

Einsatz der Satellitenfernerkundung für die Bodennutzungsstatistik

Methoden und Resultate eines Forschungsprojektes

2

Raum und Umwelt
Espace et environnement
Territorio e ambiente

Die vom Bundesamt für Statistik (BFS) herausgegebene Reihe «Statistik der Schweiz» gliedert sich in folgende Fachbereiche:

- | | | | |
|----|---|----|---|
| 0 | Statistische Grundlagen und Übersichten | 11 | Verkehr und Nachrichtenwesen |
| 1 | Bevölkerung | 12 | Geldpolitik, Finanzmärkte und -akteure |
| 2 | Raum und Umwelt | 13 | Soziale Sicherheit |
| 3 | Arbeit und Erwerb | 14 | Gesundheit |
| 4 | Volkswirtschaft | 15 | Bildung und Wissenschaft |
| 5 | Preise | 16 | Kultur, Medien, Zeitverwendung |
| 6 | Industrie und Dienstleistungen | 17 | Politik |
| 7 | Land- und Forstwirtschaft | 18 | Öffentliche Finanzen |
| 8 | Energie | 19 | Rechtspflege |
| 9 | Bau- und Wohnungswesen | 20 | Gesellschaft in Bewegung (Querschnittsthemen) |
| 10 | Tourismus | | |
-

Einsatz der Satellitenfernerkundung für die Bodennutzungsstatistik

Methoden und Resultate eines Forschungsprojektes

Autoren

Ivo Leiss, Gaby Noser
Ernst Basler + Partner AG, Zollikon

Herausgeber

Bundesamt für Statistik

Herausgeber: Bundesamt für Statistik (BFS)
Auskunft: Jürg Burkhalter, Tel. 032 713 61 23
E-Mail: juerg.burkhalter@admin.bfs.ch
Realisierung: Sektion Raumnutzung, Bundesamt für Statistik
Vertrieb: Bundesamt für Statistik
CH-2010 Neuchâtel
Tel. 032 713 60 60 / Fax 032 713 60 61
Bestellnummer: 405-0000
Preis: Fr. 11.–
Reihe: Statistik der Schweiz
Fachbereich: 2 Raum und Umwelt
Originaltext: Deutsch, auch auf englisch erhältlich
Übersetzung: Nicola Burri, Übersetzungen und Sekretariatsservice, Zürich
Layout: BFS
Copyright: BFS, Neuchâtel 2000
Abdruck – ausser für kommerzielle Nutzung –
unter Angabe der Quelle gestattet.
ISBN: 3-303-02059-0

Inhaltsverzeichnis

Liste der Abbildungen und Tabellen	4
Zusammenfassung	5
1 Einleitung	7
1.1 Problemstellung	7
1.2 Das Forschungsprojekt	7
1.3 Zielsetzung der Arbeit	9
1.4 Aufbau der Arbeit	9
2 Grundlagen	10
2.1 Entwicklung der Fernerkundung	10
2.2 Einsatz der Satellitenfernerkundung	10
2.3 Die Bodennutzung der Schweiz (Arealstatistik)	11
2.4 Beschreibung der verwendeten Satellitensensoren	13
2.5 Bestes Aufnahmedatum	16
2.6 Verfügbarkeit wolkenarmer Satellitendaten der Schweiz	17
2.7 Verwendete Satellitendaten	19
3 Methodik	20
3.1 Post-Systemkorrektur	20
3.2 Geometrische Korrektur	23
3.3 Radiometrische Korrektur	29
3.4 Klassifikation	40
3.5 Nachbearbeitung einer Klassifikation	48
4 Resultate	50
4.1 Überblick	50
4.2 Waldmischungsgrad im Untersuchungsgebiet Beckenried	51
4.3 Landnutzung im Untersuchungsgebiet Yverdon (monotemporal)	52
4.4 Landnutzung im Untersuchungsgebiet Yverdon (multitemporal)	53
4.5 Landwirtschaftliche Kulturen im Untersuchungsgebiet Yverdon	54
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	55
5.1 Schlussfolgerungen	55
5.2 Ausblick	56
Abkürzungen und Fachbegriffe	57
Literatur	60

Liste der Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

Abbildung 1: Das Referenzsystem von Landsat TM in der Schweiz	14
Abbildung 2: Das Referenzsystem von SPOT in der Schweiz	15
Abbildung 3: Verfügbarkeit von mindestens einer geeigneten Szene (in Prozent)....	18
Abbildung 4: ‘Quicklooks’ der im Rahmen des Projekts verwendeten Landsat-TM und SPOT-Szenen	32
Abbildung 5: Datenfluss für die radiometrische Korrektur von Fernerkundungsdaten	36
Abbildung 6: Datenfluss zur Klassifikation von Fernerkundungsdaten	40
Abbildung 7: Waldmischungsgrad im Untersuchungsgebiet Beckenried	31
Abbildung 8: Landnutzung I im Untersuchungsgebiet Yverdon (monotemporal)	31
Abbildung 9: Landnutzung II im Untersuchungsgebiet Yverdon (multitemporal) ...	34
Abbildung 10: Landwirtschaftliche Kulturen im Untersuchungsgebiet Yverdon	34

Tabellen

Tabelle 1: TM Kanalspezifikationen	13
Tabelle 2: HRV Kanalspezifikationen	15
Tabelle 3: Verwendete TM- und XS-Daten	19
Tabelle 4: Überblick über die durchgeführten Orthorektifizierungen	27
Tabelle 5: Überblick über die durchgeführten parametrischen Orthorektifizierungen	28
Tabelle 6: Übersicht über die durchgeführten semi-empirischen radiometrischen Korrekturen	37
Tabelle 7: Übersicht über die durchgeführten physikalisch basierten radiometrischen Korrekturen	39

Zusammenfassung

Um den Nutzen der Satellitenfernerkundung für die Belange der Arealstatistik abzuklären, suchte das Bundesamt für Statistik die Zusammenarbeit mit dem Geographischen Institut der Universität Zürich. Daraus resultierte 1990 ein erster Forschungsauftrag an dieses Institut, dem bis 1997 vier weitere folgten. In der vorliegenden Publikation sind die im Rahmen dieser fünf Projektphasen verwendeten Methoden und die erzielten Resultate in einer Gesamtschau zusammengefasst. Die ausführlichen Beschreibungen und technische Detailangaben können einer Reihe von Zwischen- und Schlussberichten sowie Seminarunterlagen entnommen werden.

Die Untersuchungen wurden in zwei verschiedenen Untersuchungsgebieten durchgeführt. Ein Gebiet bildeten die Kartenblätter Zug, Rigi und Beckenried, das andere die Region Yverdon. Gesamthaft wurden 13 Szenen beschafft. Es handelte sich dabei um neun Landsat-5 TM-Szenen, eine SPOT-2 Pan, eine SPOT-2 XS und zwei SPOT-3 XS-Szenen. Eine Untersuchung mit den verfügbaren TM-Szenen aus den Jahren 1985-1996 hat gezeigt, dass sich rund 80% der Fläche der Schweiz jährlich mit einer geeigneten TM-Szene abdecken lassen. Weiter gelingt es durchschnittlich alle drei Jahre, die ganze Schweiz mit mindestens je zwei geeigneten TM-Szenen abzudecken.

Da sich Satellitenbilddaten in der üblicherweise zum Kauf angebotenen Rohform für optimierte Klassifikationen und statistisch zuverlässige Auswertungen sowie kartografisch befriedigende Darstellungen nur bedingt eignen, mussten die nötigen Vorverarbeitungsschritte für beide Szenentypen entwickelt und durchgeführt werden. Es stellte sich heraus, dass bei gewissen TM-Bildern zwei Korrekturen durchgeführt werden sollten: die Entfernung verdoppelter Zeilen und die Entfernung des lokalen Rauschens. Bei den SPOT-Daten waren keine derartigen Post-Systemkorrekturen notwendig.

Da die Aufnahmesensoren die Pixel nicht parallel zu den Landeskoordinatenachsen aufnehmen und da das Geländere relief sich durch Verzerrungen bemerkbar macht, ist in einem weiteren Schritt eine Orthorektifizierung vorzunehmen. In dieser Publikation werden verschiedene Methoden beschrieben. Sie basieren alle auf Passpunkten, welche einerseits in der Szene und andererseits auf einer Karte bestimmt werden müssen. Je besser die Passpunkte sind, desto besser stimmt die Geometrie der orthorektifizierten Szene mit derjenigen der Landeskarte überein. Die Untersuchungen zeigten, dass sich bei guten Passpunkten eine Genauigkeit in der Grössenordnung von einem halben Pixel erreichen lässt.

Je nach Anwendung empfiehlt sich anschliessend noch eine radiometrische Korrektur der Szene. Dabei wird versucht, die szenenbedingten radiometrischen Effekte im Satellitenbild auszugleichen. Diese sind einerseits topografisch (z.B. unterschiedlicher Sonneneinfallswinkel, Schattenwurf), andererseits atmosphärisch bedingt (z.B. unterschiedliche Dunstverhältnisse). Es werden verschiedene Korrekturmöglichkeiten vorgestellt. Eine allseits überzeugende Korrektur konnte bislang nicht gefunden werden. Je nach Art der Klassifikation sollte aber trotzdem eine radiometrische Korrektur vorgenommen werden.

Für die Klassifikation werden neben den Kanälen der Satellitendaten oft noch Informationen vom Geländemodell (Höhe, Neigung, Exposition) und Texturinformationen, die aus einzelnen Kanälen berechnet wurden, verwendet. Sowohl die Kanalauswahl als auch die Wahl des Klassifikationsalgorithmus haben einen Einfluss auf die Güte des Ergebnisses. Die optimale Konfiguration hängt jedoch vom Klassifikationsproblem, vom Untersuchungsgebiet sowie vom Aufnahmezeitpunkt der Satellitendaten ab. Eine allgemein gültige Methode kann deshalb nicht angegeben werden.

Schliesslich werden einige Resultate, die während des Forschungsprojekts erzielt wurden, vorgestellt. Bei jedem Beispiel ist angegeben, welche Szenen verwendet wurden, welche Korrekturen vorgenommen wurden, mit welchem Algorithmus klassifiziert wurde, und welche Klassifikationsgenauigkeit gegenüber einer Bodenreferenz erreicht wurde. Bei der Angabe der Klassifikationsgenauigkeit wird davon ausgegangen, dass die Bodenreferenz hundertprozentig korrekt ist. Diese Voraussetzung kann jedoch kaum erfüllt werden. Abweichungen können insbesondere durch unterschiedliche Aufnahmezeitpunkte oder Geometrien zwischen Bodenreferenz und Satellitendaten entstehen. Die effektive Genauigkeit wird also durch den angegebenen Wert etwas unterschätzt.

In Anbetracht der Forschungsergebnisse kam man beim Bundesamt für Statistik zum Schluss, dass man das Know-how übernehmen und die Arealstatistik mit Satellitenfernerkundung im Bereich Waldmischungsgrad ergänzen möchte. Die entsprechenden Arbeiten werden im Jahr 2000 abgeschlossen. Zu diesem Thema ist eine separate Publikation geplant.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die operationell im Bundesamt für Statistik angewendete Methode der Luftbildinterpretation von systematisch verteilten Punkstichproben wurde in den 70er-Jahren für die Erhebung einer neuen Arealstatistik der Schweiz entwickelt und für die Ersterhebung der Bodennutzung auf der Grundlage von Luftbildern von 1979 bis 1985 umgesetzt [68]. Sie findet ebenfalls für die erste Gesamtnachführung mittels Luftbildern von 1992 bis 1997 Verwendung. Allerdings hat sich die Methode vor allem in Bezug auf die Nachführung mit permanenten, identischen Stichprobenpunkten als über Erwarten arbeitsaufwändig erwiesen. Sie weist darüber hinaus Schwächen bezüglich der Erkennbarkeit und Genauigkeit gewisser, wünschbarer Nutzungskategorien sowie bezüglich erzielbarer Aktualität und zeitlicher Vergleichbarkeit auf. Zudem sind ihre Resultate, obwohl statistisch von hoher Genauigkeit, für die Herstellung thematischer Karten und für die geographisch-räumliche Analyse nur bedingt geeignet.

In den vergangenen Jahren hat die Satellitenfernerkundung demgegenüber eine rasante Entwicklung durchgemacht, durch welche das Potenzial von Satellitendaten für die Erdbeobachtung enorm erweitert worden ist. Trotz vielen Einsatzmöglichkeiten wurde dieses Potenzial bislang in der Praxis und für operationelle und produktionsorientierte Aufgaben nur spärlich genutzt. Während im Bereich der Forschung und Entwicklung bemerkenswerte Fortschritte zu verzeichnen sind, besteht zweifellos immer noch eine Lücke zwischen potenziellem Einsatz und effektiver, konkreter Anwendung.

1.2 Das Forschungsprojekt

Im Jahre 1990 startete das Bundesamt für Statistik ein Projekt, welches die Einsatzmöglichkeiten der Satellitenfernerkundung für die amtliche Statistik, namentlich die Areal- und Umweltstatistik, abklären sollte. Auftragnehmer war Prof. Dr. K.I. Itten vom Geographischen Institut der Universität Zürich. In den folgenden fünf Projekt-Phasen wurden für verschiedene Teilbereiche der Satellitenfernerkundung Methoden erarbeitet und getestet.

In der ersten Projektphase im Dezember 1990 wurden die methodischen Grundlagen zur geometrischen und radiometrischen Korrektur von Satellitenbildern erarbeitet. Dabei wurden Verfahren zur Korrektur reliefbedingter Lageverzerrungen sowie sensorbedingter radiometrischer Effekte entwickelt. Ehrler [25] führte diese Untersuchungen mittels Landsat TM- und SPOT HRV (XS und Pan)-Bildern durch, wobei er sich auf ein Untersuchungsgebiet in der Innerschweiz (Kartenblätter Zug, Rigi, Beckenried) konzentrierte. Es zeigte sich, dass das 'striping' in SPOT-Bildern mit Hilfe eines morphologischen Filters zu einem grossen Teil korrigiert werden kann, ohne dass ein Informationsverlust in Kauf genommen werden muss. Bezüglich geometrischer Genauigkeit konnten die Anforderungen der Schweizerischen Arealstatistik sowohl mit Landsat TM als auch mit SPOT HRV erreicht werden.

In einer zweiten Phase, welche im Oktober 1992 begann, wurde einerseits ein Konzept zur radiometrischen Korrektur der Illuminationsunterschiede entwickelt, andererseits das Potenzial der Satellitendaten für eine automatische, digitale Bodennutzungsklassifikation untersucht. Für diese Arbeiten wurden das Untersuchungsgebiet und die Datengrundlage aus der Phase I übernommen. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Illuminationsunterschiede mit Hilfe der herkömmlichen empirischen und semi-empirischen Korrekturverfahren nicht derart korrigieren lassen, dass eine signifikante Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit resultieren würde. Untersuchungen zur spektralen Trennbarkeit zwischen den Landnutzungskategorien ergaben, dass Unterscheidungen innerhalb der vier Hauptbereiche «Bestockte Flächen», «Landwirtschaftliche Nutzflächen», «Siedlungsflächen» und «Unproduktive Flächen» allein auf Grund der spektralen Information nur vereinzelt möglich sind [12].

Die Phase III, welche im Januar 1994 begann, beinhaltete drei Schwerpunkte: (1) die Unterscheidung der gesamten Waldfläche in Laub-, Misch- und Nadelwald (Waldtypisierung), (2) die Erarbeitung eines Arbeitskonzeptes zur Unterscheidung zwischen Ackerland, Wiesland und Weide und (3) die Herstellung einer bestmöglichen Satellitenbildklassifikation für ein Kartenblatt im Massstab 1:25'000. Als Neuerung in der Datenaufbereitung wurden die Rohdaten mit Hilfe eines physikalischen Modells von Sandmeier [54] radiometrisch korrigiert. Der Vergleich verschiedener Bodenreferenzdaten für Wald im Untersuchungsgebiet Beckenried zeigte beträchtliche Unterschiede und wies auf die prinzipielle Frage nach der Zuverlässigkeit solcher Quellen hin. Für die Satellitenbildklassifikation in der Westschweiz wurde eine neue Landsat TM-Szene gekauft und die Region Yverdon als Untersuchungsgebiet ausgewählt. Der Vergleich der Klassifikation mit der Arealstatistik zeigte, dass trotz Anwendung modernster Methoden für die Kategorien «Industrieflächen», «Gebäude» und «Rebbauf Flächen» keine befriedigenden Resultate erzielt werden konnten [12].

Die Phase IV begann im Januar 1995 und verfolgte drei Zielsetzungen: (1) die Realisierung des in Phase III erstellten Konzeptes zur multitemporalen Klassifikation im landwirtschaftlichen Raum, (2) die Planung und Mithilfe bei der multitemporalen Satellitenbildbeschaffung und (3) die Beratung und konzeptionelle Unterstützung bei der Erarbeitung einer konkreten Projektskizze zur Umsetzung der Satellitenfernerkundung in eine praxis- und produktionsorientierte Anwendung [13]. Für das Untersuchungsgebiet Yverdon wurden mit entsprechender Feldarbeit für einige Testflächen sehr detaillierte Angaben über die angebauten Feldfrüchte erhoben. Ausserdem wurden sieben Landsat TM- und zwei SPOT HRV (XS)-Szenen innerhalb der Vegetationsperiode eines Jahres beschafft. Bei der multitemporalen Klassifikation im landwirtschaftlichen Raum konnte eine signifikante Verbesserung im Vergleich zu einer monotemporalen Klassifikation erreicht werden. Im Rahmen der Beratung im Hinblick auf eine praxis- und produktionsorientierte Anwendung erfolgte ein Transfer der bisher entwickelten Methoden, Verfahren und Programme sowie der erworbenen Erfahrungen zum Bundesamt für Statistik.

Die Phase V wurde im Mai 1997 in Angriff genommen. Schwerpunkte bildeten die Untersuchungen des Überlappungsbereichs von Landsat TM-Satellitenszenen für eine Klassifikationsverbesserung sowie die Analyse des Potenzials multitemporaler Satellitendaten im Grenzbereich zwischen Wald und gewissen landwirtschaftlichen Nutzflächen. Für das Untersuchungsgebiet Yverdon zeigte sich, dass die zusätzliche spektrale Information im Überlappungsbereich zweier Szenen zu einer signifikanten Klassifikationsverbesserung führt. Anhand der Untersuchungen im Grenzbereich zu Wald konnte die Bedeutung nicht-

spektraler Zusatzdaten wie Topografie und Textur gezeigt werden. Ausserdem stellte sich heraus, dass die Methode der neuronalen Netzwerke für derartige komplexe Klassifikationsprobleme besonders geeignet ist.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Die Resultate dieser fünf Projekt-Phasen sind in 16 Berichten sowie in elf Vortragspräsentationen festgehalten. Eine einheitliche, zusammenfassende Publikation, welche einen Überblick über die Untersuchungen erlauben würde, existiert jedoch nicht.

Der vorliegende Methodenband Fernerkundung soll diese Lücke füllen und die im Rahmen des Projektes zwischen 1990 und 1998 erarbeiteten Methoden und Resultate zusammenfassen. Die untersuchten Methoden und Ergebnisse sollen in einen gesamtheitlichen Kontext gebracht und bewertet werden. Ausserdem sollen die wichtigsten Resultate der Klassifikation präsentiert werden. Es ist nicht das Ziel des Methodenbandes, die verschiedenen Teilphasen des Projektes abzuhandeln. Ebenfalls sollen die Methoden und deren Algorithmen nicht im Detail beschrieben werden. Dafür wird auf die Fachliteratur und auf die Projektberichte verwiesen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Im Kapitel 2 wird auf die Grundlagen der Fernerkundung eingegangen. Dabei wird die Entwicklung und der Einsatz von Fernerkundung aufgezeigt, die in diesem Projekt verwendeten Satellitensysteme und -daten beschrieben und der Datensatz der Bodennutzung Schweiz (Arealstatistik) vorgestellt. Anschliessend werden Fragen zum besten Aufnahmezeitpunkt und zur Verfügbarkeit wolkenloser Satellitendaten der Schweiz diskutiert.

Das Kapitel 3 bildet den Hauptteil dieses Bandes. Er befasst sich mit den Methoden, welche im Arealstatistik-Projekt bei der Vorverarbeitung und der Klassifikation zum Einsatz gelangt sind. Nach einem Überblick über die bestehenden Methoden werden die einzelnen Verfahren beschrieben, deren Resultate zusammengefasst und bewertet.

Im Resultatteil werden einige Beispiele der produzierten Landnutzungsklassifikationen dargestellt. Sämtliche Prozessierungsschritte, die für das Erreichen dieses Produktes notwendig waren, sind dabei aufgelistet.

Am Schluss dieses Bandes finden sich eine Zusammenstellung von Fachausdrücken und Abkürzungen sowie das Literaturverzeichnis.

2 Grundlagen

2.1 Entwicklung der Fernerkundung

Die Fernerkundung hat in den letzten Jahrzehnten in vielen Bereichen der Geowissenschaften stark an Bedeutung gewonnen. Anwendungen finden sich heute unter anderem in Agrar- und Forstwirtschaft, Geologie, Ozeanographie, Hydrologie und Meteorologie. Bis anfangs der Siebziger Jahre gelangten vor allem flugzeuggestützte Aufnahmesysteme zur Anwendung. Satellitenaufnahmen waren damals militärischen Zwecken vorbehalten. Seit dem Start der ersten amerikanischen Landsat-Plattform im Jahre 1972 stehen für den zivilen Bereich auch satellitengestützte Aufnahmesysteme zur Verfügung.

Die Fernerkundungssensoren messen reflektierte oder emittierte Strahlung aus verschiedenen Spektralbereichen des sichtbaren Lichts, des Infrarots sowie der Mikrowellen. Dabei kann zwischen fotografischen und nicht-fotografischen Aufnahmesystemen unterschieden werden. In der Regel wird durch eine Vielzahl von Einzelmessungen ein Bild zusammengestellt (z.B. Scanner). In gewissen Fällen kann es sich bei den Aufnahmen auch um Einzelmessungen handeln (z.B. Radar-Altimeter [40]).

Fotografische Aufnahmesysteme sind nach wie vor am meisten verbreitet und bestehen in der Regel aus einer Kamera und einem Film. Für die konventionelle Luftbildfotografie wird fast ausschliesslich eine Einzelobjektivkamera (Reihenmesskamera) eingesetzt. Daneben gibt es aber auch noch mehrlinsige Kameras, Streifenkameras und Panoramakameras. Während früher fast ausschliesslich mit Schwarzweissfilmen aufgenommen wurde, können die Interpretationsmöglichkeiten heute durch Farb-, IR- und UV-Filme erweitert werden.

Die nicht-fotografischen, digitalen Aufnahmesysteme erlangen immer grössere Bedeutung. Je nach Aufnahmetechnik spricht man bei diesen Sensoren von Scannern, Radiometern, Radar, Spektrometern. Besonders multispektrale oder hyperspektrale Aufnahmen, welche sich durch eine gleichzeitige Registrierung der Strahlung in verschiedenen Wellenlängenbereichen auszeichnen, erweitern den Anwendungsbereich der Fernerkundungsdaten ganz erheblich. Eine spezielle Stellung nimmt in diesem Zusammenhang der Laser-scanner ein. Mit Hilfe dieses Sensors kann die Distanz zwischen Plattform und Geländeoberfläche ermittelt werden. Diese Information kann anschliessend zur Herstellung hochpräziser DHM verwendet werden.

Die Interpretation von Fernerkundungsaufnahmen beruhte früher ausschliesslich auf analogen Methoden. Dabei standen die photogrammetrische Auswertung sowie die Interpretation anhand von Grau- oder Farbtönen, Textur, Muster sowie – bei stereoskopischer Betrachtung – das dreidimensionale Bild der Oberflächenformen im Vordergrund. Mit dem Aufkommen der elektronischen Datenverarbeitung in den Sechzigerjahren wurden zusätzlich auch Methoden zur automatischen Interpretation entwickelt.

2.2 Einsatz der Satellitenfernerkundung

Der Einsatz von Satelliten kann als eine der wichtigsten technologischen Errungenschaften, die den heutigen Stand der Fernerkundung bestimmen, bezeichnet werden. Insbesondere bei meteorologischen Anwendungen ist die Information, welche von den Satelliten gelie-

fert wird, nicht mehr wegzudenken. Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet liegt aber auch im Bereich der Landbedeckung ('land cover') bzw. der Landnutzung ('land use'). Prinzipiell können Fernerkundungsdaten auf diesem Gebiet für vier Aufgabenstellungen genutzt werden:

- Kartierung ('mapping'),
- Bestandesaufnahme ('inventoring'),
- Überwachung ('monitoring'),
- Vorhersage ('forecasting').

Ziel des 'mapping' ist die Herstellung einer Landnutzungs- bzw. Landbedeckungskarte [2], [3], [36]. Die Pixel eines Bildes werden dabei durch manuelle oder automatische Verfahren einer Kategorie zugewiesen, wobei die Kartierungsgenauigkeit im Vordergrund steht. Als Mass für die Güte des Resultates wird deshalb häufig ein Pixel-zu-Pixel-Vergleich mit der Bodenreferenz verwendet.

Beim 'inventoring' sollen die flächenmässigen Anteile einzelner Landnutzungen bestimmt werden [10], [29]. Mit Hilfe von statistischen Methoden – z.B. Regressions-schätzungen ('regression estimates') – wird dabei die Genauigkeit konventioneller, in der Regel bodengestützter Verfahren durch Satellitendaten verbessert. Die Güte des Resultates wird anhand der Korrelation zwischen 'ground truth' und Satellitendaten ausgedrückt.

Beim 'monitoring' steht die Überwachung von Landnutzungsveränderungen im Vordergrund [31], [59]. In der Regel werden dazu Daten verschiedener Zeitpunkte verwendet. Ein typisches Beispiel stellt die Überwachung der Waldfläche in den Tropen dar.

Beim 'forecasting' schliesslich wird versucht, zukünftige Entwicklungen der Landnutzung vorherzusagen [19], [58]. Diese Prognosen können auf monotemporalen oder multitemporalen Daten beruhen. Bei der Früherkennung von Schädlingsbefall oder Austrocknung bei landwirtschaftlichen Kulturen werden üblicherweise monotemporale Daten eingesetzt. Ernteprognosen stützen sich hingegen oft auf multitemporale Daten.

2.3 Die Bodennutzung der Schweiz (Arealstatistik)

In den Jahren 1912, 1923/24, 1952 und 1972 wurden Arealstatistiken publiziert, die aus verschiedenen Gründen methodisch uneinheitlich und daher für viele Fragestellungen und insbesondere für Zeitvergleiche unbrauchbar waren. Deshalb beschloss der Schweizerische Bundesrat am 17. Februar 1982 die Neuerhebung der Arealstatistik der Schweiz mit Hilfe der stichprobenweisen Luftbildinterpretation, einer Methode, die Ende der Siebzigerjahre am Institut für Photogrammetrie der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Lausanne und am Institut für Orts-, Regional- und Landesplanung der ETH Zürich unter Mitwirkung verschiedener Bundesstellen entwickelt wurde.

Als Datengrundlage für die Arealstatistik 1979/85 dienten Schwarzweiss-Luftbilder des Bundesamtes für Landestopographie des Flugprogrammes der Jahre 1979 bis 1985. Der Datensatz 1979/85 repräsentiert somit den Zustand der Bodennutzung in der Schweiz zu Be-

ginn der Achtzigerjahre, wobei die ältesten Daten aus dem Jahr 1979 (Westschweiz), die jüngsten (Kanton Graubünden) von 1985 stammen. Die Erhebungsarbeiten, die entsprechend den Kartenblättern der Landeskarte 1:25'000 organisiert waren, begannen im Frühjahr 1984 und waren Ende 1992 abgeschlossen.

Für die Datenerhebung wurden knapp 4000 Folien mit einem Netz von Stichprobenpunkten im Abstand von $100 \times 100\text{m}$ berechnet und den Luftbildern überlagert. Massgebend für die Lage der Stichprobenpunkte waren die Schnittpunkte der 100m-Koordinaten der Landeskarte. Mit Hilfe der Orientierungselemente des Luftbildes (Lage des Aufnahmestandpunktes, Kammerkonstante, Bildneigungen, Bildhauptpunkt) und des auf Hektaren umgerechneten und ergänzten digitalen Geländemodells RIMINI des Eidgenössischen Militärdepartements wurden die Positionen der Stichprobenpunkte für jedes Luftbild berechnet und anschliessend automatisch gezeichnet. Daraus entstand eine Mass haltige Folie mit Stichprobenetz, Rahmenmarken, Passpunktmarkierung und Beschriftung des Kilometernetzes, die für die Interpretationsarbeiten dem entsprechenden Luftbild überlagert werden konnte.

Die Interpretation der Landnutzung erfolgte unter Stereoskopen, welche die räumliche Betrachtung der Bilder ermöglichen. In deren Verlauf wurde jedem der insgesamt 4.1 Millionen Stichprobenpunkte eine der 69 Kategorien des Nutzungskataloges zugeteilt. Ausschlaggebend für die Zuteilung der Bodennutzungscode war die Nutzung am Stichprobenpunkt. Zur Vereinheitlichung der Interpretation und zur Vermeidung von Missverständnissen bei den Zuordnungskriterien wurde jedes Bild Punkt für Punkt von einem zweiten Bearbeiter kontrolliert. Danach wurden die Differenzen gemeinsam besprochen und bereinigt. In Feldbegehungen wurden unklare Nutzungen oder schwer interpretierbare Gebiete sowie noch offen gebliebene Einzelpunkte verifiziert und endgültig zugeteilt. Das Ergebnis der Interpretationsarbeiten – die bereinigten Stichprobenfolien mit den Landnutzungscode – wurde am Bildschirm erfasst und für die Auswertungen in das geographische Informationssystem (GIS) von GEOSTAT des Bundesamtes für Statistik übernommen [11].

Die Arealstatistik-Nomenklatur wird grundsätzlich durch zwei nicht immer eindeutig voneinander trennbaren Grössen bestimmt, nämlich durch die Art der Bodenbedeckung (Vegetation, Bauten, Wasser usw.) sowie durch deren Funktion (Landwirtschaft, Wohnen, Industrie, Erholung usw.). Die vorliegende Gliederung der Kategorien ist jedoch kein durchgehend hierarchisches System in dem Sinne, dass auf der obersten Hierarchiestufe die Bedeckung und auf den nachfolgenden Ebenen deren Funktionen unterteilt würden. Vielmehr ist aus methodischen und praktischen Gründen ein gemischtes System angewendet worden.

Die Grundkategorien wurden auf der Grundlage einer breiten Vernehmlassung in Verwaltung und bei den wichtigsten Statistikbenützern festgelegt und anschliessend in sechs Gebieten ausgetestet. Die Erfahrungen im Laufe der Erhebung führten zu ersten Änderungen und Anpassungen. Einerseits mussten Kategorien (z.B. Ackerbaugelände) aufgehoben werden, da sie wegen jahreszeitlich divergierenden Bildflügen nicht überall erkennbar waren. Andererseits wurden aber dort, wo gut erkennbare Nutzungen nur schlecht in den bestehenden Katalog eingeteilt werden konnten, zusätzliche Kategorien gebildet. Eine detaillierte Beschreibung der Grundkategorien findet sich im Kategorienkatalog des Bundesamtes für Statistik [12].

2.4 Beschreibung der verwendeten Satellitensensoren

Landsat TM

Der erste Landsat-Satellit wurde 1972 in seine Umlaufbahn gebracht. Seither konnten fünf weitere Satelliten erfolgreich lanciert werden. Die erste Generation dieser Satelliten, Landsat-1 bis 3, hatte zwei Sensoren an Bord: die Videokamera RBV sowie den opto-mechanischen Abtaster MSS. Infolge technischer Probleme mit dem RBV sowie der spektralen und radiometrischen Überlegenheit des MSS wurden die RBV-Daten nur selten genutzt. Die zweite Landsat-Generation wurde 1982 mit dem Start von Landsat-4 ins Leben gerufen und 1984 mit Landsat-5 weitergeführt. Beide Plattformen haben zusätzlich zum MSS den Bildabtaster TM an Bord. Die geplante Missionsdauer betrug für Landsat-4 und -5 ursprünglich drei Jahre. Gegenwärtigen Schätzungen zufolge soll die Kontinuität der Landsat-5-Mission jedoch über das Jahr 2000 hinaus aufrechterhalten werden können [26]. 1993 sollte Landsat-6 in Betrieb genommen werden, doch ging der Satellit unmittelbar nach dem Start verloren. Landsat-7 wurde im April 1999 in seine Umlaufbahn gebracht. Diese Plattform ist mit einem verbesserten TM (ETM+) sowie mit dem neuen HRMSI ausgerüstet. Das ETM+ Instrument ist ein Multispektralscanner mit acht Bändern.

Landsat-5 besitzt eine nahezu polare, sonnensynchrone Umlaufbahn in durchschnittlich 705 km Höhe. Er überfliegt den Äquator zwischen 09.20 und 09.40 UT mit einer Inklination von 98.2° und benötigt 98.9 Minuten für die Umkreisung der Erde. Daraus ergibt sich eine vollständige Abdeckung der Erde zwischen 81° N und 81° S. Nach 16 Tagen erreicht der Satellit wieder seinen Ausgangspunkt im Orbit. Am Äquator beträgt der seitliche Überlappungsbereich zweier benachbarter Überflüge ('tracks') 7.6% und nimmt Richtung Pole zu. Auf der geographischen Breite der Schweiz beträgt die Überlappung durchschnittlich 38%, bei 60° bereits 54%. Damit wird über 80% der Schweizer Landesfläche von zwei 'tracks' abgedeckt, was die Erhältlichkeit brauchbarer Daten deutlich verbessert.

Der Sensor TM besitzt sieben Kanäle und eine räumliche Auflösung von 30 bzw. 120m (Tabelle 1). Die Breite eines Abtaststreifens beträgt 185 km.

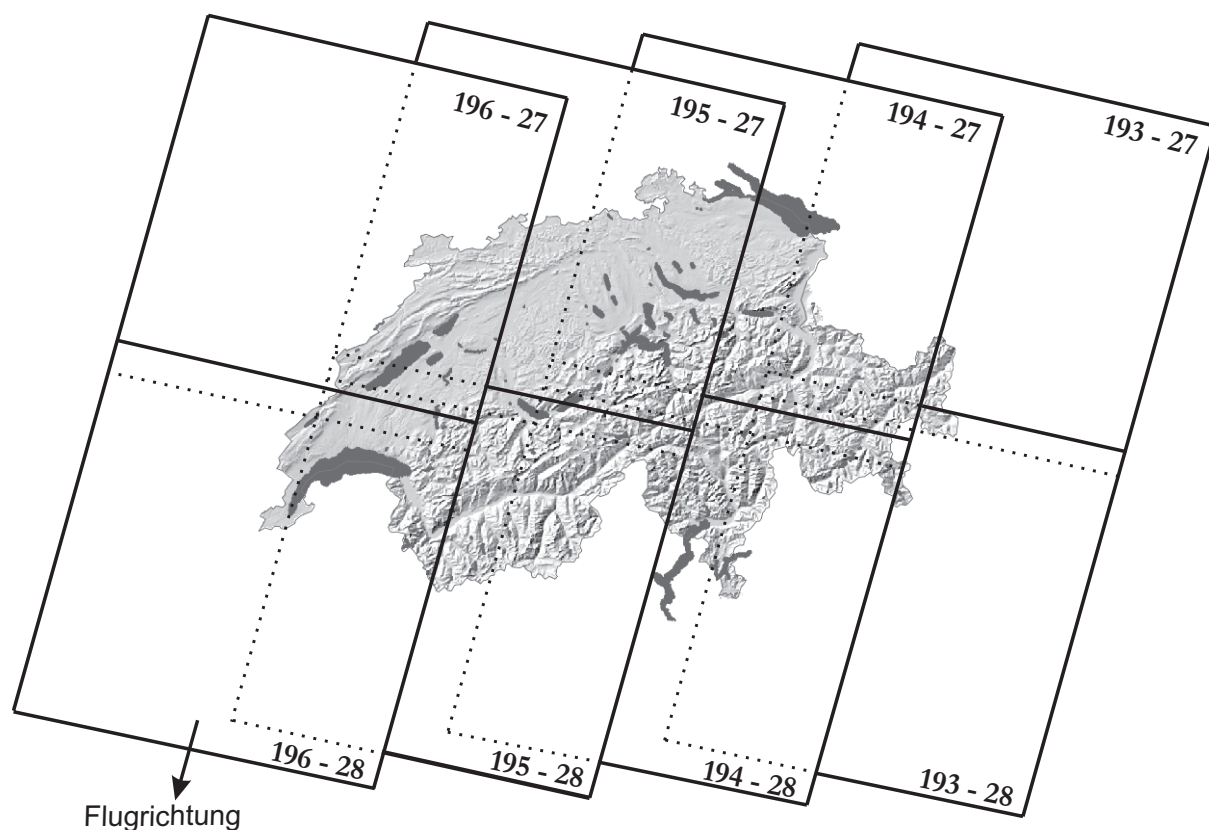
Tabelle 1: TM Kanalspezifikationen

Kanal	Wellenlänge [µm]	Räumliche Auflösung [m²]
TM 1	0.45 - 0.52 (VIS, blau)	30 × 30
TM 2	0.52 - 0.60 (VIS, grün)	30 × 30
TM 3	0.63 - 0.69 (VIS, rot)	30 × 30
TM 4	0.76 - 0.90 (NIR)	30 × 30
TM 5	1.55 - 1.75 (SWIR)	30 × 30
TM 6	10.4 - 12.5 (TIR)	120 × 120
TM 7	2.08 - 2.35 (SWIR)	30 × 30

Landsat-Daten von Europa, Nordafrika und den Mittleren Osten vertreibt die Firma Eurimage. Die Daten werden an drei verschiedenen Bodenempfangsstationen der ESA registriert: Fucino (Italien), Kiruna (Schweden) und Maspalomas (Spanien). Dabei liegt die Schweiz im Empfangsbereich von Fucino und Kiruna.

Für Landsat existieren zwei Referenzsysteme: WRS I für Landsat-1, -2 und -3 sowie WRS II für Landsat-4 und -5. Die Schnittpunkte zwischen 'track' und 'frame' bilden die nominalen Szenenmittelpunkte und werden für die Identifikation und Bestellung der Landsat-Daten verwendet (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Das Referenzsystem von Landsat TM in der Schweiz. Quelle: [49]



SPOT HRV

Seit dem Start von SPOT-1 im Jahre 1986 sind SPOT-Daten operationell verfügbar. In der Zwischenzeit wurden drei weitere Plattformen in Betrieb genommen: SPOT-2 (1990), SPOT-3 (1993) und SPOT-4 (1998). Diese SPOT-Satelliten sind mit jeweils zwei opto-elektronischen Zeilenkameras namens HRV ausgerüstet. Diese Sensoren messen in vier bzw. fünf verschiedenen Kanälen. Es stehen stets zwei Satelliten im Einsatz. Als beispielsweise SPOT-3 im November 1996 unerwartet verloren ging, wurde SPOT-1 reaktiviert.

Die nahezu polaren, sonnensynchronen Umlaufbahnen der SPOT-Satelliten liegen in durchschnittlich 832 km Höhe und weisen eine Inklination von 98.7° auf. Sie benötigen somit 101.4 Minuten für die Umkreisung der Erde und erreichen nach 26 Tagen ihren Ausgangspunkt. Der Äquator wird zwischen 10.20 und 10.40 UT überflogen.

Mit Hilfe eines ferngesteuerten Spiegels können die beiden HRV-Sensoren in einem Bereich von $\pm 27^\circ$ quer zur Flugrichtung geschwenkt werden. Diese Technik erlaubt die Aufnahme eines beliebigen Gebietes innerhalb eines Streifens von ca. 900 km pro Überflug, was für eine höhere zeitliche Auflösung sowie für Stereo-Auswertungen genutzt werden kann.

So kann ein bestimmtes Gebiet am Äquator sieben Mal innerhalb des Repetitionszyklus von 26 Tagen aufgenommen werden. Auf der geographischen Breite der Schweiz können sogar elf Aufnahmen innerhalb der 26 Tage resultieren. Dies entspricht einer durchschnittlichen zeitlichen Auflösung von 2.4 Tagen bei einem maximalen Intervall von vier Tagen. Beide Instrumente können unabhängig voneinander entweder im panchromatischen Modus (Pan- oder P-Modus) oder im multispektralen Modus (XS-Modus) betrieben werden und besitzen eine Abtastbreite von je 60 km (Tabelle 2). Bei parallelem Betrieb im selben Modus beträgt der seitliche Überlappungsbereich 3 km, was zu einer totalen Abtastbreite von 117 km führt.

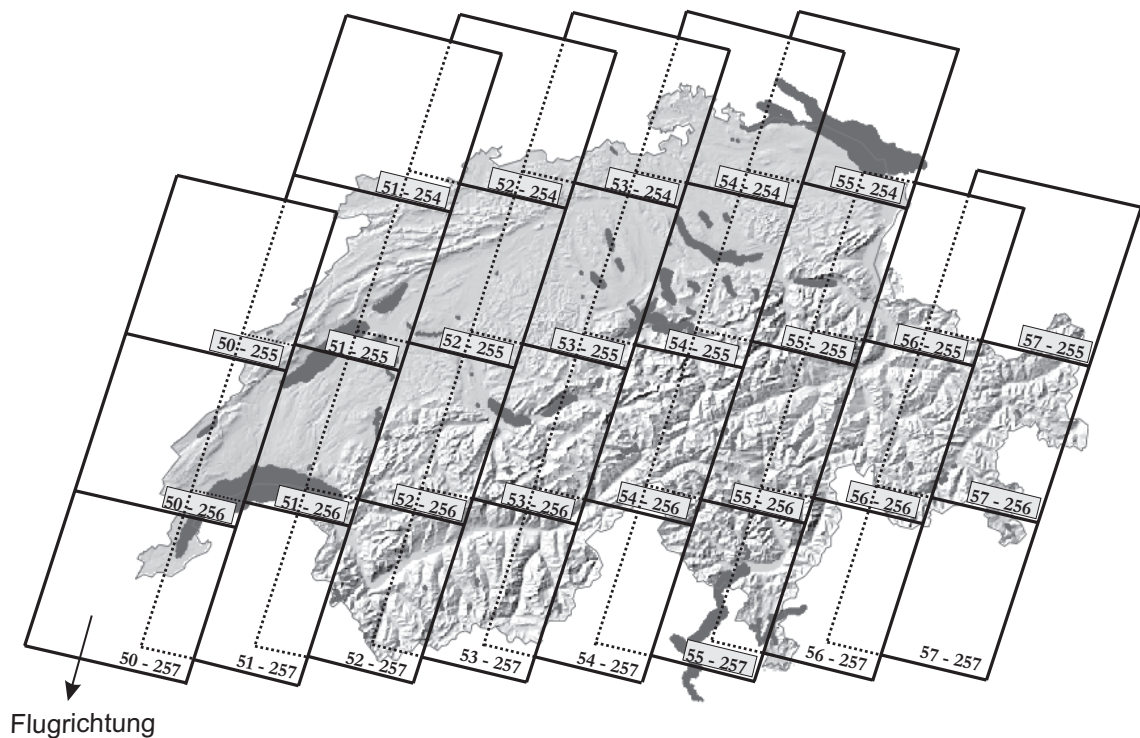
Tabelle 2: HRV Kanalspezifikationen

Kanal	Wellenlänge [µm]	Räumliche Auflösung [m ²]
P	0.51 - 0.73 (Pan)	10 × 10
XS 1	0.50 - 0.59 (VIS, grün)	20 × 20
XS 2	0.61 - 0.68 (VIS, blau)	20 × 20
XS 3	0.79 - 0.89 (NIR)	20 × 20
XS 4 (nur SPOT-4)	1.58 - 1.75 (SWIR)	20 × 20

In Europa werden SPOT-Daten an folgenden Bodenempfangsstationen registriert: Toulouse (Frankreich), Kiruna (Schweden), Fucino (Italien) und Maspalomas (Spanien). Mit Ausnahme von Maspalomas liegt die Schweiz im Empfangsbereich dieser Stationen.

Das Referenzsystem von SPOT besteht wie bei Landsat aus 'tracks' und 'frames' (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2: Das Referenzsystem von SPOT in der Schweiz. Quelle: [49]



2.5 Bestes Aufnahmedatum

Das beste Aufnahmedatum für Satellitendaten ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Zu den wichtigsten zählen:

- die Beleuchtungssituation,
- die spektrale Unterscheidbarkeit der Kategorien.

Je nach Aufgabenstellung und Untersuchungsgebiet muss auch noch die Schneebedeckung bei der Auswahl eines günstigen Aufnahmedatums berücksichtigt werden.

Diese beiden Einflüsse können kaum getrennt voneinander analysiert werden. Die folgenden empirischen Untersuchungen geben deshalb nur einen Hinweis über das beste Aufnahmedatum. Für eine abschliessende Beurteilung sind weiter gehende Untersuchungen notwendig.

2.5.1 Beleuchtungssituation

Die Beleuchtungssituation spielt in der Schweiz eine besondere Rolle. Mit abnehmender Sonnenelevation nehmen auch die Gebiete mit Schlagschatten und schlechter Beleuchtung zu. Durch eine Korrektur der Beleuchtungseffekte können Fehlklassifikationen in diesen Gebieten zwar reduziert, nicht jedoch vermieden werden.

Leiss [46] hat mit Hilfe von TM-Szenen vom April, Mai, Juni, Juli und Oktober 1995 den besten Aufnahmezeitpunkt für eine Landnutzungsklassifikation im Untersuchungsgebiet Yverdon empirisch untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die Genauigkeit der ‘maximum likelihood’-Klassifikationen vom April bis Juli zwischen 78% und 81% variierte, während die Genauigkeit der Oktober-Klassifikation bei 74% lag. Nachdem in der Untersuchung von Dousse [22] mit Hilfe der September-Daten gute Resultate erzielt werden konnten, kann davon ausgegangen werden, dass die Verschlechterung der Klassifikationsgenauigkeit mit den Oktober-Daten auf die schlechten Beleuchtungsverhältnisse zurückzuführen sind.

Bezüglich der Beleuchtungssituation wird deshalb empfohlen, für allgemeine Landnutzungsklassifikationen einen Aufnahmezeitpunkt zwischen April und September zu verwenden.

2.5.2 Spektrale Unterscheidbarkeit

Das beste Aufnahmedatum bezüglich der spektralen Unterscheidbarkeit richtet sich nach der Aufgabenstellung. So kann sich eine Szene bestens zur Unterscheidung gewisser landwirtschaftlicher Kulturen (z.B. Gerste und Weizen) eignen, während dieses Aufnahmedatum keine optimale Erkennung verschiedener Waldmischungsgrade zulässt.

Dousse [22] hat das beste Aufnahmedatum empirisch untersucht. Ihr standen für das Untersuchungsgebiet Yverdon acht Aufnahmen zur Verfügung: je eine TM-Szene für die Monate April bis Oktober 1995 sowie eine Spot XS-Szene des Monats Juli 1995. Die Klassifikation neun verschiedener Kategorien (hauptsächlich landwirtschaftliche Nutzflächen) mit dem ‘maximum likelihood’-Algorithmus zeigte, dass die besten Genauigkeiten mit Hilfe der TM-Daten vom September erzielt werden konnten.

Bezüglich der spektralen Unterscheidbarkeit scheinen sich für landwirtschaftliche Nutzflächen damit Aufnahmen im Zeitraum zwischen April und Oktober zu eignen.

2.6 Verfügbarkeit wolkenarmer Satellitendaten der Schweiz

Die Verfügbarkeit von Satellitendaten bildet eine Grundvoraussetzung für die Satellitenfernerkundung. Sie hängt im Wesentlichen von drei Faktoren ab:

- von einem störungsfreien Betrieb,
- von der zeitlichen Auflösung des Aufnahmesystems und
- im Falle von VIS- und IR-Systemen von der Bewölkungshäufigkeit des Untersuchungsgebietes.

Während die zeitliche Auflösung eines Aufnahmesystems in der Regel konstant ist, kann der Bewölkungsgrad räumlich wie zeitlich stark variieren.

In der Schweiz bildet die Bewölkung den wichtigsten limitierenden Faktor für die Verfügbarkeit von Daten im VIS- und IR-Bereich. Innerhalb des wünschbaren Aufnahmezeitraumes ist es hier nur selten möglich, ein absolut wolkenfreies Satellitenbild zu erhalten. In der Praxis gelangen deshalb häufig teilbewölkte Daten zum Einsatz. Obwohl es statistische Methoden gibt, um das Problem bewölkter Bildteile zu reduzieren [32], [56], wird die Qualität des Resultates dadurch im Allgemeinen beeinträchtigt.

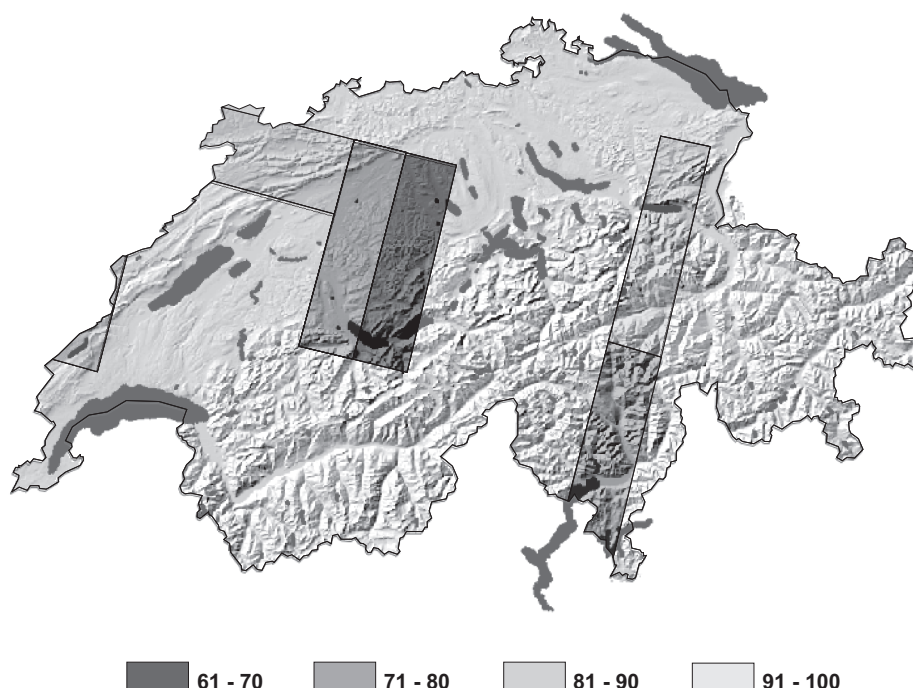
Leiss [46] hat die Verfügbarkeit wolkenarmer Satellitendaten in der Schweiz untersucht. Als Basis für diese Untersuchung dienten die im LEDA-Katalog von Eurimage registrierten Landsat TM-Daten. Aus dieser Datenbank wurden diejenigen Szenen extrahiert, welche die Schweiz abdecken ('track' 193 bis 196 und 'frame' 27 bis 28, vgl. Abbildung 1) und in den Jahren zwischen 1985 und 1996 aufgenommen wurden. Insgesamt standen somit 2834 Szenen zur Verfügung.

Bei der Auswahl geeigneter Daten wurde davon ausgegangen, dass ausschliesslich Viertelszenen zum Einsatz gelangen. Der Entscheid, ob eine Viertelszene für eine Landnutzungsklassifikation geeignet ist, basierte auf folgenden Kriterien:

- Aufnahmezeitpunkt: 1. April bis 31. Oktober,
- Bewölkungsgrad: $< 20\%$,
- Zeitspanne zur letzten Szene: > 20 Tage.

Als Mass zur Quantifizierung der Verfügbarkeit wurde in Anlehnung an Kontoes et al. [39] der Erwartungswert verwendet, mit welchem eine geeignete Szene registriert werden kann. Dieser Schätzwert ergibt sich aus dem prozentualen Anteil der Jahre, aus welchen eine genügende Anzahl Viertelszenen vorliegt. In der Abbildung 3 ist die Verfügbarkeit von mindestens einer wolkenarmen Szene innerhalb eines Jahres dargestellt.

Abbildung 3: Verfügbarkeit von mindestens einer geeigneten Szene (in Prozent)



Die Resultate dieser Auswertung lassen folgende Aussagen zu: Rund 80% der Schweizer Landesfläche lassen sich jährlich mit mindestens einer geeigneten TM Viertelszene abdecken. Die geringste Verfügbarkeit (67%) befindet sich im Gebiet zwischen Sempachersee und Thunersee, welches ausschliesslich vom ‘track’ 195 abgedeckt wird. Dieses Gebiet beinhaltet jedoch weniger als 5% der Landesfläche.

Die Untersuchungen von Leiss [46] haben ausserdem ergeben, dass es durchschnittlich alle drei Jahre (Verfügbarkeit: 33%) gelingt, die gesamte Schweiz mit mindestens zwei geeigneten TM-Datensätzen abzudecken. Am schwierigsten scheint es dabei, Daten über das Gebiet nördlich und südlich des Walensees zu erhalten. Dabei hat sich gezeigt, dass der Überlappungsbereich benachbarter Szenen einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Verfügbarkeit geeigneter Szenen hat. Ausserdem stehen für Gebiete südlich der Alpen sowie für die Genferseeregion mehr geeignete Daten zur Verfügung als für Gebiete nördlich der Alpen. Es wird klar, dass eine multitemporale Auswertung in der Schweiz, welche mindestens drei Szenen innerhalb der Anbauperiode benötigt, mit Landsat-TM allein nicht mehr realisierbar ist. Der Einsatz mehrerer Sensoren ist demzufolge unumgänglich.

2.7 Verwendete Satellitendaten

In der folgenden Tabelle 3 sind sämtliche Satellitendaten zusammengestellt, welche im Rahmen des Projektes beschafft und verwendet wurden. Die ‘Quicklooks’ dieser Szenen sind aus Abbildung 4 in der Heftmitte ersichtlich.

Tabelle 3: Verwendete TM- und XS-Daten

Datum	Sensor	track / frame	Szenentyp	Bewölkung	Enthaltene Untersuchungsgebiete
09.08.90	TM	195 / 027	Vollszene	1-10%	Yverdon, Zug, Rigi, Beckenried
30.06.91	Pan	054 / 255	Vollszene	0%	Zug, Rigi, Beckenried
30.06.91	XS	054 / 255	Vollszene	0%	Zug, Rigi, Beckenried
11.07.91	TM	195 / 027	Vollszene	11-20%	Zug, Rigi, Beckenried
08.04.95	TM	196 / 027	Viertelszene	0%	Yverdon
03.05.95	TM	195 / 027	Viertelszene	1-10%	Yverdon
20.06.95	TM	195 / 027	Viertelszene	0%	Yverdon
19.07.95	XS	050 / 255	Vollszene	0%	Yverdon
22.07.95	TM	195 / 027	Viertelszene	0%	Yverdon
14.08.95	TM	196 / 027	Viertelszene	31-40%	Yverdon
24.09.95	TM	195 / 027	Viertelszene	11-20%	Yverdon
17.10.95	XS	050 / 255	Vollszene	0%	Yverdon
17.10.95	TM	196 / 027	Viertelszene	21-30%	Yverdon

3 Methodik

3.1 Post-Systemkorrektur

3.1.1 Überblick

Die zur Erde übermittelten Satellitendaten sind mit sensorbedingten radiometrischen und geometrischen Fehlern behaftet. Durch die vom Betreiber in der Regel durchgeführte Systemkorrektur wird ein Grossteil dieser Fehler behoben oder zumindest reduziert. Die verbleibenden Artefakte müssen im Rahmen einer Post-Systemkorrektur durch den Benutzer festgestellt und gegebenenfalls korrigiert werden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Qualitätsanalyse der Daten. Auf Grund der unterschiedlichen Sensortechnologien und Systemkorrekturen sind die möglichen Fehler bei TM- und HRV-Daten verschieden und machen eine sensorspezifische Betrachtung notwendig.

Darvishsefat [18] hat die wichtigsten Fehler bei TM-Daten zusammengestellt und analysiert. Zu den wichtigsten geometrischen Fehlern bei TM-Daten zählt Darvishsefat:

- Zeilenverdoppelung,
- Kolonnenverdoppelung,
- Zeilensegmentversatz.

Ausserdem fallen auch folgende radiometrischen Fehler ins Gewicht:

- Lokales Rauschen,
- Kalibrierungs-Restfehler,
- ‘memory’-Effekt.

Ehrler [25] hat sich mit der Qualitätsanalyse von SPOT XS und Pan auseinander gesetzt. Er hat bei HRV-Daten hauptsächlich folgende radiometrische Fehler festgestellt:

- Kalibrierungs-Restfehler,
- Lokales Rauschen.

Im Folgenden wird auf die im Rahmen der Arealstatistik-Projektes untersuchten Fehler eingegangen. Für jeden Einflussparameter erfolgt eine Beschreibung, eine Erklärung seiner Ursachen, eine Abschätzung der Grössenordnung, die Darlegung möglicher Korrekturmethode sowie eine Bewertung im Hinblick auf eine Verbesserung der Landnutzungs-klassifikation.

3.1.2 Zeilenverdoppelung bei TM

In den durch ESRIN systemkorrigierten TM-Daten treten in unregelmässigen Abständen duplizierte Zeilen auf. Diese redundante Information befindet sich in allen Kanälen an der gleichen Stelle und wurde zur Korrektur von Flughöhen- und Fluggeschwindigkeitsänderungen in Bezug auf den IFOV des Sensors eingefügt [24].

Bei der geometrischen Korrektur führen verdoppelte Zeilen zu lokalen Ungenauigkeiten in der Grössenordnung eines Pixels. Im Falle eines regelmässigen Auftretens können sie ohne Weiteres eliminiert werden, da die verwendete geometrische Transformation die dadurch erzeugte Massstabsänderung wieder auszugleichen vermag [46].

Diese Elimination wurde für alle im Projekt verwendeten TM-Szenen durchgeführt.

3.1.3 Verdoppelte Kolonnen und Zeilensegmentversatz bei TM

Die Kolonnenverdoppelung wird bei der Systemkorrektur durch ESRIN aus zwei Gründen durchgeführt: Einerseits werden Erdkrümmung und perspektivische Verzerrung (Panoramaeffekt) kompensiert, andererseits können dadurch auch Schwankungen in der Rotationsgeschwindigkeit des Scan-Spiegels ausgeglichen werden. Dies ist auch der Grund, weshalb die Kolonnenverdoppelung separat innerhalb eines ‘sweeps’ erfolgt [24].

Da die Rotationsgeschwindigkeit des Scan-Spiegels bei der Systemkorrektur nur ungenügend modelliert werden kann, kommt es an den Übergängen zwischen den ‘sweeps’ gelegentlich zu einem Zeilensegmentversatz um ein Pixel [24].

Untersuchungen von Darvishsefat [18] haben gezeigt, dass die verdoppelten Kolonnen nicht aus den Daten entfernt werden dürfen, da bei der geometrischen Korrektur ansonsten signifikante Fehler auftreten. Deshalb wurden die verdoppelten Kolonnen in allen verwendeten TM-Szenen des Projektes belassen.

3.1.4 Lokales Rauschen bei HRV und TM

Lokales Rauschen ist die Folge von Datenübertragungsfehlern, plötzlicher Detektor-saturierung oder anderen elektronischen Problemen. Betroffene Pixel haben einen Grauwert von 0 (im Falle von Datenübertragungsfehlern) oder 255 (im Falle von Saturierung). Bedingt durch die Sensortechnik tritt dieser Fehler bei TM-Daten in Zeilen-, bei XS-Daten in Kolonnenrichtung auf.

Eine Methode zur automatischen Detektion verrauschter Pixel ist die räumliche Korrelation [57]. Dieses Verfahren beruht auf der Erwartung, dass benachbarte Pixel ähnliche Grauwerte aufweisen. Als Ähnlichkeitsmass eignet sich die quadrierte Differenz zwischen benachbarten Zeilen. Mit Hilfe eines Schwellenwertes können verrauschte und nicht verrauschte Pixel voneinander abgegrenzt werden. Diese Methode eignet sich vor allem für Bilder, welche von lokalem Rauschen stark betroffen sind. Damit lässt sich allerdings nicht verhindern, dass teilweise auch unverrauschte Pixel erfasst werden.

Eine andere Möglichkeit stellt die manuelle Bestimmung durch einen Interpreten oder eine Interpretin am Bildschirm dar [46]. Diese Methode ist sehr zuverlässig. Auf Grund des hohen zeitlichen Aufwandes eignet sie sich aber nur dann, wenn die Anzahl verrauschter Pixel nicht allzu gross ist.

Die Störpixel führen zu Fehlern bei der Klassifikation, weshalb eine Korrektur empfohlen wird. In der Regel eignet sich die manuelle Detektion der Störpixel besser als die automatische, da nur wenige Pixel durch diesen Effekt beeinträchtigt sind.

Zur Korrektur der verrauschten Pixel eignet sich ein Medianfilter. Die Fenstergrösse muss dabei der Anzahl betroffenen Pixel angepasst werden. Bei TM eignen sich beispielsweise Fenster von 1×3 , 1×5 oder 1×7 , bei HRV von 3×1 , 5×1 oder 7×1 .

In den im Projekt verwendeten Daten konnte nach der Systemkorrektur nur in der TM-Szene vom 08.04.95 lokales Rauschen im Untersuchungsgebiet festgestellt werden. Dieses wurde mit der beschriebenen Methode korrigiert. In allen anderen HRV- und TM-Daten erübrigte sich diese Korrektur [46].

3.1.5 Kalibrierungsrestfehler bei HRV

‘Striping’ entsteht bei HRV-Daten auf Grund der unterschiedlichen Kalibrierung der 1728 Detektoren innerhalb eines ‘arrays’ und zeichnet sich durch eine Streifung in Kolonnenrichtung aus. Die Beeinträchtigung liegt nach der Systemkorrektur im Bereich von ein bis zwei Grauwerte [25].

Mittels einer morphologischen Filterung nach Banon et al. [4] kann das ‘striping’ sowohl bei Level 1A-, als auch bei Level 1B-Daten wirksam korrigiert werden [42]. Die Anwendung dieser Korrekturmethode bewirkte bei den untersuchten XS-Daten keine signifikante Klassifikationsverbesserung, weshalb für eine operationelle Anwendung darauf verzichtet werden kann [46]. Im Rahmen des Projektes wurde das ‘striping’ nur in der XS- und Pan-Szene vom 30.06.91 korrigiert [25].

Durch die unterschiedliche Kalibrierung zwischen den vier Arrays kommt es an den Übergängen zu einer Art ‘banding’. Ehrler [25] hat festgestellt, dass die durch diesen Fehler hervorgerufenen Variationen nach erfolgter Systemkorrektur ein bis zwei Grauwerte betragen. Für diesen Effekt gibt es kaum eine Korrekturmöglichkeit. Da die Grössenordnung des Fehlers jedoch im Bereich des ‘stripings’ liegt, kann davon ausgegangen werden, dass die Vernachlässigung sich nicht entscheidend auf das Klassifikationsresultat auswirkt.

3.1.6 Kalibrierungsrestfehler bei TM

Die ungleiche Kalibrierung der einzelnen Detektoren untereinander wird bei TM-Daten innerhalb der 16 Detektorelemente eines ‘sweeps’ sichtbar. Dieser Fehler kann durch die Systemkorrektur nicht vollständig entfernt werden und äussert sich im Bild durch eine Streifung in Zeilenrichtung (‘striping’) [48], [28].

Darvishsefat [18] hat festgestellt, dass nach der Systemkorrektur die Unterschiede zwischen den Zeilenmittelwerten weniger als ein Grauwert betragen. Eine Korrektur dieses Fehlers kann demzufolge nicht zur Verbesserung einer Klassifikation beitragen, weshalb für operationelle Anwendungen darauf verzichtet werden kann.

Aus diesem Grunde wurde bei den verwendeten TM-Daten auf eine Korrektur des ‘stripings’ generell verzichtet.

Durch die ungleiche Kalibrierung der 16 Detektoren während der Vor- und Rückwärtsbewegung kommt es ausserdem zu einem ‘banding’ zwischen den ‘sweeps’, welches auch nach erfolgter Systemkorrektur noch sichtbar ist [48].

Zur Korrektur des ‘bandings’ hat sich die Summenhistogrammgenerierung jeder Bildzeile und das anschliessende Ersetzen von Grauwerten mit Abweichungen von mehr als zwei Messwerten bewährt [60]. Da diese Korrektur jedoch nur in den TM-Kanälen 1 und 5 sinn-

voll ist [18], und auch bei deren Vornahme keine Verbesserung einer digitalen Klassifikation nachgewiesen werden kann, muss dieser Fehler für operationelle Anwendungen nicht korrigiert werden.

Eine Korrektur des ‘bandings’ wurde bei keiner der verwendeten TM-Szenen durchgeführt.

3.1.7 ‘Memory’-Effekte bei HRV und TM

Tastet der Sensor während einer gewissen Zeit stark reflektierende Gebiete ab (wie Schnee, Eis oder Wolken) und trifft dann auf Gebiete mit geringer Reflexion (wie Gewässer), kann es zu einem so genannten ‘memory’-Effekt kommen: Das gemessene Signal liegt dann bis zu vier Grauwerte zu hoch und benötigt eine gewisse Zeit (bei TM beispielsweise bis zu 1000 Pixel), um sich wieder zu normalisieren. Dieser Effekt führt zu einem lokalen ‘banding’ von maximal 16 Zeilen [28], [48].

Der ‘memory’-Effekt tritt, in sehr geringem Masse, auch in den verwendeten Daten im Randbereich von Wolken, Schnee und Gewässer auf. Sein Einfluss auf die Grauwerte ist jedoch zu klein, um Klassifikationsfehler bewirken zu können, weshalb bei operationellen Anwendungen keine Korrektur notwendig ist.

Im Rahmen des Projektes wurde der ‘memory’-Effekt in keinem der Datensätze korrigiert.

3.2 Geometrische Korrektur

3.2.1 Überblick

Durch die geometrische Korrektur sollen Fernerkundungsdaten orthogonal auf eine horizontale Referenzebene projiziert werden [6]. In den letzten Jahren hat die Bedeutung der geometrischen Korrektur stark zugenommen. Folgende Faktoren sind dafür verantwortlich [57]:

- die zunehmende Komplexität der Fernerkundungssysteme (z.B. schwenkbare Spiegel, unterschiedliche räumliche Auflösung),
- das steigende Interesse an multisensoraler Bildverarbeitung,
- die steigende Nachfrage nach Präzision, zeitlicher Auflösung und Wiederholbarkeit bei Fernerkundungsmessungen.

Durch die immer häufiger werdende kombinierte Auswertung multitemporaler und multisensoraler Szenen erhält die geometrische Korrektur eine noch grössere Bedeutung.

Im Zusammenhang mit der geometrischen Korrektur von Bilddaten werden verschiedene Begriffe verwendet [57]:

- *Registrierung*
Die Anpassung eines Bildes an ein anderes Bild des gleichen Gebietes.
- *Rektifizierung oder Georeferenzierung*
Die Anpassung eines Bildes an eine Karte.

- *Geokodierung*

Spezialfall der Rektifizierung, welche die Skalierung zu einer Standardpixelgrösse beinhaltet. Dadurch wird die Auswertung von Rasterdaten verschiedener Quellen in einem GIS erleichtert.

- *Orthorektifizierung*

Korrektur des Bildes unter Berücksichtigung der topografiebedingten Verzerrungen, so dass das Bild in einer orthogonalen Projektion vorliegt.

Der Einfluss der Geländehöhe auf die Genauigkeit der geometrischen Korrektur wurde bereits in verschiedenen Arbeiten aufgezeigt [38], [64]. Bei multitemporalen Szenen in mittleren und hohen Breiten erhält dieser Aspekt zusätzliche Bedeutung. In diesen Gebieten werden häufig Aufnahmen verschiedener ‘tracks’ verwendet. Die komplementäre Sichtweise des Geländes hat zur Folge, dass bereits bei geringen Höhenunterschieden Parallaxen von über einem Pixel auftreten können. Auf Grund der resultierenden Mischsignaturen wäre eine multitemporale Auswertung stark erschwert. Im Arealstatistik-Projekt wurde deshalb von Beginn weg eine Orthorektifizierung der Satellitendaten angestrebt.

Es gibt zwei Ansätze für die geometrische Korrektur von Bildern:

- parametrischer Ansatz,
- empirischer (nicht-parametrischer) Ansatz.

Beim parametrischen Verfahren wird versucht, die Aufnahmesituation analytisch auf der Grundlage der Kollinearität von Bild- und Objektgeraden zu beschreiben. Dazu können neben den Parametern der äusseren Orientierung (Querneigung, Längsneigung, Kantung, Koordinaten des Projektionszentrums) auch noch spezielle Sensorparameter miteinflussen [24]. Parametrische Verfahren sind besonders nützlich zur Orthorektifizierung von Szenen in kontrastarmen oder kartografisch schlecht dokumentierten Gebieten. Die notwendigen Parameter für die exakte Modellierung können jedoch von den Satellitenbetreibern häufig nicht oder nur mit zu ungenauer Präzision und ungenügender zeitlicher Auflösung geliefert werden [9]. Sie müssen deshalb in der Regel mit Hilfe einiger weniger Passpunkte geschätzt werden [27], [34], [63].

Beim empirischen Verfahren werden die geometrischen Verhältnisse erfasst, ohne den Abbildungsvorgang zu kennen. Dabei wird mittels Passpunkte eine numerische Transformation der Bilddaten auf die Referenzgeometrie bestimmt [24]. Zu den wichtigsten Transformationen zählen die Helmerttransformation, die Affintransformation und Transformationen mit Polynomen 2. und 3. Grades. In der Praxis wird meistens die Affintransformation bevorzugt. Die innere Bildgeometrie wird dabei nicht verzerrt, und sie erlaubt die Einführung unterschiedlicher Massstäbe und Rotationswinkel in x- und y-Richtung. Lokale Verzerrungen im Originalbild können damit vermindert werden. Diese Methode ist einfach zu handhaben und lässt sich unabhängig vom verwendeten Sensor einsetzen. Für Satellitenbilder eignet sich der empirische Ansatz besonders gut, da die Flugbahn relativ stabil und die Geländehöhenunterschiede im Verhältnis zur Flughöhe sehr klein sind [41]. Auch beim empirischen Verfahren lässt sich die Genauigkeit durch die Berücksichtigung der Geländehöhe zusätzlich verbessern [38].

Im Rahmen des Arealstatistik-Projektes wurden sowohl die empirische Orthorektifizierung als auch die parametrische Orthorektifizierung untersucht. Im Folgenden wird auf die theoretischen Grundlagen und die praktische Durchführung eingegangen. Abschliessend werden die erzielten Resultate bewertet.

3.2.2 Bestimmung von Passpunkten

Passpunkte werden für die Bestimmung der unbekannten Parameter bei der geometrischen Korrektur benötigt. Ihre Genauigkeit beeinflusst die Qualität der Orthorektifizierung entscheidend, weshalb der Aufwand für deren Bestimmung den Genauigkeitsanforderungen angepasst sein muss. Passpunkte sollten folgende Eigenschaften aufweisen:

- kleine Ausdehnung,
- hoher Kontrast in den Bilddaten,
- keine Generalisierung in der Karte,
- möglichst unveränderlich in der Zeit.

Für TM- und XS-Daten haben sich folgende Objekte als geeignet erwiesen:

- Kreuzungen von Strassen 4. oder 5. Klasse,
- Brücken,
- allein stehende Gebäude.

Die Bildkoordinaten der Passpunkte wurden am Bildschirm basierend auf einer Falschfarbeninfrarot-Darstellung (NIR/Rot/Grün als RGB) bestimmt. Die Bestimmung der Kartenkoordinaten kann je nach Informationsgrundlage auf verschiedene Arten erfolgen. Zu den häufigsten Varianten zählen:

- Karten in analoger Form,
- orthorektifizierte digitale Bilder oder Karten,
- orthorektifizierte digitale Vektoren,
- Passpunkt-Datenbank.

Im Arealstatistik-Projekt wurden die Kartenkoordinaten und Geländehöhen sämtlicher Passpunkte aus der Landeskarte im Massstab 1:25'000 bestimmt. Für das Herauslesen der Koordinaten wurde zu diesem Zweck ein spezieller Lupenmassstab verwendet.

Bei der Bestimmung der Passpunkte kann es zu folgenden Ungenauigkeiten kommen:

- ungenaue Bildkoordinatenbestimmung,
- ungenaue Kartenkoordinatenbestimmung,
- ungenaue Geländehöhenbestimmung,
- nicht-lineare lokale Verzerrungen im Bild,
- ungenaue Kartengrundlage (z.B. durch Generalisierung).

Diese Ungenauigkeiten führen in der Regel zu hohen Residuen der Passpunkte und sollten bereinigt werden. Fehler bei der Bestimmung der Bildkoordinaten, Kartenkoordinaten und Geländehöhe können korrigiert werden. Bei nicht-linearen Verzerrungen und ungenauer Kartengrundlage empfiehlt sich ein Ausschluss des betroffenen Passpunktes aus der Modellberechnung [46].

3.2.3 Resampling

Bei der geometrischen Korrektur wird ausgehend vom korrigierten Bild die Position eines Pixels im unkorrigierten Datensatz berechnet (Rückwärtstransformation). Dazu werden die Parameter des geometrischen Modells verwendet. Die aus der Transformation resultierenden Bildkoordinaten fallen in der Regel nicht exakt auf die ganzzahligen Pixelpositionen. Für die Verarbeitung von Rasterdaten ist daher ein ‘resampling’ bei der Orthorektifizierung unumgänglich. Die in der Fernerkundung am häufigsten verwendeten ‘resampling’-Verfahren sind [57]:

- nächster Nachbar (‘nearest neighbour’),
- bilineare Interpolation (‘bilinear’),
- dreidimensionale Faltung (‘cubic convolution’).

Welches dieser konventionellen ‘resampling’-Verfahren sich am besten für eine anschliessende digitale Klassifikation eignet, ist umstritten. Itten [35] bevorzugt das ‘nearest neighbour’-Verfahren, weil dadurch keine neuen, künstlichen Grauwerten im orthorektifizierten Bild geschaffen werden. Dikshit et al. [21] haben bei einer empirischen Untersuchung mit Hilfe der bilinearen Interpolation die besten Klassifikationsergebnisse erzielt. Pratt [52] schliesslich weist darauf hin, dass die zweidimensionale Empfindlichkeitsvariabilität der Sensordetektoren am besten durch das ‘cubic convolution’-Verfahren modelliert werden kann.

Basierend auf den Untersuchungen von Dikshit et al. [21] und eigenen Tests wird für Klassifikationsanwendungen die bilineare Interpolation empfohlen.

3.2.4 Empirische Orthorektifizierung

Die im Rahmen des Projektes durchgeführte empirische Orthorektifizierung wurde ursprünglich von Bitter [7] für optische Satellitendaten entwickelt. Kellenberger [37] hat dieses Verfahren durch die zusätzliche Berücksichtigung der Erdkrümmung weiterentwickelt.

Das Verfahren basiert auf einer Affintransformation. Diese lineare Abbildung besitzt sechs Unbekannte und kann Translationen, Rotationen und Massstabsänderungen unabhängig von der x- und y-Richtung ausführen. Der reliefbedingte Lageversatz wird korrigiert, indem die zentralperspektivische Zeileninformation anhand eines Korrekturvektors in eine Orthogonalprojektion überführt wird. Dies geschieht einerseits bei jedem Passpunkt, damit die Berechnung der Transformationskoeffizienten nicht von Reliefverzerrungen negativ beeinflusst wird. Andererseits wird dieser Korrekturvektor auch bei der eigentlichen Transformation jedes einzelnen Bildelementes angewendet.

Für dieses Verfahren werden folgende Parameter benötigt:

- Radius der Erde,
- Flughöhe des Satelliten,
- Blickwinkel,
- IFOV,
- Pixelkoordinaten der Nadirlinie.

Die Tabelle 4 gibt einen Überblick über die im Rahmen des Projektes durchgeführten empirischen Orthorektifizierungen. Die Residuen sollten nicht als Mass für die Genauigkeit der geometrischen Korrektur verwendet werden.

Tabelle 4: Überblick über die durchgeführten Orthorektifizierungen

Datum	Sensor	Untersuchungsgebiet	Passpunkte		Durchschnittlicher RMSE [m]		Gelände-modell	Resampling
			definiert	verwendet	in x	in y		
09.08.90	TM	Yverdon	77	51	10.0	9.3	DHM25	nearest neighbour, 25m
30.06.91	Pan	Zug, Rigi, Beckenried	130	85	4.0	4.5	DHM25	nearest neighbour, 10m
30.06.91	XS	Zug, Rigi, Beckenried	90	72	7.0	7.6	DHM25	nearest neighbour, 10m
11.07.91	TM	Zug, Rigi, Beckenried	190	130	8.6	6.7	DHM25	nearest neighbour, 10m

Ehrler [25] hat die Lagegenauigkeit der empirischen Orthorektifizierung mittels eines GIS-Ansatzes überprüft. Dabei resultierte für die TM-Szene vom 11.07.91 ein mittlerer Lagefehler von ca. 12m, für die Pan- und XS-Szenen vom 30.06.91 ein mittlerer Lagefehler von 6m [25].

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit der empirischen Orthorektifizierung die Anforderungen der Schweizerischen Arealstatistik erfüllt werden können. Als Nachteil der Methode erweist sich die Notwendigkeit einer grossen Anzahl von Passpunkten, insbesondere weil deren Bestimmung zeitintensiv ist. Ausserdem kann die erforderliche gute räumliche Verteilung der Passpunkte nicht immer gewährleistet werden.

3.2.5 Parametrische Orthorektifizierung

Die verwendete parametrische Orthorektifizierung wurde von Toutin ursprünglich für SPOT HRV entwickelt [30], [63] und später für Landsat TM [50], für MOS MESSR und Seasat SAR [65] sowie für flugzeuggestützte SAR-Systeme [66] getestet. Das Verfahren lässt sich für verschiedene Sensoren anwenden, weil es auf dem Kollinearitätsprinzip beruht und die verschiedenen Verzerrungen relativ zur globalen Aufnahmegeometrie berücksichtigt. Es sind dies [67]:

- Verzerrungen in Bezug zur Plattform (Position, Geschwindigkeit, Orientierung),
- Verzerrungen in Bezug zum Sensor (Blickwinkel, IFOV, Integrationszeit einer Zeile),
- Verzerrungen in Bezug zur Erde (Geoid – Ellipsoid unter Berücksichtigung der Geländehöhe),
- Verzerrungen in Bezug zur kartografischen Projektion (Ellipsoid – kartografische Referenzebene).

Fluglage- und Orbitdaten sowie einige Passpunkte bilden die Voraussetzung für dieses Modell. Die Fluglagedaten beinhalten für jede Zeile die Veränderung der Winkelgeschwindigkeit entlang den drei Achsen in Bezug zum Boden. Die Orbitdaten definieren die geometrischen Parameter des Sensors und seiner Plattform. Für SPOT HRV sind dies beispielsweise [67]:

- Momentanes Gesichtsfeld (IFOV),
- Blickwinkel,
- Integrationszeit des Detektorsignals,
- Radialgeschwindigkeit,
- Winkelgeschwindigkeit,
- Distanz zwischen Erdmittelpunkt und Satellitenplattform,
- Flughöhe des Satelliten,
- Inklination des Orbits,
- geographische Länge des Äquatorüberfluges von der Süd- zur Nordhemisphäre ('ascending node longitude'),
- geographische Breite der Satellitenposition auf der Orbitebene in Bezug auf den 'ascending node' ('satellite argument'),
- Pixelkoordinaten des Bildzentrums,
- geographische Koordinaten des Bildzentrums.

In der Regel werden die für die Orthorektifizierung notwendigen Fluglage- und Orbitdaten direkt von den Headerdaten des Datenträgers (CD oder Magnetband) gelesen [51]. Gelegentlich sind die Orbitinformationen im Header des Datenträgers jedoch fehlerhaft oder unvollständig und müssen mit Hilfe entsprechender Nominalwerte korrigiert werden [45]. Selbst wenn Orbitdaten nicht verfügbar sind, scheint die Anwendung von Nominalwerten unproblematisch zu sein.

In der Tabelle 5 sind die im Rahmen des Projektes durchgeführten parametrischen Orthorektifizierungen zusammengestellt. Die Residuen sind im Gegensatz zum empirischen Ansatz ein guter Indikator für die Genauigkeit der geometrischen Korrektur.

Tabelle 5: Überblick über die durchgeführten parametrischen Orthorektifizierungen

Datum	Sensor	Untersuchungsgebiet	Passpunkte		Durchschnittlicher RMSE [m]		Gelände-modell	Resampling
			definiert	verwendet	in x	in y		
08.04.95	TM	Yverdon	79	65	8.9	9.4	DHM25	bilinear, 25m
03.05.95	TM	Yverdon	76	63	9.6	5.7	DHM25	bilinear, 25m
20.06.95	TM	Yverdon	82	65	10.6	6.7	DHM25	bilinear, 25m
22.07.95	TM	Yverdon	105	82	9.8	8.1	DHM25	bilinear, 25m
14.08.95	TM	Yverdon	65	60	10.5	5.6	DHM25	bilinear, 25m
24.09.95	TM	Yverdon	74	60	7.9	9.0	DHM25	bilinear, 25m
17.10.95	TM	Yverdon	76	64	11.5	8.9	DHM25	bilinear, 25m
19.07.95	XS	Yverdon	96	87	6.3	5.5	DHM25	bilinear, 25m
17.10.95	XS	Yverdon	76	62	5.9	5.6	DHM25	bilinear, 25m

Der durchschnittliche RMSE der verwendeten Passpunkte lag bei den sieben TM-Szenen im Bereich von 0.4 bis 0.5 Pixel, bei den beiden XS-Szenen bei 0.4 Pixel. Eine Überlagerung digitalisierter Feldgrenzen zeigte ausserdem, dass weder bei den TM- noch bei den XS-Daten eine systematische Abweichung lokalisiert werden kann. Bei TM führten die verdoppelten Kolonnen allerdings zu sichtbaren lokalen Verzerrungen [46].

Die parametrische Orthorektifizierung erfüllt damit die Anforderungen der Schweizerischen Arealstatistik bezüglich geometrischer Genauigkeit. Als besonderer Vorteil kann gewertet werden, dass die Methode bereits mit acht bis zehn Passpunkte zu Genauigkeiten im Subpixelbereich führt. Damit kann der Zeitaufwand für die Bestimmung der Passpunkte im Vergleich zum empirischen Ansatz reduziert werden. Aus diesem Grunde sollte der parametrische Ansatz der empirischen Orthorektifizierung vorgezogen werden.

3.3 Radiometrische Korrektur

3.3.1 Überblick

Satellitendaten verschiedener Sensoren und verschiedener Aufnahmezeitpunkte können nicht direkt miteinander verglichen werden. Sie unterliegen unter anderem dem Einfluss der Sensorkalibrierung, der Sonnenposition sowie atmosphärischer und topografischer Effekte. Mit Hilfe der radiometrischen Korrektur können die objektspezifischen Einflüsse jedoch reduziert und gleichzeitig die Daten in vergleichbare physikalische Grössen umgewandelt werden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von radiometrischer Kalibrierung [57]. Damit kann bis zu einem gewissen Grad erreicht werden, dass die Satellitendaten nur noch objektspezifische Reflexionseigenschaften beinhalten.

Bei der radiometrischen Korrektur können drei verschiedene Schritte unterschieden werden (Abbildung 5, Seite 36).

Im ersten Schritt werden die Grauwerte des Sensors in gemessene Strahlung ('at-sensor radiance') konvertiert. Dazu werden Informationen über die Sensorkalibrierung benötigt.

Im zweiten Schritt wird die 'at-sensor radiance' in Strahlungswerte auf dem Boden ('surface radiance') transformiert. Diese Konvertierung ist bedeutend schwieriger, da dabei Information über die atmosphärischen Bedingungen während der Aufnahme benötigt wird. Bei operationellen Anwendungen kann die Verfügbarkeit dieser Information nicht unbedingt vorausgesetzt werden.

Eine einfache und häufig verwendete Methode zur atmosphärischen Korrektur benutzt dunkle Objekte im Bild als Kalibrierungsobjekt [1], [15]. Dabei wird angenommen, dass die dunkelsten Objekte in einem Kanal eine Reflexion von null besitzen, so dass jede gemessene Strahlung über null die Folge von atmosphärischen Streueffekten ist. Um diese Effekte zu reduzieren, werden die Grauwerte der dunklen Objekte aller Pixel im jeweiligen Kanal subtrahiert ('dark object subtraction'). Die Problematik dieser Methode liegt in der Bestimmung geeigneter dunkler Objekte im Bild sowie in der Annahme, dass deren Reflexion gleich null ist. Ausserdem wird bei diesem Ansatz die Durchlässigkeit der Atmosphäre ('path transmittance') vernachlässigt, welche vor allem im NIR- und SWIR-Bereich wichtig ist.

Abbildung 7 rechts oben:

Waldmischungsgrad im Untersuchungsgebiet Beckenried

- Legende:
- 1: Laubwald (hellgrün)
 - 2: Mischwald (grün)
 - 3: Nadelwald (dunkelgrün)
 - 0: Nichtwald (farblos)

Abbildung 8 rechts unten:

Landnutzung I im Untersuchungsgebiet Yverdon (monotemporal)

- Legende:
- 1: Laubwald (hellgrün)
 - 2: Mischwald (grün)
 - 3: Nadelwald (dunkelgrün)
 - 4: Industrieflächen (violett)
 - 5: Gebäude (rot)
 - 6: Rebbauf Flächen (rosa)
 - 7: Landwirtschaftliche Nutzflächen 1 (hellgelb)
 - 8: Landwirtschaftliche Nutzflächen 2 (dunkelgelb)
 - 9: Landwirtschaftliche Nutzflächen 3 (braun)
 - 10: Landwirtschaftliche Nutzflächen 4 (dunkelbraun)
 - 11: Alpwirtschaftliche Nutzflächen (olivgrün)
 - 12: stehende Gewässer (blau)
 - 0: Nullkategorie (farblos)

Abbildung 4 auf der nächsten Doppelseite, links:

‘Quicklooks’ der im Rahmen des Projekts verwendeten Landsat-TM und SPOT-Szenen

(auf die Reproduktion der SPOT Pan-Szene vom 30.06.91 wurde aus nahe liegenden Gründen verzichtet; siehe XS vom selben Ort und Zeitpunkt). Die Szenen wurden in vergleichbarem Massstab abgebildet. Deshalb sind die Bildausschnitte unterschiedlich gross: eine Landsat TM ‘full scene’ deckt ungefähr 185x185km² ab, eine Landsat-TM ‘quarter scene’ 95x95km² und eine SPOT-Szene 60x60km².

Linke Seite:	oben	Landsat-TM 195 / 027	Vollszene vom 9. August 1990
	Mitte rechts	SPOT-XS 054 / 255	Vollszene vom 30. Juni 1991
	unten	Landsat-TM 195 / 027	Vollszene vom 11. Juli 1991

Abbildung 7: Waldmischungsgrad

Figure 7: Degrees of forest mixture

Beckenried

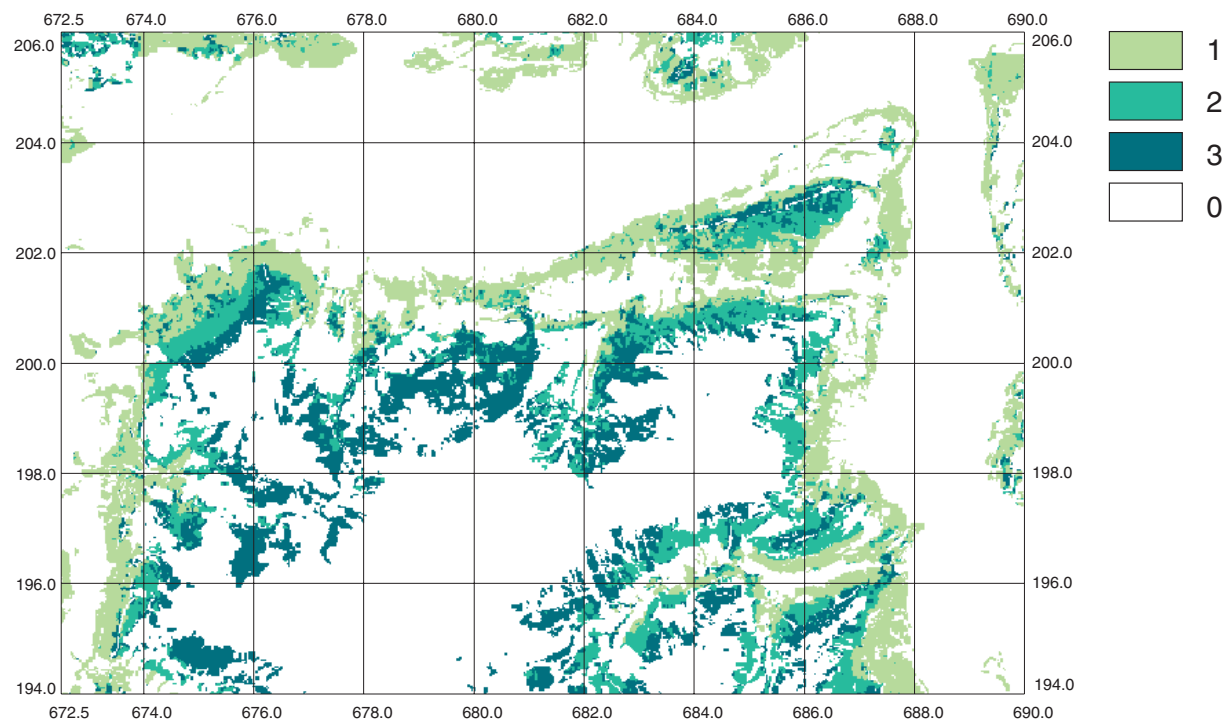


Abbildung 8: Landnutzung I

Figure 8: Land use I

Yverdon

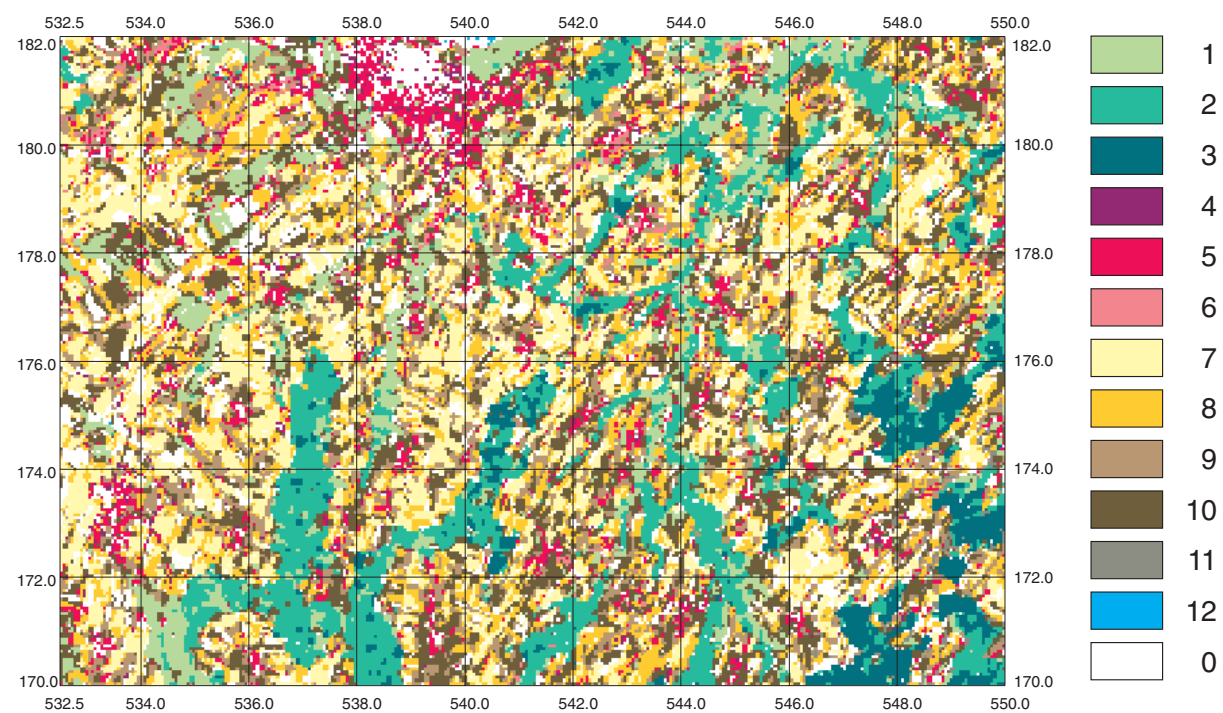
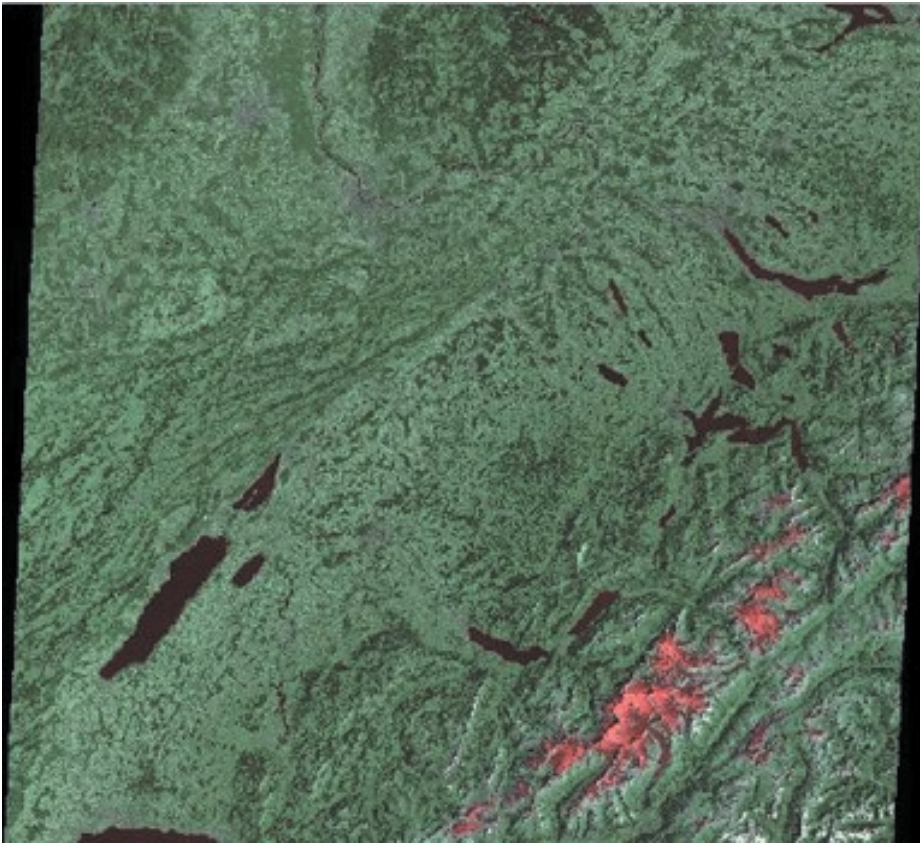


Abbildung 4: 'Quicklooks' der im Rahmen des Projekts verwendeten Landsat-TM und SPOT-Satellitenszenen

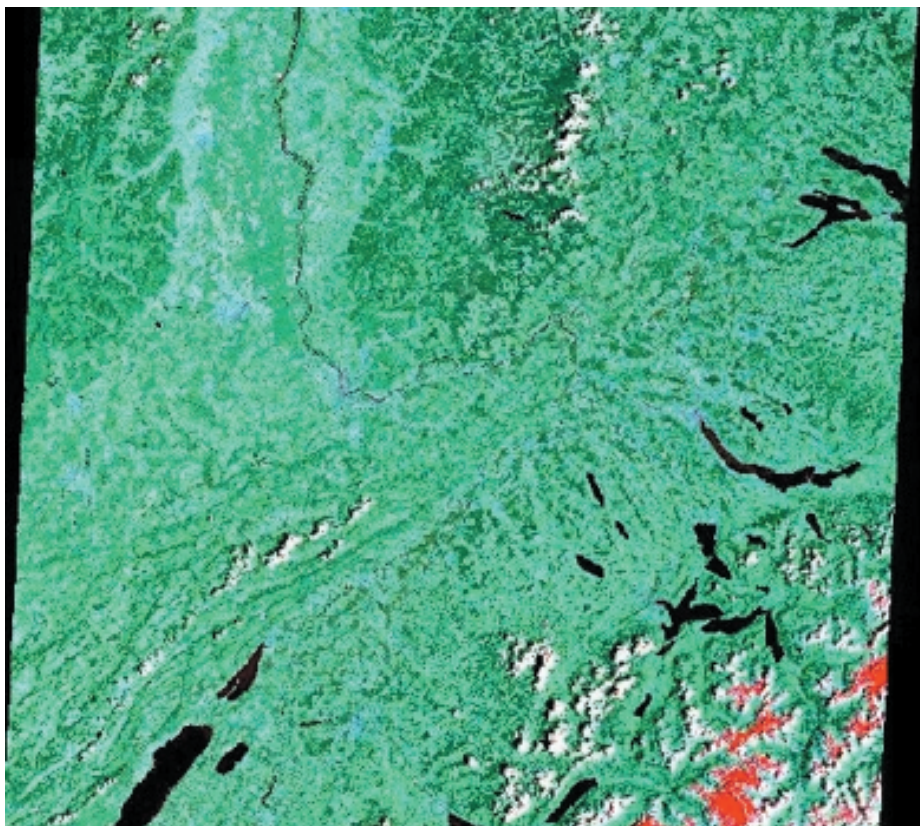
Figure 4: Quicklooks of Landsat TM and SPOT satellite scenes used in the project



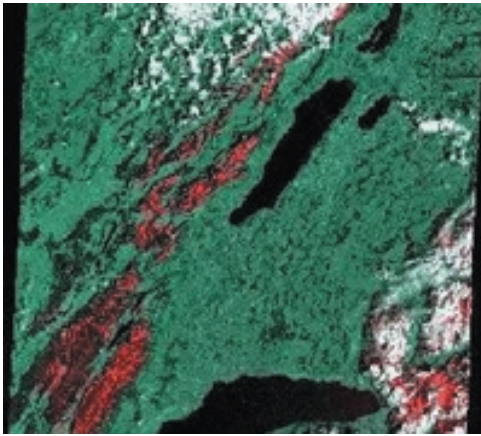
Landsat TM
195/027
9-8-1990



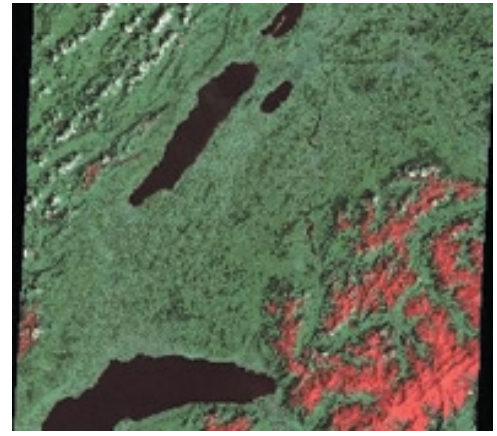
SPOT
054/255
30-6-1991



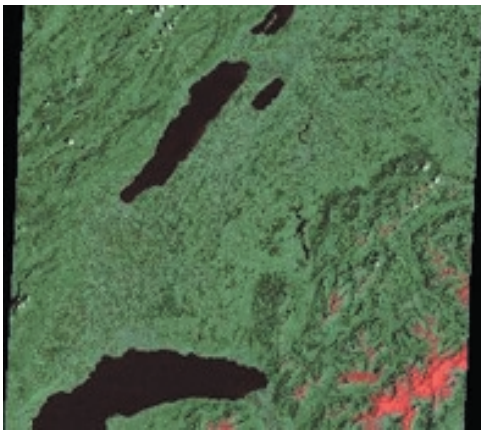
Landsat TM
195/027
11-7-1991



Landsat TM
196/027 SE
8-4-1995



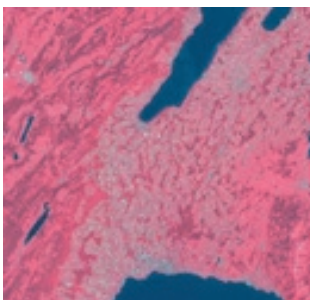
Landsat TM
195/027 SW
3-5-1995



Landsat TM
195/027 SW
20-6-1995



Landsat TM
195/027 SW
22-7-1995



SPOT
050/255
19-7-1995



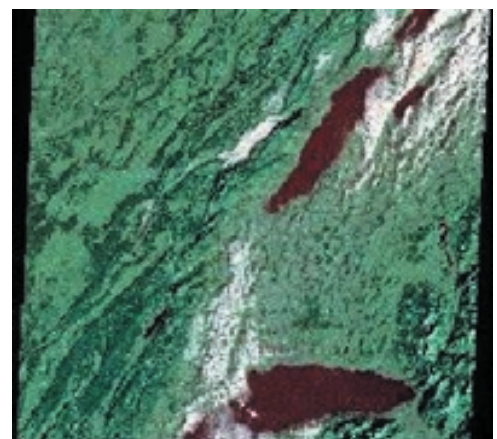
SPOT
050/255
17-10-1995



Landsat TM
196/027 SE
14-8-1995



Landsat TM
195/027 SW
24-9-1995



Landsat TM
196/027 SE
17-10-1995

Abbildung 9: Landnutzung II

Figure 9: Land use II

Yverdon

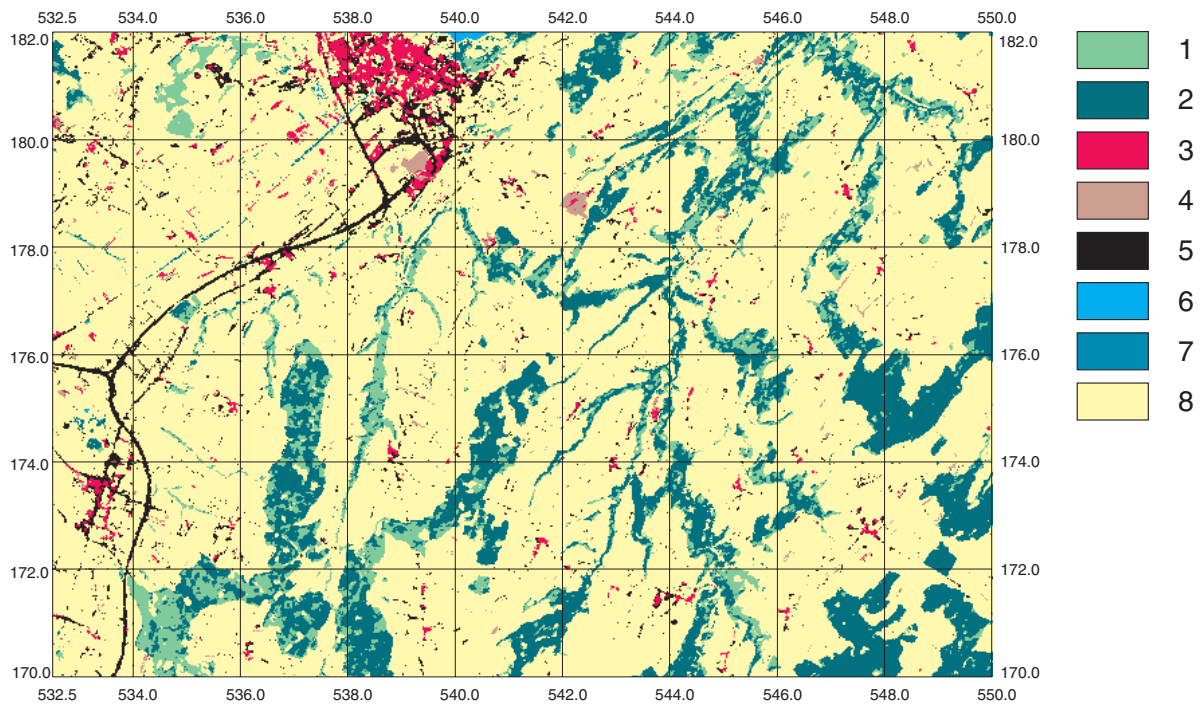


Abbildung 10: Landwirtschaftliche Kulturen

Figure 10: Agricultural cultivation

Yverdon

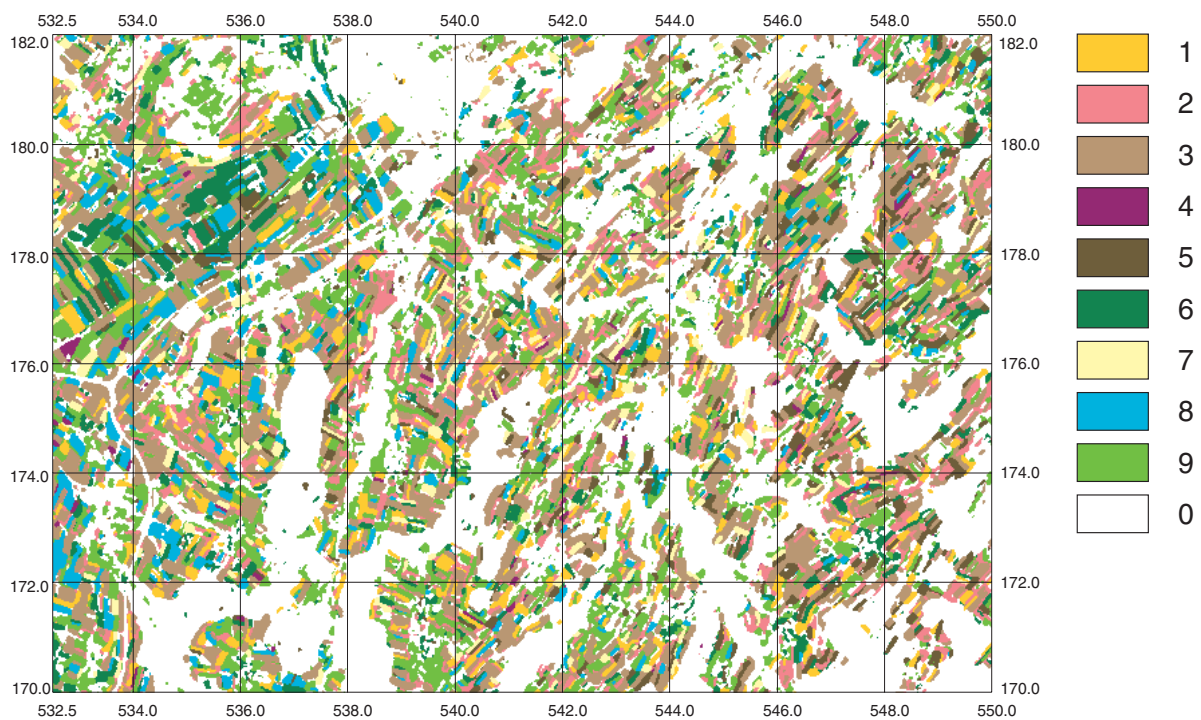


Abbildung 9 links oben:

Landnutzung II im Untersuchungsgebiet Yverdon (multitemporal)

- Legende:
- 1: Laubwald (grün)
 - 2: Nadelwald (dunkelgrün)
 - 3: Siedlungsflächen (rot)
 - 4: Baustellen, vegetationslose Flächen (braunrosa)
 - 5: Verkehrsflächen (schwarz)
 - 6: Stehende Gewässer (blau)
 - 7: Fliessende Gewässer (dunkelblau)
 - 8: Landwirtschaftliche Nutzfläche (hellgelb)

Abbildung 10 links unten:

Landwirtschaftliche Kulturen im Untersuchungsgebiet Yverdon

- Legende:
- 1: Gerste (dunkelgelb)
 - 2: Roggen (rosa)
 - 3: Weizen (braun)
 - 4: Erbsen (violett)
 - 5: Kartoffeln (dunkelbraun)
 - 6: Mais (dunkelgrün)
 - 7: Raps (hellgelb)
 - 8: Zuckerrüben (türkisblau)
 - 9: Kunstwiesen (hellgrün)
 - 0: andere (farblos)

Abbildung 4 auf der vorgehenden Doppelseite, rechts:

‘Quicklooks’ der im Rahmen des Projekts verwendeten Landsat-TM und SPOT-Szenen

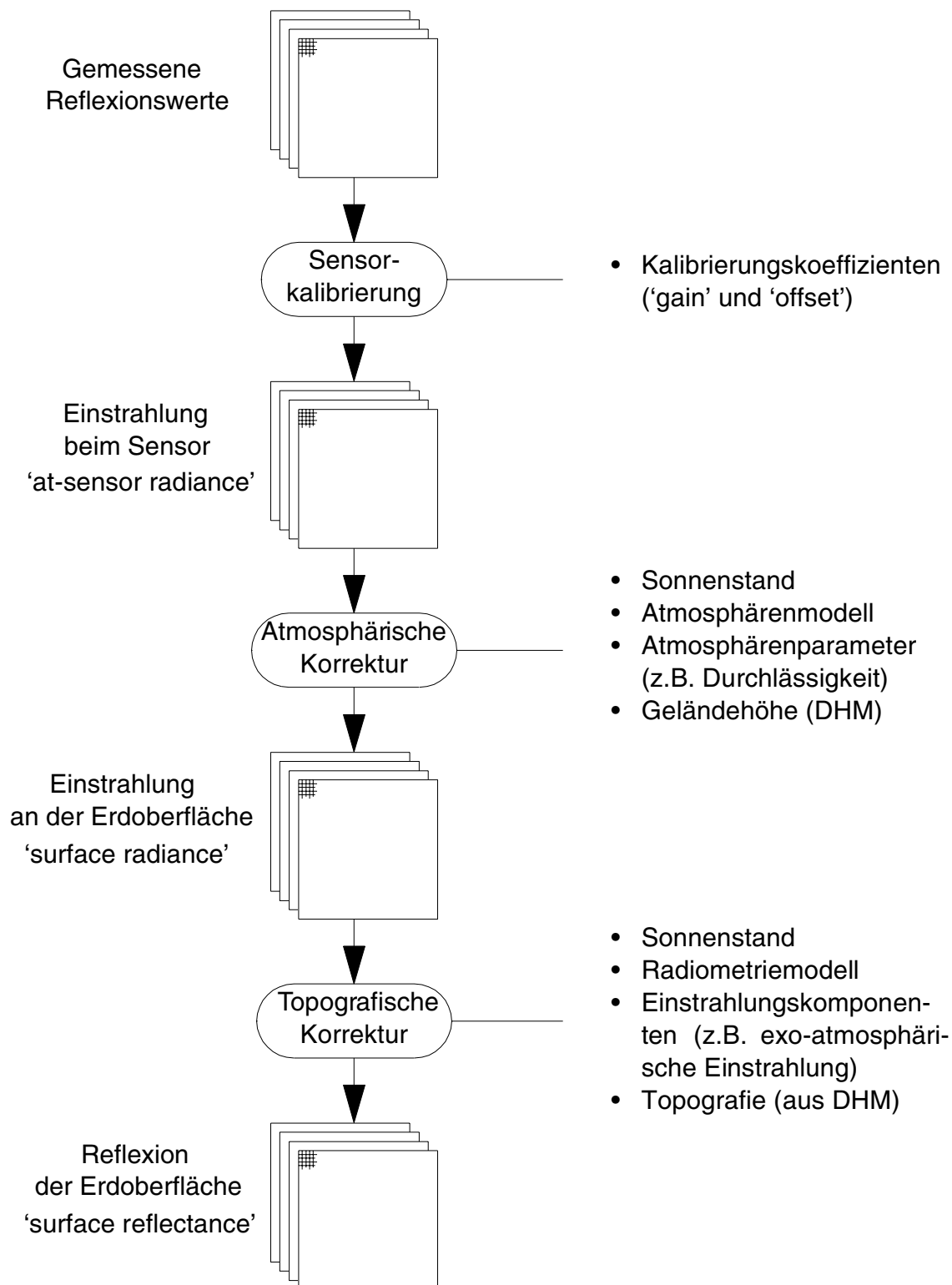
Rechte Seite: Von oben links zeilenweise nach unten rechts:

- | | | |
|-----------------|----------------------|-------------------------------------|
| 1. Reihe links | Landsat-TM 196 / 027 | Viertelszene vom 8. April 1995 |
| 1. Reihe rechts | Landsat-TM 195 / 027 | Viertelszene vom 3. Mai 1995 |
| 2. Reihe links | Landsat-TM 195 / 027 | Viertelszene vom 20. Juni 1995 |
| 2. Reihe rechts | Landsat-TM 195 / 027 | Viertelszene vom 22. Juli 1995 |
| 3. Reihe links | SPOT-XS 050 / 255 | Vollszene vom 19. Juli 1995 |
| 3. Reihe Mitte | SPOT-XS 050 / 255 | Vollszene vom 17. Oktober 1995 |
| 3. Reihe rechts | Landsat-TM 196 / 027 | Viertelszene vom 14. August 1995 |
| 4. Reihe links | Landsat-TM 195 / 027 | Viertelszene vom 24. September 1995 |
| 4. Reihe rechts | Landsat-TM 196 / 027 | Viertelszene vom 17. Oktober 1995 |

Abbildung 5: Datenfluss für die radiometrische Korrektur von Fernerkundungsdaten.

Sie beinhaltet die Umwandlung der Messwerte in physikalische Grössen.

Quelle: [57], modifiziert



Neuere Arbeiten verwenden die Schätzung der Strahlung dunkler Objekte in Kombination mit einem Strahlungstransfer-Modell (z.B. Modtran [5] oder 6S [69]). Mit Hilfe der dunklen Objekte wird dabei die Modellierung der Atmosphäre geeicht [16], [62]. Da keine atmosphärischen Messungen benötigt werden, ist eine operationelle Anwendung dieses Ansatzes möglich. Aber auch hier kann sich die Bestimmung geeigneter dunkler Objekte in der Praxis als schwierig erweisen. Dieses Problem wird von Richter [53] umgangen, indem bei seinem Ansatz invariante Referenzobjekte im Bild für die Eichung des Strahlungstransfer-Modells verwendet werden können.

Im dritten Schritt wird anhand der ‘surface radiance’ schliesslich die objektspezifische Oberflächenreflexion (‘surface reflectance’) bestimmt. In Gebieten mit starkem Relief wirkt sich die unterschiedliche Beleuchtung sehr stark auf die ‘surface radiance’ aus. Mit Hilfe eines Geländemodells kann der Topografieeinfluss modelliert und reduziert werden.

Eine Erweiterung dieser ‘slope-aspect’-Korrektur stellt die Hinzunahme eines Atmosphärenmodells dar, um den atmosphärischen Einfluss zu berücksichtigen [72]. Das Miteinbeziehen des diffusen Himmelslichtes anhand des sichtbaren Himmelanteils (‘sky view factor’) sowie der Nachbarschaftseffekte (‘terrain view factor’) kann diese Modellierung zusätzlich verbessern [23].

Im Folgenden wird auf die beiden im Rahmen des Projektes angewendeten Methoden eingegangen. Dabei werden die theoretischen Grundlagen und die praktische Durchführung erläutert sowie die erzielten Resultate bewertet.

3.3.2 Semi-empirische radiometrische Korrektur

Bei der semi-empirischen c-Korrektur handelt es sich um eine objektspezifische Korrektur der Illumination, welche von Teillet [61] vorgestellt wurde. Dabei werden sämtliche Bildelemente so behandelt, als ob sie alle das Illuminationsverhalten der gewählten Korrekturkategorie aufweisen. Das Verfahren modelliert den Anteil der einfallenden Strahlung anhand des Cosinus des Sonneneinfallswinkels. Die Objekte werden somit als lambertiane Strahler angesehen. Ergänzt wird diese Modellierung mit einem Faktor c, welcher das Himmelslicht (‘diffuse sky radiation’) berücksichtigt. Der Faktor c ergibt sich aus dem linearen Zusammenhang zwischen dem vom Sensor gemessenen Grauwerte und dem Sonneneinfallswinkel.

In der Tabelle 6 sind die im Rahmen des Projektes durchgeführten semi-empirischen radiometrischen Korrekturen aufgelistet.

Tabelle 6: Übersicht über die durchgeführten semi-empirischen radiometrischen Korrekturen

Datum	Sensor	Untersuchungsgebiet	Geländemodell	Korrekturkategorie
30.06.91	XS	Beckenried	DHM25	Arealstatistik, Vegetation
30.06.91	Pan	Beckenried	DHM25	Arealstatistik, Vegetation
11.07.91	TM	Beckenried	DHM25	Arealstatistik, Vegetation

Der Nutzen der semi-empirischen radiometrischen Korrektur wurde anhand einer ‘maximum likelihood’-Klassifikation von sechs verschiedenen Vegetationstypen im Untersuchungsgebiet Beckenried untersucht. Nach der Korrektur resultierte sowohl bei HRV- als auch bei TM-Daten eine Verschlechterung der Klassifikationsgenauigkeit um über 2% [42]. Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den Erfahrungen, die mit der c-Korrektur im Zusammenhang mit Waldklassifikationen gemacht wurden. Dabei konnte mit Hilfe dieses Verfahrens je nach Untersuchungsgebiet eine Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit zwischen 2% und 6% erzielt werden.

Diese Resultate zeigen, dass die semi-empirische radiometrische Korrektur bei einer Landnutzungsklassifikation zu keiner Genauigkeitsverbesserung führt. Die Anwendung dieses Verfahrens wird deshalb nur bei der Klassifikation spezieller Kategorien (z.B. bei einer Wald-/Nichtwald-Unterscheidung) empfohlen.

3.3.3 Physikalisch basierte radiometrische Korrektur

Im Rahmen des Projektes wurde die von Sandmeier [55] vorgeschlagene physikalisch basierte radiometrische Korrektur angewendet. Dieses physikalisch basierte Verfahren berücksichtigt sowohl atmosphärische als auch topografische Effekte.

Bei diesem Verfahren wurden die folgenden vereinfachenden Annahmen getroffen:

- Die Atmosphäre ist in horizontaler Richtung homogen. Variationen treten nur in vertikaler Richtung auf.
- Die optische Dichte der Aerosole (‘aerosol optical depth’) ist in vertikaler Richtung homogen. Höhenbedingte Variationen der Aerosolkonzentration werden damit nicht berücksichtigt.
- Die Bodenbedeckung ist nicht bekannt. Deshalb wird generell von einer Lambertianen Reflexionscharakteristik der Bodenbedeckung ausgegangen. Eine objektspezifische BRDF wird somit nicht berücksichtigt.
- Jedes Pixel im Bild wird als Nadirpixel betrachtet, womit die Länge des Strahlengangs für jedes Pixel gleich ist. Das FOV sowie der Schwenkwinkel eines Sensors werden ausser Acht gelassen.
- Es wird eine uniforme Umgebungsreflexion vom Typ «grüne Vegetation» angenommen.

Um die für die Korrektur notwendigen atmosphärischen Parameter für horizontale Flächen zu modellieren, wurde das Strahlungstransfer-Modell 6S eingesetzt [69]. Für den Fall, dass keine geeigneten Messdaten (Radiosondenmessungen, meteorologische Beobachtungen) zur Verfügung stehen, können gewisse Eingabeparameter mit Hilfe von vordefinierten Standardmodellen angenähert werden. Dies betrifft die atmosphärischen Verhältnisse, den Aerosoltyp und die spektrale Variation der Bodenreflexion. Mit Hilfe der Aerosolmodelle können gewisse Aerosoltypen geschätzt werden. Zur Bestimmung der Aerosolkonzentration wird jedoch zusätzlich noch die «optische Dichte» (μ_{meteo}) benötigt.

Die Tabelle 7 gibt einen Überblick über die im Rahmen des Projektes durchgeführten physikalisch basierten radiometrischen Korrekturen.

Tabelle 7: Übersicht über die durchgeführten physikalisch basierten radiometrischen Korrekturen

Datum	Sensor	Untersuchungsgebiet	Atmosphärenmodell	Aerosolmodell	μ_{meteo} [km]	Spektrale Variation der Bodenreflexion	Gelände- modell
09.08.90	TM	Yverdon	Radiosondenmessungen	'continental'	15-40	'green vegetation'	DHM25
11.07.91	TM	Beckenried	Radiosondenmessungen	'continental'	12-40	'green vegetation'	DHM25
08.04.95	TM	Yverdon	'US standard 62'	'urban'	40	'green vegetation'	DHM25
03.05.95	TM	Yverdon	'midlatitude summer'	'continental'	26	'green vegetation'	DHM25
20.06.95	TM	Yverdon	'midlatitude summer'	'continental'	39	'green vegetation'	DHM25
22.07.95	TM	Yverdon	'midlatitude summer'	'continental'	11	'green vegetation'	DHM25
14.08.95	TM	Yverdon	'midlatitude summer'	'urban'	17	'green vegetation'	DHM25
24.09.95	TM	Yverdon	'US standard 62'	'continental'	20	'green vegetation'	DHM25
17.10.95	TM	Yverdon	'US standard 62'	'urban'	10	'green vegetation'	DHM25
30.06.91	Pan	Beckenried	Radiosondenmessungen	'continental'	18-40	'green vegetation'	DHM25
30.06.91	XS	Beckenried	Radiosondenmessungen	'continental'	18-40	'green vegetation'	DHM25
19.07.95	XS	Yverdon	'midlatitude summer'	'continental'	40	'green vegetation'	DHM25
17.10.95	XS	Yverdon	'US standard 62'	'urban'	8	'green vegetation'	DHM25

Im Untersuchungsgebiet Beckenried wurde der Nutzen der physikalisch basierten radiometrischen Korrektur bei einer Klassifikation des Waldmischungsgrades mit Hilfe von TM-Daten getestet. Bei einer Parallelepiped-Klassifikation resultierte eine Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit von 5%, beim 'minimum distance'-Verfahren von 2% und bei einer wahrscheinlichkeitsbasierten Klassifikation von 7%. Beim 'maximum likelihood'-Verfahren verschlechterte sich die Klassifikationsgenauigkeit um 1% [43].

Im Untersuchungsgebiet Yverdon ergab die physikalisch basierte radiometrische Korrektur bei einer Klassifikation verschiedener landwirtschaftlicher Nutzflächen eine Genauigkeitsverbesserung von knapp 5% [45]. Dabei kam eine 'maximum likelihood'-Klassifikation mit TM-Daten zum Einsatz. Dies ist umso erstaunlicher, als dass die landwirtschaftlichen Nutzflächen sowohl in ihrer Höhenausdehnung als auch in ihrer Neigung beschränkt sind.

Durch die physikalisch basierte radiometrische Korrektur können jedoch auch einige offensichtliche Fehler an Geländekanten und in schwach beleuchteten Gebieten resultieren. Diese Artefakte, welche bereits von Sandmeier [55] beobachtet wurden, dürften einerseits die Folge einer ungenügenden Bestimmung des Sonneneinfallswinkels und der Schlag-schattengebiete sein. Durch ein höher aufgelöstes DHM liessen sich diese Fehler unter Umständen vermeiden. Andererseits kann das Nichtberücksichtigen von Nachbarschaftseffekten zu Artefakten führen.

Für generelle Landnutzungsklassifikationen wird in Anbetracht dieser Resultate empfohlen, die physikalisch basierte radiometrische Korrektur durchzuführen.

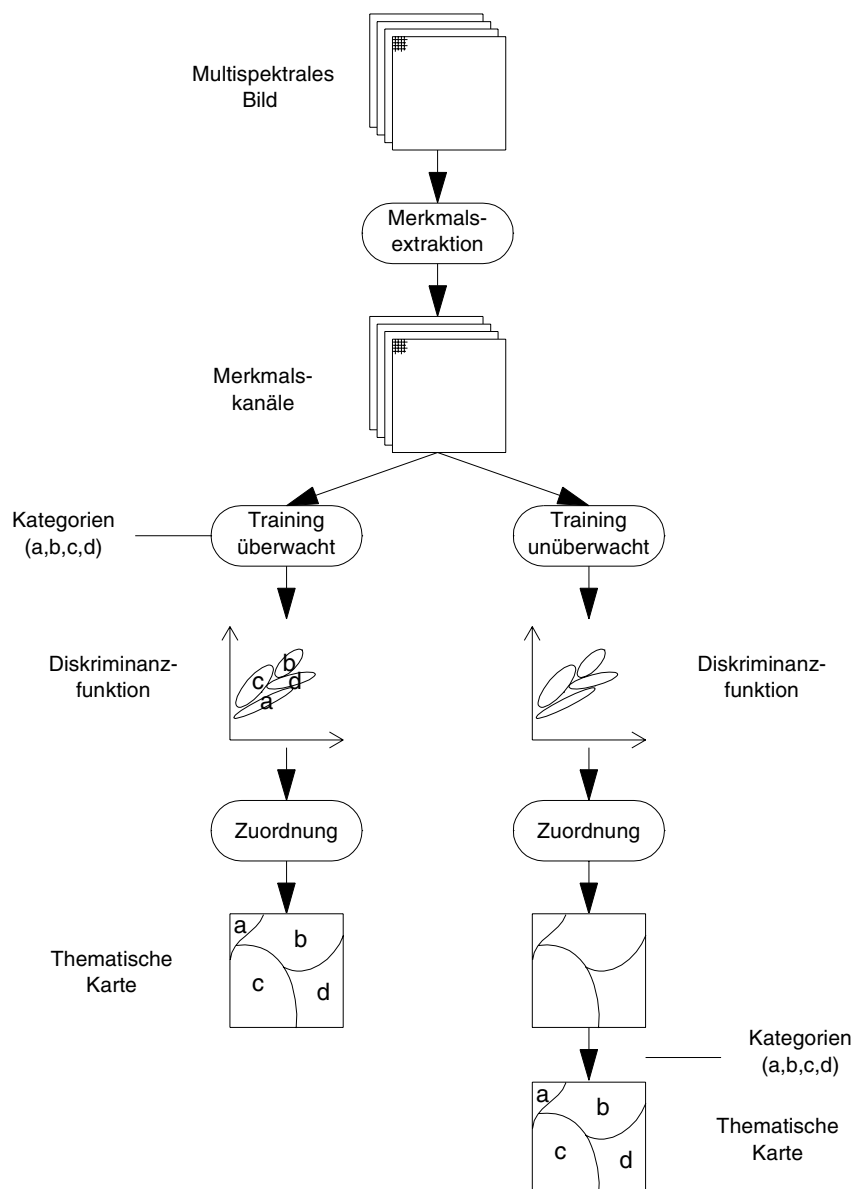
3.4 Klassifikation

3.4.1 Überblick

Die Bildklassifikation ist der Prozess, in welchem aus Bilddaten thematische Information extrahiert werden, wobei die Zuordnung eines Pixels zu einer Kategorie im Vordergrund steht. Dies setzt voraus, dass sich die Kategorien in den Bilddaten unterscheiden lassen. Ihre gegenseitige Abgrenzung wird allerdings durch mehrere Faktoren erschwert. Neben sensor- und szenenbedingten radiometrischen Störeffekten sind es insbesondere Mischsignaturen, die eine Klassifikation erschweren.

Traditionellerweise beinhaltet die thematische Klassifikation drei grundlegende Schritte (Abbildung 6).

Abbildung 6: Datenfluss zur Klassifikation von Fernerkundungsdaten



Die Extraktion von Merkmalskanälen ('feature extraction') hat zunächst zum Ziel, die Bilddaten auf die signifikanten Merkmalsparameter zu reduzieren, welche die Klassierung des abgebildeten Gebietes erlauben. Die ursprünglichen multispektralen Kanäle eines Bildes können zwar auch direkt für die Klassifikation benutzt werden, doch sind diese Daten oft stark miteinander korreliert, was zu einer ineffizienten Analyse führt. Ausserdem können bildbasierte Eigenschaften (z.B. räumliche Texturmasse) zusätzliche Informationen in die Klassifikation einbringen.

Im Rahmen des Trainings werden sodann repräsentative Pixel (sog. Trainingsstichproben oder einfach Trainingsgebiete) definiert, welche zur Bestimmung einer Diskriminanzfunktion im Merkmalsraum verwendet werden. Werden den Trainingsgebieten anhand von 'ground truth' Kategorien zugewiesen, spricht man von überwachtem Training. Andernfalls geht der Algorithmus a priori davon aus, dass Unterschiede in den Daten vorhanden sind. Es handelt sich dann um ein unüberwachtes Training.

Bei der Zuordnung ('labeling') schliesslich wird die Diskriminanzfunktion auf das ganze Bild angewendet. Im Falle eines überwachten Trainings sind die Kategorien mit der Diskriminanzfunktion assoziiert. Beim unüberwachten Training hingegen muss die Zuordnung zu einer Kategorie am Schluss erfolgen.

Im Folgenden werden die im Rahmen des Arealstatistik-Projektes untersuchten oder angewendeten Verfahren im Bereich der Merkmalsextraktion, des Trainings und der Zuordnung vorgestellt.

3.4.2 Beurteilung einer Klassifikation/Klassifikationsgenauigkeit

Digitale Klassifikationen werden häufig mit Hilfe von Bodenreferenzdaten ('ground truth') überprüft. Ein Klassifikationsresultat kann dabei anhand einer Fehlermatrix ('error matrix') präsentiert werden. In dieser aus Kolonnen und Zeilen bestehenden Tabelle werden die Anzahl Beobachtungen (in der Regel Pixel), welche bei der Klassifikation einer gewissen Kategorie zugeordnet wurden, in Relation zur Kategorie der Bodenreferenz gesetzt. Die Kolonnen geben üblicherweise die Referenzdaten wieder, während in den Zeilen die Kategorien der Klassifikation dargestellt sind. Im Idealfall sind alle Elemente, die nicht in der Hauptdiagonalen der Fehlermatrix liegen, gleich null, was eine fehlerlose Klassifikation bedeutet. Der Vorteil einer Fehlermatrix ist, dass sowohl die irrtümlich einer anderen Kategorie zugewiesenen Beobachtungen (Fehler 1. Art, 'commission error') als auch die nicht erkannten Beobachtungen einer Kategorie (Fehler 2. Art, 'ommission error') wiedergegeben werden.

Die Fehlermatrix ist Ausgangspunkt für eine ganze Reihe von deskriptiven und analytisch-statistischen Techniken zur Klassifikationsbeurteilung. Einen Überblick dazu vermittelt Congalton [17]. Das einfachste deskriptive Mass ist die Gesamtgenauigkeit ('overall accuracy'), welche definiert wird als prozentualer Anteil korrekt klassierter Pixel.

In den folgenden Kapiteln werden die Klassifikationsresultate jeweils mit Hilfe der Gesamtgenauigkeit bewertet. Da die Gegenüberstellung der Klassifikationsresultate und der Bodenreferenzdaten Pixel-zu-Pixel erfolgte, werden geometrische Ungenauigkeiten (auch diejenigen der Referenzdaten) genauso bestraft wie tatsächliche Fehlklassifikationen. Die wirkliche Klassifikationsgenauigkeit dürfte daher stets etwas höher liegen.

3.4.3 Bestimmung nicht auswertbarer Gebiete

Bei der Verarbeitung von Satellitendaten ist man immer wieder mit Gebieten konfrontiert, welche nicht ausgewertet werden können. Bei optischen Sensoren handelt es sich grösstenteils um Wolken und Wolkenschatten. Je nach Aufgabenstellung müssen auch schneebedeckte Gebiete dazugezählt werden.

Die Abgrenzung der nicht auswertbaren Gebiete kann generell auf zwei Arten erfolgen:

- automatisch,
- manuell.

Die automatische Erfassung beruht beispielsweise auf der Klassifikation der spektralen Information im Satellitenbild. Das Vorgehen entspricht dabei dem Klassifikationsprozess, wie es im Folgenden für die Landnutzungsklassifikation beschrieben ist. Diese Methode führt allerdings insbesondere bei Wolkenschatten zu Fehlern.

Bei der manuellen Erfassung wird das nicht auswertbare Gebiet anhand einer geeigneten Kanalkombination am Bildschirm vektorisiert und anschliessend gerastert. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die Interpretin oder der Interpret Kenntnisse über die lokalen Gegebenheiten bei der Erfassung mit berücksichtigen kann.

In den Satellitendaten, welche im Arealstatistik-Projekt ausgewertet wurden, erfolgte die Bestimmung der nicht auswertbaren Gebiete stets mit Hilfe der manuellen Vektorisierung am Bildschirm.

3.4.4 Geländeinformation als zusätzliches Klassifikationsmerkmal

Bei herkömmlichen Klassifikationsverfahren wird ausschliesslich die spektrale Satellitenbildinformation herangezogen, um ein Pixel zu identifizieren. Es gibt aber noch weitere Informationsquellen, die für die Identifikation von Landnutzungskategorien von Nutzen sein und damit in den Klassifikationsprozess einfließen könnten. Folgende Beispiele sollen dies skizzieren:

- «Günstige Alp- und Juraweiden» sind auf 1500m wahrscheinlicher als «Günstiges Wies- und Ackerland».
- Rebbauf Flächen sind an Südhängen wahrscheinlicher anzutreffen als an nordexponierten Hängen.
- Ackerflächen in schwach geneigten Gebieten sind wahrscheinlicher als in stark geneigten Gebieten.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Tests zur Integration der Geländeinformation in den Klassifikationsprozess durchgeführt. Im Untersuchungsgebiet Beckenried wurde die Geländehöhe zusammen mit TM- und XS-Daten für eine wahrscheinlichkeitsbasierte Klassifikation des Waldmischungsgrades (Laub-, Misch- und Nadelwald) verwendet. Dabei resultierte eine Klassifikationsverbesserung von 5% bis 12% gegenüber einer herkömmlichen 'maximum likelihood'-Klassifikation ohne Geländeinformation [43].

Im Untersuchungsgebiet Yverdon erfolgte die Bodennutzungsklassifikation anhand von TM-Daten. Für die bessere Unterscheidung des Waldmischungsgrades wurde zusätzlich die Geländehöhe, für die bessere Unterscheidung der landwirtschaftlichen Nutzflächen die

Geländehöhe und die Exposition herangezogen. Das Resultat dieser wahrscheinlichkeitsbasierten Klassifikation wurde anschliessend zu sieben Kategorien aggregiert und mit der Schweizerischen Arealstatistik verglichen. Die Hinzunahme der Geländeinformation bewirkte bei diesem Test eine Klassifikationsverbesserung von mehr als 5% gegenüber einer ‘maximum likelihood’-Klassifikation ohne Geländeinformation [43].

Im Untersuchungsgebiet Yverdon wurden die Geländehöhe, -exposition und -neigung zusammen mit TM-Daten für die Unterscheidung von neun verschiedenen Landnutzungskategorien verwendet. Dabei resultierte eine Klassifikationsverbesserung von 10% [44].

Diese Resultate zeigen, dass durch die Hinzunahme der Geländeinformation für bestimmte Kategorien signifikante Klassifikationsverbesserungen erzielt werden können. Die Verwendung der Geländeinformation als zusätzliches Merkmal bei der Klassifikation wird daher empfohlen.

3.4.5 Texturinformation als zusätzliches Klassifikationsmerkmal

Die Textur ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der Identifizierung von Objekten in einem Bild. Im Gegensatz zu der spektralen Information beinhaltet die Textur die räumliche Verteilung der Grauwertvariationen in den Kanälen. Informationen über Homogenität, Kontrast und lineare Strukturen können mit den entsprechenden Texturparametern ermittelt werden.

Die texturale Informationen wird häufig in Form von Grauwerts-Abhängigkeits-Matrizen (‘grey-level co-occurrence matrices’) wiedergegeben. Nach Haralick et al. [33] werden ‘grey-level co-occurrence’ (GLC) Matrizen zur Ableitung von Statistiken zweiter Ordnung in digitalen Bildern verwendet. Eine GLC Matrix ist die Schätzung der Wahrscheinlichkeit des Überganges von einem Grauwert i auf den Grauwert j zweier benachbarter Bildelemente, wobei die Nachbarschaft durch einen Übergangsvektor definiert ist. Die Schätzung folgt durch Zählen der auftretenden Grauwertübergänge und anschliessender Normierung. Eine GLC Matrix beinhaltet demzufolge die normierte Häufigkeiten p_{ij} , mit der zwei in einem definierten Abstand d benachbarten Bildelemente, mit den Grauwerten i bzw. j in einer bestimmten Richtung im Bild auftreten. Die Reihenfolge der Grauwerte wird nicht berücksichtigt; es handelt sich also um eine symmetrische Matrix.

Die Betrachtung der GLC Matrix lässt eine erste Interpretation zu: Je mehr sich die besetzten Elemente um die Diagonale scharen, desto homogener ist das Bild. Im Gegensatz dazu bedeuten Elemente, die weit von der Diagonalen entfernt liegen, starke Grauwertsprünge, also Inhomogenität.

Damit nicht die gesamte GLC Matrix zur Beschreibung der Textur verwendet werden muss, werden so genannte Texturmerkmale aus den GLC Matrizen abgeleitet. Sie geben die Charakteristik der GLC Matrix in einem einzigen Wert wieder.

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Texturmasse im Hinblick auf ihre Eignung bei der Klassifikation getestet: die ‘homogeneity’ und das ‘angular second moment’ [57]. Die beiden Texturmasse wurden anhand einer 3×3 Fenstergrösse einmal in horizontaler und dann in vertikaler Richtung für das Untersuchungsgebiet Yverdon berechnet. Als Grundlage diente der Kanal 3 der XS-Szene vom 19.7.1995. Mit Hilfe eines neuronalen Netzwerkes wurden neun verschiedene Landnutzungskategorien unterschieden. Durch die Hinzunahme der vier Texturkanäle resultierte dabei eine Klassifikationsverbesserung von über 4% [22].

Dieser Test zeigt, dass die texturale Information eine signifikante Verbesserung einer Klassifikation mit sich bringen kann. Die Herstellung dieser zusätzlichen Merkmale erfolgt zudem schnell und einfach. Die Anwendung bei einer operationellen Landnutzungs-klassifikation wird daher empfohlen.

3.4.6 Eindimensionale Trennbarkeit für die Merkmalsauswahl

Die eindimensionale Trennbarkeit ist ein Mass für die Trennbarkeit zweier Kategorien [42]. Sie berechnet sich auf Grund der Differenz zweier Häufigkeitsverteilungen in einem bestimmten Kanal. Für die Berechnung dieses Masses wird keine bestimmte statistische Verteilung vorausgesetzt.

Die maximale eindimensionale Trennbarkeit kann für alle Kategorienpaare berechnet werden. Mit Hilfe der daraus resultierenden Trennbarkeitsmatrix können diejenigen Kategorien bestimmt werden, welche mit den zur Verfügung stehenden Merkmalen nur ungenügend getrennt werden können. Diese Kategorien sollten vor einer Klassifikation aggregiert werden.

Die Merkmale mit der jeweils höchsten eindimensionalen Trennbarkeit können auch in einer Merkmalsmatrix zusammengefasst werden. Sie gibt einen Hinweis über die optimalen Merkmale für die Klassifikation.

Die Methode der maximalen eindimensionalen Trennbarkeit hat den Vorteil, dass bei den untersuchten Kategorien keine bestimmte Verteilung vorausgesetzt wird. Es lassen sich insbesondere auch nicht-normalverteilte Häufigkeitsverteilungen von Kategorien (z.B. Geländeinformation) untersuchen. Als Nachteil der Methode sei erwähnt, dass jeweils nur ein Kanal in die Berechnungen miteinbezogen wird. Auch wenn es sich dabei um den für die entsprechende Trennung optimalen Kanal handelt, so würde die Hinzunahme weiterer Kanäle die Situation einer multispektralen Klassifikation besser annähern.

Das Verfahren ist vor allem dann zweckmässig, wenn nur ein oder zwei Merkmale für die Klassifikation zur Verfügung stehen. Da aber häufig multispektrale Daten für die Klassifikation angewendet werden, wird diese Methode kaum noch zum Einsatz gelangen.

3.4.7 Jeffries-Matusita Distanz (JMD) für die Merkmalsauswahl

Die JMD ist ein Mass für die statistische Trennbarkeit und wird definiert als die mittlere Differenz zwischen den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen zweier Kategorien [57]. Dabei können beliebige Kanalkombinationen ausgewertet werden. Dieses Mass kann dazu verwendet werden, um aus einer grossen Anzahl von Merkmalen die optimale Kombination für die Klassifikation zu extrahieren.

Die JMD lässt sich für jedes Kategorienpaar einzeln berechnen. Für eine gesamtheitliche Beurteilung kann die durchschnittliche und die minimale JMD aller Paare herangezogen werden. Die durchschnittliche Distanz beschreibt die generelle Trennbarkeit der Kategorien, während sich die minimale Distanz auf die Trennbarkeit der am schwierigsten zu trennenden Kategorien bezieht [43].

Die JMD wurde einerseits verwendet, um das Potenzial der Satellitendaten für eine Klassifikation abzuschätzen [42]. Andererseits wurde dieses Mass für die Auswahl der optimalen Merkmale für die Klassifikation eingesetzt [43], [45].

Die Methode der JMD hat den Vorteil, dass die Berechnung mit einer beliebigen Anzahl Merkmale erfolgen kann. Dadurch kann zusätzlich auch die Anzahl Merkmale, die für eine bestimmte Genauigkeitsanforderung notwendig ist, bestimmt werden. Der Schwachpunkt der Methode liegt in der Annahme, dass die Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktionen normalverteilt sind.

Dieses Verfahren eignet sich für die Auswahl der optimalen Merkmale für ein parametrisches Klassifikationsverfahren. Die Anwendung empfiehlt sich vor allem dann, wenn mehr als acht Merkmale vorliegen, deren Kategorienstatistik durch eine Normalverteilung angenähert werden kann.

3.4.8 Parallelepiped-Klassifikation

Beim Parallelepiped-Algorithmus handelt es sich um ein nicht-parametrisches Verfahren, bei dem zur Abgrenzung einer Kategorie in jedem Kanal ein oberer und ein unterer Grenzwert festgelegt wird [57].

Die Bestimmung dieser Grenzwerte kann einerseits visuell erfolgen, indem Häufigkeitsverteilungen ausgewertet werden. Dieses Vorgehen führt in der Regel zu besseren Resultaten, erfordert jedoch – je nach Schwierigkeit der Kategorientrennung – ein hohes Mass an Erfahrung und Fingerspitzengefühl. Andererseits lassen sich die Grenzwerte auch automatisch (zum Beispiel mittels Mittelwert und Standardabweichung) bestimmen, was eher den Anforderungen einer operationellen Anwendung entspricht.

Dieses Verfahren wurde im Untersuchungsgebiet Beckenried für die Klassifikation des Waldmischungsgrades eingesetzt [43]. Sowohl für TM- als auch für XS-Daten wurden die Grenzwerte durch visuelle Auswertung der Histogrammverteilungen bestimmt. Dabei resultierte im Vergleich zu einer ‘minimum distance’-Klassifikation eine Verbesserung um 14%, im Vergleich zu einer ‘maximum likelihood’-Klassifikation eine Verbesserung um 5% bis 8%.

Diese Untersuchungen zeigen, dass mit Hilfe der Parallelepiped-Methode für gewisse Aufgabenstellungen signifikant bessere Klassifikationsresultate erzielt werden können als mit statistischen Klassifikationsmethoden. Ausserdem lassen sich damit auch Merkmale verarbeiten, in denen die Häufigkeitsverteilung einer Kategorie nicht durch eine Normalverteilung angenähert werden kann. Mit zunehmender Anzahl Kategorien und Merkmale wird die Bestimmung der Grenzwerte aber sehr komplex, so dass eine visuelle Auswertung der Häufigkeitsverteilungen für operationelle Anwendungen kaum noch in Frage kommt. Dieses Verfahren wird deshalb für einfache Unterscheidungen, wie z.B. für eine Wald-/Nichtwald-Klassifikation, empfohlen.

3.4.9 ‘Minimum Distance’-Klassifikation

Bei der ‘minimum distance’-Klassifikation wird ein zu klassierendes Bildelement derjenigen Kategorie zugeordnet, zu deren Schwerpunkt die kürzeste Entfernung auftritt. Als Entfernungsmaass wird in der Regel die Euklidische Distanz, in seltenen Fällen auch die Mahalanobis Distanz, verwendet. Der Schwerpunkt einer Kategorie kann definiert werden durch den Mittelwert- oder Modusvektor, oder aber durch ein Zentrum, das durch einen unüberwachten ‘cluster’-Algorithmus ermittelt wurde [57].

Das ‘minimum distance’-Verfahren wurde im Zusammenhang mit der Klassifikation des Waldmischungsgrades anhand von TM- und XS-Daten im Untersuchungsgebiet Beckenried verwendet [43]. Die dabei erzielten Resultate lagen jedoch deutlich unter der Genauigkeit einer Parallelepiped- oder einer ‘maximum likelihood’-Methode.

Im Untersuchungsgebiet Yverdon wurde dieses Verfahren für die Klassifikation von neun verschiedenen Anbaukulturen verwendet [45]. Dabei wurden multitemporale TM- und XS-Daten von fünf verschiedenen Aufnahmezeitpunkten verwendet. Das Verfahren wurde dem ‘maximum likelihood’-Algorithmus vorgezogen, weil es bei multimodal verteilten Trainingsdaten in der Regel weniger empfindlich reagiert und damit zu leicht besseren Resultaten führt.

Das Verfahren eignet sich vor allem dann, wenn die verwendeten Kanäle unkorreliert sind. In diesen Fällen können vereinzelt auch bessere Resultate als mit dem ‘maximum likelihood’-Verfahren erzielt werden. In der Praxis besteht jedoch häufig eine starke Korrelation zwischen den verwendeten Kanälen, so dass dann eine ‘maximum likelihood’-Klassifikation vorzuziehen ist.

3.4.10 ‘Maximum Likelihood’-Klassifikation

Der ‘maximum likelihood’-Algorithmus berechnet mit Hilfe einer vorgegebenen Stichprobenstatistik für jede Kategorie eine mehrdimensionale Wahrscheinlichkeitsfunktion in Form einer Normalverteilung. Anhand dieser Dichtefunktion wird für jedes Pixel im Bild bestimmt, welche Kategorie die maximale Mutmasslichkeit (‘likelihood’) besitzt. Falls bekannt ist, wie häufig eine Kategorie im Untersuchungsgebiet auftritt, kann die Dichtefunktion mit einer so genannten a priori-Wahrscheinlichkeit gewichtet werden [57].

Diese Gewichtung durch a priori-Wissen ist allerdings nicht unproblematisch: Werden nämlich die Kategorien mit ihrer effektiven Häufigkeiten im Untersuchungsgebiet gewichtet – was natürlich voraussetzt, dass diese bekannt sind –, so führt dies zu einer Überbewertung häufig auftretender («grosser») Kategorien, während selten auftretende («kleine») Kategorien unterbewertet werden. In einzelnen Fällen können solche «kleine» Kategorien sogar völlig verschwinden [70].

Das ‘maximum likelihood’-Verfahren wurde im Untersuchungsgebiet Beckenried für die Unterscheidung des Waldmischungsgrades mit Hilfe von TM- und XS-Daten eingesetzt [43]. Für beide Sensoren lag die Klassifikationsgenauigkeit aber deutlich unter derjenigen der Parallelepiped-Methode. Im Vergleich zur ‘minimum distance’-Klassifikation konnte jedoch eine Verbesserung um rund 5% erzielt werden.

In Yverdon wurde dieses Verfahren innerhalb einer hierarchischen Klassifikation zur Unterscheidung der vier Hauptkategorien eine Landnutzungsklassifikation sowie zur Unterscheidung zwischen Industrie- und Gebäudeflächen angewendet [43]. Die Datengrundlage bildeten dabei TM-Daten.

Im gleichen Untersuchungsgebiet wurde das ‘maximum likelihood’-Verfahren für eine Landnutzungsklassifikation angewendet. Müller [47] klassierte dabei acht Kategorien mit Hilfe von XS- oder TM-Daten, während Dousse [22] neun Kategorien anhand von XS-Daten unterschied. Bei Dousse resultierte durch das ‘maximum likelihood’-Verfahren eine Klassifikationsverbesserung von 1.5% gegenüber einer Klassifikation mit neuronalen Netzwerk.

Dieses Verfahren ist einfach und führt bei normalverteilten Merkmalen sehr häufig zu optimalen Resultaten. Es wird für allgemeine Landnutzungsklassifikationen empfohlen, wo ausschliesslich multispektrale Daten einer Aufnahme zum Einsatz gelangen.

3.4.11 Möglichkeitsbasierte Klassifikation

Die im Rahmen des Projektes verwendete wahrscheinlichkeitsbasierte Klassifikation basiert auf der Möglichkeitstheorie ('possibility theory'), welche von Zadeh [73] eingeführt wurde. Diese auf 'fuzzy logic' basierende Theorie eignet sich zur Behandlung von unpräzise und unsicherem Wissen.

Der Zugehörigkeitsgrad ('membership grade') kann einerseits anhand von linguistischen Prädikaten (z.B. «sehr tief», «hoch», «nicht») beschrieben werden [8]. Andererseits kann der Zugehörigkeitsgrad auch analytisch (z.B. durch eine 'maximum likelihood'-Prozedur) geschätzt werden [71]. Dadurch kann die Information verschiedener Quellen verknüpft werden.

Das wahrscheinlichkeitsbasierte Verfahren wurde im Untersuchungsgebiet Beckenried verwendet, um bei der Klassifikation des Waldmischungsgrades die Geländehöhe miteinzubeziehen [43]. Der Zugehörigkeitsgrad bezüglich der Geländehöhe wurde anhand linguistischer Prädikate bestimmt, während der Zugehörigkeitsgrad bezüglich der spektralen Information anhand der 'maximum likelihood'-Prozedur geschätzt wurde. Für die drei Kategorien Laub-, Misch- und Nadelwald konnte mit diesem Verfahren gegenüber dem 'maximum likelihood'-Algorithmus eine Verbesserung von 5% bis 12% erreicht werden.

Im Untersuchungsgebiet Yverdon wurde dieses Vorgehen innerhalb einer hierarchischen Klassifikation von TM-Daten für die Unterscheidung des Waldmischungsgrades sowie für die Unterscheidung der landwirtschaftlichen Nutzflächen verwendet [43]. Neben der Geländehöhe wurden dabei auch die Exposition für die Definition von Expertenregeln benutzt.

Dieses Verfahren bildete auch die Grundlage für die Auswertung des Überlappungsbereiches bei XS- und TM-Daten vom 17.10.95 [47]. Im Untersuchungsgebiet Yverdon resultierte dabei im Vergleich zu einer 'maximum likelihood'-Klassifikation eine Verbesserung von 4% für TM-Daten und eine Verbesserung von 7% für XS-Daten.

Der Vorteil der wahrscheinlichkeitsbasierten Klassifikation liegt in der Möglichkeit, den Zugehörigkeitsgrad sowohl anhand von Expertenregeln als auch anhand einer analytischen Schätzung zu bestimmen. Damit können normalverteilte und nicht-normalverteilte Daten problemlos miteinander verknüpft werden. Bei einer operationellen Anwendung könnte sich die Definition von Expertenregeln als Nachteil erweisen. Diese setzt eine entsprechende Erfahrung der Interpretin bzw. des Interpreten voraus. Dieses Verfahren eignet sich besonders für komplexe Unterscheidungen, bei welchen zusätzliche Merkmale wie beispielsweise Geländehöhe erforderlich sind oder für multitemporale Auswertungen, bei denen für das gleiche Gebiet mehrere Datensätze zur Verfügung stehen [46].

3.4.12 Klassifikation mit neuronalen Netzwerken

In den letzten Jahren haben neuronale Netzwerke für die nicht-parametrische Klassifikation stark an Beliebtheit gewonnen. Sie unterscheiden sich markant von den konventionellen Verfahren, weil die Diskriminanzfunktion anhand eines iterativen Verfahrens bestimmt wird [14].

Im Rahmen des Projektes gelangte die ‘multilayer perceptron’-Methode zur Anwendung, welche für die Klassifikation von Fernerkundungsdaten von den verschiedenen Typen neuronaler Netzwerke am häufigsten verwendet wird [22]. Dieses Verfahren zeichnet sich durch eine schnelle Prozessierung aus, ist sehr gut dokumentiert und konnte bereits in vielen Anwendungen erfolgreich eingesetzt werden.

Im Untersuchungsgebiet Yverdon wurde die Methode der neuronalen Netzwerke eingesetzt, um neun Landnutzungskategorien anhand von XS-Daten, der Geländeinformation sowie der texturalen Information zu klassieren [22]. Im gleichen Untersuchungsgebiet wurde die Methode zur Unterscheidung von neun landwirtschaftlichen Kulturen mit Hilfe multitemporaler TM- und XS-Daten eingesetzt. Im Vergleich zu einer ‘minimum distance’-Klassifikation mit der gleichen Datengrundlage resultierte dabei eine Klassifikationsverbesserung von 6% [46].

Die Vorteile neuronaler Netzwerke sind unter anderem die Lernfähigkeit, die Generalisierungsfähigkeit sowie die Fehlertoleranz. Die Verteilung der Merkmale spielt bei diesen Verfahren keine Rolle. Ein Nachteil liegt in der relativ langen Rechenzeit während des Lernvorgangs.

Die Methode der neuronalen Netzwerke eignet sich deshalb besonders für komplexe Unterscheidungen, wo zusätzliche Merkmale wie Nachbarschaft, Textur und Geländeinformation erforderlich sind, sowie für die Unterscheidung landwirtschaftlicher Nutzflächen mit Hilfe multitemporaler Daten.

3.5 Nachbearbeitung einer Klassifikation

Bei der Nachbearbeitung einer Klassifikation kann unterschieden werden zwischen

- Plausibilisierung und
- Generalisierung.

Bei der Plausibilisierung wird das Klassifikationsresultat anhand von Standorteigenschaften (z.B. Nachbarschaft, Höhe über Meer) überprüft. Diese Nachbearbeitung wird in der Regel mit Hilfe von Wenn-Dann-Regeln durchgeführt.

Das Ziel der Generalisierung ist die Aufarbeitung des Klassifikationsresultates für die kartografische Darstellung. In der Regel wird dabei das Erscheinungsbild des Klassifikationsresultates beruhigt, indem beispielsweise isolierte Pixel mit Hilfe eines Filters entfernt werden. Das Resampling eines Klassifikationsresultates im Hinblick auf die Darstellung in einem bestimmten Massstab kann ebenfalls zur Generalisierung gezählt werden.

In der Praxis lassen sich diese beiden Post-Klassifikationsmethoden jedoch nicht immer eindeutig voneinander unterscheiden. So handelt es sich bei einer Entfernung isolierter Laubwaldpixel mit einer räumlichen Auflösung von 25m a priori um eine Generalisierung. In der Praxis wird eine derart kleine Fläche jedoch nicht als eigener Bestand definiert, weshalb die Entfernung eines isolierten Pixels in diesem Fall auch eine Plausibilisierung darstellt.

Im Rahmen des Projektes wurden die Klassifikationsresultate ausschliesslich mit Hilfe eines Modalwertfilters nachbearbeitet. Im Untersuchungsgebiet Beckenried wurde die wahrscheinlichkeitsbasierte Klassifikation des Waldmischungsgrades mit Hilfe eines 5×5 -Modalwertfilters generalisiert und plausibilisiert [43]. Dadurch konnte für die drei Kategorien eine Klassifikationsverbesserung von 2% erzielt werden.

Das gleiche Verfahren wurde auch für die Klassifikation des Waldmischungsgrades im Untersuchungsgebiet Yverdon angewendet. Ausserdem wurde hier auch das Resultat der Klassifikation landwirtschaftlicher Nutzflächen mit Hilfe eines 3×3 -Modalwertfilters nachbearbeitet [43]. Eine quantitative Untersuchung über die dadurch erzielte Verbesserung des Klassifikationsresultates fand nicht statt.

Im gleichen Untersuchungsgebiet wurde ein 3×3 -Modalwertfilter angewendet, um das Resultat einer multitemporalen Klassifikation neun verschiedener Anbaukulturen nachzuverarbeiten [45]. Die Klassifikationsgenauigkeit konnte dadurch ebenfalls um 2% verbessert werden.

4 Resultate

4.1 Überblick

Im Rahmen des Projektes wurden einerseits im Untersuchungsgebiet Beckenried, andererseits im Untersuchungsgebiet Yverdon Klassifikationen durchgeführt. Dabei bestehen Unterschiede bezüglich der Datengrundlage, der Datenvorverarbeitung sowie der angewendeten Klassifikationsmethode. Inhalt der Klassifikationen bildete die Unterscheidung des Waldmischungsgrades sowie der Landnutzung.

Zur Beurteilung der Klassifikationsgenauigkeit wurden die Resultate mit Hilfe von Bodenreferenzdaten ('ground truth') überprüft. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese Referenzdaten zu 100% richtig sind. Diese Annahme ist jedoch nur selten korrekt und kann zu einer verfälschten Beurteilung des Klassifikationsresultates führen. Die Interpretation der Klassifikationsgenauigkeit erfordert deshalb einerseits genaue Kenntnisse über die Datenerhebungsmethoden (Bodenreferenzdaten und Klassifikationsdaten). Andererseits muss man sich über die Technik der Genauigkeitsbeurteilung im Klaren sein. Im Folgenden wird für die Klassifikationsbeurteilung stets die so genannte Gesamtgenauigkeit angegeben. Eine entsprechende Beschreibung dieses Masses findet sich im Kapitel 3.4.2.

Sämtliche Klassifikationsresultate beruhen auf der gleichen geometrischen Grundlage wie das Landeskartenwerk. Sie basieren auf dem schweizerischen geodätischen Datum CH-1903 (Bezugsellipsoid von Bessel (1841), Fundamentalpunkt alte Sternwarte Bern) und dem schweizerischen Projektionssystem (winkeltreue schiefachsige Zylinderprojektion).

Im Folgenden werden einige Beispiele von Klassifikationsresultaten vorgestellt. Zu jedem Resultat werden die zu Grunde liegenden Satellitendaten, die durchgeführten Prozessierungsschritte sowie die Resultate aus dem Vergleich mit den Bodenreferenzdaten aufgeführt.

4.2 Waldmischungsgrad im Untersuchungsgebiet Beckenried

Die zugehörige farbige Abbildung 7 befindet sich in der Mitte der Publikation (S. 31).

Satellitendaten:	Landsat TM Szene 195/027 vom 11.07.1991.
Postsystem-Korrektur:	Elimination der verdoppelten Zeilen.
Geometrische Korrektur:	Empirische Orthorektifizierung. Resampling: 'nearest neighbour' auf 10 m.
Radiometrische Korrektur:	Semi-empirische radiometrische Korrektur (c-Korrektur). Korrekturkategorie: Vegetation.
Klassifikation:	Möglichkeitsbasierte Klassifikation. Merkmale: TM2, TM4, TM5, TM7, Geländehöhe DHM25. Postklassifikation: Modusfilter 5×5 .
Legende:	1: Laubwald 2: Mischwald 3: Nadelwald 0: Nichtwald
Bodenreferenz:	Waldbestandeskarte Brennwald/Schellenberg aus IR-Luftbilder 1987. Waldbestandeskarte Buochserwald aus IR-Luftbildern 1985. Gesamtgenauigkeit: 57.0%.
Literaturhinweis:	[43]

4.3 Landnutzung im Untersuchungsgebiet Yverdon (monotemporal)

Die zugehörige farbige Abbildung 8 befindet sich in der Mitte der Publikation (S. 31).

Satellitendaten:	Landsat TM Szene 195/027 vom 09.08.1990.
Postsystem-Korrektur:	Elimination der verdoppelten Zeilen.
Geometrische Korrektur:	Empirische Orthorektifizierung. Resampling: 'nearest neighbour' auf 25 m.
Radiometrische Korrektur:	Physikalisch basierte radiometrische Korrektur. Datengrundlage: Radiosondenmessungen und Schätzung der horizontalen Sichtbarkeiten.
Klassifikation:	Hierarchische Klassifikation. 'maximum likelihood' mit den Merkmalen TM3, TM4, TM5, TM7. Möglichkeitsbasierte Klassifikation mit den Merkmalen TM2, TM3, TM4, TM7, Geländehöhe DHM25. 'maximum likelihood' mit den Merkmalen TM1, TM3, TM4, TM5. 'k-means' mit den Merkmalen TM3, TM4, TM 5, TM7. Postklassifikation: kategorienspezifischer Modusfilter 3×3 bzw. 5×5 .
Legende:	1: Laubwald 2: Mischwald 3: Nadelwald 4: Industrieflächen 5: Gebäude 6: Rebbauf Flächen 7: Landwirtschaftliche Nutzflächen 1 8: Landwirtschaftliche Nutzflächen 2 9: Landwirtschaftliche Nutzflächen 3 10: Landwirtschaftliche Nutzflächen 4 11: Alpwirtschaftliche Nutzflächen 12: stehende Gewässer 0: Nullkategorie
Bodenreferenz:	Schweizerische Arealstatistik 1992/97. Gesamtgenauigkeit: 84.0%.
Literaturhinweis:	[43]

4.4 Landnutzung im Untersuchungsgebiet Yverdon (multitemporal)

Die zugehörige farbige Abbildung 9 befindet sich in der Mitte der Publikation (S. 34).

Satellitendaten:	Landsat TM Szene 196/027 vom 08.04.95. Landsat TM Szene 195/027 vom 03.05.95. Landsat TM Szene 195/027 vom 20.06.95. Landsat TM Szene 195/027 vom 22.07.95. Landsat TM Szene 195/027 vom 24.09.95. Spot HRV-XS Szene 050/255 vom 19.07.95.
Postsystem-Korrektur:	Elimination der verdoppelten Zeilen (TM).
Geometrische Korrektur:	Parametrische Orthorektifizierung. Resampling: 'bilinear' auf 25 m.
Radiometrische Korrektur:	Physikalisch basierte radiometrische Korrektur. Datengrundlage: Atmosphärenmodelle und Aerosolmodelle, bildbasierte horizontale Sichtweite.
Klassifikation:	Möglichkeitsbasierte Klassifikation. Merkmale: TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM7.
Legende:	1: Laubwald 2: Nadelwald 3: Siedlungsflächen 4: Baustellen, vegetationslose Flächen 5: Verkehrsflächen 6: Stehende Gewässer 7: Fliessende Gewässer 8: Landwirtschaftliche Nutzfläche
Bodenreferenz:	Arealstatistik 1992/97. Gesamtgenauigkeit 88.7%.
Literaturhinweis:	[46]

4.5 Landwirtschaftliche Kulturen im Untersuchungsgebiet Yverdon

Die zugehörige farbige Abbildung 10 befindet sich in der Mitte der Publikation (S. 34).

Satellitendaten:	Landsat TM Szene 196/027 vom 08.04.95. Landsat TM Szene 195/027 vom 03.05.95. Landsat TM Szene 195/027 vom 20.06.95. Landsat TM Szene 195/027 vom 22.07.95. Landsat TM Szene 195/027 vom 24.09.95. Spot HRV-XS Szene 050/255 vom 19.07.95.
Postsystem-Korrekturen:	Elimination der verdoppelten Zeilen (TM). Korrektur des lokalen Rauschens (TM).
Geometrische Korrektur:	Parametrische Orthorektifizierung. Resampling: 'bilinear' auf 25 m.
Radiometrische Korrektur:	Physikalisch basierte radiometrische Korrektur. Datengrundlage: Atmosphärenmodelle und Aerosolmodelle, bildbasierte horizontale Sichtweite.
Klassifikation:	Neuronale Netzwerke. Merkmale: TC1 (08.04.95), TC2 (08.04.95), TC3 (08.04.95), TC1 (03.05.95), TC2, (03.05.95), TC3 (03.05.95), TC1 (20.06.95), TC2 (20.06.95), TC3 (20.06.95), XS1 (19.07.99), XS2 (19.07.99), XS3 (19.07.99), TC1 (22.07.95), TC2 (22.07.95), TC3 (22.07.95), TC1 (24.09.95), TC2 (24.09.95), TC3 (24.09.95), Geländehöhe DHM25, Neigung DHM25, Exposition DHM25.
Legende:	1: Gerste 2: Roggen 3: Weizen 4: Erbsen 5: Kartoffeln 6: Mais 7: Raps 8: Zuckerrüben 9: Kunstwiesen 0: andere
Bodenreferenz:	Feldkartierung 1995. Gesamtgenauigkeit: 76.4%.
Literaturhinweis:	[46]

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Schlussfolgerungen

Von 1990 bis 1998 untersuchte das Geographische Institut der Universität Zürich (GIUZ) im Auftrag des Bundesamts für Statistik eine Vielzahl von Methoden der Satellitenbildverarbeitung mit dem Ziel, die Einsatzmöglichkeiten der Satellitenfernerkundung für die amtliche Statistik, namentlich für die Areal- und Umweltstatistik, abzuklären.

Dabei zeigte sich, dass die im Ausland entwickelten Methoden zur Verarbeitung der Satellitendaten in der Schweiz oft nicht oder nur bedingt geeignet waren. Die topografischen Verhältnisse und die Charakteristik der Landnutzung in der Schweiz führten dazu, dass sowohl bei der geometrischen, als auch bei der radiometrischen Korrektur und der Klassifikation neue Methoden entwickelt werden mussten.

Die im Rahmen dieser Forschungszusammenarbeit verfügbaren Ressourcen hätten es nicht zugelassen, in allen Bereichen die notwendigen Tests und Neuentwicklungen durchzuführen. Glücklicherweise konnten jedoch Synergien mit anderen Projekten (insbesondere zum Thema «Waldklassifikation» und «Radiometrie») am GIUZ genutzt werden. Dadurch war es schliesslich möglich, in den verschiedensten Bereichen der Verarbeitung Fortschritte zu erzielen und gleichzeitig operationelle Methoden zu entwickeln. Dieser doppelte Aufbau von Wissen und Erfahrungen ist sowohl aus Sicht des Auftraggebers als auch aus Sicht des Auftragnehmers als Erfolg zu werten.

Die zeitliche und inhaltliche Strukturierung des Forschungsauftrags hat zu einer flexiblen und effizienten Steuerung und Planung beigetragen und zu wertvollen Resultaten geführt. Nachdem in einer ersten Projektphase getestet wurde, inwieweit Satellitendaten grundsätzliche Bedürfnisse der amtlichen Statistik abdecken können, folgten vier weitere Projektphasen von durchschnittlich eineinhalb Jahren. Am Ende jeder Phase wurde der Inhalt der kommenden Projektphase vom Auftraggeber gemeinsam mit dem Auftragnehmer festgelegt. Der Fortgang des Projektes konnte dadurch stets an die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Statistik und der Satellitenfernerkundung angepasst werden.

Ein wichtiger Meilenstein dieser Zusammenarbeit bildete der Entscheid, das im Rahmen des Projektes im GIUZ erlangte Know-how zum BFS zu transferieren. Der Zeitpunkt dieses Entscheids nach rund zwei Dritteln der gesamten Projektdauer scheint rückblickend optimal gewählt worden zu sein.

Bemerkenswert ist, dass während der gesamten Projektdauer kaum personelle Änderungen aufgetreten sind; weder beim Begleitem des Bundesamtes für Statistik noch bei der Projektleitung des GIUZ. Diese Kontinuität hat sicher massgeblich zum erfolgreichen Abschluss des Projektes beigetragen.

Am Ende des Projektes stehen sowohl dem Auftraggeber als auch dem Auftragnehmer Methoden zur Verarbeitung von Satellitendaten und zur Herstellung von Landnutzungsstatistiken zur Verfügung, welche auch im internationalen Vergleich als hoch entwickelt bezeichnet werden können.

5.2 Ausblick

Durch die Resultate dieses Projektes motiviert, hat das Bundesamt für Statistik 1996 beschlossen, gesamtschweizerisch eine Walddifferenzierung mit Hilfe von digitalen Satellitendaten durchzuführen und die Arealstatistik im Bereich Waldmischungsgrad (Laub- Misch- und Nadelwald) zu ergänzen. Die entsprechenden Arbeiten werden im Jahr 2000 abgeschlossen. Der Erfolg dieses Projekts wird die Möglichkeiten weiter konkretisieren, wie die Satellitenfernerkundung für künftige Erhebungen im BFS genutzt werden kann.

Sicher ist, dass sich die Satellitenfernerkundung auch im technischen und methodischen Bereich weiterentwickelt. Seit dem Ende der Forschungszusammenarbeit mit dem GIUZ sind bereits wieder drei neue, wegweisende Satelliten in ihre Umlaufbahn gebracht worden:

- Landsat-7 mit dem Sensor ETM+,
- IKONOS-2, dessen Sensor drei multispektrale Kanäle mit einer Auflösung von 4m und einen panchromatischen Kanal mit einer räumlichen Auflösung von 1m besitzt,
- EOS AM-1 und EOS PM-1, deren Sensor MODIS für die entsprechende Aufgabenstellung konfiguriert werden kann und bei 250m Auflösung in drei, bei 1000m Auflösung in 18 Kanälen misst.

In den kommenden Jahren werden weitere räumlich und spektral hochauflösende Satellitensensoren in ihre Umlaufbahn gebracht: OrbView-4 (Ende 2000), Envisat-1 MERIS (2001), SPOT-5 (2002).

Mit diesen Daten können sicher einige Klassifikationsprobleme gelöst werden, welche zur Zeit die Folge von Mischpixel sind. Doch werden gleichzeitig neue Probleme hinzukommen. Die Informationsmenge wird in Zukunft grösser, Textur- und Formmerkmale sowie die hyperspektralen Eigenschaften der Objekte werden an Bedeutung gewinnen.

Abkürzungen und Fachbegriffe

<i>'banding'</i>	Bandmuster in Zeilen- oder Kolonnenrichtung eines Rasterbildes, hervorgerufen durch unterschiedliche Kalibrierung eines Detektorarrays während der Aufnahme.
<i>Bestandeskarte</i>	Karte der Forstorgane; sie gibt Auskunft über die aktuelle Waldbestockung und -zusammensetzung.
<i>BFS</i>	Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
<i>BRDF</i>	' <i>Bidirectional Reflectance and Distribution Function</i> '; Reflexionscharakteristik eines Objektes im Halbraum.
<i>CORINE</i>	' <i>CoORDinated INformation on the Environment</i> '; Programm der Europäischen Union, welches im Jahre 1985 gestartet wurde und sich aus verschiedenen Projekten (u.a. CORINE Landcover) zusammensetzt.
<i>DHM</i>	Digitales Höhenmodell (auch: Digitales Geländemodell, DGM; 'digital terrain model', DTM); digitale Repräsentation der Höheninformation eines Gebietes, zumeist in Rasterform.
<i>Grauwert</i>	Intensitätswert eines Pixels ('digital number').
<i>Eurimage</i>	Kommerzieller Vertreiber der ESA; Via E. D'Onofrio 212, I-00155 Roma, Italy; http://www.eurimage.it/ .
<i>ESA</i>	' <i>European Space Agency</i> '; europäische Raumfahrtbehörde.
<i>ESRIN</i>	' <i>European Space Research Institute</i> ', Frascati, Italien; durch die ESA gegründetes Zentrum für den Empfang, die Prozessierung und Archivierung von Daten verschiedener Quellen (vornehmlich Satellitendaten).
<i>ETM+</i>	' <i>Enhanced Thematic Mapper</i> '; Sensor auf der amerikanischen Plattform Landsat-7.
<i>FOV</i>	' <i>Field Of View</i> '; totales Gesichtsfeld; Gesamtöffnungswinkel eines Sensors in Messrichtung, vergleiche auch IFOV.
<i>'frame'</i>	Referenzierung einer Szene quer zur Flugrichtung.
<i>GEOSTAT</i>	Geographisches Informationssystem und Servicestelle im Bundesamt für Statistik für raumbezogene Daten (mit Dienstleistungs- und Koordinationsaufgaben).
<i>GIS</i>	Geographisches Informationssystem; generelle Bezeichnung für ein Computersystem zur Erfassung, Verwaltung, Verarbeitung, Analyse und Darstellung raumbezogener Daten aus unterschiedlichen Quellen.
<i>'ground truth'</i>	Bodeninformationen; durch Beobachtung oder Messung in situ (auf oder nahe der Erdoberfläche) gewonnene Informationen, die den aktuellen Zustand eines Objektes während der Datenaufnahme beschreiben [20].
<i>HRMSI</i>	' <i>High Resolution Multispectral Stereo Imager</i> '; Sensor auf der amerikanischen Plattform Landsat-7, räumliche Auflösung panchromatisch: 5m, multi-spektral: 10m.

<i>HRV</i>	‘High Resolution Visible’; opto-elektronische Zeilenkamera, Sensor der französischen Plattformen SPOT-1, -2 und -3.
<i>IFOV</i>	‘Instantaneous Field Of View’; momentanes Gesichtsfeld; Winkel, aus dem ein Detektorelement elektromagnetische Strahlung empfängt, vergleiche auch FOV.
<i>Integrationszeit</i>	Zeit, welche ein Sensor für eine Messung benötigt. Je nach Aufnahmetechnik kann sich dieser Wert auf ein einzelnes Pixel, auf ein Pixelarray oder auf eine Pixelmatrix beziehen.
<i>IR</i>	‘Infrared’, Infrarot; Wellenlängenbereich zwischen 0.7 und 12 (15) μm , vergleiche auch NIR, TIR, VIS und SWIR.
<i>L+T</i>	Bundesamt für Landestopographie; Schweizerische Amtsstelle, die u.a. für die Erstellung der Landeskarten in verschiedenen Massstäben und davon abgeleiteten digitalen Daten zuständig ist.
<i>Lambertianer Strahler</i>	Objekt, dessen Rückstrahlung in allen Richtungen gleich gross ist; diese optische Eigenschaft entspricht einer idealen diffusen Rückstrahlung.
<i>Landnutzungs-kategorie</i>	Art oder Typ der Bodennutzung (in der Schweiz) gemäss dem Kategorienkatalog der Schweizerischen Arealstatistik.
<i>Landsat</i>	‘LAND SATellite’; amerikanische Plattform für die Sensoren RBV, MSS und TM.
<i>LEDA</i>	‘Landsat online Earthnet Data Availability’; Satellitenbilddatenbank der Firma Eurimage für Landsat, AVHRR, MOS und NIMBUS-7; öffentlich zugänglich via Telnet (epocat.esrin.esa.it).
<i>Merkmal</i>	Von Sensoren erfasste bildliche Information der Objekte; unter anderem Grauton, Farbe, multispektrale Signatur, Oberflächenstruktur (Textur), Form oder zeitliches Verhalten.
<i>MESSR</i>	‘Multispectral Electronic Self Scanning Radiometer’; opto-elektronische Zeilenkamera, Sensor auf der japanischen Plattform MOS.
<i>MOS</i>	(1) ‘Modular Optoelectronic Scanner’, auch ‘Multispectral Optical Sensor’; opto-elektronische Zeilenkamera, Sensor auf der indischen Plattform IRS-P3 und (2) ‘Marine Observation Satellite’; japanische Plattform für den Sensor MESSR.
<i>MSS</i>	‘Multispectral Scanner’; opto-mechanischer Abtaster, Sensor auf den amerikanischen Plattformen Landsat-1, -2, -3, -4 und -5.
<i>multitemporal</i>	Arbeitsweise, die mehrere Aufnahmen oder Datenquellen unterschiedlicher Zeitpunkte berücksichtigt.
<i>NIR</i>	‘Near Infrared’, nahes Infrarot; Wellenlängenbereich zwischen 0.7 und etwa 1.3 μm , vergleiche auch VIS, SWIR und TIR.
<i>Pan</i>	Panchromatischer Modus des Sensors HRV.
<i>PAN</i>	‘Panchromatic Camera’; opto-elektronische Zeilenkamera, Sensor auf der indischen Plattform IRS-1C und -1D.

<i>Pixel</i>	‘Picture cell’, auch ‘picture element’; Flächeneinheit eines digitalen Bildes, die durch eine bestimmte Position in der Bildmatrix und durch einen Grauwert, bei Farb- oder Multispektralbildern durch mehrere Grauwerte, gekennzeichnet ist [20].
<i>RBV</i>	‘Return Beam Vidicon’; opto-elektronische Bildkamera, Sensor auf den amerikanischen Plattformen Landsat-1, -2 und -3.
<i>‘resampling’</i>	Vorgang, durch den bei der geometrischen Transformation von Bildern aus einer vorliegenden Grauwertmatrix eine neue berechnet wird; er ist mit einer Interpolation zwischen den Grauwerten des Eingabebildes verbunden [20].
<i>RGB</i>	Rot-Grün-Blau.
<i>RMSE</i>	‘Root Mean Square Error’; Mass für die Annäherung zweier Messreihen.
<i>SAR</i>	‘Synthetic Aperture Radar’; abbildendes Radar-System mit Blick seitlich zur Flugrichtung und mit synthetisch vergrößerter Antennengrösse (Apertur).
<i>SPOT</i>	‘Satellite pour l’observation de la terre’, auch ‘Système Probatoire d’ Observation de la Terre’; französische Plattform für den Sensor HRV.
<i>‘striping’</i>	Streifenmuster in Zeilen- oder Kolonnenrichtung eines Rasterbildes, hervorgerufen durch unterschiedliche Kalibrierung eines Detektors während der Aufnahme.
<i>‘sweep’</i>	Schwenk eines Spiegels über die Erdoberfläche bei einem opto-mechanischen Abtaster; bei TM werden dabei beispielsweise 16 parallele Zeilen abgetastet.
<i>SWIR</i>	‘Short Wave Infrared’; kurzwelliges Infrarot, Wellenlängenbereich zwischen etwa 1.3 und 3.5 μm , vergleiche auch VIS, NIR und TIR.
<i>TIR</i>	‘Thermal Infrared’; langwelliges, emittiertes Infrarot, Wellenlängenbereich zwischen 6 und 12 (15) μm , vergleiche auch VIS, NIR und SWIR.
<i>TM</i>	‘Thematic Mapper’; opto-mechanischer Abtaster, Sensor auf den amerikanischen Plattformen Landsat-4 und -5.
<i>‘track’</i>	Nadirlinie eines Satellitenüberfluges; auch ‘path’.
<i>VIS</i>	‘Visible’; sichtbare elektromagnetische Strahlung, Wellenlängenbereich zwischen etwa 0.4 und 0.7 μm , vergleiche auch NIR, SWIR und TIR.
<i>WRS</i>	‘World Reference System’; Raster aus ‘tracks’ und ‘frames’ zur genauen Referenzierung einer Landsat-Szene.
<i>XS</i>	Multispektraler Modus des Sensors HRV.

Literatur

- [1] Ahern, F.J., D.G. Goodenough, S.C. Jain, V.R. Rao und G. Rochon (1977): Use of clear lakes as standard reflectors for atmospheric measurements. In: *Proc. of Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, S. 583-594
- [2] Ahmad, W., L.B. Jupp und M. Nunez (1992): Land cover mapping in a rugged terrain area using Landsat MSS data. *International journal of remote sensing*, 13(4):673-683
- [3] Baker, J.R., S.A. Briggs, V. Gordon, A.R. Jones, J.J. Settle, J.R.G. Townshend und B.K. Wyatt (1991): Advances in classification for land cover mapping using SPOT HRV imagery. *International journal of remote sensing*, 12(5):1071-1085
- [4] Banon, G.J.F., und J. Barrera (1989): Morphological filtering for striping correction of SPOT images. *Photogrammetria*, 43:195-205
- [5] Berk, A., L.S. Bernstein und D.C. Robertson (1989): *MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7*. GL-TR-89-0122, U.S. Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom
- [6] Bernstein, R. (1983): Image geometry and rectification. In: *Manual of remote sensing*, American Society of Photogrammetry, Falls Church, S. 873-922
- [7] Bitter, P. (1990): *Einbau von Landsat Thematic Mapper-Daten in ein Wald-Informationssystem*. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- [8] Blonda, P.N., G. Pasquariello, S. Losito, A. Mori, F. Posa und D. Ragno (1991): An experiment for the interpretation of multitemporal remotely sensed images based on a fuzzy logic approach. *International journal of remote sensing*, 12(3):463-476
- [9] Brüschi, W. (1991): *Passpunktlose Koordinatenberechnung aus den Zusatzdaten eines SPOT-Stereobildpaares – Ein Beitrag zur Herstellung digitaler Geländemodelle aus Satellitenbildern*. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- [10] Buckland, S.T., und D.A. Elston (1994): Use of groundtruth data to correct land cover area estimates from remotely sensed data. *International journal of remote sensing*, 15(6):1273-1282
- [11] Bundesamt für Statistik (1992a): *Die Bodennutzung der Schweiz, Arealstatistik 1979/85, Resultate nach Gemeinden*, Bern
- [12] Bundesamt für Statistik (1992b): *Die Bodennutzung der Schweiz, Arealstatistik 1979/85, Kategorienkatalog*, Bern
- [13] Bundesamt für Statistik (1996): *Arealstatistik Schweiz, Walddifferenzierung mit digitalen Satellitendaten*. Projekt-Kurzdarstellung, Bern
- [14] Catalini, M. (1997): *Neuronale Netzwerke in der Satellitenbildklassifikation*. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- [15] Chavez, P.S. (1988): An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 24(3):459-479

- [16] Chavez, P.S. (1989): Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 55(9):1285-1294
- [17] Congalton, R.G. (1991): A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, 37(1):35-46
- [18] Darvishsefat, A.A. (1995): *Einsatz und Fusion von multisensoralen Satellitendaten zur Erfassung von Waldinventuren*. Remote Sensing Series, Vol. 24, Department of Geography, University of Zurich
- [19] Demircan, A., und W. Mauser (1994): Yield estimation for corn with multitemporal and multisensoral remote sensing data. In: *Proc. of IGARSS Symposium*, Pasadena, S. 832-834
- [20] Deutsches Institut für Normung (1995): *Photogrammetrie und Fernerkundung – Teil 3: Begriffe der Fernerkundung*. DIN 18716-3 (Entwurf), Ausgabe: 1995-07, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- [21] Dikshit, O., und D.P. Roy (1996): An empirical investigation of image resampling effects upon the spectral and textural supervised classification of a high spatial resolution multispectral image. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 62(9):1085-1092
- [22] Dousse, T. (1998): *Potential multitemporaler Satellitendaten*. Zwischenbericht der Phase V Arealstatistik-Projekt, Geographisches Institut der Universität Zürich
- [23] Dozier, J., und D. Marks (1987): Snow mapping and classification from Landsat Thematic Mapper data. *Annals of Glaciology*, 9:97-103
- [24] Ehrhardt, H. (1990): *Modellorientierte Entzerrung von Thematic-Mapper-Rohdaten*. Forschungsbericht, DLT-FB 90-55, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen
- [25] Ehrler, C. (1993): *Einsatz von Satellitendaten für die Schweizerische Arealstatistik: Radiometrische und geometrische Grundlagen*. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- [26] Eurimage (1996): *LANDSAT*. Eurimage, Rom, Online abrufbar: URL: http://www.eurimage.it/Products/LS_long.html, 07.04.97
- [27] Friedman, D.E., K.L. Friedel, K.L. Magnussen, R. Kwok und S. Richardson (1983): Multiple scene precision rectification of spaceborn imagery with very few control points. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 49(12):1657-1667
- [28] Fusco, L., U. Frei und A. Hsu (1985): Thematic Mapper: operational activities and sensor performance at ESA/Earthnet. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 51(9):1299-1314
- [29] Gonzalez-Alonso, F., und J.M. Cuevas (1993): Remote sensing and agricultural statistics: crop area estimation through regression estimators and confusion matrices. *International journal of remote sensing*, 14(6):1215-1219

- [30] Guinchard, H. (1983): Etude théoretique de la précision dans l'exploitation cartographique d'un satellite à défilement: application à Spot. *Société française de photogrammétrie et télédétection*, 90(2):15-26
- [31] Hallum, C. (1993): A change detection strategy for monitoring vegetative and landuse cover types using remotely-sensed, satellite-based data. *Remote sensing of environment*, 43(3):171-177
- [32] Hanuschak, G.A. (1976): Landsat estimation with cloud cover. In: *Proc. Of LARS*, West Lafayette, S. 11-13
- [33] Haralick, R.M., K. Shanmugan, und I. Dinstein (1973): Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-3: 610-621
- [34] Ho, D., und A. Asem (1986): NOAA AVHRR image referencing. *International journal of remote sensing*, 7(7):1511-1519
- [35] Itten, K.I. (1980): *Grossräumige Inventuren mit Landsat-Erderkundungssatelliten. Landeskundliche Luftbildauswertung im mitteleuropäischen Raum*, Heft 15, Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Bonn – Bad Godesberg
- [36] Kanellopoulos, I., G. G. Wilkinson und A. Chiuderi (1994): Land cover mapping using combined Landsat TM imagery and textural features from ERS-1 Synthetic Aperture Radar imagery. In: *Proc. of SPIE*, 2315:332-341
- [37] Kellenberger, T. (1991): *Dokumentation Dipix-Task 'KT'/'KTB' (Version 1.1)*. Geographisches Institut der Universität Zürich
- [38] Kellenberger, T. (1996): *Erfassung der Waldfläche in der Schweiz mit multispektralen Satellitenbilddaten – Grundlagen, Methodenentwicklung und Anwendung*. Dissertation, Philosophische Fakultät II der Universität Zürich
- [39] Kontoes, C., und J. Stakenborg (1990): Availability of cloud-free Landsat images for operational projects: the analysis of cloud-cover figures over the countries of the European Community. *International journal of remote sensing*, 11(9):1599-1608
- [40] Kraus, K., und W. Schneider (1988): *Fernerkundung: Band 1, Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken*. Ferd. Dümmler Verlag, Bonn
- [41] Kraus, K. (1990): *Fernerkundung: Band 2, Auswertung photographischer und digitaler Bilder*. Ferd. Dümmler Verlag, Bonn
- [42] Leiss, I.A. (1993): *Einsatz von Satellitendaten für die Schweizerische Arealstatistik: Ergebnisse der Projekt-Phase II*. Abschlussbericht Arealstatistik-Projekt, Geographisches Institut der Universität Zürich
- [43] Leiss, I.A. (1995): *Einsatz von Satellitendaten für die Schweizerische Arealstatistik: Ergebnisse der Projekt-Phase III*. Abschlussbericht Arealstatistik-Projekt, Geographisches Institut der Universität Zürich
- [44] Leiss, I.A., S. Sandmeier, K. Itten, T. Kellenberger (1995b): *Use of Expert Knowledge and Possibility Theory in Land Use Classification*; Proceedings of EARSeL 15th Symposium, Basel, Switzerland

- [45] Leiss, I.A. (1997): *Einsatz von Satellitendaten für die Schweizerische Arealstatistik: Ergebnisse der Projekt-Phase IV*. Abschlussbericht Arealstatistik-Projekt, Geographisches Institut der Universität Zürich
- [46] Leiss, I.A. (1998): *Landnutzungskartierung mit Hilfe multitemporaler Erdbeobachtungs-Satellitendaten*. Dissertation, Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Zürich
- [47] Müller, P. (1997): *Multisensorale Klassifikation von Satellitendaten basierend auf der 'possibility theory'*. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- [48] Murphy, J.M., F.J. Ahern, P.F. Duff und A.J. Fitzgerald (1985): Assessment of radiometric accuracy of Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper data products from Canadian production systems. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 51(9):1359-1369
- [49] National Point of Contact (1997): *National Point of Contact*. NPOC Switzerland, Online abrufbar: URL: <http://www.vision.ee.ethz.ch/npoc/>, 01.03.00
- [50] O'Brien, D., und J. Handy (1991): Recent image mapping experiments in the surveys, mapping and remote sensing sector. In: *Proc. of National Conference on GIS*, Ottawa, S. 458-470
- [51] PCI (1997): *PACE satellite ortho and DEM*. Manual, V. 6.1, PCI, Ontario
- [52] Pratt, W.K. (1977): *Digital image processing*. John Wiley and Sons, New York
- [53] Richter, R. (1990): A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images. *International journal of remote sensing*, 11(1):159-166
- [54] Sandmeier, St., K.I. Itten und P. Meyer (1994): Improvements of Satellite Land Cover Classifications in Rugged Terrain through Correction of Scene Effects. Final Report. *ESA Study No. 125487*. Remote Sensing Laboratories. Department of Geography, University of Zurich
- [55] Sandmeier, St., und K.I. Itten (1997): A physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 35(3):708-717
- [56] Schanzer, D.L. (1992): An automatic classification procedure for coping with clouds in Landsat TM data. *Canadian journal of remote sensing*, 18(1):30-43
- [57] Schowengerdt, R.A. (1997): *Remote sensing – models and methods for image processing*. Academic Press, San Diego
- [58] Simpson, G. (1994): Crop yield prediction using a CMAC neural network. In: *Proc. of SPIE*, 2315:160-171
- [59] Smith, A.M., D.J. Major, C.W. Lindwall und R.J. Brown (1995): Multi-temporal, multi-sensor remote sensing for monitoring soil conservation farming. *Canadian journal of remote sensing*, 21(2):177-184
- [60] Suter, M. (1992): *Digitales Mosaik der Schweiz aus Landsat Thematic Mapper Satellitendaten*. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich

- [61] Teillet, P.M. (1987): *Documentation Program FIVESS*. Canada Center for Remote Sensing, Ottawa, unpubliziert
- [62] Teillet, P.M., und G. Fedosejevs (1995): On the dark target approach to atmospheric correction of remotely sensed data. *Canadian journal of remote sensing*, 21(4):374-387
- [63] Toutin, T. (1985): *Analyse mathématique des possibilités cartographiques du système de Spot*. Ph.D. Thesis, ENSG
- [64] Toutin, T., und Y. Carbonneau (1989): La multi-stéréoscopie pour les corrections d'images Spot-HRV. *Canadian journal of remote sensing*, 15(2):110-119
- [65] Toutin, T., und Y. Charbonneau (1992): MOS and SEASAT image geometric corrections. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 30(3):603-609
- [66] Toutin, T., Y. Charbonneau und L. Laurent (1992): An integrated method to rectify airborne radar imagery using DEM. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 56(2):247-253
- [67] Toutin, T. (1995): Intégration de données multisources: comparaison de méthodes géométriques et radiométriques. *International journal of remote sensing*, 16(15):2795-2811
- [68] Trachsler, H., O. Kölbl, B. Meyer und F. Mahrer (1980): *Stichprobenweise Auswertung von Luftaufnahmen für die Erneuerung der Eidgenössischen Arealstatistik*, Bern
- [69] Vermote, E.F., D. Tanré, J.L. Deuzé, M. Herman und J.J. Morcrette (1997): Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 35(3):675-686
- [70] Vogel, H. (1998): *Kartierung von geologischen Formationen in der Antarktis mittels Fernerkundung*. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich
- [71] Wang, F. (1990): Improving remote sensing image analysis through fuzzy information representation. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 56(8):1163-1169
- [72] Woodham, R.J., und M.H. Gray (1987): An analytical method for radiometric correction of satellite multispectral scanner data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 25(3):258-271
- [73] Zadeh, L.A. (1978): Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*, 1(1):3-28

Publikationsprogramm BFS

Das Bundesamt für Statistik (BFS) hat – als zentrale Statistikstelle des Bundes – die Aufgabe, statistische Informationen breiten Benutzerkreisen zur Verfügung zu stellen.

Die Verbreitung der statistischen Information geschieht gegliedert nach Fachbereichen (vgl. Umschlagseite 2) und mit verschiedenen Mitteln:

Diffusionsmittel	Kontakt	Diffusionsmittel	Kontakt
Individuelle Auskünfte	032 713 60 11	Online-Datenbank	032 713 60 86
Das BFS im Internet	http://www.statistik.admin.ch	Publikationen zur vertieften Information (zum Teil auch als Diskette)	032 713 60 60
Medienmitteilungen zur raschen Information der Öffentlichkeit über die neusten Ergebnisse	032 713 60 11		

Nähere Angaben zu den verschiedenen Diffusionsmitteln liefert das alle 2 Jahre nachgeführte **Publikationsverzeichnis**. Es kann gratis bezogen werden über 032 713 60 60 oder per E-Mail: order@bfs.admin.ch

Raum und Umwelt

Die Serie «Arealstatistik Schweiz, Die Bodennutzung in den Kantonen, Gemeindeergebnisse 1979/85 und 1992/97» umfasst die folgenden 8 Publikationen:

erschienen sind:

Kantone VD, GE	Bestellnummer 002-9701
Kantone FR, NE, JU	Bestellnummer 002-9702
Kantone BE, LU, OW, NW	Bestellnummer 002-9703
Kantone SO, BS, BL, AG	Bestellnummer 002-9704
Kanton VS	Bestellnummer 002-9705
Kantone ZH, ZG, SH, TG	Bestellnummer 002-9706
Kantone UR, SZ, GL, AR, AI, SG	Bestellnummer 002-9707

Kantone GR, TI
erscheint Anfang 2001

Preise: zwischen Fr. 8.- und Fr. 17.-

Die vorliegende Publikation ist auch in Englisch erhältlich, Bestellnummer: 406-0000

2001 werden erscheinen:

Die Bodennutzung der Schweiz
Walddifferenzierung mit digitalen Satellitendaten
Grundlagen und Ergebnisse

Die Bodennutzung der Schweiz
Publikumsbroschüre zum Bodennutzungswandel
(Kurzdarstellung)

Weitere Publikationen:

Die Bodennutzung der Schweiz; Karte 1:300'000
Preis Fr. 16.-, Bestellnummer 002-8507, Sprache d/f/i/e

Arealstatistik 1979/85; Kategorienkatalog
Preis Fr. 28.-, Bestellnummern: deutsch 002-8502,
französisch 002-8503

Umwelt in der Schweiz 1997, Zahlen, Fakten, Perspektiven
Preis Fr. 28.-, Bestellung: Eidgenössische Drucksachen- und
Materialzentrale, CH-3000 Bern,
Bestellnummern: deutsch 319.404d, französisch 319.404f,
italienisch 319.404i, englisch 319.404eng

Angaben zur Bodennutzung der Schweiz sind auch auf dem Internet abrufbar unter:

http://www.statistik.admin.ch/stat_ch/ber02/asch/dframe1.htm

Die aktuelle Version des GEOSTAT-Benutzerhandbuches ist deutsch und französisch als PDF-Dokument verfügbar unter:

<http://www.statistik.admin.ch/dienstle/elektron/dgeostat01.htm>



Um den Nutzen der Satellitenfernerkundung für die Belange der Arealstatistik abzuklären, suchte das Bundesamt für Statistik die Zusammenarbeit mit dem Geographischen Institut der Universität Zürich. Daraus resultierte 1990 ein erster Forschungsauftrag an dieses Institut, dem bis 1997 vier weitere folgten. In der vorliegenden Publikation sind die im Rahmen dieser fünf Projektphasen verwendeten Methoden und die erzielten Resultate in einer Gesamtschau zusammengefasst.

Nach einer allgemeinen Einleitung wird die Entwicklung und der Einsatz von Fernerkundung aufgezeigt, die in diesem Projekt verwendeten Satellitensysteme und -daten für die Untersuchungsgebiete Beckenried und Yverdon beschrieben und der Datensatz der Bodennutzung Schweiz (Arealstatistik) vorgestellt. Anschliessend werden Fragen zum besten Aufnahmezeitpunkt und zur Verfügbarkeit wolkenloser Satellitendaten der Schweiz diskutiert.

Der Hauptteil des Bandes befasst sich mit den Methoden, welche im Projekt bei der Vorverarbeitung und der Klassifikation zum Einsatz gelangt sind. Nach einem Überblick über die bestehenden Methoden werden die einzelnen Verfahren beschrieben, deren Resultate zusammengefasst und bewertet. Im Resultatteil werden einige Beispiele der produzierten Landnutzungsklassifikationen dargestellt.