



## Die Klassifizierung der Schneebedeckung aus Satellitenaufnahmen im kleinräumigen alpinen Bereich in Theorie und Praxis

Josef Jansa <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **89** (2), S. 50–63

2001

BibT<sub>E</sub>X:

```
@ARTICLE{Jansa_VGI_200104,  
Title = {Die Klassifizierung der Schneebedeckung aus Satellitenaufnahmen im  
kleinr{"a}umigen alpinen Bereich in Theorie und Praxis},  
Author = {Jansa, Josef},  
Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {50--63},  
Number = {2},  
Year = {2001},  
Volume = {89}  
}
```





# Die Klassifizierung der Schneebedeckung aus Satellitenaufnahmen im kleinräumigen alpinen Bereich in Theorie und Praxis

Josef Jansa, Wien

## Zusammenfassung

Das Wissen um die aktuelle Schneelage ist weltweit von großem Interesse (Stichwort: Klimaüberwachung, Wasserversorgung, etc.). In diesem Zusammenhang ist auch die Klassifizierung von Schnee aus Satellitenaufnahmen seit Jahren von wissenschaftlichem Interesse. Für die Wiener Wasserwerke wurde ein Pilotprojekt gestartet, mit dem die Schneeschmelze in den Quellgebieten modelliert werden soll. Die Schneeklassifizierung dient der Kalibrierung dieses Modells. Hier wird ein Überblick über die Problematik gegeben und vorgestellt, wie im konkreten Fall vorgegangen wurde. Zunächst gibt es eine Einführung über die Eigenschaften des Schnee und seiner Erscheinungsform in Bildern der optischen Sensoren und der Mikrowellensysteme. Dann wird genauer auf den verwendeten Klassifizierungsvorgang, der im wesentlichen aus einer unüberwachten Klassifizierung mit Beleuchtungsberücksichtigung bzw. einer Ratio-Bildung aus zeitlichen Bildfolgen besteht. Die Beschreibung der Vorgehensweise wird mit Beispielen unterlegt.

## Abstract

Knowledge about current snowcover is of great interest world-wide (cue: monitoring climate change, water supply, etc). In this context classification of snow from satellites has been of scientific interest for years. The Vienna Water Supply Authority has initiated a pilot project which focuses on modelling snowmelt in the areas of fresh water springs. The classification of snow is used for calibration purposes of the model. In this article an overview of the problem is presented describing the procedure within the project. A first part is dedicated to snow properties and appearance of snow in images from optical and microwave sensors followed by a more detailed description of the classification approach, that is based on an unsupervised classification taking into account illumination and on a ratio calculation of temporal image sequences, respectively. The text is complemented by examples.

## 1. Einleitung

Die Klassifizierung der Schneedecke scheint, so der erste Eindruck, eine einfache Aufgabe zu sein, da sich für den menschlichen Interpreten Schnee gewöhnlich deutlich von anderen Bodenbedeckungsklassen unterscheidet. Offenkundig wird das Problem allerdings, wenn man an Bewölkung denkt, die in den Bildern aus spektraler Sicht oft dasselbe Erscheinungsbild wie Schnee zeigt und, wenn überhaupt, oft nur durch die Form und Struktur richtig erkannt werden kann. Das Problem der Schneeklassifizierung ist dennoch wesentlich diffiziler. Zuerst ist zu klären, was man unter Klassifizierung verstehen soll: Geht es darum, „Schnee“ von „Nicht-Schnee“ zu unterscheiden oder geht es darum, bestimmte Schnee-Eigenschaften herauszufinden, wie etwa Körnigkeit, Feuchtigkeit, Verschmutzung, Aufbau der Schneedecke und ähnliches mehr? Beide Fragestellungen sind nicht unabhängig voneinander zu betrachten, weil schon für das Erkennen von Schnee aufgrund seiner verschiedenen Eigenschaften erforderlich ist, daß man sich detaillierter mit den möglichen Erscheinungsformen befaßt.

### 1.1. Motivation

Die Wiener Wasserwerke, als Verantwortliche für die nachhaltige Bewirtschaftung der Trinkwasserquellen, widmen sich schon lange neben den Fragen der Qualitätssicherung auch jener der Versorgungssicherung. Die Vorhersage des Wasseraufkommens und die Abschätzung des in den Quellgebieten schlummernden Wasserpotentials ist ein wesentlicher Punkt. Die Wasserwerke haben daher im Jahre 1998 ein Pilotprojekt angeregt, in welchem untersucht werden sollte, ob es nicht möglich wäre, über geeignete Schneeschmelzmodellierung laufend über den aktuellen Stand der in der Schneedecke gebundenen Wasserreserven informiert zu sein. Als Untersuchungsgebiet wurde die Schneeealpe in den Kalkalpen westlich der Rax vorgeschlagen. Diese Aufgabenstellung wurde auch vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (vormals Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr) als förderungswürdig erkannt und über einen Forschungsauftrag unterstützt. Daneben erklärte sich auch die ESA (European Space Agency) bereit, im Rahmen eines Announcement of Opportunity Daten des Satelliten ERS kostenfrei zur Verfügung zu stellen. Das gesamte Projekt war anberaumt für drei Jahre,

beginnend mit dem Anfang der Schneeschmelzperiode des Jahres 1998 und endend mit Ende der Schmelzperiode des Jahres 2000. Die Ausführung der Forschungsarbeiten übernahmen das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) und das Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft (IHGW), beide Technische Universität Wien. Außendienst und Aufgaben, die mit der Messung meteorologischer Daten zusammenhängen, übernahmen die Wiener Wasserwerke. Das IHGW hatte in der Vergangenheit Erfahrung in der Schneemodellierung gesammelt und war daher für diesen Aufgabenzweig verantwortlich. Das I.P.F. war für alle Aufgaben in Verbindung mit der Geländeerfassung und -modellierung und für die Bildinterpretation verantwortlich. Eine dieser Detailaufgaben sollte die Schneeklassifizierung aus Satellitenbildern sein, konkret aus SPOT XS und ERS SAR Aufnahmen. Die Ergebnisse dieser Klassifizierung waren als eine Art „Ground Truth“ für Zwecke der Kalibrierung des Schneemodells gedacht. [1]

### 1.2. Aufgabenstellung

Die detaillierten Anforderungen an die Klassifizierungen sind durch die Erfordernisse der Schmelzmodell-Kalibrierung definiert. Die zentrale Aufgabe war daher, die Schneelage zu erkennen und zwar, wenn irgendwie möglich, genauer charakterisiert durch Einteilung in mehrere Kategorien, die folgendermaßen beschrieben werden können: (1) volle Schneedecke, (2) leicht lückige Schneedecke, (3) stark lückige Schneedecke, (4) Schneefrei. Dadurch soll eine gewisse Aussage über die Schneemenge ausgedrückt werden. Eine Ergänzungsaufgabe war das Feststellen der Schnee-Eigenschaft „Feuchte“. Natürlich wäre auch die Dicke der Schneedecke und deren Aufbau von Interesse, was aber im Rahmen dieser Aufgabenstellung nicht weiter verfolgt wurde. Gesucht ist eine möglichst genaue lagemäßige Kartierung der Schneedecke und nicht, wie bei manch anderen Aufgabestellungen, eine statische Aussage über die Schneemenge.

## 2. Wahl geeigneter Sensoren

Bevor nähere Überlegungen über die weitere Vorgangsweise angestellt werden, sollen noch einige zusätzliche Projektparameter definiert werden. Es sind folgende Fragen zu klären,

Welche räumliche Auflösung sollen die Satellitenaufnahmen haben? (D.h. wie klein müssen die Pixel am Boden sein?)

Welche spektrale Auflösung ist erforderlich? (D.h. welche und wieviele Spektralbereiche braucht man für die Aufgabe der Schneeklassifizierung?)

Welche zeitliche Auflösung wird benötigt? (D.h. wieviele Satellitenaufnahmen sind in welchem zeitlichem Intervall erforderlich?)

Die Antworten darauf, hängen von verschiedenen Faktoren ab, die entweder durch äußere Rahmenbedingungen festgelegt sind, oder sich aus einer Kosten-Nutzen-Überlegung ergeben, oder durch die Aufgabenstellung vorgegeben werden.

*Räumliche Auflösung:* Da das Geländemodell in einem 20m-Raster erfaßt wurde und das Schneemodell ebenfalls in einem 20m-Raster aufgebaut wird, erscheint eine Pixelgröße von etwa 20m sinnvoll.

*Spektrale Auflösung:* Da die Schneeklassifizierung die zentrale Aufgabe ist, muß man überlegen, welche Spektralbereiche für diese Aufgabe auf jeden Fall erforderlich sind. Untersuchungen der spektralen Eigenschaften des Schnees zeigen, daß die im klassischen Farbinfrarotfilm verwendeten Kanäle, nämlich grün, rot und nahes infrarot das absolute Minimum darstellen, daß ein mittlerer Infrarotkanal aber entscheidende Vorteile brächte, besonders in Hinblick auf Schnee-Wolken-Diskriminierung. Denkt man an die Feststellung der Schneefeuchte, so sind Aufnahmesysteme, die im Mikrowellenbereich arbeiten, zu berücksichtigen.

*Zeitliche Auflösung:* Da die Konzentration auf dem Schneeschmelzvorgang liegt, ist es naheliegend, sich auf die Schmelzperiode zu konzentrieren. Gerade in diesem Zeitraum variiert die Schneedecke am häufigsten und am sichtbarsten. Die Ausaperung läßt Schneemuster erkennen, die sich optimal für den Vergleich der Ergebnisse der Schneeschmelzmodellierung mit jenen der Schneeklassifizierung eignen. Letztlich wurde entschieden, vier Termine im Zeitraum zwischen Feber und Juni als Minimalanforderung festzulegen.

Bei dieser bekannten Aufgabenstellung sind im wesentlichen zwei Fragen zu klären:  
Welche Sensoren kommen in Frage?  
Welche Auswerteverfahren sind geeignet?

Die Antworten auf diese Fragen werden im allgemeinen einen Kompromiß darstellen, da es erstens kaum Sensoren gibt, die alle Erfordernisse voll erfüllen und, zweitens, die Praxistauglichkeit gewisse Einschränkungen verlangt.

Unter Berücksichtigung oben angeführter Bedingungen kommen zwei Gruppen von Sensoren in Frage:

Optische Sensoren wie LANDSAT TM, IRS1C bzw. 1D LISS, SPOT XS bzw. XI  
Mikrowellensysteme wie ERS1/2 AMI SAR oder RADARSAT

Der Einsatz von Landsat TM Aufnahmen für die gestellte Aufgabe ist wohl dokumentiert (z.B. [2], [3]). Die Entscheidung fiel auf SPOT XS (mit einer Präferenz für XI) und ERS AMI SAR. Der Hauptgrund, SPOT zu favorisieren, war die relativ unkompliziert durchführbare Programmierbarkeit der Datenerfassung (mit der die Vorteile der Verschwenkbarkeit der Aufnahmerichtung aus der Flugbahn voll ausgeschöpft werden können) und die Verfügbarkeit von drei sich im Umlauf befindlichen, gleichwertigen Systemen. Dies ist besonders wichtig, da das Untersuchungsgebiet häufig bewölkt ist, und bei regulär durchgeführten Aufnahmen es sehr unwahrscheinlich ist, zu der geforderten Anzahl von Bildern zu gelangen. Selbstverständlich wäre der SPOT XI (mit dem mittleren Infrarotkanal) die bessere Lösung. Da aber XI nur auf dem Satelliten SPOT4 verfügbar ist, wurde auf die alleinige XI-Nutzung verzichtet. Die Entscheidung für ERS wurde aufgrund der Akzeptanz des Announcement of Opportunity Proposals getroffen, wonach die ESA die Mikrowellendaten kostenlos zur Verfügung stellte.

Generell kann man die Vor- und Nachteile von optischen und Mikrowellen-Sensoren, unabhängig von deren speziellen Einsatzbereichen, gegenüberstellen:

*Optische Sensoren:* Durch die Verfügbarkeit von Multispektralsystemen ist ein sehr breites Anwendungsspektrum gegeben. Außerdem steht eine große Palette standardisierter Auswerteverfahren zur Verfügung. Ein Nachteil ist, daß Wolken ein Sichthindernis bilden und optische Sensoren daher in Gebieten mit häufiger Wolkendecke nur sehr eingeschränkt angewendet werden können.

*Mikrowellen-Sensoren:* Der zuletzt angeführte Nachteil der optischen Sensoren wird von den Mikrowellensystem überwunden. Sie durchdringen nahezu ungehindert die Wolkendecke. Diesem Vorteil stehen aber einige Nachteile gegenüber. Zunächst sind die Speckles zu erwähnen, Interferenzerscheinungen, die bei Systemen mit synthetischer Apertur (SAR) auftreten und zu einem stark verrauschtem Bild führen. Ein weiterer Nachteil ist, daß die Wechselwirkung zwischen Mikrowellen und Materie relativ kompliziert ist, weshalb die Auswerteverfahren noch nicht sehr

ausgereift sind und wenige Standardverfahren zur Verfügung stehen.

### 3. Schnee und Schneeklassifizierung im optischen Bereich

Wenn man von optischer Fernerkundung spricht, meint man damit die Erfassung und Auswertung von Daten, die mit Sensoren aufgenommen wurden, die optische Elemente, wie Linsen oder Spiegel, für die Abbildung verwenden. Mit derartigen Systemen können Spektralbereiche vom Ultraviolett bis zu thermischen Infrarot aufgenommen werden. Hier in diesem Abschnitt soll die Konzentration auf dem sichtbaren Licht, dem nahem und mittlerem Infrarot liegen.

Schnee besteht, wenn man ihn genau betrachtet, aus Eiskristallen mit mehr oder weniger dazwischen eingeschlossener Luft. Schnee erscheint uns weiß, da im sichtbaren Bereich das Sonnenlicht nahezu unverfälscht reflektiert wird. Die ursprünglichen Schneekristalle vereinen sich sehr rasch und bilden mehr oder weniger große Eiskörner. Die Form und Größe der Körner sind hängt von den Schmelz und darauffolgenden Gefriervorgängen in der Schneedecke ab. Wenn Schnee schmilzt, so wird das flüssige Wasser wie in einem Schwamm in der Schneedecke festgehalten und bildet damit auch einen wesentlichen Bestandteil, der bei der spektralen Analyse beachtet werden muß. Es ist aber zu bedenken, daß der Wassergehalt selten 10% erreicht, ohne daß flüssiges Wasser in den Boden abfließt oder, wenn der Abfluß behindert wird, sich an der Oberfläche der Schneedecke in Pfützen sammelt.

Weitere Bestandteile der Schneedecke, die das Aussehen signifikant verändern können, sind alle Arten von Verunreinigungen, die durch Staub, Ruß, aber auch Pollen verursacht werden können.

#### 3.1. Schneekarakteristika im optischen Bereich

Für den Interpreten stellt sich die Frage, in welcher Weise die verschiedenen Schneebestandteile das Aussehen im optischen Bereich, d.h. den (wellenlängenabhängigen, gerichteten) Reflexionsgrad  $\rho_{\gamma}$ , beeinflussen.

Aus Untersuchungen hat sich gezeigt, daß der spektrale Reflexionsgrad und dessen Richtungsabhängigkeit von der Korngröße beeinflusst wird, während im Schnee enthaltenes flüssiges Wasser, sofern es deutlich unter dem vorhin erwähnten Wert von 10% liegt, den Reflexionsgrad sehr

wenig beeinflusst. Natürlich ist zu bedenken, daß flüssiges Wasser besonders an der Schneeoberfläche bei Abkühlung, z.B. über Nacht, wieder gefriert, wodurch sich die Korngröße und in der Folge der Reflexionsgrad verändert.

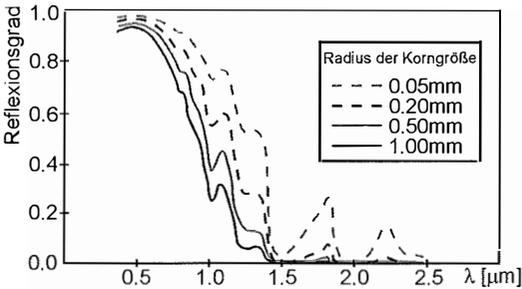


Abb. 1: Reflexionsgrad von Schnee in Abhängigkeit der Korngröße

Abbildung 1 zeigt den spektralen Reflexionsgrad frischgefallenen, reinen Schnees für den Bereich des sichtbaren Lichtes bis zum mittleren Infrarot. Die angegebenen Korngrößen können noch überschritten werden, allerdings würde dies im gezeigten Diagramm keiner wesentlichen Änderungen bedürfen [4].

Man sieht, daß der Schneereflektionsgrad im sichtbaren Bereich von der Korngröße nahezu unabhängig ist. Besonders deutlich wird der Unterschied im nahen Infrarot (zwischen 1 µm und 1.3 µm) und auch im mittleren Infrarot.

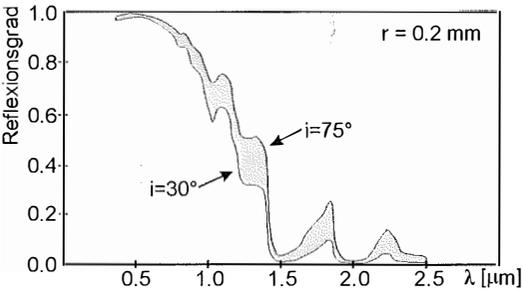


Abb. 2: Richtungsabhängigkeit des Schnee-Reflexionsgrades für eine bestimmte Korngröße

Abbildung 2 zeigt die spektrale Richtungsabhängigkeit des Reflexionsgrades, hier für eine Korngröße von 0.2 mm [5]. Die zwei Randkurven stehen für zwei verschiedene Einstrahlwinkel. Auch hier sieht man, daß der sichtbare Anteil nahezu unbeeinflusst bleibt, sich Schnee also fast wie ein Lambert'scher Reflektor verhält, während wiederum das nahe und mittlere Infrarot im Verhalten deutlich abweichen.

Im folgenden soll beurteilt werden, inwieweit die SPOT XS bzw. XI Aufnahmen für Schneeklassifizierung geeignet sind. Die Abbildung 3 entspricht der Abbildung 1, wobei zusätzlich der spektrale Reflexionsgrad der Wolken (mit einer Tropfengröße zwischen 4 µm und 20 µm) eingezeichnet wurde [6]. Überlagert wurden die Spektralbänder, für welche die SPOT XS und XI Sensoren empfindlich sind.

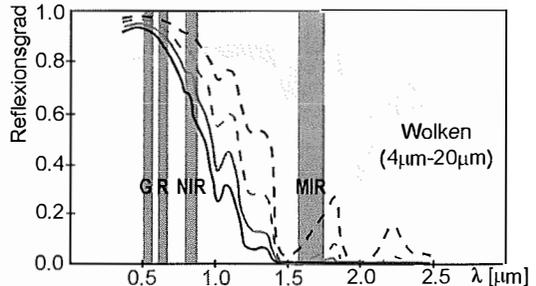


Abb. 3: Reflexionsgrad von Schnee und Wolken in Bezug zur spektralen Empfindlichkeit der SPOT Sensoren

Wie deutlich zu erkennen ist, hat im Falle von SPOT XS (mit Sensoren für den grünen (500–590 nm), roten (610–680 nm) und nahen Infrarot-Bereich (790–890 nm)) in allen verfügbaren Kanälen Schnee durchwegs hohen Reflexionsgrad. Nahezu gleich hohen Reflexionsgrad weisen Wolken auf, was darauf schließen läßt, daß Schnee von Wolken in den Aufnahmen nicht zu unterscheiden sind. Wäre man auch an einer Diskriminierung der Schneekörnung interessiert, so wäre SPOT XS ebenfalls wenig geeignet. Sieht man sich dagegen SPOT XI an, der auch das mittlere Infrarot (1580–1750 nm) zur Verfügung stellt, so kann man ganz deutlich Wolken von Schnee unterscheiden. Körnungsklassifizierung wäre aber nach wie vor schwierig, wenn auch in gewissen Fällen denkbar.

### 3.2. Radiometrisches Verhalten und Korrekturmöglichkeiten

Anhand eines konkreten Satellitenbildes soll eine erste visuelle Beurteilung der Möglichkeiten der Schneeklassifizierung erfolgen. In Abbildung 4 ist eine Farbinfrarotdarstellung der Aufnahme vom 18. Feber 1998 gezeigt. Der Überflug erfolgte um 10 Uhr 54 (MEZ) vormittags bei einer Sonnenhöhe von 28° und einem Sonnenazimut von 158°. Was sofort auffällt, wenn man sich auf Schnee konzentriert, sind nicht irgendwelche Unterschiede, die durch Schneeeigenschaften verursacht werden, sondern jene, die durch die Beleuchtung bedingt sind. Es gibt sehr starke

Überstrahlungen bis zur Sensorsättigung an den sonnenzugewandten Schneehängen, während andere Bereiche zur Gänze im Schatten liegen und nie von der Sonne erreicht werden.

graphische Normalisierung“. Ansätze dieser Art versuchen, die wesentlichen Strahlungsanteile, welche für die Belichtung im Sensor verantwortlich zeichnen, zu modellieren. Die Skizze in Ab-

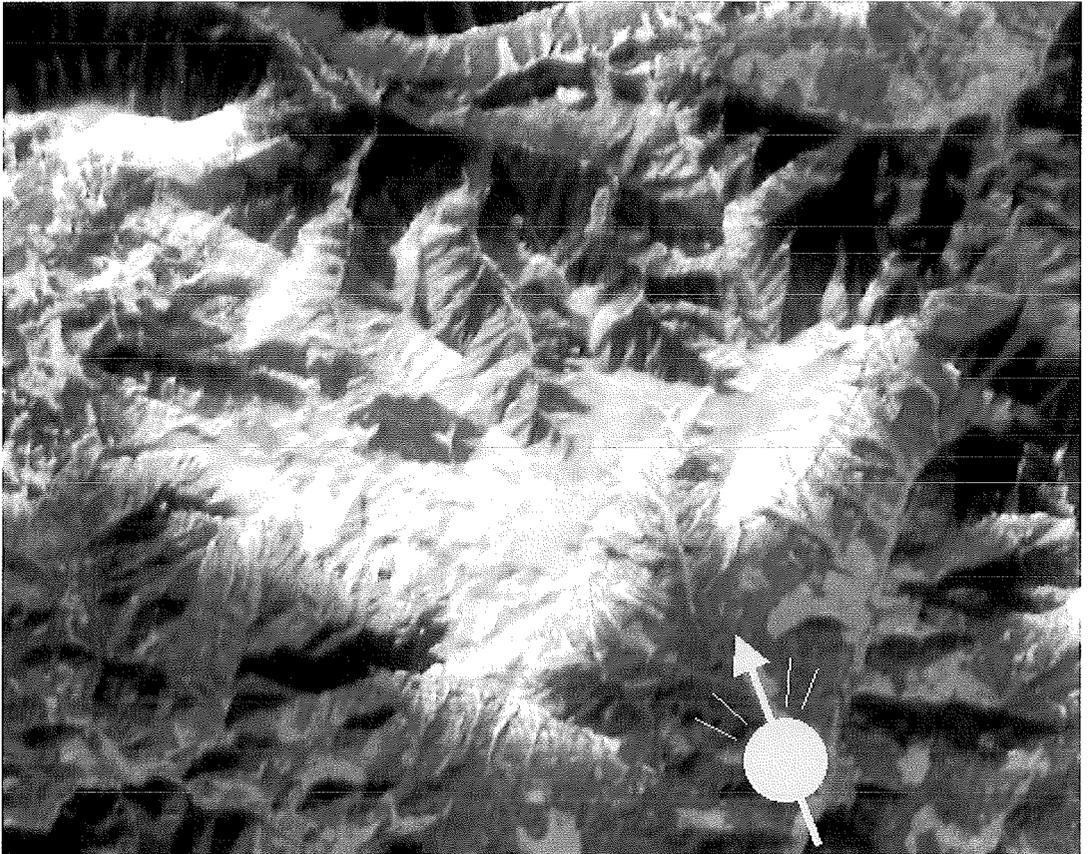


Abb. 4: SPOT XS Aufnahme vom 18.2.1998, Farbinfrarotdarstellung

Bei idealen Bedingungen sollten Helligkeits- und Farbunterschiede im Bild auf folgende Eigenschaften zurückzuführen sein:

Objekttyp (z.B. Schnee, Wald, Wiese, . . .)  
Eigenschaften des Typs (z.B. Pulverschnee, Harsch, . . .)

Die Klassifizierung lieferte demnach die Objektklassen und eventuell deren Unterklassen.

Die tatsächlichen Gegenheiten zeigen aber, daß Helligkeits- und Farbunterschiede zwar auch vom Objekttyp herrühren, aber nicht unwesentlich durch unterschiedliche Beleuchtung hervorgerufen werden. Der Klassifizierungsansatz kann daher sehr komplex werden. Vorteilhaft wäre die Berücksichtigung der Beleuchtungseinflüsse mit Hilfe der sogenannten „topo-

bildung 5 soll helfen, die Komplexität der Verhältnisse zu veranschaulichen.

Die Strahlung, die am Objekt eintrifft und dort die reflektierte Strahlung hervorruft, setzt sich zusammen aus den Anteilen:

- DS, der direkten Sonnenstrahlung
- HS, dem Himmelslicht, der in der Atmosphäre gestreuten Strahlung
- FS, der Fremdstrahlung, die durch Reflexion eines in der Nähe befindlichen beleuchteten Objektes verursacht wird.

Die Strahlung, die beim Sensor eintrifft, setzt sich zusammen aus den Anteilen:

- RS, der vom Objekt reflektierten Strahlung
- LS, dem Luftlicht, der in der Atmosphäre gestreuten Strahlung

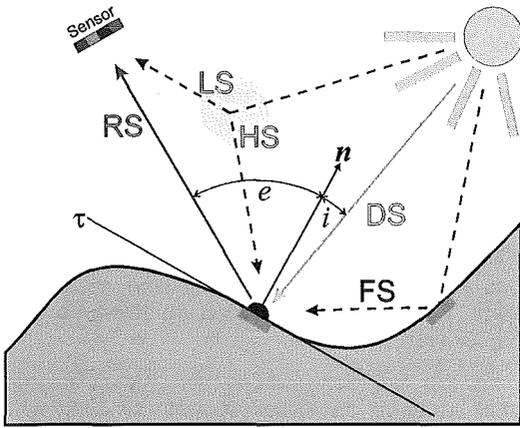


Abb. 5: Strahlungsverhältnisse

Während die direkte Sonnenstrahlung noch relativ leicht zu berücksichtigen wäre, benötigt man für die radiometrische Korrektur sehr komplexe Modelle mit vielen unsicher bestimmbar Parametern, wie etwa Streuungseinfluß oder gegenseitige Beleuchtung. Die „topographische Normalisierung“ wird daher, wenn überhaupt, fast immer nur über die direkte Sonnenbestrahlung errechnet. Ein ganz entscheidender Parameter ist dann der Cosinus des Einstrahlwinkels  $i$  (siehe Abb.5) auf das Gelände, der aber sehr einfach über das digitale Geländemodell, dem bekannten Aufnahmezeitpunkt und den berechenbaren oder vielleicht sogar bekannten Sonnenstand für jeden Punkt des Geländes bestimmt werden kann.

Für den Fall der Schneeklassifizierung spielt aber die Fremdstrahlung eine besonders wich-



Abb. 6: Sättigungsbereiche und gänzlich unbeleuchtete Bereiche

tige Rolle. Schnee hat wegen seines sehr hohen Reflexionsgrades auch einen entscheidenden Einfluß als indirekt beleuchtendes Objekt, wodurch die konventionellen Ansätze der „topographischen Normalisierung“, die z.B. auf der Minnaertschen Reflexionsfunktion [7] basieren, fehl schlagen.

Abbildung 6 zeigt für das bereits bekannte Satellitenbild (siehe Abb. 4) als graue Flecken die der Sonne abgewandten Hänge und die Schlag-schattenzonen und in Weiß die der Sonne zugewandten Hänge, in denen Sättigung des Sensors auftritt. Kann man mit Sicherheit annehmen, daß es sich bei den weißen Gebieten um Schnee handelt, so ist innerhalb dieser Zonen jede Einstufung in Unterkategorien unmöglich.

### 3.3. Klassifizierung aus optischen Daten

Da die „topographische Normalisierung“ nicht zielführend angewandt werden kann, muß der eigentliche Klassifizierungsansatz entsprechend anpassungsfähig sein.

Prinzipiell haben sich folgende Ansätze bewährt:

- (a) Ratio-Bilderstellung und Schrankensetzung (z.B. SI (Schnee-Index), NDSI (Normalised Difference Snow Index))
- (b) Überwachte Klassifizierung (Auswahl von über visuelle Interpretation gewonnene Trainingsgebiete)
- (c) Spectral Unmixing Ansätze (Auswahl von sogenannten End Members, die ebenfalls mit Trainingsgebieten vergleichbar sind. Die Anzahl der End Members ist allerdings beschränkt auf die Anzahl der verwendeten Spektralbereiche)
- (d) Unüberwachte Klassifizierung (Über Analyse des spektralen Merkmalsraumes findet der Klassifizierungsalgorithmus selbst die relevante Klasseneinteilung. Die Zuordnung der Klassennamen zu den gefunden Klassen muß allerdings i.a. ebenfalls durch visuelle Interpretation vom Benutzer getroffen werden)

ad (a): Für den NDSI gibt es prinzipiell verschiedene Ansätze, die aber alle den Unterschied des Reflexionsgrades zwischen mittlerem Infrarot und kürzeren Wellenlängen ausnutzen (z.B. [3]). Der NDSI ist vom Aufbau her vergleichbar mit dem wesentlich bekannteren NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) und hat folgende Gestalt:

$$\text{NDSI} = (g_{\text{visnir}} - g_{\text{mir}}) / (g_{\text{visnir}} + g_{\text{mir}})$$

wobei  $g$  der Grauwert ist, der Index  $mir$  für mittleres Infrarot und der Index  $visnir$  für sichtbares

Licht bzw. nahes Infrarot steht. Der NDSI hat den Vorteil, daß auch Beleuchtungseffekte zum Teil eliminiert werden. NDSI liegt im Werteintervall  $[-1.0, +1.0]$ . Die Schranke für die Schneediskriminierung könnte bei  $>0.5$  liegen, muß aber von Fall zu Fall angepaßt werden. Da das mittlere Infrarot verwendet wird, kommt im Falle von SPOT nur der über SPOT4 verfügbar XI-Mode in Frage. Die Klassifizierung mit Hilfe des NDSI wird im folgenden nicht näher ausgeführt, da für das angesprochene Projekt nur eine von insgesamt 12 Satellitenaufnahmen im XI-Mode verfügbar war.

ad (b): Bei der überwachten Klassifizierung muß für jede zu klassifizierende Objektklasse vom Benutzer ein Trainingsgebiet ausgewählt werden, das die spektrale Charakteristik der Klasse möglichst gut repräsentiert. Im Falle von starken Beleuchtungsunterschieden innerhalb einer Klassen müssen zusätzlich Unterklassen gebildet werden, was den Aufwand gewaltig ansteigen läßt. Die überwachte Klassifizierung wurde bei einigen Bildern mit Hilfe des Maximum Likelihood Ansatzes [8] versucht, bei anderen aber als zu aufwendig gegeben.

ad (c): Spectral Unmixing Ansätze verfolgen die Grundidee, daß die Pixel nicht unbedingt die spektralen Eigenschaften einer einzelnen Objektklasse repräsentieren. Durch die begrenzte räumliche Auflösung ist sehr oft eine Mischung von Objektklassen im Grauwert enthalten. Mit der Spectral Unmixing Methode wird daher versucht, die Klassenanteile pro Pixel herauszufinden. Diese Methode ist daher auch als „Subpixel-Klassifizierung“ bekannt. Vom Prinzip her ist das Verfahren vergleichbar mit einer Farbraumtransformation, wobei als „Primärfarben“ die spektralen Charakteristika von ausgewählten „Primärklassen“ (den End Members) vorgegeben werden. Spectral Unmixing wurde hier nicht weiter verfolgt. [9]

ad (d): Unüberwachte Klassifizierungsansätze bieten einen großen Vorteil. Der Benutzer braucht sich von Beginn an keine (großen) Gedanken zu machen, wieviele Objektklassen zu klassifizieren sind. Im allgemeinen wird dies dem Algorithmus überlassen, der ein spektral segmentiertes Bild liefert. Die aufwendige Suche nach Trainingsgebieten entfällt. Die Zuordnung zu Klassen zu den gefundenen Segmenten bedarf zwar auch einer gewissen visuellen Interpretation, die aber deutlich schneller durchführbar ist. Aus diesen Gründen fiel schließlich die Entscheidung für den unüberwachten ISODATA-Ansatz (Iterative Selforganizing Data Analysis Technique).

Dennoch würde im konkreten Fall eine sehr große Anzahl von Segmenten entstehen, die noch dazu, vor allem wegen der begrenzten Aussagekraft der SPOT XS Kanäle, teilweise extrem ähnliche spektrale Eigenschaften aufwiesen, was die automatische Analyse des spektralen Merkmalsraumes unzuverlässig machte.

Um die Klassenzahl zu reduzieren, wurde das Bild zerlegt in spektral ähnlicher Bilder, indem zuerst eine Unterteilung nach Beleuchtungsklassen erfolgte. Das aus DTM und Sonnenstand abgeleitete  $\cos i$ -Bild diente der Bildung von Beleuchtungskategorien (Abb.7). Jede dieser Kategorien wurde dann einer unabhängigen multispektralen Klassifizierung unterworfen. Die klassifizierten Teilbilder konnten dann zum klassifizierten Gesamtbild zusammengesetzt werden. Das Prinzip des Ablaufes zeigt Abbildung 8.

Dennoch stellte sich heraus, daß manche Objektklassen nicht zu trennen waren. So wurde z.B. lückige Schneedecke auf der Hochfläche gleich klassifiziert wie eine wenig vitale Wiese im Tal. Dieses Problem kann in einer Nachbearbeitung mit einer Abfrage über die Geländehöhe gelöst werden. Das Endergebnis für das vorhin vorgestellte Satellitenbild ist in Abbildung 9 zu sehen, in welchem die vier verschiedenen Schneebedeckungsklassen von schwarz (= aper) bis weiß (= volle Schneedecke) kodiert sind.

#### 4. Schnee und Schneeklassifizierung im Mikrowellenbereich

Wie schon früher erwähnt, bietet die Mikrowellen-Fernerkundung die Möglichkeit, durch Wolken hindurchzusehen. Dies ist ein besonderer

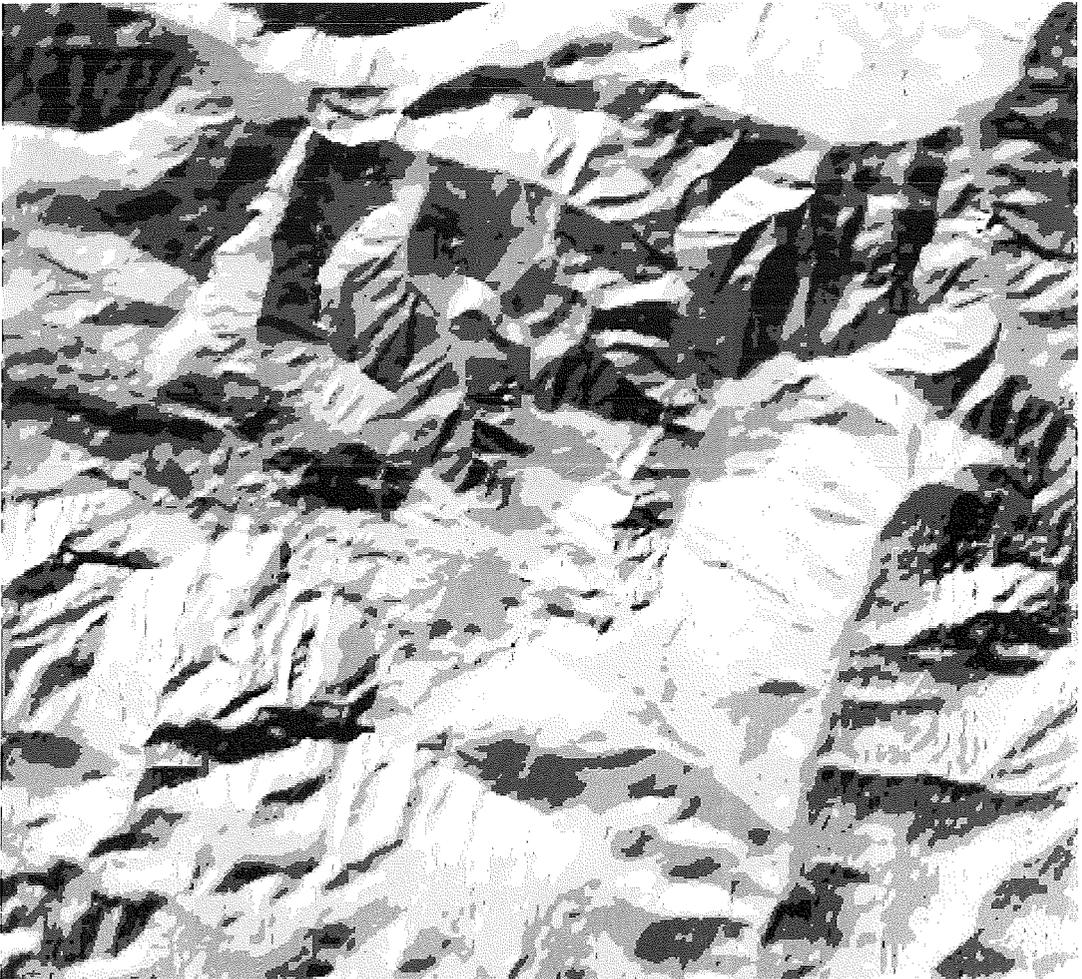


Abb. 7: Beleuchtungskategorien, eingeteilt aufgrund von  $\cos i$

Vorteil, wenn in regelmäßigen Abständen vor allem in Gebieten mit häufiger Bewölkung beobachtet werden soll. Eine Analyse des Gebietes der Schneeealpe anhand von Wettersatellitenaufnahmen hat ergeben, daß im Schnitt nur für wenige Tage pro Monat im Zeitraum der Schneeschmelze wolkenfreies Wetter gegeben ist. Da der ERS-Satellit ein aktives Mikrowellensystem besitzt, das mit geeigneter räumlicher Auflösung arbeitet, war es daher naheliegend, diese Art der Bilderfassung genauer zu betrachten.

Mikrowellensysteme als elektronische Systeme, die mit Frequenzen im GHz-Bereich arbeiten, verhalten sich anders, als man von den optischen Systemen her gewohnt ist. Eine Kenngröße des beobachteten Materials, welche für das Verhalten der Mikrowellen am Objekt verantwortlich ist, ist die komplexe relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r = \epsilon'_r - i \epsilon''_r$ . Während der reelle Teil  $\epsilon'_r$  eine Aussage über den Brechungsindex des Materials gibt, ist der imaginäre Teil  $\epsilon''_r$  ein Maß für die elektrische Leitfähigkeit. Für viele

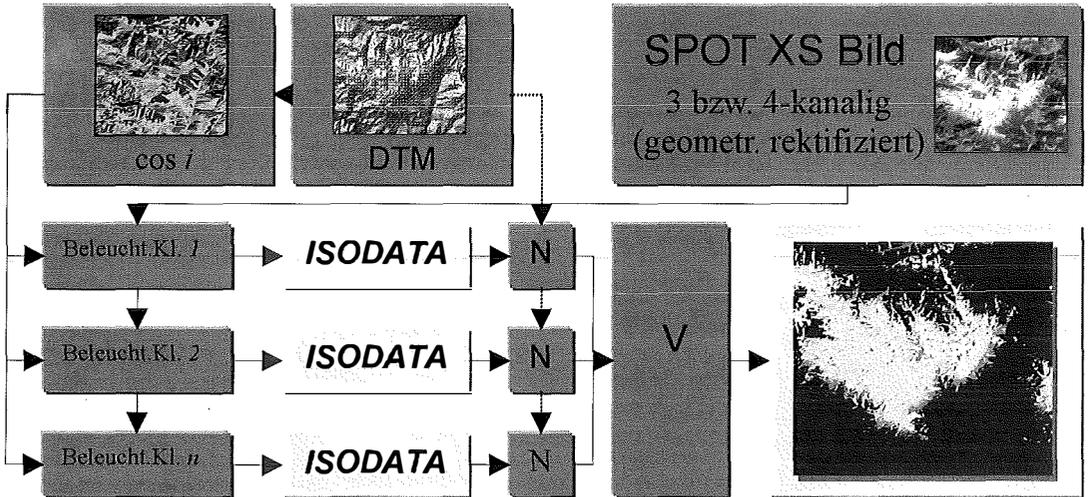


Abb. 8: Klassifizierungsablauf. N . . . Nachbearbeitung, V . . . Vereinigung

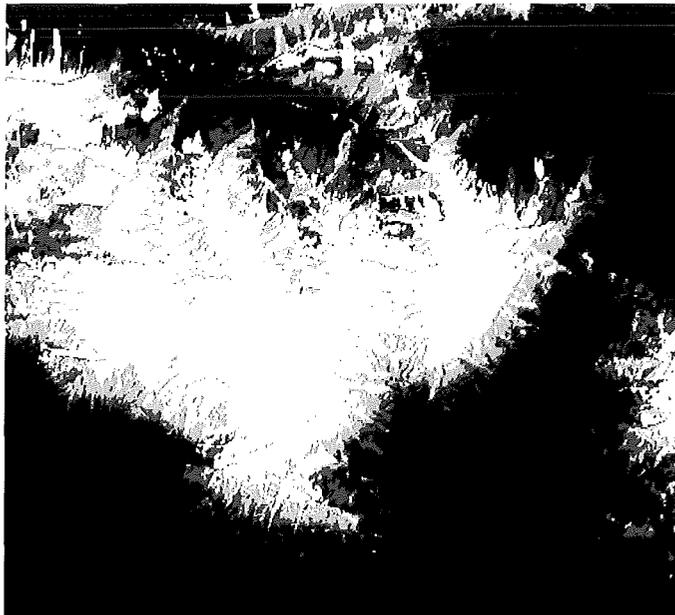


Abb. 9: Klassifizierungsergebnis des Satellitenbildes vom 18. Feber 1998

trockene natürliche Stoffe ist  $\epsilon''_r$  im Mikrowellenbereich sehr klein. Nimmt die Feuchtigkeit bzw. die Leitfähigkeit zu, so steigt  $\epsilon''_r$  rapide an. Gleichzeitig sinkt die Eindringtiefe. So kann in trockenen Böden die Eindringtiefe im cm-Bereich liegen, während diese im feuchten Boden in den mm-Bereich absinkt. Noch deutlicher ist dies bei Eis zu beobachten. Bei reinem Eis kann die Eindringtiefe einige m betragen, bei Wasser allerdings kann man bestensfalls mit einigen cm rechnen. (z.B. [10])

Aus dem vom Mikrowellensensor empfangenen Signal wird der sogenannte Rückstreuoeffizient  $\sigma^\circ$  abgeleitet, der ähnlich wie der Reflexionsgrad  $\rho$  bei der optischen Fernerkundung Rückschlüsse über die Eigenschaften des Objektes erlaubt. Allerdings muß hier ebenfalls angemerkt werden, daß  $\sigma^\circ$  nicht nur vom beobachteten Material alleine abhängt, sondern auch von der verwendeten Frequenz, von der Polarisations-einstellung des Sensors, in hohem Maß auch von der Beschaffenheit der Oberfläche (ob sie rau oder glatt ist) und ganz wesentlich auch vom Einstrahlwinkel. Der Einstrahlwinkel ändert sich einerseits systembedingt von einem Rand des Flugstreifens zum anderen (z.B.  $19^\circ$  bis  $28^\circ$  bei ERS AMI), was aber leicht berücksichtigt werden könnte. Entscheidender ist aber die Geländeform. Voraussetzung für eine qualitativ hochwertige Auswertung ist daher ein extrem genaues Geländemodell, das im allgemeinen nicht zur Verfügung steht.

Aufgrund der Komplexität dieser Zusammenhänge ist die Klassifizierung mit Hilfe von Mikrowellen sehr schwierig. Die wissenschaftliche Bearbeitung ist bei weitem noch nicht abgeschlossen und bietet der Forschung auch in Zukunft noch ein breites Betätigungsfeld.

#### 4.1. Schneecharakteristika im Mikrowellenbereich

Die Rückstreuung, die in einem beschneiten Gebiet beobachtet wird, setzt sich zusammen aus dem Rückstrahlanteil

- von der Oberfläche (der Luft-Schnee-Grenze)
- von innerhalb der Schneedecke (durch Volumsstreuung in den Eiskristallen)
- von der Oberfläche des Untergrundes (der Schnee-Boden-Grenze)
- von innerhalb der Schneedecke (durch Mehrfachrückstreuung)
- von innerhalb der Schneedecke (durch Streuung an Eislinsen oder Inhomogenitäten)
- von innerhalb des Eindringbereich des Untergrundes (durch Volumsstreuung des Bodens)

Es gibt detaillierte Untersuchungen des Mikrowellenverhaltens der Schneedecke (z.B. [11]). Konzentriert man sich auf die Mikrowellen des C-Bandes (5,3 Ghz, 5,66 cm), so ist festzustellen, daß trockener Schnee nicht erkannt werden kann. Er ist total transparent, die Eindringtiefe beträgt viele Meter. Die registrierte Rückstreuung stammt vor allem vom Boden unter der Schneedecke oder von eventuell im Schneesinneren vorhandenen Inhomogenitäten. Beginnt Schnee zu schmelzen, so reduziert sich die Eindringtiefe sofort bis in den cm-Bereich. Allerdings kann auch die Oberflächenveränderung während des Schmelzvorganges das Rückstreuverhalten merklich beeinflussen, entweder durch Zunahme der Oberflächenrauigkeit und damit durch Zunahme der diffusen Streuung oder durch starke Ansammlung von Wasser an der Oberfläche und damit durch Begünstigung der gerichteten Reflexion. Eine genaue Analyse des Aufbaus und Eigenschaften der Schneedecke erscheint durch Einsatz einer einzelnen Mikrowellenfrequenz und einer einzigen Polarisations-einstellung nicht möglich.

Es gibt eine ganze Reihe von Untersuchungen über die Nutzung von SAR-Systemen für die Schneekartierung (z.B. [12], [13], [14], [15]). Beispielfhaft soll eine mit C-Band-Mikrowellen in den Alpen durchgeführte (Rott, 1994) die Gegebenheiten zeigen: bei trockenem Schnee wird  $e'=1,87$  und  $e''=0,0001$ . Bei feuchtem Schnee werden diese Werte  $e'=2,95$  und  $e''=0,571$ .

#### 4.2. Geometrische und radiometrische Eigenschaften von SAR

Aufgrund der durch das Aufnahmeverfahren (einer Laufzeitmessung von Schrägdistanzen) bedingten Abbildungsgeometrie, ergeben sich sehr ungewohnte Verzerrungen im Bild, sobald man im hügeligen oder gebirgen Gelände aufnimmt (siehe Abb. 10). Es kommt zu den bekannten Erscheinungen

Foreshortening (starke maßstäbliche Verkürzung an Hängen, die in Richtung Aufnahmesystem schauen)

Layover (Abbildung verschiedener Objektpunkte auf denselben Bildpunkt)

Shadow (Bereiche an den dem Sensor abgewandten Hängen, die durch den Mikrowellenstrahl der Sendeantenne nicht erreicht werden können)

Die geometrische Rektifizierung dieser Fehler bedarf eines genauen Geländemodelles und eines parametrischen Korrekturansatzes. Zusätzlich zu den geometrischen Fehlern kommt aber



Abb. 10: ERS SAR Aufnahme (descending Flug)

auch radiometrische Fehlinformation, die nur schwer oder überhaupt nicht korrigierbar ist. In Layover- und Foreshortening-Bereichen wird sehr starke Rückstreuung registriert, da diese von einem Einstrahlwinkel nahe  $0^\circ$  kommen, wo der Rückstreuoeffizient unbestimmbar wird. Um im gebirgigen Teil eine komplette Deckung mit auswertbaren Daten zu erhalten, muß das Interessensgebiet von mindestens zwei verschiedenen Seiten aufgenommen werden. Im Falle der ERS-Satellitenaufnahmen kombiniert man die Aufnahme vom Nord-Süd-Flug (descending path) mit einer vom Süd-Nord-Flug (ascending path). Da bei ERS der Einstrahlwinkel in ebenes Gelände zwischen  $19^\circ$  und  $28^\circ$  liegt, führen Hänge, die parallel zur Flugrichtung verlaufen und diese Hangneigung aufweisen, zu den oben erwähnten Effekten. Da dies in der Natur recht häufig auftritt, ist im Gebirge nur etwa 50% eines einzelnen ERS SAR Bildes auswertbar. Abbildung 11 zeigt das Interessensgebiet, wobei in

Hellgrau jene Bereiche eingezeichnet sind, die sowohl durch descending als auch durch ascending Flüge auswertbar wären. Schwarz sind die Bereiche, die weder durch den einen noch durch den anderen Flug auswertbar sind. Alle anderen Bereiche (dunkelgrau) sind entweder aus dem descending oder den ascending Flug verwendbar.

Da man für eine absolute Bestimmung der Rückstreuoeffizienten ein hochgenaues digitales Geländemodell benötigte, das nicht vorhanden ist, wendet man üblicherweise eine relative Auswertung an, indem man Terminvergleiche über Ratio-Bildung durchführt und nur Veränderungen feststellt. In diesem Fall werden die Abhängigkeiten vom Einstrahlwinkel eliminiert [16].

#### 4.3. Klassifizierung aus Mikrowellendaten

Wie schon früher angedeutet, ist eine Klassifizierung der Schneelage mit ERS SAR Bildern

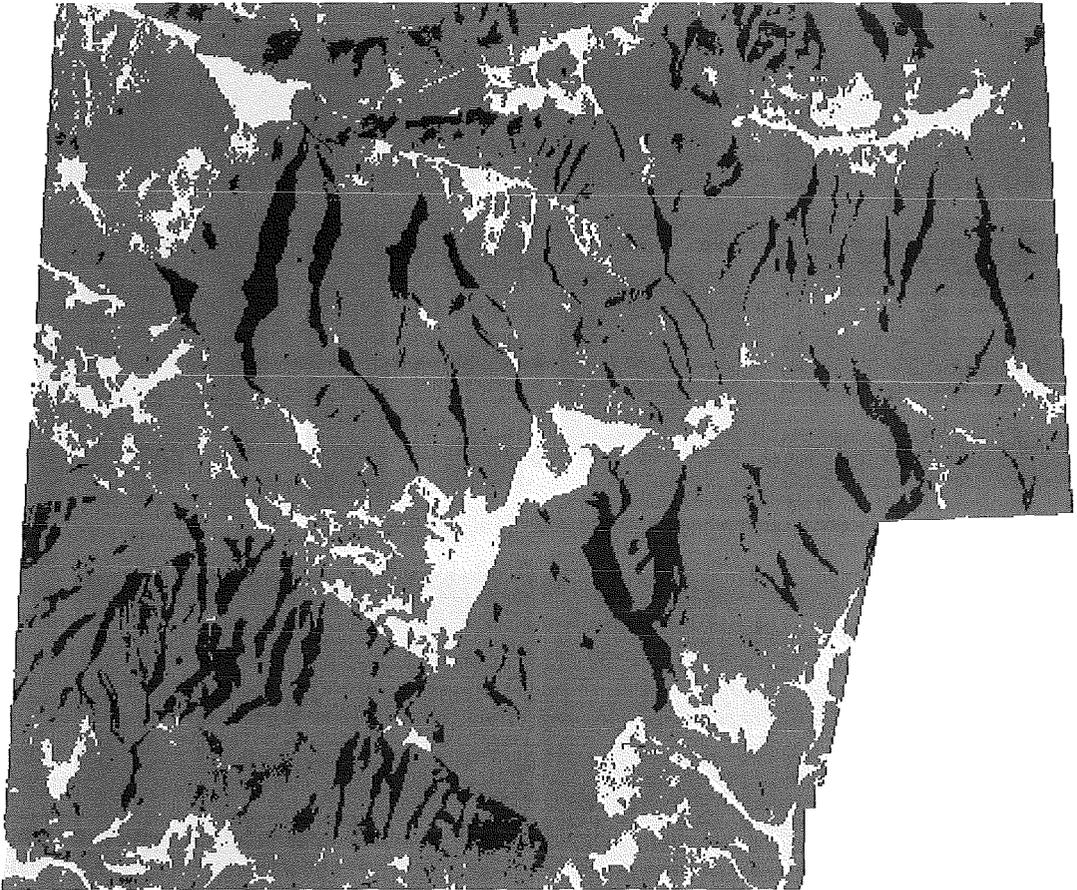


Abb. 11: ERS Deckung von absteigender und/oder aufsteigender Flugbahn aus

nur sehr eingeschränkt möglich, da trockener Schnee nicht erkannt werden kann. Was aber sehr wohl zu erkennen ist, ist eine Änderung der Schneefeuchte.

Um eine sinnvolle Feuchte-Klassifizierung durchführen zu können, ist zu garantieren, daß mindestens eine Aufnahme existiert, die als „trocken“ angenommen werden und somit als Referenzaufnahme gelten kann. Im Idealfall handelt es sich um ein schneefreies Bild mit trockenem Boden. Es kann aber auch ein Bild sein, von dem man weiß, daß das Gebiet mit trockenem Schnee bedeckt ist. Dieses Referenzbild wird über Ratio-Bildung mit allen anderen Bildern verglichen. Durch Schrankenbildung erhält man die Feuchtezunahme. Bewährt hat sich eine Schranke von 3dB, d.h. daß an allen Stellen, an denen eine Ratiowert größer 3dB erhalten wird, die Feuchte deutlich zugenommen hat. Der Ablauf der Klassifizierung ist in Abbildung 12 schematisch dargestellt (d&a=descending und ascending Bild, VV= Vorverarbeitung, z.B.

Speckle-Filterung, GR= geometrische Rektifizierung, V=Vereinigung des desc- und des asc-Bildes).

Das Ergebnis der Feuchteklassifizierung ist für das unrektifizierte descending-Bild in Abbildung 13 dargestellt. Als Referenzbild war eine garantiert schneefreie Aufnahme vom 1. Juli 1999 vorgesehen, die sich aber als ungeeignet herausstellte. Es hatte kurz vor der Aufnahme geregnet. Daher diente das Feber-Bild (vom 11.2.) als Referenz, von dem angenommen werden konnte, daß damals im wesentlichen trockener Schnee gelegen war. Im linken oben Bild sieht man die Veränderungen im März (am 18.3.) gegenüber Feber. Grau bedeutet gering, weiß starke Feuchtigkeitszunahme. Man erkennt den Schmelzvorgang an den Hängen und in etwas tieferen Lagen, während auf der Hochebene noch wenig zu bemerken ist. Im April (am 22.4.) ist auch auf der Hochebene die Schmelze voll im Gange, im Mai (am 27.5.) ist ein großer Teil bereits abgeschmolzen. Das Juli-Bild täuscht stärkeren

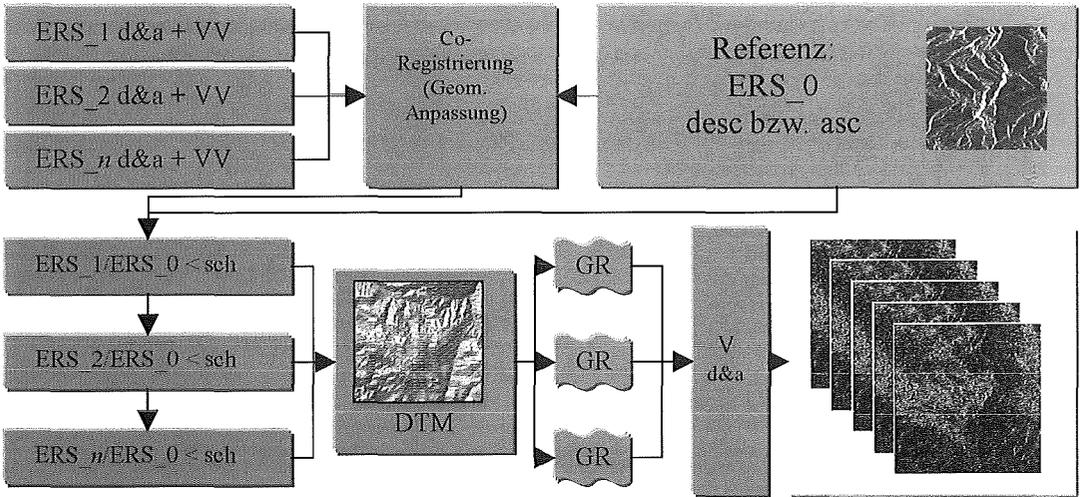


Abb. 12: Ablaufschema der Klassifizierung der Schneefeuchte aus SAR-Bildern

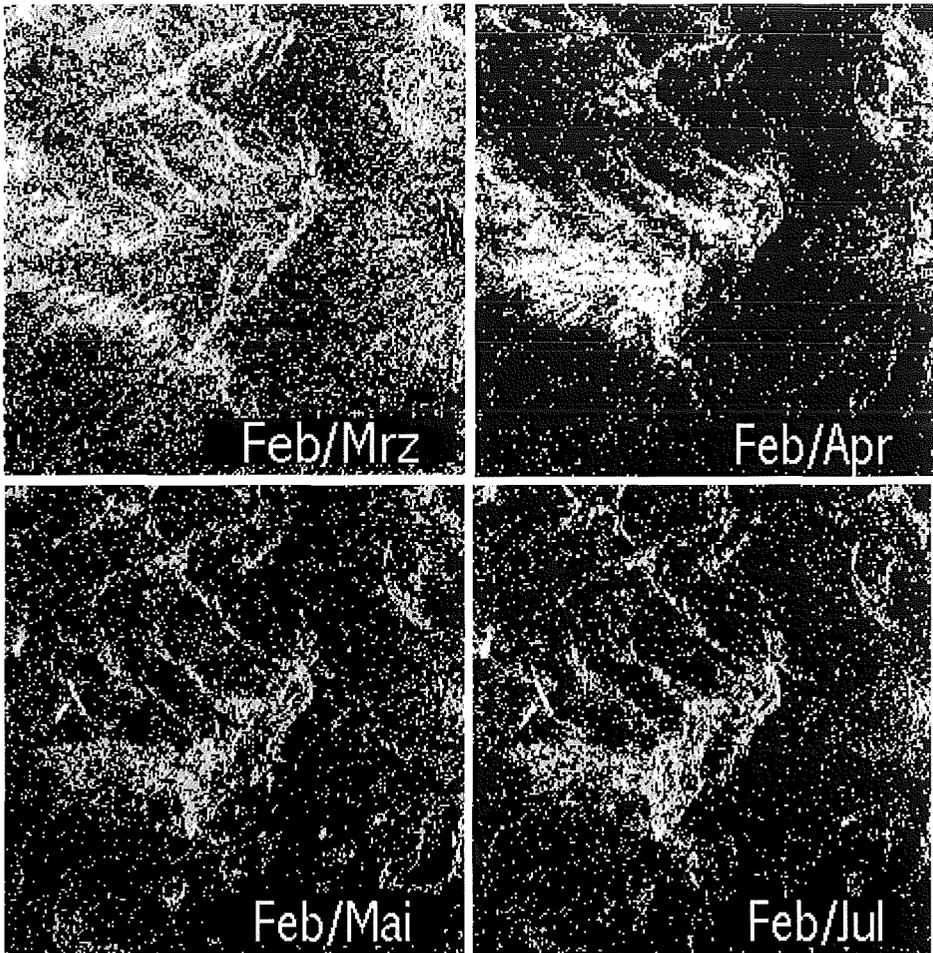


Abb. 13: Ergebnis der Feuchteklassifizierung im desc-Bild

Schmelzvorgang, tatsächlich aber ist die hohe Feuchte dem Regen zuzuschreiben. Man erahnt, daß bei ungeeigneter Wahl des Referenzbildes für die Ratio-Bildung, wie in diesem Fall bei der Wahl des Juli-Bildes, ein gänzlich falsche Ergebnis herausgekommen wäre. Die sehr hohe Ähnlichkeit des Mai- und Juli-Ergebnisses läßt aber auch zur Vorsicht bei der Interpretation mahnen. Auf die Frage einzugehen, inwieweit diese Ergebnisse tatsächliche Feuchtigkeitsänderungen im Schnee anzeigen oder inwieweit sie durch den Untergrund beeinflußt sind, scheint berechtigt und müßte noch näher behandelt werden.

## 5. Schlußbemerkungen

Das anfangs einfach erschienene Problem der Schneeklassifizierung stellt sich bei genauer Betrachtung als ein recht komplexes heraus, das auch in der internationalen Forschung einen wichtigen Stellenwert hat. Dabei sind kleinräumige Problemstellungen (z.B. die Wasserversorgung betreffend – wie es das hier vorgestellte Projekt war – oder im Rahmen von Lawinenwarnsystemen) genauso vertreten wie großräumige bis globale Fragestellungen (z.B. im Rahmen der Überwachung der Klimaveränderungen). Im gebirgigen Gelände sind besondere Herausforderungen gegeben. Wegen der steilen Hänge, großen Höhenunterschiede und dem im Winter niedrigen Sonnenstand erschweren Schatten die Klassifizierung in optischen Bildern. Schneefelder wiederum verursachen Überbelichtung. In SAR-Aufnahmen führen starke geometrische und radiometrische Störungen zur Notwendigkeit, zwei Aufnahmen aus unterschiedlichen Richtungen zu verwenden. Ein anderes Problem ist der Bewuchs, der eine genaue Feststellung der Schneelage verhindert. Ist die Klassifizierungstheorie für optische Aufnahmen schon weitgehend ausgereizt, so befindet sie sich für Mikrowellenanwendungen noch immer Forschungsstadium. Mit den vermehrt eingesetzten Hyperspektralscannern auf dem optischen Sektor und den Multifrequenz- und Multipolarisations-SAR werden sich weitere Möglichkeiten eröffnen, wie erste Versuchsreihen bereits zeigen. In der Praxis vielfach bewährt hat sich auch die Kombination verschiedener Sensoren im Rahmen eines Fusionsansatzes. Die Schneeklassifizierung wird also in der Zukunft noch die Wis-

senschaft beschäftigen, auch wenn sie, wie im konkreten Fall, „nur“ zur Kalibrierung eines Schneemodells verwendet wird.

## Literatur

- [1] Jansa J., Kraus K., Blöschl G., Kirnbauer R., Kuschnig G.: Modellierung Snow Melt Processes in Alpine Areas. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.33, Supplement B7 auf CD-ROM, pp.69–74, 2000.
- [2] Dozier J.: Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. Remote Sensing of Environment, Vol. 28, pp.9–22, 1989.
- [3] Winther J.-G., Hall D.K.: Satellite-derived Snow Coverage Related to Hydropower Production in Norway: Present and Future. Int. Journal of Remote Sensing, Vol.20/15&16, pp. 2991–3008, 1999.
- [4] Nolin A.W., Dozier J.: A Hyperspectral Method for Remotely Sensing the Grain Size of Snow. Remote Sensing of Environment, 74, pp. 207–216, 2000.
- [5] Dozier J.: Remote Sensing of Alpine Snow Cover in Visible and Near-Infrared Wavelength. In: Proceedings des CSSA (Center of Snow Science in Alta) Symposiums, 1991.
- [6] King M.D., Kaufman Y.J., Menzel W.P., Tanré D.: Remote Sensing of Cloud, Aerosol, and Water Vapour Properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.30/1, pp. 2–27, 1992.
- [7] Jansa J.: A Global Topographic Normalisation Algorithm for Satellite Images. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.32/7, pp. 8–15, 1998.
- [8] Kraus K. mit Beiträgen von Jansa J. und Schneider W.: Auswertung photographischer und digitaler Bilder, Dümmler Bonn, 1990.
- [9] Rosenthal W.: Estimating Alpine Snow Cover with Unsupervised Spectral Unmixing. Proceedings des IGARSS'96 Symposiums, Vol.4, pp.2252–2254, 1996.
- [10] Kraus K., Schneider W.: Fernerkundung – Physikalische Grundlagen und Auswertetechniken, Dümmler Bonn, 1988.
- [11] Strozzi T., Mätzler Ch.: Backscattering Measurements of Alpine Snowcovers at 5.3 and 35 GHz. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.36/3, pp. 838–848, 1998.
- [12] Shi J., Dozier J., Rott H.: Snow Mapping in Alpine Regions with Synthetic Aperture Radar, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.32/1, pp.152–158, 1994.
- [13] Shi J., Dozier J.: SIR-C/X-SAR Investigations of Snow Properties in Alpine Regions. Proceedings IGARSS'95, Vol.II, pp.1582–1584, 1995.
- [14] Baghdadi N., Gauthier Y., Bernier M.: Capability of Multitemporal ERS-1 SAR Data for Wet-Snow Mapping. Remote Sensing of Environment, 60, pp. 174–186, 1997.
- [15] Koskinen J.T., Pulliainen J.T., Hallikainen H.T.: The Use of ERS-1 SAR Data in Snow Melt Monitoring, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.35/3, pp. 601–610, 1997.
- [16] Nagler Th., Rott H.: Retrieval of Wet Snow by Means of Multitemporal SAR Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.38/2, pp. 754–765, 2000.

## Anschrift des Autors

Dipl.-Ing. Dr. Josef Jansa: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Gußhausstraße 27–29, A-1040 Wien. Email: Josef.Jansa@tuwien.ac.at