findet in allen unterschiedlichen Teilbereichen der Geowissenschaften Anwendung.

Die Forschungsstelle „Gebirgsforschung: Mensch und Umwelt“ widmet sich insbesondere der Erforschung stark reliefierter Räume. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich daher mit der Fernerkundung in Gebirgsräumen und behandelt beispielhaft räumliche Strukturen des Reliefs, der Böden, der Vegetation und des Klimas. Aus Platzgründen werden die Entwicklungen im Wirtschafts- und Siedlungsraum nicht angesprochen, obwohl die Fernerkundung gerade für die rasch ablaufenden Prozesse in der Kulturlandschaft ein Erfolg versprechendes Analyseinstrument darstellt.

4. Fernerkundung in Gebirgsräumen

Gebirgsregionen sind oftmals weit abgelegen und/oder schwer zugänglich, egal ob die Gründe dafür in den physischen Verhältnissen oder in politische Restriktionen zu finden sind. Damit ist eine Datenaufnahme und Beobachtung durch Ortsbegehung oftmals nur schwer möglich. In diesen Fällen bietet die Fernerkundung einen Weg, solche Gebiete zu erfassen und zu untersuchen.

Jedoch stellt der versteilte, in der Regel glazial geformte Teil des Gebirges – im Allgemeinen die Höhenstufen oberhalb der Dauersiedlungsgrenze, das so genannte

„Hochgebirge“ (in den zentralen Ostalpen also das Niveau über 2000 m Meereshöhe) – einen Landschaftsausschnitt dar, der die Möglichkeiten der Fernerkundung an ihre Grenzen bringt. Probleme werden vor allem durch das steile Gelände verursacht. Bedingt durch sein Aufnahmesystem ist der Satellit kaum in der Lage, solche Gebiete ohne Datenverlust und Fehler aufzunehmen. Zudem besteht die Tendenz, zunehmend kleinräumige Erscheinungen zu untersuchen, und dazu sind hoch auflösende Datensätze notwendig. Solche sind erst seit kurzer Zeit und zudem noch zu recht hohen Kosten verfügbar, weshalb ihr Potential auch noch nicht in seiner Gesamtheit ausgewertet worden ist, insbesondere nicht im Hochgebirge. Zur Verfügung stehende Datensätze in entsprechender räumlicher Auflösung umfassen optische Daten, Laser- und Radardaten sowie Digitale Höhenmodelle (DHM). Letztgenannte sind in Gebirgsregionen besonders wichtig für die Darstellung und Analyse des charakteristischen Reliefs.

4.1 Digitale Höhenmodelle

Digitale Höhenmodelle (DHMs) dienen der dreidimensionalen Darstellung der Topographie und sind meist als regelmäßig angeordnetes Punktraster dargestellt, in dem die einzelnen Punkte Höhenwerte repräsentieren. Da sie eine quantitative Analyse der Erdoberfläche erlauben, kommen DHMs in einer Vielzahl von Anwendungen zum Einsatz. Dazu gehören u.a. hydrologische Modellierung, Rohstoffexploration, Naturgefahrenbeobachtung, Planung von Infrastruktur, Flugführung sowie Wetter- und Klimamodellierung.

DHMs können einerseits aus optischen Stereosatellitenbildern (ASTER oder SPOT5) oder durch SAR[1]-Interferometrie (InSAR) erzeugt werden, die eine räumliche Auflösung von einigen Zehnermetern und eine vertikale Genauigkeit von einigen Metern bis zu einigen wenigen Zehnermetern erreichen (Kääb 2005). Außerdem stellt die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) kostenlos Höhendaten im Internet[2] zum Download zur Verfügung und deckt ein Gebiet zwischen 60 Grad nördlicher und 54 Grad südlicher Breite ab (Beispiel Abb. 14). Die Daten besitzen eine räumliche Auflösung von 90 Metern und eine Höhengenauigkeit von einigen Metern bis zu wenigen Zehnermetern.

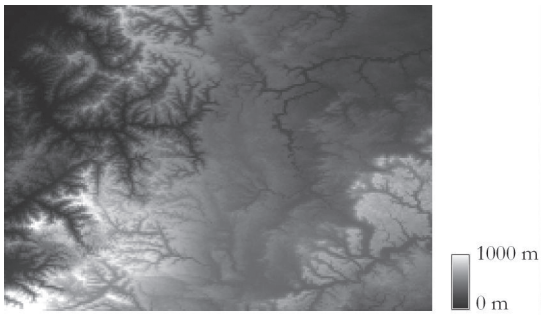

Abb. 14: SRTM-Daten, 90-m-Auflösung (Quelle: U.S. Geological Survey).

[1] Synthetic Aperture Radar.

[2] http://seamless.usgs.gov/website/Seamless/.

Andererseits stehen hoch auflösende DHMs zur Verfügung, die durch Luftbild-Photogrammetrie, flugzeuggestütztes InSAR und Laserscanning erzeugt werden. Derartige Höhenmodelle weisen eine räumliche Auflösung von wenigen bis zu einigen Zehnermetern und eine vertikale Genauigkeit im Bereich von Zentimetern bis Metern auf (Kääb 2004). Mit Hilfe von digitalen Höhenmodellen ist es möglich, vertikale Veränderungen der Erdoberfläche zu ermitteln. Diese Messungen können nach Erstellung von Differenzenbildern im Hochgebirge beispielsweise Aufschluss über Erosionsvorgänge oder Veränderungen der Gletschermächtigkeit über einen bestimmten Zeitraum geben (Kääb 2005).

4.2 Airborne Laser Scanning

Das Verfahren Airborne Laser Scanning (ALS) – auch unter dem Begriff LIDAR (LIght Detection And Ranging) bekannt – birgt ein Potenzial in sich, das bisher noch nicht in seiner Gesamtheit abgeschätzt werden kann. ALS dient der hochgenauen (> 1 Mio. Messpunkte pro km²) und hoch auflösenden (Höhengenauigkeit im Dezimeterbereich) Erfassung von Geländeoberflächen und misst neben den x-, y- und z-Koordinaten zumeist auch die am Empfänger ankommende Intensität des reflektierten Strahls (Geist et al. 2005). Der Hauptanwendungsbereich ist die topographische Geländeaufnahme, bei der neben den Geländeformen auch die Beschaffenheit des Geländes so wie sein Bodenbewuchs bestimmt werden kann. ALS ist zudem in der Lage, die Vegetationsschicht zu durchdringen und so ein digitales Oberflächen- und Geländemodell anzufertigen. Das digitale Oberflächenmodell (DOM) beschreibt neben der realen Geländeform auch natürliche und anthropogene Objekte, wohingegen das digitale Geländemodell (DGM) diese Dinge nicht berücksichtigt, sondern lediglich sämtliche Informationen über die Geländeoberfläche sowie ergänzende Angaben speziell zur geomorphologischen Charakterisierung des Geländes enthält. Auf Grund der gleichzeitigen Erfassung von DOM und DGM eignet sich ALS hervorragend für die Anwendung im Wald. Untersuchungen zu den Einsatzmöglichkeiten umfassen u.a. die Schätzung des Holzvorrates, die Waldstrukturanalyse, die Einzelbaumerkennung sowie die Baumhöhenermittlung (Mair & Hollaus 2006; Hyyppä et al. 2004).

Interessante Fragestellungen im Hochgebirge ergeben sich nicht nur für die Untersuchung von Forst, sondern auch im Bereich der Glaziologie, Geomorphologie und Hydrologie. So wurden beispielsweise im Rahmen des EU-Projektes OMEGA (Operational Monitoring system for European Glacial Areas)[3] u.a. ALS-Daten zur Erstellung von DGMs getestet. Ziel des Projektes „ist die Entwicklung eines Prototyps für ein operationelles Monitoringsystem, das genaue und aktuelle Informationen über ausgewählte europäische Gletscher zur Verfügung stellen soll“ (Geist

[3] http://omega.utu.fi.

2004: 104). ALS-Daten ermöglichen eine feine Darstellung der Topographie, so dass selbst Gletscherspalten oder einzelne Fels- und Eisblöcke abgebildet werden können (Abb. 15). Interessant ist ebenfalls die Auswertung der Daten hinsichtlich der Abschätzung von Massenbilanzen, Gletscherbewegungen und der Klassifikation von Gletscheroberflächen. Auch die Beschreibung geomorphologischer Strukturen ist eine wichtige Komponente der Gebirgsforschung, da sie u.a. Hinweise auf Naturgefahren geben kann. So können nach der Erstellung von Oberflächenmodellen Simulationen von Überflutung, Lawinen oder Hangrutschungen erzeugt werden. An dieser Stelle sei auf die Publikation von Hollaus, Wagner & Kraus (2005) und die darin angegebene Literatur verwiesen, in der die Anwendung der ALS für hydrologische Modellierung beschrieben wird.

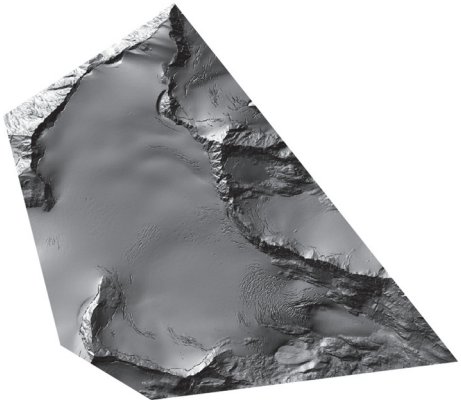

Abb. 15: Hillshade eines flugzeuggestützten ALS DGMs des Kesselwandferners, Ötztaler Alpen. Datenaufnahme Oktober 2004 im Rahmen des EU-Projekts OMEGA.

Es muss allerdings erwähnt werden, dass die ALS-Datenerfassung in Gebieten mit großen Reliefunterschieden eingeschränkt ist, da Laserscanningsysteme eine begrenzte Reichweite aufweisen. Weiterentwicklungen in der Technik können jedoch diesen Nachteil mittlerweile mindern (Geist et al. 2005). Ebenso stellen neue ALS-Systeme kalibrierte Intensitäten des Laserechos sowie die gesamte Wellenfunktion bereit (Wagner et al. 2004). Damit sind zusätzliche Informationen über die Eigenschaften (z.B. Eis, Firn, Schnee, Fels) und die Struktur (Vegetation) der Oberfläche verfügbar. Außerdem wird eine Unterscheidung von niedriger Vegetation und versiegelten Flächen erlaubt, die nicht über die Geometrie möglich ist.

4.3 Optische Daten

Auch Satelliten wie IKONOS, QuickBird und Orbview-3, die zum Teil im Submeterbereich aufnehmen und daher nahezu mit Luftbildern vergleichbar sind, eröffnen neue Möglichkeiten in der Hochgebirgsfernerkundung. Die hoch auflösenden Satellitenbilder bieten im Hochgebirge gegenüber dem bisher eingesetzten Bildmaterial mit gröberer Auflösung eine erweiterte Anwendbarkeit, die derzeit allerdings noch erforscht wird. Probleme bei der Auswertung lagen bisher neben Kosten- und Akquisitionsgründen darin, „dass die Methoden- bzw. Softwareentwicklung mit den technischen Neuerungen nicht Schritt halten konnte“, so Neubert (2005: XV). Konventionelle Auswertungsverfahren sind auf die gleiche Art und Weise nicht unbedingt mehr zielführend, weshalb neue Verfahren entwickelt werden müssen. Anhand

der multispektralen optischen Daten können u.a. Aussagen über Oberflächenformen, geologische und geomorphologische Zusammenhänge, Vegetation, Böden, Landnutzung, Wasserhaushalt und Siedlungen getroffen werden (Löffler, Honecker & Stabel 2005).

Huggel, Kääb & Salzmann (2006) untersuchten den Einsatz von IKONOS (Abb. 16) und QuickBird zur Abschätzung von (insbesondere von Gletschern ausgehenden) Naturgefahren im Hochgebirge. Das Ergebnis zeigt, dass anhand von IKONOS-Daten potentiell instabile Schutthänge identifiziert werden können und QuickBird-Daten für die Abschätzung von Schäden, verursacht durch Massenbewegung und Flutabgänge, geeignet sind. Weitere Einsatzmöglichkeiten dieser hoch auflösenden Daten werden u.a. von Petrini-Monteferri et al. (2003), Vassilopouloua et al. (2002), Kääb (2004) oder Huggel, Kääb & Salzmann (2004) beschrieben. Die Art der untersuchten Naturgefahren reicht von Bergstürzen, Muren, Hangrutschungen, Überflutungen, Sturmschäden, Waldbränden, Gletschervorstößen und Lawinen bis hin zu vulkanischen Ereignissen. Obwohl die hoch auflösenden Daten für einen Einsatz im Naturgefahrenmanagement sehr zweckdienlich sind, sind sie doch erst frühestens zwei bis drei Tage nach Eintreten der Ereignisse erhältlich und damit nicht sofort für eine schnelle Abschätzung des Schadens und zum Organisieren von Hilfsmaßnahmen einsatzbereit. Einer kontinuierlichen Gefahrenbeobachtung stehen auch die immensen Datenkosten entgegen. Kostengünstiger für diesen Anwendungsbereich sind Satellitenbilder von LANDSAT (Abb. 16), SPOT-3/4 oder TERRA-ASTER im Auflösungsbereich von 10 bis 30 Metern. Kääb (2004) verweist auf zahlreiche Untersuchungen, die mit diesen Daten bereits gemacht worden sind und bestätigt trotz ihrer reduzierten Auflösung ihre Einsatzfähigkeit im Hochgebirge.

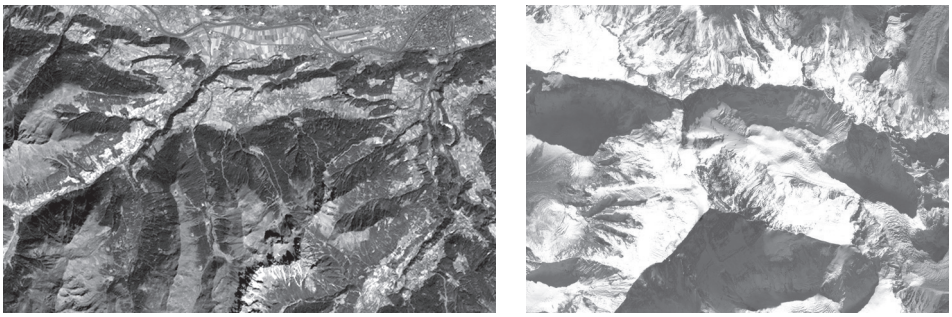

Abb. 16: links: LANDSAT-ETM+, 15 m, pan, Stubaier Alpen (Quelle: Global Land Cover Facility, www.landcover.org); rechts: IKONOS, 4 m, Mt. Everest (© Space Imaging, Inc., www.spaceimaging.com/gallery/).

Die Naturgefahrenforschung stellt einen komplexen Anwendungsbereich im Hochgebirge dar, daneben kommen optische Fernerkundungsdaten des Weiteren bei der Kartierung (Hörsch 2001), beim Natur- und Landschaftsschutz (Werner 2002), bei

hydrologischen und hydrogeologischen Fragestellen (Meinel, Schumacher & Gössel 2003; Seidel & Martinec 2002) oder bei Untersuchungen über Wildbestände und -habitate (Albertz 2001; Buchroithner, Prechtel & Hessing 1996) zum Einsatz.

Die Abgrenzung von Vegetation erfolgt am häufigsten über den Normalised Difference Vegetation Index (NDVI), der nahes Infrarot, welches besonders die Vitalität der Vegetation widerspiegelt, ins Verhältnis mit dem roten Spektralbereich setzt (Albertz 2001). Ferner ermöglicht der NDVI auch die Abgrenzung von Bodeneinheiten, allerdings nur über die Oberfläche, da ein Eindringen der Strahlen in den Boden nicht gegeben ist. In vielen Gebieten unserer Erde ist Boden zudem permanent mit Vegetation bedeckt. Auch deshalb ist eine direkte Bestimmung von Bodeneigenschaften (Humusgehalt, Korngrößenverteilung etc.) mit Hilfe von optischen Daten meist nicht möglich, sondern kann nur indirekt über andere Indikatoren erfolgen. In Frage kommen dabei Bewuchsmerkmale, morphologische Eigenschaften des Geländes sowie andere bodenrelevante Erscheinungen, wie z.B. Erosion. Direkte Aufnahmemöglichkeiten von Bodeneigenschaften bietet zumindest teilweise die Radarfernerkundung.

4.4 Radardaten

Mikrowellensensoren zählen zu den aktiven Aufnahmesystemen und bieten im Vergleich zu den optischen Sensoren den Vorteil, dass sie wetter- und tageszeitunabhängig Daten liefern können. Sie erlauben die Aufnahme durch Dunst, Rauch, leichten Regen sowie Schneefall und unter bestimmten Bedingungen auch die Beobachtung von Erscheinungen unterhalb der Vegetations- und einer dünnen Bodenschicht. Das Haupteinsatzgebiet der Mikrowellen liegt in der Radarfernerkundung (Radio detection and ranging), wobei ein Mikrowellensignal schräg zur Erdoberfläche ausgesendet, der Anteil des zum Sensor rückgestreuten Signals (Radarecho) wieder empfangen und die Laufzeit und Intensität von ausgestrahlter und am Boden reflektierter Strahlung gemessen wird. Die Strahlung besitzt eine definierte Wellenlänge (im Bereich 1 mm – 1 m), Ausbreitungsrichtung, Strahldichte, Polarisation und Phase. Letztere enthält dreidimensionale Information und kann zur Berechnung von Digitalen Geländemodellen (DGM) weiterverarbeitet werden. Bestimmende Einflussfaktoren der Radarfernerkundung sind: der Einfallswinkel der Strahlen und die Lage eines Geländeabschnitts zum Radarstrahl, die Oberflächenrauhigkeit, die Bodenfeuchte und die elektrische Leitfähigkeit, die Wellenlänge sowie die Polarisation (Löffler, Honecker & Stabel 2005).

Bei ausreichend steilem Einfallswinkel sind Strahlen mit einer größeren Wellenlänge (z.B. C- und L-Band) in der Lage, Vegetation zu passieren und in den Boden einzudringen, wo sie vorwiegend von Wassermolekülen gestreut werden (vgl. Abb. 17). Je

feuchter der Boden ist, desto höher wird auch die Intensität des Radarechos. Wagner (1998) entwickelte basierend auf Daten des ERS-1/2-Scatterometers ein Verfahren, aus den Rückstreukoeffizienten die Bodenfeuchte zu extrahieren.

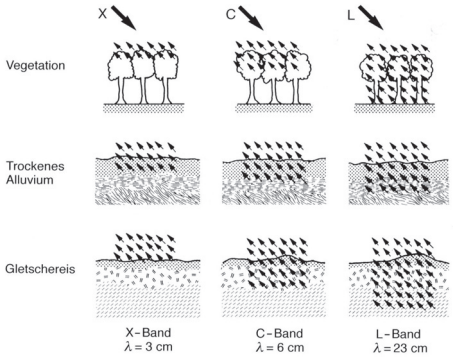

Abb. 17: Schematische Darstellung der Eindringtiefen von Mikrowellen mit unterschiedlichen Wellenlängen (Quelle: Albertz 2001: 64).

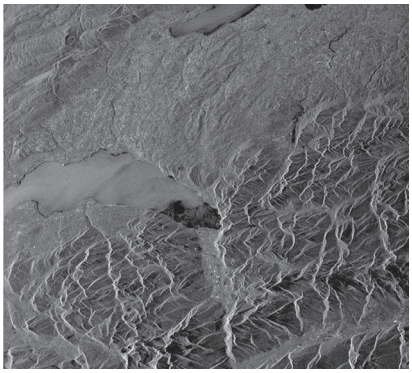

Abb. 18: ERS-2 Satellitenbild der südwestlichen Schweiz (Kantone Vaud und Valais) (Quelle: ESA).

Gerade in Gebirgsregionen gestaltet sich aber die Aufnahme mit Radar relativ schwierig (Lichtenegger 1996), weshalb der Einsatz der Daten zur reinen Interpretation der Flächeneigenschaften begrenzt ist. Wegen des Aufnahmesystems erscheinen dem Sensor zugeneigte Hänge stark verkürzt bis überhängend. Des Weiteren entstehen Radarschatten, die bei abgewandten Hängen vorzufinden sind, da dort entweder sehr wenig oder überhaupt keine Strahlung reflektiert wird. Der Schatten erscheint umso länger, je flacher der Einfallswinkel und je steiler das Gelände ist.

Die Oberflächenrauhigkeit kann zur Unterscheidung von verschiedenen Bodenbedeckungen (Wald, Wasser, Gestein, Gletscher etc.) herangezogen werden. Je rauer die Oberfläche, desto stärker der Rückstreukoeffizient. Ebenso wirkt sich die Polarisation der Wellenlänge auf das Radarecho aus und gibt z.B. die Möglichkeit, verschiedene Vegetationstypen zu unterscheiden.

Neben der Intensität wird auch die Phasenlage der Radarwelle gemessen, die dreidimensionale Information enthält und so die Generierung von Geländemodellen ermöglicht (Abschnitt „Digitale Höhenmodelle“). Das Verfahren wird Radarinterferometrie genannt (Löffler, Honecker & Stabel 2005). Anwendungsfelder sind die Erfassung von Veränderungen der Erdoberfläche im Millimeter- und Zentimeterbereich bei Gletschern, Hangrutschungen sowie Hebungen und Senkungen, z.B. auf Grund von Permafrost.

Derzeit stehen Radardaten mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen und verschiedenen Frequenzbereichen zur Verfügung, die sowohl von flugzeug- als auch sa-

tellitengestützten Aufnahmesystemen stammen. Zu den Satelliten zählen ERS-1/2 (Abb. 18, S. 77), JERS, RADARSAT und ENVISAT. Für Ende des Jahres 2006 ist der Start des neuen deutschen Satelliten TerraSAR-X[6] geplant. Er soll Daten mit einer räumlichen Auflösung von ein bis zwei Metern und verschiedenen Polarisationen zur Verfügung stellen und bietet Möglichkeiten, die bisher bei Aufnahmen aus dem Weltall nicht gegeben waren.

5. Bildverarbeitung, Bildauswertung und GIS

Fernerkundung umfasst neben der Aufzeichnung der Daten auch deren thematische Verarbeitung und Interpretation bzw. Klassifikation zur Ableitung von (GIS-)Informationen. Mit Hilfe der so genannten Bildverarbeitung werden Störeinflüsse reduziert und die Bilder für die folgende Auswertung aufbereitet. Dazu werden zunächst geometrische Verzerrungen korrigiert, die durch das Aufnahmesystem und das Relief entstehen. Anschließend findet eine radiometrische Korrektur statt, bei der verschiedene Störeinflüsse, die während der Datenaufnahme und der Übertragung aufgetreten sind, eliminiert werden. Mit Hilfe der Bildverbesserung in Form von Kontrastverstärkung, Filterung und Kombination mehrerer Spektralbänder sind die Daten für eine nachfolgende Auswertung vorbereitet.

Die Bildauswertung dient dazu, aus den verbesserten Daten für die Anwendung gewünschte Informationen und Produkte für die Anwendung abzuleiten. Neubert (2005) bietet einen guten Überblick zu den aktuell angewandten Methoden und entsprechenden Fragestellungen. Die seit kurzer Zeit vorhandenen, hoch auflösenden Satellitenbilddaten verlangen neue Verfahren, um u.a. den enormen Datenumfang auswerten zu können. Neben den klassischen pixelbasierten Auswertungsverfahren wie dem Schwellwertverfahren und der überwachten oder unüberwachten Klassifikation kommen neue Methoden hinzu wie Neuronale Netze oder Fuzzy-logic-Algorithmen. Besonders segmentbasierte Auswertungen sowie Verfahren zur Objekterkennung und -extraktion sind nicht mehr wegzudenkende Methoden, deren Verwendung erst mit der Verbesserung der Auflösung der Satellitenbilddaten und der Rechentechnik sinnvoll und brauchbar geworden ist.

Mit Hilfe eines Geo-Informationssystems (GIS), das aus Hardware, Software, Daten und Anwendungen besteht, können raumbezogene Daten digital erfasst und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden. Der Datenbestand ist dabei in Ebenen strukturiert und kann Vektor-, Sach- und Rasterdaten enthalten, die interaktiv manipuliert werden können. Zu der letztgenannten Kategorie gehören immer häufiger Fernerkundungsdaten sowie daraus abgeleitete Auswertungsergebnisse. Ein GIS bietet eine

[6] http://www.caf.dlr.de/tsx/start_ge.htm.

Vielzahl von integrierten Analysemethoden, die der Gewinnung neuer Informationen und somit der Erstellung von Entscheidungsgrundlagen dienen. Dabei liegt der Vorteil der Fernerkundungsdaten gegenüber anderen Datenquellen darin, dass sie oft flächendeckend verfügbar sind und schneller aktualisiert werden können.

6. Fazit

Gebirge stellen Ressourcen-, Lebens- und Erholungsräume dar, die sensibel auf äußere Einflüsse wie die Intensivierung der Landnutzung oder andere Umwelteinflüsse reagieren. Fernerkundung kann bei der Erfassung und der Analyse von Gebirgsräumen einen vielversprechenden Beitrag leisten, indem ihre Vorteile, wie z.B. die berührungsfreie Beobachtung, gegenüber konventionellen Aufnahmemethoden zum Tragen kommen. Basierend auf einer Vielzahl von Fernerkundungsdatensätzen gilt es, geeignete Methoden zu entwickeln und sich an der Erarbeitung und Umsetzung von Strategien für eine nachhaltige Nutzung und Entwicklung in Gebirgsräumen zu beteiligen.

7. Literaturverzeichnis

Albertz, J., 2001: *Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt.

Buchroithner, M.F., N. Prechtel & C. Hessing, 1996: *High mountain game habitat assessment using remote sensing. Proceedings of the 4th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography*: 61–69.

Geist, Th., 2004: Digitale Geländemodelle aus flugzeuggestützten Laserscanner-Daten und ihre Anwendung für glaziologische Fragestellungen. *Innsbrucker Geographische Gesellschaft, Jahresbericht 2001/2002*: 104–112.

Geist, T. et al., 2005: Der Einsatz von flugzeuggestützten Laserscanner-Daten für geowissenschaftliche Untersuchungen in Gebirgsräumen. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 3*: 183–190.

Hörsch, B., 2001: *Zusammenhang zwischen Vegetation und Relief in alpinen Einzugsgebieten des Wallis (Schweiz). Ein multiskaliger GIS- und Fernerkundungsansatz*. Dissertation, Universität Bonn.

Hollaus, M., Wagner, W. & K. Kraus, 2005: Airborne laser scanning and usefulness for hydrological models. *Advances in Geosciences*, 5: 57–63.

Huggel C., Kääb, A. & N. Salzmann, 2004. GIS-based modeling of glacial hazards and their interactions using Landsat TM and Ikonos imagery. *Norwegian Journal of Geography*, 58: 61–73.

Huggel, C., Kääb, A. & N. Salzmann, 2006: *Evaluation of QuickBird and IKONOS imagery for assessment of high-mountain hazards*. EARSeL eProceedings, 5(1): 51–62.

Hyyppä, J. et al., 2004: Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVI, PART 8/W2: 82–89

Kääb, A., 2004: *Mountain glaciers and permafrost creep. Research perspectives from earth observation and geoinformatics technologies*. Habilitationsschrift, Institut für Geographie, Universität Zürich.

Kääb, A., 2005: *Remote Sensing of Mountain Environment*. UNESCO publications: proceedings Second and Third GLOCHAMORE Workshop: 92–99.

Lichtenegger, J., 1996: *The contribution of ERS SAR to monitoring of hilly and mountainous regions*. Proceedings of the 4th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography: 141–152.

Löffler, E., U. Honecker & E. Stabel, 2005: *Geographie und Fernerkundung: Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und modernen Fernerkundungsdaten*. Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung. Berlin, Stuttgart.

Mair, B. & M. Hollaus, 2006: *Laserscanning – Ein Wald aus Punkten*. Bündner Wald, 59: 47–53.

Meinel, G., U. Schumacher & J. Gössel, 2003: *Analyse der Hochwasserkatastrophe vom Sommer 2002 für die Stadtfläche Dresdens auf Basis von GIS und Fernerkundung*. CORP 2003 – Computergestützte Raumplanung: 109–116.

Neubert, M., 2005: *Bewertung, Verarbeitung und segmentbasierte Auswertung sehr hoch auflösender Satellitenbilddaten vor dem Hintergrund landschaftsplanerischer und landschaftsökologischer Anwendungen*. Dissertation, TU Dresden.

Petrini-Monteferri, F. et al., 2003: Einsatz höchstauflösender Satellitendaten im Kontext alpiner Naturgefahren. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XV*: 348–357.

Seidel, K. & J. Martinec, 2002: *Hydrological applications of satellite snow cover mapping in the Swiss Alps*. Proceedings of ERASeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space, Bern: 79–87.

Vassilopouloua, S. et al., 2002: Orthophoto generation using IKONOS imagery and high-resolution DEM: a case study on volcanic hazard monitoring of Nisyros Island (Greece). *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,* 57: 24–38.

Wagner, W., 1998: *Soil Moisture Retrieval from ERS Scatterometer Data*. Dissertation, Technische Universität Wien.

Wagner, W. et al., 2004: *From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXV, Part B/3: 201–206.

Werner, C., 2002: *Einsatzmöglichkeiten räumlich hochauflösender Satellitenbilder für Landschaftsplanung und Naturschutz*. Habilitationsschrift, TU Berlin.