

FERNERKUNDUNG VON SCHNEE UND EIS IM HOCHGEBIRGE

Helmut Rott
Institut für Meteorologie und Geophysik
Universität Innsbruck

IDN 141003

Zusammenfassung

Es wird ein Überblick über Fernerkundungs-Verfahren zur Erfassung von Schnee und Eis in gebirgigen Einzugsgebieten gegeben. Satelliten-Sensoren im Sichtbaren, im Infraroten und im Mikrowellen-Bereich des Spektrums werden beschrieben und die Anwendungsmöglichkeiten der Satellitendaten in Routine und Forschung diskutiert. Mit Beispielen wird auf die Schneekartierung aus digitalen Daten der erdbeobachtenden Satelliten Landsat und NOAA näher eingegangen.

Remote sensing of snow and ice in mountainous regions

Summary

This paper reviews remote sensing methods which are used for analysis of snow and ice in mountainous regions. Satellite sensors in the visible, infrared and microwave parts of the spectrum are described. The possibilities of satellite data for operational and scientific snow and ice studies are discussed. Applications of digital data from Landsat and NOAA-satellites are shown.

E i n l e i t u n g

Fernerkundungs-Methoden leisten heute einen wesentlichen Beitrag zur weltweiten Erfassung der Schnee- und Eisbedeckung und deren räumlichen und zeitlichen Variationen. Besonders wertvoll haben sich Fernerkundungs-Verfahren für die Erforschung und Überwachung der polaren Eisschilde, des Meereises und der Schneebedeckung in hohen Breiten erwiesen. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf den Beitrag der Fernerkundung zur Erfassung von Schnee und Eis in gebirgigen Einzugsgebieten der mittleren Breiten.

Die wichtigsten Parameter der Schnee- und Eisbedeckung für Anwendungen in Hydrologie, Glaziologie und Klimatologie sind: die flächenhafte Ausdehnung von Schnee und Eis, die Schneegrenze, das Wasseräquivalent der Schneedecke, die Schneehöhe, die Oberflächenbeschaffenheit von Schnee und Eis (Albedo,

Temperatur), die innere Struktur der Schneedecke (freier Wassergehalt, Dichte, Korngröße, Temperatur). Von den aufgezählten Parametern können mit Fernerkundungsverfahren im Sichtbaren und Infraroten die flächenhafte Ausdehnung, die Schneegrenze sowie verschiedene Werte der Oberflächenbeschaffenheit erfaßt werden. Zur Bestimmung des Wasseräquivalents, das für hydrologische Anwendungen besonders wichtig ist, werden Verfahren im Mikrowellenbereich erprobt.

Über Messungen der natürlichen Gammastrahlung entlang einer Meßstrecke vom Flugzeug aus kann das Wasseräquivalent ebenfalls bestimmt werden, in gebirgigen Einzugsgebieten hat sich dieses Verfahren bisher jedoch nicht bewährt. Dazu sind vergleichende Messungen der Gammastrahlung bei schneefreiem und schneebedecktem Boden entlang genau derselben Flugstrecke in Höhen von etwa 100 m über Grund durchzuführen. Neben der Einhaltung der Flughöhe bereiten die Gammastrahlung kosmischen Ursprungs und die Strahlung von den umgebenden Gebirgshängen Probleme bei der Auswertung der Messungen.

A b b i l d e n d e V e r f a h r e n i m S i c h t b a r e n u n d n a h e n I n f r a r o t

Die von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung in mehr oder weniger breiten Spektralbereichen zwischen 0.3 und 2.5 μm dient als Quelle der Messungen, die mit Kameras und Scannern durchgeführt werden. Die Instrumente gelangen auf Flugzeugen und Satelliten zum Einsatz. Flugzeuge eignen sich für Aufgaben, die hohe Auflösung in größeren zeitlichen Abständen benötigen. Eine dieser Aufgaben ist die Erfassung der Gletscherflächen der Erde, mit der auf Empfehlung der Internationalen Kommission für Schnee und Eis im Jahre 1966 begonnen wurde. Bis heute ist die Dokumentation der Gletscher erst in einigen Ländern vollständig abgeschlossen. Da die Messungen von Flugzeugen und die Auswertung dieser Daten zeitaufwendig und teuer sind, werden in zunehmendem Maße zur Vervollständigung des Welt-Gletscher-Inventars Satellitendaten herangezogen (IAHS, 1980).

Die wichtigsten Satelliten-Sensoren, die zur Erfassung von Schnee und Eis beitragen, sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Satellit	Sensor	Spektralbereich	Auflösung	Wiederholungsrate
Landsat-3	MSS	0.5-0.6 μm	80 m	18 Tage
		0.6-0.7		
		0.7-0.8		
		0.8-1.1		
TIROS-N (NOAA)	RBV	0.5-0.8 μm	40 m	1 Tag
	AVHRR	0.55-0.68 μm	1 km	
		0.72-1.10		
		3.55-3.93		
		10.5-11.5		

Satellit	Sensor	Spektralbereich	Auflösung	Wiederholungsrate
METEOSAT (1 außer Betrieb) (2 für Anfang 1981 geplant)	Radio- meter	0.4-1.1 μm 5.2-7.1 10.5-12.5	2.5 km 5 km 5 km	1/2-stündl.
HCMM	HCMR	0.5-1.1 μm 10.5-12.5	500 m	3 Tage
NIMBUS-7	SMMR	6.6 GHz 10.7 18.0 21.0 37.0	97x151 km 59x 91 km 41x 55 km 30x 46 km 18x 27 km	3 Tage
SEASAT (von Juni bis Okt. 1978 in Betrieb)	SAR SMMR	1.35 GHz wie Nimbus-7	25 m	unregelmäßig

Für operationelle Anwendungen werden vor allem Daten des multispektralen Scanners (MSS) auf Landsat und des Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) der meteorologischen Satelliten der NOAA-Serie verwendet. Die folgenden Beispiele wurden am interaktiven digitalen Bildverarbeitungssystem des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck bearbeitet. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt von 40 km x 40 km aus einer Landsat-Aufnahme von Tirol vom 8.2.1975 in MSS-Kanal 5. Mit Hilfe einer nicht-linearen Kennlinie wurde der Kontrast in den Schattenzonen des Bildes verstärkt. Durch die obere Hälfte des Bildes verläuft das teilweise schneefreie Inntal. In den unbewaldeten Zonen ist die Schneegrenze deutlich zu erkennen. In dichten Waldgebieten kann auf Schneebedeckung lediglich aus der Schneelage der angrenzenden Flächen geschlossen werden.

Mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung läßt sich der Informationsgehalt der Satellitendaten voll nutzen. Für wiederholte Schneekartierung im selben Einzugsgebiet lohnt sich die Entwicklung automatischer Klassifizierungsverfahren.

Abbildung 2 zeigt das Ergebnis einer Klassifizierung von Landsat-MSS Daten in Hinblick auf Schneebedeckung für dasselbe Gebiet, das in Abbildung 1 dargestellt ist. Das Klassifizierungsverfahren beruht auf dem unterschiedlichen spektralen Reflexionsvermögen von verschneitem und schneefreiem Gebiet, wobei die Daten der MSS-Kanäle 4 (0.5 - 0.6 μm) und 6 (0.7 - 0.8 μm) verwendet wurden. Es wurde ein kontrolliertes Verfahren angewandt, bei dem die Daten der Trainingsgebiete in 3 Kategorien eingeteilt wurden: schneefreies Gebiet, Wald mit Schneedecke, schneebedecktes Gebiet. Die 3 Kategorien wurden mit linearen Diskriminanzfunktionen gegeneinander abgegrenzt. Während die Unterschiede in der Bestrahlung zufolge Hangneigung und Exposition durch das Verfahren gut ausgeglichen wurden, ergab sich teilweise eine falsche Zuordnung für Waldgebiete mit Schneedecke, die als unverschneites Gebiet klassifiziert wurden. Die Trennung dieser 2 Kategorien stellt jedoch auch bei visueller Interpretation hochauflösender Bilddaten ein Problem dar. Bei automatischer Klassifizierung läßt sich die Fehlerrate noch senken, wenn man die Klassifizierung für 2 bis 3 verschiedene Expositionen und Höhenstufen getrennt durchführt.

Entsprechend der Auflösung von 60 m x 80 m sind digitale Landsat-MSS-Daten zur Schneekartierung in Einzugsgebieten ab etwa 10 km² Größe geeignet. Bei ebenmäßigen Geländeformen wie auf Gletschern ist die Kartierung von Schnee- und Eisflächen auch für Gebiete, die kleiner sind als 10 km², mit hinreichender Genauigkeit möglich (Rott, 1976). Mit dem Return Beam Vidicon RBV werden auf Landsat-3 in einem Kanal Daten mit einer Auflösung von 40 m empfangen. Ein Einschränkung für routinemäßige Anwendungen stellt weniger die Auflösung der Bilddaten dar als die Wiederholungsrate der Aufnahmen. Falls man die Daten von 2 Satelliten der Landsat-Serie empfängt, kommt man im günstigsten Fall auf einen zeitlichen Abstand von 9 Tagen zwischen zwei Aufnahmen. In den Alpen wird die Wiederholungsrate zufolge der starken Wolkenbedeckung gerade im Frühjahr wesentlich herabgesetzt.

Eine wesentlich häufigere Wiederholung der Aufnahme desselben Gebietes erreicht man mit meteorologischen Satelliten. Geostationäre Satelliten nehmen die Erdoberfläche von ihrer Position 36.000 km über dem Äquator in halbstündlichen Abständen auf. Die Bildaufzeichnung am geostationären Satelliten Meteosat-1 war von November 1977 bis November 1979 in Betrieb, der Start von Meteosat 2 ist für Anfang 1981 vorgesehen. Die Auflösung des Radiometers auf Meteosat beträgt im sichtbaren Kanal im Sub-Satellitenpunkt 2,5 km, im Alpengebiet nimmt ein Bildpunkt entsprechend dem Beobachtungswinkel etwa 4 km x 4 km ein. 1 km ist die Auflösung des Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) auf den polarumlaufenden Satelliten Tiros-N, mit denen seit 1979 das operationelle meteorologische Satelliten-System NOAA betrieben wird.

Ein Beispiel für AVHRR-Daten aus Kanal 1 im sichtbaren Spektralbereich zeigt Abbildung 3, in der Bilddaten des Alpengebietes vom 22.7.1980 kontrastverstärkt wiedergegeben sind. Zuzufolge der kühlen Witterung der vorangegangenen Wochen waren zu diesem Termin die höheren Zonen der Alpen schneebedeckt, in Tirol lag in den Höhenlagen oberhalb 2.000 m eine nahezu geschlossene Schneedecke. Der Golf von Genua, die Adria und die oberitalienischen Seen erscheinen auf dem Bild hell, da ein Teil der Sonnenstrahlung spiegelnd in Richtung Sensor reflektiert wurde. Im obersten Teil des Bildes verhindert eine Wolkendecke die Sichtbarkeit der Erdoberfläche.

Digitale Bilddaten des AVHRR sind zur Schneekartierung in Einzugsgebieten ab einer Fläche von 500 km² geeignet. Das Radiometer des Heat-Capacity-Mapping-Mission Satelliten (HCMM) erlaubt bei einer Auflösung von 500 m auch die Kartierung in Einzugsgebieten unter 500 km². Bei HCMM handelt es sich jedoch um eine Test-Mission, während die NOAA-Satelliten ein operationelles System darstellen, das über eine längere Periode Daten liefern soll. Probleme bei der Auswertung der AVHRR-Daten bereiten bei niederem Sonnenstand die Schatten der Bergketten. Eine weitere Fehlermöglichkeit ist durch die mitunter schlechte Unterscheidbarkeit von Wolken und Schnee bedingt, insbesondere bei geringer Wolkenbedeckung des Untersuchungsgebietes. Eine Hilfe für die Unterscheidung von Wolken und Schnee bringen die 3 AVHRR-Kanäle im Infraroten. Aus thermischen Infrarot-Daten allein ist die Trennung von schneebedecktem und schneefreiem

Gebiet keineswegs in allen Fällen möglich.

Geeichten Scanner-Daten von Flugzeugen und Satelliten kann man neben der Ausdehnung der Schnee- und Eisflächen zusätzliche Information entnehmen. Unter Berücksichtigung der Transmission und der Rückstreuung der Atmosphäre kann man die von der Oberfläche reflektierten Strahldichten berechnen, die für den Energiehaushalt der Oberfläche von Bedeutung sind. Über Berechnung und Messung der spektralen Einstrahlung kann man weiters das Reflexionsvermögen für den jeweiligen Spektralbereich berechnen (Rott, 1980). Mit Hilfe des spektralen Reflexionsvermögens sind Aussagen über den Zustand von Schneeflächen wie zum Beispiel die Unterscheidung von nassem und trockenem Schnee möglich.

S a t e l l i t e n - S e n s o r e n i m M i k r o w e l l e n - B e r e i c h

Im Mikrowellen-Bereich von 1 GHz bis 40 GHz (30 cm bis 0.75 cm Wellenlänge) sind Atmosphäre und Wolken weitgehend durchlässig für die elektromagnetische Strahlung. Mit aktiven Meßverfahren in diesen Frequenzbereichen erreicht man hohe Auflösung wie zum Beispiel mit dem Synthetic Aperture Radar (SAR), das auf Seasat im Einsatz war. Zufolge der kurzen Lebensdauer des Satelliten konnten über Land nur einige Bildstreifen mit dem Sensor aufgenommen werden. Wegen der starken Winkelabhängigkeit des reflektierten Signals bereitet die Analyse von Schnee- und Eisflächen aus Radardaten im Hochgebirge Schwierigkeiten. Zur Kartierung und Unterscheidung von Meereisarten stellen hochauflösende Radar-Systeme wie das Seasat-SAR eine wertvolle Hilfe dar.

Passive Mikrowellen-Systeme auf Satelliten konnten nicht nur zur Kartierung von Meereis, sondern auch zu Studien der Schneebedeckung über Land wertvolle Beiträge leisten (Rango et al., 1979). Mikrowellen-Radiometer messen emittierte Energie der Erdoberfläche, die durch die Atmosphäre geringfügig modifiziert wird. Die emittierte Strahlung natürlicher Oberflächen im Mikrowellen-Bereich hängt bei gegebener Frequenz nicht nur von der physikalischen Temperatur ab. Da auch Strahlung aus dem Inneren der Schneedecke zur Emission beiträgt, spielen Kristallstruktur, Korngröße, Schneedichte und freier Wassergehalt eine Rolle (Hofer und Mätzler, 1980). Im Frequenzbereich von 10 GHz kommt die emittierte Strahlung bei trockenem Schnee aus Bereichen bis zu einigen Metern Tiefe. Diese Eigenschaften haben dazu geführt, daß man über großflächigen Gebieten verschiedene Parameter der Schneedecke wie das Wasseräquivalent oder die Schneehöhe in Beziehung zu multispektralen Mikrowellen-Daten setzen kann.

Die stärkste Einschränkung für Anwendungen passiver Mikrowellen-Daten ist durch das geringe Auflösungsvermögen der Radiometer bedingt. Mit dem Scanning Multichannel Microwave Radiometer auf Nimbus-7 ist zum dritten Mal auf einem Satelliten der Nimbus-Serie ein Mikrowellen Radiometer im Einsatz. Das Instrument tastet die Erdoberfläche in 5 Frequenzbereichen

jeweils in horizontaler und vertikaler Polarisierung ab. Das Auflösungsvermögen ergibt sich aus dem Verhältnis der Wellenlänge zum Antennendurchmesser und liegt je nach Frequenz zwischen 18 km x 27 km und 97 km x 151 km. Diese Auflösung beschränkt die Anwendungen auf Studien in großen Maßstäben.

R o u t i n e m ä ß i g e A n w e n d u n g e n u n d z u k ü n f t i g e M ö g l i c h k e i t e n

Seit Mitte der sechziger Jahre werden Daten der Schnee- und Eisbedeckung aus Satellitenbildern abgeleitet, wobei in den ersten Jahren nur großflächige Informationen gewonnen wurden. Mit der Entwicklung neuer Sensoren erweiterte sich auch der Kreis der Anwendungen, der zunächst vor allem wissenschaftliche Fragestellungen in Hydrologie, Glaziologie, Klimatologie und Polarforschung umfaßte. In den letzten Jahren hat die Verbesserung der Sensoren auf operationellen Satelliten wesentlich dazu beigetragen, daß Satellitendaten auch routinemäßig in verschiedenen Zweigen der Wasserwirtschaft und Hydrologie verwendet werden. Außerhalb der Polargebiete beschränken sich Routine-Anwendungen vor allem auf die Erfassung von Schnee- und Eisflächen in Einzugsgebieten verschiedener Größe.

Als Beispiel sei der Application Systems Verification Test on Snowcover Mapping (ASVT) (Rango and Peterson, 1980) erwähnt, der von den Organisationen NASA und NOAA in Zusammenarbeit mit einer Anzahl von Kraftwerksgesellschaften und hydrologischen Diensten durchgeführt wird. In der NOAA-Zentrale in Washington D.C wird für über 30 Einzugsgebiete in den Vereinigten Staaten die Schneebedeckung aus AVHRR-Daten und aus Daten geostationärer Satelliten abgeleitet. Die Schneeflächen werden im allgemeinen einmal wöchentlich bestimmt, die Nutzer erhalten die fertigen Analysen innerhalb 30 Stunden nach der Satelliten-Aufnahme. Falls Landsat-Daten für ein Einzugsgebiet vorhanden sind, werden diese zur Kontrolle und Verbesserung der Analysen verwendet. Die Daten gehen zusammen mit Bodenmessungen in hydrologische Modelle zur Erstellung von Abflußprognosen ein.

Wesentlich für die Verwendung von Satellitendaten für Abflußprognosen ist neben dem raschen Datenzugriff bei vertretbaren Kosten vor allem die einigermaßen regelmäßige Wiederholung der Aufnahme desselben Gebietes. In Gegenden mit häufiger Wolkenbedeckung ist mit hochauflösenden Satellitendaten (Landsat) eine regelmäßige Wiederholung zur Zeit nicht gesichert. Deshalb beschränkt sich die Anwendung dieser Daten ebenso wie der Einsatz von Fernerkundungs-Messungen aus Flugzeugen auf Probleme, die keine häufige Wiederholung benötigen wie zum Beispiel glaziologische Anwendungen und wissenschaftliche Untersuchungen. Zu routinemäßigen hydrologischen Anwendungen tragen vor allem die Satelliten mit hoher Wiederholungsrate aber geringerem Auflösungsvermögen bei; die Daten dieser Satelliten eignen sich zur Schneekartierung in Einzugsgebieten ab etwa 500 km² Fläche. Eine optimale Nutzung der Bild-Information ermöglicht die Auswertung an interaktiven digitalen

Bildverarbeitungssystemen.

Neue Sensoren auf zukünftigen Satelliten werden dazu beitragen, den Kreis der Anwendungen in Forschung und im routinemäßigen Einsatz zu erweitern. Für Landsat-D ist der Thematic Mapper vorgesehen, der die Erdoberfläche in 6 Spektralbereichen im Sichtbaren und nahen Infrarot mit 30 m Auflösung abtastet und in einem Kanal im thermischen Infrarot mit 120 m Auflösung. Bilddaten der Erdoberfläche mit 10 bis 20 m Auflösung sollen die Satelliten Spot (Frankreich) und in stereoskopischer Aufnahme Mapsat (NASA) liefern. Im Rahmen des Ice and Climate Experiment (ICEX) der NASA wird für 1985 der Start eines polarumlaufenden Satelliten in Betracht gezogen, der mit einem abbildenden Radar von 25 bis 100 m Auflösung und mit einem Mikrowellen-Radiometer von 7 bis 20 km Auflösung ausgerüstet sein soll. Zur Erprobung von Sensoren und für spezielle Forschungsaufgaben in Glaziologie und Hydrologie werden die Erderkundungs-Missionen auf Spacelab beitragen.

Literatur

- Hofer, R. and Mätzler, C., 1980: Investigations on snow parameters by radiometry in the 3- to 60-mm wavelength region. Journal of Geophys. Research, vol. 85, no. C1: 453-460.
- IAHS, 1980: World glacier inventory. Proceedings of the workshop at Riederalp, Switzerland, Sept. 1978. IAHS-AISH Publication no. 126, 351 p.
- Rango, A., Chang, A.T.C., and Foster, J.L., 1979: The utilization of spaceborn microwave radiometers for monitoring snowpack properties. Nordic Hydrology vol. 10: 25-40.
- Rango, A. and Peterson, R., 1980: Operational applications of satellite snowcover observations. NASA Conference Publication no. 2116, 301 p.
- Rott, H., 1976: Analyse der Schneeflächen auf Gletschern der Tiroler Zentralalpen aus Landsat-Bildern. Zeitschrift f. Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. 12: 1-28.
- Rott, H., 1980: Die Berechnung spektraler Strahlungsgrößen zur Auswertung von Strahldichtemessungen aus Flugzeugen. Archiv f. Met. Geoph. Biokl., Ser. B., Bd. 28: 277-290.

Datum: 14. Oktober 1980

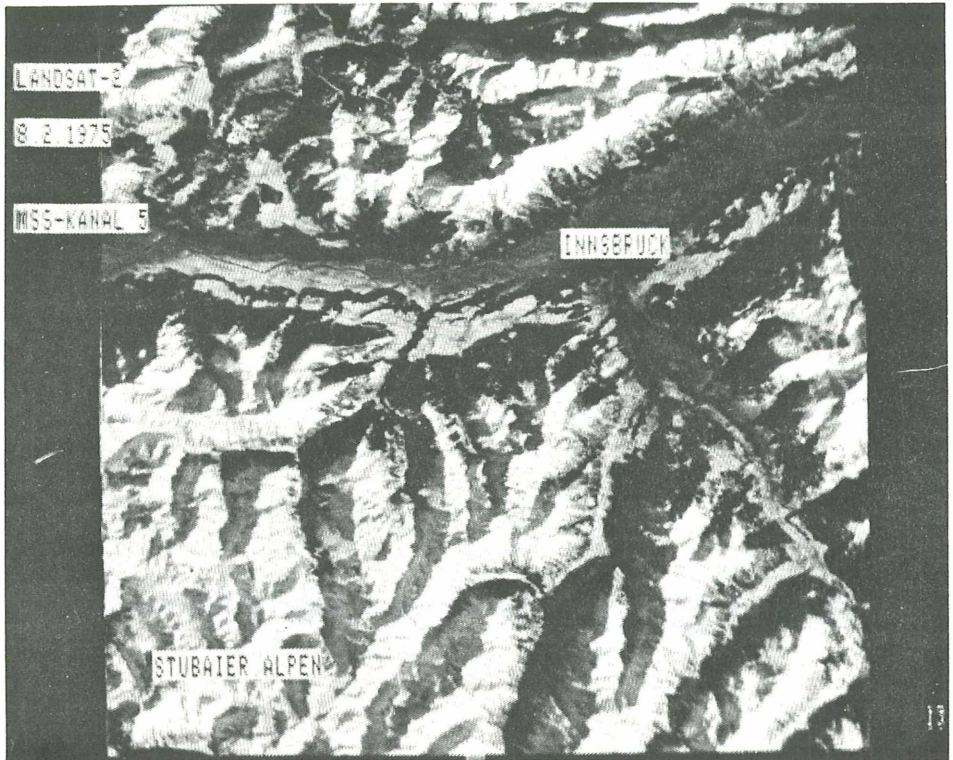


Abbildung 1: Ausschnitt einer Landsat-2 Aufnahme von Tirol vom 8.2.1975 in MSS-Kanal 5 ($0.6 - 0.7 \mu\text{m}$), wiedergegeben am digitalen Bildverarbeitungssystem Innsbruck.

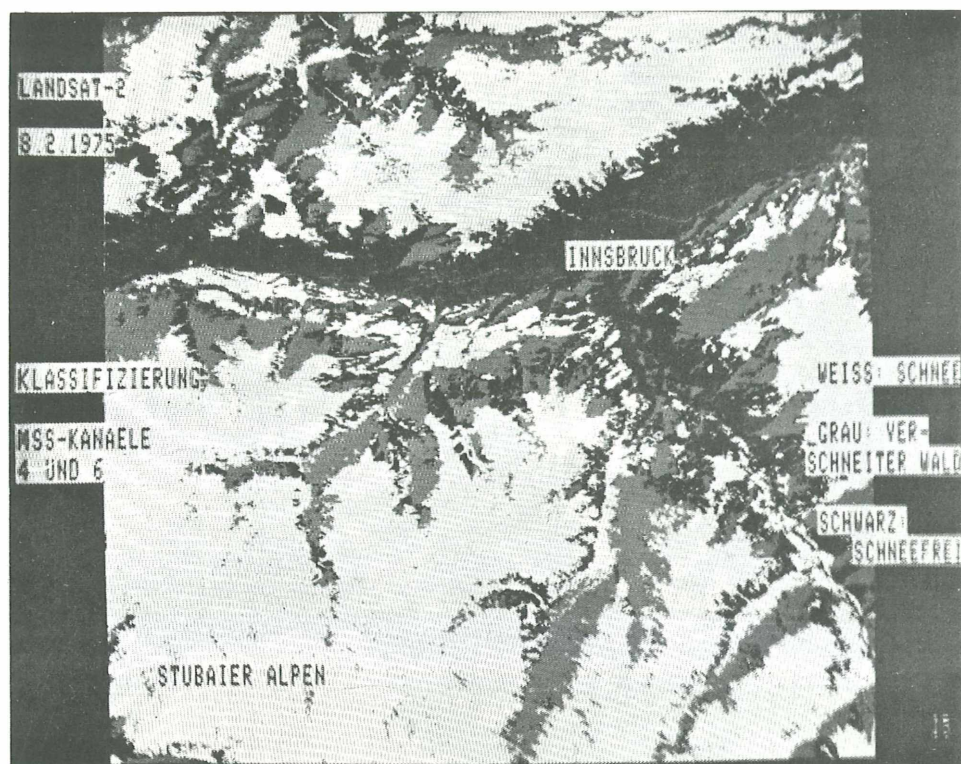


Abbildung 2: Ergebnis einer zweidimensionalen kontrollierten Klassifizierung für 3 Klassen im selben Ausschnitt wie Abbildung 1.

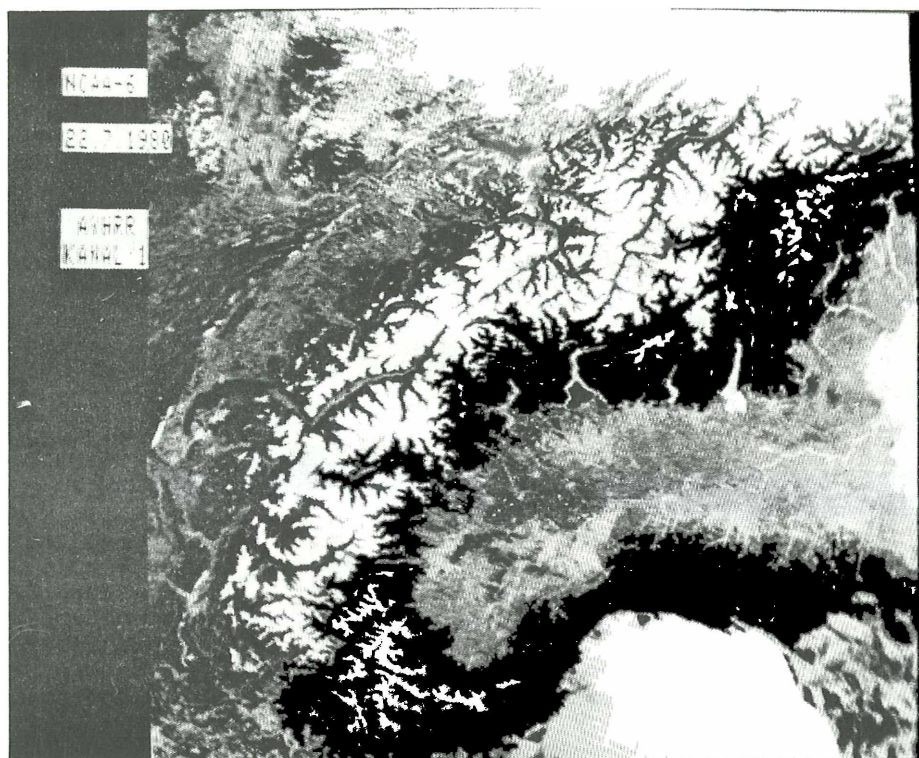


Abbildung 3: Das Alpengebiet aus einer NOAA-6 Aufnahme vom 22.7.1980 im sichtbaren AVHRR-Kanal, zur Verfügung gestellt von DFVLR/GSOC-Oberpfaffenhofen, wiedergegeben am digitalen Bildverarbeitungssystem Innsbruck.