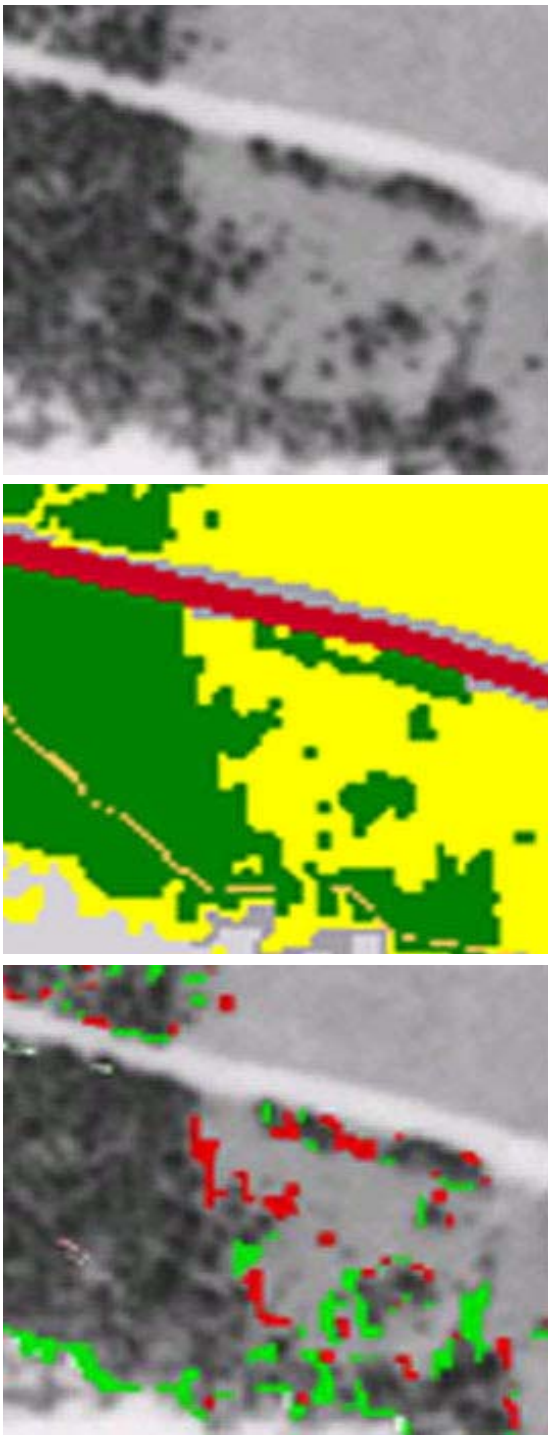
Change Detection mit Luftbildern im Schweizerischen Nationalpark



Diplomarbeit von Nico Lehmann

Geographisches Institut
Universität Zürich

Leitung: Prof. Dr. K. I. Itten

Betreuung: Dr. T. Kellenberger

Zürich 2003

Dank

Ich möchte an dieser Stelle allen danken, die mich bei den Arbeiten und beim Verfassen dieser Diplomarbeit unterstützt und beraten haben. Insbesondere gilt mein Dank folgenden Personen und Institutionen:

Prof. Dr. K. I. Itten für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit, für das Durchlesen des Manuskriptes und für die Verbesserungsvorschläge.

Meinem Betreuer Dr. Tobias Kellenberger, der sich immer sehr viel Zeit für mich genommen hat, wann immer Fragen oder Probleme auftauchten. Den Arbeitsplatz an sonniger Lage und der besten Aussicht hatte ich auch ihm zu verdanken. Für die ausgezeichnete Betreuung möchte ich mich herzlich bedanken.

Dr. Martin Schütz (WSL, Birmensdorf). Er hat sich die Zeit genommen um mit mir die Resultate zu überprüfen.

Dipl. geogr. Sandra Eckert für die fachkundige Unterstützung.

Dr. Britta Allgöwer für die Inputs bezüglich der Datenaufbereitung für das GIS-SNP.

Danken möchte ich weiter:

Olivia

Meinen Studienkollegen Yves, Mätthu und Steiner.

Stöckli, Kienast & Koeppel, Landschaftsarchitekten AG, 5430 Wettingen

Dinu und Piro

Lutzli Lutz

Ein besonders herzlicher Dank geht an meine Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mich immer unterstützt haben. Grüsse an meinen Bruder Micha.

Winterthur, im August 2003 Nico Lehmann

Inhalt

Abbildungen V

Tabellen VII

Glossar und Abkürzungen IX

Zusammenfassung XIII

1 Einleitung

1.1 Problemstellung 1
1.2 Zielsetzung 3
1.3 Aufbau der Arbeit 4

2 Die Untersuchungsgebiete

2.1 Allgemeine Übersicht 5
2.2 Das Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod” 6
2.3 Das Untersuchungsgebiet “Alp La Schera” 7
2.4 Das Untersuchungsgebiet “Alp da Grimmels” 8

3 Grundlagen

3.1 Datengrundlagen 11
3.1.1 Luftbilder 11
3.1.2 Digitales Höhenmodell DHM10 18
3.1.3 Topographische Karten 18
3.1.4 Kalibrierungsprotokolle der Schweizerischen Landestopographie 18

4 Datenvorverarbeitung

4.1 Digitalisieren der Luftbilder 21
4.2 Geometrische Korrektur 22
4.2.1 Grundlagen 22
4.3 Durchführung der geometrischen Korrektur 23
4.3.1 Durchführung der Orthorektifizierung 23
4.3.1.1 parametrische Orthorektifizierung 23

4.3.1.2 nicht-parametrische Orthorektifizierung 26
4.3.2 Durchführung der Koordinatentransformation und “resampling” 27

5 Change Detection (Veränderungsanalyse)

5.1 Einführung 31
5.1.1 Auswahl einiger Change Detection Methoden 32
5.1.2 Einige Methoden im Vergleich 33

6 Datenklassifikation

6.1 Allgemeines zur Datenklassifikation 35
6.1.1 Visuelle Interpretation des Waldes 35
6.1.2 Spektrale Eigenschaften des Waldes 36
6.2 Grundlagen der digitalen Datenklassifikation 38
6.2.1 Automatische Klassifikation 38
6.2.2 Die Trainingsgebiete 39
6.2.3 Die Auswahl der Klassen 39
6.2.4 Klassifikationsverfahren 39
6.2.5 Überprüfung des Klassifikationsresultates 39

7 Objektorientierte Bildanalyse

7.1 Was ist eCognition? 41
7.2 eCognition 42
7.2.1 Multiskalare Bildsegmentierung mit eCognition 42
7.2.2 Objektorientierte, wissensbasierte Klassifikation mit eCognition 44
7.2.2.1 “nearest neighbor”-Klassifikation 45
7.2.2.2 Zugehörigkeitsfunktion (membership function) 47
7.2.2.3 Klassifikationsmerkmale (classification features) 49

8 Durchführung der Klassifikation mit eCognition

8.1 Durchführung der multiskalaren Segmentierung 51
8.2 Durchführung der Klassifikation 54
8.2.1 Klassenhierarchie (class hierarchy) und Definition des Regelwerkes 54
8.2.2 hierarchisches Vorgehen bei der Klassifikation 55
8.3 Die Klassifikationsresultate 56
8.3.1 Alp da Stabelchod 56

8.3.2 Alp da Grimmels 57
8.3.3 Alp La Schera 58
8.4 Genauigkeitsanalyse der Klassifikation 59
8.4.1 Stabilität der Klassifikation (classification stability) mit eCognition 59
8.4.2 Quantitative Analyse mit eCognition 61
8.4.3 Qualitative Analyse der Klassifikation 65

9 Veränderungsanalyse

9.1 Was ist ArcView 3.2? 69
9.2 Vorbereitungen zur Veränderungsanalyse 69
9.2.1 Importieren der Klassifikation 69
9.2.2 Verrechnen der einzelnen Klassifikationen 70
9.2.3 Maskieren der Untersuchungsgebiete für eine detailierte quantitative Auswertung und Abschätzen der von Schattenwurf betroffenen Wiesenfläche 71

10 Resultate

10.1 Ergebnisse der Veränderungsanalyse für das Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod” 73
10.2 Ergebnisse der Veränderungsanalyse für das Untersuchungsgebiet “Alp La Schera” 76
10.3 Ergebnisse der Veränderungsanalyse für das Untersuchungsgebiet “Alp da Grimmels” 79

11 Diskussion

11.1 Allgemein 83
11.2 Diskussion 83

Literatur 91

Anhang 97

Der Schweizerische Nationalpark 98
Vorbemerkung 98
Allgemein 98
Geschichte 99
Klima 100

Geologie 100
Böden 100
Flora und Vegetation 101
Die Tierwelt 102
Ausblick 103

Abbildungen

Abbildung 1.1 Veränderung der Waldfläche 1983/85 - 1993/95. 2
Abbildung 1.2 Entwicklung der sommerlichen Rothirsch-Population im Schweizerischen Nationalpark seit seiner Gründung. 3
Abbildung 1.3 Methodisches Vorgehen. 4
Abbildung 2.1 Übersicht über die Untersuchungsgebiete. 5
Abbildung 2.2 Die Alp da Stabelchod auf dem Schuttfächer. 7
Abbildung 2.3 Blick von der Alp La Schera ins italienische Livigno-Tal. 8
Abbildung 2.4 Panorama von der Alp da Grimmels in Richtung Osten. 9
Abbildung 3.1 Beechcraft SuperKing Air 350C als Plattform für die Luftbildaufnahmen. 11
Abbildung 3.2 Twin Otter DHC-6-300 als Plattform für die Luftbildaufnahmen. 11
Abbildung 3.3 Leica RC 30 12
Abbildung 4.1 Funktionsweise der indirekten Transformation (Rückwärtstransformation). 28
Abbildung 4.2 Übersicht über die geometrisch korrigierten Datensätze. 30
Abbildung 6.1 Reflexion von Vegetation, Boden und Wasser im sichtbaren (VIS) und nahen Infrarotbereich (NIR). 36
Abbildung 6.2 Reflexionseigenschaften von verschiedenen Pflanzenarten. 37
Abbildung 7.1 Übersicht über die verschiedenen Klassifikationsmöglichkeiten mit eCognition. 42
Abbildung 7.2 Das Homogenitäts-Kriterium (homogeneity criterion) 44
Abbildung 7.3 Klassenhierarchie (class hierarchy) in eCognition. 45
Abbildung 7.4 “nearest neighbor”-Klassifikation am Beispiel einer zweidimensionalen Datenmatrix 46
Abbildung 7.5 Vorgehensweise einer Zugehörigkeitsfunktion (membership function) in eCognition. 47
Abbildung 7.6 Die definierten Zugehörigkeitsfunktionen in eCognition. 49
Abbildung 8.1 Übersicht über die Homogenitätskriterien der vier Segmentierungsebenen. 51
Abbildung 8.2 Die vier Segmentierungsebenen für die panchromatischen Aufnahmen und die Infrarotaufnahmen. 53
Abbildung 8.3 Überblick über die Klassenhierarchie (class hierarchy). 54
Abbildung 8.4 Membership function 55
Abbildung 8.5 Datenklassifikation des Untersuchungsgebietes “Alp da Stabelchod”. 56
Abbildung 8.6 Datenklassifikation des Untersuchungsgebietes “Alp da Grimmels”. 57
Abbildung 8.7 Datenklassifikation des Untersuchungsgebietes “Alp La Schera”. 58

Abbildung 8.8 Spuren des Lawinenniederganges von 1979 nördlich der “Alp La Schera”. .. 59
Abbildung 8.9 Stabilität der Klassifikation (classification stability) 61
Abbildung 8.10 Bodenreferenzdaten (TTA Mask) 62
Abbildung 8.11 Visuelle Überprüfung der Klassifikation in ArcView 3.2. 66
Abbildung 8.12 Vergleich der Datenklassifikationen zweier Luftbildtypen (SW und CIR) 67
Abbildung 9.1 Maske für die detailierte quantitative Auswertung der Waldfläche. 71
Abbildung 10.1 Change Detection “Alp da Stabelchod” 74
Abbildung 10.2 Veränderung der Waldfläche im Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod” . 75
Abbildung 10.3 Veränderung der Waldfläche im Untersuchungsgebiet “Alp La Schera” 76
Abbildung 10.4 Change Detection “Alp La Schera”. 77
Abbildung 10.5 dichtes, beinahe undurchdringbares Legföhrengebiet auf unstabilem Boden östlich der “Alp La Schera”. 78
Abbildung 10.6 Veränderung der Waldfläche im Untersuchungsgebiet “Alp da Grimmels” ... 79
Abbildung 10.7 “Alp da Grimmels” 80
Abbildung 10.8 Change Detection “Alp da Grimmels” 81
Abbildung 13.1 Allgemeine Übersicht über die Lage des Schweizerischen Nationalparks. 99
Abbildung 13.2 Übersicht über die Waldgesellschaften im Schweizerischen Nationalpark. . 102
Abbildung 13.3 Übersicht über einige Tierarten 103

Tabellen

Tabelle 3.1 Übersicht über die Aufnahmeparameter der verwendeten Luftbilder. 13
Tabelle 3.2 Übersicht über die verfügbaren Kalibrierungsprotokolle. 19
Tabelle 4.1 Genauigkeitsmasse der Orthorektifizierung mit param. Verfahrensweise. 26
Tabelle 4.2 Genauigkeitsmasse der Orthorektifizierung mit nicht-parametrischer Verfahrensweise. 27
Tabelle 5.1 Übersicht über verschiedene “Change Detection”-Verfahren 31
Tabelle 8.1 Die verwendeten Scale Parameter für die Bildsegmentierung. 52
Tabelle 8.2 Pixelbasierte Fehlermatrix und Genauigkeitsmasse der Klassifikation. 63
Tabelle 8.3 Genauigkeitsmasse der Klassifikationen. 65
Tabelle 9.1 Berechnung der vom Schattenwurf betroffenen Wiesenfläche für das Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod”. 72
Tabelle 10.1 Ergebnisse der Veränderungsanalyse pro Zeitschnitt für die “Alp da Stabelchod” (nur maskiertes Gebiet). 75
Tabelle 10.2 Ergebnisse der Veränderungsanalyse pro Zeitschnitt für die “Alp La Schera” (nur maskiertes Gebiet). 76
Tabelle 10.3 Ergebnisse der Veränderungsanalyse pro Zeitschnitt für die “Alp da Grimmels” (nur maskiertes Gebiet). 79

Glossar und Abkürzungen

ArcView	GIS-Software der Firma ESRI (Environmental Systems Research Institute)
Bildmittelpunkt	Der Bildmittelpunkt ist als Fixpunkt ein wichtiger Punkt auf dem Luftbild und muss bei jeder Auswertung zuerst mit Hilfe der Rahmenmarken bestimmt werden.
CIR	“color infrared”; Bezeichnung für Aufnahme, welche im sichtbaren Spektrum und im nahen Infrarotbereich empfindlich ist (Rot, Grün, Nahes Infrarot)
DHM, DGM	Digitales Höhenmodell oder digitales Geländemodell; digitale Repräsentation der Höheninformation eines Gebietes, oftmals in Rasterform
DHM10	Digitales Höhenmodell des Schweizerischen Nationalparkes mit einer Maschenweite von 10 Meter
dpi	“dots per inch”; Mass für die Auflösung von digitalen Bilddaten
eCognition	Bildanalyse-Software der Firma Definiens AG in München; objektorientierter, wissensbasierter Ansatz
GCP	“Ground Control Point”; Passpunkt für die geometrische Referenzierung eines Datensatzes
GIS	Geographisches Informationssystem
KIA	Kappakoeffizient; Mass für die Genauigkeit einer Klassifikation gegenüber Referenzdaten
LIDAR	“Light Detection and Ranging”; aktives Fernerkundungssystem; Die Reflexion der ausgesandten Laserstrahlen wird mit Hilfe eines optischen Systems aufgefangen und auf einen Detektor fokussiert. Anwendung: Höhenmodelle (DHM, DGM), Oberflächenmodelle (DOM); Auflösung: bis zu 15 Messungen pro Quadratmeter.

MDC	“Minimum Distance Classification”; statistisches Verfahren der geringsten Distanz zur Klassifikation eines Datensatzes anhand repräsentativer Stichproben
MIR	Mittleres Infrarot; Wellenlängenbereich 1’300 nm bis ca. 2’800 nm
MLC	“Maximum Likelihood Classification”; statistisches Verfahren der grössten Wahrscheinlichkeit zur Klassifikation eines Datensatzes anhand repräsentativer Stichproben
MSS	Multispektral-Scanner
Nadir	Bildhauptpunkt; Senkrecht unter dem Projektionszentrum liegender Geländepunkt; frei von jeglicher Verzerrung
NDVI	“Normalized Difference Vegetation Index”; durch Ratio-Bildung ermittelter Vegetationsindex
NIR	“near infrared”; Nahes Infrarot; Wellenlängenbereich 700 nm bis ca. 1’300 nm
Overall Acc.	“Overall Accuracy”; Mass für die Genauigkeit der Klassifikation; Verhältnis der Summe der richtig klassierten Pixel zur Gesamtzahl der zu klassierenden Pixel
pan	“panchromatic”; panchromatisch; Bezeichnung für Aufnahmen, bei denen alle Wellenlängen des sichtbaren Spektrums (400 nm bis 700 nm) in einen Kanal abgebildet werden
PK25	Pixelkarte im Massstab 1:25’000 des Bundesamtes für Landestopographie
Producer Acc.	“Producer’s Accuracy”; Mass für die Genauigkeit der Klassifikation; zeigt an, wie häufig ein Pixel der Referenzdaten richtig klassiert wurde
Rahmenmarken	“fiducial marks”; Rahmenmarken sind an den Ecken oder in der Mitte der Seiten des Luftbildes zu finden. Der Schnittpunkt der Verbindunglinien gegenüberliegender Rahmenmarken ergibt den Bildhauptpunkt.
RC10 und RC30	Reihenbildkamera der Firma Leica; Typ Einzelobjektivkamera; Filmformat 23 cm x 23 cm, automatischer Filmtransport und Auslösevorrichtung

RMSE	“root mean square error”; Standardfehler. Mass für die Genauigkeit der Orthorektifizierung
User Acc.	“User’s Accuracy”; Mass für die Genauigkeit der Klassifikation; zeigt die Wahrscheinlichkeit an, dass es sich bei einem klassierten Pixel der Klasse x auch in Wirklichkeit um das Objekt x handelt
VIS	“visual”; sichtbarer Bereich des Spektrums; Wellenlängenbereich 400 nm bis 700 nm

Zusammenfassung

Die präzise, flächenhafte Überwachung der Waldentwicklung ist eigentlich nur mit Satellitendaten oder Luftbildern effizient durchzuführen. Um langfristige Analysen anzustellen, müssen allerdings Luftbilder herangezogen werden. Dies deshalb, weil Satellitendaten nicht annähernd einen so langen Zeitschnitt abdecken können wie Luftbilder. Da es in dieser Arbeit einen langen Zeitschnitt zu untersuchen gilt und die Untersuchungsgebiete kleinräumig sind, wird mit Luftbildern gearbeitet.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist das Monitoring des Waldes in den Randbereichen von drei ehemaligen Alpweiden im Schweizerischen Nationalpark. Der methodische Schwerpunkt liegt dabei auf der kompletten und ganzheitlichen Durchführung des Projekts. Von der Auswahl der Daten bis zum geeigneten Veränderungsanalyse-Verfahren (Change Detection) wird in dieser Arbeit ausführlich gesprochen. Letztere wird mit der Post-Klassifikationsmethode durchgeführt. Ein wichtiger Teil stellt dabei die Klassifikation der Daten mit Hilfe des wissensbasierten, objektorientierten Ansatzes dar.

Die Untersuchungsgebiete dieser Arbeit sind die “Alp da Stabelchod”, die “Alp La Schera” und die “Alp da Grimmels” im 1914 gegründeten Schweizerischen Nationalpark. Für diese Gebiete stehen Abzüge von Schwarz-Weiss-Aufnahmen aus den Jahren 1973, 1979, 1985 und 1991 zur Verfügung. Zusätzlich werden digitale CIR-Datensätze (Falschfarbenbilder) aus dem Jahre 2000 verwendet, um die Aktualität der Untersuchungen sicherzustellen. Als weitere Hilfsmittel dienen das DHM10, verschiedene topographische Karten der Schweizerischen Landestopographie und einige Kalibrierungsprotokolle.

Zu Beginn wird eine geometrische Korrektur der vorhergehend digitalisierten Luftbilddaten durchgeführt. Für die genaue geometrische Korrektur werden die Kalibrierungsprotokolle, falls vorhanden, herangezogen. Bei den Bilddaten, wo keine Protokolle mehr vorhanden sind, wird der semiempirische Ansatz für die geometrische Korrektur gewählt. Für mehr Präzision kann für die geometrische Korrektur das DHM10 beigezogen werden.

Im nächsten Schritt geht es darum, die Post-Klassifikationsmethode für die Change Detection anzuwenden. Dazu werden die Bilddatensätze mit dem neuartigen wissensbasierten und objektorientierten Klassifikationsansatz des Software-Pakets eCognition klassiert. Die Klassifikation wird mit dem “nearest-neighbor”-Verfahren, gepaart mit wissensbasierten Informationen, durchgeführt. Die Resultate erweisen sich in der visuellen Überprüfung als sehr gut.

Nach der Klassifikation der Bilddaten gilt es diese miteinander zu verrechnen um die Veränderung der Landbedeckung zwischen den Zeitständen zu ermitteln. Diese Arbeit wird mit der GIS-Software ArcView 3.2 der Firma ESRI durchgeführt. Dabei wird ein spezielles Augenmerk auf die Waldfläche gelegt. Mit den Analyse-Tools von ArcView 3.2 lassen sich jene Flächen eruieren, welche zu bestimmten Zeitpunkten von einer Veränderung des Waldes betroffen waren. Dank der Möglichkeit Flächeninhalte zu berechnen, kann mit ArcView nebst einer detaillierten und übersichtlichen qualitativen Analyse auch eine quantitative Veränderungsanalyse durchgeführt werden.

Diese Diplomarbeit zeigt, wie mit Luftbildern eine zuverlässige Waldentwicklunganalyse durchgeführt werden kann.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Bis gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurde das Gebiet des heutigen Schweizerischen Nationalparks intensiv genutzt (Krüsi et al, 1998). Das im Jahre 1914 der Natur überlassene Gebiet entsprach allem anderen als einer ökologisch intakten Landschaft. Forst- und Viehwirtschaft prägten die Artenzusammensetzung praktisch im gesamten Gebiet des Parks. So dominiert im subalpinen Bereich (ca. 1'850 bis 2'300 m.ü.M.) des Parks noch heute die Bergföhre (Pinus montana) (Klaus, 2000). Im Unterwuchs sind relativ häufig die Arve (Pinus cembra), seltener die Lärche (Larix decidua) und vereinzelt die Fichte (Picea abies) anzutreffen (Krüsi et al, 1998). Unterhalb von 1'850 m.ü.M. nimmt die Bedeutung der Fichte auch in der Baumschicht rasch zu. Ohne den jahrhundertelangen Einfluss des Menschen wären die Bergföhren hingegen nur auf Pionier- und Regenerationsflächen sowie an Extremstandorten vorhanden. In der subalpinen Stufe wären vermutlich hauptsächlich Arvenwälder anzutreffen mit der Lärche als wichtigstem Begleiter (Krüsi et al, 1998). Auf den zur Gewinnung von Landwirtschaftsland vom Wald befreiten subalpinen Weiden war das räumliche Vegetationsmuster durch die Viehhaltung geprägt. Dies gilt besonders für die Umgebung der Alphütten, wo sich das Vieh besonders häufig aufhielt und sich somit nährstoffliebende Pflanzen etablieren konnten (Klaus, 2000). Die anderen Teile der Weiden wurden als Mähwiesen zur Gewinnung von Heu verwendet (Klaus, 2000).

Mehr als 80 Jahre nach der Gründung des Schweizer Nationalparks sind noch immer Spuren der ehemaligen landwirtschaftlichen Nutzung in diesem Gebiet zu erkennen (Klaus, 2000). Nach der Aufgabe der landwirtschaftlichen Tätigkeiten konnten die subalpinen Weiden üppig gedeihen. Erst in den dreissiger Jahren des 20 Jahrhunderts wurden sie wieder beweidet. Diesmal allerdings von Rothirschen (Cervus elaphus), deren Bestand sich im Park stark entwickelte (Klaus, 2000).

Im Jahre 1920 gab es praktisch noch keine Rothirsche im Schweizerischen Nationalpark (vgl. Abb. 1.2). Bis 1985 stieg ihre Anzahl aber bis auf ein Maximum von ca. 2'200 Tieren an. Heute weiden ungefähr 2'000 Rothirsche mehrheitlich während den Sommermonaten im Parkgebiet (Schütz et al, 2001). Diese starke Zunahme der Rothirschpopulation führte zur Befürchtung, dass die Verjüngung in den Wäldern gefährdet sei und dass die bewaldete Fläche im Laufe der Zeit abnehmen würde (Blankenhorn et al., 1979; Leibundgut et al., 1985; Schlegel, 1985).

Demgegenüber stehen die verschiedensten Untersuchungen zur Entwicklung der Schweizer Landschaft. Hier nur einige, die sich mit diesem Thema beschäftigen: Schweizerisches Landesforstinventar (LFI) (WSL, 2001) (vgl. Abb. 1.1), Landschaft unter Druck (Koeppel et al, 1991; Sigmaplan, 1994; Sigmaplan, 2001). Alle diese Arbeiten zeigen deutlich, dass die Waldfläche in der Schweiz im Allgemeinen zunimmt. Besonders von der Verwaldung sind ehemalige landwirtschaftliche Flächen in Bergregionen betroffen. Da sich die Landwirtschaft nicht mehr lohnt, wird das Kulturland aufgegeben. Dadurch wird dem Wald eine Möglichkeit geboten sich ohne grosse Störungen auszubreiten.

Die Fernerkundung bietet mit all ihren Instrumenten eine gute Möglichkeit gerade solche zeitabhängige Phänomene zu untersuchen. Inventarisieren, kartieren, analysieren und beobachten sind die Aufgaben der Fernerkundungsspezialisten. Dazu stehen ihnen viele Instrumente zur Verfügung. Satellitendaten zum Beispiel werden dank ihrer immer besseren räumlichen Auflösungsvermögen auch für kleinräumige Untersuchungen herangezogen. Die Luftbilder kön-

nen einzeln eingesetzt werden um einen naturräumlichen Vorgang zu erklären, oder auch in Ergänzung mit Satellitendaten verwendet werden. In Archiven werden analoge und digitale Fernerkundungsdaten gesammelt. Diese Archive sind wertvoll, wenn es darum geht, eine Veränderung in der Landschaft anhand von Fernerkundungsdaten zu untersuchen. Es wurden verschiedene Methoden entwickelt um die Veränderungen von Objekten (Change Detection) zu erkennen. Als sehr genaue Methode hat sich die "Post Classification"-Methode erwiesen. Um die Change Detection durchzuführen, werden bei der "Post Classification"-Methode die multitemporalen Datensätze erst einmal klassiert. Hernach können diese klassierten Datensätze beliebig miteinander verrechnet werden um die Veränderung der Objekte zu ermitteln. Um das Fortpflanzen von Fehlern einzudämmen, ist es wichtig, mit den verwendeten Daten ein gutes Klassifikationsergebnis zu erzielen.

In vielen Bereichen der Fernerkundung kommen je länger je mehr "objektorientierte Klassifikationsmethoden" zur Anwendung. So auch im Prozess der Change Detection. Bei einer objektorientierten Analyse werden in einem Segmentierungsprozess Objekte gebildet, aufgrund welcher dann die Klassifikation durchgeführt wird. Als eine vielversprechende Methode hat sich bis jetzt die objektorientierte Klassifikation mit der Software eCognition der Firma Definiens (Definiens, 2001) erwiesen.

Für die Verschneidung der Klassifikationen, also die eigentliche Change Detection, gibt es keine Empfehlung bezüglich der zu verwendenden Software. Gute Werkzeuge liefert aber zweifelsohne das Softwarepaket ArcView der Firma ESRI.

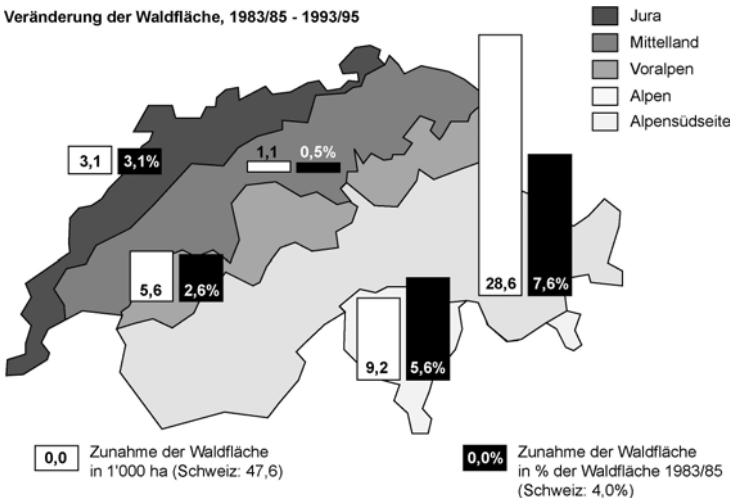


Abbildung 1.1 Veränderung der Waldfläche 1983/85 - 1993/95. (Quelle: WSL 2001; eigene Darstellung)

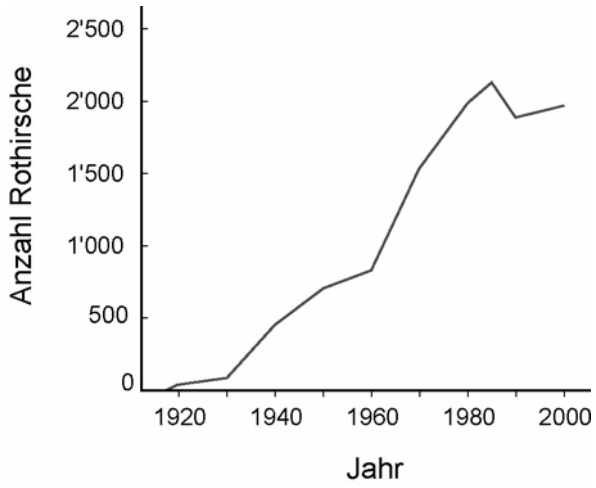


Abbildung 1.2 *Entwicklung der sommerlichen Rothirsch-Population im Schweizerischen Nationalpark seit seiner Gründung. (Quelle: Krüsi et al., 1998; eigene Darstellung)*

1.2 Zielsetzung

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, herauszufinden, ob die ehemaligen Alpweiden *Alp da Stabelchod*, *Alp La Schera* und *Alp da Grimmels* des Schweizerischen Nationalparks vom Zuwachsen durch Wald bedroht sind. In dieser Arbeit wird versucht, dieses Szenario mit Hilfe von Luftbilddaten zu untersuchen.

Der methodische Schwerpunkt an sich liegt in der kompletten und ganzheitlichen Durchführung des Projekts. Von der Auswahl der Daten, über die geometrische Korrektur, bis hin zum geeigneten "Change Detection"-Verfahren soll in dieser Arbeit ausführlich gesprochen werden. Ein wichtiger Teil ist die wissensbasierte, objektorientierte Datenklassifikation im Laufe der "Change Detection".

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden von Standpunkten der Fernerkundung und der Ökologie ausgewertet und beurteilt. Dabei setzt sich der Autor auch mit Fragen der Wildtierökologie auseinander. Aktuelle Forschungsergebnisse der Schweizerischen Nationalparkforschung werden ausgewertet, integriert und für die Interpretation dieser Arbeit konsultiert.

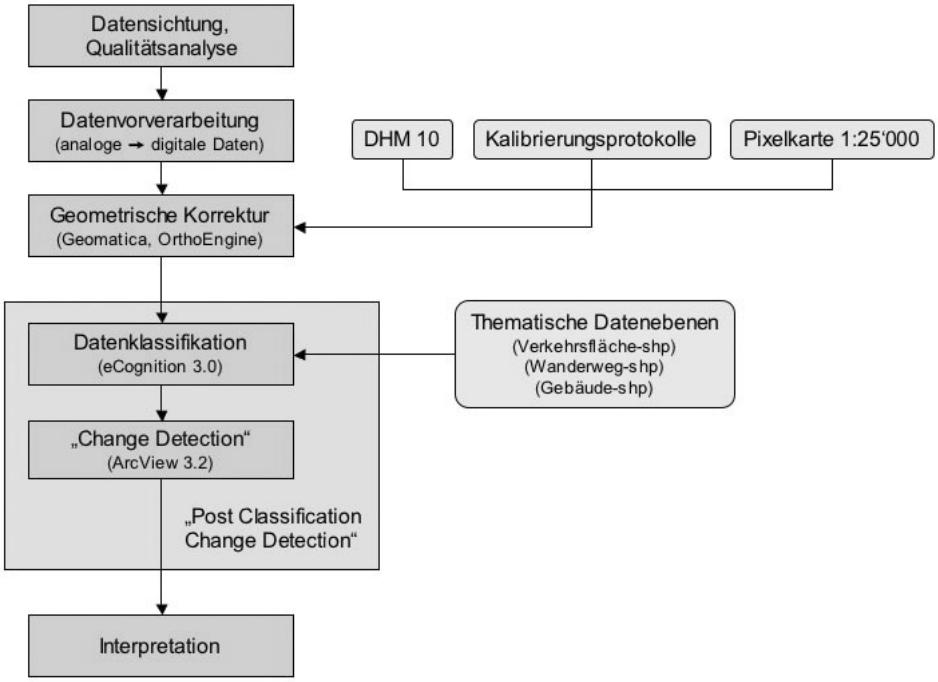


Abbildung 1.3 Methodisches Vorgehen. (vereinfacht)

1.3 Aufbau der Arbeit

Im ersten Kapitel geht es darum, einen Überblick über die Untersuchungsgebiete zu gewinnen. Das zweite Kapitel widmet sich der in dieser Arbeit verwendeten Luftbild-Daten. Es erklärt, welche Grundlagendaten ergänzend zum Einsatz kommen. Die digitale Aufbereitung und die geometrische Korrektur der Luftbilder ist das Thema des vierten Kapitels. Im Kapitel "Change Detection" werden verschiedenen Formen der Veränderungsanalyse kurz besprochen. Das folgende Kapitel "Datenklassifikation" zeigt, welche Ansätze es bei der Klassifikation von digitalen Bilddaten gibt und welche Richtlinien und Besonderheiten es zu beachten gilt. Im siebten Kapitel erfolgt die Einführung in die Software eCognition, mit welcher in dieser Arbeit die Datenklassifikation nach dem objektorientierten und wissensbasierten Ansatz durchgeführt wird. Die Durchführung der Datenklassifikation ist der Inhalt des folgenden Kapitels. In diesem wird ausführlich auf die Arbeit mit eCognition eingegangen. Das neunte Kapitel dient der eigentlichen Beschreibung der Veränderungsanalyse, welche mit dem Programm ArcView durchgeführt wird. Die Resultate der Change Detection für die drei Untersuchungsgebiete sind im Kapitel "Resultate" dargestellt. Die Interpretation der Resultate ist Gegenstand des anschliessenden Kapitels mit dem Titel "Diskussion". Im Anhang findet sich ein allgemeines Kapitel bezüglich des Schweizerischen Nationalparks. Es vermittelt die naturräumlichen Bedingungen des Schweizerischen Nationalparks. Die geschichtlichen Fakten und auch Hintergründe zur aktuellen Forschung sollen aufgezeigt werden.

2 Die Untersuchungsgebiete

2.1 Allgemeine Übersicht

Die Untersuchungsperimeter dieser Arbeit liegen im Kanton Graubünden. Genauer gesagt im Zentrum des Schweizerischen Nationalparks. Die drei Untersuchungsräume entsprechen den ehemaligen Alpweiden Alp da Stabelchod, Alp La Schera und Alp da Grimmels.

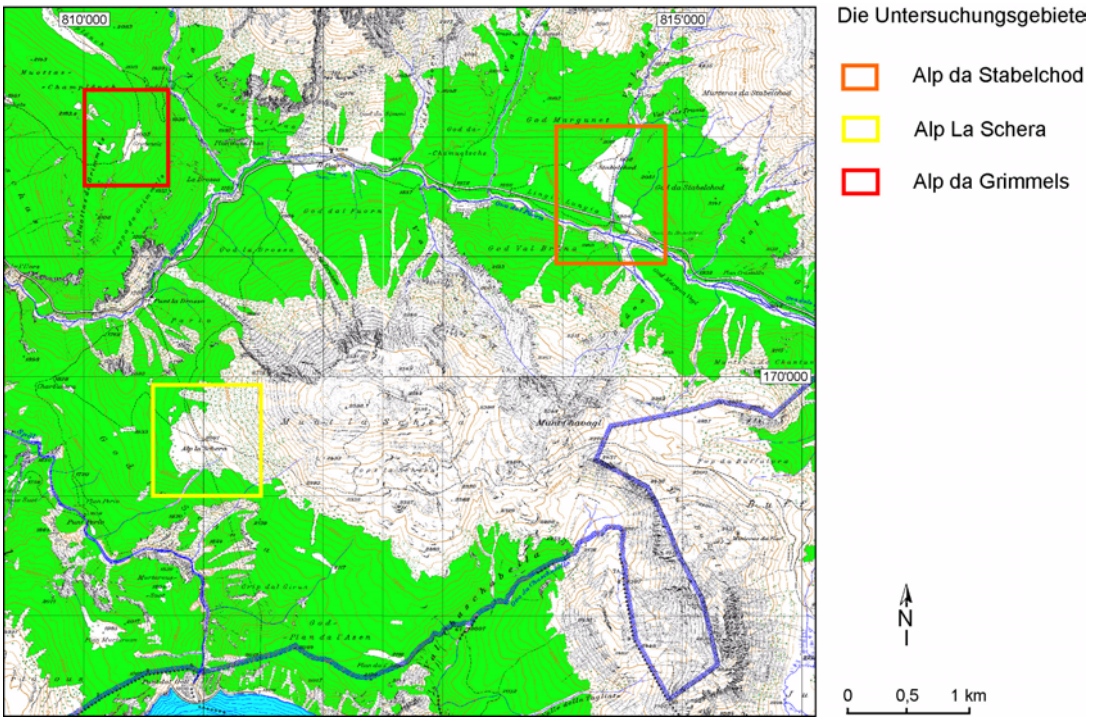


Abbildung 2.1 *Übersicht über die Untersuchungsgebiete. © Bundesamt für Landestopographie (swisstopo).*

Das Gebiet Alp la Schera wird durch die schweizerischen Landeskoordinaten folgendermassen abgegrenzt: 810’000/170’600 (NE-Ecke) und 812’000/168’400 (SE-Ecke). Die Alp da Grimmels hat die Eckpunkte 809’200/173’200 (NE-Ecke) und 811’500/170’500 (SE-Ecke). Die Alp da Stabelchod ist durch die Landeskoordinaten 813’000/170’000 (NE-Ecke) und 815’500/170’500 (SE-Ecke) begrenzt. Es sind die schweizerischen Landeskarten 1218 (Zernez), 1219 (S-charl) und 1238 (Piz Quattervals) im Massstab 1:25’000, welche die drei Untersuchungsräume vollständig abdecken. Die Alp da Grimmels und die Alp da Stabelchod liegen beide nördlich der Ofenpassstrasse, welche von Zernez ins Val Müstair führt und den Schweizerischen Nationalpark in West-Ost Richtung durchläuft. Die Alp La Schera liegt südlich eben-

dieser. Die Alp da Stabelchod liegt auf einer mittleren Höhe von 1'945 m.ü.M.. Die Alp da Grimmels weist eine mittlere Höhe von 2'050 m.ü.M. auf. Die südlichere Alp La Schera liegt auf einer durchschnittlichen Meereshöhe von 2'090 m. Die Topographie ist ziemlich vielfältig. Die Höhendifferenzen in den Untersuchungsgebieten sind zum Teil einige hundert Meter gross. Auch die Expositionen der Alpwiesen sind sehr verschieden. Alp da Stabelchod ist nach Süd-Südwest ausgerichtet. Die Alp da Grimmels weist eine Ost-Südostexposition auf und die Alp la Schera ist nach Südwesten ausgerichtet. Siedlungen gibt es in den Untersuchungsräumen keine. Nur einzelne "Alphütten" (heute als Unterstände für Parkpersonal eingesetzt) befinden sich jeweils auf den untersuchten Alpweiden. Bemerkenswert ist noch, dass ein Autostrassentunnel von Punt la Drossa genau unter der Alp la Schera hindurch an den Livigno-Stausee (Italien) führt. Ansonsten führen nur die Wanderwege des Nationalparks durch die drei Untersuchungsräume. Die Bodenbedeckung besteht vorwiegend aus Nadelgehölzen und Gräsern[1].

2.2 Das Untersuchungsgebiet "Alp da Stabelchod"[2]

Die Alp da Stabelchod liegt am Taleingang des Val da Stabelchod. Sie liegt auf dem Schuttfächer bei der Mündung des Val da Stabelchod ins Tal der Ova dal Fuorn. Die Alp da Stabelchod ist eine ausgedehnte Weiderodung auf dem Schuttfächer.

Im östlichen und mittleren Teil war die Matte üppig und hochwüchsig. Besonders in der nahen Umgebung der alten Sennhütte wuchsen noch um 1930 und 1940 gute Futtergräser (Haarstraussgras, Alpen-Rispengras, Wiesen-Rispengras und Goldhafer). Dies ergaben die Untersuchungen von Braun-Blanquet und Lüdi. In den 70-er Jahren schrieben Bach et al, dass in den vergangenen Jahrzehnten sich minderwertige Futterpflanzen enorm ausgebreitet haben, sodass von der ehemaligen Fettwiese nicht mehr viel zu erkennen sei. Diese tiefgreifenden Veränderungen beruhen auf verschiedenen Ursachen, meinen die Autoren. In den ersten Jahren, als die wildlebenden Weidetiere (bes. Rothirsche) noch wenig zahlreich waren, blieb in einigen Teilen der Weide das Gras ungenutzt. Es wuchs kräftig und bildete im Winter jeweils eine immer mächtiger werdende Streuedecke. Dies hemmte manche Arten in der Entwicklung. Allmählich stellte sich eine neue Gleichgewichtslage ein. Aus Gründen der intensiven Wurzelkonkurenz zwischen der Bergföhre und den Gräsern, konnte sich die Bergföhre auf den besseren Weidestücken nicht durchsetzen. Seit der Parkgründung haben sich die Hirsche stark vermehrt. Besonders die Jungpflanzen der Bergföhre im westlichen Teil der einstigen Alp weisen deutliche Verbissspuren auf. Nebst den Jungtrieben der Bergföhre äsen die Hirsche auch die guten Futterpflanzen ab. Diese kommen dadurch kaum mehr zum Blühen. Da die Düngung des Bodens durch das Wild kaum wirksam ist, verarmt der Boden zusehends. Weniger wertvolle Magerpflanzen breiteten sich stark aus. Gesäumt wird die ehemaligen Alpweide vor allem von aufrechten Bergföhren. Durchsetzt ist der gleichmässige Bestand von einigen Lärchen.

1. für detailiertere Angaben zu den Untersuchungsgebieten siehe Kapitel 2.2, Kapitel 2.3, Kapitel 2.4 und im Anhang "Der Schweizerische Nationalpark"
2. Die Ausführungen in diesem Kapitel beruhen weitgehend auf Bach et al, 1976 und eigenen Beobachtungen.

Abbildung 2.2 *Die Alp da Stabelchod auf dem Schuttfächer. Von der Alp gelangt der Wanderer ins Val da Stabelchod. (Foto: N. Lehmann)*

2.3 Das Untersuchungsgebiet "Alp La Schera"[3]

Auf der Alp La Schera treten einige seltene Silikatpflanzen auf, zum Beispiel Pulsatilla vernalis (Pelz-Anemone) und Trifolium alpinum (Alpen-Klee). Im östlichen Teil der Weide sind einige von der Witterung und Lawinenniedergängen zerzauste Lärchen und Arven zu bewundern. Auf den ehemaligen Alpweiden, welche seit 1911 nicht mehr genutzt werden, wurden ähnliche Veränderungen beobachtet wie auf der Alp da Stabelchod. In den Jahren 1917 bis 1927 stellte Braun-Blanquet eine ausgezeichnete Milchkrautweide fest. Unter anderem wurden folgende Arten aufgenommen: Alpen-Lieschgras, Roter-Schwingel, Wiesenklee, Feuerroter Pippau. Nach fast 80 Jahren sind die Rasen niederwüchsig. Sogar das Steppengras Furchen-Schwingel ist hier bis in eine Höhe von 2050 m vorgedrungen. Die Mulde unterhalb der Hütte war früher ein stark überdüngter Viehläger. Die Stickstoffzeiger mussten auch hier seit der Parkgründung weichen. Die Rasenschmiele verdrängte Arten wie etwa den Echten-Eisenhut. Im Nordosten der Alp befindet sich eine der schönsten Borstgras-Kolonien im gesamten Parkgebiet. Es wächst direkt über dem anstehenden Silikatgestein. Das Borstgras gelangt besonders bei Weidegang auf nährstoffarmen Böden zur Dominanz. Die offene Fläche wird von aufrechten Bergföhren und einigen wenigen Lärchen eingesäumt. Am östlichen Rand der ehemaligen Weide sichern ausgedehnte Legföhrenbestände den recht steilen und unstabilen Hang des Munt La Schera. Wenige mächtige Lärchen ragen aus dem niedrigen Legföhren-Gehölz.

Von der Alp La Schera erhaschen Wanderer einen tollen Blick ins italienische Livigno-Tal. Stark geprägt wird das Tal vom Livigno-Stausee.

3. Die Ausführungen in diesem Kapitel beruhen weitgehend auf Bach et al, 1976 und eigenen Beobachtungen.

Abbildung 2.3 *Blick von der Alp La Schera ins italienische Livigno-Tal. Der Stausee hat im trockenen Sommer des Extremjahres 2003 einen sehr niedrigen Wasserstand. (Foto: N. Lehmann)*

2.4 Das Untersuchungsgebiet "Alp da Grimmels"[4]

Die Alp da Grimmels wurde erst 1932 zum Parkgebiet erklärt. Früher stand im Zentrum der Weide eine Alphütte. Im Gegensatz zu Alp da Stabelchod und Alp La Schera konnte auf Alp da Grimmels anfänglich keine Verbesserung des Rasens festgestellt werden. Dies ist wohl darauf zurückzuführen, dass direkt nach der Aufgabe der Beweidung, eine intensive Beäsung durch Hirsche, Rehe und Gemsen einsetzte. Auch auf Grimmels beginnt sich der Furchen-Schwingel auszubreiten. Er besiedelt vor allem die steileren Hänge der ehemaligen Alpweide. Eingerahmt ist die Alp da Grimmels von aufrechten Bergföhren. Einige wenige Lärchen mischen sich unter die dominanten Bergföhren.

Von der Alp da Grimmels geniessen die Wanderer einen herrlichen Weitblick in Richtung Piz Nair und Ofenpass-Hospiz (Osten). Im Vordergrund Il Fuorn.

4. Die Ausführungen in diesem Kapitel beruhen weitgehend auf Bach et al, 1976 und eigenen Beobachtungen.

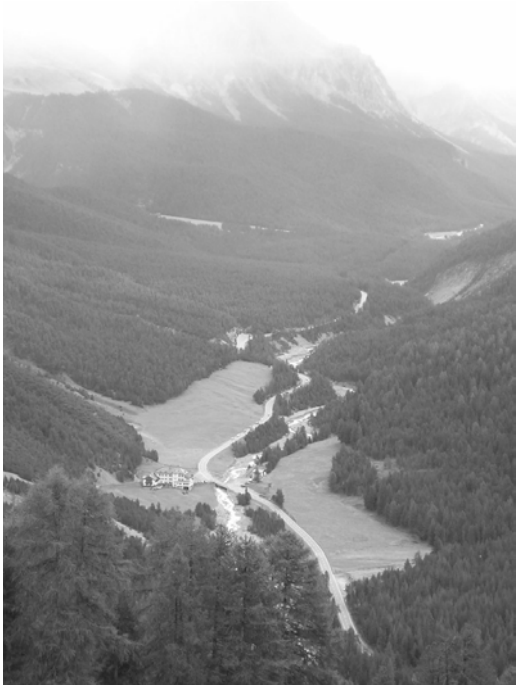


Abbildung 2.4 *Panorama von der Alp da Grimmels in Richtung Osten. Im Vordergrund Il Fuorn an der Passstrasse. Der Piz Nair im Hintergrund ist in Nebel gehüllt. (Foto: N. Lehmann)*

3 Grundlagen

3.1 Datengrundlagen

3.1.1 Luftbilder

Dieser Arbeit stehen zwei unterschiedliche Bildtypen zur Verfügung. Zum einen sind es analoge Schwarzweiss-Luftbilder der Jahre 1973, 1979, 1985 und 1991, und zum anderen sind es digitale Infrarotfarbbilder (CIR) aus dem Jahre 2000. Als Plattform für die Aufnahmen wurden die Flugzeuge der Schweizerischen Landestopographie eingesetzt. Es handelt sich dabei um die zwei Flugzeugtypen: Beechcraft SuperKing Air 350C und Twin Otter DHC-6-300.

Abbildung 3.1 *Beechcraft SuperKing Air 350C als Plattform für die Luftbildaufnahmen. © Bundesamt für Landestopographie (swisstopo).*

Abbildung 3.2 *Twin Otter DHC-6-300 als Plattform für die Luftbildaufnahmen. © Bundesamt für Landestopographie (swisstopo).*

Die Beechcraft Super King Air 350C verfügt über 2 Triebwerke, welche über eine Leistung von je 1’050 PS verfügen. Sie kann eine Flughöhe von bis zu 10 Kilometern erreichen. Die Twin Otter DHC-6-300 ist ausgestattet mit zwei 652 PS starken Triebwerken. Ihre maximale Flughöhe beträgt knapp 8 Kilometer (www.swisstopo.ch, 2003).

Die in dieser Arbeit verwendeten Luftbilder wurden je mit einer Einzelobjektivkamera, der Reihenbildkamera von Leica (RC 8, RC 10, RC 30), aufgenommen (www.swisstopo.ch, 2002).

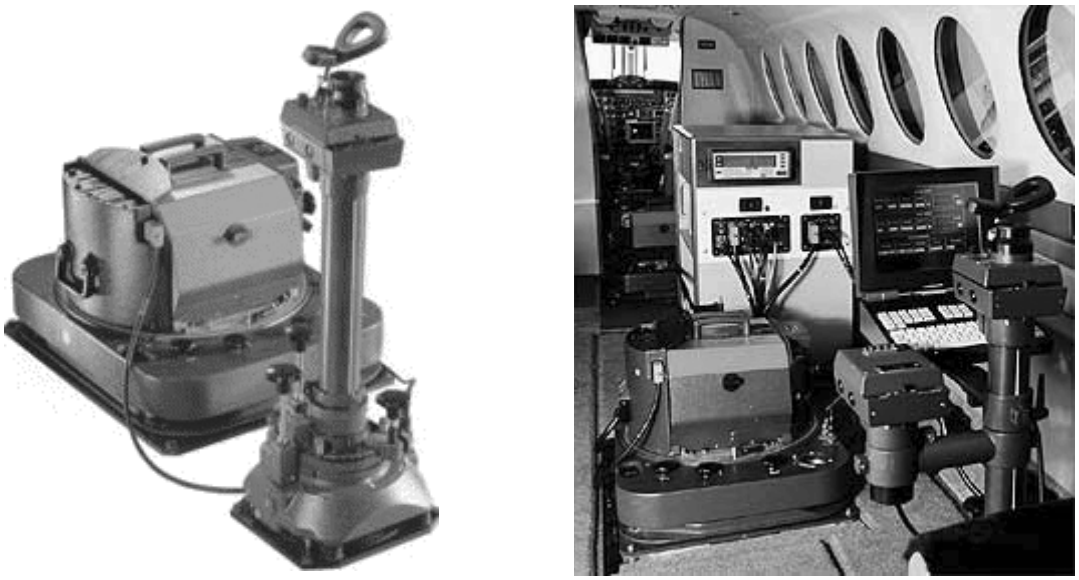


Abbildung 3.3 *Leica RC 30. links: Detailansicht. rechts: Leica RC 30 mit Kamerasteuerung in Beechcraft SuperKing Air 350C montiert. © Bundesamt für Landestopographie (swisstopo)*

Sie besitzt eine automatische Auslösevorrichtung und einen automatischen Filmtransport. Dies ermöglicht Zeitfolgen der Aufnahmen, welche von der Flughöhe, der Objektivbrennweite und der Fluggeschwindigkeit abhängen. Das Filmformat ist 23 cm x 23 cm. Die Aufnahmen von 1973 - 1991 wurden auf Schwarzweissfilme belichtet. Für die Aufnahmen vom Jahre 2000 wurde ein Infrarotfarbfilm verwendet. Dieser besteht aus drei farbempfindlichen Schichten. Eine Schicht wird durch eine infrarotempfindliche Schicht ersetzt. Die Zuordnung der Farben ist ein rein technischer Vorgang. Für die Darstellung des Infrarots wird die Farbe Rot herangezogen. Der rote Wellenlängenbereich wird Grün dargestellt und für den grünen Bereich wird das Blau verwendet. Man spricht bei dieser Art von Photographien auch von Falschfarbenbildern. Denn keine der dargestellten Farben entspricht der tatsächlichen Wahrnehmung. Im Farbdruck erscheinen grüne Gegenstände blau. Rote Gegenstände werden grün dargestellt. Objekte, welche eine starke Infrarotreflexion aufweisen, sind rot dargestellt. (Löffler, 1994)

Die verwendeten Objektive haben Brennweiten von ca. 152 mm - 153 mm. Eine Ausnahme stellen die Aufnahmen vom Jahr 2000 dar. Die wurden mit einem Objektiv aufgenommen, welches eine wesentlich grössere Brennweite hat, nämlich 303 mm. Die vorherrschende Richtung

der Befliegungen war Ost-West beziehungsweise West-Ost. Dies hat den Vorteil, dass die Luftbilder ungefähr nordorientiert und daher direkt mit Karten vergleichbar sind (Huss et al., 1984). Zudem wurden damit die ungünstigen Beleuchtungseinflüsse, welche bei Nord-Süd-Flugrichtung vorkommen würden, umgangen.

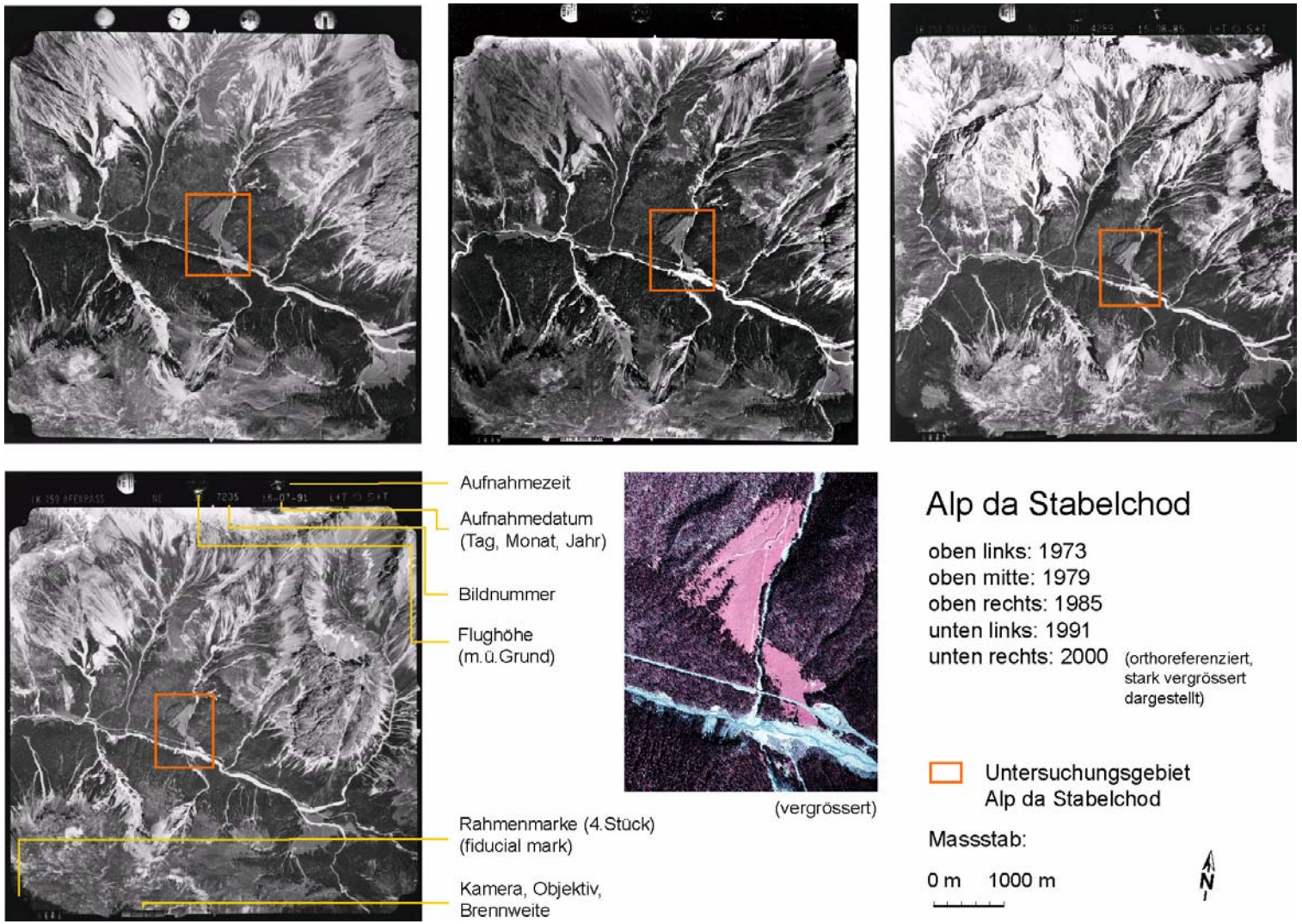
Das gesamte Luftbildarchiv des Geographischen Instituts Zürich stand dieser Arbeit zur Verfügung. Die aktuellsten Bilddaten aus dem Jahre 2000 wurden vom Schweizerischen Nationalpark zur Verfügung gestellt und waren wie einleitend erwähnt digital vorhanden. Im Archiv des GIUZ sind Abzüge der panchromatischen Luftbildaufnahmen seit den frühen 70-er Jahren des 20. Jahrhunderts abgelegt. Ausgesucht wurden demzufolge die folgenden Aufnahmen:

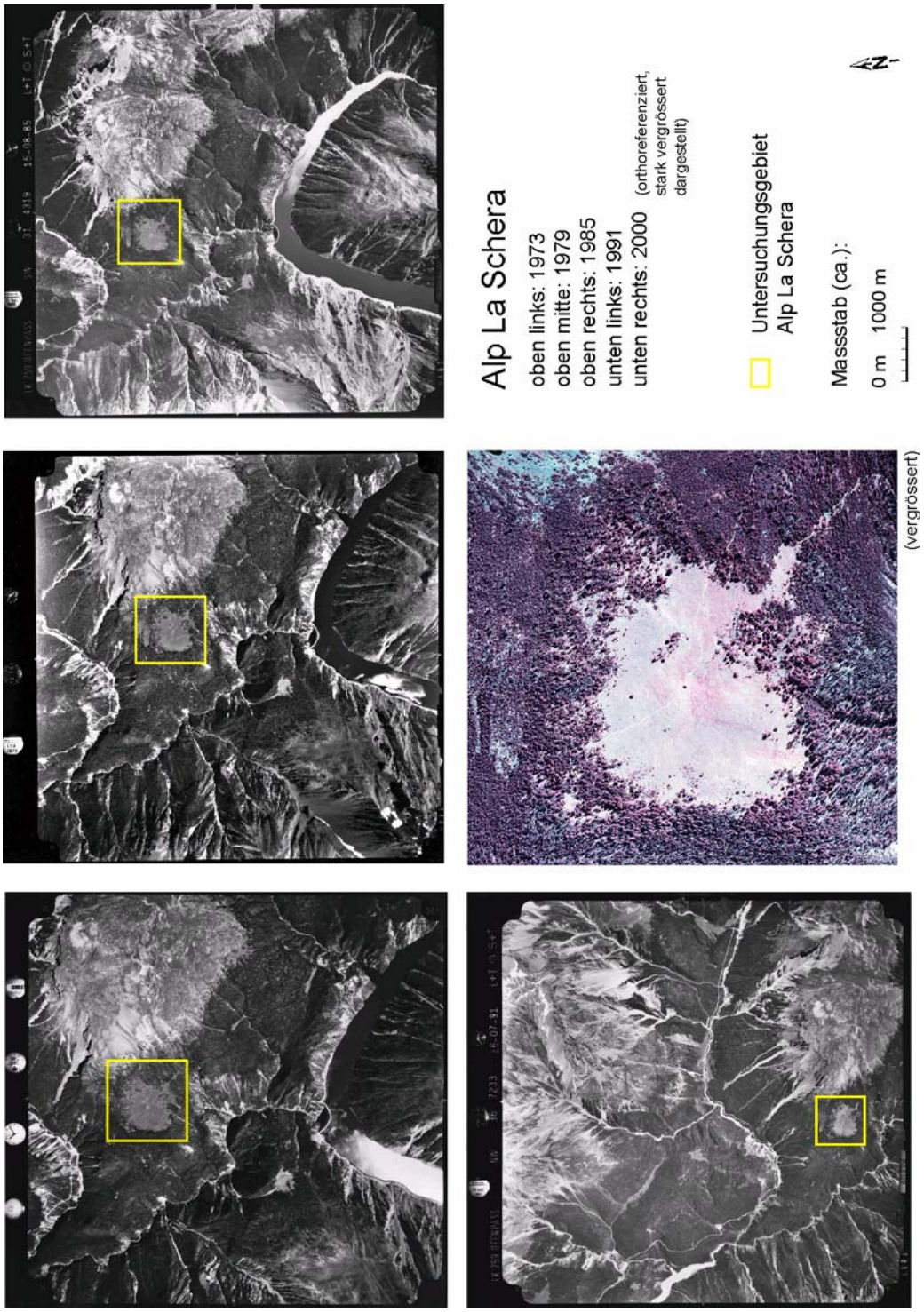
Aufnahme-Datum	Film	Kamera	Objektiv	Brennweite (mm)	Flughöhe (m.ü.G.)	Maßstab ca.	Bild-Nr.	LK 1:25'000	Uhrzeit
12.09.73	S/W	RC 8	UAg 120	152.87	5540	1:34'000	1115	1219	12.46.31
12.09.73	S/W	RC 8	UAg 120	152.87	5548	1:34'000	1118	1218	12.47.11
12.09.73	S/W	RC 10	UAg II	152.87	5155	1:34'000	1185	1238	13.35.46
06.09.79	S/W	RC 10	UAg II	153.02	5840	1:38'000	8124	1238	13.35.46
06.09.79	S/W	RC 10	UAg II	153.02	5640	1:37'000	8177	1218	11.20.55
06.09.79	S/W	RC 10	UAg II	153.02	5635	1:37'000	8180	1219	11.21.32
15.08.85	S/W	RC 10	UAg 15/4	153.37	5500	1:35'000	4287	1218	10.59.27
15.08.85	S/W	RC 10	UAg 15/4	153.37	5490	1:35'000	4289	1219	11.00.13
15.08.85	S/W	RC 10	UAg 15/4	153.37	5475	1:35'000	4319	1238	11.39.08
16.07.91	S/W	RC 10	UAg 15/4	153.37	5500	1:35'000	7233	1218/1238	12.24.33
16.07.91	S/W	RC 10	UAg 15/4	153.37	5500	1:35'000	7235	1219	12.25.06
24.08.00	CIR	RC 30	30/4 NAT-S	303.15	3000	1:10'000	5385	1218	11.23.08
24.08.00	CIR	RC 30	30/4 NAT-S	303.15	3000	1:10'000	5322	1238	11.58.34
24.08.00	CIR	RC 30	30/4 NAT-S	303.15	3000	1:10'000	5242	1219	12.16.46

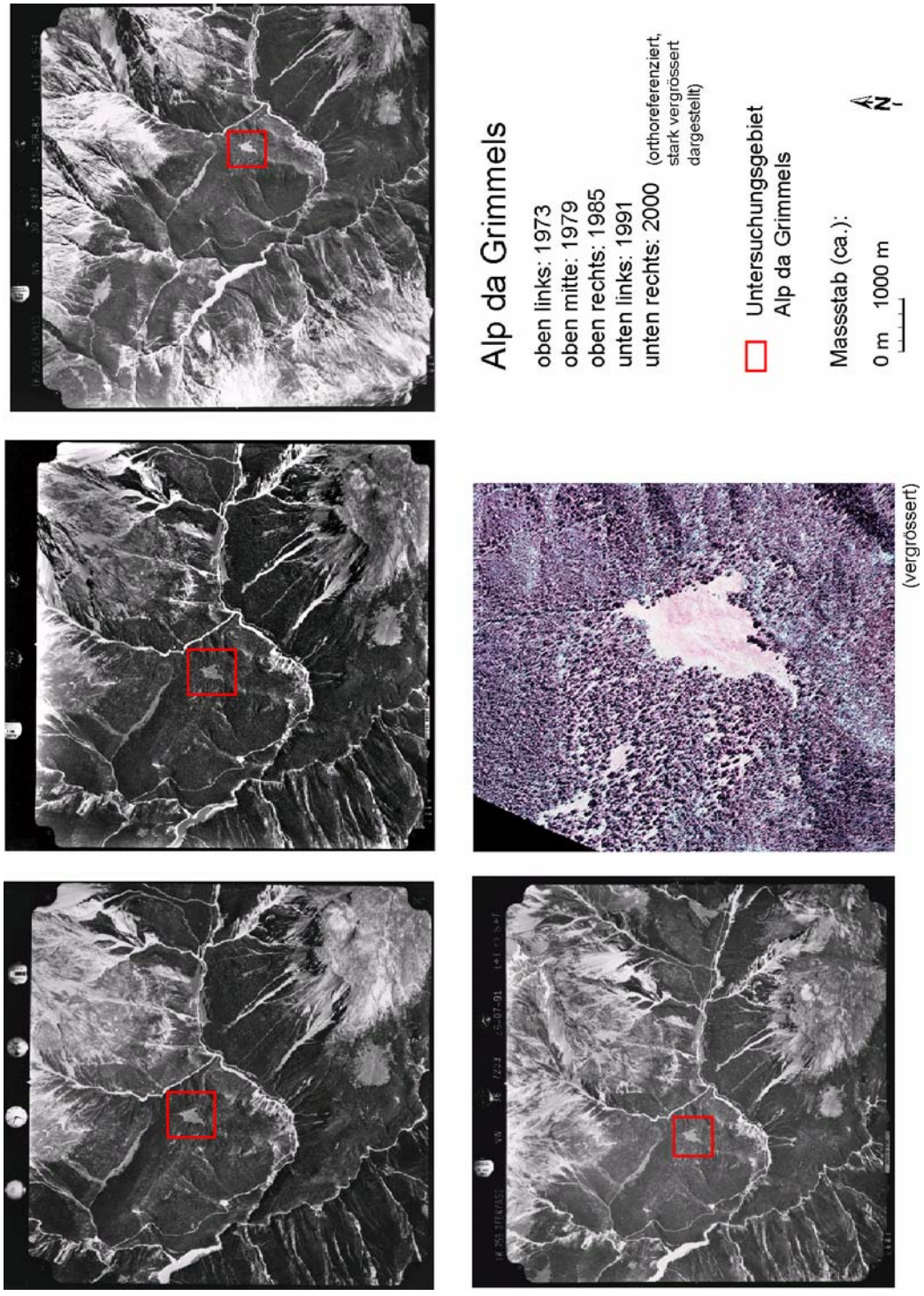
Tabelle 3.1 Übersicht über die Aufnahmeparameter der verwendeten Luftbilder.

Ausgewählt wurden diese, weil sie für die drei Untersuchungsgebiete die besten Einstrahlungsverhältnisse hatten. Die Sonne soll in den Bildern möglichst senkrecht auf die Wiesen scheinen. So wird vermieden, dass Objekte grosse Schatten werfen. Dazu kommt noch, dass die Untersuchungsgebiete möglichst nahe beim Nadirpunkt liegen sollen. Dort ist bekanntlich die Verzerrung am Geringsten und der höhenbedingte Versatz von Bildpunkten kann klein gehalten werden. Leider standen keine Luftbilder zur Verfügung, welche zur gleichen Jahreszeit aufgezeichnet wurden. Es wäre wünschenswert, dass in allen für die Untersuchung herangezogenen Bilder derselbe Stand der Vegetation herrschen würde. In diesen Untersuchungsgebieten mit Nadelholzbeständen sind die Auswirkungen des Vegetationsstandes aber nicht derart dramatisch wie dies bei Laubbaumbeständen der Fall wäre. Ein anderer Parameter, welcher von Bild zu Bild variiert, ist die Aufnahmezeit. Je nach Einstrahlung der Sonne auf die Erde ist auch die von der Kamera erfasste Rückstrahlung anders. Deshalb müssen die Aufnahmezeiten der Bilder möglichst nahe beisammen sein.

Wenn Fernerkundungsdaten miteinander verglichen werden, so sollten die Daten ungefähr den gleichen mittleren Bildmassstab aufweisen. Bei den vorliegenden Bilddaten ist diese Bedingung durch die gering variierende Flughöhe über Grund und Brennweite mehr oder weniger erfüllt. Nur die Luftbilder aus dem Jahre 2000 haben einen grösseren mittleren Bildmassstab. Der liegt bei etwa 1:10’000. Währendem die übrigen Luftbilder mittlere Bildmassstäbe von zirka 1:35’000 aufweisen.


Aufnahmezeit
Aufnahmedatum
(Tag, Monat, Jahr)
Bildnummer
Flughöhe
(m.ü.Grund)
Rahmenmarke (4.Stück)
(fiducial mark)
Kamera, Objektiv,
Brennweite
(vergrössert)
Alp da Stabelchod
oben links: 1973
oben mitte: 1979
oben rechts: 1985
unten links: 1991
unten rechts: 2000
(orthoreferenziert,
stark vergrössert
dargestellt)
Untersuchungsgebiet
Alp da Stabelchod
Massstab:
0 m 1000 m
N


Alp La Schera
oben links: 1973
oben mitte: 1979
oben rechts: 1985
unten links: 1991
unten rechts: 2000
(orthoreferenziert, stark vergrössert dargestellt)
Untersuchungsgebiet
Alp La Schera
Massstab (ca.):
0 m 1000 m
(vergrössert)


Alp da Grimmels
oben links: 1973
oben mitte: 1979
oben rechts: 1985
unten links: 1991
unten rechts: 2000
(orthoreferenziert, stark vergrössert dargestellt)
Untersuchungsgebiet Alp da Grimmels
Massstab (ca.):
0 m 1000 m
N
(vergrössert)

Die vorangehenden Abbildungen zeigen die originalen Luftbilddaten der Jahre 1973, 1979, 1985, 1991 und 2000. Die Massstabsangabe bezieht sich auf die ungefähren Distanzen im Luftbild. Die Darstellungen sind im Massstab 1:4 gehalten.

3.1.2 Digitales Höhenmodell DHM10[5]

Für die Untersuchungsgebiete steht das DHM10, das digitale Geländemodell (DGM, oder auch digitales Höhenmodell DHM) des Schweizer Nationalparks zur Verfügung, das den Schweizer Nationalpark vollständig abdeckt. Es wurde im September des Jahres 1993 gefertigt. Das DHM10 hat in x- und in y-Richung eine Maschenweite von 10 Metern. In z-Richtung liegt die Auflösung im Millimeter-Bereich. Der tiefste Punkt liegt auf 1'374.114 m.ü.M. Der höchste Punkt weist eine Höhe von 3'173.033 m.ü.M. auf. Der Mittelwert liegt bei 2'310.093 m.ü.M. In dieser Arbeit wird es verwendet, um die Luftbilddaten auf die schweizerischen Landeskoordinaten zu referenzieren (geometrische Korrektur).

3.1.3 Topographische Karten

Zur Übersicht dienen, wie im Kapitel 2.1 "Das Untersuchungsgebiet" erwähnt, die Kartenblätter 1218 (Zernez), 1219 (S-charl) und 1238 (Piz Quattervals) im Massstab 1:25'000. Zudem stehen die Karten im Massstab 1:25'000 des Bundesamtes für Landestopographie auch digital zur Verfügung. Die digitalen Landeskarten werden benötigt, um die Geokodierung durchzuführen (Kapitel 4) . Die Kartenblätter 1:25'000 werden vom Bundesamt für Landestopographie aus Schwarzweiss-Luftbildern photogrammetrisch erstellt und unterliegen seit 1970 einem regelmässigen Nachführungszyklus von sechs Jahren. Die Landeskarten kommen etwa 1 bis 2 Jahre nach der Befliegung auf den Markt. So lange dauert es, bis die Luftbilder ausgewertet sind, der Photogrammeter Unsicherheiten im Feld überprüft hat und der Druck erfolgt ist. Die Kartengeometrie basiert auf einer schiefachsigen, winkeltreuen Zylinderprojektion (Mercator) mit dem Berührungspunkt bei der "Alten Sternwarte" in Bern (Koordinatenzentrum: 600'000/200'000 [7° 26' 22.5'' N / 45° 57' 88.66'' E]). Die Äquidistanz der Höhenkurven beträgt 10 m (20 m im Alpengebiet). Die absolute geometrische Lokalisationsgenauigkeit der Landeskarten 1:25'000 liegt zwischen 2.5 m und 7.5 m (Bundesamt für Landestopographie, 1992).

3.1.4 Kalibrierungsprotokolle der Schweizerischen Landestopographie

Um die Bilddaten lagerichtig zu orthorektifizieren, ist es von Vorteil, wenn die Aufnahmeparameter der Luftbilder bekannt sind. Mit deren Hilfe kann die Verzerrung im Luftbild und auch die Verzerrung der Papierabzüge korrigiert werden. Die Kalibrierungsprotokolle der Schweizerischen Landestopographie sind bezüglich der verwendeten Kamera und Linse kategorisiert. Leider sind aber nicht für alle Kamera-Linsen-Kombinationen die Kalibrierungsprotokolle archiviert. Diejenigen die aufbewahrt wurden, können gratis von der Schweizerischen Landestopographie per Internet als PDF-Files heruntergeladen werden (www.landestopographie.ch/de/image/LBcalib.html). In den Kalibrierungsprotokollen sind Angaben über den Kamera-, Linsen- und Filmtyp, Brennweite, Bildmittelpunkt und Rahmenmarken vermerkt.

5. Die Ausführungen in diesem Kapitel beruhen weitgehend auf www.geo.unizh.ch, 2002.

Bei der Auswahl der Kalibrierungsprotokolle muss darauf geachtet werden, dass die Objektiv-Nummer identisch ist und das Datum des Protokolls vor dem Aufnahmedatum des Luftbildes liegt.

Bild-Nr.	Aufnahmedatum	Objektiv / Objektiv-Nr.	Datum Kalibrierungsprotokoll
1115 - 1118	12.09.1973	15 UAg	20.02.1970
4287 - 4319	15.08.1985	13018	14.05.1985
7233 - 7235	16.07.1991	13018	14.05.1985
5242 - 5385	24.08.2000	17124	07.12.1999

Tabelle 3.2 *Übersicht über die verfügbaren Kalibrierungsprotokolle der Schweizerischen Landestopographie.*

4 Datenvorverarbeitung

Um Daten digital auswerten zu können, müssen sie erst einmal in digitaler Form vorliegen. Deshalb müssen die analogen Luftbilder für diese Arbeit digitalisiert werden. Die Korrektur der Geometrie ist unerlässlich, da eine ungenaue Passgenauigkeit der Bilder eine Veränderung der Landbedeckung vortäuschen würde. Weil die Bilder unabhängig voneinander klassiert werden, ist eine radiometrische Korrektur der Bilddaten nicht notwendig. In diesem Kapitel wird zuerst das Digitalisieren der analogen Luftbilder beschrieben. Anschliessend folgt eine detaillierte Beschreibung der geometrischen Korrektur.

4.1 Digitalisieren der Luftbilder

Da die Change Detection digital durchgeführt wird, müssen die analogen Luftbilder gescannt werden, damit eine digitale Auswertung möglich wird. Wie bereits erläutert, stehen dieser Arbeit die Papierabzüge und nicht etwa die Negative zur Verfügung. Die Papierabzüge werden mit 1600 dpi gescannt. Versuche hatten gezeigt, dass höhere Auflösungen keine Verbesserung der Bildqualität ergaben. Die Körnung des Fotopapiers verhinderte eine noch präzisere Auflösung. Die Berechnung der räumlichen Auflösung kann mit den in Kapitel 2 aufgeführten, für jedes Bild spezifischen Parametern durchgeführt werden. Zuerst muss der ungefähre mittlere Bildmassstab errechnet werden. Aus der ersten Beziehung geht hervor, dass der Bildmassstab innerhalb eines Luftbildes nur dann konstant sein kann, wenn die Flughöhe über Grund stets die selbe ist. Je coupierter ein Gelände ist, desto stärker variiert der Massstab. Der im Anschluss ermittelte Bildmassstab stellt demnach den mittleren Bildmassstab dar.

zum Beispiel: Bild 7235 vom 16.07.1991

$$mittlererBildmassstab = \frac{Brennweite(f)}{Flughoehe(H)} \tag{4.1}$$

$$\frac{0,15337m}{5500m} \approx 1/35860 \tag{4.2}$$

Mit Hilfe dieses mittleren Bildmassstabs kann die räumliche Auflösung ermittelt werden. Eine Strecke von einem inch beträgt in diesem Luftbild (Nr. 7235 vom 16.07.1991):

$$0.0254m \times 35860 = 910.844m \tag{4.3}$$

Nun wird das Luftbild mit einer Auflösung von 1600 dpi gescannt. Daraus folgt eine räumliche Auflösung des digitalisierten Luftbildes von:

$$\frac{910.844m}{1600} \approx 0.570m \tag{4.4}$$

Da die Aufnahmeparameter für die analogen Luftbilder beinahe identisch sind, resultiert nach dem Scanvorgang für alle Szenen eine räumliche Auflösung von ungefähr 60 cm x 60 cm Pixelgrösse.

Die räumliche Auflösung der digitalen Bilddaten aus dem Jahre 2000 ist wesentlich feiner als die errechneten 60 cm Pixelgrösse bei den digitalisierten Luftbildern. Sie liegt im Bereich von 20 cm x 20 cm Pixelgrösse.

4.2 Geometrische Korrektur

4.2.1 Grundlagen

Um die Bilddaten sinnvoll und lagegetreu mit anderen raumbezogenen Daten verwenden zu können, müssen sie in einer gemeinsamen Referenzgeometrie vorliegen. Dieser Vorgang wird Georeferenzierung genannt. Die Bilddaten sind dann georeferenziert, wenn jedes Pixel einer kartographischen Abbildung eindeutig zugeordnet werden kann (Kappas, 1994). Es gibt grundsätzlich zwei Methoden, um die Georeferenzierung durchzuführen:

- parametrische Verfahren

- nicht-parametrische Verfahren

Bei den parametrischen Verfahren wird versucht, jedem Pixel einen Platz im Outputbild zuzuweisen. Es wird also angestrebt, pixelweise die Aufnahmegeometrie zu rekonstruieren. Dabei werden präzise Angaben über die Lage und die Orientierung des Aufnahmesystems zur Zeit der Aufnahme vorausgesetzt, wie auch präsise Sensorparameter. Zusätzlich sind Bodenreferenzpunkte notwendig. Bodenreferenzpunkte werden auch GCP's (Ground Control Points) oder Passpunkte genannt. Diese müssen in den Rohdaten wie auch in der Referenzgeometrie eindeutig identifizierbar sein (Kellenberger, 1996). Diese parametrischen Verfahren eignen sich bei flugzeuggestützten Sensoren. Bei Satellitendaten werden die benötigten Parameter von den Satellitenbetreibern häufig nicht oder teilweise mit ungenauen, resp. falschen Angaben geliefert (Ehrler, 1993). Aktuell werden aber die parametrischen Verfahren auch bei Satellitendaten zur Georeferenzierung immer häufiger verwendet.

Bei den nicht-parametrischen Verfahren wird die Geometrie des Bildes erfasst, ohne den Abbildungsvorgang genau zu kennen. Es wird versucht, mittels von Passpunkten eine Transformationsfunktion zu berechnen. Diese ermöglicht eine Berechnung der Bilddaten auf die Referenzgeometrie. Es werden also Näherungslösungen gesucht, die die Beziehungen zwischen Pixelkoordinaten im Satellitenbild und Kartenkoordinaten der entsprechenden Punkte am Boden beschreiben (Suter, 1995). Diese nicht-parametrischen Methoden kommen vor allem bei Satellitendaten zur Anwendung, da die Flugbahn stabil und die Geländeunterschiede im Verhältnis zur Flughöhe sehr klein sind. Aber auch bei Luftbildern können diese Ansätze angewendet werden. Dann nämlich, wenn die Angaben zur Aufnahmegeometrie des Bildes nicht mehr vorhanden sind, oder ein fehlerhaftes Kalibrierungsprotokoll vorliegt.

Für die Georeferenzierung wird in dieser Arbeit das orthogonale Koordinatensystem der Schweizerischen Landeskarte verwendet. Der Einbezug eines digitalen Geländemodells ist für die nicht-parametrischen Verfahren unumgänglich, aber auch bei parametrischen Methoden durchaus hilfreich. Wenn ein Geländemodell bei der geometrischen Korrektur verwendet wird, so nennt man den Georeferenzierungsprozess auch Orthorektifizierung. Dabei werden topographiebedingte Verzerrungen bei der Korrektur der Verzerrung berücksichtigt (Leiss, 1998).

4.3 Durchführung der geometrischen Korrektur

4.3.1 Durchführung der Orthorektifizierung

Es ist das Ziel der Orthorektifizierung, die Luftbilder in die Geometrie der Schweizerischen Landeskoordinaten zu bringen. Die Orthorektifizierung wird mit dem Softwarepaket Geomatica OrthoEngine von PCI (2000) durchgeführt.

In dieser Arbeit werden alle Luftbilder, bis auf den digitalen Datensatz der Alp da Stabelchod aus dem Befliegungsjahr 2000, orthorektifiziert. Die Orthorektifizierung dafür wurde in einer früheren Arbeit durchgeführt (RSL et al., 2003). Da für einige Bilder die Kalibrierungsprotokolle nicht mehr aufzutreiben waren, müssen für einige Datensätze auch nicht-parametrische Ansätze verwendet werden.

4.3.1.1 parametrische Orthorektifizierung

Für die Luftbilder der Jahrgänge 1973, 1985, 1991 und 2000 konnten die Kalibrierungsprotokolle von der Schweizerischen Landestopographie bzw. vom Schweizerischen Nationalpark bezogen werden. In diesen Kalbirierungsprotokollen sind die genauen Aufnahmeparameter (principal point of offset, focal length, fiducial marks, u.s.w.) eingetragen.

Bevor Passpunkte gesucht werden können, muss die Geometrie des Bildes mit Hilfe ebendieser Aufnahmeparameter bestimmt werden. Für die exakte Modellrechnung wäre es gut, wenn möglichst viele Ground Control Points (ca. 80; abhängig von der Gebietsgrösse und der Bodenbedeckung) identifiziert werden könnten. Die Genauigkeit des Modells wird verbessert, wenn die GCP's regelmässig und über das ganze Luftbild verteilt wären. Die Passpunkte sollten aber gemäss Leiss (1998) noch mehr Eigenschaften aufweisen. Passpunkte sollten möglichst Punktobjekte sein und demnach eine möglichst geringe räumliche Ausdehnung haben. Ein hoher Kontrast zu Nachbarobjekten in den Bilddaten ist hilfreich zur genauen Lokalisation. Zudem sollten Passpunkte Objekte sein, welche bei der Herstellung der Karte keine Generalisierung erfahren haben und in der Zeit unveränderlich sind. Ideale Passpunkte weisen auch keine Höhendifferenz zum verwendeten Geländemodell auf (keine Türme, Sendemasten und ähnliches).

Im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks ist es schwierig, genügend identifizierbare Passpunkte zu finden. Eindeutig identifizierbare Objekte wie zum Beispiel Brücken oder Wegkreuzungen sind sehr rar. So können für jedes der Luftbilder nur ca. 25 deutlich identifizierbare Passpunkte lokalisiert werden[6]. Da es in dieser Arbeit um eine sehr kleinräumige Auswertung der Bilddaten geht, spielt es auch nicht eine so grosse Rolle, dass die Passpunkte nicht regelmässig über das Bild verteilt liegen. Es ist vielmehr der Fall, dass die Passpunkte in der nahen Umgebung der drei Untersuchungsräume liegen. Damit wird eine hohe Passgenauigkeit des

6. In den Bilddaten können folgende Objekte als geeignete Passpunkte identifiziert werden:
   - Brücken (2. Klass-Strasse, 6. Klass-Fussweg) über Flüsse und Bäche
   - Einzelbäume, welche in der zeitlichen Abfolge unverändert bleiben
   - Ecken von Gebäuden und Ruinen
   - Abzweigungen bei Wanderwegen (6. Klass-Fussweg)

Modells in den Untersuchungsräumen angestrebt. Die Passpunkte mit zu grossen Residuen werden ausgeschaltet, damit sie in die Modellrechnung nicht einbezogen werden.

Die anschliessende Regressionsrechnung liefert die Residualwerte jedes einzelnen sowie den Standardfehler (RMSE) aller Passpunkte in x- und y-Richtung. In der Regel bilden die Residuen und der Standardfehler einen recht guten Indikator für die Genauigkeit der Orthorektifizierung (Leiss, 1998). Der Standardfehler wird wie folgt berechnet:

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_i - X_{org,i})^2 + (Y_i - Y_{org,i})^2}}{\sqrt{(n-1)}} \tag{4.5}$$

wobei: n = Anzahl Passpunkte

Xi = berechneter x-Wert des Punktes i

Yi = berechneter y-Wert des Punktes i

Xorg,i = ursprünglicher x-Wert des Punktes i

Yorg,i = ursprünglicher y-Wert des Punktes i

Die Tabelle 4.1gibt einen Überblick über die Genauigkeit der geometrischen Korrektur nach parametrischer Vorgehensweise.

Orthorektifizierung	Stabelchod 1973
Grösse der Szene (Ausgabebild)	606 x 766 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 813'930 / 172'100 unten rechts: 814'840 / 170'950
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	29
verwendete Passpunkte	21
Max. RMSE in x-Richtung	3,18 m
Max. RMSE in y-Richtung	2,41 m
Standardfehler (RMSE)	0,84 m

Orthorektifizierung	Stabelchod 1985
Grösse der Szene (Ausgabebild)	606 x 766 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 813'930 / 172'100 unten rechts: 814'840 / 170'950
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	32
verwendete Passpunkte	23
Max. RMSE in x-Richtung	1,87 m
Max. RMSE in y-Richtung	1,34 m
Standardfehler (RMSE)	0,42 m

Orthorektifizierung	Stabelchod 1991
Grösse der Szene (Ausgabebild)	606 x 766 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 813'930 / 172'100 unten rechts: 814'840 / 170'950
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	26
verwendete Passpunkte	19
Max. RMSE in x-Richtung	1,54 m
Max. RMSE in y-Richtung	1,03 m
Standardfehler (RMSE)	0,37 m

Orthorektifizierung	Stabelchod 2000
Grösse der Szene (Ausgabebild)	606 x 766 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 813'930 / 172'100 unten rechts: 814'840 / 170'950
Resampling	*
identifizierte Passpunkte	*
verwendete Passpunkte	*
Max. RMSE in x-Richtung	*
Max. RMSE in y-Richtung	*
Standardfehler (RMSE)	*

Orthorektifizierung	La Schera 1973
Grösse der Szene (Ausgabebild)	600 x 620 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 810'000 / 172'400 unten rechts: 811'500 / 171'600
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	24
verwendete Passpunkte	18
Max. RMSE in x-Richtung	2,15 m
Max. RMSE in y-Richtung	1,72 m
Standardfehler (RMSE)	1,10 m

Orthorektifizierung	La Schera 1985
Grösse der Szene (Ausgabebild)	600 x 620 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 810'000 / 172'400 unten rechts: 811'500 / 171'600
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	26
verwendete Passpunkte	17
Max. RMSE in x-Richtung	2,37 m
Max. RMSE in y-Richtung	0,68 m
Standardfehler (RMSE)	0,73 m

Orthorektifizierung	La Schera 1991
Grösse der Szene (Ausgabebild)	600 x 620 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 810'000 / 172'400 unten rechts: 811'500 / 171'600
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	25
verwendete Passpunkte	16
Max. RMSE in x-Richtung	1,71 m
Max. RMSE in y-Richtung	2,36 m
Standardfehler (RMSE)	1,08 m

Orthorektifizierung	La Schera 2000
Grösse der Szene (Ausgabebild)	600 x 620 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 810'000 / 172'400 unten rechts: 811'500 / 171'600
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	26
verwendete Passpunkte	18
Max. RMSE in x-Richtung	1,62 m
Max. RMSE in y-Richtung	0,92 m
Standardfehler (RMSE)	0,47 m

Orthorektifizierung	Grimmels 1973
Grösse der Szene (Ausgabebild)	467 x 534 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 810'000 / 172'400 unten rechts: 810'700 / 171'600
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	19
verwendete Passpunkte	15
Max. RMSE in x-Richtung	2,94 m
Max. RMSE in y-Richtung	2,37 m
Standardfehler (RMSE)	1,21 m

Orthorektifizierung	Grimmels 1985
Grösse der Szene (Ausgabebild)	467 x 534 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 810'000 / 172'400 unten rechts: 810'700 / 171'600
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	20
verwendete Passpunkte	15
Max. RMSE in x-Richtung	1,63 m
Max. RMSE in y-Richtung	1,82 m
Standardfehler (RMSE)	0,53 m

Orthorektifizierung	Grimmels 1991
Grösse der Szene (Ausgabebild)	467 x 534 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 810'000 / 172'400 unten rechts: 810'700 / 171'600
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	18
verwendete Passpunkte	14
Max. RMSE in x-Richtung	2,18 m
Max. RMSE in y-Richtung	1,95 m
Standardfehler (RMSE)	0,81 m

Orthorektifizierung	Grimmels 2000
Grösse der Szene (Ausgabebild)	467 x 534 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 810'000 / 172'400 unten rechts: 810'700 / 171'600
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	21
verwendete Passpunkte	13
Max. RMSE in x-Richtung	1,76 m
Max. RMSE in y-Richtung	2,03 m
Standardfehler (RMSE)	0,75 m

Tabelle 4.1 *Genauigkeitsmasse der Orthorektifizierung mit parametrischer Verfahrensweise. Das Bild Stabelchod 2000 wurde von J. Lencinos (RSL et al., 2002) orthorektifiziert.*

4.3.1.2 nicht-parametrische Orthorektifizierung

Für die Luftbilder des Jahrgangs 1979 können die Kalibrierungsprotokolle nicht mehr bezogen werden. Deshalb kommen für die Bilddaten dieses Jahrgangs nicht-parametrische Methoden zum Einsatz. Die Bilder werden anhand der Orthophotos des Jahres 1991 orthorektifiziert. Das Vorgehen nennt man image-to-image processing. Auch bei diesen Bildern werden ca. 25 Passpunkte gesucht, welche möglichst in der nahen Umgebung der Untersuchungsperimeter liegen.

Die Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die Genauigkeit der geometrischen Korrektur nach nicht-parametrischer Vorgehensweise.

Orthorektifizierung	Stabelchod 1979
Grösse der Szene (Ausgabebild)	606 x 766 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 813'930 / 172'100 unten rechts: 814'840 / 170'950
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	34
verwendete Passpunkte	21
Max. RMSE in x-Richtung	1,79 m
Max. RMSE in y-Richtung	1,61 m
Standardfehler (RMSE)	0,35 m

Orthorektifizierung	La Schera 1979
Grösse der Szene (Ausgabebild)	600 x 620 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 810'600 / 169'930 unten rechts: 811'500 / 169'000
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	27
verwendete Passpunkte	16
Max. RMSE in x-Richtung	1,48 m
Max. RMSE in y-Richtung	1,09 m
Standardfehler (RMSE)	0,28 m

Orthorektifizierung	Grimmels 1979
Grösse der Szene (Ausgabebild)	467 x 534 Pixel
Koordinaten (Ausgabebild)	oben links: 810'000 / 172'400 unten rechts: 810'700 / 171'600
Resampling	nearest neighbor
identifizierte Passpunkte	28
verwendete Passpunkte	16
Max. RMSE in x-Richtung	1,48 m
Max. RMSE in y-Richtung	1,43 m
Standardfehler (RMSE)	0,64 m

Tabelle 4.2 *Genauigkeitsmasse der Orthorektifizierung mit nicht-parametrischer Verfahrensweise.*

Bis zu diesem Zeitpunkt sind die Modelle der Transformation für alle Bilddaten berechnet. Als letzter Schritt der geometrischen Korrektur wird die Orthorektifizierung aller Bilddaten durch das eigentliche Rechnen der Koordinatentransformation abgeschlossen.

4.3.2 Durchführung der Koordinatentransformation und “resampling”

Grundsätzlich gibt es in der digitalen Bildverarbeitung zwei Transformationsverfahren. Die *direkte Transformation* und die *indirekte Transformation* (Albertz, 2001). Bei der direkten Transformation wird für jedes Pixel des Eingabe-Bildes die Lage im Ausgabe-Bild errechnet und der entsprechende Grauwert aus dem Eingabe-Bild zugeordnet. Das Zwischenergebnis dieser Transformation ist ein ungenaues Bildraster, aus dem die Grauwertmatrix des Ausgabe-Bildes durch Interpolation abgeleitet werden muss. In dieser Arbeit wird die geometrische Korrektur mit einer indirekten Transformation (Rückwärtstransformation) durchgeführt. Vom georeferenzierten Bild wird die entsprechende Pixelposition im unkorrigierten Bild berechnet. Für jedes Pixel im Ausgabe-Bild wird der richtige Grauwert aus dem Eingabe-Bild “geholt” und in die Grauwertmatrix des Ausgabebildes geschrieben. Doppelbesetzungen und Informationslükken werden somit vermieden.

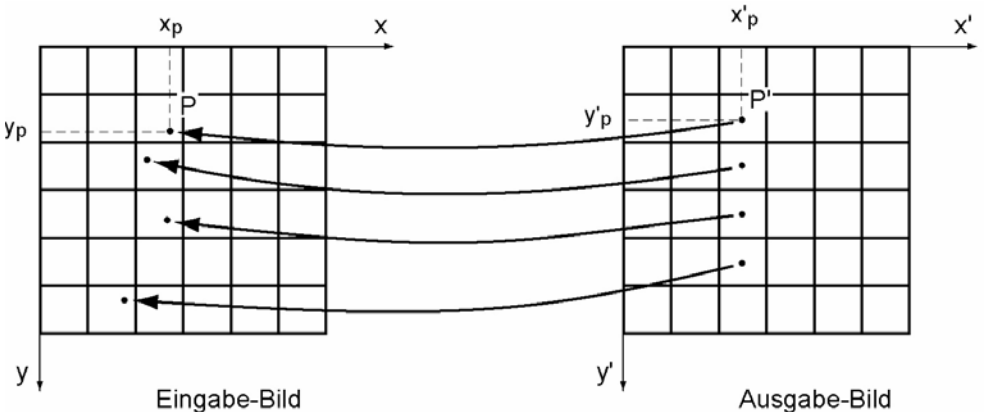


Abbildung 4.1 Funktionsweise der indirekten Transformation (Rückwärtstransformation). (Albertz, 2001; abgeändert)

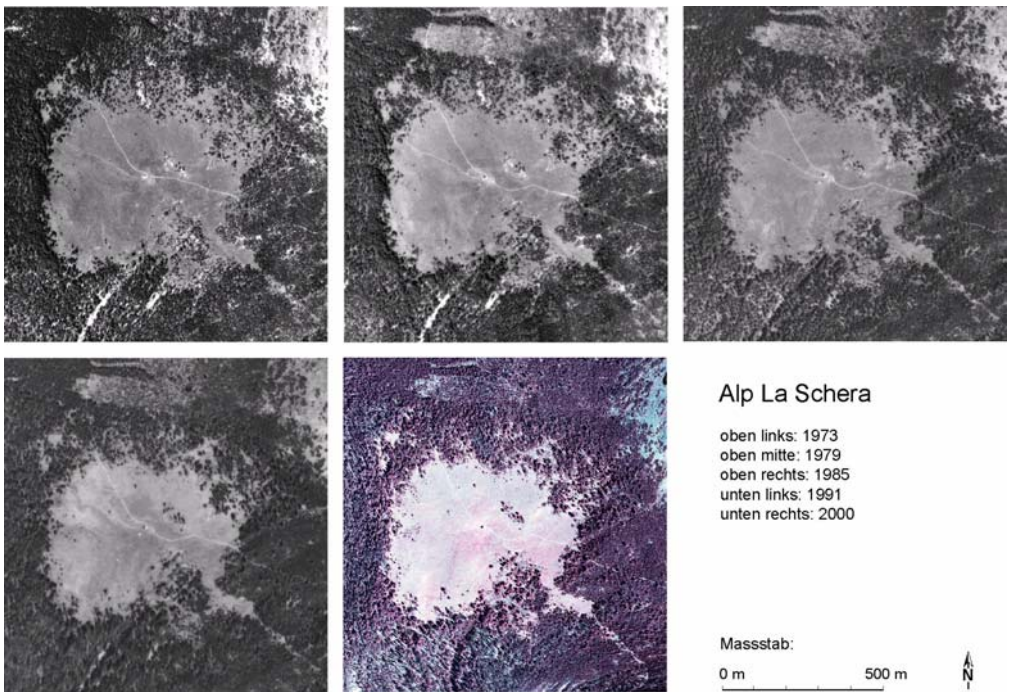
Bei der Überlagerung der beiden Datensätze (Ein- und Ausgabe-Bild) tritt das Problem der Zuordnung der Grauwerte auf. Die Bildelemente des korrigierten Ausgabebildes lassen sich nicht deckungsgleich mit den Bildelementen des Eingabebildes überlagern. Es müssen Verfahren angewendet werden, die es ermöglichen, dem Ausgabebild sinnvolle und ganzzahlige Werte zuzuordnen. Diese Methode wird als "Resampling" bezeichnet. An dieser Stelle sei erwähnt, dass es verschiedene "Resampling"-Verfahren gibt. Sie unterscheiden sich in Rechenaufwand und Genauigkeit der Zuordnung voneinander.

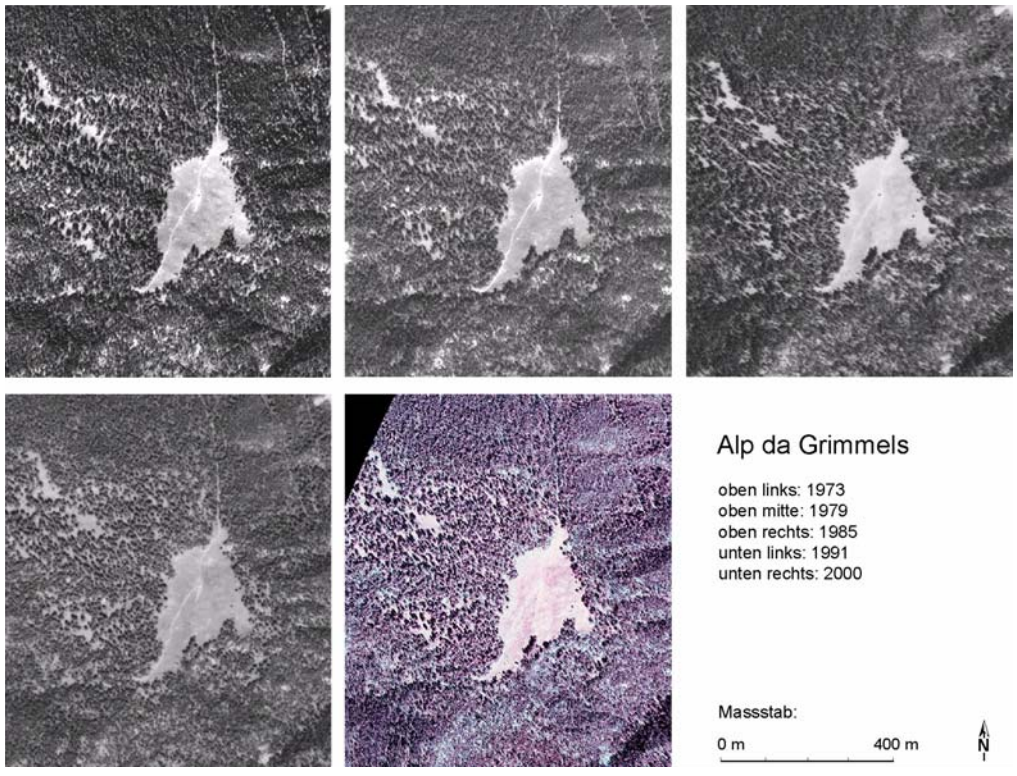
- Verfahren der "nächsten Nachbarschaft"
- Verfahren der "bilinearen Interpolation"
- Verfahren der "bikubischen Interpolation"

Das Verfahren der "nächsten Nachbarschaft" ist relativ einfach durchzuführen. Der Rechenaufwand ist dementsprechend gering. Dabei wird der Grauwert desjenigen Pixels des ursprünglichen Eingabebildes übernommen, welches dem transformierten Pixel am nächsten liegt. Es kann vorkommen, dass nur ein Teil des ursprünglichen Pixels erfasst wird. Der räumliche Versatz kann bei dieser Methode bis zu einem halben Pixel gross sein. Dies kann auf dem Ausgabebild zu einem störenden "Ausfransen" linearer Strukturen führen.

Qualitativ bessere Resultate bringen die "bilineare Interpolation" und die "bikubische Interpolation". Bei diesen beiden Verfahren werden die Grauwerte der Pixel des Ausgabebildes mit Hilfe der jeweils umgebenden Pixel berechnet. Bei der "bilinearen Interpolation" wird der Grauwert des transformierten Pixels durch lineare Interpolation der Grauwerte der vier nächstgelegenen Pixel des Eingabebildes errechnet. Die "bikubische Interpolation" geht noch einen Schritt weiter. Bei diesem Verfahren werden sogar die 16 nächstgelegenen Pixel zur Berechnung des Ausgabebild-Pixels herangezogen. Mit der "bikubischen Interpolation" werden die besten Ergebnisse erzielt (Löffler, 1994).

Für diese Arbeit wird die "bikubische Interpolation" verwendet. Damit dieser Prozess durchgeführt werden kann, müssen die Bilddatenmengen vorhergehend reduziert werden. Dazu wird der Untersuchungsperimeter vorgängig eingeschränkt. Die Resultate der Orthorektifizierung sind in der Abbildung 4.2 pro Untersuchungsgebiet dargestellt.


Alp La Schera
oben links: 1973
oben mitte: 1979
oben rechts: 1985
unten links: 1991
unten rechts: 2000
Massstab:
0 m
500 m
N


Alp da Grimmels
oben links: 1973
oben mitte: 1979
oben rechts: 1985
unten links: 1991
unten rechts: 2000
Massstab:
0 m
400 m
N

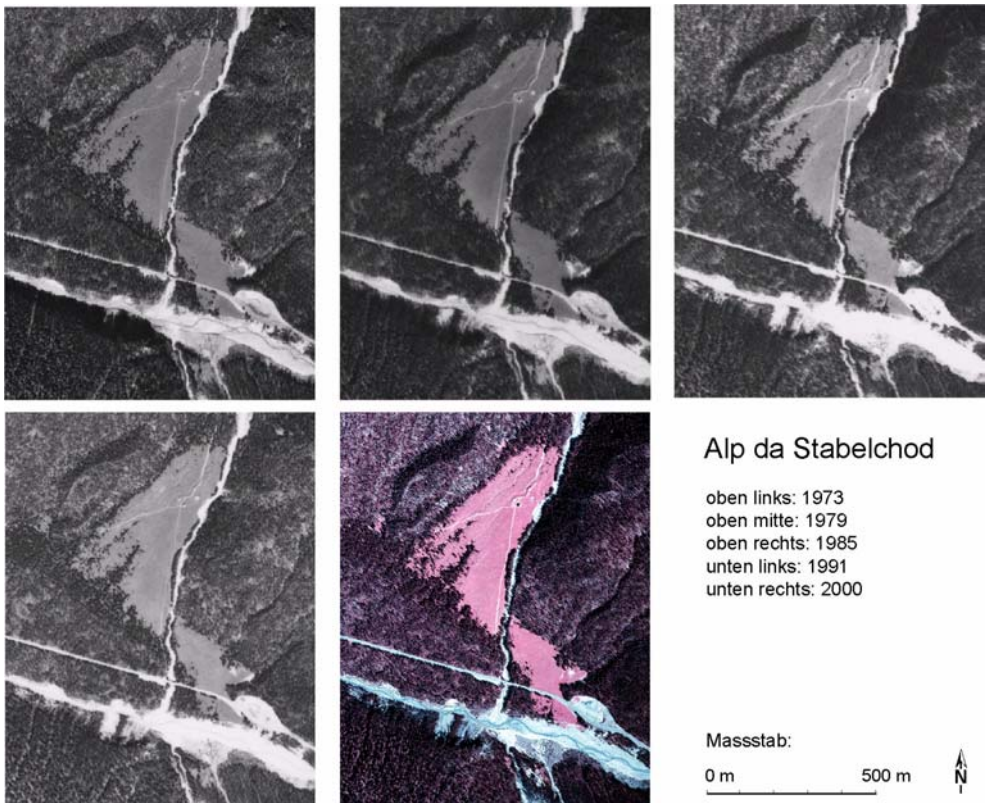


Abbildung 4.2 Übersicht über die geometrisch korrigierten Datensätze.

5 Change Detection (Veränderungsanalyse)[7]

5.1 Einführung

Change Detection bedeutet die automatische Identifizierung von Veränderungen der Objekte zwischen zeitlich verschieden aufgenommenen Fernerkundungsdatensätzen. Dazu gibt es verschiedene Ansätze (Albertz, 2001). "Change Detection"-Methoden wurden bisher hauptsächlich für die Analyse von Forstbeständen, für Landnutzungsveränderungen, für Veränderung von Küstenregionen und für Weidelandmanagement angewendet.

"image enhancement"	- basiert auf der Verwendung "unklassierter" Fernerkundungsdaten - nutzt Methoden zur Verbesserung von Bildern, um Pixel identifizieren zu können, die sich verändert haben - mathematische Kombination von Bildern verschiedener Zeitpunkte durch: • Subtrahieren von Bändern (Weismiller et al., 1977) z. B. Bilddifferenzierung (image differencing) • Ratiobildung (Howarth & Wickware, 1981) • Differenzierung mittels Vegetationsindex NDVI (Nelson, 1983) • Image Regression (Singh, 1986) • Hauptkomponentenanalyse (PCA) (Byrne et al., 1980) • Change vector analysis (Malila, 1980; Johnson & Kasischke, 1998)
direkte multitemporale Klassifikation (direct multi-date classification)	- basiert auf der Einzelanalyse eines kombinierten Datensatzes von zwei oder mehreren Zeitpunkten
Verschneidung unabhängiger Klassifikationen (post classification comparison)	- vergleichende Analyse der Klassifikation von Datensätzen unterschiedlicher Zeitpunkte, die unabhängig voneinander produziert wurden - Normalisierung der Daten nicht notwendig (Singh, 1989; Yuan et al., 1999)
kombinierte Methoden	- Anwendung von Image enhancement-Methoden in Kombination mit "Post Classification"-Verfahren (Pilon et al., 1988; Weiers et al., 1999)

Tabelle 5.1 Übersicht über verschiedene "Change Detection"-Verfahren

7. Die Ausführungen in diesem Kapitel beruhen weitgehend auf Singh, 1989.

5.1.1 Auswahl einiger Change Detection Methoden

In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick über die wichtigsten “Change Detection”-Methoden gegeben werden.

- **Bilddifferenzierung**

In dieser Technik werden Kanäle von zwei Datensätzen des Zeitpunktes t1 und t2 voneinander subtrahiert. Dabei werden die Grauwerte von Pixeln miteinander verrechnet. Die Ausgabematrix repräsentiert die Veränderung zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten t1 und t2.

$$Dx^{k_{i,j}} = x^{k_{i,j}}(t_2) - x^{k_{i,j}}(t_1) + C \tag{5.1}$$

x ist der Grauwert für das Pixel in der Linie i und der Kolonne j des Kanals k. t1 und t2 sind die Aufnahmedaten des multitemporalen Datensatzes. C ist eine Konstante, um positive Grauwerte zu produzieren.

Der Aufwand für die Bilddifferenzierung ist relativ gering. Der grosse Nachteil ist aber, dass unterschiedliche Typen von Veränderungen gegebenenfalls nicht unterschieden werden können. Dann nämlich, wenn die Subtraktion der Pixelwerte den gleichen Wert ergibt (180-150=30, aber auch 50-20=30). Es kann vorkommen, dass gewisse wichtige Informationen verloren gehen. Ein weiteres Problem bei der Bilddifferenzierung ist das Ansetzen des Schwellenwertes. Also, wo im Histogramm beginnt die Veränderung und wo sind Pixel angeordnet, welche keine Veränderung zeigen.

- **Bilddifferenzierung mittels Ratiobildung**

Bilddifferenzierung mittels Ratiobildung erfolgt durch Dividieren eines oder mehrerer Kanäle zweier Bilder unterschiedlichen Datums. Der Vorgang läuft auf der Basis des Pixel für Pixel-Vergleichs ab.

$$Rx^{k_{i,j}} = \frac{x^{k_{i,j}}(t_1)}{x^{k_{i,j}}(t_2)} \tag{5.2}$$

Die Variabeln haben genau die gleiche Bedeutung wie in Formel (5.1). Wenn die Intensität der reflektierten Energie fast die selbe ist in beiden Datensätzen, dann wird R annähernd 1. Dies bedeutet, dass keine Veränderung stattgefunden hat. In Gebieten mit Veränderungen liegt R deutlich über oder unter 1.

Auch in dieser “Change Detection”-Methode ist es schwierig, einen aussagekräftigen Schwellenwert zu wählen, der Gebiete mit Veränderungen von Gebieten ohne Veränderung trennt.

- **Bilddifferenzierung mittels Vegetationsindex**

Dieser Bilddifferenzierungs-Vorgang basiert darauf, dass Datensätze mit mehreren Kanälen vorhanden sind. Dabei werden beliebige Kanäle voneinander dividiert. Es gibt also grundsätzlich mehrere Indizes.

Ein spezieller Index ist dabei der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Er eignet sich sehr gut um Studien betreffend der Vegetation zu machen. Dabei wird die starke Reflektion der Vegetation im nahen Infrarotbereich genutzt.

$$R_{(NDVI)} = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \tag{5.3}$$

- **Verschneidung unabhängiger Klassifikationen (post classification comparison)**

Die Verschneidung unabhängiger Klassifikationen ist die einleuchtendste "Change Detection"-Methode. Sie bezieht sich auf den Vergleich zwischen unabhängig voneinander klassierten, multitemporalen Bilddaten. Eine komplexe Veränderungsanalyse kann durchgeführt werden, da die Art der Veränderung durch die Klassen der einzelnen Bilder definiert ist. Durch die unabhängige Klassifikation kann das Problem von Atmosphären-, und Sensor-Unterschieden zwischen den Aufnahmezeitpunkten reduziert werden. Bei den "Post Classification"-Verfahren gibt es eigentlich nur 2 Nachteile. Sie sind aufwändig durchzuführen und durch das schrittweise Vorgehen sind sie anfällig auf Fehlerfortpflanzung. Zudem ist die Genauigkeit der "Change Detection" direkt abhängig von der Güte der Klassifikationen. Liegt die Genauigkeit der Klassifkation des Bildes (t1) bei 80 % und beim Bild (t2) bei 90 %, so liegt die Genauigkeit der "Change Detection" bei 0,8 x 0,9 x 100% = 72 %.

5.1.2 Einige Methoden im Vergleich

Alle aufgezeigten Verfahren weisen Vor- und Nachteile auf. Nach dem Vergleich von sechs "Change Detection"-Verfahren kam Mas (1999) zu dem Ergebnis, dass mittels "Post Classification"-Analyse die höchste Genauigkeit einer Veränderungsanalyse erreicht werden kann. Dieses Analyseverfahren weist zudem den Vorteil auf, dass sich Klassen mit sehr unterschiedlichen spektralen Signaturen, verursacht durch verschiedene Aufnahmezeitpunkte, derselben Landnutzungsklasse zuordnen lassen. So kann beispielsweise ein Grünland zum Zeitpukt t1 eine andere spektrale Signatur aufweisen als zum Zeitpunkt t2. Dies würde im Rahmen der Veränderungsanalyse aber trotzdem nicht zur Detektion einer Veränderung führen. Das Wesen der Änderungen von Klasse-zu-Klasse kann abgeleitet werden, da die genaue Ausgangsklasse und die nach der Analyse veränderte Klasse bekannt sind. Nachteilig kann sich die Gefahr der Aufsummierung von Fehler aus den Einzelklassifizierungen auswirken. Zudem ist der Aufwand von "Post Classification-Analysen" im Vergleich zu anderen Methoden relativ hoch (Lunetta, 1999).

Singh (1986) schloss aus seinen Studien zur "Change Detection" mit Landsat-Daten, dass die "Post Classification"-Methode nicht sehr gute Resultate liefert. Besser schnitten bei seinen Untersuchungen "image enhancement"-Verfahren ab. Die "image enhancement"-Verfahren erlauben bei niedrigen Kosten die Verarbeitung grosser Datenmengen. Ihre Anwendung setzt jedoch die Notwendigkeit der Optimierung des jeweiligen Schwellenwertes zur Detektion der Veränderung voraus und erfordert eine nachfolgende Interpretation der Ergebnisbilder (Lunetta, 1999).

In dieser Arbeit wird das "Post Classification"-Verfahren angewendet. Ausschlaggebend für die Entscheidung, diesen Ansatz zu wählen ist, dass die vorhandenen Bilddaten für andere "Change Detection"-Verfahren eine ungenügende Datendynamik (spektrale Auflösung) haben.

6 Datenklassifikation

6.1 Allgemeines zur Datenklassifikation

In diesem Kapitel werden Grundlagen und allgemeine Richtlinien zur digitalen Datenklassifikation erläutert. Dabei wird ein besonderes Augenmerk dem “Wald” gelten, denn schliesslich soll ja die Entwicklung der Waldfläche in den Untersuchungsgebieten seit dem Jahr 1973 analysiert werden. Behandelte Gebiete der Datenklassifikation sind die Grundlagen der digitalen Datenklassifikation, die Reflexionseigenschaften des Waldes, Auswahl der Klassen und Trainingsgebiete und ein Überblick über die digitalen Klassifikationsverfahren.

6.1.1 Visuelle Interpretation des Waldes[8]

Der Wald ist im Luftbild ein unmittelbar zu erkennendes Element. Im grossen Bildmassstab sind die einzelnen Bestandteile des Waldes zu interpretieren. In der Regel erscheint der Wald in Form von Grau- und Farbtönen und Mustern. Die Interpretation des Waldes kann sich daher nur in seltenen Fällen mit der Artenzusammensetzung befassen. Vielmehr wird die Gesamtheit studiert.

Die Interpretation des Waldes, oder der Vegetation im Allgemeinen, verfolgt zwei Ziele. Zum einen dient es der Untersuchung des Waldes selbst (z.B. Ausbreitung des Waldes). Zum anderen gibt das Waldbild Hinweise auf andere Prozesse, die nicht unmittelbar auf den Luftbildern zu erkennen sind (z.B. Grundwasserverhältnisse). Für Waldklassierungen steht die Struktur des Waldes und sein Standort im Mittelpunkt. Eine erste grobe Standortkartierung kann anhand des Waldtyps durchgeführt werden, denn an den steilen Hängen des Schweizerischen Nationalparks wächst ein anderer Waldtyp als im Mittelland. Diese grobe Klassifikation basiert auf geomorphologischen Gegebenheiten. Für eine feinere Interpretation von Wald in Luftbildern können weitere Merkmale herangezogen werden. Es sind dies Kronenschluss der Bäume, Kronengrösse und Form, Regelmässigkeit und Glattheit des Kronendaches, Häufigkeit und Merkmale von Bäumen, die über das allgemeine Niveau des Kronendaches aufragen und, falls erkennbar, Dichte des Unterwuchses. Mit zunehmendem Wachstum und Dichte des Waldes wird der Grauton dunkler. In der Hauptvegetationsperiode hat der Wald also ein völlig anderes Erscheinungsbild als in anderen Jahreszeiten.

Um Waldschäden auf Schwarzweissluftbildern zu erkennen, müssen die Schadensauswirkungen (Sturmschlag, Blitzschlag, Schneebruch) bereits unmittelbar sichtbar sein. Auch grosser Schädlingsbefall, Wurzelkrankheiten und Zerstörung durch Feuer führen zu direkt sichtbaren Schäden im Waldbestand. Ein detaillierter Interpretationsschlüssel zur Schadenskartierung haben Heller und Ullimann 1983 entwickelt (Heller et al, 1983). Für Schadenskartierungen sind Farbluftbilder meist informativer als Schwarzweissluftbilder. Als geeignetstes Hilfsmittel zur Schadenskartierung hat sich aber das Infrarotfalschfarbenbild erwiesen. Die spektralen Eigenschaften des Infrarotbildes lassen ein Erkennen von Schäden bereits vor dem sichtbaren Erscheinen des Schadens zu.

8. Die Ausführungen in diesem Kapitel beruhen weitgehend auf Löffler, 1994.

6.1.2 Spektrale Eigenschaften des Waldes

Um eine automatische Klassifikation der Bilddaten durchzuführen, müssen die spektralen Eigenschaften der zu klassierenden Objekte beachtet werden.

Pflanzen sind aufgrund der starken Absorption der Strahlung durch das Chlorophyll im Bereich zwischen 400 nm und 700 nm (VIS - sichtbares Licht) in den sichtbaren Wellenlängen schwer zu unterscheiden. Im kurzwelligen Infrarot, also zwischen 700 nm und 1'300 nm (NIR - Nahes Infrarot), hingegen sehr deutlich. In diesem Spektralbereich liegt das Maximum der Reflexion von Pflanzen (Löffler, 1994). Im langwelligeren Infrarot, zwischen 1'300 nm und 2'800 nm, wird der spektrale Verlauf durch starke Wasserabsorptionsbanden (1'450 nm und 1'960 nm) bestimmt. Bei geringem Wassergehalt in den Blättern ist in diesem Spektralbereich die Reflexion höher. Sehr ausgeprägt sind die Absorptionsbanden bei Blättern mit einem hohen Wassergehalt.

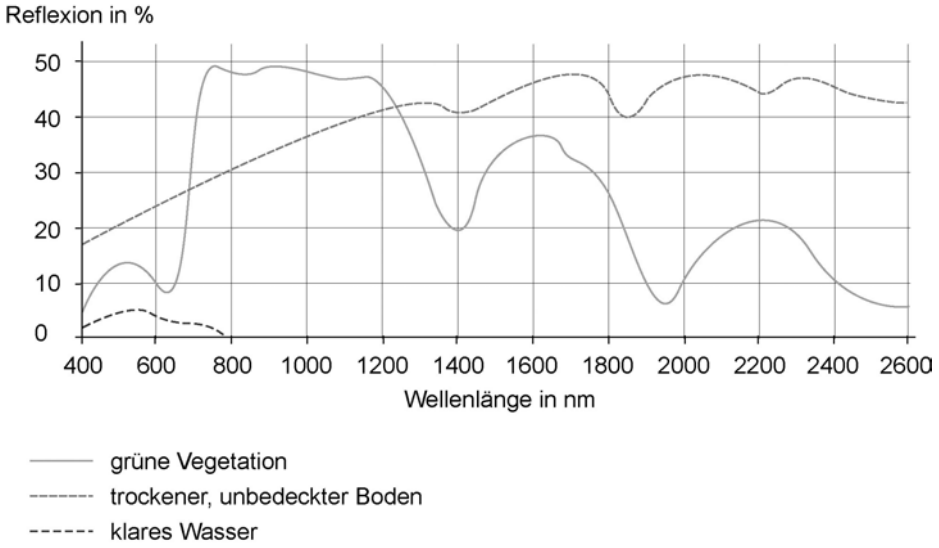


Abbildung 6.1 *Reflexion von Vegetation, Boden und Wasser im sichtbaren (VIS) und nahen Infrarotbereich (NIR). Gut zu sehen sind die Wasserabsorptionsbänder für Vegetation bei 1'450 nm und bei 1'960 nm. (Löffler, 1994; abgeändert)*

Laub- und Nadelbäume lassen sich durch ihre unterschiedlichen Reflexionseigenschaften gut unterscheiden. Laubbäume reflektieren im grünen Bereich (510 nm - 550 nm) und im nahen Infrarot deutlich mehr Energie als Nadelbäume. Die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Laub- und Nadelbäumen sind im Grünbereich auf den höheren Chlorophyllgehalt der Laubbäume zurückzuführen. Im nahen Infrarot beruhen die Unterschiede im Reflexionsverhalten auf der stark verschiedenartigen Blattstruktur (Bodmer, 1993). Abbildung 6.2 verdeutlicht dies.

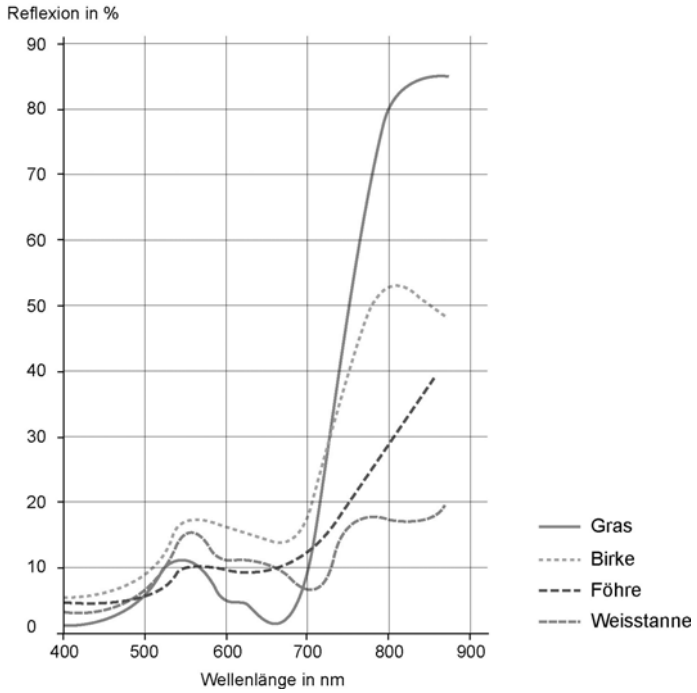


Abbildung 6.2 *Reflexionseigenschaften von verschiedenen Pflanzenarten. Gras, Birke, Föhre und Weisstanne haben im nahen Infrarotbereich sehr unterschiedliche Reflexionseigenschaften. (Drury, 1990; abgeändert)*

Die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Pflanzenbeständen liegen nach Kadro (1981) in folgenden Variablen begründet: (Liste ergänzt)

- Pflanzendichte
- Oberflächenrauhigkeit
- Pflanzenhöhe
- Artenzusammensetzung
- Form und Stellung des sichtbaren Blattwerkes
- Vitalitätszustand der Pflanzen
- Schäden (Lawinen, Sturm, Parasiten, Luftverschmutzung)
- Alter des Bestandes
- Höhe des Geländes über Meer
- sichtbare Bodenanteile im Verhältnis zu Pflanzenanteilen, Bodenfarbe und Bodenfeuchtigkeit
- Pflanzenspezifische Kenngrössen (Blattform, Chlorophyllgehalt, Blattfläche, Anzahl Blätter)

Die angetönten Faktoren, welche Einfluss auf die Reflexionseigenschaften von Pflanzenbeständen haben, basieren auf den Pflanzen selbst. Es gibt aber noch andere Faktoren. Einstrahlungswinkel der Sonne, Beobachtungswinkel, radiometrische Auflösung des Sensors, Jahres- und Tageszeit und die Flughöhe des Sensors zur Zeit der Aufnahme haben grossen Einfluss auf die gemessenen Reflexionseigenschaften von Objekten.

6.2 Grundlagen der digitalen Datenklassifikation

Die automatische Auswertung von digitalen Daten erfordert gegenüber der visuellen Auswertung einen höheren technologischen Aufwand. Aber auch die digitale Datenklassifikation beruht auf dem Erkennen von Mustern und räumlichen Zusammenhängen. Der Schritt von der visuellen Interpretation zum rechnergestützten Interpretieren ist nicht allzu gross (Löffler, 1994).

6.2.1 Automatische Klassifikation[9]

Die automatische Klassifikation nützt die Tatsache aus, dass Bilddaten in digitaler Form vorliegen. Oft liegen die Datenmatrizen durch die verschiedenen Spektralkanäle vor. Dies ist jedoch nicht zwingend der Fall, denn auch panchromatische Aufnahmen lassen sich automatisch klassieren. Wenn bei solchen Aufnahmen auch der Informationsgehalt meist weitaus geringer ist als bei multispektralen Aufnahmen. Bei der digitalen Datenklassifikation werden Bildobjekte je nach Ähnlichkeit sinnvollen Gruppen (Klassen) zugeordnet. Diese Zuordnung erfolgt mit Hilfe von statistischen Verfahren (Minimum Distance, Maximum Likelihood, u.s.w.). Die Verfahren zur digitalen Datenklassifikation beruhen darauf, dass eine Gruppe eine ganz bestimmte und für sie charakteristische spektrale Signatur aufweist. Das Ziel der Klassifikation ist es, die charakteristischen Werte der verschiedenen Gruppen zu erfassen. Es versteht sich von selbst, dass eine Wasserfläche nicht durch einen einzigen Grauwert in den verschiedenen Kanälen charakterisiert ist. Vielmehr sind es eine ganze Anzahl von Grauwerten, die um einen Mittelwert gruppiert sind. Die Schwankungen um den Mittelwert sind grösser, wenn die zu detektierende Klasse sehr heterogen ist. In den meisten Fällen kommt die Verteilung der Grauwerte jedoch einer Gauss'schen Normalverteilung sehr nahe.

Bei der digitalen Datenklassifikation werden zwei Ansätze unterschieden. Zum einen ist es die überwachte Klassifikation, und zum anderen ist es die unüberwachte Klassifikation. Für die überwachte Klassifikation müssen Vorkenntnisse über das zu klassierende Gebiet vorhanden sein. Der/die InterpretIn muss in der Lage sein, zwischen verschiedenen Klassen zu unterscheiden und diese richtig zu identifizieren. Diese Bildobjekte werden auf dem Bildschirm erfasst und abgegrenzt. Es werden also sogenannte Trainigsgebiete erfasst. Mit Hilfe von statistischen Verfahren (Minimum Distance, Maximum Likelihood, u.s.w.) werden anschliessend die Bildobjekte den Klassen zugeordnet. Bei der unüberwachten Klassifikation sind keine Trainingsgebiete erforderlich. Anhand von Clusteranalysen (Haberäcker, 1987) werden die Bildobjekte in verschiedene Klassen unterteilt. Die Zusammengehörigkeit beruht dabei lediglich auf der statistischen Auswertung der Bilddaten (Kellenberger, 1996). Der Grundgedanke von unüberwachten Klassifikationen ist, dass bestimmte spektrale Klassen im Datensatz erkannt werden können, die bei einer überwachten Klassifikation nicht erfasst worden wären, da die Auswahl der Testgebiete eine stark visuelle Komponente ist.

9. Die Ausführungen in diesem Kapitel beruhen weitgehend auf Löffler, 1994.

6.2.2 Die Trainingsgebiete[10]

Für den Erfolg der überwachten Klassifikation ist massgeblich die Auswahl der Trainingsgebiete entscheidend. Die Qualität der Trainingsgebiete ist sehr wichtig. Trainingsgebiete müssen für die jeweilige Klasse möglichst repräsentativ sein. Sie kennzeichnen die spektrale Charakteristik einer Klasse. Die Trennbarkeit gegenüber anderen Klassen ist entscheidend. Da es das erklärte Ziel von Trainingsgebieten ist die spektralen Eigenschaften einer Klasse vollständig zu erfassen, genügt es in der Regel nicht, nur ein Trainingsgebiet pro Klasse zu extrahieren. Vielmehr ist die Auswahl der Trainingsgebiete abhängig von Faktoren wie Grösse und Komplexität des zu bearbeitenden Gebietes. Die Trainingsgebiete sollten räumlich getrennt ausgewählt werden. Die Grösse und der Umfang der Trainingsgebiete unterliegen gewissen statistischen Regeln. Für einfache Klassifikationen, wie das “nearest neighbor”-Verfahren, ist ein Minimum von 30 Werten notwendig. Meist werden jedoch grössere Mengen von Bildobjekten verwendet, da die Charakteristik einer Klasse damit vollständiger erfasst wird.

6.2.3 Die Auswahl der Klassen

Das Auswählen der Klassen ist ein Prozess. Ideen müssen entwickelt, überprüft und gegebenenfalls wieder verworfen werden. Die Auswahl der Klassen richtet sich eindeutig nach dem zu untersuchenden Objekt. Um die rein quantitative Entwicklung von Waldflächen zu ermitteln, ist es nicht notwendig zwischen Laub- und Nadelbäumen zu unterscheiden. Soll aber eine Waldinventarisierung[11] durchgeführt werden, müssen verschiedene Waldgesellschaften voneinander unterschieden werden können.

Wenn die Klassenkandidaten gefunden sind, wird mittels einer spektralen Analyse überprüft, ob die gewünschten Klassen überhaupt trennbar sind. Die spektrale Analyse erfolgt unter Berücksichtigung der Histogramme. Natürlich wird die Auswahl der Klassen auch danach beurteilt, ob eine Überprüfungsmöglichkeit der Klassifikationsresultate besteht.

6.2.4 Klassifikationsverfahren

Es gibt sehr viele verschiedene Klassifikationsverfahren. Das Verfahren der geringsten Distanz, das einfache und das detaillierte Quader-Verfahren und das Verfahren der grössten Wahrscheinlichkeit (maximum likelihood) sind allesamt Klassifikationsverfahren (Löffler, 1994). Doch alle haben das gleiche Ziel: Anhand der Trainingsgebiete soll der Bildinhalt Klassen zugeteilt werden. In dieser Arbeit wird ein Verfahren der geringsten Distanz (nearest neighbor) in Kombination mit wissensbasierten Informationen eingesetzt. Das verwendete “nearest neighbor”-Verfahren ist in Kapitel 7.2.2.1 genau beschrieben. Für die Vorgehensweise der anderen Klassifikationsverfahren wird an dieser Stelle auf Löffler (1994), Albertz (2001), Itten (1979) und Kraus (1990) verwiesen.

6.2.5 Überprüfung des Klassifikationsresultates

Klassifikationsresultate aus digitalen Klassifikationen werden häufig mit Hilfe von sogenannten Bodenreferenzdaten (groundtruth) überprüft. Dabei wird angenommen, dass die Referenz-

10. Die Ausführungen in diesem Kapitel beruhen weitgehend auf Löffler, 1994.
11. Waldinventarisierungen und Holzvolumenschätzungen anhand von Luftbildern werden vor allem in den USA und Kanada durchgeführt. Denn: je einfacher die Zusammensetzung der Vegetation, desto einfacher die Interpretation. Wälder der gemässigten und borealen Breiten sind vom Luftbild aus einfacher zu studieren als beispielsweise tropische Wälder.

daten zu 100 % richtig sind. Da diese Annahme idealisiert ist und nur selten vorkommt, kann es zu einer verfälschten Beurteilung des Klassifikationsresultates kommen (Leiss, 1998).

In der Regel werden Klassifikationsresultate anhand einer Fehlermatrix (error matrix) präsentiert. In dieser aus Kolonnen und Zeilen bestehenden Tabelle werden die Anzahl Beobachtungen, 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 0, 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 (Leiss, 1998). Für detailliertere Ausführungen wird auf Kellenberger (1996) und Leiss (1998) verwiesen.

Masse für die Genauigkeit der Klassifikation sind “overall accuracy”, “producer’s accuracy”, “user’s accuracy”, “inclass accuracy” und “Kappakoeffizient”. Da in dieser Arbeit die Überprüfung der Klassifikationsresultate vorwiegend visuell durchgeführt werden musste, wird auf die Genauigkeitsmasse der Klassifikation an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Detaillierte Ausführungen finden sich in Kellenberger (1996) und Kneubühler (1996).

7 Objektorientierte Bildanalyse

7.1 Was ist eCognition?

eCognition ist eine Bildanalyse-Software und wird von der Firma Definiens AG in München entwickelt. Im Zuge der immer komplexer erscheindenden Bilddaten werden neue Instrumente der Bildanalyse gefordert. Definiens nahm sich dieser Herausforderung an und brachte die Software eCognition auf den Markt. eCognition hat als Vorbild die menschliche Wahrnehmung. Es wird also die visuelle Interpretation nachempfunden.

Beim Interpretieren von Bildern versucht der/die BetrachterIn eine Aussage über den Bildinhalt zu machen. Die Deutung des Bildinhalts beschränkt sich aber nicht nur auf das im Bild Sichtbare, sondern geht darüber hinaus (Löffler, 1998). Vielmehr werden räumliche Zusammenhänge erkannt. Dazu sind allerdings verschiedene Phasen nötig. Die 4 Phasen der Interpretation wurden von Verstappen (1977) beschrieben. Die erste Phase ist das Beobachten (detection). Dabei werden rein visuell verschiedene Elemente erfasst. Die zweite Phase ist das Erkennen und Identifizieren (recognition and identification) der beobachteten Erscheinungen. Die Analyse (analysis) befasst sich mit der räumlichen Abgrenzung und wird als dritte Phase bezeichnet. Die visuelle Interpretation wird mit der vierten Phase, der Klassifizierung (classification), abgeschlossen (Verstappen, 1977). Während diesem Prozess der Interpretation geht das menschliche Gehirn objektorientiert vor. Das Erkennen der Objekte erfolgt durch den Vergleich der Beobachtung mit den im Gehirn gespeicherten Informationen und Erfahrungen. Genau so wie die einzelnen Objekte aus dem Bild “gelesen” werden, funktioniert der Prozess auch im kleineren Massstab. Es werden Verbindungen erstellt. Zum Beispiel wird eine Gruppe von Gebüschen als Hecke erkannt. Das Gesamtbild wird so aus den einzelnen Objekten zusammengesetzt. Daraus wird ersichtlich, dass das menschliche Gehirn nicht die spektralen Werte direkt deutet, sondern sie zu Objekten zusammenfügt und deutet. Zur Interpretation eines Bildes werden also auch Informationen bezüglich der Nachbarschaft herangezogen. Dabei müssen die Objekte nicht im gleichen Massstab vorhanden sein. Die Unterobjekte aus denen ein Objekt zusammengesetzt ist, geben ebenfalls wertvolle Informationen zur richtigen Interpretation. Die menschliche Wahrnehmung ist also keineswegs “pixelorientiert”. Sie ist eindeutig “objektorientiert”.

In eCognition ist der objektorientierte Ansatz verwirklicht. Verschiedene Objekte werden gebildet, die zur Bildanalyse herangezogen werden. Diese Objekte besitzen Eigenschaften und Attribute, welche physikalischer Natur sein können. Aber auch wissensbasierte Informationen können den Objekten attestiert werden. Herzstück von eCognition ist ein hierarchisches Netzwerk, welches der menschlichen Wahrnehmung nachempfunden ist. Verschiedene Auflösungsgrade ermöglichen ein Verbinden von Objekten gleicher und verschiedener Auflösungsgrade. Damit dieses hierarchische Netz aufgebaut werden kann, geht das Softwarepaket wie folgt vor:

- Segmentierung (multiresolution segmentation): Unterteilung und Gruppierung vom Bildinhalt in Einzelobjekte aufgrund ihrer spektralen Werte und Formeigenschaften in mehreren Auflösungsstufen.
- Klassifikation: Die Klassifikation wird mit “nearest-neighbor”- oder einer Art “maximum likelihood”-Methode und/oder mit “fuzzy logic” basierten Zugehörigkeitsfunktionen durchgeführt. Voraussetzung dafür ist aber ein von Anwender/In definiertes und entwickeltes Regelwerk. In diesem Regelwerk sind die Klassifikationsbedingungen festgesetzt. Zur Definition des Regelwerkes sind verschiedene Kennzeichen (features) verfügbar. Nachbar-

schaftsbeziehungen, Relationen zu Sub- bzw. Superobjekten, Segmenteigenschaften (Formindizes) und Grauwertinformationen können als Klassenmerkmale genutzt werden.

Durch dieses hierarchische Netz wird eine grössere Klassendifferenzierbarkeit und eine vollständigere Klassifikation erreicht.

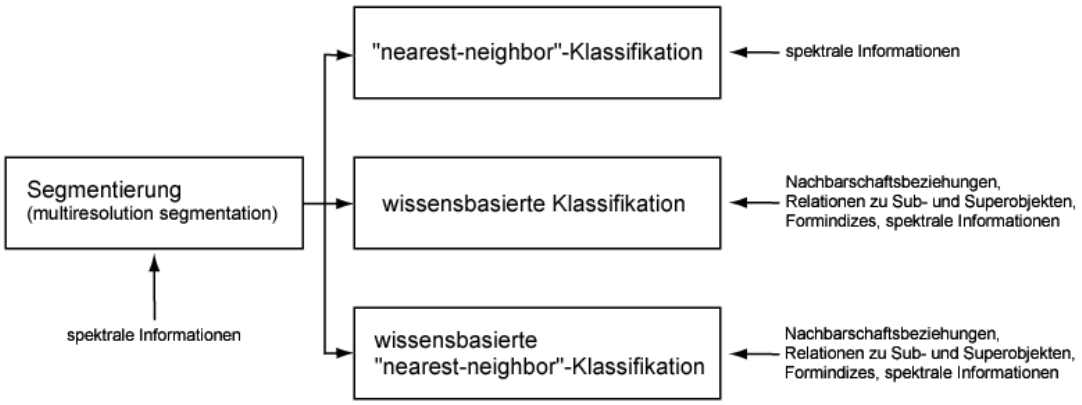


Abbildung 7.1 Übersicht über die verschiedenen Klassifikationsmöglichkeiten mit eCognition.

7.2 eCognition

Wie oben erläutert, basiert eCognition im Gegensatz zu den klassischen Bildanalyse-Softwarepaketen nicht auf einem “pixelorientierten”, sondern auf einem “objektorientierten” Ansatz. Im Wesentlichen baut eCognition auf zwei innovative und richtungsweisende methodische Prinzipien,

- die multiskalare Bild-Segmentierung
- und die objektorientierte, wissensbasierte Bildklassifikation mit Hilfe von “fuzzy logic”.

7.2.1 Multiskalare Bildsegmentierung mit eCognition

Durch die Bildsegmentierung (multiresolution segmentation) wird auf verschiedenen Ebenen ein hierarchisches Netzwerk aus Bildobjekten aufgebaut, sodass die gesamte Bildinformation in mehreren Auflösungsniveaus repräsentiert wird. Durch das entstehende Netzwerk stehen die Bildobjekte in Beziehung zueinander. Einerseits geometrisch, d.h. durch einen Segmentierungsvorgang ermittelte Objektgrenzen bilden auch zwingende Grenzen für alle Folgevorgänge der Segmentierung, andererseits auch über Nachbarschafts- und Hierarchiebeziehungen. Objekte “kennen” beispielsweise die Anzahl ihrer Nachbarn sowie die ihrer Super- und Subobjekte. Die durch die Segmentierung gebildeten Bildobjekte bieten zahlreiche Features an. Hinsichtlich Reflexion (z.B. Spektrale Mittelwerte, Varianzen), Form, Textur, vertikalem und horizontalem Hierarchiegefüge sowie der Beziehungen zu Nachbarobjekten und Subobjekten können kennzeichnende Beschreibungen der Objekte gemacht werden. Durch das Unterteilen

des Bildinhalts in homogene, zusammenhängende Polygone wird die Datenmenge reduziert. Dabei gehen aber keine wichtigen Informationen verloren (Schmidt, 2000).

Detailliert funktioniert die multiskalare Bildsegmentierung (multiresolution segmentation) wie folgt:

Der/Die AnwenderIn hat die Möglichkeit Daten unterschiedlicher geometrischer und spektraler Auflösung in ein eCognition-Projekt zu importieren. Zudem besteht auch die Option sogenannte "thematische Ebenen" (z.B. GIS-Daten, Bild-Dateien), also Daten unterschiedlicher Herkunft, ins Projekt zu integrieren. Hernach können die verschiedenen Eingangsdaten gewichtet werden. Die Gewichtung der Eingangsdaten ermöglicht eine Art "gesteuerte Segmentierung". Das heisst, die Gewichtung der Eingangsdaten entscheidet über deren Relevanz für die multiskalare Bildsegmentierung. Mit Hilfe des "scale parameters" können die Eingangsdaten in verschiedenen Segmentierungsebenen angelegt werden. Der "scale parameter" bestimmt indirekt die Grösse der Segmente (Meinel et al., 2001). In heterogenen Datensätzen (z.B. Radardaten) sind die resultierenden Segmente bei einem gegebenen "scale parameter" kleiner als bei homogenen Datensätzen (Definiens, 2001).

Für die Segmentierung ist die durchschnittliche Heterogenität der Bildobjekte das entscheidende Mass. Hinter der Segmentierung steckt nach Haarmann eine Optimierungsprozedur. Diese versucht die durchschnittliche Heterogenität der Bildobjekte bei einer bestimmten Auflösung über das gesamte Bild zu minimieren (Haarmann, 2001). Definiens nennt das Mass für die Heterogenität folgendermassen: Homogenitäts-Kriterium (homogeneity criterion) (Definiens, 2001).

Das Homogenitäts-Kriterium ist aufgeteilt in vier weitere Kriterien:

- **Farbkriterium** (color criterion)**:** Minimierung der Standardabweichung der Spektralwerte eines Bildobjektes. Das Farbkriterium entscheidet, wie gross der Einfluss der Spektralwerte auf die Segmentierung sein soll (Definiens, 2001).
- **Formkriterium** (shape criterion)**:** Das Formkriterium verhindert gebrochene Formen bei stark texturierten Daten (z.B. Radardaten). Das Formkriterium entscheidet, wie gross der Einfluss der Formhomogenität auf die Segmentierung sein soll (Definiens, 2001).
- **Glättekriterium** (smoothness criterion)**:** Das Glättekriterium wird verwendet um Bildobjekte zu kreieren, welche "weiche" (glatte) Grenzen haben. Dies ist bei enorm heterogenen Daten (z.B. Radardaten) von Nöten (Definiens, 2001).
- **Kompaktheitskriterium** (compactness criterion)**:** Das Kompaktheitskriterium wird verwendet um Objekte ähnlicher Spektralwerte, aber vollkommen verschiedener Formen, von einander zu unterscheiden (Definiens, 2001).

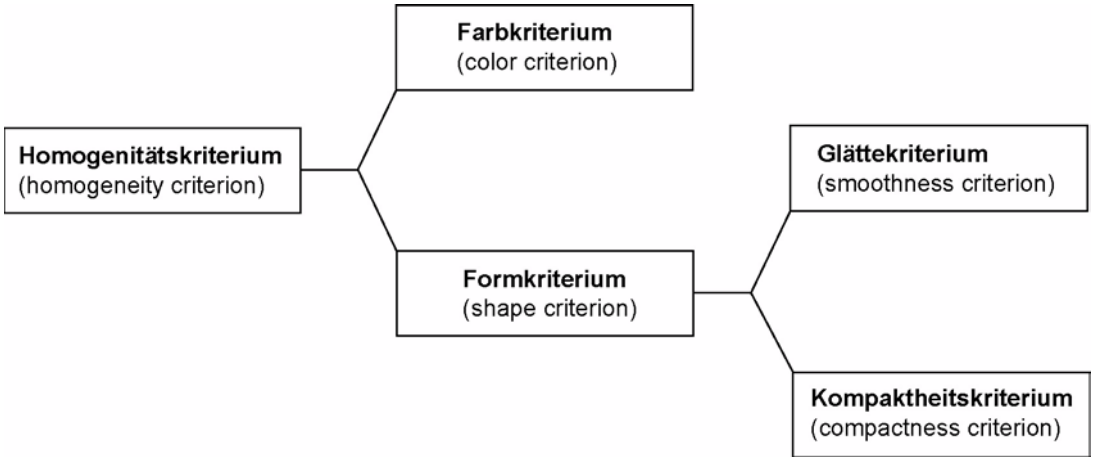


Abbildung 7.2 *Das Homogenitäts-Kriterium (homogeneity criterion) ist ein wichtiger Parameter, mit welchem die Bildsegmentierung gesteuert werden kann.*

Sind all die Parameter (scale parameter, homogeneity criterion, color criterion, shape criterion, smoothness criterion, compactness criterion) bestimmt und gewichtet, kann die Segmentierung gestartet werden. Der/die AnwenderIn geht dabei nach dem "trial-and-error"-Prinzip vor (Meinel et al., 2001). Das bedeutet, dass die Segmentierungsparameter durch wiederholte Versuche herausgefunden werden müssen, bis die optimale Segmentierung für das jeweilige Bild erreicht ist. Für den mathematischen Ansatz und die Durchführung der Segmentierung, sowie weitere Ausführungen zur multiskalaren Bildsegmentierung (multiresolution segmentation) sei an dieser Stelle auf den eCognition User Guide (Definiens, 2001) verwiesen.

7.2.2 Objektorientierte, wissensbasierte Klassifikation mit eCognition

Die Klassifikation des Bildes erfolgt auf Basis der segmentierten Bildobjekte. Die objektbezogene Klassifikation bietet die Möglichkeit, die oben genannten Objekteigenschaften mit einzubeziehen und so ein komplexes Regelwerk aufzubauen. Dieses hat die Aufgabe als Wissensbasis für die Zuordnungsregeln der Klassen zu dienen. Die zusätzliche Nutzbarmachung von objektbezogener Information verlangt umfangreiches Wissen über bestimmte Eigenschaften der Vertreter zu generierender Klassen.

Gerne wird das Beispiel der Klassifizierung eines Bildobjekts als "Stadtpark" angeführt. Der "Stadtpark" weist praktisch identische Reflexionswerte auf wie Wiesen. Deshalb ist der Stadtpark von der Wiese mittels herkömmlicher pixelbasierter Klassifikationsverfahren ohne semantische Zusatzinformation nicht unterscheidbar. Die entscheidende semantische Information wäre in diesem Fall die Tatsache, dass das Bildobjekt "Stadtpark" zum überwiegenden Teil von geschlossener Bebauung umgeben ist. Durch die explizite Dingfestmachung jeder Regel, die der Klassifikation zugrunde liegt, kann der Entscheidungsprozess einzeln rückverfolgt und dann gegebenenfalls die Regel modifiziert werden. Nachdem die Klassen hierarchisch organisiert sind, werden Eigenschaften vererbt. In einer weiteren Organisationsstruktur "Group" werden die Klassen semantisch geordnet. Das aufgestellte Regelwerk kann

abgespeichert werden und beispielsweise für angrenzende Szenen - zumindest theoretisch - direkt genutzt werden. (www.definiens, 2003)

eCognition führt die Klassifikation der segmentierten Objekte überwacht durch. Wie oben erwähnt, wird ein sogenanntes Regelwerk definiert. Dieses ermöglicht erst eine sinnvolle Klassifikation. Dieses Regelwerk wird in der Klassenhierarchie (class hierarchy) beschrieben.

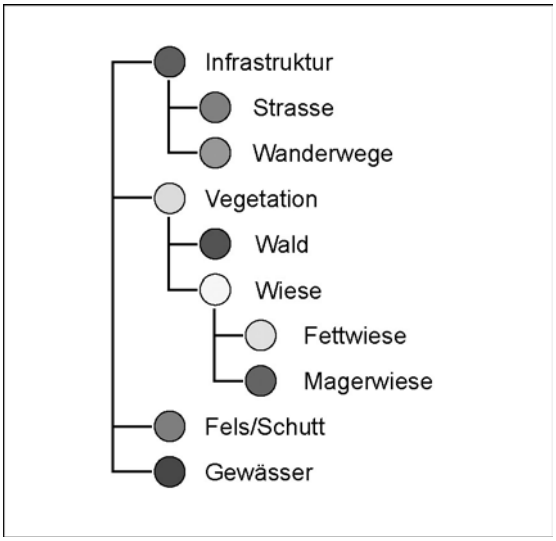


Abbildung 7.3 *Klassenhierarchie (class hierarchy) in eCognition. Die Klassenhierarchie dient dazu, ein Regelwerk für die Klassifikation zu definieren.*

In dieser Klassenhierarchie können nebst spektralen und geometrischen Informationen auch wissensbasierte Spezifikationen (Objektmerkmale (Kap 7.2.2.3)) für die Klassifikation definiert werden. Die Klassifikation erfolgt mit Hilfe von "fuzzy logic". Dies ist wie die Segmentierung ein weiteres grundlegend neues Prinzip von eCognition. Der "fuzzy logic"-Ansatz bestimmt Merkmalswerte (z.B. Formindizes) für segmentierte Objekte nicht nur mit den beiden Aussagen "ja" (1) und "nein" (0), sondern benutzt für die Klassenzuordnung eine kontinuierliche Funktion. Der Wertebereich dieser Funktion liegt zwischen 0 und 1 (0...1). Ein "nein" bedeutet 0 und ein "ja" bedeutet 1. Alle Werte drücken eine Wahrscheinlichkeit der Klassenzugehörigkeit aus. Mit Hilfe dieses "fuzzy logic"-Ansatzes können verschiedene Objektmerkmale (Spektralwerte, Formparameter, wissensbasierte Informationen, u.s.w.) miteinander in Beziehung gebracht und verglichen werden. Damit die verschiedenen Merkmalswerte in einen "fuzzy logic"-Wert umgewandelt werden können, benutzt eCognition zwei Klassifikationsalgorithmen. Es wird zum einen ein *Verfahren der geringsten Distanz* (nearest neighbor) oder ein speziell von Definiens entwickeltes "maximum likelihood"- Verfahren, und zum anderen eine *Zugehörigkeitsfunktion* (membership function) verwendet (Definiens, 2001). Da in dieser Arbeit das "nearest neighbor"-Verfahren eingesetzt wird, wird im Folgenden nur auf die "nearest neighbor"-Klassifikation von eCognition eingegangen.

7.2.2.1 "nearest neighbor"-Klassifikation

Die "nearest neighbor"-Klassifikation ist ein *Verfahren der geringsten Distanz* (engl. minimum distance) (Löffler, 1994). Es geht von der Annahme aus, dass diejenigen Werte, die im Merkmalsraum relativ nah beieinander liegen, auch zu einer gemeinsamen Klasse gehören. Da die

"nearest neighbor"-Klassifikation ein überwachtes Klassierungsverfahren ist, ist es unabdingbar, dass sogenannte Übungs- oder Trainingsgebiete abgegrenzt werden. Anhand dieser Trainingsgebiete werden die für das Objekt charakteristischen Parameter definiert. Um möglichst repräsentative Stichproben zu haben ist es wichtig, die Trainingsgebiete weder zu klein noch zu gross zu wählen. Die Wahl repräsentativer Trainingsgebiete ist für die Qualität der Klassierung sehr wichtig. Die Trainingsgebiete sollten sich klar von anderen Klassen unterscheiden. Das Ziel der Auswahl von Trainingsgebieten besteht darin, die Merkmale der einzelnen Klassen möglichst vollständig zu erfassen (Löffler, 1994). Es werden für alle Klassen Trainingsgebiete festgelegt. Für die "nearest neighbor"-Klassifikation sind mindestens 30 Stichproben notwendig (Mather, 1987). Während der Klassifikation wird ein Bildsegment derjenigen Klasse zugeordnet, zu dessen Stichprobennachbarn es den geringsten Abstand aufweist (Löffler, 1994).

Abbildung 7.4 verdeutlicht die "nearest neighbor"-Klassifikation. Das unklassierte Segment "A" wird der Klasse Wiese zugeordnet, weil es den geringsten Abstand zum Stichprobennachbarn der "Wiese"-Trainingsgebiete hat.

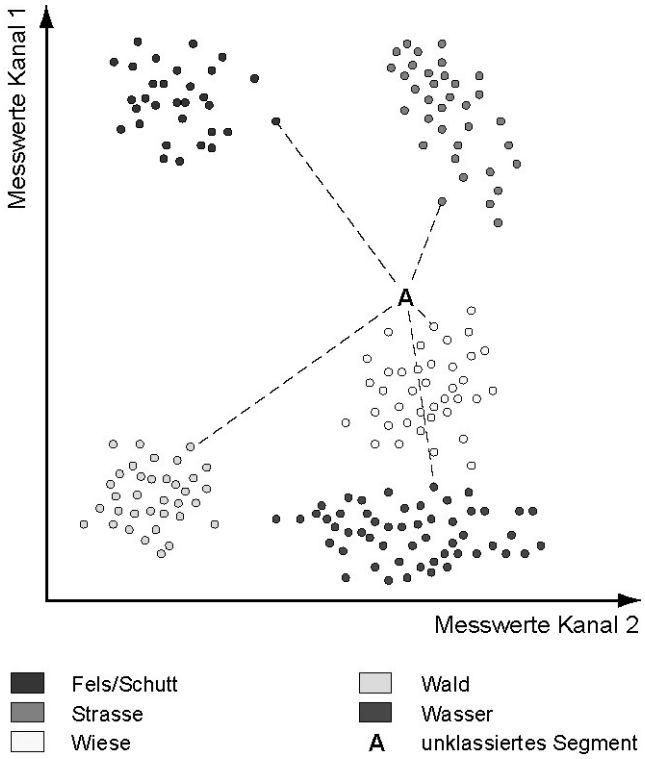


Abbildung 7.4 *"nearest neighbor"-Klassifikation am Beispiel einer zweidimensionalen Datenmatrix von einem Kanal 1 (Ordinate) und einem Kanal 2 (Abszisse). Die Trainingsgebiete sind Fels/Schutt, Strasse, Wiese, Wald und Wasser. A ist ein unklassiertes Bildsegment. Das Bildsegment A wird mit der "nearest neighbor"-Klassifikationsmethode als Wiese klassiert. (Lillesand & Kiefer, 1987; abgeändert)*

Das *Verfahren der geringsten Distanz* erfordert einen ziemlich geringen Rechenaufwand. Bei der Durchführung der "nearest neighbor"-Klassifikation können jedoch auch Probleme auftauchen. Diese gründen vor allem auf der Auswahl der Trainingsgebiete sowie auf der mangelnden Trennbarkeit einzelner Klassen (Löffler, 1994). In der "nearest neighbor"-Klassifikation wird die unterschiedliche Streuung der Messwerte nicht berücksichtigt. Somit sind Klassen, deren spektrale Parameter ähnlich sind, schlecht voneinander trennbar.

7.2.2.2 Zugehörigkeitsfunktion (membership function)

Mit den Zugehörigkeitsfunktionen (membership functions) kann eine Klassifikation der Bildsegmente durchgeführt werden. Mit Hilfe dieser Funktionen wird einem Merkmalswert ein Zuweisungswert zugeordnet. Nebst spektraler und geometrischer Information können auch Kontextinformationen (z. B. Nachbarschaftsbeziehungen) zur Klassifikation genutzt werden (Definiens, 2001). Dazu soll an dieser Stelle ein Beispiel einer Zugehörigkeitsfunktion gezeigt werden: Zur Klasse "Wiese" gehören alle Bildsegmente, welche im Kanal 1 einen Grauwert von grösser oder gleich 185 aufweisen. Bildsegmente, welche einen Grauwert von 181 oder kleiner aufweisen, erhalten den Wert 0. Bildsegmente mit einem Grauwert in Kanal 1 von 185 oder grösser, erhalten den Wert 1. Bildsegmenten mit Grauwerten zwischen 181 und 185 werden die entsprechenden Werte der Zuordnungskurve zugewiesen.

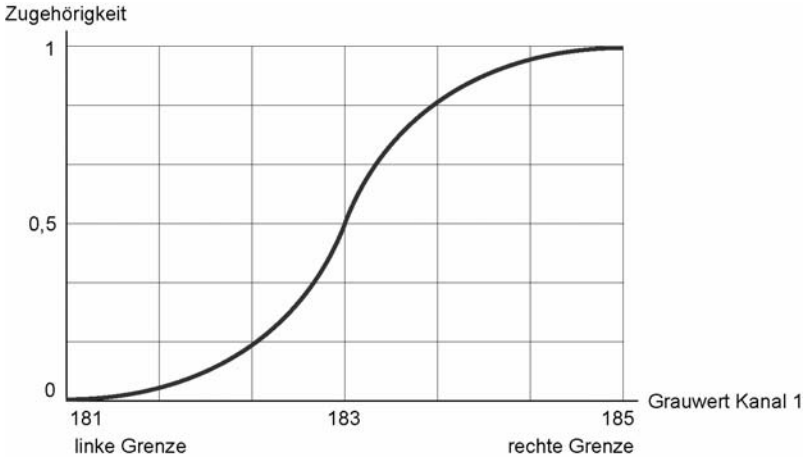
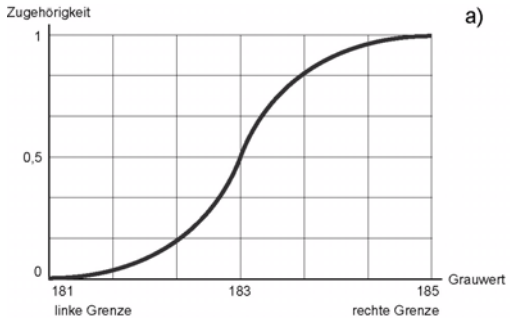
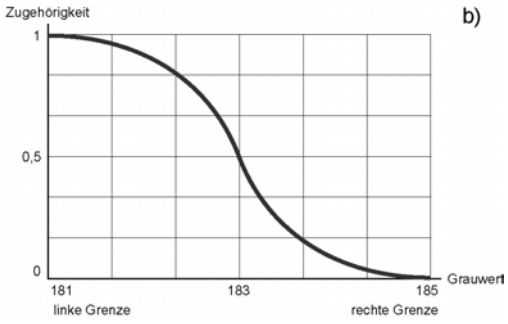
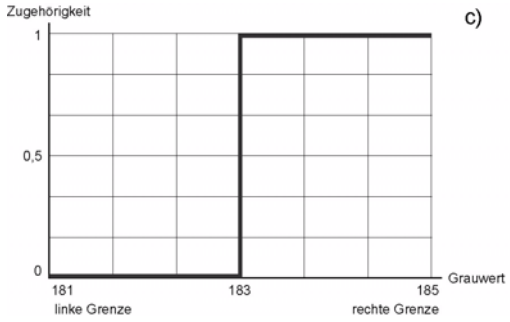


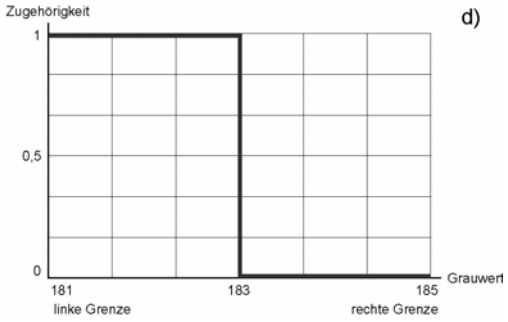
Abbildung 7.5 Vorgehensweise einer Zugehörigkeitsfunktion (membership function) in eCognition.

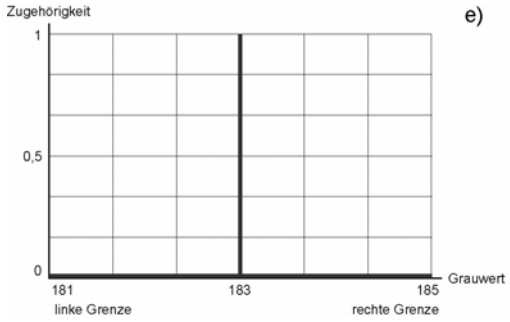
eCognition bietet dem/der AnwenderIn mehrere Zugehörigkeitsfunktionen für die Bildklassifikation an. Alle diese Funktionen beschreiben, wie die Zugehörigkeit eines Bildobjektes berechnet werden soll. In Abbildung 7.6 sind die verschiedenen, definierten Zugehörigkeitsfunktionen abgebildet. Es gibt aber auch die Möglichkeit, eine anwenderspezifische Funktion zu definieren (Definiens, 2001).

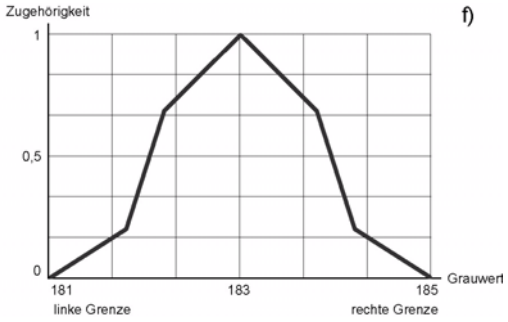

a)
Zugehörigkeit
1
0,5
0
181
183
185
Grauwert
linke Grenze
rechte Grenze


b)
Zugehörigkeit
1
0,5
0
181
183
185
Grauwert
linke Grenze
rechte Grenze


c)
Zugehörigkeit
1
0,5
0
181
183
185
Grauwert
linke Grenze
rechte Grenze


d)
Zugehörigkeit
1
0,5
0
181
183
185
Grauwert
linke Grenze
rechte Grenze


e)
Zugehörigkeit
1
0,5
0
181
183
185
Grauwert
linke Grenze
rechte Grenze


f)
Zugehörigkeit
1
0,5
0
181
183
185
Grauwert
linke Grenze
rechte Grenze

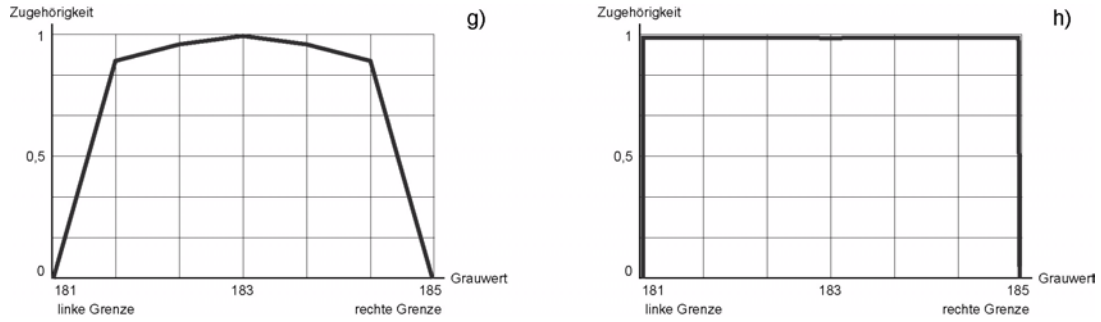


Abbildung 7.6 *Die definierten Zugehörigkeitsfunktionen in eCognition.* ***a)*** *larger than,* ***b)*** *smaller than,* ***c)*** *larger than (boolean),* ***d)*** *smaller than (boolean),* ***e)*** *singleton (exact one member),* ***f)*** *approximate Gausssian,* ***g)*** *about range,* ***h)*** *full range.*

7.2.2.3 Klassifikationsmerkmale (classification features)

In Kapitel 7.2.2 wurde erläutert, dass wissensbasierte Spezifikationen für die Klassifikation der Bildobjekte in die Klassenhierarchie eingebaut werden können. Diese wissensbasierte Spezifikationen nennt man Klassifikationsmerkmale (classification features) (Definiens, 2001). Die Klassifikationsmerkmale werden in zwei Untergruppen unterteilt. Zum einen sind das die Objektmerkmale (object features) und zum anderen sind das die klassenbezogenen Merkmale (class-related features). eCognition bietet die Möglichkeit, die anwenderdefinierten Klassifikationsmerkmale für die Klassifikation miteinzubeziehen oder sie zu ignorieren.

Objektmerkmale (object features):

- **Spektralwerte der Kanäle (layer values)** (Mittelwert, Standardabweichung, Ratio, Differenz zu Nachbarobjekten, Differenz zu Superobjekten[12], u.s.w.)
- **Form des Bildobjektes (shape)** (Länge, Fläche, Ausrichtung, Länge der Segmentgrenze, u.s.w.)
- **Textur des Bildobjektes (texture)** (Spektral- und Formtextur abgeleitet aus Subobjekten[13])
- **Hierarchiemerkmale (hierarchy)** (Anzahl der Nachbar- und Subobjekte)
- **Thematische Merkmale (thematic attributes)** (Informationen von thematischen Ebenen, z.B. Informationen aus GIS-Daten)

Klassenbezogene Merkmale (class-related features):

- Verhältnis zu Nachbarobjekten der selben Segmentierungsebene (Absolute und relative Grenzlängen, relative Fläche, Distanz zu Nachbarobjekten, u.s.w.)
- Verhältnis zu Objekten einer tieferen oder höheren Segmentierungsebene (Anzahl Objekte, absolute und relative Fläche, u.s.w.)

12. Superobjekte sind Bildobjekte aus grober aufgelösten Segmentierungsebenen.
13. Subobjekte sind Bildobjekte aus feiner aufgelösten Segmentierungsebenen.

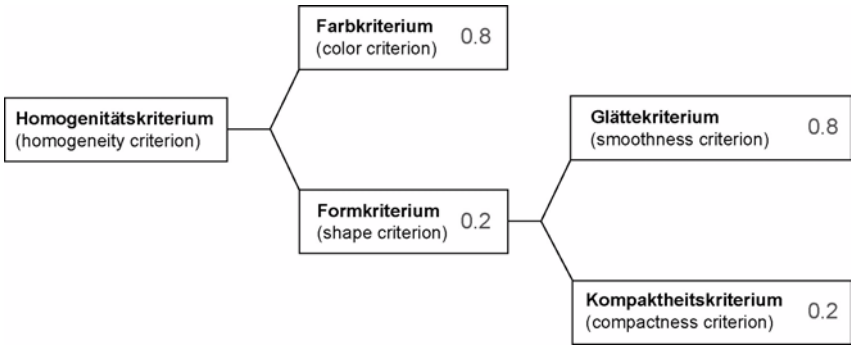
- Zugehörigkeitsmerkmal (Zugehörigkeit eines Bildobjektes zu anderen Klassen)
- “classified as” (Relevanz der Klassifikation eines Bildobjektes in anderen Segmentierungsebenen)

8 Durchführung der Klassifikation mit eCognition

8.1 Durchführung der multiskalaren Segmentierung

Wie in Kapitel 7 beschrieben, werden die Segmentierungsparameter durch Probieren eingesetzt bis das gewünschte Resultat erreicht ist. In dieser Arbeit werden vier Segmentierungsvorgänge mit verschiedenen Auflösungen durchgeführt. Das bedeutet, dass für jedes Luftbild vier Segmentierungsebenen (level) bestehen. Die Benennung der Level erfolgt in eCognition anhand des Auflösungsgrades. Das Level mit der geringsten Auflösung ist Level 4. Das Level mit der feinsten Auflösung ist Level 1. Es zeigte sich, dass die besten Segmentierungsergebnisse erzielt werden, wenn die Homogenitätskriterien nicht für alle vier Levels konstant gehalten werden. Deshalb hier eine Übersicht über die Homogenitätskriterien in den vier Segmentierungsebenen:

Level 3 und Level 4:



Level 1 und Level 2:

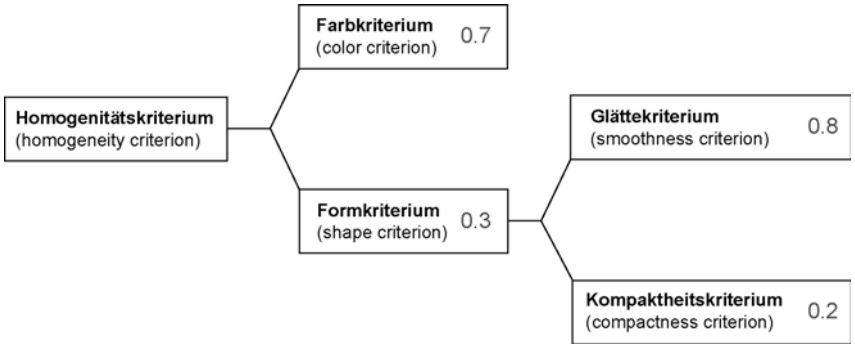


Abbildung 8.1 Übersicht über die Homogenitätskriterien der vier Segmentierungsebenen.

Die Segmentierungen für die Luftbilder der Jahrgänge 1973 bis 1991 werden mit dem panchromatischen Kanal durchgeführt. Für die Segmentierung der multispektralen Datensätze der 2000-er Luftbilder können alle drei Kanäle miteinbezogen werden (Tabelle 8.1).

Level	Scale Parameter	Kanal	Gewichtung
4	180	PAN	1
3	60	PAN	1
2	20	PAN	1
1	7	PAN	1

Level	Scale Parameter	Kanäle	Gewichtung
4	180	Grün, Rot, NIR	1,1,1
3	60	Grün, Rot, NIR	1,1,1
2	20	Grün, Rot, NIR	1,1,1
1	12	Grün, Rot, NIR	1,1,1

Tabelle 8.1 *Die verwendeten Scale Parameter für die Bildsegmentierung. Oben: gewählte Parameter für die Schwarzweissaufnahmen (1973, 1979, 1985, 1991). Unten: gewählte Parameter für die Infrarotaufnahmen (2000).*

Weil die Infrarotaufnahmen wesentlich mehr spektrale Information beinhalten als die Schwarzweissaufnahmen, muss der Scale Parameter im Level 1 ein wenig verändert werden um die gleiche Segmentierung zu errreichen[14].

Die Abbildung 8.2 zeigt die vier Segmentierungsebenen für die panchromatischen sowie für die Infrarotaufnahmen.

14. Bei einem Testlauf wurde folgendes erkannt: umso mehr spektrale Information der Segmentierung zur Verfügung steht, desto grösser muss der Scale Parameter gewählt werden. Zu kleine Segmente erhöhen den Rechenaufwand drastisch und tragen nichts zur Verbesserung des Klassifikationsresultates bei.

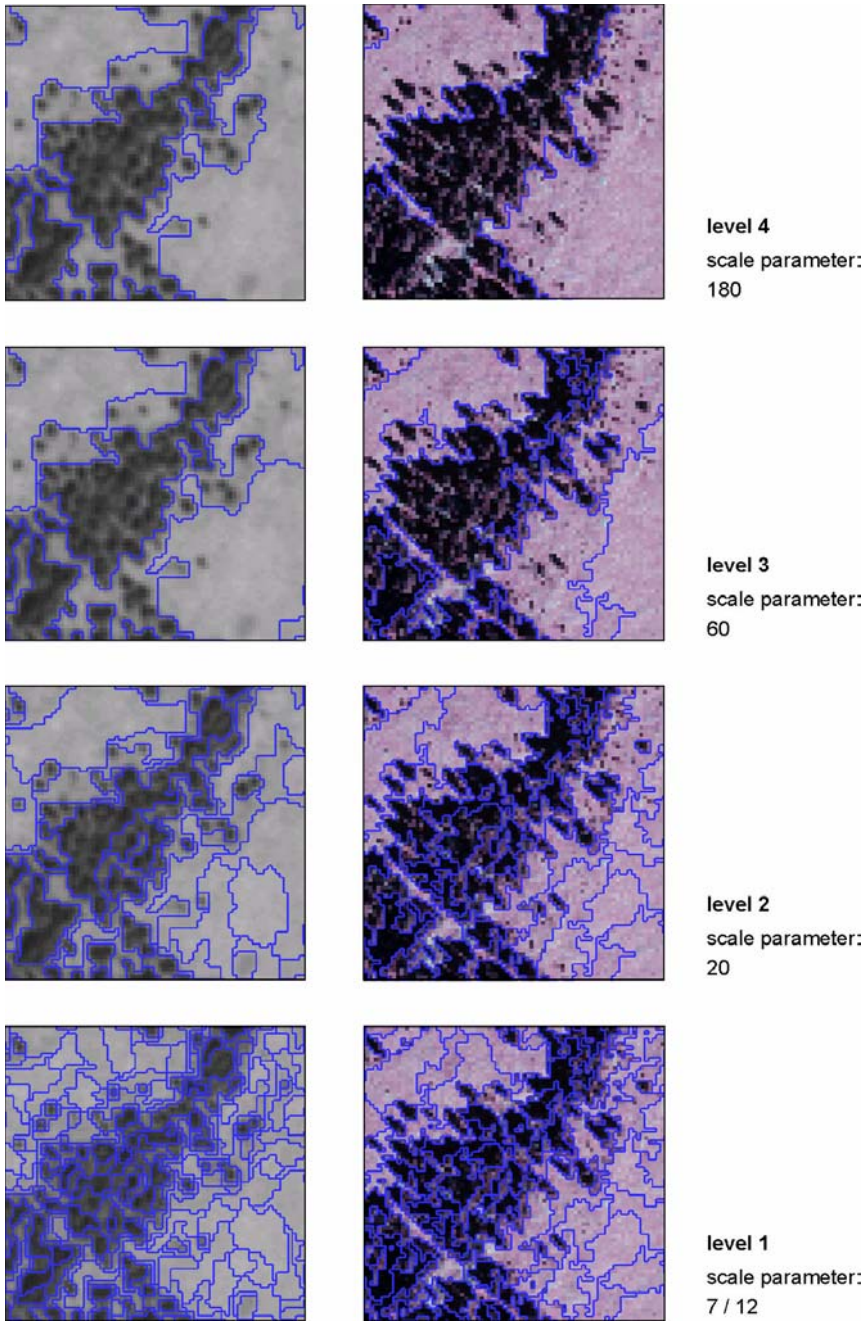


Abbildung 8.2 *Die vier Segmentierungsebenen für die panchromatischen Aufnahmen (links) und die Infrarotaufnahmen (rechts). Bildausschnitt: Alp da Stabelchod.*

8.2 Durchführung der Klassifikation

8.2.1 Klassenhierarchie (class hierarchy) und Definition des Regelwerkes

Die Klassenhierarchie ist so aufgebaut, dass die Klassifikation nach den Regeln einer hierarchischen Klassifikation (Albertz, 2001) durchgeführt werden kann. Es wird also zuerst unterschieden zwischen den Klassen “Vegetation”, “Infrastruktur” und “Geröll”. In einem zweiten Schritt wird die Klasse “Vegetation” in die Klassen “Wald” und “Wiese” aufgeteilt. Beim dritten Schritt werden die Klassen “Infrastruktur” und “Geröll” in Unterklassen unterteilt. Die Klasse “Infrastruktur” besteht aus den Klassen “Strasse”, “Wanderweg” und “Gebäude”. Die Klasse “Geröll” ist noch etwas differenzierter aufgebaut. Sie besteht aus den Klassen “Alluvion”, “Fels/Schutt”, “Wasser” und “Gebäudevorplatz”. Die Abbildung 8.3 gibt einen Überblick über die Klassenhierarchie, welche in dieser Arbeit eingesetzt wird.

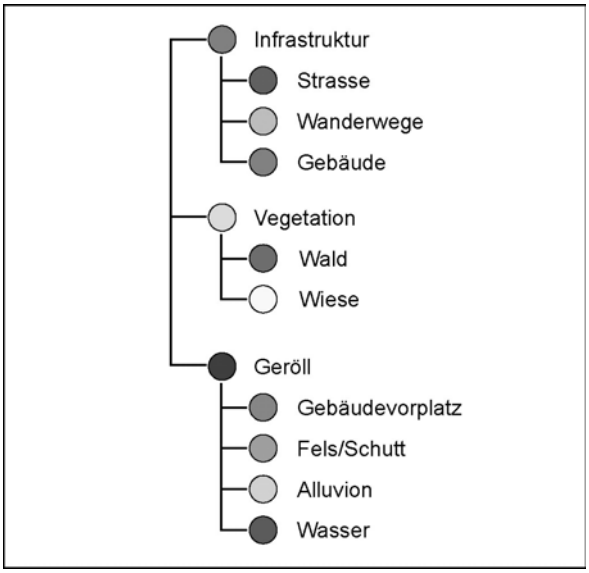


Abbildung 8.3 *Überblick über die Klassenhierarchie (class hierarchy) in welcher das Regelwerk definiert und die Klassifikation durchgeführt wird.*

Die Klassen “Vegetation” und “Geröll”, und damit auch deren Unterklassen, werden allesamt mit der “nearest neighbor”-Klassifikation definiert. Bei diesen Klassen werden also nur die spektralen Werte für die Klassifikation berücksichtigt. Trainingsgebiete für “Wiese”, “Wald”, “Alluvion”, “Fels/Schutt” und “Wasser” sind demnach von Nöten. Für die Klasse “Infrastruktur” wird der wissensbasierte Ansatz gewählt. Strassen, Wanderwege und Gebäude werden anhand der digitalen Luftbilder und der digitalen Pixelkarte im Programm ArcView 3.2 digitalisiert. Diese Shape-Datensätze werden ins eCognition-Projekt als thematische Ebenen (thematic layer) importiert. Weil diese drei Datensätze bereits bei der Segmentierung berücksichtigt werden, können die Strasse, die Wanderwege und die Gebäude sehr genau klassiert werden.

Im Regelwerk der Klassenhierarchie werden die Klassen “Strasse”, “Wanderwege” und “Gebäude” so definiert, dass sie aufgrund ihrer Merkmalswerte aus den thematischen Ebenen klassiert werden.

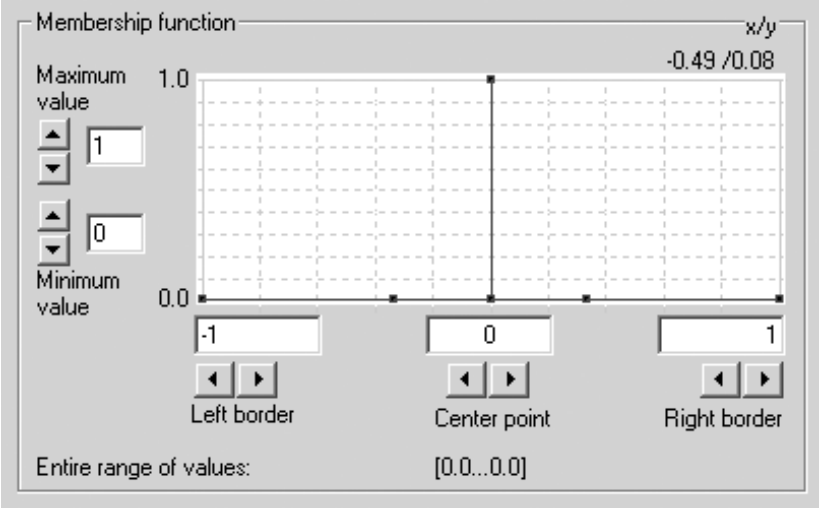


Abbildung 8.4 Membership function. Beispiel für eine wissensbasierte Klassendefinition.

Die Abbildung 8.4 zeigt: Ein Bildobjekt soll als “Strasse” klassiert werden, wenn in der thematischen Ebene “Verkehrsfläche” der Merkmalswert für dieses Bildobjekt “0” ist. Analog zur Klasse “Strasse” werden die Klassen “Wanderwege” und “Gebäude” im Regelwerk definiert.

8.2.2 hierarchisches Vorgehen bei der Klassifikation

Das Prinzip einer hierarchischen Klassifikation wird in Albertz (2001) für pixelorientierte Klassifikationsverfahren beschrieben. In dieser Arbeit wird diese Vorgehensweise in eCognition angewendet. Durch die Möglichkeit, Segmentierungsebenen mit unterschiedlichen Auflösungen zu gestalten, ist die hierarchische Klassifikation für eCognition prädestiniert.

In Level 4 wird vorerst eine grobe Unterscheidung zwischen Geröll, Vegetation und Infrastruktur vorgenommen. Eine Segmentierungsebene tiefer erfolgt dann die grobe Unterteilung der Klasse “Vegetation” in ihre Unterklassen “Wald” und “Wiese”. Die Unterklassen von “Geröll” und “Infrastruktur” bleiben weiterhin inaktiv, d.h. sie werden nicht in die Klassifikation miteinbezogen. In Level 2 wird das optimale Klassifikationsergebnis angenähert. In dieser Segmentierungsebene werden die Objekte der Klassen “Wald” und “Wiese” immer präziser klassiert. In Level 2 erfolgt auch das aktive Teilhaben der Klassen “Fels/Schutt”, “Wasser”, “Alluvion”, “Strasse”, “Wanderwege” und “Gebäude” an der Klassifikation. Erst in Level 1 wird die optimale Klassifikation des Bildes erreicht. Für alle Bildobjekte ist in Level 1 die optimale Klassenzugehörigkeit ermittelt. Mit Hilfe von “Hierarchie-Funktionen” gelingt es auch die äusserst schwierig zu unterscheidenden Klassen “Alluvion”, “Fels/Schutt” und “Wasser” zu klassieren. “Membership functions” zu Superobjekten garantieren, dass die drei Klassen exakt klassiert werden können.

8.3 Die Klassifikationsresultate

8.3.1 Alp da Stabelchod

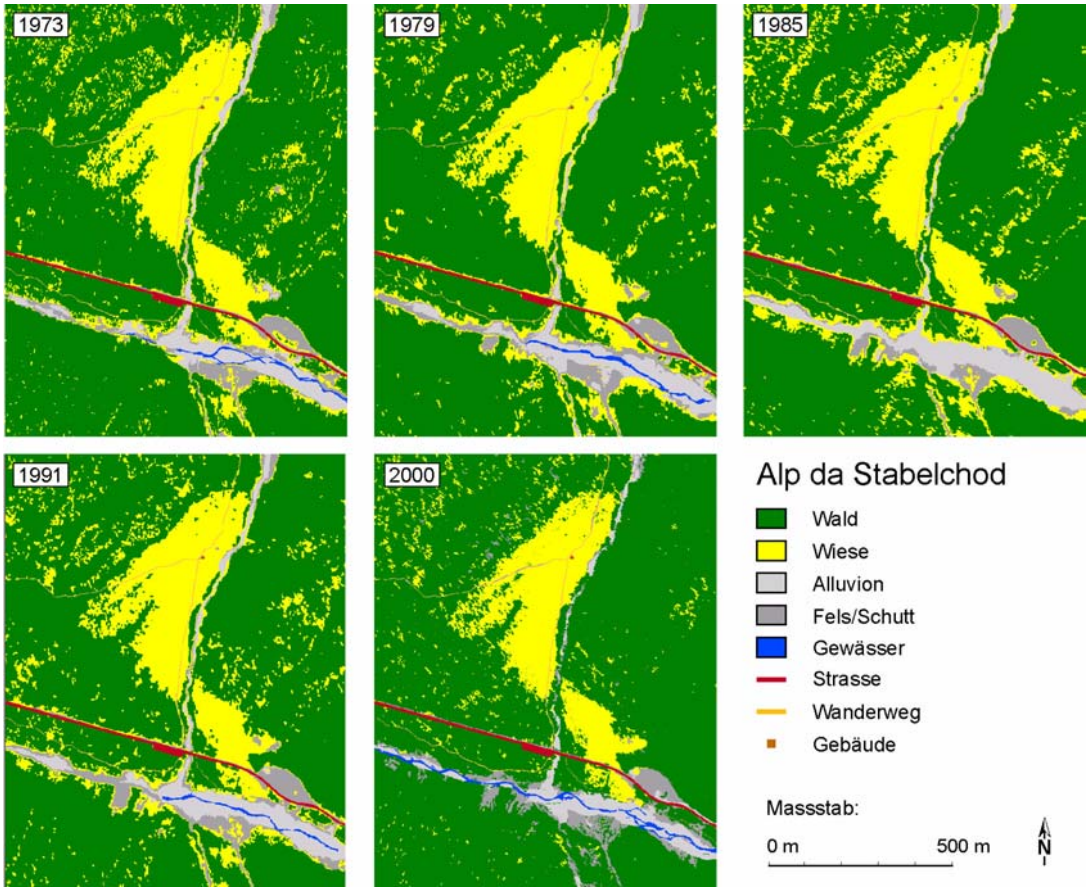


Abbildung 8.5 Datenklassifikation des Untersuchungsgebietes "Alp da Stabelchod".

Die Abbildung 8.5 zeigt die objektorientierte, wissensbasierte Klassifikation der Datensätze des Untersuchungsgebietes "Alp da Stabelchod". Grün dargestellt ist der Wald, der leider nicht in verschiedene Waldtypen unterteilt werden konnte. Gelb eingefärbt ist die Wiesenfläche. Infrastrukturen[15] sind in Rot, Orange und Braun ausgeschieden. Das Alluvion ist in der Abbildung 8.5 Hellgrau, die Klasse "Fels und Schutt" Dunkelgrau dargestellt. Die Gewässer sind als blaue Flächen zu erkennen.

Die als wissensbasierte Information ins eCognition-Projekt integrierten thematischen Ebenen schlagen sich in die Klassifikation durch. In allen Bildern wird die Infrastruktur eindeutig iden-

15. Als Infrastruktur gelten Strassen, Wanderwege und Gebäude.

tifiziert. Bei der Strasse kann man die Postautohaltstelle “P8” kurz vor der Brücke erkennen. Auch die für die Auswertung wichtigsten Klassen “Wald” und “Wiese” sind relativ eindeutig voneinander trennbar. Einzelbäume, welche in der Wiese stehen, können mit der objektorientierten Klassifikation genau detektiert werden. Weniger genau ist die Klassifikation für die Klassen “Alluvion”, “Fels/Schutt” und “Gewässer”. Dies ist am Besten bei dem 85-er Bild der “Alp da Stabelchod” zu sehen. Die Klassifikation detektiert kein Wasser in den beiden Flussbetten, obwohl die Flüsse Wasser führten. Zufriedenstellend wird das Alluvion ausgeschieden.

8.3.2 Alp da Grimmels

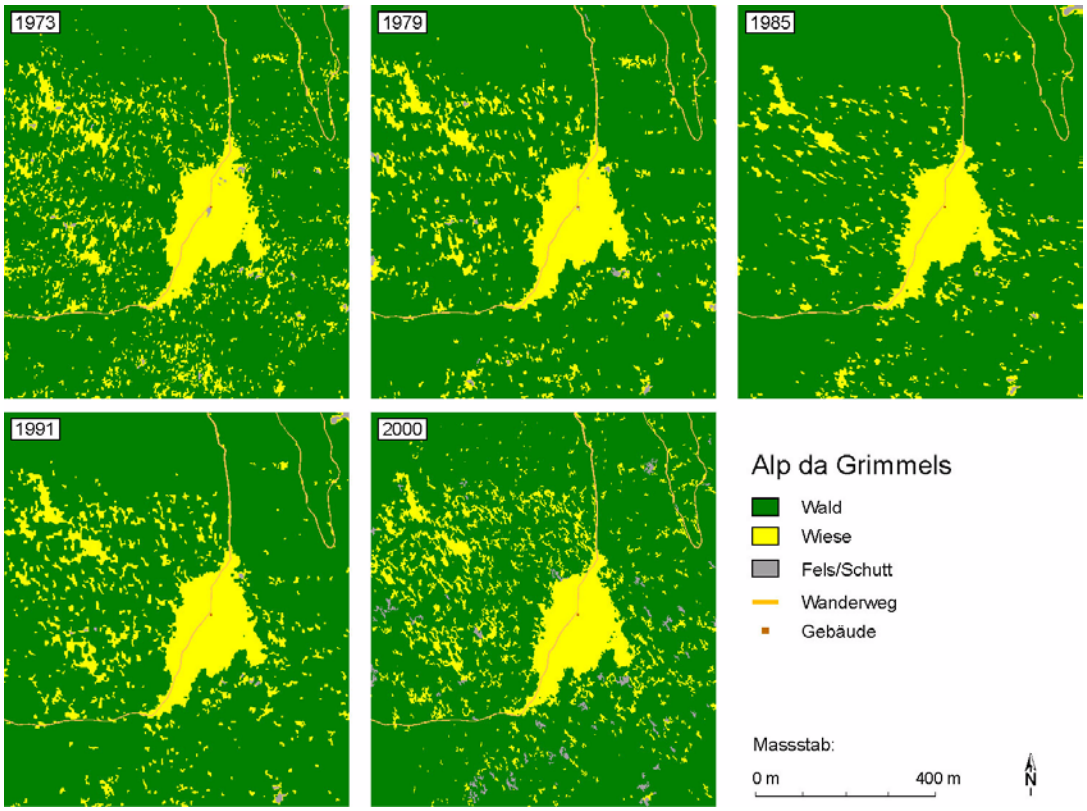


Abbildung 8.6 Datenklassifikation des Untersuchungsgebietes “Alp da Grimmels”.

Die Abbildung 8.6 zeigt die Klassifikation für das Untersuchungsgebiet “Alp da Grimmels”. Auch in diesem Untersuchungsgebiet kann der Wald gut von der Wiese getrennt werden. Aber auch hier ist es unmöglich den Wald in verschiedene Waldgesellschaften zu unterteilen. Besonders gut erweist sich auch bei der Alp da Grimmels das Importieren der wissensbasierten Information durch die beschriebenen Polygon-Datensätze (Wanderweg, Ruine). Es zeigt sich, dass sich beim 2000-er Datensatz wesentlich mehr Flächen als Fels und Schutt extrahieren las-

sen. Durch das bessere spektrale Auflösungsvermögen hebt sich das Gestein im 2000-er Datensatz der “Alp da Grimmels” deutlich als bläuliche Fläche von der Vegetation (rötlich) ab.

8.3.3 Alp La Schera

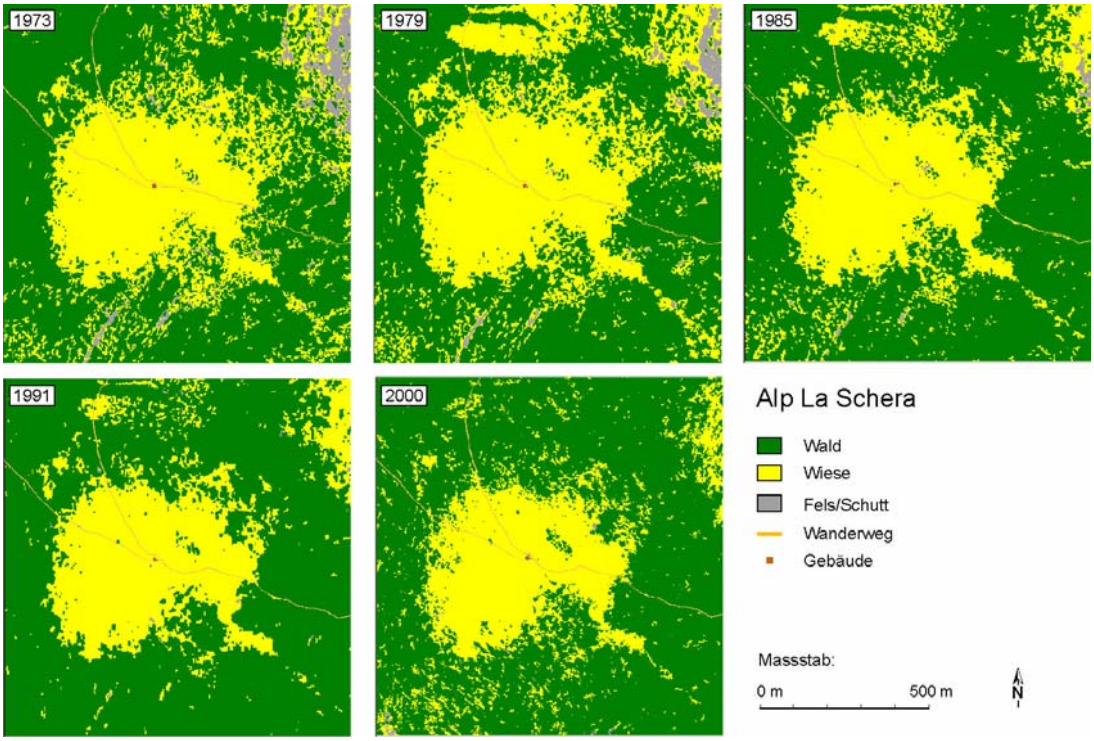


Abbildung 8.7 Datenklassifikation des Untersuchungsgebietes “Alp La Schera”.

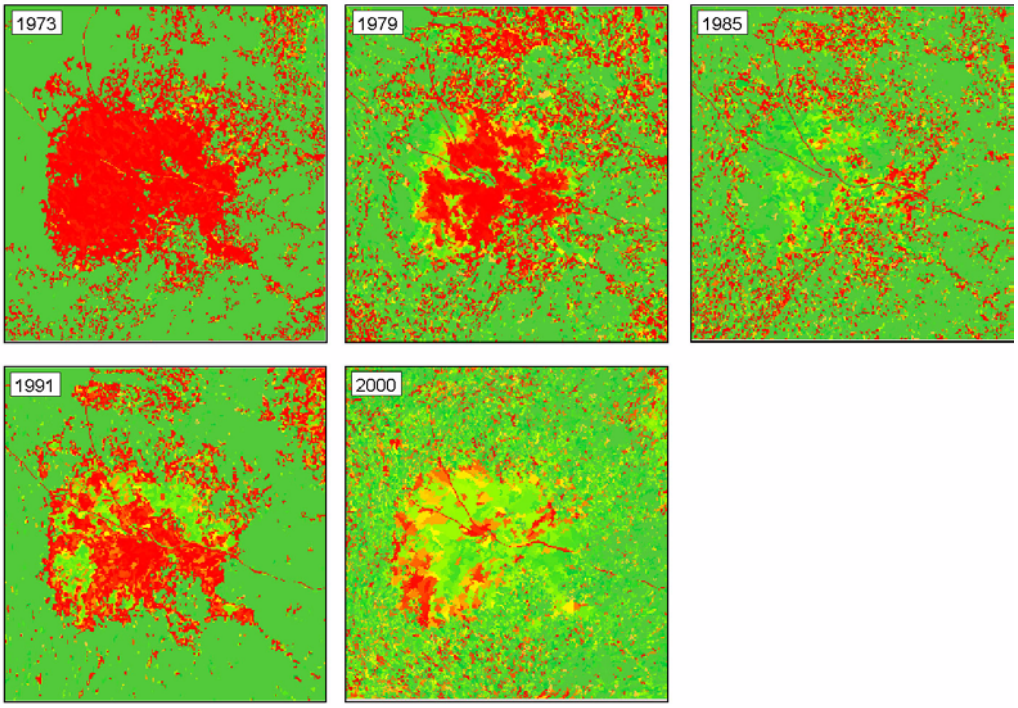
Die Abbildung 8.7 zeigt die Klassifikation für das Untersuchungsgebiet “Alp La Schera”. Ähnlich wie bei der Klassifikation der anderen beiden Untersuchungsgebiete lässt sich auch auf der “Alp La Schera” der Wald leicht von der Wiesenfläche trennen. Als wissensbasierte Information dienen auch für die Klassifikation die Wanderwege und das Gebäude. Der Wanderweg östlich der ehemaligen Alphütte wurde nach 1973 verlegt. 1973, 1979 und 1985 sind im nordöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes Felsen detektiert. Dies sind Schotterrasen, welche im Laufe der Zeit immer dichter verwachsen. Besonders gut zu erkennen ist der Lawinenzug nördlich der ehemaligen Alpweide aus dem Jahre 1979. Dieser wächst in den folgenden Jahren offensichtlich wieder mit Wald ein. Auch in diesem Untersuchungsgebiet kann keine Klassifikation verschiedener Waldtypen vorgenommen werden. Wie in den anderen Untersuchungsgebieten sind ebenfalls Waldlichtungen als Wiesenflächen ausgeschieden.

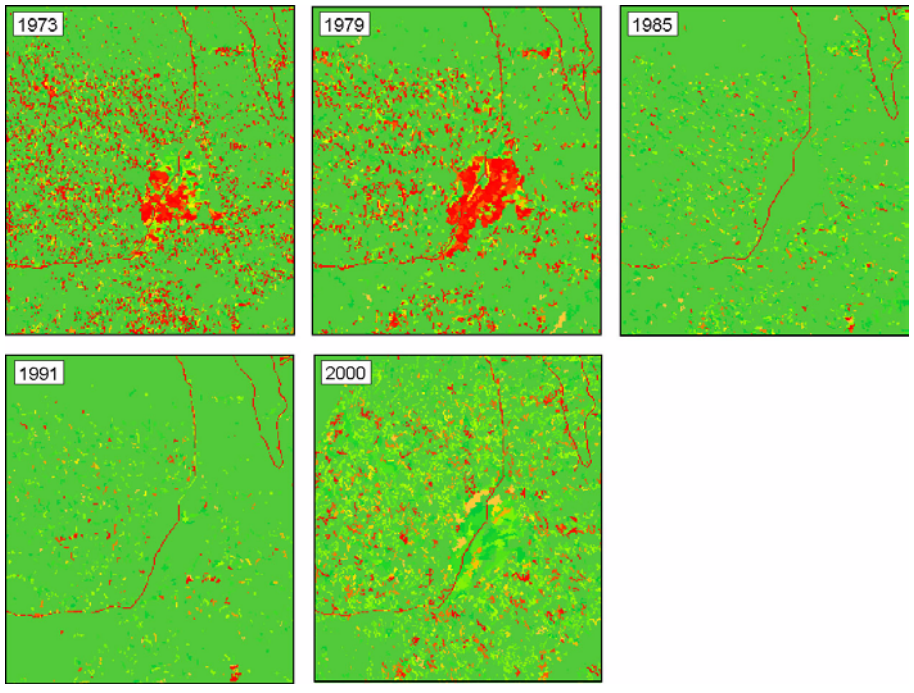
Abbildung 8.8 *Spuren des Lawinenniederganges von 1979 nördlich der "Alp La Schera". In der Nähe des Wanderweges sind sie noch nicht vollständig zugewachsen. (Fotos: N. Lehmann)*

8.4 Genauigkeitsanalyse der Klassifikation

8.4.1 Stabilität der Klassifikation (classification stability) mit eCognition

Aufgrund des "fuzzy logic"-Ansatzes, welcher bei der Klassifikation mit eCognition verwendet wird, besitzt jedes klassierte Objekt eine Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit zu mehr als einer Klasse. Wenn die Differenz zwischen dem besten und zweitbesten Zugehörigkeitswert klein ist, bedeutet dies, dass die Zuweisung zu einer Klasse nicht eindeutig ist. Diese Differenz ist ein Wert für die Stabilität der Klassifikation (classification stability) und kann in eCognition bildlich dargestellt werden. Die Farbe dunkelgrün bedeutet eine eindeutige und rot eine mehrdeutige Klassenzuweisung (Definiens, 2001).


1973
1979
1985
1991
2000


1973
1979
1985
1991
2000

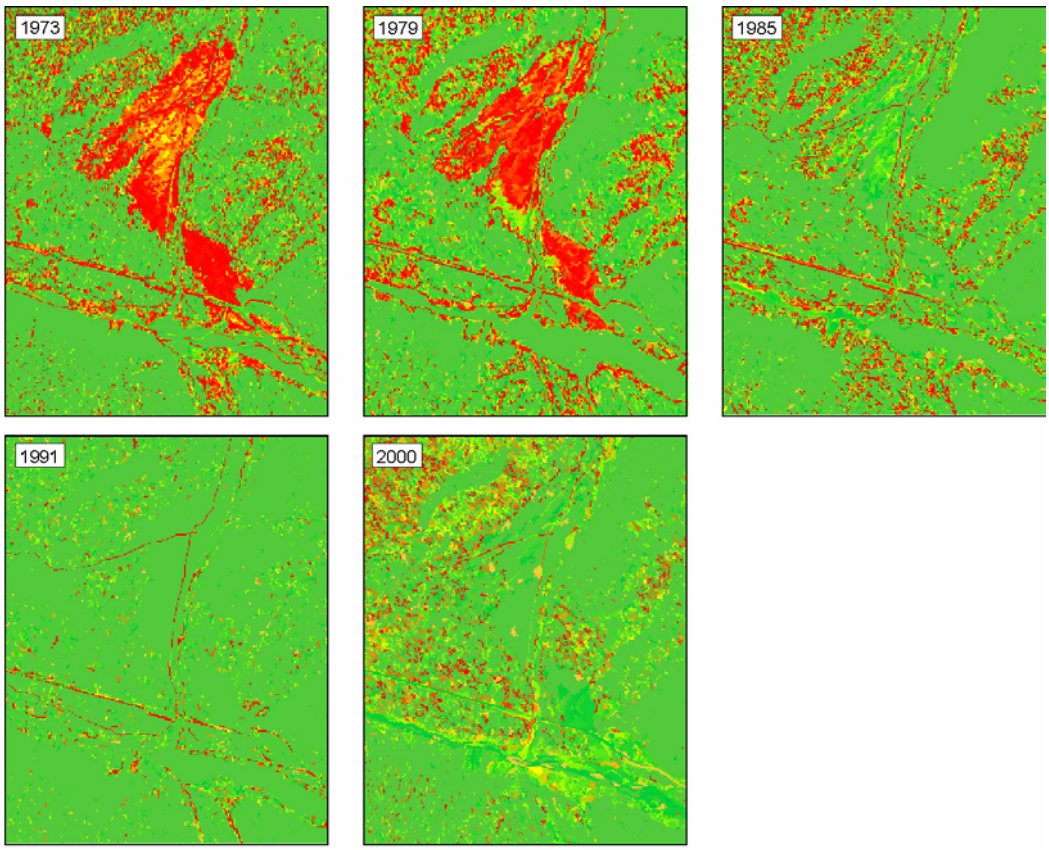


Abbildung 8.9 *Stabilität der Klassifikation (classification stability) mit eCognition berechnet für die Untersuchungsgebiete. oben: Alp La Schera, mitte: Alp da Grimmels, unten: Alp da Stabelchod. Massstab: 1: 22'500.*

Aus der Abbildung 8.9 wird ersichtlich, dass in den Bildern aus den Jahren 1973 und 1979 die Klassenzugehörigkeit für die Klasse "Wiese" nicht sehr deutlich ist. Die grünen Farbtöne in den Bildern der Jahre 1985, 1991 und 2000 deuten darauf hin, dass die Klasse "Wiese" eine klare Klassenzugehörigkeit aufweist. Für die Klasse "Wald" ist die Klassifikation in allen fünf Bildern ziemlich stabil.

8.4.2 Quantitative Analyse mit eCognition

eCognition bietet nebst der "classification stability"-Funktion noch eine weitere Möglichkeit, um die Genauigkeit der Klassifikation zu überprüfen. Es ist dies die quantitative Auswertung der erzielten Klassifikationsergebnisse. Dazu können Bodenreferenzdaten (groundtruth) ins eCognition-Projekt eingefügt werden. Anhand dieser Bodenreferenzdaten errechnet eCognition die Genauigkeitsmasse der Klassifikation.

Da dieser Arbeit kein ausreichend präziser Bodenreferenzdatensatz zur Verfügung steht, muss mittels visueller Interpretation der Luftbilder ein einfacher Bodenreferenzdatensatz generiert werden. Dazu werden in eCognition Bildsegmente der Segmentierungsebene 2 visuell klassiert. Dabei ist wichtig, dass die ausgewählten Bildsegmente in allen fünf Bild-Jahrgängen die gleiche Klasse aufweisen. Diese Testgebiete können als eine sogenannte TTA Mask exportiert werden. Dieser angefertigte Bodenreferenzdatensatz kann auf jedes Bild angewendet werden, um das Klassifikationsresultat zu überprüfen.

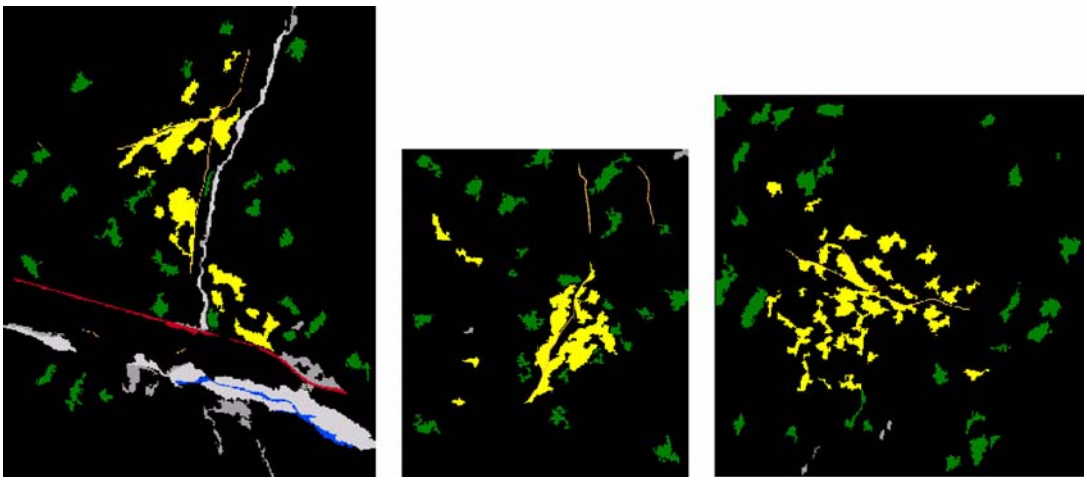


Abbildung 8.10 *Bodenreferenzdaten (TTA Mask) für Alp da Stabelchod, Alp da Grimmels und Alp La Schera (von links nach rechts). visuell extrahiert. Massstab 1:22'500.*

Als Beispiel soll das Bild des Jahres 1991 der Alp da Stabelchod dienen. Die Bodenreferenzdaten werden mit der Klassifikation verglichen. eCognition berechnet die Genauigkeitsmasse für das 91-er Bild der Alp da Stabelchod. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8.2 dargestellt.

User \ Reference Class	Gewässer	Wege	Gebäude	Strasse	Alluvion	Fels/Schutt	Wald	Wiese	Sum
Confusion Matrix									
Gewässer	890	0	0	0	301	0	0	0	1191
Wege	0	922	0	0	0	0	0	0	922
Gebäude	0	0	29	0	0	0	0	0	29
Strasse	0	0	0	2094	0	0	0	0	2094
Alluvion	614	0	0	0	14517	0	0	0	15131
Fels/Schutt	0	0	0	0	0	6081	0	0	6081
Wald	0	0	0	0	0	4	11354	0	11358
Wiese	6	0	0	0	57	554	0	12276	12893
unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum	1510	922	29	2094	14875	6639	11354	12276	
Accuracy									
Producer	0.747	1	1	1	0.959	1	1	0.952	
User	0.589	1	1	1	0.976	0.916	1	1	
Hellden	0.659	1	1	1	0.968	0.956	1	0.975	
Short	0.491	1	1	1	0.937	0.916	1	0.952	
KIA Per Class	0.579	1	1	1	0.965	0.904	1	1	
Totals									
Overall Accuracy	**0.969**								
KIA	**0.96**								

Tabelle 8.2 *Pixelbasierte Fehlermatrix (Confusion Matrix) und Genauigkeitsmasse (Accuracy) der Klassifikation. Hier für die Klassifikation des Datensatzes Stabelchod des Jahres 1991.*

- **Fehlermatrix (Confusion Matrix)**

Die Tabellen 8.2 und 8.3 zeigen die Fehlermatrix für alle Klassifikationen und Klassen, ausgenommen ist bloss die Klasse “Gebäudevorplatz”. Diese Klasse kommt daher nicht in die Fehlermatrix, weil sie manuell klassiert wurde.

Die Fehlermatrix ist so aufgebaut, dass die Kolonnen die Daten der Bodenreferenz darstellen. In Zeilen sind die vom Anwender klassierten Werte aufgeführt. Da es in dieser Arbeit besonders um das Verhältnis zwischen “Wald” und “Wiese” geht, soll an dieser Stelle besonders auf die Werte dieser beiden Klassen eingegangen werden. Für beide Klassen resultiert eine präzise Übereinstimmung der Klassifikation mit den Bodenreferenzdaten. Von den 12’276 im Bodenreferenzdatensatz als “Wiese” ausgeschiedenen Pixel, sind in der Klassifikation alle diese 12’276 Pixel (100 %) ebenfalls als Wiese klassiert. Genau dasselbe Resultat liefert die Klassifikation für den Wald. Von den 11’354 im Bodenreferenzdatensatz als “Wald” ausgewiesenen Pixel, sind 11’354 Pixel (100 %) als Wald klassiert. Dass die Klassen “Gebäude”, “Wanderwege” und “Strasse” als vollkommen richtig klassiert angegeben werden ist nicht weiter erstaunlich. Diesen Klassen lagen bei der Klassifikation die wissensbasierten Informationen zu Grunde. Die genaue Klassifikation der übrigen Klassen ist aber doch eher erstaunlich.

- **Genauigkeitsmasse (Accuracy)**

Die “producer’s accuracy” zeigt an, wie häufig ein Pixel der Referenzdaten richtig klassiert wurde. Im Bild der Alp da Stabelchod liegt die “producer’s accuracy” für die Klasse “Wald” bei 100 % und für die Klasse “Wiese” bei 95,2 %. Die “user’s accuracy” zeigt die Wahrscheinlichkeit an, dass es sich bei einem klassierten Pixel der Klasse x auch in Wirklichkeit um das Objekt x handelt. Die “user’s accuracy” ist in diesem Beispiel für die Klassen “Wald” und

“Wiese” 100 %. Die “overall accuracy” ist das Verhältnis der Summe der richtig klassierten Pixel (Diagonale der Fehlermatrix) zur Gesamtzahl der zu klassierenden Pixel. Fehler 1. und 2. Art werden nicht berücksichtigt. Für die Klassifikation des 91-er Bildes der Alp da Stabelchod liegt die “overall accuracy” bei 96,9 %. Der Kappakoeffizient (KIA) zeigt, wie gut ein Klassifikationsresultat mit den Bodenreferenzdaten übereinstimmt. Da “Kappa” von der Klassengrösse unabhängig ist und Fehler 1. und 2. Art berücksichtigt, ist es das aussagekräftigste Genauigkeitsmass. Der höchste Wert von “Kappa” ist 1. In der vorliegenden Klassifikation liegt der Kappakoeffizient bei 0,96.

Stabelchod 1973	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	0.997	0.990
User's Accuracy	0.988	0.996
KIA	0.985	
Overall Accuracy	0.993	

Stabelchod 1979	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	0.997	0.999
User's Accuracy	0.999	0.990
KIA	0.993	
Overall Accuracy	0.900	

Stabelchod 1985	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	0.995	0.997
User's Accuracy	0.997	0.990
KIA	0.991	
Overall Accuracy	0.900	

Stabelchod 2000	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	0.987	0.992
User's Accuracy	0.991	0.976
KIA	0.966	
Overall Accuracy	0.983	

La Schera 1973	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	0.991	0.963
User's Accuracy	0.958	0.989
KIA	0.948	
Overall Accuracy	0.974	

La Schera 1979	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	0.992	0.963
User's Accuracy	0.958	0.993
KIA	0.952	
Overall Accuracy	0.976	

La Schera 1985	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	0.990	0.984
User's Accuracy	0.982	0.991
KIA	0.974	
Overall Accuracy	0.987	

La Schera 1991	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	1.000	1.000
User's Accuracy	1.000	1.000
KIA	1.000	
Overall Accuracy	1.000	

La Schera 2000	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	0.954	0.968
User's Accuracy	0.965	0.955
KIA	0.920	
Overall Accuracy	0.960	

Grimmels 1973	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	0.963	0.974
User's Accuracy	0.975	0.958
KIA	0.934	
Overall Accuracy	0.967	

Grimmels 1979	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	0.979	0.994
User's Accuracy	0.994	0.976
KIA	0.971	
Overall Accuracy	0.985	

Grimmels 1985	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	0.968	0.995
User's Accuracy	0.995	0.965
KIA	0.961	
Overall Accuracy	0.981	

Grimmels 1991	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	1.000	0.999
User's Accuracy	0.999	1.000
KIA	0.999	
Overall Accuracy	1.000	

Grimmels 2000	Wald	Wiese
Producer's Accuracy	0.964	0.977
User's Accuracy	0.978	0.962
KIA	0.939	
Overall Accuracy	0.970	

Tabelle 8.3 *Genauigkeitsmasse der Klassifikationen. Berechnet mit Hilfe der Bodenreferenzdaten für die Klassen "Wald" und "Wiese".*

Für alle Szenen konnten derart gute Klassifikationsergebnisse erzielt werden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Klassifikation der Bilder eine sehr hohe Genauigkeit aufweist. Damit eignen sich die Klassifikationen sehr gut, um eine aussagekräftige "Change Detection" durchzuführen.

8.4.3 Qualitative Analyse der Klassifikation

Nebst den quantitativen Analysen mit eCognition wird in dieser Arbeit auch eine qualitative Analyse der Klassifkation der einzelnen Bilder durchgeführt. Dazu wird das Klassifikationsergebnis von jedem einzelnen Bild als Polygondatensatz (shp-file) exportiert. In der GIS-Software ArcView 3.2 werden die Polygondatensätze geometrisch lokalisiert und bearbeitet. Es werden mit Hilfe der "Legendeneditierungs-Funktion" die Waldränder farblich einheitlich dargestellt und die übrigen Klassen transparent geschaltet. Als "Themen" werden anschliessend alle digitalen Orthophotos (image files) ins ArcView-Projekt geladen. Wird das entsprechende Orthophoto mit dem erstellten "Wald-Datensatz" des gleichen Jahrganges überlagert, ermöglicht die Darstellung dem Anwender die visuellen Kontrolle der Klassifikation bezüglich der Klasse "Wald". Genau gleich funktioniert dieses Vorgehen natürlich auch mit den anderen Klassen.

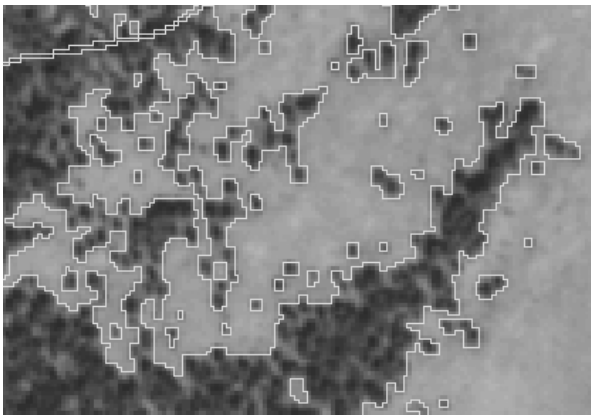


Abbildung 8.11 *Visuelle Überprüfung der Klassifikation in ArcView 3.2. Hier als Beispiel ein Ausschnitt von der "Alp da Stabelchod" 1991. Hellgrau: detektierte Waldgrenze. Massstab 1:2'000.*

Auch bei der qualitativen Analyse der Klassifikationsergebnisse wird eine sehr hohe Genauigkeit der Klassifikationen festgestellt.

Es stellt sich bezüglich der späteren quantitativen Auswertung nur ein Problem, nämlich das der unterschiedlichen Aufnahmeparameter der Datensätze. Sowohl die spektrale als auch die geometrische Auflösung in den originalen Datensätzen des Jahres 2000 deutlich feiner als bei den 73-er, 79-er, 85-er und 91-er Datensätzen. Diese Eigenschaften schlagen sich auch in den Resampling-Datensätzen (räumliche Auflösung: 1,5 m) nieder.

Deshalb können in der Klassifikation der 2000-er Bilder auch die einzelnen gebüschartigen Gehölze inmitten der ehemaligen Alpweide detektiert werden. Bei den übrigen Datensätzen stellt sich dieses Unterfangen als unmöglich heraus (vgl. Abb. 8.12).

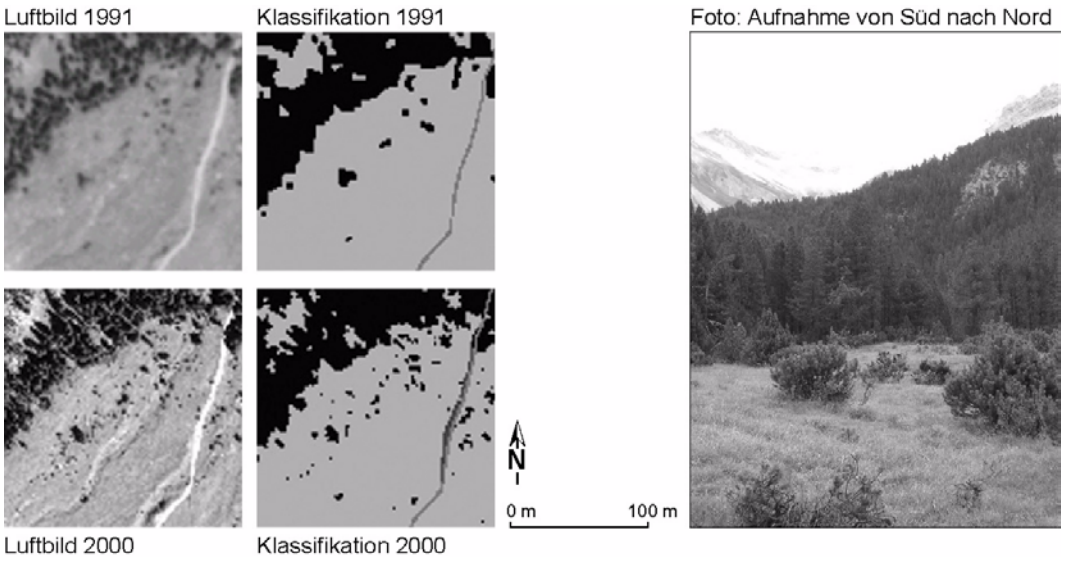


Abbildung 8.12 *Vergleich der Datenklassifikationen zweier Luftbildtypen (SW und CIR) am Beispiel eines Ausschnittes von der "Alp da Stabelchod" 1991 und 2000. (Foto: N. Lehmann)*

Um die Ergebnisse miteinander vergleichbar zu machen, wird demnach eine Filterung der 2000-er Datenklassifikationen durchgeführt. Dabei werden in ArcView alle Waldflächen entfernt, welche kleiner als 4 m^2 und nur von "Wiese" umgeben sind.

9 Veränderungsanalyse

9.1 Was ist ArcView 3.2?[16]

ArcView ist ein Softwarepaket, welches von der Firma ESRI (Environmental Systems Research Institute) entwickelt und vertrieben wird. ArcView wird seit mehreren Jahren erfolgreich im GIS-Bereich eingesetzt. ArcView ist sozusagen der kleine Bruder von ArcInfo, dem anderen Produkt der amerikanischen Firma. ArcView hat gegenüber der Software ArcInfo grosse Vorteile in der Benutzerfreundlichkeit. ArcInfo hingegen erlaubt eindeutig mehr Funktionen und Anwendungsmöglichkeiten. ESRI hat stets neue Versionen und Upgrades für ArcView entwickelt. Das neuste Produkt der Firma ESRI ist ArcGis. ArcGis verbindet laut ESRI die Anwenderfreundlichkeit von ArcView mit der Vielseitigkeit von ArcInfo.

ArcView 3.2 erlaubt das Abfragen, Darstellen, Analysieren und Verknüpfen von GIS-Daten. Ein wichtiges Element von ArcView 3.2 ist die Möglichkeit Karten automatisch zu generieren. ArcView kann Daten verschiedenster Formate (tiff, jpg, shp, dwg, dxf,...) darstellen und verarbeiten. In der Regel werden GIS-Daten als Punkt-, Linien- oder Polygon-Datensätze benutzt. Jedes dargestellte Objekt ist verknüpft mit einer Tabelle, wo allgemeine Informationen und Attribute zum jeweiligen Objekt vermerkt sind. Dank dieser Tabellen lassen sich mit ArcView komplexe Datenabfragen und Analysen anstellen (z.B.: Sichtbarkeitsanalysen für optimale Antennenstandorte in der Mobilfunktechnologie).

9.2 Vorbereitungen zur Veränderungsanalyse

9.2.1 Importieren der Klassifikation

Wie in Kapitel 8 erwähnt, besteht bei eCognition die Möglichkeit, Datenklassifikationen als shape-Files zu exportieren. Die erreichte Klassifikation aller Datensätze kann also ohne Probleme in ein ArcView-Projekt importiert und weiter verarbeitet werden. Die Klassifikationsdaten sind als Polygondatensätze verfügbar. Alle Klassifikationen werden mit denselben Attributen ins ArcView-Projekt integriert. Die gewählten Attribute sind Identifikationsnummer, bestes Klassifikationsresultat und die Klasse, welcher ein Segment zugeteilt wurde. Beim Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod” sind es ungefähr 65’000, bei der “Alp La Schera” ca. 48’000 und bei der “Alp da Grimmels” sind es um die 50’000 Polygone. Entsprechend gross ist der Rechenaufwand beim Darstellen der verschiedenen Klassifikationen.

Zur besseren Übersicht werden die Polygondatensätze der einzelnen Klassifikationen mittels der Legendeneditierungsfunktion (legend editor) farblich so dargestellt, dass sie mit den gebräuchlichen Abbildungen verglichen werden können.

16. Die Ausführungen in diesem Kapitel beruhen weitgehend auf ESRI, 1998.

9.2.2 Verrechnen der einzelnen Klassifikationen

Um die Veränderung zu erfassen, müssen die verschiedenen Datensätze miteinander verrechnet werden. Dazu bietet ArcView 3.2 eine Erweiterung (Extension), die zum Lieferumfang der Software gehört. Das Tool trägt den Namen “Geoprocessing Wizard”. Mit dem “Geoprocessing Wizard” lassen sich zwei Datensätze miteinander verrechnen. Verschiedene Funktionen können dabei ausgewählt werden. Zu ihnen zählen beispielsweise das Verschneiden (intersect), das Verschmelzen (merge), das Ausschneiden (clip) und das Kombinieren (combine) von verschiedenen Themen. Während des Vorgangs generiert ArcView ein neues Shape-File, welches die Attribute beider Input-Datensätze enthält. In dieser Arbeit wird genau diese Eigenschaft zu Nutze gemacht.

Vorab müssen allerdings die Attribut-Tabellen der zu verrechnenden Klassifikations-Datensätze so vorbereitet werden, dass eine anschliessende Datenabfrage durchgeführt werden kann. Dazu wird in der Tabelle jedes Datensatzes ein Feld zugefügt, welches Informationen bezüglich der Klasse der Segmente beinhaltet (Feld *Klass73* beinhaltet für jedes Polygon die Klassenzugehörigkeit, also beispielsweise: *Wald*).

Nun aber zur eigentlichen Arbeit mit dem “Geoprocessing Wizard”. In den Berechnungen zur Veränderungsanalyse werden jeweils zwei Klassifikationen miteinander verschnitten (intersect). Die 73-er wird mit der 79-er verschnitten, die 79-er mit der 85-er, die 85-er mit der 91-er und die 91-er mit der 2000-er Klassifikation. Dadurch entstehen neue Polygondatensätze, welche die Attributtabellen beider Ausgangsthemen beinhalten. Aus ihnen wird die Veränderung der Landschaft zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkten extrahiert. Die Vollständigkeit der vier errechneten Datensätze ermöglicht eine komplexe Abfrage bezüglich der Veränderungen.

In den errechneten Veränderungs-Datensätzen werden mit Hilfe des Abfragetools (Query Builder) vier Abfragedurchgänge durchgeführt. Im ersten Schritt werden jene Polygone herausgefiltert, welche im früheren Zeitschnitt “Wiese” waren und im späteren Zeitschnitt als “Wald” klassiert wurden. Also: Alle Flächen, welche von Wiese zu Wald wurden. All diesen Polygonen wird in einem speziellen Veränderungs-Tabellenfeld (z.B. 73_79 [e_f], oder 91_00) der Wert “1” zugewiesen:

([Klass73] = “Wiese”) and ([Klass79] = “Wald”) = 1 (9.1)

Im zweiten Abfragedurchgang werden jene Polygone extrahiert, welche im früheren Zeitschnitt “Wald” waren und im späteren Zeitschnitt als “Wiese” ausgeschieden sind. Also: Alle Flächen, welche von Wald zu Wiese wurden. All diesen Polygonen wird im Veränderungs-Tabellenfeld der Wert “2” zugeordnet.

([Klass73] = “Wald”) and ([Klass79] = “Wiese”) = 2 (9.2)

Im dritten Abfragedurchgang werden jene Polygone extrahiert, welche im früheren Zeitschnitt eine andere Klasse als “Wald” oder “Wiese” waren und im späteren Zeitschnitt als “Wald” klassiert sind. Also: Alle Flächen, welche von Fels/Schutt, Alluvion, Strasse, Wanderweg, Gebäude und Gewässer zu Wald wurden. All diesen Polygonen wird im Veränderungs-Tabellenfeld der Wert “3” zugeordnet.

([Klass79] = “Wald”) and not ([Klass73] = “Wald”) and ([e_f] = “0”) = 3 (9.3)

Im vierten Abfragedurchgang werden jene Polygone extrahiert, welche im früheren Zeitschnitt “Wald” waren und im späteren Zeitschnitt als etwas anderes als “Wald” klassiert sind. Also: Alle Flächen, welche von Wald zu Fels/Schutt, Alluvion, Strasse, Wanderweg, Gebäude oder Gewässer wurden. All diesen Polygonen wird im Veränderungs-Tabellenfeld der Wert “4” zugeordnet.

([Klass73] = “Wald”) and not ([Klass79] = “Wald”) and ([e_f] = “0”) = 4 (9.4)

Die erzeugten Veränderungs-Datensätze können wiederum mit Hilfe des Legendeneditierungstools dargestellt werden. Damit nebst den qualitativen auch quantitative Aussagen über die Veränderung von Flächen gemacht werden können, bietet ArcView die Möglichkeit Flächen von Polygonen zu berechnen. Dazu steht Rechenwerkzeug zur Verfügung. Berechnet wird die Fläche (Tabellenfeld), indem der Befehl

Fläche = [Shape].returnarea (9.5)

dem Rechenwerkzeug zugeteilt wird.

9.2.3 Maskieren der Untersuchungsgebiete für eine detailierte quantitative Auswertung und Abschätzen der von Schattenwurf betroffenen Wiesenfläche

Da in dieser Arbeit erforscht wird, ob die ehemaligen Alpweiden im Schweizerischen Nationalpark verganden, ist es nicht von Bedeutung, ob kleine Waldlichtungen zuwachsen oder eher nicht. Zudem ist die Stabilität der Klassifikation ausserhalb der Alpweiden nicht allzu hoch und somit sind statistische Aussagen bezüglich dieser Gebiete nicht von grossem Nutzen. Deshalb werden die drei Untersuchungsgebiete maskiert (siehe Abb. 9.1).

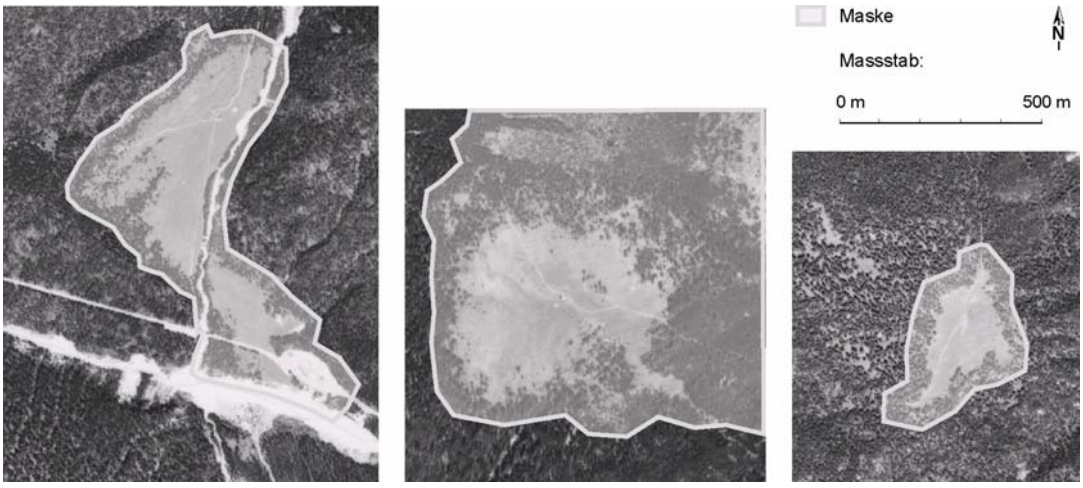


Abbildung 9.1 *Maske für die detaillierte quantitative Auswertung der Waldfläche für alle Untersuchungsgebiete. Für das Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod” dient die Maske auch für eine Abschätzung der vom Schattenwurf betroffenen Wiesenfläche.*

Diese Maske dient auch der Abschätzung des Schattenwurfes. Dieser kann in der Arbeit nicht über die Klassifikation definiert werden, sondern muss auf anderem Wege quantifiziert werden. Dazu dient die Maske über dem Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod”. Innerhalb dieser Maske kann abgeschätzt werden, welche Wiesenfläche von Schattenwurf betroffen ist. Visuell wird aufgezeichnet, welche Waldränder und Einzelbäume Schatten auf als “Wiesen” klassierte Flächen werfen. Die Gesamtlänge des schattenwerfenden Waldrandes wird mit dem Rechenwerkzeug und dem Befehl

$$\text{Länge} = [\text{Shape}].\text{returnlength} \tag{9.6}$$

berechnet. Die Schattenlänge wird für jedes Bild des Untersuchungsgebietes “Alp da Stabelchod” ebenfalls visuell ermittelt. Indem an 30 Stellen die Länge des Schattens bestimmt wird. Daraus lässt sich ein durchschnittlicher Schattenwurf ermitteln. Wird nun die durchschnittliche Schattenlänge mit der Gesamtbreite des schattenwerfenden Waldrandes multipliziert, kann die beschattete Wiesenfläche für jedes Bild des Untersuchungsgebietes “Alp da Stabelchod” ermittelt werden (siehe Tab. 9.1).

Bild-Nummer / Aufnahmedatum	schattenwerfender Waldrand	durchschnittliche Schattenlänge	Schattenfläche auf Wiese
1115 / 12.09.1973	1’180 m	3.0 m	3’540.0 m^2
8180 / 08.09.1979	1’200 m	3.0 m	3’600.0 m^2
4289 / 15.08.1985	1’113 m	3.3 m	3’673.5 m^2
7235 / 16.07.1991	1’275 m	2.8 m	3’570.0 m^2
5242 / 24.08.2000	1’200 m	4.2 m	5’040.0 m^2

Tabelle 9.1 *Berechnung der vom Schattenwurf betroffenen Wiesenfläche für das Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod”.*

Diese Berechnungen werden später in der quantitativen Veränderungsanalyse berücksichtigt.

10 Resultate

Die qualitative Veränderungsanalyse wird für alle drei Untersuchungsgebiete durchgeführt. Die quantitative Veränderungsanalyse wird ebenfalls für alle Untersuchungsgebiete gemacht, allerdings nur unter der in Kapitel 9 erstellten Maske. Beim Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod” werden zudem noch die Abschätzungen der Schattenflächen in die quantitative Analyse einbezogen.

10.1 Ergebnisse der Veränderungsanalyse für das Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod”

In diesem Kapitel werden die qualitativen und quantitativen Ergebnisse der Veränderungsanalyse für das Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod” aufgeführt.

Das Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod” weist im untersuchten Zeitraum eine geringe Ausdehnung der Waldfläche auf Kosten der Wiesenfläche auf. Die Zunahme der Waldfläche ist zwischen 1973 und 1985 konstant. Die Abnahme der Waldfläche im Zeitraum 1985 und 1991 ist auf den Sturm “Vivian” zurückzuführen. “Vivian” fegte im Februar 1990 über weite Teile Mitteleuropas. Dabei verschonte er auch den Schweizerischen Nationalpark nicht. Einzelne Bäume hielten den heftigen Windböen nicht stand. Besonders betroffen waren isolierte Einzelbäume und solche, welche in Waldrandnähe wurzelten.

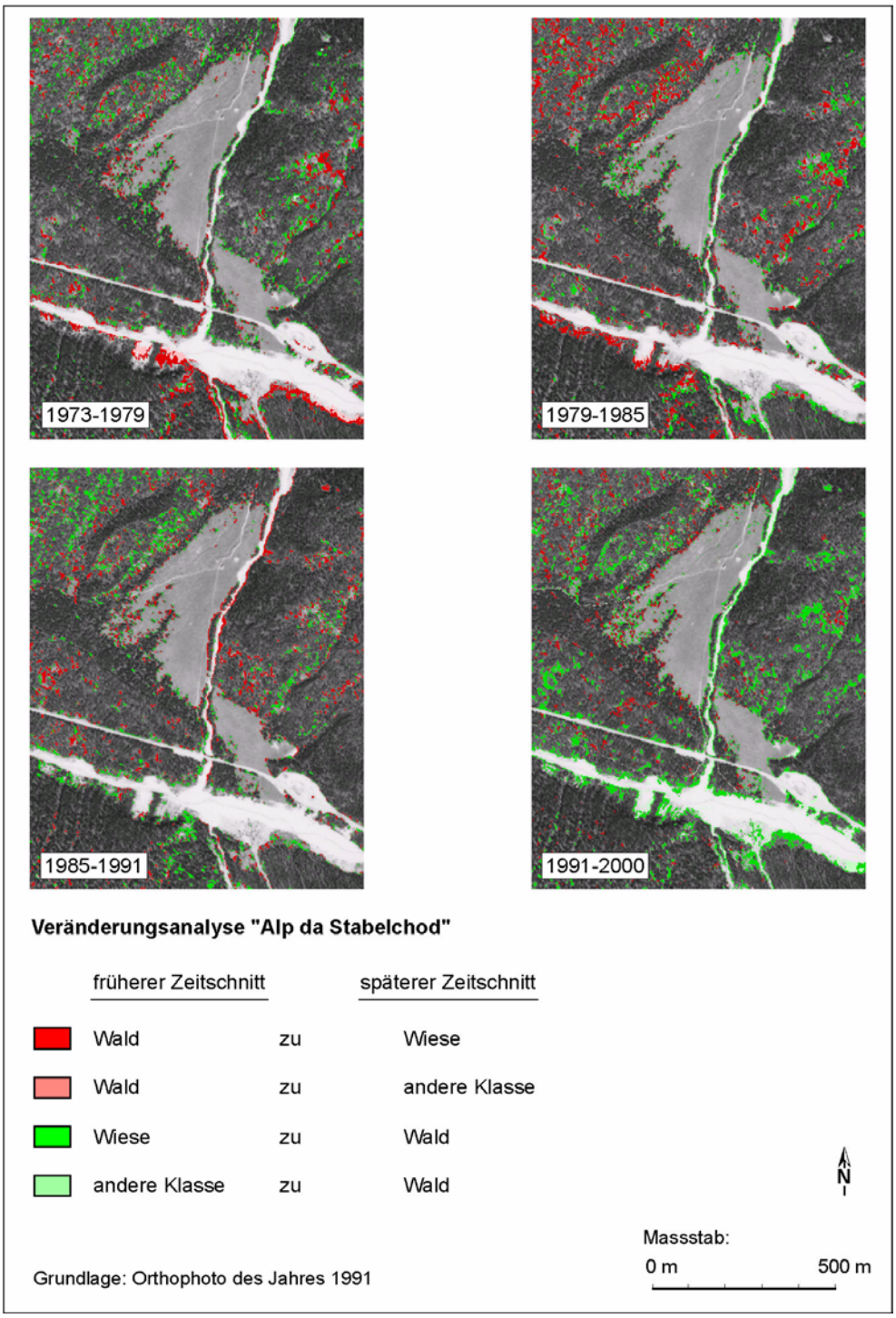
Die Gründe für die starke Zunahme der Waldfläche im Zeitraum 1991 bis 2000 sind in den unterschiedlichen Aufnahmeparametern der beiden Luftbilder begründet. Zum einen beträgt der Zeitschnitt 9 Jahre anstatt der normalen 6 Jahre und zum anderen umfassen die in Kapitel 8.4.3 durchgeführten Anpassungen in der 2000-er Klassifikation nicht die gesamten, auf die verschiedenen Aufnahmeparameter zurückzuführenden Unterschiede.

Nach der Filterung betrug die Zunahme der Waldfläche im Zeitraum 1991 bis 2000 noch 9’500 m^2. Diese Zunahme der Waldfläche kann durchaus mit den Bilanzen der anderen Zeitschnitte verglichen werden, bedenkt man doch den um 3 Jahre längeren Untersuchungszeitraum.

Die Frage nach den Auswirkungen des Sturmes “Lothar” vom Dezember 1999 auf den Waldbestand im Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod” lässt sich beantworten. Praktisch der gesamte Kanton Graubünden blieb vom Sturm verschont. Damit verursachte “Lothar” auch im Schweizerischen Nationalpark keine merklichen Windwurfflächen.

Die Abbildung 10.2 zeigt auch den sehr geringen Einfluss des Schattenwurfes auf die Ergebnisse.

Abbildung 10.1 Change Detection "Alp da Stabelchod".



Zeitschnitt	Waldfläche dazu (m^2)	Waldfläche weg (m^2)	Veränderung total (m^2)
1973 - 1979	11’515	7’201	+ 4’314
1979 - 1985	11’958	7’346	+ 4’612
1985 - 1991	5’997	12’682	- 6’685
1991 - 2000	22’427	7’697	+ 14’730

Tabelle 10.1 *Ergebnisse der Veränderungsanalyse pro Zeitschnitt für die “Alp da Stabelchod” (nur maskiertes Gebiet).*

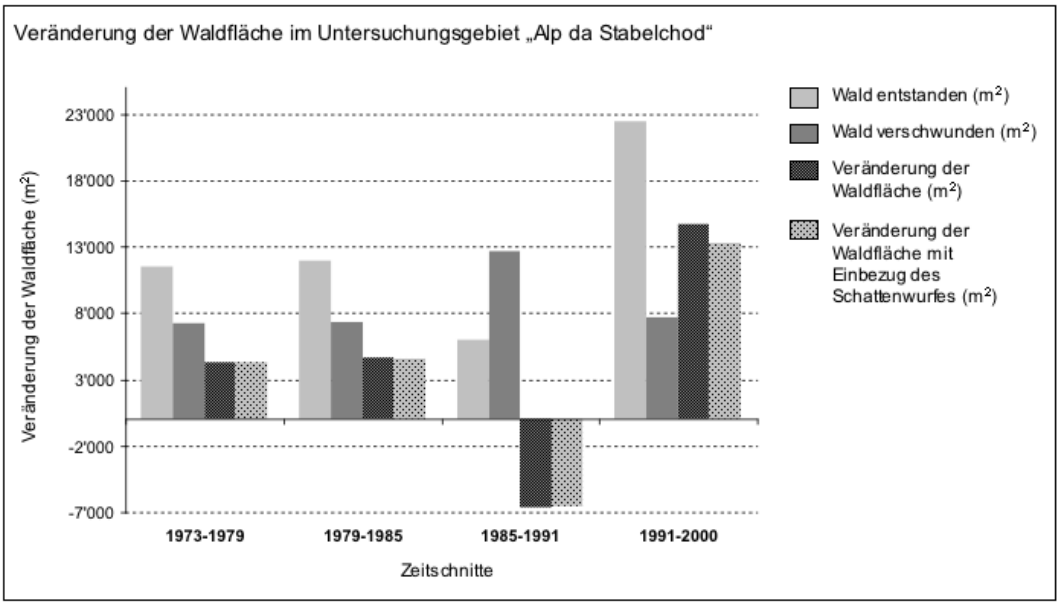


Abbildung 10.2 *Veränderung der Waldfläche im Untersuchungsgebiet “Alp da Stabelchod” (nur maskiertes Gebiet).*

10.2 Ergebnisse der Veränderungsanalyse für das Untersuchungsgebiet “Alp La Schera”

In diesem Kapitel werden die qualitativen und quantitativen Ergebnisse der Veränderungsanalyse für das Untersuchungsgebiet “Alp La Schera” aufgeführt.

Zeitschnitt	Waldfläche dazu (m^2)	Waldfläche weg (m^2)	Veränderung total (m^2)
1973 - 1979	47’580	66’593	- 19’013
1979 - 1985	87’567	18’484	+ 69’083
1985 - 1991	42’257	8’471	+ 33’786
1991 - 2000	46’312	29’315	+ 16’997

Tabelle 10.2 Ergebnisse der Veränderungsanalyse pro Zeitschnitt für die “Alp La Schera” (nur maskiertes Gebiet).

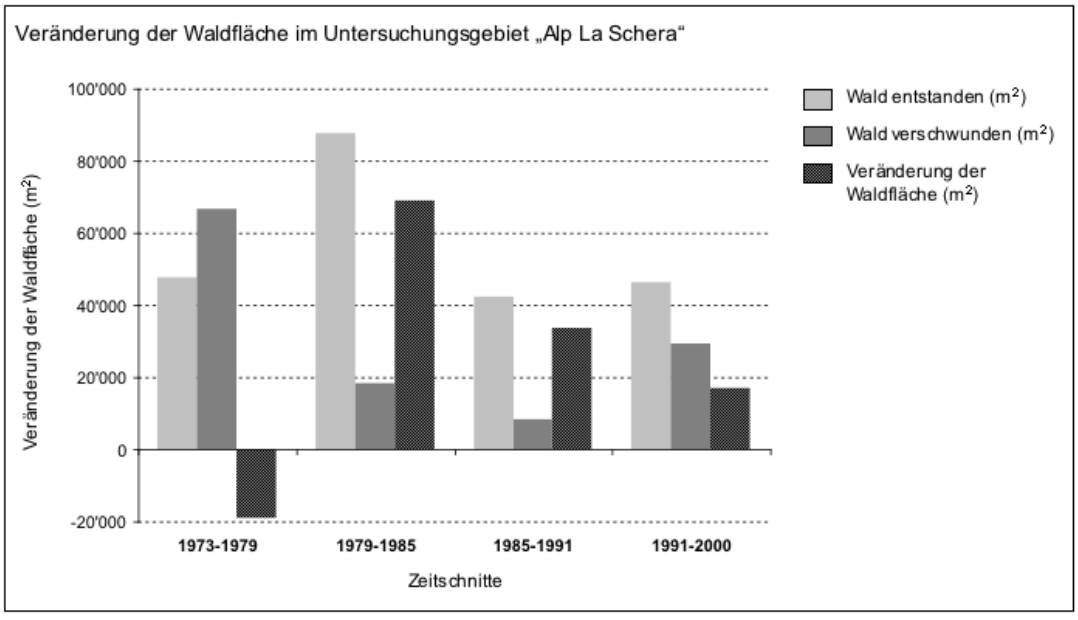
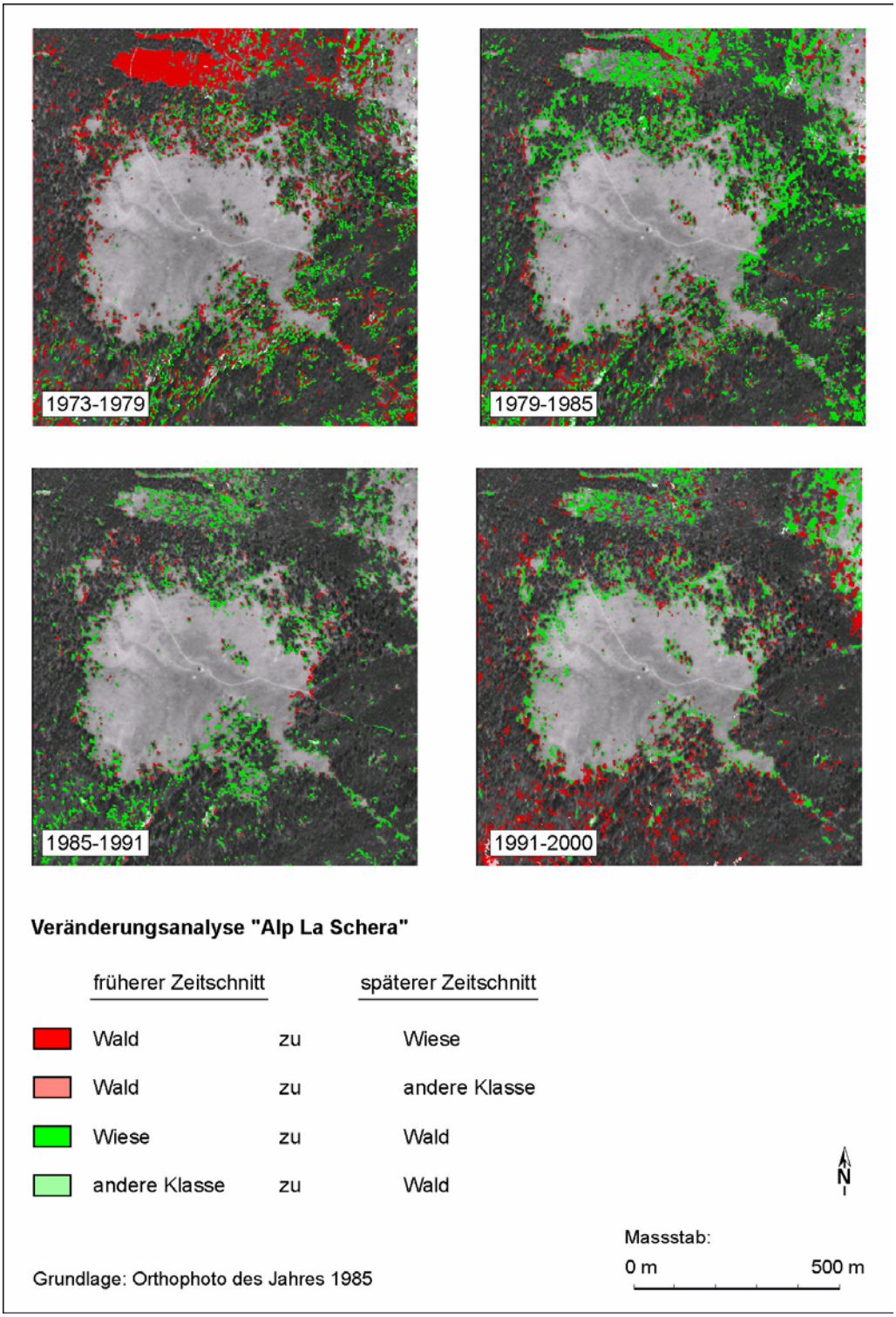


Abbildung 10.3 Veränderung der Waldfläche im Untersuchungsgebiet “Alp La Schera” (nur maskiertes Gebiet).

Abbildung 10.4 Change Detection "Alp La Schera".



Das Untersuchungsgebiet “Alp La Schera” weist im gesamten Untersuchungszeitraum 1973 bis 2000 eine Zunahme der Waldfläche auf. Die Abbildung 10.3 zeigt, dass im Zeitraum 1973 bis 1979 eine Abnahme der Waldfläche im Untersuchungsgebiet stattgefunden hat. Diese Abnahme der Waldfläche ist auf den Lawinenniedergang vom Februar 1979 im nordöstlichen Teil der Alp zurückzuführen. Die Lawine zerstörte eine grosse Fläche des Bergföhrenbestandes. Da die Aufnahme des Jahres 1979 erst ein halbes Jahr nach dem Lawinenniedergang gemacht wurde, sind die Auswirkungen der Lawine auf die Vegetation markant. Doch bereits in diesem ersten Untersuchunszeitschnitt zeichnet sich die starke Ausbreitung des Waldes in den von Legföhren bestockten Gebieten östlich der Alpweide ab (Abb. 10.4). Dieser Trend setzt sich bis ins Jahr 2000 fort. Der Lawinenzug wächst kontinuierlich mit Wald zu. In Gebieten wo die aufrechte Föhre vorherrscht, also westlich und südwestlich der ehemaligen Alpweide, sind ähnliche Zuwachsraten des Waldrandes wie bei der “Alp da Stabelchod” zu beobachten.

Im Untersuchungsgebiet “Alp La Schera” erkennt man die Auswirkungen des Sturms “Vivian” kaum. Dies hängt direkt mit der Wuchsform der Bäume zusammen. Die Legföhre, welche einen Grossteil des Untersuchungsgebietes bestockt, ist für Windwurf nicht anfällig.

Abbildung 10.5 *dichtes, beinahe undurchdringbares Legföhrengebiet auf unstabilem Boden östlich der “Alp La Schera”. (Foto: N. Lehmann)*

10.3 Ergebnisse der Veränderungsanalyse für das Untersuchungsgebiet “Alp da Grimmels”

In diesem Kapitel werden die qualitativen und quantitativen Ergebnisse der Veränderungsanalyse für das Untersuchungsgebiet “Alp da Grimmels” aufgeführt.

Zeitschnitt	Waldfläche dazu (m^2)	Waldfläche weg (m^2)	Veränderung total (m^2)
1973 - 1979	6’662	3’258	+ 3’404
1979 - 1985	3’797	4’082	- 285
1985 - 1991	2’661	4’324	- 1’663
1991 - 2000	5’446	5’522	- 76

Tabelle 10.3 Ergebnisse der Veränderungsanalyse pro Zeitschnitt für die “Alp da Grimmels” (nur maskiertes Gebiet).

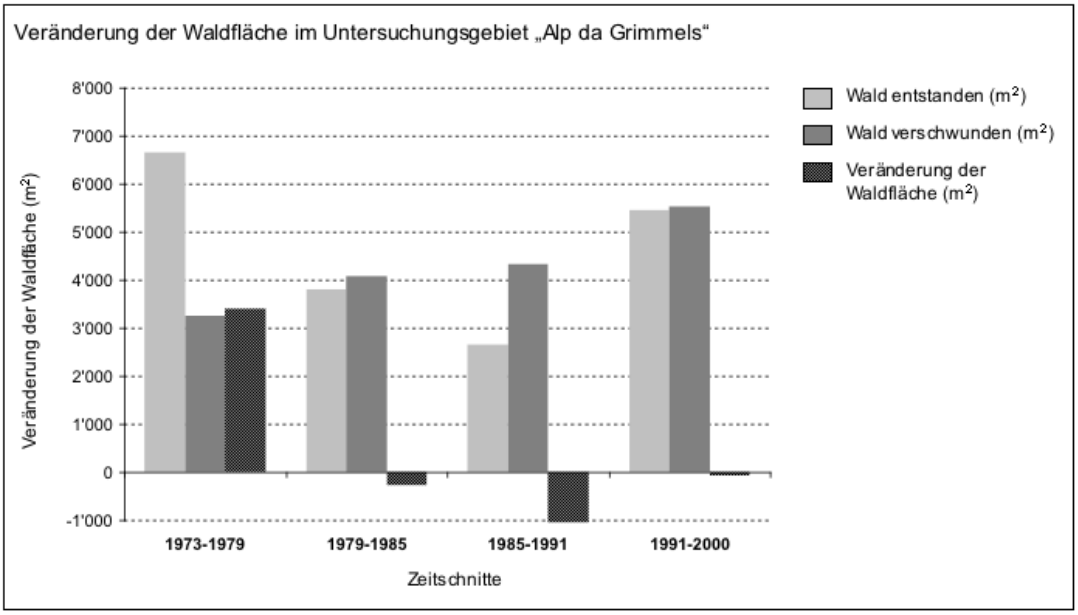


Abbildung 10.6 Veränderung der Waldfläche im Untersuchungsgebiet “Alp da Grimmels” (nur maskiertes Gebiet).

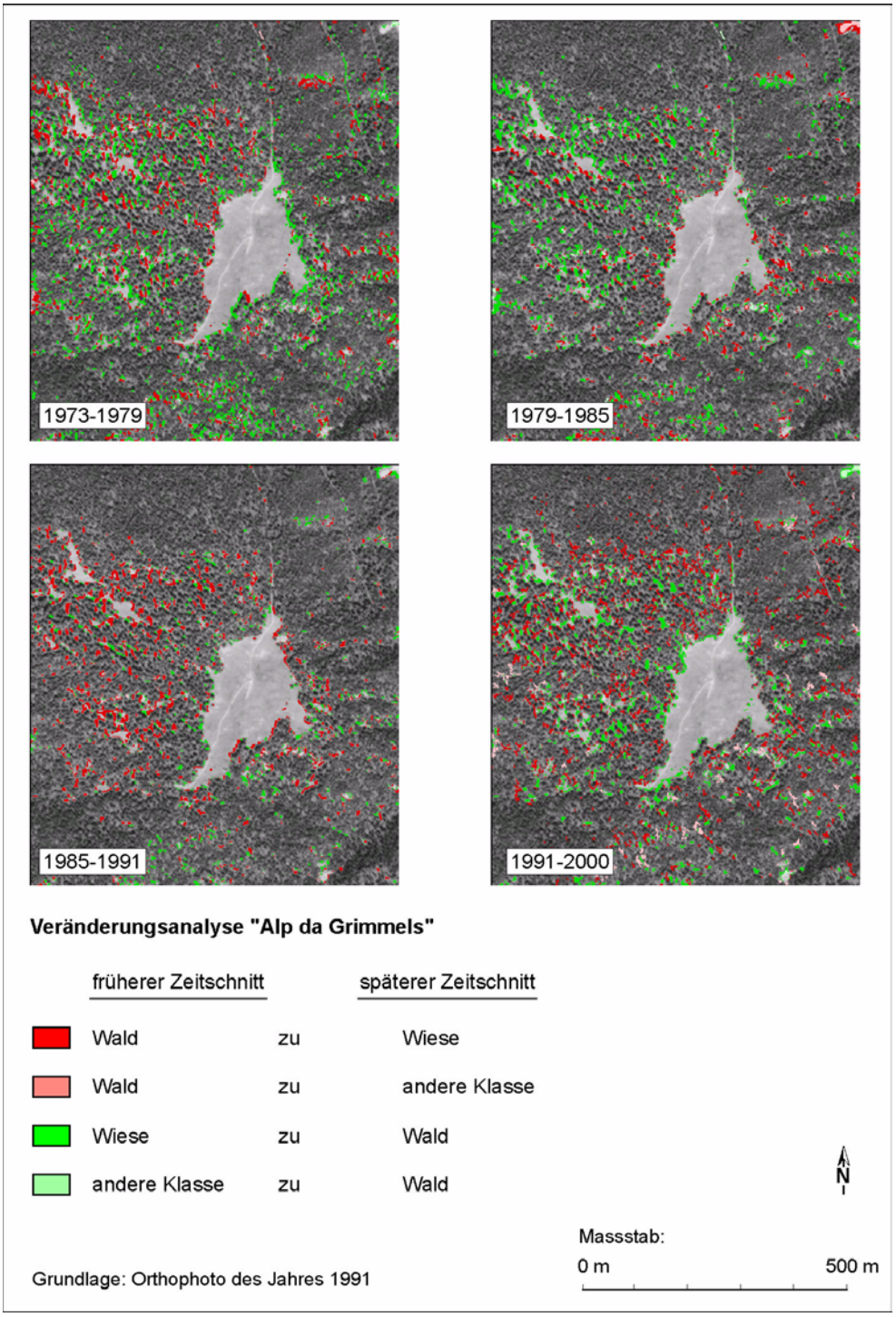
Das Untersuchungsgebiet “Alp da Grimmels” zeigt eine unterschiedliche Entwicklung der Waldfläche im Vergleich zu den beiden anderen Untersuchungsgebieten. Der Waldrand verändert seine Lage während dem untersuchten Zeitraum nur sehr geringfügig (Abb. 10.8). Dies

unterstützt auch die Abbildung 10.6. Sie verdeutlicht, dass die Waldfläche rund um die ehemalige Alpweide seit 1973 keine grossen Flächenveränderungen erfahren hat. Zudem hat der Sturm "Vivian" nicht derart grosse Schäden angerichtet wie auf der "Alp da Stabelchod". Gründe dafür sind in der Exposition und der Grösse der Alp zu suchen. Die östliche Exposition macht die Wälder für Stürme mit starken Westwinden weniger anfällig. Keinesfalls begünstigend wirkt sich die relativ kleine Fläche der Alp auf Verwirbelungen aus, welche oftmals Gründe für starken Windwurf sein können.

Verjüngung gibt es fast nur im südlichen Teil der ehemaligen Alpweide. Allerdings sind die jungen Bergföhren und Lärchen in diesem Bereich relativ stark von Verbiss betroffen.

Abbildung 10.7 *"Alp da Grimmels". Links: Verjüngung im südlichen Teil der Weide, teils stark verbissen. Rechts: östlicher und südöstlicher Waldrand beinahe ohne Verjüngung. (Fotos: N. Lehmann)*

Abbildung 10.8 Change Detection "Alp da Grimmels".



11 Diskussion

11.1 Allgemein

In der Einführung zu dieser Arbeit werden zwei Szenarien zur Entwicklung der Untersuchungsgebiete vorgestellt. Ein Szenario geht davon aus, dass die Huftiere die Waldverjüngung störend beeinflussen und somit die bewaldete Fläche mittel- und langfristig abnehmen würde. Das andere Szenario äussert die Befürchtung, dass die ehemaligen Alpweiden im Schweizerischen Nationalpark durch die ausbleibende landwirtschaftliche Nutzung rasch verganden.

Die Untersuchungen dieser Arbeit lassen eindeutige Aussagen zur Waldentwicklung im Schweizerischen Nationalpark zu und bestätigen Resultate früherer Untersuchungen zum Wald-Freiland-Verhältnis im Schweizerischen Nationalpark. Die Diskussion bezüglich der Wald-Wild-Problematik und der natürlichen Dynamik im Wald-Freiland-System im Parkgebiet wird damit fortgeführt und erhält neue Impulse. Diese tragen hoffentlich dazu bei, dass in Diskussionen über den Einfluss von Herbivoren auf den Wald in der Schweiz nicht nur von den schädlichen Einflüssen gesprochen wird.

11.2 Diskussion

Bevor die Ergebnisse dieser Arbeit detailliert begutachtet werden können, müssen die Dynamik der Wiederbewaldung und die Auswirkungen von Huftieren - im speziellen des Rothirsches - auf solche Prozesse analysiert werden.

Wiederbewaldung

Im Schweizerischen Nationalpark wurden schon etliche Studien zur Wiederbewaldungsdynamik, besonders der ehemaligen Alpweiden, durchgeführt. Federführend ist die Forschungsanstalt WSL. Bei der Analyse der Wiederbewaldung wird stark auf die Auswirkungen der Huftierpopulationen, in besonderem Masse des Rothirsches, eingegangen.

Die starke Zunahme der sommerlichen Rothirschpopulation nach der Gründung des Parks von praktisch 0 um 1920 auf über 2’200 im Jahre 1985 führte zur Befürchtung, dass die Verjüngung in den Wäldern gefährdet sei und dass die bewaldete Fläche im Laufe der Zeit abnehmen werde (Blankenhorn et al., 1979). Krüsi et al (1995, 1996) wiederlegten diese These anhand von Untersuchungen auf Dauerbeobachtungsflächen. Die Wälder erobern an verschiedenen Stellen erfolgreich die subalpinen Weiden, welche seit der Parkgründung nicht mehr landwirtschaftlich genutzt werden (Krüsi et al., 1995, 1996). Krüsi et al. und Bigler zeigten auch, dass es für die grössten Ausbreitungsraten des Waldes eine “optimale” Hirschdichte gibt. Als um 1950 die Hirschdichte ca. 6-9 Tiere pro km^2 betrug, konnten sich etwa viermal mehr Bäume etablieren als um 1920 als es im Park praktisch keine Rothirsche hatte oder um 1985 als die Dichte bei über 24 Tieren pro km^2 lag (Bigler, 1997; Schütz et al., 1998). Bei einer für die Wiederbewaldung der Alpweiden “optimalen” Rothirschdichte von 6 bis 9 Tieren pro Quadratkilometer würden sich im unmittelbar an den Waldrand angrenzenden Weidestreifen (25 m) in einem Zeitraum von 100 Jahren viele Bäume etablieren. Rein rechnerisch bedeutet dies, dass der

Waldrand im Durchschnitt in 100 Jahren etwa 14 m in die Weide hinaus vorrücken würde. Dieser Wert steht im Gegensatz zu den etwa 3,5 m bei einer Rothirschdichte von praktisch 0 (1920) oder etwa 24 wie im Jahre 1985 (Krüsi et al., 1998).

Die Ergebnisse dieser "Change Detection" mit Schwarz-Weiss-Luftbildern unterstützen die Resultate aus den Untersuchungungen von Krüsi et al. (1998). Der Vorstoss des Waldrandes auf Kosten der Wiesenfläche liegt auf allen Untersuchungsgebieten ungefähr bei den von Krüsi et al. (1998) berechneten Werten für eine Rothirschdichte jenseits des für die Waldausbreitung "optimalen" Bereichs (6-9 Tiere pro km^2). Die hohe Wilddichte reguliert demnach die Ausbreitung des Waldes. Durch Verbiss-, Fege-, Schäl- und Trittschäden wird die Dynamik der Wiederbewaldung zwar gebremst, nicht aber vollständig gestoppt. Vielmehr können Huftiere (in den Untersuchungsgebieten Rothirsche) positiven Einfluss auf die Keimungsrate von Bergföhren und anderen Bäumen haben (Krüsi et al., 1996).

Auswirkungen von Rothirschen auf die Waldverjüngung

In Studien zur Waldverjüngung wird hauptsächlich auf die negativen Auswirkungen der Huftiere wie etwa Verbiss, Fegen, Schälen und Treten hingewiesen (Näscher, 1979; Bernhart, 1988; Eiberle, 1989; Brändli, 1995). Positive Einflüsse auf die Ansamung in Form von Lükkenbildung durch Rothirsche werden nicht besprochen. Dass die Dichte von Baumkeimlingen in von Huftieren geschaffenen Lücken deutlich höher ist als in geschlossener Vegetation, wurde im Gebiet des Nationalparks verschiedentlich beobachtet (Krüsi et al., 1996; Bigler, 1997; Schütz et al., 1999; Moser, 1999). Die spontane Wiederbewaldung der Weiden soll gemäss den Autoren erst erfolgen, nachdem die dichte Vegetation durch Störungen geöffnet worden ist. Offene Stellen in den Hochgras- und Dauerkurzweiden findet man auf "Alp La Schera" und "Alp da Stabelchod" vermehrt im Waldrandbereich (Bigler, 1997). Eigene Beobachtungen zeigten, dass auch im südlichen Bereich der "Alp da Grimmels" derartige Verhältnisse herrschen. Dies scheint plausibel, denn der Waldrandbereich wird besonders häufig begangen, da er sozusagen als Brückenelement zwischen Wald und Weide fungiert. Da nahe des Waldrandes auch der Samenregen am grössten ist (Schweingruber, 1993), gelangen Samen im Waldrandbereich am ehesten zur Keimung. Dies zeigt sich auch in den Ergebnissen dieser Arbeit. Inmitten der Weiden etablieren sich in den untersuchten 30 Jahren kaum junge Bäume. Die Wiederbewaldung passiert im Gebiet des Waldrandes.

Wie erwähnt, würden ohne die Rothirsche im Waldrandbereich einerseits weniger Lücken in der Vegetationsdecke gebildet, andererseits würden auch keine Flächen mit Hochgras in Dauerkurzweiden umgewandelt (Achermann et al., 2000). Auf Hochgrasweiden fand Bigler (1997) wesentlich weniger offene Stellen, welche Samen zur Keimung dienen könnten als auf Dauerkurzweiden. Wären also alle Weiden mit Hochgras bedeckt, würde die Wiederbewaldung noch viel langsamer voranschreiten. Dazu passen auch die Untersuchungen von Suter et al. (2003, unveröffentlicht), welche mit Kot-Analysen die Nahrung von Rothirschen im Schweizerischen Nationalpark rekonstruierten. Dabei fand sich *Nardus stricta* (Hochgras-Pflanze) in keiner der analysierten Ausscheidungen. *Carex sempervirens* (Dauerkurzweide-Pflanze) hingegen, äsen die Rothirsche offenbar besonders gerne. Daraus kann gefolgert werden, dass es kaum Keimmöglichkeiten in Gebieten mit Hochgrasweide gibt, da die Rothirsche hier nicht für die nötigen offenen Stellen in der Vegetationsdecke sorgen.

Der negative Einfluss der Beweidung durch Hirsche wirkt sich vor allem in den zentralen und ebenen Weideteilen auf die Verjüngung aus. Dort sind qualitativ hochwertige Nahrungsquellen vorhanden. Durch den grossen Abstand zum Waldrand oder samentragenden Einzelbäumen ist die Keimlingsdichte stark reduziert. Starke Keimlingsausfälle können aber auch durch die Anwesenheit von Murmeltieren oder Kleinsäugern zustande kommen (Bigler, 1997). Wie bereits

erwähnt gehört der Verbiss zu den am meistgenannten Schadenswirkungen, welche Rothirsche und andere Huftiere auf den Wald ausüben. Beim Verbiss äst der Rothirsch Knospen und Triebe des Baumes ab. Weil die Föhre im frühen Sommer austreibt, ist sie im Schweizerischen Nationalpark durch den dort sömmernden Rothirsch verbissen (Stagl, 2000). Bigler (1997) zeigte, dass Bäume der Grössenklasse "unter 25 cm" nicht durch Rothirsche verbissen werden, da sie relativ wenige Knospen bilden. Deshalb werden grössere Bäume (25-150 cm) stärker verbissen. Der Verbiss bewirkt bei der Pflanze eine Verzögerung des Wachstums (Eiberle et al., 1987). Kurth et al. (1960) stellte fest, dass 100-130 cm hohe Bäumchen im Nationalpark durchschnittlich 40 Jahre brauchen, um die Gefährdungszone von 150 cm zu durchwachsen. Trotzdem: Untersuchungen in Wäldern innerhalb und ausserhalb des Parks (Näscher, 1979; Brang, 1989; Krüsi et al., 1996) zeigen aber, dass bei der aktuellen Huftierdichte die Verjüngung der Wälder im Gebiet insgesamt eindeutig nicht gefährdet ist (Krüsi et al., 1998). Gemäss den Sukzessionsmodellierungen von Kienast et al. (einger.) gilt dies auch bei einer dreimal höheren Verbissbelastung als aktuell. Die Modellrechnungen haben ausserdem gezeigt, dass sich die über den Verbissbereich (150 cm) hinausgewachsenen Bäume bei hohem Verbissdruck rascher und besser weiterentwickeln als bei fehlendem Wildverbiss. Offenbar profitieren sie von mehr Licht in den Beständen und von der durch das Wild verursachten Schwächung der konkurrierenden Nachbarbäume.

Change Detection - Veränderungsanalyse

Die durchgeführte Change Detection zeigt deutlich, dass auf den ehemaligen Alpweiden "Alp da Stabelchod", "Alp La Schera" und "Alp da Grimmels" seit 1973 die Wiederbewaldung nur sehr langsam fortschreitet. Der Trend verzeichnet auf allen drei Untersuchungsgebieten leicht zunehmende Waldflächen. Die Abbildung 10.4 veranschaulicht eine überdurchschnittliche Zunahme der Waldfläche in dem von Legföhren (Latsche) bestockten Gebiet östlich der "Alp La Schera". Es scheint, als hänge die Geschwindigkeit der Wiederbewaldung vom Vegetationstypen ab.

Abhängigkeit von Wiederbewaldungsdynamik und Vegetationstyp?

Nun, wie diverse Untersuchungen zeigten (Krüsi et al., 1996,1998; Näscher, 1979; Brang, 1989), beeinflusst der Wilddruck massgeblich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Waldes im Schweizerischen Nationalpark. Es liegt deshalb nahe, die Gründe für die starke Ausbreitung der Legföhre im Untersuchungsgebiet "Alp La Schera" auf den vom Wild ausgeübten Wilddruck zu suchen. In der im Jahre 1998 von Krüsi et al. veröffentlichten Arbeit wird von der für die Waldausbreitung "optimalen" Hirschdichte gesprochen.

Wenn nun also im Legföhrengebiet der "Alp La Schera" seit gut 30 Jahren die "optimale" Rothirschdichte herrschen würde, so liesse sich die starke Ausbreitung der Latsche in diesem Gebiet erklären. Allerdings ist dies nicht zu beweisen, denn es existieren keine genauen Daten mit dem räumlichen Aufenthaltsmuster für den Rothirsch. Dafür, dass die Hirsche die Legföhrengebiete meiden würden, sind rasch plausible Ursachen gefunden: Zum einen behagen den bis zu 350 kg schweren Tieren die wackligen und instabilen Schotterflächen auf welchen die Legföhre optimal gedeiht überhaupt nicht. Sie bevorzugen feste Trittflächen. Zum anderen ist den mächtigen Rothirschen die Deckung in den niedrigen, gebüschartigen Legföhrengehölzen nicht genügend sicher. Zudem erschweren die dichten Legföhrengehölze in Kombination mit dem wackligen Geröll eine rasche Flucht. Aber auch das Nahrungsangebot ist auf den von Latschen beschatteten Schotterflächen nicht dem Rothirsch entsprechend. Die Tiere bevorzugen die saftigeren Dauerkurzweiden inmitten der Alpweiden und nahe der schutzbietenden, aufrechten Bergföhrenbestände. Des weiteren meiden die männlichen Tiere während der Bastzeit (April bis August) die Legföhrengebiete. Der durch die zahlreichen Blutgefässe sehr empfind-

liche Bast[17] lässt die Stiere grossen Schmerz empfinden, wenn sie durch das dicht verästelte Legföhrengehölz streifen. Einen grossen Stellenwert im Leben der Rothirsche hat neben der Nahrungsaufnahme und dem Wiederkauen auch die Körperpflege. Dazu wälzen sich die Tiere in schlammgefüllten, feuchten Mulden. Diese kommen aber auf dem steilen, wasserdurchlässigen Boden im Legföhrengebiet nicht vor. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im Legföhrengebiet alles andere als optimale Lebensbedingungen für die Rothirsche herrschen. Es könnte deshalb also durchaus sein, dass es im Legföhrengebiet oberhalb der "Alp La Schera" seit längerem eine Rothirschdichte von 6-9 Tiere pro Quadratkilometer hat. Diese Rothirschdichte also, welche gemäss Krüsi et al. (1998) für die maximale Ausbreitung des Waldes eine optimale Grösse darstellt.

Eine andere, viel simplere Erklärung für den starken Zuwachs an Legföhren östlich der "Alp La Schera", ist die: Die Legföhre wächst vor allem in die Breite. Diese verschiedenartigen Wuchsformen von aufrechter Bergföhre und Latsche haben auf die Veränderungsanalyse flächenmässig einen anderen Effekt.

Unter Berücksichtigung der von Bigler (1997) erstellten Diplomarbeit zu den Altersstrukturen der Bäume auf Wiederbewaldungsflächen im Schweizerischen Nationalpark, muss die Überlegung der "optimalen" Hirschdichte im Legföhrengebiet östlich der "Alp La Schera" verworfen werden. Mit dendrochronologischen Methoden konnte das Keimungsjahr von unzähligen Bergföhren auf "Alp La Schera" ermittelt werden. Bis 1960 stieg die Anzahl der keimenden Bäume kontinuierlich an. Ab 1960 ist jedoch ein deutlicher Rückgang der keimenden Bäume auszumachen. Demnach ist die starke Ausbreitung der Legföhre im Gebiet "Alp La Schera" nicht auf etablierte Legföhren zurückzuführen, sondern auf ihre flächige Wuchsform.

Lawinen und Windwurf

Die Wiederbewaldung des Lawinenzuges (1979) nordöstlich der "Alp La Schera" weist darauf hin, dass bei optimalen Bedingungen die Wiederbewaldung von offenen Flächen relativ rasch vollzogen wird. Optimale Bedingungen heissen in diesem Fall: viel Licht, offene Vegetationsdecke. Krüsi et al. (2000) analysierten die Auswirkungen eines Schneedruckereignisses in einem Bergföhrenwald am Munt La Schera auf den Sukzessionsverlauf. Dabei erkannten sie, dass die Konkurrenzkraft der Bäume und eventuell Krankheiten wie z.B. parasitische Pilze (Schneeschütte, Hallimasch, Wurzelschwamm) massgeblich für die Wiederbewaldung und den Sukzessionsverlauf verantwortlich sind. Durch die zahlreichen umgeknickten Bäume reduziert sich im Lawinenzug die Konkurrenz vorläufig und es fällt mehr Licht auf die Fläche. Da die umgestürzten Bäume auch den Wildwechsel verhindern, fallen die Störungen durch Huftiere weg (Krüsi et al., 1996). Die Kombination dieser Umstände führt zur Etablierung vieler Keimlinge und damit zur raschen Wiederbewaldung. Allerdings kann sich die Zusammensetzung des Bestandes nach einem derartigen Schadensereignisses massgeblich verändern. Dann zum Beispiel, wenn die Bergföhre durch den Hallimasch selektiv geschädigt würde (Krüsi et al., 2000). Die lokal gehäuften Ausfälle der Bergföhre würden die Arve oder die Lärche begünstigen.

Den gleichen Effekt wie Lawinen können Windwürfe und Brände haben (Krüsi et al., 2000). Im untersuchten Zeitraum ist es vor allem der Sturm "Vivian" (Februar 1990), dem viele Einzelbäume nicht Stand hielten. Wobei die "Alp da Stabelchod" am stärksten, die "Alp da Grimmels" und die "Alp La Schera" jedoch kaum betroffen waren. Diese Tatsache hängt wohl mit der Exposition und dem Bewuchs der Untersuchungsgebiete zusammen. Währenddem das Gebiet "Alp La Schera" zu einem grossen Teil mit den auf Windwurf unanfälligen Legföhren be-

17. behaarte Haut, die das Kolbengeweih bis zur Verknöcherung umgibt und mit Blut versorgt. Anfangs August entledigt sich der Hirsch der Basthaut durch Fegen.

stockt ist, wachsen auf den beiden anderen Untersuchungsgebieten aufrechte Bergföhren. Da sie nicht tief wurzeln (keine Pfahlwurzel), sind sie auf starke Winde sehr anfällig. Die Exposition dürfte bei der “Alp da Grimmels” der entscheidende Faktor für die geringen Windwurfschäden sein. Sie liegt auf der Westwind abgeneigten Seite des “Muottas da Grimmels”.

Einsatz von Fernerkundungstechniken für Wald-Monitoring im Schweizerischen Nationalpark

Wie einleitend erwähnt, hat der Einsatz von Fernerkundungstechniken für das Wald-Monitoring besonders in Gegenden mit zusammenhängenden Waldgebieten grosse Tradition. Fernerkundungsdaten haben gegenüber Feldaufnahmen den Vorteil, dass sich ein Gebiet grossräumig analysieren lässt. Aus den Ergebnissen von Feldaufnahmen lassen sich nur bedingt Rückschlüsse auf ein grösseres Gebiet machen. Auch ist die Unzugänglichkeit eines Untersuchungsgebietes oftmals der Grund für den Einsatz von FE-Daten.

Speziell im Schweizerischen Nationalpark ist die Analyse eines grösseren Zeitschnittes mit FE-Daten gegenüber Feldaufnahmen relativ schwierig. Im Vergleich zu den von Braun-Blanquet und Stüssi zwischen 1917 und 1945 eingerichteten Dauerbeobachtungsflächen (Scheurer, 2000), welche eine lange Untersuchungszeitdauer zulassen, hatte die Fernerkundung eine unbedeutende Rolle. Sie war beschränkt auf die Befliegungen des Gebietes für die Kartenherstellung durch die Schweizerische Landestopographie (seit 1973). Erst in jüngerer Zeit wird die Fernerkundung für Modellierungen und Veränderungsanalysen eingesetzt. Besonders zu erwähnen ist dabei die exakte Modellierung von Oberfläche und Gelände mittels Laser-Messungen (LIDAR) in einem kleinen Gebiet im Bereich der “Alp da Stabelchod”.

Beurteilung dieser Arbeit

Bezüglich der Fragestellung ist der Einsatz von Fernerkundungsdaten sicherlich gerechtfertigt. Die systematische Befliegung durch die Schweizerische Landestopographie ermöglicht eine Untersuchung, die auf ungefähr gleichbleibenden Zeitschnitten beruht. Betrachtet man die magere Qualität der Bilddaten, so blieb bei der Wahl der geeigneten “Change Detection”-Methode nur eine Möglichkeit: Die Post-Klassifikations-Methode. Sie eignet sich deshalb für den zu untersuchenden Gegenstand, weil dabei die Bilddaten nicht “geeicht” werden müssen (ausser Korrektur der Geometrie). Die unabhängigen Datenklassifikationen können direkt miteinander verglichen und verrechnet werden (Singh, 1989). Die dabei eingesetzte objektorientierte Software eCognition bietet viele Möglichkeiten, um eine Klassifikation exakter durchzuführen als mit den gängigen pixelbasierten Verfahren.

Um den Wald in verschiedene Waldtypen zu unterteilen, hätte die Qualität der Bilddaten wesentlich besser sein müssen. Auch bei guter Bildqualität wäre es jedoch schwierig gewesen die Waldtypen zu klassieren. Rein visuell gibt es im Luftbild zwischen Lärche, Arve und Bergföhre keine Unterschiede. Die Klassifikation verschiedener Waldtypen müsste also via differenzierter Spektralinformationen versucht werden. Die grossen Reinbestände könnten damit klassiert werden. Die einzelnen, in den Bergföhrenbeständen eingesträuten Arven und Lärchen, wären aber auch bei grosser spektraler Information nicht zu erkennen.

Kritik im Vorgehen kann im Bezug auf die Behandlung des Schattenwurf-Problemes geübt werden. Das Problem ist nicht vollständig und zufriedenstellend gelöst. Sicherlich könnte man mit Hilfe der Höhenangaben im Oberflächenmodell (DOM) versuchen, die Schatten zu detektieren. Dies gilt aber auch nur für einen Ausschnitt des Fallstudiengebietes “Alp da Stabelchod”. Dieser Aufwand hätte aber den Rahmen dieser ohnehin zeitintensiven Diplomarbeit

gesprengt. Der entscheidende Grund für die Nichtberücksichtigung des DOM ist aber der Folgende: Auf die Kernaussage dieser Arbeit hätte es keinen Einfluss gehabt.

Insgesamt sind die tatsächlichen Entwicklungen bezüglich der Wiederbewaldung der ehemaligen Alpweiden im Schweizerischen Nationalpark richtig erfasst worden. Die Ergebnisse dieser Arbeit decken sich voll und ganz mit den Erkenntnissen aus den in diesem Kapitel zitierten Arbeiten.

Aussichten Waldverjüngung und Wiederbewaldung

Die zukünftige Waldverjüngung auf den Weiden wird sich je nach Standort unterschiedlich entwickeln (Schütz et al., 2000). Momentan herrscht auf dem südwestlichen Weideteil von Stabelchod eine relativ dynamische Verjüngung mit geringer Beweidung. Dies liesse gemäss Krüsi et al. (1998) diesen Teil der Weide eher zuwachsen als andere Bereiche. Auf "Alp La Schera" und "Alp da Grimmels" gibt es wenig Jungwuchs. Dies deshalb, weil die zwischen 60 und 130 Zentimeter hohen, buschigen Bergföhren noch wenige Samen bilden. Die "Alp da Grimmels" ist zudem mit derart dichten Dauerkurzweiden bedeckt, dass es auch trotz grosser Hirschdichte kaum offene Stellen für Keimlinge geben wird. Auf allen drei Untersuchungsgebieten dürfte die gegen Schatten wesentlich tolerantere Arve an Bedeutung gewinnen. Denn der für die Ausbreitung der Arvensamen zuständige Tannenhäher breitet sich aktuell im Parkgebiet stark aus.

Abiotische Störungen fördern voraussichtlich die Wiederbewaldung der Weiden. Umgestürzte Bäume können gemäss Bigler (1997) das Mikroklima an diesen Stellen ändern, was eine kleinräumige Vegetationsänderung zur Folge hat. Auch können die umgestürzten Bäume die Schutzwirkung von Keimlingen übernehmen, wie dies auf Wildwechseln im Wald von Krüsi et al. (1996) beobachtet wurde.

Die langsame Verkleinerung der Weidefläche könnte langfristig dazu beitragen, dass die beästen Weideteile noch intensiver beweidet werden. Auf diesen intensiv beästen Dauerkurzweiden vermag sich kaum ein Baum zu etablieren. Sie werden noch lange Zeit baumfrei bleiben. Es kann aber auch sein, dass die Hirsche mangels Futtermenge in Zukunft ihre Futterwahl verändern. Dieses Verhalten konnte von Zimmermann (1990) in der alpinen Stufe bereits beobachtet werden. Solche Szenarien dürften sich aber über Jahrzehnte hin entwickeln. Dabei sind andere einflussreiche Umwelteinflüsse, wie etwa die Klimaveränderung, noch nicht berücksichtigt.

Aussichten für Einsatz von Fernerkundungstechniken

Die Einsatzmöglichkeiten des Klassifikationsprogrammes eCognition sind enorm vielfältig. Mit dieser Software wird den zu untersuchenden Bilddaten ein Optimum ihres Potenzials entzogen. Da es ausserdem eine anwenderfreundliche Bedienung mit dem neuen wissensbasierten, objektorientierten Ansatz verbindet, wird es sich behaupten können. Am Geographischen Institut der Universität Zürich werden mehrere Diplomarbeiten mit eCognition durchgeführt und es sind noch weitere in Planung.

Die ständig voranschreitenden technischen Neuerungen in der Fernerkundung werden es in Zukunft erlauben, detailliertere und genauere Untersuchungen anzustellen. Es wird laufend versucht Geräte zu entwickeln, die bessere räumliche Auflösungen aufweisen. Dabei werden Milliarden in die Forschung und die Wirtschaft investiert. Auch an die Rechner, welche die immer grösser werdenden Datenmengen verarbeiten müssen, werden enorme Ansprüche gestellt. Die fortschreitende Entwicklung von Fernerkundungssystemen wird in Zukunft eine Vielfalt

von neuen Untersuchungen ermöglichen. Für die Erforschung unserer Umwelt bringt dieser technische Fortschritt eine Vielzahl von Vorteilen.

Für Langzeit-Untersuchungen ist es entscheidend, dass über den gesamten Untersuchungszeitraum die gleichen Datentypen zur Verfügung stehen. Die Vergleichbarkeit der Daten ist ein wichtiger Punkt für die Qualitätssicherung von Forschungsergebnissen. Nebst den geringeren Kosten dürfte das auch einer der Gründe dafür sein, dass das Luftbild (digital/analog) auch in Zukunft in der Fernerkundung eine wichtige Rolle behält und nicht vom Satellitenbild abgelöst wird.

Literatur

ACHERMANN, G.; SCHÜTZ, M.; KRÜSI, B. O.; WILDI, O. (2000): Lägerfluren im Schweizerischen Nationalpark: langfristige Entwicklung der Vegetation. In: Nationalpark-Forschung in der Schweiz Nr. 89 2000. Hrsg.: Forschungskommission des Schweizerischen Nationalparks und Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Zernez, 2000.

ALBERTZ, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt, 2001.

BACH, R. et al. (1976): Durch den schweizerischen Nationalpark - ein wissenschaftlicher Führer. Hrsg.: Komission für die wissenschaftliche Erforschung des Nationalparkes. Schweizerischer Bund für Naturschutz (SBN), 1976.

BERNHART, A. (1988): Waldentwicklung, Verjüngung und Wildverbiss im oberbayerischen Bergwald. In: Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen 139 (6).

BIGLER, C. (1997): Auswirkungen von Huftieren auf die Wiederbewaldungsdynamik auf drei subalpinen Weiden im Schweizerischen Nationalpark. Diplomarbeit ETH Zürich, ausgeführt an der WSL. Birmensdorf, 1997.

BLANKENHORN, H. J.; BUCHLI, C.; VOSER, P.; BERGER, C. (1979): Bericht zum Hirschproblem im Engadin und Münstertal. Eidg. Oberforstinspektorat, Bern.

BODMER, H.-C. (1993): Untersuchung zur forstlichen Bestandeskartierung mit Hilfe von Satellitenbildern. Dissertation, Professur für Forsteinrichtung und Waldwachstum der ETH Zürich. Zürich, 1993.

BRÄNDLI, U. B. (1995): Zur Verjüngungs- und Wildschadensituation im Gebirgswald der Schweiz. In: Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen 146 (5).

BRANG, P. (1989): Untersuchungen zur Zerfallsdynamik in unberührten Bergföhrenwäldern im Schweizerischen Nationalpark. In: Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen 140.

BYRNE, G. F.; CRAPPER, P. F.; MAYO, K. K. (1980): Monitoring land cover change by principal component analysis of multitemporal Landsat data. In: Remote Sensing of Environment.

DEFINIENS (2001): eCognition - object oriented image analysis. USER GUIDE. München, 2001.

DRURY, S. A. (1990): A Guide to Remote Sensing. Interpreting Images of the Earth. Oxford University Press. New York, 1990.

EIBERLE, K. (1989): Über den Einfluss des Wildverbisses auf die Mortalität von jungen Waldbäumen in der oberen Montanstufe. In: Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen 140 (12).

EIBERLE, K.; NIGG, H. (1987): Grundlagen zur Beurteilung des Wildverbisses im Gebirgswald. In: Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen 138.

ESRI (1998): ArcView Gis. Benutzerhandbuch. Hrsg.: Environmental Systems Research Institute. Redlands, 1998.

GOHL, R. et al. (1991): Keine Axt und kein Schuss seit 1914 - Der Schweizerische Nationalpark. in Geschützte Landschaften der Schweiz - 100 Naturparadiese von nationaler Bedeutung. Verlag DAS BESTE aus Reader's Digest. Zürich, 1991.

HAARMANN, B. (2001): Untersuchung zur Verwendbarkeit der Software eCognition für Zwecke der CORINE Landnutzungs-Klassifikation. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung der Universität Hannover. Hannover, 2001.

HABERÄCKER, P. (1987): Digitale Bildverarbeitung - Grundlagen und Anwendung. 2. Auflage. München, Wien, 1987.

HELLER, R. C.; ULLIMANN, J. J. (1983): Forest resource assessments. In: Colwell. Hrsg.: Manual of Remote Sensing II. Falls Church, 1983.

HILDEBRANDT, G. (1993): Fernerkundung in der Forstwirtschaft. In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung. Nr. 4, 1993. H. Wichmann Verlag. Karlsruhe, 1993.

HOWARTH, J. P.; WICKWARE, G. M. (1981): Procedure for change detection using Landsat digital data. In: International Journal of Remote Sensing. 1981.

HUSS, J.; ARCA, A.; HILDEBRANDT, G.; KENNEWEG, H.; PEERENBOOM, G. H.; RHODY, B. (1984): Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Karlsruhe, 1984.

ITTEN, K. I. (1979): Grossräumige Inventuren mit Landsat-Erderkundungssatelliten in der Schweiz. Habilitationsschrift, Philosophische Fakultät II der Universität Zürich. Zürich, 1979.

JOHNSON, R. D.; KASISCHKE, E. S. (1998): Change vector analysis: a technique for the multispectral monitoring of land cover condition. In: International Journal of Remote Sensing.

KAPPAS, M. (1994): Fernerkundung nah gebracht. Leitfaden für Naturwissenschaftler. Ferd. Dümmlers Verlag. Bonn, 1994.

KADRO, A. (1981): Untersuchung der spektralen Reflexionseigenschaften verschiedener Vegetationsbestände. Dissertation, Forstwissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg im Breisgau. Freiburg, 1981.

KELLENBERGER, T. W. (1996): Erfassung der Waldfläche in der Schweiz mit multispektralen Satellitenbilddaten. Grundlagen, Methodenentwicklung und Anwendung. Dissertation, Geographisches Institut der Universität Zürich. Zürich, 1996.

KIENAST, F.; FRITSCHI, J.; BISSEGGER, M.; ABDERHALDEN, W. (einger.): Modelling succession patterns of high elevation forests under changing herbivore pressure. Forest Ecology and Management.

KLAUS, G. (2000): Geht das Vieh, freut sich der Hirsch. In: Neue Zürcher Zeitung. Forschung und Technik. Ausgabe Nr. 131, 07.06.2000. Zürich, 2000.

KNEUBÜHLER, M. (1996): Digitale Waldklassifikation mit LANDSAT TM-Daten im Kanton Zürich. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich. Zürich, 1996.

KOEPPEL, H.-D.; SCHMITT, H.-M.; LEISER, F. (1991): Landschaft unter Druck. Zahlen und Zusammenhänge über Veränderungen in der Landschaft Schweiz. Hrsg.: Bundesamt für Raumplanung und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern, 1991.

KRAUS, K. (1990): Fernerkundung. Band 2: Auswertung photographischer und digitaler Bilder. Ferd. Dümmler Verlag. Bonn, 1990.

KRÜSI, B. O.; SCHÜTZ, M.; WILDI, O.; GRÄMIGER, H. (1995): Huftiere, Vegetationsdynamik und botanische Vielfalt im Nationalpark. CRATSCHLA 3 (2). Zernez, 1995.

KRÜSI, B. O.; SCHÜTZ, M.; GRÄMIGER, H.; ACHERMANN, G. (1996): Was bedeuten Huftiere für den Lebensraum Nationalpark? Eine Studie zu Nahrungsangebot und Waldverjüngung. CRATSCHLA 4 (2). Zernez, 1996.

KRÜSI, B. O.; SCHÜTZ, M.; BIGLER, Ch.; GRÄMIGER, H.; ACHERMANN, G. (1998): Huftiere und Vegetation im Schweizerischen Nationalpark von 1917 bis 1997: Einfluss auf das Wald-Freilandverhältnis. 2. Vortrag am Workshop IZW Berlin. Birmensdorf, 1998.

KRÜSI, B. O.; MOSER, B. (2000): Der Einfluss von Schnee und Huftieren auf den Sukzessionsverlauf in einem Bergföhrenwald im Schweizerischen Nationalpark (Munt La Schera). In: Nationalpark-Forschung in der Schweiz Nr. 89 2000. Hrsg.: Forschungskommission des Schweizerischen Nationalparks und Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Zernez, 2000.

KURTH, A.; WEIDMANN, A.; THOMMEN, F. (1960): Beitrag zur Kenntnis der Waldverhältnisse im Schweizerischen Nationalpark. Mitteilung der Schweizerischen Anstalt für Forstliches Versuchswesen 36 (4).

LABHART, T. P. (1998): Geologie der Schweiz. 4. überarbeitete Auflage. OTT Verlag. Thun, 1998.

LEIBUNDGUT, H.; SCHLEGEL, J. (1985): Waldbauliche Untersuchungen in Bergföhrenbeständen des Schweizerischen Nationalparks. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 136.

LEISS, I. A. (1998): Landnutzungskartierung mit Hilfe multitemporaler Erdbeobachtungs-Satellitendaten. Anwendung präziser geometrischer und radiometrischer Korrekturmethoden sowie automatischer Klassifikationsverfahren. Dissertation, Geographisches Institut der Universität Zürich. Zürich, 1998.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. (1987): Remote sensing and image interpretation. 2. Auflage. New York, 1987.

LÖFFLER, E. (1994): Geographie und Fernerkundung. Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und modernen Fernerkundungsdaten. B.G. Teubner. Stuttgart, 1994.

MALILA, W. A. (1980): Change vector analysis: an approach for detecting forest changes with Landsat. In: Proceedings of the 6th Annual Symposium on Machine Processing of Remotly Sensed Data. West Lafayette. 1980.

MAS, J.-F. (1999): Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. In: International Journal of Remote Senssing. 1999.

MATHER, P. M. (1987): Computer processing of remotely-sensed images. Chichester, 1987.

MEINEL, G.; NEUBERT, M.; REDER, J. (2001): Pixelorientierte versus segmentorientierter Klassifikation von IKONOS-Satellitenbilddaten. Ein Methodenvergleich. In: Zeitschrift für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Nr. 3, 2001.

MOSER, B. (1999): Vom Pionierwald zur Klimaxgesellschaft. Untersuchungen zur Entwicklung eines Bergföhrenwaldes am Munt La Schera, Schweizerischer Nationalpark. Diplomarbeit ETH, Zürich, 1999.

NÄSCHER, F. A. (1979): Zur waldbaulichen Bedeutung des Rothirschverbisses in der Waldgesellschaft des subalpinen Fichtenwaldes in der Umgebung des Schweizerischen Nationalparks. Dissertation ETH Zürich. Zürich, 1979.

NELSON, R. F. (1983): Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.

PILON, P. G.; HOWARTH, P. J.; BULLOCK, R. A. (1988): An enhanced classification approach to change detection in semi-arid environments. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1988.

REMOTE SENSING LABORATORIES (RSL); EIDG. FORSCHUNGSANSTALT WSL (2003): Pilotprojekt LB-SNP 2000. Teilprojekt B: Digitale, automatisierte Auswerteverfahren. Schlussbericht. Zürich, Birmensdorf, 2003.

SCHEURER, T. (2000): Geschichte der botanischen Forschung und Dauerbeobachtung im Schweizerischen Nationalpark. In: Nationalpark-Forschung in der Schweiz Nr. 89 2000. Hrsg.: Forschungskommission des Schweizerischen Nationalparks und Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Zernez, 2000.

SCHLEGEL, J. (1985): Allerlei Interessantes und Erstaunliches über die Bergföhre. In: Bündnerwald 38 (4).

SCHMIDT, R. (2000): Untersuchung des Bildanalysesystems eCognition. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung der Universität Hannover. Hannover, 2000.

SCHÜTZ, M.; KRÜSI, B. O.; ACHERMANN, G.; GRÄMIGER, H. (1998): Zeitreihenanalyse in der Vegetationskunde: Analyse und Interpretation von Einzelflächen am Beispiel von Daten aus dem Schweizerischen Nationalpark. Botanica Helvetica 108/1.

SCHÜTZ, M.; KRÜSI, B. O.; ACHERMANN, G.; MOSER, B.; LEUZINGER, E.; NIEVERGELT, B. (1999): Langzeitwirkung des Rothirsches auf räumliche Struktur, Artenzusammensetzung und zeitliche Entwicklung der Vegetation im Schweizerischen Nationalpark seit 1917. Beitrag Jagd- und Wildforschung 24.

SCHÜTZ, M.; WILDI, O.; KRÜSI; B. O.; MÄRKI, K.; NIEVERGELT, B. (2000): Von Lägerfluren zu Föhrenwäldern: Einnischungsmuster von 121 Pflanzenarten in einem 585 Jahre dauernden Regenerationsprozess. In: Nationalpark-Forschung in der Schweiz Nr. 89 2000. Hrsg.: Forschungskommission des Schweizerischen Nationalparks und Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Zernez, 2000.

SCHÜTZ, M.; KRÜSI, B. O. (2001): Geht die Kuh, kommt der Hirsch. Schalenwild kann die Artenvielfalt von subalpinen Weiden erhalten. In: HOTSPOT - Biodiversität in Berggebieten. Ausgabe 4 vom 04.11.01. Forum Biodiversität Schweiz, SANW. 2001.

SCHWEINGRUBER, F. H. (1993): Jahrringe und Umwelt - Dendroökologie, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Birmensdorf, 1993.

SIGMAPLAN; METRON; METEOTEST (1994): Landschaft unter Druck. 1. Fortschreibung. Hrsg.: Bundesamt für Raumplanung und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern, 1994.

SIGMAPLAN; METRON; METEOTEST (2001): Landschaft unter Druck. 2. Fortschreibung. Hrsg.: Bundesamt für Raumplanung und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern, 2001.

SINGH, A. (1986): Change detection in the tropical forest environment of northeastern India using Landsat. In: Remote Sensing and Tropical Management. Hrsg.: Eden, M. J.; Parry, J. T.. Wiley & Sons. New York, 1986.

SINGH, A. (1989): Digital change detection techniques using remotely-sensed data. In: International Journal of Remote Sensing. Nr. 6. 1989.

STAFFELBACH, H. (2001): Aussichten im Schweizerischen Nationalpark. Werd Verlag. Zürich, 2001.

STAGL, W. (2000): Arten von Wildschäden. Online Publikationen. Bundesamt und Forschungszentrum für Wald. www.fbva.at. (03.07.2003).

SUTER, W.; SUTER, U.; KRÜSI, B. O.; SCHÜTZ, M. (2003, unveröffentlicht): Spatial variation of summer diet of red deer Cervus elaphus in the eastern Swiss Alps. Birmensdorf, 2003.

TSCHUDIN, M. (1994): Nationalpark. in “Schweizer Naturschutz” Spezial. Ausgabe 3, 1994. Hrsg.: Schweizerischer Bund für Naturschutz (SBN), 1994.

WEIERS, S.; MIELBY, S.; GROOM, G.; STJERNHOLM, M; WISSEN, M; BOCK, M.; SCHADE, B; TSCHACH, E. (1999): Monitoring of Changes in Biotope and Land Use Inventory in Denmark and Schleswig-Holstein by Means of Satellite Image Analysis and GIS Technology. Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein. Köln, 1999.

WEISMILLER, R. A.; KRISTOF, S. J.; SCHOLZ, D. K.; ANUTA, P. E.; MOMIN, S. A. (1977): Change detection in coastal zone environments. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.

VERSTAPPEN, H. Th. (1977): Remote sensing in geomorphology. Amsterdam, 1977.

YUAN, D.; ELVIDGE, C. D.; LUNETTA, R. S. (1999): Survey of Multispectral Methods for Land Cover Change Analysis. In: Remote Sensing Change Detection - Environmental Monitoring, Methods and Application. Hrsg.: Lunetta, R. S.; Elvidge, C. D.. Taylor & Francis Ltd.. London, 1999.

ZIMMERMANN, B. (1990): Wechselwirkungen zwischen alpinen Rasen und freilebenden Huftieren im Schweizerischen Nationalpark: Produktion, Konsumation, Selektivität. Diplomarbeit am Institut für Systematische Botanik, Universität Zürich. Zürich, 1990.

Internet

www.swisstopo.ch/de/image/LBcalib.html (10.02.2002)

www.swisstopo.ch/de/image/FDplane.html (02.07.2003)

www.geo.unizh.ch/nationalpark/gis/daten/grundd/dtm_b.html (05.12.2002)

www.definiens.com (10.05.2003)

www.pronatura.ch (21.03.2003)

www.wsl.ch/land/products/lfi/spaziergang/spaz2.html (15.08.2001)

Anhang

Der Schweizerische Nationalpark

Vorbemerkung

Allgemein

Geschichte

Klima

Geologie

Böden

Flora und Vegetation

Die Tierwelt

Ausblick

Der Schweizerische Nationalpark

Vorbemerkung

Der Schweizerische Nationalpark wurde durch einen Bundesratsbeschluss am 1. August 1914 offiziell gegründet (Staffelbach, 2001). Durch einen weiteren Beschluss vom 7. Oktober 1959 bestätigte man die heutigen Grenzen des Naturreservats. Der Schweizerische Nationalpark ist der Beeinflussung und Nutzung durch den Menschen entzogen. Flora und Fauna blieben also seit nunmehr fast 90 Jahren sich selbst überlassen. Sie entwickelten sich nach ihren eigenen Gesetzen. Im Park wurden seit der Gründung viele wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt, welche unter der Aufsicht der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft stehen. (Gohl et al, 1991)

Eine Absicht der Schöpfer des Nationalparkes bestand ja gerade auch darin, den Naturwissenschaftern ein grosses Natur-Laboratorium einer früher unter menschlichem Einfluss stehenden Gegend zur Verfügung zu stellen. Das sich selbst überlassene Gebiet ermöglicht Veränderungen über mehrere Generationen hinweg ungestört zu verfolgen. Nun mag es paradox erscheinen, wenn man in einem Gebiet, von welchem man aus wissenschaftlichen Gründen jeden menschlichen Einfluss fernhalten will, den Zutritt von Touristen gestattet. Um aber die Wünsche der Naturfreunde als auch die Erfordernisse der Wissenschaft zu erfüllen, konnte nur ein Teil des Parkes dem Besucher zugänglich gemacht werden. Er darf nämlich die markierten Wege nicht verlassen, und sich strikte an die Parkordnung halten. (Bach et al, 1976)

Allgemein

Wenn man in einem so stark industrialisierten und dicht bevölkerten Land wie der Schweiz grosse Wald- und Wiesengebiete finden will, welche im Laufe der Jahrhunderte nie vom Menschen beeinflusst worden sind, ist das schwierig. Sogenannte Urwälder sind sehr selten geworden. Die wenigen noch existierenden verdanken ihr Überleben ihrer isolierten Lage, ihrer Unzugänglichkeit, welche eine Bewirtschaftung verunmöglichte. Das Gebiet des Nationalparks ist davon auch nicht ausgenommen. Überall findet man Spuren von menschlicher Tätigkeit, welche über Jahrhunderte hinweg nachweisbar ist. Erst mit der Parkgründung 1914 kamen diese zum Stillstand.

Der Park liegt ein einer Höhe von über 1’700 m.ü.M.. Das Gebiet ist sehr gebirgig. Schmale, tief eingeschnittene Täler prägen das Landschaftsbild. Die höchste Erhebung ist mit 3’164 m der Piz Quattervals. Grosse Gletscher sind keine vorhanden. Jedoch sind Blockgletscher im Parkgebiet weit verbreitet. Diese Schuttmassen fliessen mit Geschwindigkeiten von bis zu einem Meter im Jahr ab. Besonders schöne Exemplare befinden sich im Val da l’Acqua und im Val Sassa. Nach verschiedenen Erweiterungen des Parkgebietes von 1914-1961 umfasst der Park heute zirka 168 Quadratkilometer. Die obere Waldgrenze liegt hier beträchtlich höher als in anderen Teilen der Schweiz. Nämlich zwischen 2’300 und 2’400 m. Von der Gesamtfläche des schweizerischen Nationalparkes sind etwa 30 Prozent (50 Quadratkilometer) von Wald be-

deckt. Die alpine Zone nimmt mehr als die Hälfte des Parkgebietes ein, nämlich etwa 100 Quadratkilometer. (Bach et al, 1976)

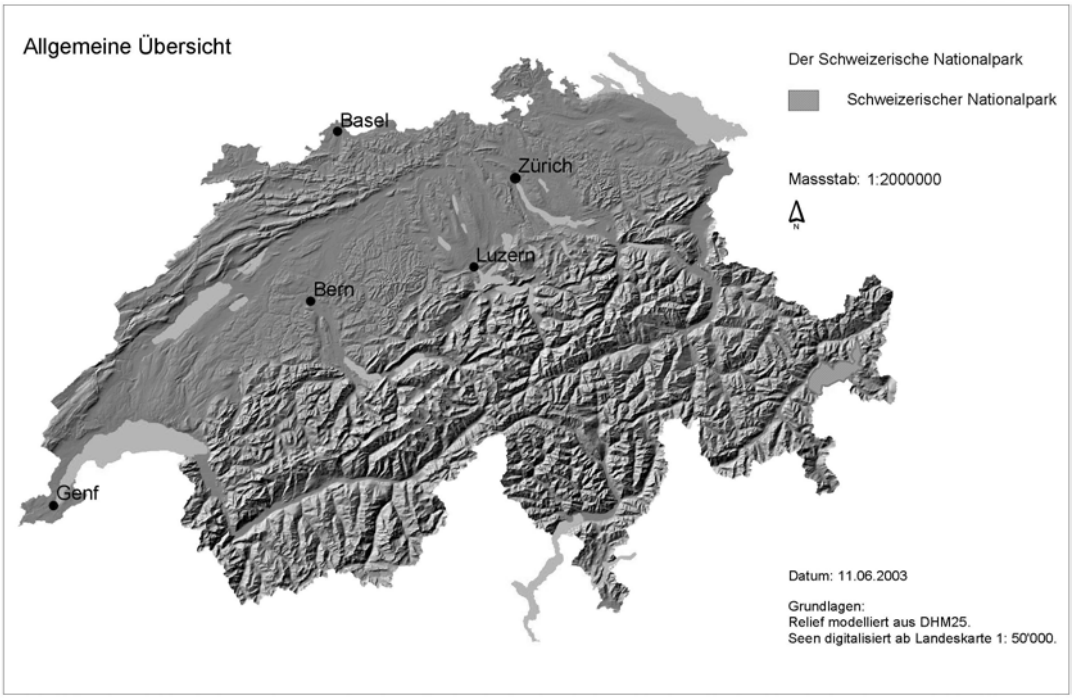


Abbildung 13.1 Allgemeine Übersicht über die Lage des Schweizerischen Nationalparks.

Geschichte

Der Ofenpass hat seit Jahrhunderten eine grosse Bedeutung. Er war der einzige leicht begehbare Übergang vom Unterengadin ins Münstertal und ins Veltlin. Die alte Strasse führte von Zernez nach Ova Spin und von dort nach Il Fuorn. Längs des Ova dal Fuorn führte sie zur Passhöhe. Diese Strasse ist auch heute noch an einigen Stellen erkennbar. Warentransporteure, Reisende und Kriegstruppen waren ständige Benutzer dieser alten Passstrasse. Vor dem Bau der Eisenbahn war der Holzbedarf der Engadiner Bevökerung gross, besonders in Form von Holzkohle. Es waren die Wälder des Fuorn-Gebietes und diejenigen des Val Ftur und von Las Crastatchas, welche der Industrie seit dem Mittelalter bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts einen schweren Tribut zollen mussten. Im 14. und 15. Jahrhundert wurden die Wälder des Unterengadins trotz heftiger Proteste der Einwohner durch die Herrscher im Tirol übernutzt. Diese brauchten das Holz für den Betrieb der Salinen in Hall, wohin es auf dem Spöl und dem Inn geflösst wurde (Schweizer Naturschutz, 1994). Im 16. Jahrhundert wurde die Übernutzung des Waldes von der Gemeinde Zernez weitergeführt. Das Holz wurde damals in das weniger holzreiche Oberengadin verkauft oder für die Fabrikation von Holzkohle verwendet. Das Vorkommen von Eisenerz im Tal von Il Fuorn auf Murteras da Grimmels und im Val Ftur und die Nähe von Flüssen, Wäldern und Verkehrswegen ermöglichte eine Ausbeutung. Es wurden Eisenbarren hergestellt. Wasserangetriebene Gebläse hielten die Holzkohle in den Hochöfen auf hoher

Temperatur damit die Erze schmolzen. Herbeigeführt wurde das Wasser oft in hölzernen Leitungen. Auch die Holzkohle wurde an Ort und Stelle fabriziert. Die Eisenminen von Buffalora wurden bereits im Jahre 1332 erstmals erwähnt. Auch in Stabelchod konnte eine frühere Giesserei nachgewiesen werden. Doch das Zentrum der Eisenverhüttung lag doch weiter unten im Tal, in Il Fuorn. (Bach et al, 1976)

Klima

Als Teilgebiet des Engadins gehört der Schweizerische Nationalpark der inneralpinen Trokkenzone an. Die jährliche Niederschlagsmenge beträgt im Mittel in den Tälern unter 1'200 mm. Mit der Niederschlagsarmut geht eine relativ geringe Bewölkung einher. In Verbindung mit der Höhenlage des Tales resultieren hohe Strahlungswerte und eine starke Schwankung der Lufttemperatur. Hohe Schwankungen der Lufttemperatur sind übrigens im täglichen sowie auch im jährlichen Verlauf festzustellen (kältestes Monatsmittel: -4 bis -10°C; wärmstes Monatsmittel: 13 bis 16°C [Angaben für Station Buffalora]). Der jährliche Gang der Niederschlagsmengen entspricht weitgehend dem mitteleuropäischen Typus: grösste Niederschlagsmengen im Juli und August, niedrigste im Januar und Februar. Für das Nationalparkgebiet wurde eine mittlere jährliche Niederschlagsmenge von 1'142 mm gemessen. Auch sehr ausgeprägt sind die tiefen Werte der relativen Luftfeuchtigkeit. Sie sinken vor allem im Frühling und Herbst oft bis gegen 10% ab. (Bach et al, 1976)

Geologie

Der weitaus grösste Teil des Schweizerischen Nationalparkes gehört zu den Engadiner Dolomiten. Sie sind ein Teil des oberostalpinen Deckensystems, des höchsten der Alpen. Nur ganz im Südwesten des Parkes erscheinen darunter die unterostalpinen Decken. Die penninischen Einheiten sind im Norden des Parkes, im Unterengadiner Fenster, unter den oberostalpinen Decken aufgeschlossen.

Die Engadiner Dolomiten sind aus metamorphen Kristallingesteinen vorpenninischen Alters einerseits und anderseits aus Sedimentgesteinen des Perm, der Trias, stellenweise auch des Jura und der Kreide aufgebaut. Die Formation, welche dem Nationalpark sein eigentliches Gepräge gibt, ist der Hauptdolomit der mittleren Obertrias. Meist sind es dickbankige, graue Dolomite, welche grosse, ausgesprochen vegetationsfeindliche Schutthalden liefern. Im Süden (Munt la Schera) sind Sandstein- und Schieferformationen der Trias vorhanden. Sie liefern das Ausgangsmaterial für die relativ seltenen Silikatböden des Schweizerischen Nationalparkes. (Labhart, 1998)

Böden

Im Schweizerischen Nationalpark besteht das Muttergestein für die Bodenbildung grösstenteils aus karbonatreichen Sedimenten. In Kapitel Geologie war von Dolomit die Rede. In Moränen, Schottern und im Hangschutt gibt es gemischte Ablagerungen aus Silikaten und Karbonaten. Rein silikatisches Material ist dagegen nur wenig verbreitet. Die Zeitdauer, die für die Bodenbildung zur Verfügung gestanden hat, reicht im Nationalpark maximal bis zur letzten Eiszeit zurück. Das Relief und das Klima verursachten aber eine starke Erosion. Durch die Be-

wirtschaftung, besonders den Kahlschlag und die übermässige Beweidung, wurde dieser Prozess noch verstärkt. Die meisten Böden sind deshalb ziemlich jung.

Da der Dolomit mit vielen feinen und groben Klüften durchsetzt ist, spielt die Frostverwitterung eine grosse Rolle. Kälte und Trockenheit hemmen den Abbau von pflanzlichem Material. Somit steigt der Gehalt an organischer Substanz des Bodens. Die Streu von Nadelbäumen und Zwergsträuchern, auch unter günstigen Bedingungen schwer abbaubar, wird im Nationalpark auf Dolomit auf der Bodenoberfläche angehäuft und bildet mit der Zeit eine immer mächtiger werdende Auflage von Rohhumus. In den Dolomitböden des Nationalparkes lässt sich kein eigentlicher Anreicherungshorizont (Karbonat) feststellen. Doch kann Karbonat, das im Obergrund gelöst worden ist, im Untergrund wieder ausgeschieden werden. Die Dolomitböden haben deshalb gewöhnlich ein A-C-Profil. Ihr Profil besteht also nur aus einem Humushorizont, der allmählich ins Muttergestein übergeht. Im Gegensatz zu den Karbonatböden gibt es im Schweizerischen Nationalpark auch noch die Silikatböden. Diese sind auf dem silikatischen Muttergestein am Munt la Schera verbreitet. Diese Böden weisen sauren Charakter auf. Da der anstehende Fels wenig wasserdurchlässig ist, sind die Böden darauf oft vernässt. Die Streu von Nadelbäumen, Zwergsträuchern und Moosen bilden eine Rohhumusauflage. Die Mächtigkeit hängt nicht zuletzt vom ph-Wert des Gesteins ab. Je saurer das Gestein, desto mächtiger die Rohhumusauflage. Die sauren Humusstoffe werden zum Teil in die Tiefe gespült und mit ihnen auch Basen wie etwa Aluminium und Eisen. Der Oberboden verarmt an diesen Stoffen und verliert dabei die braune Farbe. Im Profilmittelteil werden diese Stoffe wieder ausgefällt und bilden einen rotbraunen Sesquioxyd-Humus-Anreicherungshorizont (Bs). Dieser geht allmählich ins silikatische Muttergestein (C) über. Im Laufe der Zeit entwickeln sich aus den Humussilikatböden Podsole. Podsole unterscheiden sich durch stärkere Humusverlagerung von den Humussilikatböden. (Bach et al., 1976)

Flora und Vegetation

Die Trockenheit und die Temperaturextreme spiegeln sich in der Vegetation des Schweizerischen Nationalparkes und dessen angrenzenden Tälern wieder. Es fehlen zum Beispiel die Weisstanne und die meisten mesophilen Laubhölzer (Buche, Ulme, Eiche, Winterlinde). Laubhölzer sind im Schweizerischen Nationalpark sehr schwach vertreten. Nur gerade 1 % der gesamten Waldfläche besteht aus Laubbäumen (Staffelbach, 2001). Selbst die Fichte mag sich nur in luftfeuchteren Schattenhängen zu entfalten. Die Charakterbäume des Schweizerischen Nationalparks sind die Föhren, die Lärche und die Arve. (Gohl et al, 1991)

Das engere Parkgebiet reicht nirgends bis in die montane Stufe herunter. Trotzdem finden sich von der Steppenvegetation der Tieflagen einige Ausläufer bis nach Buffalora. Diese Vorkommen sind jedoch anthropogen bedingt. Oberhalb der montanen Stufe liegt die subalpine Stufe. Diese ist im Parkgebiet in zwei übereinanderliegende Teile gegliedert. Der untere Teil umfasst die Höhenlagen von 1’450 m - 1’900 m. Die obere subalpine Stufe reicht von 1’900 m bis zur Waldgrenze, welche ungefähr bei 2’200 m liegt. Die Abbildung 13.2 vermittelt einen Überblick über die Verbreitung der wichtigsten subalpinen Nadelwaldgesellschaften im Schweizerischen Nationalpark. Daraus wird ersichtlich, dass sich unabhängig von der geologischen Unterlage in ca. 1’900 m.ü.M. ein deutlicher Wechsel in der Vegetation vollzieht. Auf Silikatgestein wird das Piceetum subalpinum der unteren subalpinen Stufe abgelöst vom Rhodoreto-Vaccinietum (Lärchen-Arvenwald). Das Mugeto-Ericetum (Erika-Bergföhrenwald) bedeckt die grössten Flächen des Parkgebietes. Diese über Karbonatgestein vorkommende Waldgesellschaft ist hinsichtlich Exposition und Höhenlage weitgehend unabhängig. Besonders eindrücklich sind die grossflächigen Wälder im Ofenpassgebiet. Die Bergföhren erreichen dort eine Höhe von 8 - 15 Metern. An sonnigen Hängen reicht aber auch das Pineto-Caricetum humilis (Zwergseggen-Engadinerföhrenwald) bis in 1’900 Meter hinauf. Schattige Hänge von 1’900 m - 2’200 m sind von Mugeto-Rhodoretum hirsuti (Steinrosen-Bergföhrenwald) be-

wachsen (Bach et al., 1976). Die durch Schneedruck oft sichelwüchsige Bergföhre im Steinrosen-Bergföhrenwald erreicht eine Höhe von 10 - 15 Meter.

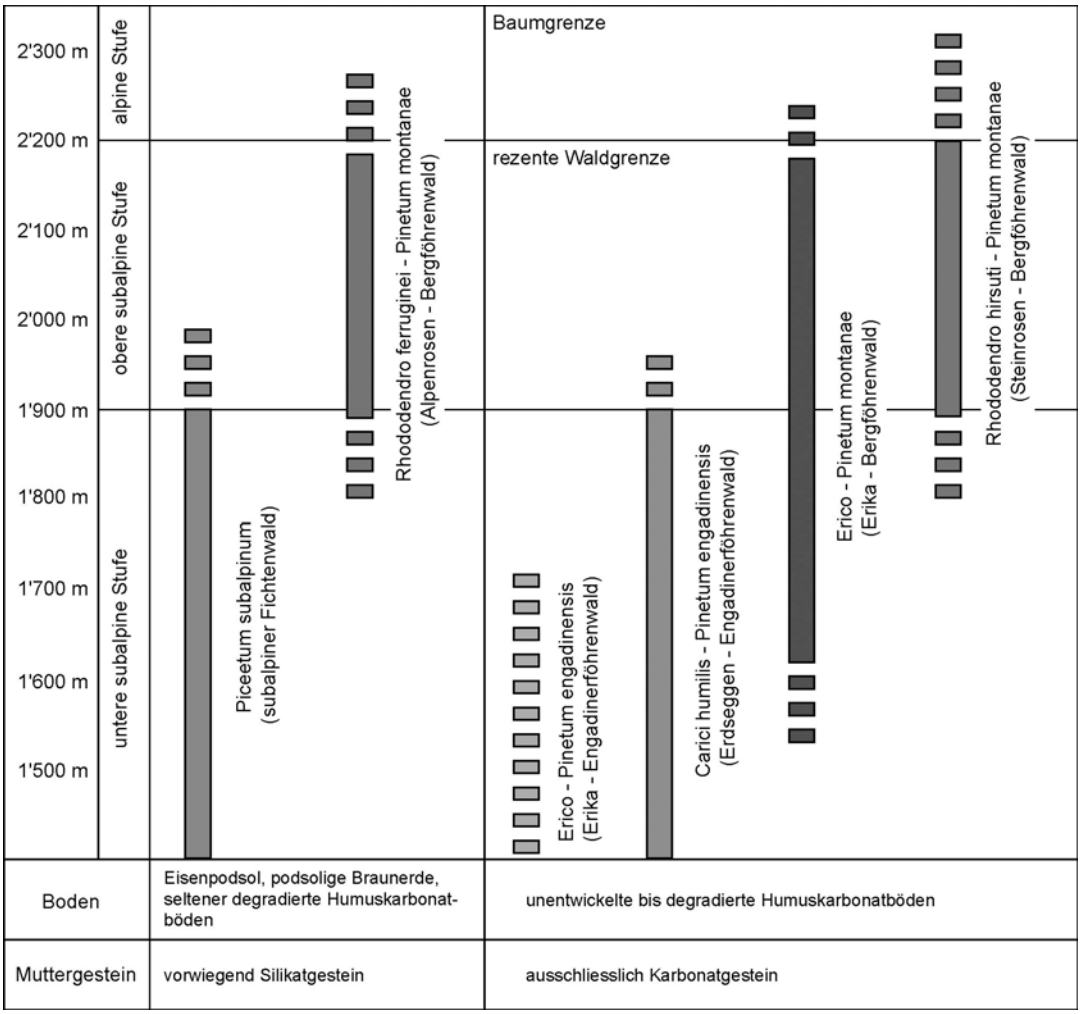


Abbildung 13.2 Übersicht über die Waldgesellschaften im Schweizerischen Nationalpark. Quelle: Bach et al., 1976 (abgeändert).

Die Tierwelt

Die Säugerfauna im Parkgebiet entspricht weitgehend derjenigen der übrigen alpinen und hochalpinen Stufe. Vier grössere Arten, nämlich Bär, Wolf, Luchs und wahrscheinlich auch Wildkatze, sind im 19. oder anfangs des 20. Jahrhunderts ausgerottet worden. Eine ebenfalls ausgerottete Art, der Steinbock, konnte seit der Parkgründung erfolgreich wiederangesiedelt werden (Gohl et al., 1991). Die Rückkehr des Bartgeiers anfangs der 90-er Jahre war eine Erfolgsstory. Dank langjähriger, wissenschaftlich begleiteter Vorarbeit gelang die Wiederansiedlung schon beim ersten Anlauf (Schweizer Naturschutz, 1994). Bei der Parkgründung wurde

im Gebiet kein einziger Rothirsch mehr festgestellt. Durch stetige Einwanderung aus dem angrenzenden Ausland besiedelte sich das Parkgebiet mit dem Rothirsch. Der Rothirsch ist aber nur Sommergast im Schweizerischen Nationalpark. Mitte Oktober wandern die meisten Tiere in tiefere Lagen ab. Ein anderes Huftier, welches im Park vorkommt ist die Gemse. Ihr Bestand hat sich seit dem Bestehen des Parkes am geringsten verändert. Er schwankte beständig zwischen 1'000 und 1'300 Tieren. Neben den Huftieren kommen aber natürlich auch Raubtiere vor. Zahlreich vertreten sind Fuchs, Baum- und Steinmarder und Hermelin. Selten kommt der Dachs vor. 1972 setzte eine Naturschutzgruppe widerrechtlich einen Luchs im Parkgebiet aus. Doch wanderte dieses Tier kurzerhand tiefer ins Unterengadin ab. Das Murmeltier ist der charakteristischste Nager des Alpenraumes. Auch im Nationalpark lebt ein gefestigter Bestand an Murmeltieren. Die Wälder und Matten bieten vielen Mausarten einen Lebensraum. Auch Fledermäuse sind besonders bei Il Fuorn zu beobachten. Die Artenvielfalt an Vögeln ist bemerkenswert. Einige sollen hier erwähnt sein: Steinadler, Bartgeier, Sperber, Auerhahn, Birkhuhn, Rauhfusskauz, Buntspecht, Kleiber, u.v.m.. Der Bestand an Reptilien und Lurchen ist im Park gering. Dies hängt hauptsächlich mit dem rauhen Klima zusammen. Im Park leben Kreuzotter, Bergeidechse, Grasfrosch und Alpenmolch. Der Wanderer erfreut sich vielmehr an den zahlreichen Insekten- und Schmetterlingsarten, welche sich im Nationalpark tummeln. (Bach et al., 1976)

Abbildung 13.3 *Übersicht über einige Tierarten, welche im Schweizerischen Nationalpark einen Lebensraum gefunden haben. Von links nach rechts: Rothirsch (Cervus elaphus), Steinbock (Capra ibex), Rotfuchs (Vulpes vulpes), Steinadler (Aquila chrysaetos), Bartgeier (Gypaetus barbatus).*

Ausblick

Ein Totalreservat wie der Schweizerische Nationalpark ist von grosser Bedeutung. Besonders in einer Zeit, wo viel um die Erhaltung unserer Umwelt diskutiert wird. Im Nationalpark finden Tiere und Pflanzen ein Rückzugsgebiet. Hier sehen die Menschen, wie sich eine Landschaft ohne beträchtliche Eingriffe entwickelt. Besonders für die Wissenschaft ist der Schweizerische Nationalpark wichtig: Eine besondere Kommission befasst sich mit der Erforschung dieser Unterengadiner Bergregion, die im Grunde ein ausgedehntes Freiluft-Labor darstellt.

Braucht es weitere Nationalparks in der Schweiz?

Vor einigen Jahren inizierte Pro Natura die Kampagne: "Gründen wir einen neuen Nationalpark!" (www.pronatura.ch, 2002). Auf diesen Aufruf hin meldeten sich Vereine verschiedener Gebiete aus unterschiedlichen Teilen der Schweiz. Bei dieser Kampagne war das oberste Ge-

bot, dass die ansässige Bevölkerung die treibende Kraft für die Schaffung eines Grossschutzgebietes sein sollte. Bei einigen Gebieten war aber genau diese Forderung das Problem und so verliefen einige Pläne im Sand. Dann nahm sich das Nationalfondsprojekt 48 (NFP48) der Problematik an. Eine interdisziplinäre Forschungsgruppe um den Politikwissenschafter Dr. Erwin Rüegg behandelt aktuell das Thema: How to turn alpine landscapes into an asset of development? In dieser Forschungsgruppe sind auch Dr. Frohmut Gerheuser (Soziologe) und Hans-Dietmar Koeppel (Landschaftsplaner) involviert. Die Forschung setzt beim Willen der örtlichen Bevölkerung an. Wie kann nämlich die lokale Bevölkerung das "Spektakel der Alpen" als Ressource nutzen?. Dabei geht es nicht um jene Regionen, welche auf den Massentourismus setzen. Es geht um die Regionen, welche diese Möglichkeit nicht haben, oder solche Investitionen einfach nicht aufbringen können. Die Entwicklung soll nachhaltig und eigenbestimmt sein und der Eigenheit der alpinen Landschaft gerecht werden. Das ist die forschungsleitende Aussage. Das Projekt fragt nach institutionellen Voraussetzungen, welche die potentiellen Gebiete mobilisieren können, um lebensfähig zu bleiben. Dabei werden zwei Ebenen besonders betrachtet:

a) die endogenen Faktoren der lokalen und regionalen Selbstorganisationsfähigkeit und

b) die fördernden bzw. hindernden Rahmenbedingungen für eine solche Entwicklung.

Im NFP48 werden insgesamt 6 Untersuchungsgebiete betrachtet. Es sind dies: Adula/Rheinwaldhorn, Entlebuch, Locarnese, Maderanertal, Säntis/Schwägalp und Parc jurassien vaudois.

In diesen Gebieten sind die treibenden Kräfte, welche hinter der Schaffung eines Grossschutzgebietes respektive Nationalparks stehen, ziemlich gross. Es ist also nicht illusorisch zu sagen, dass es in einem oder mehreren dieser Gebiete in naher Zukunft zu einer Parkgründung kommen wird. Zumal auch mit der Revision des Natur- und Heimatschutzgesetzes (NHG) die rechtlichen Grundlagen für Schutzbestrebungen geschaffen werden.